

兵庫県南部地震の実被害データに基づく
建物被害評価に関する研究

Study on Building Damage Estimation based on the Actual Data
due to the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake

村尾 修

1999年11月

東京大学生産技術研究所
耐震防災工学研究室

はじめに

本研究報告は、1999年12月に東京大学において博士（工学）として認められた学位論文「兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究」の全文と、国際会議等で英語で発表された関連論文を掲載したものである。

1995年1月17日午前5時46分、成人の日を含む3連休が明け、いつもと変わらぬ平日の朝を迎えようとしていた矢先に、兵庫県南部地震が都市を襲った。私が現地を訪れたのは、それから約1ヶ月ほどしてからのものであった。被災地は地震直後よりはやや落ちつきを取り戻しているものの、見慣れた神戸の風景からはほど遠く、道路は渋滞し、街は瓦礫の撤去に追われていた。現地入りして間もなく、私は、一人の少年が倒壊した木造家屋の瓦礫の前で線香を上げているのを見た。恐らく倒壊により家族を失ったのだろう。初めて目の当たりにした地震による悲惨な現状を嘔み締めながら、「自分に何が出来るだろうか」と自問しながらも、答を見つけられずに、数日の間歩き続けたことを今でも生々しく覚えている。

あれからちょうど5年の月日が流れた。防災都市計画研究所と早稲田大学理工総研の災害情報センターでの1年半、東京大学生産技術研究所に来てからの3年半、私にとってのこの5年間は、多くの方々に大変貴重な体験をさせていただいた期間であった。本報告書は、長かったようでもあり、一瞬のこのようでもあったこの5年間の、私のひとつの「かたち」である。多くの方々に支えられたこの5年間の貴重な体験により、当時見つけられなかった「自分に何が出来るだろうか」という問いに対する自分なりの答あるいは方向性が見えてきた気がする。

昨年も、台湾、トルコなどで地震が発生し、多くの方々が亡くなられた。研究をするにあたり、多くのデータを取り扱うことがあるが、当然のことながら、それらは単なる記号ではなく、その数字の裏には人間ひとりひとりの人生あるいは社会背景など忘れてはいけない大切な意味がある。博士の学位を授けられた今、数字の意味を十分に認識し、被災地を初めて歩いた時の初心を忘れることなく、責任ある一研究者としてこれからも研究を続けていきたいと思う。

多くの方々の御支援・御指導のもと、学位論文をこのようなかたちでまとめることが出来た。特に東京大学の山崎文雄先生、藤野陽三先生、小出治先生、中埜良昭先生、目黒公郎先生、そして横浜国立大学の村上處直先生らには、主査・副査として多大なる助言をいただいた。また被災地域である尼崎市、伊丹市、宝塚市、西宮市、芦屋市、神戸市、明石市、北淡町役所の方々には、建物被害データを提供していただくと同時に、建物被害調査の研究に関して協力をしていただいた。心より感謝したい。

博士論文を書き終えた今、兵庫県南部地震により亡くなられた多くの方々のご冥福を祈るとともに、被災地の更なる復興を願う次第である。

2000年1月
村尾 修

論文の内容の要旨

論文題目： 兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究

氏 名： 村尾 修

本論文では、兵庫県南部地震により被害を受けた建物データを用いて、建物被害評価に関する研究を行い、かつ防災環境都市デザイン手法 MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design) を提案し、本研究成果を用いた防災的観点からの将来的な都市ビジョンを示した。

各自治体で所有している建物データを用いて、地域の建物倒壊危険度を評価し、建物被害推定等を行うことは、都市の防災対策をする上で極めて重要である。本研究ではそれらに必要な建物被害関数および建物倒壊危険度評価法を構築するために図-1 に示すような過程で検討を行った。

まず、本研究で主として用いた神戸市の建物被害データの位置付けを明確にするため、兵庫県南部地震におけるいくつかの建物被害調査を比較検討し、問題点を浮き彫りにし、今後大地震が発生した時にそれらの問題点が解消されるような調査票を提案した。また調査法が異なる場合の建物被害評価変換法を提案した。そして神戸市の建物被害データを用いて兵庫県南部地震による建物被害を分析し、建物構造や建築年代によって異なる建物被害の傾向を明らかにした。次に、地震動観測記録が限られていたために不十分であった兵庫県南部地震における地震動分布を、上記建物被害データと微地形分類を用いて詳細に推定し、構造・建築年代別の建物被害関数を構築した。さらにこの被害関数を基にして信頼性解析を用いた建物倒壊危険度評価法を提案した。最後に本研究の成果である建物被害関数や建物倒壊危険度評価法等を都市デザインに適用するために、防災環境都市デザイン手法 MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design) を提案した。

以下に本研究の成果を要約して示す。

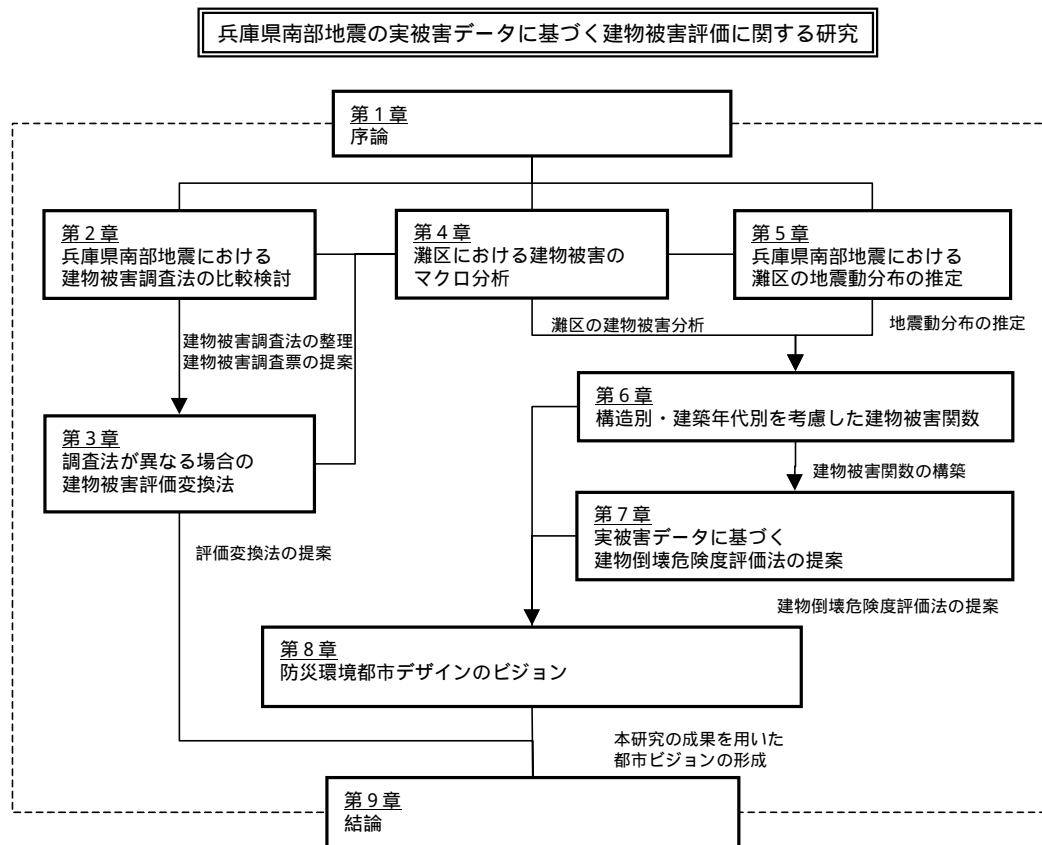


図-1 本論文の研究フロー

第1章では、兵庫県南部地震の概要を含む本研究の背景を述べ、本研究の目的と位置付けを示した。次に、建物被害調査法、建物被害分析、兵庫県南部地震における地震動分布推定、建物被害関数、建物被害想定および危険度評価、そして都市デザインと防災都市計画など本研究に関連した各項目に関する既往の研究について概観した。最後に本研究の構成と内容を説明した。

第2章では、自治体という公的な立場からの建物被害評価法を提案するために、兵庫県南部地震後に実施された建物被害調査の内容を整理・分析した。各自治体で行われた調査は国の統一基準に基づいてはいるが、大災害を想定した調査法が確立されていなかったため、自治体ごとに調査内容が異なり、同じ判定結果であっても「全壊」や「半壊」等の用語の定義が異なることが分かった。また自治体による調査は学会等による調査とは異なり、建物内部も考慮したものであり、判定結果に大きな影響を与えていた。さらに自治体による調査は建物を資産価値として評価するという趣旨で行われるため、建築コストとの比較も行った。以上の結果をふまえ、資産価値を評価する自治体という公的な立場からの建物被害調査票を提案した。

第3章では、兵庫県南部地震で被害を受けた芦屋市の約12,000棟の建物を対象として、自治体と震災復興都市づくり特別委員会（以下、震特委員会）による建物被害調査の判定結果を比較した。その結果、全体としては芦屋市の全壊判定は震特委員会調査の中破以上、芦屋市の全半壊判定は震特委員会の軽微な損傷以上にほぼ等しいことがわかった。また判定結果と推定地震動との関係を調べた結果、地震動の大きさが2調査による被害判定結果の違いに影響を与えていることがわかった。以上の分析により、自治体による資産的評価を重視した建物被害調査の判定結果を、震特委員会の調査に基づく被害判定へと変換する評価法を提案した。

第4章では灘区における建物被害のマクロ分析を行った。その結果、構造別の全半壊率はレンガ造が最も高く、続いて木造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄骨造、軽量鉄骨造、コンクリートブロック造、鉄筋コンクリート造の順であった。各構造ごとの建築年代および建築年別の被害率は、どの構造においても、一部の例外を除いて建築年代が新しいほど小さくなる傾向が見られた。また耐震基準の改正による影響も見られた。建物の階数別の被害分析では、鉄骨造、鉄筋コンクリート造とも高層になるほど被害率が高かった。木造建物の屋根別の被害は、どの建築年代においても重量の大きい瓦葺きが最も大きく、軽いスレート葺きが最も小さかった。GISを用いた灘区の建物被害分析を行った結果、どの構造においても、全壊率の高い地域はいわゆる「震災の帯」上に広がっているという傾向が確認された。また全壊率の高い地域で死者発生率も高いという傾向が見られた。木造建物の被害率と微地形（土地条件）との関係を調べた結果、台地・段丘上では上位面、低位面、浅い谷の順に、また沖積低地においては扇状地、緩扇状地、海岸平野・三角州の順に、木造建物の全半壊率（とくに全壊率）が大きかった。このことから表層の地盤条件の違いが建物の全半壊率に大きく影響していることが窺われた。

第5章では、兵庫県南部地震後に震特委員会等が調査を行い、建設省建築研究所がまとめた建物被害データを用いて推定した地震動分布と、神戸市により実施された調査に基づく建物被害データを用いて、構造・建築年代を考慮した建物被害関数を求めた。この被害関数を用いて、灘区における地震動分布を再推定した。木造建物の建築年代ごとの被害関数から推定された地震動を比較検討することにより、建築年代ごとの棟数分布が地域によって異なることの影響を取り除くことができ、町丁目ごとの微地形も考慮した精度の高い地震動を推定することができた。

第6章では、神戸市によって実施された兵庫県南部地震による灘区の建物被害データと、第5章で推定した詳細な地震動分布を用いて、構造別および建築年代別の建物被害関数を構築した。

構築された構造別の建物被害関数では、木造の被害は小さい地震動から発生し始め、かつどの最大速度値においても他の構造に比べて被害率が高くなるのに対し、RC造は高い地震動になっても被害率が低かった。また建築年代別では、木造以外の全てにおいて古い建物ほど小さい地震動で被害率が上がり始め、それぞれの地震動においても新しい建物より高い被害率を示した。これらと同様の傾向は、第4章の建物被害分析の結果からも見られた。木造に関しては、基本的にそれぞれのPGVにおいて古いものほど高く、新しいものほど低い被害率となっていたが、古い3曲線は120 cm/sを超えたあたりからほとんど重なってしまっていた。また、本章の中で詳細な地震動分布を用いて構築された建物被害関数と、第4章で構築した建物被害関数とを町丁目ごとの実被害を用いて比較した。その結果、本章により、建物被害関数の精度が向上したことが確認された。

第7章では、東京都の建物倒壊危険度の手法を神戸市灘区に適用して、兵庫県南部地震による建物被害との比較を行った。その結果、建物棟数密度が大きく建物倒壊危険率に影響していることがわかった。次に、地域の被災ポテンシャルを表す指標は、その地域での地盤条件を含めた建物倒壊の危険率であると考え、建物倒壊の危険度を地震発生時の全壊率に対応する指標として、信頼性解析に基づく評価式を構築した。ここで提案した新建物倒壊危険度は、ある地域の建物存在比率と建物および地盤から決定されるマトリクスタイプの危険性ウェイトから求められるもので、灘区の実被害と比較した結果、強い相関が確認された。この評価式を用いて各地域の地域特性を含んだ新建物倒壊危険度を算定することができる。最後にここで提案した評価式を用いて東京都の新建物倒壊危険度を評価した。その結果、東京都の方法では支配的要因であった建物棟数密度の影響を取り除き、建物強度や地盤の

影響を考慮した新建物倒壊危険度を評価することができた。

第8章では、Lynch, Kevin の「都市のイメージ」という考え方を参考にして、都市を生態的に見立てて、21世紀に向けた防災的・環境的な観点からの都市解析およびデザイン手法（図-2）を提案した。この手法を防災環境都市デザイン手法 MUSE（The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design）と名づけた。MUSE とは、ある都市をひとつの閉じた有機的な系に見立て、8種の物的要素に分類し、都市の様相を可視化することにより、それぞれの要素あるいは要素間相互の関係性から都市を解析し、設計およびシミュレートするための手法である。この8種の要素は「主体」、「形態要素」、「ウェブ」、「自然」の4種に大きく分類され、「形態要素」はさらに5つの要素（パス、エッジ、セル、ヴォイド、コア）に分類される。またひとつの地域を仮想的に閉ざすために準要素として「仮想壁」を想定している。この手法を用いた将来的なビジョンを描いた。

第9章では、本研究の全体内容を統括し、本研究で得られた成果を要約した。

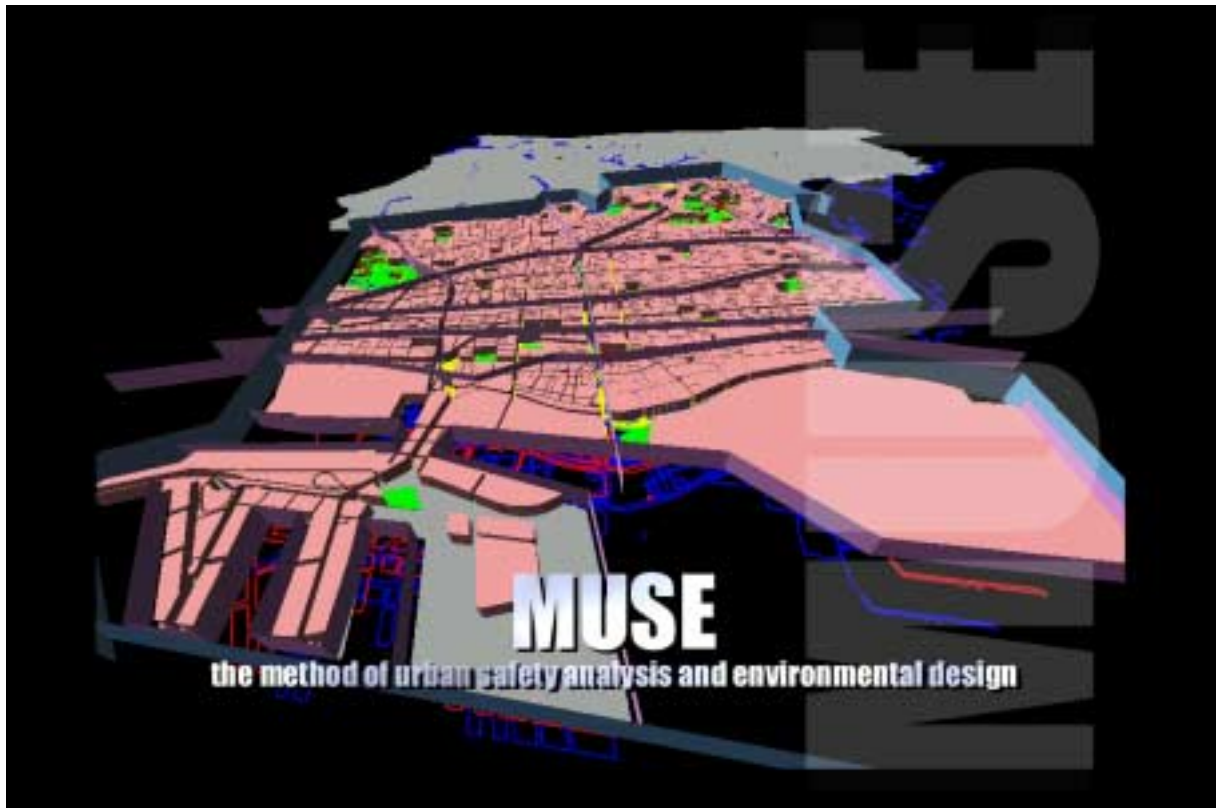


図-2 都市空間をいくつかの物的要素に分類し、本研究の成果である建物倒壊危険度等を用いた MUSE（The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design）の全体イメージ

著者略歴

生年月日：1965年6月20日

神奈川県横浜市出身

- 1978.4 駒場東邦中高等学校入学
- 1984.3 駒場東邦中高等学校卒業
- 1985.4 横浜国立大学工学部建設学科入学
- 1989.3 横浜国立大学工学部建設学科卒業
卒業設計テーマ：“Kawasaki nouvelle vague”（指導教官：山田弘康 教授）
- 1990.4 横浜国立大学大学院工学研究科計画建設学専攻・前期課程入学
- 1992.3 横浜国立大学大学院工学研究科計画建設学専攻・前期課程修了
修士論文テーマ：“安藤忠雄の建築空間特性及び動線に沿った展開に関する研究”
（指導教官：村上處直 教授）
- 1992.4 横浜国立大学大学院工学研究科計画建設学専攻・後期課程進学
- 1995.3 横浜国立大学大学院工学研究科計画建設学専攻・後期課程単位取得後退学

この間

- 1990.7-8 ヴァージニア工科大学サマーセミナーに参加（建築都市設計）
- 1991.7-8 ”
- 1992.7-8 ”

- 1994.4-1996.11 浅野工学専門学校非常勤講師（建築意匠，構造力学）
- 1995.4-1996.11 (株)防災都市計画研究所
- 1996.4-1996.11 早稲田大学理工学総合研究センター研究員
- 1996.11- 東京大学生産技術研究所助手
現在に至る

著者研究業績一覧

査読論文（邦文学会誌）

- 1) 村尾修・山崎文雄：兵庫県南部地震における建物被害調査の比較，第10回日本地震工学シンポジウム，pp.3229-3234，1998.
- 2) 村尾修・山崎文雄：兵庫県南部地震における建物被害の自治体による調査法の比較検討，日本建築学会計画系論文集，No.515，pp.187-194，1999.
- 3) 村尾修・山崎文雄・目黒公郎：芦屋市をモデルとした兵庫県南部地震による建物被害評価の変換法，日本建築学会計画系論文集，No.519，pp.203-210，1999.
- 4) 村尾修・山崎文雄：構造・建築年を考慮した建物被害データに基づく灘区の地震動分布の再推定，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.141-148，1999.
- 5) 村尾修・山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，No.527，pp.189-196，2000.
- 6) 村尾修・田中宏幸・山崎文雄・若松加寿江：兵庫県南部地震の被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案，日本建築学会構造系論文集，No.527，pp.197-204，2000.

国際会議論文

- 1) Murao, O., Tanaka, H., and Yamazaki, F., (1999). "Comparison of Building Collapse Risk and Actual Building Damage due to the 1995 Kobe Earthquake," *Proceedings of the 6th Japan/United States Workshop on Urban Earthquake Hazard*, pp.95-98, Kobe, Japan.
- 2) Murao, O., and Yamazaki, F., (1999). "Development of Fragility Curves for Buildings Based on Damage Data due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake," *Proceedings of the Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications*, 259-269, Taipei, Taiwan.
- 3) Tanaka, H., Murao, O., and Yamazaki, F., (1999). "New Method for Building Collapse Risk Assessment based on Damage Data due to the 1995 Kobe Earthquake", *Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing*, 871-876, Hong Kong.
- 4) Murao, O., and Yamazaki, F., (1999). "Use of GIS for the Method of Urban Safety Analysis and Environmental design", *Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing*, 851-956, Hong Kong.
- 5) Murao, O., Tanaka, H., and Yamazaki, F., (2000). "Risk Evaluation Method of Building Collapse from the Experience of the Kobe Earthquake", *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*, New Zealand. (掲載予定)

国内学会講演概要

- 1) 村尾修・竹下裕明・佐土原聡・村上處直：横浜市中心部のライフラインの信頼性評価に関する研究 -都市における直下型地震を前提とした高度社会システムの構築に関する基礎的研究その1-，1991年度日本建築学大会（東北）学術講演梗概集D，日本建築学会，pp.1283-1284，1991.
- 2) 村尾修・佐土原聡・村上處直：安藤忠雄の建築空間特性及び動線に沿った展開に関する研

- 究, 1992 年度日本建築学大会(北陸) 学術講演梗概集 F, pp.1299-1300, 1992.
- 3) 村尾修・佐土原聡・村上處直: 阪神・淡路大震災を教訓とした防災都市構造計画のあり方に関する考察, 1995 年度日本建築学大会(北海道) 学術講演梗概集 F-1, pp.413-414, 1995.
 - 4) 村尾修: 防災都市構造計画に関する研究その 1-都市の地形と人口規模との関係-, 1995 年地域安全学会論文報告集, pp.411-418, 1995.
 - 5) 相馬仁・村尾修・佐土原聡・村上處直: 自治体における地震災害対応 GIS(地理情報システム)のあり方に関する研究, 1996 年度日本建築学大会(近畿) 学術講演梗概集 F1, pp.189-190, 1996.
 - 6) 村尾修: 災害情報データベースの活用可能性に関する研究その 1-事故災害発生サイクルに関する研究-, 1996 年地域安全学会論文報告集, pp.397-404, 1996.
 - 7) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震における灘区の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会論文集, pp.1261-1264, 1997.
 - 8) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震による灘区の建築物被害マクロ分析, 1997 年度日本建築学大会(関東) 学術講演梗概集 F-1, pp.829-930, 1997.
 - 9) 村尾修・山崎文雄: 防災マニュアル作成に関する考察, 1997 年地域安全学会論文報告集, 地域安全学会, pp.416-421, 1997.
 - 10) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震における北淡町の建物被害分析, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.367-370, 1997.
 - 11) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震による建物被害判定の比較 -芦屋市をモデルケースとして-, 1998 年度日本建築学大会(九州) 学術講演梗概集 F-1, pp.789-790, 1998.
 - 12) 田中宏幸・村尾修・山崎文雄: 東京都の方法による灘区の建物倒壊危険度と実被害との比較, 第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.399-402, 1998.
 - 13) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震による芦屋市の建物被害調査結果の比較検討, 第 3 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.331-334, 1998.
 - 14) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震における自治体の建物被害調査と建築コストとの比較, 1998 年地域安全学会論文報告集, pp.164-167, 1998.
 - 15) 山崎文雄・村尾修・目黒公郎・中埜良昭: 災害情報の共有化を目指して -KOBEnet の 3 年半の活動-, 1998 年地域安全学会論文報告集, 地域安全学会, pp.20-23, 1998.
 - 16) 村尾修・田中宏幸・山崎文雄・若松加寿江: 兵庫県南部地震の実被害に基づく建物倒壊危険度評価法, 第 25 回地震工学研究発表会論文集, pp.1109-1112, 1999.
 - 17) 村尾修・山崎文雄: 兵庫県南部地震の実被害データに基づく灘区の地震動分布と建物被害関数, 第 25 回地震工学研究発表会論文集, pp. 1101-1104, 1999.
 - 18) 小川直樹・山崎文雄・村尾修: 建物被害データに基づく明石市の地震動分布推定, 第 25 回地震工学研究発表会論文集, pp. 45-48, 1999.
 - 19) 田中宏幸・村尾修・山崎文雄・若松加寿江: 兵庫県南部地震の実被害に基づく建物倒壊危険度ウェイト設定手法, 1999 年度日本建築学大会(中部) 学術講演梗概集 F-1, pp. 811-812, 1999.
 - 20) 村尾修・山崎文雄: 自治体データに基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 1999 年度日本建築学大会(中部) 学術講演梗概集 F-1, pp. 809-810, 1999.

- 21) 田中宏幸・村尾修・山崎文雄：実被害データに基づく新建物倒壊危険度の提案，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp.92-93，1999.
- 22) 小川直樹・山崎文雄・村尾修：明石市の建物被害調査に基づいた地震動分布の推定，土木学会第54回年次学術講演会講演概要集，I-B，pp.204-205，1999.
- 23) 村尾修・山崎文雄：建物倒壊危険度を用いた都市解析手法の提案，第4回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集，pp.561-564，1999.
- 24) 梅村幸一郎・村尾修・山崎文雄・西村明儒：GISを用いた灘区における人的被害と建物被害の相関分析，1999年地域安全学会論文報告集，pp.64-67，1999.
- 25) 村尾修・山崎文雄：3次元GISを用いた都市解析手法MUSEの提案，1999年地域安全学会論文報告集，pp.72-75，1999.
- 26) 村尾修・小川直樹・長谷川弘忠・山崎文雄：台湾地震による集集地区の被害，1999年地域安全学会論文報告集，pp.246-249，1999.

生産研究（生産技術研究所所報）

- 1) 村尾修・山崎文雄：兵庫県南部地震の被害分析 -その3 灘区における建築物被害のマクロ分析-，生産研究，49巻6号，pp.21-24，1997.
- 2) 村尾修・山崎文雄：兵庫県南部地震の被害分析 -その5 GISを用いた灘区の建築物被害分析-，生産研究，49巻8号，pp.30-33，1997.
- 3) 村尾修・山崎文雄：兵庫県南部地震の被害分析 -その9 北淡町における建築物被害のマクロ分析-，生産研究，49巻12号，pp.43-46，1997.
- 4) 村尾修・山崎文雄：兵庫県南部地震の被害分析 -その10 建築年代を考慮した木造建物被害に基づく灘区の地震動分布-，生産研究，51巻2号，pp.17-20，1999.
- 5) 村尾修・田中宏幸・山崎文雄・若松加寿江：兵庫県南部地震の実被害に基づく建物倒壊危険度評価法の提案，生産研究，51巻11号，pp.17-20，1999.

一般雑誌その他

- 1) 村尾修：裏リグの舞台裏 -都市の26のメタファ-達-，建築文化，彰国社，pp.10-12，1994.
- 2) 村尾修・村上處直：都市環境生態システムの構築へ 防災モデル都市の必要条件，Urban Environmental Organic System，都市問題，東京市政調査会，vol.86，No.8，pp.69-80，1995.
- 3) 村尾修：大震災時に生きる公共空間，教育と施設，文教施設協会，No.51冬，pp.64-65，1995.
- 4) 村尾修・村上處直：災害に強いまちづくり -環境道路による都市の将来構造-，公衆衛生，医学書院，vol.60，No.4，pp.13-17，1996.4.
- 5) 村尾修：第2回災害情報収集・安全対策シンポジウム -阪神・淡路大震災から1年- 開催後記，月刊消防，東京法令出版，vol.18，No.5，1996.
- 6) 村尾修：世界の公共空間と公共性の意義，Public Space in the World and Significance of Public Spirit，アバン・アドバンス，名古屋都市センター，No.12，pp.11-19，1998.
- 7) 山崎文雄・村尾修・目黒公郎・中埜良昭：災害情報の共有化を目指して -KOBEnetの活動記録の紹介-，建築防災，日本建築防災協会，No.255，pp.14-19，1999.4.
- 8) 読売新聞2000/1/11夕刊，「東京23区地震時倒壊 危険度東西でくっきり」

兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究

目次

1	序論.....	1-1
1.1	研究の目的と位置付け.....	1-2
1.2	既往の研究の概要.....	1-5
1.3	論文の構成と内容.....	1-11
2	兵庫県南部地震における建物被害調査の比較検討.....	2-1
2.1	はじめに.....	2-2
2.2	兵庫県南部地震後の建物被害調査の概要と問題点.....	2-4
2.3	建物被害調査の比較.....	2-7
2.4	建物被害判定の比較.....	2-12
2.5	自治体による建物被害調査と建築コストとの比較.....	2-17
2.6	建物被害調査票の提案.....	2-20
2.7	まとめ.....	2-23
3	調査法が異なる場合の建物被害評価変換法.....	3-1
3.1	はじめに.....	3-2
3.2	芦屋市における建物被害判定結果の比較.....	3-3
3.3	建物被害判定ごとの被害率曲線の比較と評価変換法.....	3-10
3.4	まとめ.....	3-19
4	灘区における建物被害のマクロ分析.....	4-1
4.1	はじめに.....	4-2
4.2	灘区の概要.....	4-3
4.3	灘区の建物被害データ.....	4-5
4.4	建物被害のマクロ分析.....	4-8
4.5	GISを用いた建物被害分析.....	4-17
4.6	まとめ.....	4-23
5	兵庫県南部地震における灘区の地震動分布の推定.....	5-1
5.1	はじめに.....	5-2
5.2	建築研究所データを用いた地震動分布推定の概要.....	5-4
5.3	自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数.....	5-8
5.4	灘区における地震動分布の再推定.....	5-16
5.5	まとめ.....	5-22

6	構造別・建築年代別を考慮した建物被害関数	6-1
6.1	はじめに	6-2
6.2	自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数	6-5
6.3	建物被害関数による推定値と実被害との比較	6-14
6.4	まとめ	6-18
7	実被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案	7-1
7.1	はじめに	7-2
7.2	東京都の建物倒壊危険度	7-3
7.3	東京都の方法による灘区の建物倒壊危険度と実被害との比較	7-6
7.4	実被害データに基づく新建物倒壊危険度評価法の提案	7-15
7.5	汎用ウェイトの設定手法	7-19
7.6	新危険度評価法による東京都の建物倒壊危険度	7-26
7.7	まとめ	7-29
8	防災環境都市デザインのビジョン	8-1
8.1	はじめに	8-2
8.2	都市のイメージ	8-4
8.3	生態的都市論	8-7
8.4	防災環境都市デザイン手法 MUSE の提案	8-14
8.5	防災環境都市デザイン手法 MUSE のイメージ	8-19
8.6	まとめ	8-36
9	結論	9-1
	参考文献	10-1
	付録 1：建物被害調査票	10-5
	付録 2：灘区の町丁目データ	10-19
	英語論文	
	Vulnerability Functions for Japanese Buildings based on Damage Data due to the 1995 Kobe Earthquake	10-27
	Risk Evaluation Method of Building Collapse from the Experience of the Kobe Earthquake	10-39
	Use of GIS for the Method of Urban Safety Analysis and Environmental design	10-47
	謝辞	10-53

目 次

図-1.1	本論文の構成フロー	1-13
図-2.1	建物被害分析の対象地域	2-3
図-2.2	自治体ごとの建物部分項目別判定比率の比較	2-11
図-2.3	各地域の建物被害率の比較	2-14
図-2.4	構造別の建物被害率の比較	2-15
図-2.5	自治体調査と地震保険損害査定との建物被害率比較	2-15
図-2.6	自治体と震特委員会調査による被害率比較（全建物）	2-16
図-2.7	自治体と震特委員会の被害率の比と室内判定比の関係	2-16
図-2.8	自治体判定における建物部分項目別比率と建築コストの比較	2-18
図-2.9	自治体判定における建物部分項目の対建築コスト比	2-19
図-2.10	建物被害状況調査票（木造）	2-21
図-2.11	建物被害状況調査票（非木造）	2-22
図-3.1	建物被害率の比較	3-6
図-3.2	芦屋市対象地域と震度7の帯	3-6
図-3.3	芦屋市による建物被害判定に占める震特委員会判定の比率	3-7
図-3.4	エリアごとの建物被害判定結果の比較	3-8
図-3.5	芦屋市による建物被害判定ごとの震特委員会判定の内訳	3-8
図-3.6	エリアごとの判定比較	3-9
図-3.7	エリアごとの判定比較	3-9
図-3.8	被害判定の対応レベルとエリアごとの比率	3-13
図-3.9	最大速度と芦屋市による建物被害率の関係の確率紙表示	3-14
図-3.10	最大速度と震特委員会による建物被害率の関係の確率紙表示	3-14
図-3.11	芦屋市データに基づく建物被害関数	3-15
図-3.12	震特委員会データに基づく建物被害関数	3-15
図-3.13	芦屋市と震特委員会の建物被害関数の比較	3-15
図-3.14	最大速度と各建物被害率の関係の確率紙表示	3-16
図-3.15	建物被害関数における芦屋市判定の内訳	3-16
図-3.16	建物被害判定の評価率（全壊）	3-17
図-3.17	建物被害判定の評価率（半壊）	3-17
図-3.18	建物被害判定の評価率（その他）	3-17
図-3.19	自治体全壊率から被害率への評価変換	3-18
図-3.20	自治体全壊率から震特委員会被害率への評価変換	3-18
図-3.21	震特委員会大破率から被害率への評価変換	3-18
図-3.22	震特委員会大破率から自治体被害率への評価変換	3-18
図-4.1	灘区の概要図	4-4
図-4.2	兵庫県南部地震における強震記録観測点と震度7の帯	4-4

図-4.3	灘区内建物の構造別比率.....	4-6
図-4.4	建物の構造別被害率.....	4-7
図-4.5	木造の建築年代別被害率.....	4-10
図-4.6	RC 造の建築年代別被害率.....	4-10
図-4.7	S 造の建築年代別被害率.....	4-11
図-4.8	軽量 S 造の建築年代別被害率.....	4-11
図-4.9	木造の建築年別被害率.....	4-12
図-4.10	RC 造の建築年別被害率.....	4-12
図-4.11	S 造の建築年別被害率.....	4-13
図-4.12	軽量 S 造の建築年別被害率.....	4-13
図-4.13	RC 造の階数別被害率.....	4-14
図-4.14	S 造の階数別被害率.....	4-15
図-4.15	木造の屋根種別・建築年代別被害率.....	4-16
図-4.16	町丁目ごとの木造棟数分布.....	4-19
図-4.17	町丁目ごとの RC 造棟数分布.....	4-19
図-4.18	町丁目ごとの S 造棟数分布.....	4-19
図-4.19	町丁目ごとの木造全壊率.....	4-20
図-4.20	町丁目ごとの RC 造全壊率.....	4-20
図-4.21	町丁目ごとの S 造全壊率.....	4-20
図-4.22	町丁目ごとの死者発生率.....	4-20
図-4.23	町丁目ごとの微地形区分（土地条件）.....	4-21
図-4.24	木造建物の微地形区分別被害率.....	4-21
図-4.25	建設省建築研究所データと神戸市調査データの町丁目別全壊率判定の比較.....	4-22
図-5.1	詳細な建物被害関数構築までのフローチャート.....	5-3
図-5.2	解析に用いた地震記録の観測位置.....	5-6
図-5.3	低層独立住宅の被害関数.....	5-6
図-5.4	山口・山崎により推定された地震動分布（最大速度）.....	5-7
図-5.5	山口・山崎による灘区の推定地震動分布（最大速度）.....	5-11
図-5.6	山口・山崎による推定 PGV のランク別建築年代別棟数率.....	5-11
図-5.7	最大速度と木造建物被害率の関係の確率紙表示.....	5-13
図-5.8	構造別被害関数（全壊率-最大速度）.....	5-14
図-5.9	構造別被害関数（全半壊率-最大速度）.....	5-14
図-5.10	木造建築年代別被害関数（全壊率-最大速度）.....	5-15
図-5.11	木造建築年代別被害関数（全半壊率-最大速度）.....	5-15
図-5.12	灘区の微地形分類.....	5-18
図-5.13	各建築年代ごとの全壊率と全半壊率により推定された最大速度値の比較.....	5-18
図-5.14	各建築年代ごとの被害データから推定された最大速度値の比較.....	5-19
図-5.15	再推定した灘区の地震動分布（最大速度）.....	5-19
図-5.16	再推定値と初期推定値との比較.....	5-20

図-5.17	再推定値と再々推定値との比較.....	5-20
図-5.18	再推定 PGV のランク別建築年代別棟数率.....	5-21
図-6.1	建物被害関数構築までのフローチャート.....	6-4
図-6.2	最大速度と木造建物被害率の関係の確率紙表示.....	6-8
図-6.3	構造別建物被害関数（全壊率）.....	6-9
図-6.4	構造別建物被害関数（全半壊率）.....	6-9
図-6.5	被害関数の比較（全壊率）.....	6-10
図-6.6	被害関数の比較（全半壊率）.....	6-10
図-6.7	木造の建築年代別被害関数（全壊率）.....	6-11
図-6.8	木造の建築年代別被害関数（全半壊率）.....	6-11
図-6.9	RC 造の建築年代別被害関数.....	6-12
図-6.10	S 造の建築年代別被害関数.....	6-12
図-6.11	軽量 S 造の建築年代別被害関数.....	6-13
図-6.12	建物被害関数（ ）による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較.....	6-16
図-6.13	建物被害関数（ ）による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較.....	6-16
図-6.14	建物被害関数（ ）と（ ）の比較（木造）.....	6-17
図-7.1	東京都の建物倒壊危険度決定までのフロー.....	7-5
図-7.2	灘区の建物棟数密度分布.....	7-9
図-7.3	灘区の基礎地盤分類.....	7-9
図-7.4	灘区の液状化可能性.....	7-10
図-7.5	灘区の大規模造成地占有率.....	7-10
図-7.6	灘区の埋立地.....	7-11
図-7.7	灘区の急傾斜地.....	7-11
図-7.8	灘区の建物倒壊危険度.....	7-12
図-7.9	灘区の町丁目単位の推定 PGV.....	7-12
図-7.10	灘区の建物全壊率.....	7-13
図-7.11	全壊建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較.....	7-13
図-7.12	全半壊建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較.....	7-13
図-7.13	全壊率と建物倒壊危険量の比較.....	7-14
図-7.14	建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較.....	7-14
図-7.15	建物棟数密度と全壊率の比較.....	7-14
図-7.16	灘区的地盤分類.....	7-17
図-7.17	灘区の新建物倒壊危険度.....	7-18
図-7.18	全壊率と建物倒壊危険率との比較.....	7-18
図-7.19	全壊棟数と新建物危険棟数との比較.....	7-18
図-7.20	全壊に対応した建物強度の確率密度関数（木造）.....	7-22
図-7.21	全壊に対応した建物強度の確率密度関数（RC 造）.....	7-22
図-7.22	全壊に対応した建物強度の確率密度関数（S 造）.....	7-23
図-7.23	全壊に対応した建物強度の確率密度関数（軽量 S 造）.....	7-23

図-7.24	地盤ごとの PGV 生起確率密度分布関数.....	7-24
図-7.25	信頼性解析における被害確率の説明図.....	7-25
図-7.26	危険性ウェイトの地盤ごとの再現性の評価.....	7-25
図-7.27	東京 23 区における建物倒壊危険度の比較.....	7-28
図-8.1	横浜山下公園周辺の都市のイメージ.....	8-6
図-8.2	丹下健三研究室の東京計画 1960.....	8-10
図-8.3	Smithson の都市論（クラスターとしての都市）.....	8-11
図-8.4	人体の器官系（1）.....	8-12
図-8.5	人体の器官系（2）.....	8-13
図-8.6	MUSE の要素の概念図.....	8-18
図-8.7	MUSE タイトル.....	8-19
図-8.8	MUSE の全体イメージ.....	8-20
図-8.9	MUSE の概要.....	8-20
図-8.10	MUSE の各要素（1）.....	8-21
図-8.11	MUSE の各要素（2）.....	8-21
図-8.12	Imaginary Wall（1）：灘区を囲う仮想壁.....	8-22
図-8.13	Imaginary Wall（2）：仮想壁と都市のデータ.....	8-22
図-8.14	Imaginary Wall（3）：仮想壁に投影される平常時交通情報.....	8-23
図-8.15	Imaginary Wall（4）：仮想壁の概要.....	8-23
図-8.16	Path（1）：網の目のような都市のパス.....	8-24
図-8.17	Path（2）：主要なリーディングパスとそれを木目の細かいセカンダリーパス.....	8-24
図-8.18	Path（3）：パスと交通情報.....	8-25
図-8.19	Path（4）：パスの概要.....	8-25
図-8.20	Edge（1）：港湾におけるエッジのイメージ.....	8-26
図-8.21	Edge（2）：主要エッジの全体像.....	8-26
図-8.22	Edge（3）：ある方向から見たエッジとパスによるスリット.....	8-27
図-8.23	Edge（4）：エッジの概要.....	8-27
図-8.24	Cell（1）：都市における細胞のようなセル.....	8-28
図-8.25	Cell（2）：色彩と高さで表現された地震発生時のセルごとの地震動分布.....	8-28
図-8.26	Cell（3）：3次元で表現されたセルごとの建物倒壊危険度.....	8-29
図-8.27	Cell（4）：セルの概要.....	8-29
図-8.28	Void（1）：ヴォイドの全体イメージ.....	8-30
図-8.29	Void（2）：ヴォイドによる延焼安全度のイメージ.....	8-30
図-8.30	Void（3）：装着型映像装置から見えるヴォイドのイメージ.....	8-31
図-8.31	Void（4）：ヴォイドの概要.....	8-31
図-8.32	Core（1）：ネットワーク化されたコア.....	8-32
図-8.33	Core（2）：都市におけるコア.....	8-32
図-8.34	Core（3）：装着型映像装置に映し出されるコアのデータ.....	8-33
図-8.35	Core（4）：コアの概要.....	8-33

図-8.36	Web (1): 地中から見たウェブの全体イメージ.....	8-34
図-8.37	Web (2): システム化されたウェブ	8-34
図-8.38	Web (3): モニターに映し出されるウェブのデータ.....	8-35
図-8.39	Web (4): ウェブの概要	8-35
付録 1	建物被害調査票.....	10-5

表 目 次

表-2.1	兵庫県南部地震後の建物被害調査に関する比較	2-6
表-2.2	建物被害調査項目の比較	2-9
表-2.3	建物被害調査項目の内容と判定比率	2-10
表-2.4	各地域の建物被害判定の比較	2-14
表-2.5	工事費の比率	2-18
表-3.1	建物被害調査内容の比較	3-5
表-3.2	建物被害棟数の比較	3-5
表-3.3	エリアごとの建物棟数と町名	3-7
表-3.4	対象地域全域における建物被害判定結果	3-7
表-3.5	建物被害関数の構築に用いた推定地震動と建物被害率	3-13
表-3.6	建物被害関数の係数	3-14
表-3.7	各判定ごとの建物被害関数の係数	3-16
表-4.1	灘区の建物被害棟数	4-6
表-4.2	RC 造の階数別被害棟数	4-14
表-4.3	S 造の階数別被害棟数	4-15
表-4.4	木造の屋根種別・建築年代別被害棟数	4-16
表-5.1	灘区の対象地域内（臨海・山麓地域以外）の建物被害棟数	5-12
表-5.2	統合された区分の例（140 棟ごとに統合された RC 造の場合）	5-12
表-5.3	建物被害関数の回帰係数（構造別）	5-13
表-5.4	建物被害関数の回帰係数（木造建築年代別）	5-13
表-6.1	統合された地域区分の例（1951 年以前の木造の場合）	6-7
表-6.2	被害関数作成のための構造・年代区分の分類	6-7
表-6.3	建物被害関数の回帰係数	6-8
表-6.4	灘区における推定建物被害棟数と実被害との比較	6-17
表-7.1	東京都の建物倒壊危険度評価における建物・基礎地盤分類項目	7-5
表-7.2	分類項目ごとの建物全壊率と規準化数値	7-17
表-7.3	確率密度関数のパラメータと全壊率をほぼ再現するような危険性ウェイト	7-24
表-7.4	東京都の地盤分類ごとの PGV 地盤増幅度と生起確率密度関数のパラメータ値	7-27
表-7.5	本章のウェイトを東京都に適用した場合の汎用危険性ウェイト	7-27
表-8.1	MUSE 利用法の具体例	8-36
付録 2	灘区の町丁目データ	10-19

兵庫県南部地震の実被害データに基づく

建物被害評価に関する研究

Study on Building Damage Estimation based on the Actual Data
due to the 1995 Hyogoken Nanbu Earthquake

1.1 研究の目的と位置付け

本節では、本研究の目的と位置付けを明確にするために、まず防災都市計画という側面から見た兵庫県南部地震の概要とその意義について述べる。その後、いくつかの問題点の解決のために本研究で行った建物被害評価に関する分析・提案について解説する。

なお本研究は、これまでに研究し、その成果として投稿してきた建物被害評価に関する一連の研究論文を修正・加筆し、さらに数章を加えたものである。

1.1.1 兵庫県南部地震の概要と研究の目的

1995年1月17日午前5時46分、淡路島北部、深さ14kmを震源とするマグニチュード7.2の兵庫県南部地震が発生した。この直下型地震は、神戸市を中心とした阪神地域に過去に例を見ないほどの都市型大災害をもたらした。神戸市海洋気象台では最大加速度818gal（南北成分）を観測し、震源から遠く離れた東京や鹿児島でも震度1と発表された。国土庁（1998）によれば、この「阪神・淡路大震災」による被害は、死者6,430名、負傷者43,773名、最大避難民32万人、全壊住家10万5千棟、半壊家屋14万4千棟、焼損家屋7,500棟、鉄道の不通13社、高速道路等の通行止め27路線36区間、水道断水123万戸、停電260万戸、都市ガスの供給停止86万戸、加入電話の障害48万3千件、堤防・護岸被害32箇所、農林水産業関係の被害総額900億円程度である。我々が長い年月をかけて確立してきた都市という高度に発達した社会システムは、この地震により一瞬のうちに崩壊し、そのシステムの裏に潜む様々な問題が浮き彫りになった。我々防災研究に携わる者は、あまりにも多くのものを奪い去ったこの地震を謙虚に受け止め、多くのものをそこから学び、この経験を未来の社会のために昇華させていく必要がある。

兵庫県南部地震では上記のように膨大な数の建物が被害を受け、地震直後にはそれぞれ異なる目的でいくつかの建物被害調査が行われた。これらの建物被害調査結果の中には、地震による建物被害特性の分析、観測記録が少なかったことにより不充分であった地震動分布の推定、建物被害関数の構築など、今後の都市防災研究に欠かせない大変貴重なデータが数多く含まれている。過去の地震による被害データを用いた研究は、これまでも行われて来たが、そのデータ数は比較的少なかった。そういう意味で兵庫県南部地震による膨大な被害データを研究に生かすことは大変意義のあることであり、これまでに明らかにされなかった多くの新しい知見を得る可能性がある。

本研究では、兵庫県南部地震による建物被害データ（とくに神戸市による調査データ）を用いて、建物被害調査法を比較・整理することにより兵庫県南部地震時に浮き彫りになった問題点を解消するための提案を行い、地震動を推定することにより詳細な建物被害関数を構築し、そしてそれらに基づく建物倒壊危険度評価法を提案することを目的としている。さらに、ここで得た研究成果を都市の分析手法に生かすための防災都市デザインのビジョンを提案している。

1.1.2 建物被害評価に関する研究の意義と位置付け

(1) 兵庫県南部地震における建物被害調査法の比較(第2章, 第3章)

兵庫県南部地震直後にいくつかの組織により, 建物被害調査が実施された。そこで得た貴重な被害データを用いて新たな知見を得ることが本研究の主目的であるが, 各調査の方法や被害レベルの判定基準は主体組織や調査の目的によって異なっていた。また兵庫県南部地震はその時代性・規模においてこれまでに大都市で体験したことのないものであったため, これまでには問題にされなかったような建物被害調査に関するいくつかの問題が浮き彫りになった。建物被害データは本研究の基盤となるものであり, 研究を進める上で, これらの建物被害調査を比較・整理しておく必要がある。さらにその中で得た成果を, 今後建物被害調査をする上で役立つような新たな知見として提案している。以上のことを第2章「兵庫県南部地震における建物被害調査の比較検討」, 第3章「調査法が異なる場合の建物被害評価変換法」で行う。

(2) 灘区の建物被害データ(第4章)

第4章から第7章では, 神戸市から提供された建物被害データを用いて灘区を対象とした各研究を行う。そのためにまず第4章「灘区における建物被害のマクロ分析」で, 対象となる灘区と建物被害データの概要を説明し, マクロな建物被害分析を行う。

(3) 灘区における地震動分布推定と建物被害関数の構築(第5章 第6章)

地震による構造物被害を評価するためには, 被災地域での地震動強さの面的分布を推定することが重要である。しかし兵庫県南部地震時に観測された強震記録は限られており, これのみから地域の地震動分布を求めるには, 不十分である。地震動分布は, アンケート調査や墓石の転倒率, あるいは地盤モデルのFEM解析等により推定することが可能だが, 本研究では, 膨大な建物被害データを用いて灘区の詳細な地震動分布推定を行っている。そのために, 震災復興都市づくり特別委員会(日本都市計画学会関西支部, 日本建築学会近畿支部都市計画部会)および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災度調査結果を数値化した建設省建築研究所(1996)のデータと神戸市から提供された灘区のデータを使い分けている。これを第5章「兵庫県南部地震における灘区の地震動分布の推定」で行う。

次に, 第5章で推定された地震動分布と灘区の建物被害データから建物被害関数を行う。ここでは兵庫県南部地震で過去に例を見ない規模で破壊された約3万棟の建物被害データを用いているため, 構造別・建築年代別の精度の高い建物被害関数の構築が可能である。これを第6章「構造別・建築年代別を考慮した建物被害関数」で行う。

(4) 建物倒壊危険度評価法(第7章)

兵庫県南部地震を契機に, 国, 地方自治体, 個人とあらゆるレベルで地震防災への意識が高まり, 大規模かつ多岐にわたった被害を考慮して, 被害想定を見直し, あるいは新たに検討する気運が高まっている。損害保険料率算定会(1998a)の報告によれば, 各自治体で行われている地震被害想定には様々な手法が存在する。本研究では, 東京都(1998)および東京都都市計画局(1998a, 1998b)が実施した「東京都地域危険度測定調査」(第4回)に基づき, 建物倒壊危険度を分析対

象とする。これは、「ある地震の発生を仮定した上で地震動を推定し、経験的な被害関数などから地震発生時の被害を予測する」被害想定とは異なり、「被災ポテンシャルを地域間で比較し、相対的に危険な地域を抽出する」ことを目的としている。この東京都の方法を灘区に適用し、実被害と比較することにより、モデルとしての簡易性を保ちつつ、確率論的な概念も取り入れ、より一般的な建物倒壊危険度評価法を提案する。これは本研究で扱っている建物被害データを用いることにより初めて可能となる。以上のことを第7章「実被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案」で行う。

(5) 防災環境都市デザインのビジョン（第8章）

地震国であり、かつ高密度の日本の都市では防災的な観点から都市を設計する必要がある。地震国であるが故に蓄積された日本の数々の教訓を都市設計に生かし、21世紀さらにはその先の未来における都市像を提案することが日本のアイデンティティを培い、地球上の他の都市に役立つものと思われる。しかしながらいくつかの事例を除き、防災的な研究成果が具体的な都市ビジョンとして描かれたことはあまり多くなかった。ここでは主に第6章、第7章の成果を用いて、防災的、環境的な観点から都市の解析およびデザイン手法を提案する。これを第8章「防災環境都市デザインのビジョン」で行う。

1.2 既往の研究の概要

本節では、建物被害評価に関する既往の研究成果を概括する。

1.2.1 建物被害調査法に関する研究（第2章，第3章）

損害保険料率算定会（1998b）の報告によれば、震災後の建物被災度評価は、避難所の確保、二次災害の防止、災害救助法の適用、各種補助金申請用等の罹災証明の発行、固定資産税減免調査、保険金支払いのための罹災程度の評価などを目的として行われている。その評価方法は、昭和43年6月14日以降、警察・厚生・建設・消防関係では「災害の被害認定基準の統一について」内閣総理大臣官房審査室長通知により統一が図られているが、その他の分野では、それぞれ微妙に異なる方法が採られている。ここでは本研究で用いた自治体による調査法について述べる。

兵庫県南部地震のように高度にシステム化された大都市を広範囲にわたって襲った都市直下地震は、これまでに経験したことがなかったため、調査の仕方や被災程度の判定基準を巡っていくつかの問題が初めて浮き彫りになった。自治省固定資産税課（1997）によれば、以前から自治体による建物被害判定基準は「天災、火災等の理由による固定資産税減免のための家屋に対する評価基準」として定められていたが、大災害を想定したものではなかったため、全壊・半壊の判定は自治体の判断に委ねられた（自治省固定資産税課および神戸市に対するヒアリングより）。問題点の多くはこのように統一された評価法がなかったことが原因と思われる。これらの問題を解消するためには、自治体の職員および住民が個々の調査の目的を十分に認識するとともに、地震直後の混乱の中で適切かつ客観的に被害判定ができるよう、全国で統一された評価法が必要である。そのためには兵庫県南部地震後に広域で実施された建物調査方法および判定基準等を比較し、整理しておくことが重要である。林・宮腰・田村（1997a）は兵庫県南部地震後の日本建築学会近畿支部が主体となった被害調査（鈴木・藤原，1995）、建設省建築研究所（1996）がとりまとめた建物被害調査結果の被災度定義について比較しているが、各自治体調査の詳細についてはこれまで報告されていない。

1.2.2 兵庫県南部地震における建物被害分析（第4章）

兵庫県南部地震はこれまでに経験したことの無いほど多くの建物被害をもたらしたため、その被害データを分析することにより、これまでに得られなかった多くの知見を得ることが可能である。(1)で述べたように、兵庫県南部地震発生後に、その目的・組織に応じていくつかの建物被害調査が実施されたため、いくつかの異なる被害データが存在している。その結果、各研究グループにより様々な建物被害分析の報告がされている。

自治体によって行われた建物被害調査に基づくデータを用いたものとしては、杉浦・山崎（1996）による宝塚市、後藤・山崎・佐藤（1996）による芦屋市、村尾・山崎（1997a）による北淡町、後藤・山崎・若松・浅野（1997）による尼崎市、杉浦・山崎（1997）による伊丹市、山口・山崎・

若松(1997)あるいは岩井・亀田・碓井(1997)による西宮市 ,Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa (1997) による神戸市, そして小川・山崎(1998)による明石市等がある。いずれも構造別・建築年代別を基本として建物被害の分析をしており, データに応じて階数別・屋根別等も行っている。

自治体による調査以外のデータとしては, 震災復興都市づくり特別委員会(日本都市計画学会関西支部, 日本建築学会近畿支部都市計画部会)および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災度調査結果のデータが挙げられる。それを数値化した建設省建築研究所(1996)は構造別・建築年代別・階数別・用途別等詳細な分析を行っている。緑川・長谷川・向井・西山・福田・山内(1997)は神戸市内の特定地域の調査データを用いて鉄骨造の被害レベルと建築年代との関係や年代と階数別の分析を行っている。村上・田原・藤田・三澤(1996)は, 神戸市東灘区の木造住宅の密集した震度7の地域内における詳細調査に基づくデータを用いて, 建築年代, 建物規模などと被害の関係を明らかにしている。

1.2.3 兵庫県南部地震における地震動分布推定(第5章)

兵庫県南部地震時の観測記録の数は充分とは言えないため, 他の情報を用いて地震動を推定する必要がある。兵庫県南部地震の被災地域における地震動分布推定および建物被害関数に関する研究としては, これまでに, 翠川・藤本(1996)が地形条件と被災地域での墓石転倒率の分布から神戸市およびその周辺での最大速度分布を推定し, 藤本・翠川(1996)は各種被害データを重合して阪神・淡路地域での震度6の分布を推定している。また, 林・宮腰・田村・渡辺(1996), 林・宮腰・田村・川瀬(1997)は一連の研究の中で, 地盤モデルのFEM解析による再現地震動と建設省建築研究所(1996)によってまとめられた建物被害調査データを用いて, 最大地動速度と低層独立住宅被害との被害関数(林・宮腰・田村, 1997)を構築し, 同調査の建物被害率から被害地域全域での最大地動速度分布を推定している。その他に太田・小山・中川(1998)は, 被災地域におけるアンケート調査結果を用いて, 計測震度分布を推定している。

山口・山崎(1999)は, 強震観測記録とその周辺地域における建設省建築研究所(1996)の低層独立住宅被害データを用いて, 低層独立住宅の被害関数を求め, その関数を同データのもととなった調査地域に適用し, 阪神地域の地震動分布を推定している。この手法は, 林・宮腰・田村・渡辺(1996), 林・宮腰・田村・川瀬(1997)による研究と似ているが, 大阪府内における小さい地震動による被害データも考慮している。本研究ではこの推定地震動を土台として灘区の詳細な地震動分布を推定している。

1.2.4 建物被害関数の構築(第6章)

被害関数は, 着目している被災対象群が平均的な耐震強さ V_0 の周りに標準偏差 σ で正規分布しているという仮定のもとに標準正規分布関数でよく記述される。これまで我が国では, 物部(1926)が家屋倒壊率と合震度との関係を被害関数として定式化したことを皮切りとして, 東京都防災会

議(1980)の震度階解説表の記載内容の定量化により各種構造物の被害関数を作成した岡田・鏡味(1991)の研究など、様々な震害の経験に基づく、建物被害関数あるいは建物被害率曲線(バルナビリティ関数またはフラジリティカーブ)に関する研究が報告されてきた。しかし、建物被害関数のもとになるデータは限られていたため、その精度についての十分な確証は得られていなかった。最近では、兵庫県南部地震による膨大な被害データを用いた被害関数に関する研究が、いくつかの研究グループにより報告されている。建物被害関数を構築するためには、対象地区の地震動分布と建物被害データが必要であるが、兵庫県南部地震時の強震記録はそれほど多くは観測されていなかったため、地震動分布を何らかの方法で推定する必要がある。また実施されたいくつかの建物被害調査もその目的・方法によって判定基準が異なっていたため、これまでに報告されてきた被害関数も、使用したデータによる違いを見せている。

林・宮腰・田村(1997b)は、地盤モデルのFEM解析による再現地震動と建設省建築研究所(1996)のデータを用いて推定された林・宮腰・田村・川瀬(1997)の最大地動速度分布から、低層建物および中高層建物の用途別の被害関数を構築している。Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa(1997)は、同推定地動速度分布と神戸市の行った調査データから構造・建築年代別の被害関数を求めている。また長谷川・翠川・松岡(1998)は、建設省建築研究所(1996)のデータと東灘区西部地区の建物について村上・田原・藤田・三澤(1996)が行った建築年代別被害調査結果を用いて木造建築物の建築年代別被害関数を作成し、林・宮腰・田村(1997b)の結果と比較している。

1.2.5 建物被害想定および危険度評価(第7章)

損害保険料率算定会(1998a)は地震被害想定調査の歴史について、以下のように報告している。

1970年代後半から1990年代前半にかけて、関東・東海地方の自治体により「仮想東海地震」や「南関東地震」等を対象とした地震被害想定調査が行われてきた。その過程で、1923年の関東地震による地震のゆれと被害の関係が研究・分析され、被害予測手法の開発や検証が行われた。1980年代に入ると、1978年宮城県沖地震や1983年日本海中部地震などの被害状況を含めて解析を行う自治体も増えてきた。その後、莫大な被害をもたらした1995年の兵庫県南部地震では、「関西には地震がない」という俗説が一蹴され、その地震を契機に、国、地方自治体、個人とあらゆるレベルで地震防災への意識が高まり、大規模かつ多岐にわたった被害を考慮して、被害想定を見直し、あるいは新たに検討する気運が高まっている。

地震による建物被害には、ゆれや地盤の液状化による被害の他、斜面崩壊や津波、火災による被害がある。これらのうち建物被害予測の項目で考慮されているものは、主にゆれや液状化を原因とするものであり、斜面崩壊や津波による影響が議論されているものは少ない。焼失建物については、地震火災の出火・延焼を検討する際に取り扱われる。

地震のゆれによる建物被害の予測としては、過去の地震被害の経験に基づく予測と建物応答解析に基づく予測があるが、本研究で対象とした建物被害評価法は、兵庫県南部地震の経験に基づくものであるため、ここでは同地震被害に基づく予測を用いている例について述べる。

東京都(1997a, 1997b)や山梨県(1996)は、兵庫県南部地震での事例から、加速度と建築年

代別被害率の関係を設定している。名古屋市（1997）は、建物被害と地表加速度推定値から建物被害を予測しており、また栃木県（1995）は、神戸市中央区や芦屋市の被害事例から震度と建物被害率の関係を設定している。三重県（1997a, 1997b）は、1944年の東南海地震における三重県内の想定震度と建物被害の関係、ならびに西宮市の被害率から建物の「罹災証明全壊率」を求めている。滋賀県（1996）は、神戸市（中央区・灘区・東灘区）・西宮市・尼崎市の分析に基づき、建物・地盤条件・震源断層距離との関係から被害予測を行っている。

地震被害想定調査の現状を整理した後藤・山崎・片山（1995）は、被害想定今後の課題として、「事前想定では、仮定・条件パラメータが非常に多いことから、複雑なシミュレーションなど学術研究的な方法よりも、簡便な方法でおおざっぱな量が想定できる手法を用いる。」、「既往地震被害データを用いて作られた推定式の中には、最近の地震で明らかになった知見を考慮していないものもあり、推定式の見直しが必要である。」などを挙げている。本研究はこの二つの問題点を解消するものである。

本研究で取り上げた東京都（1998）および東京都都市計画局（1998a, 1998b）による「東京都地域危険度測定調査」（第4回）は、これまでの被害想定とは違った角度から、都内の地震に対する危険度を算定したものである。これは東京都が東京都震災予防条例に基づき、5年ごとに実施している調査であり、その目的は、「都市災害に強い都市づくりの指標とする」、「震災対策事業を優先的に実施する地域を選択する際の参考とする」、「地震災害に対する都民の認識を深め、防災意識の高揚に役立つ」などである。地震が発生することを仮定して被害を予測するという点では、被害想定も地域危険度評価も同じ性質のものであるが、被害想定が特定の地震動発生を仮定し、その地震によって生じる具体的な被害量を想定することを目的としているのに対し、地域危険度評価は、被災ポテンシャルを地域間で比較し、相対的に危険な地域を抽出することを目的としているという点で、その算定方法・考え方に違いがある。このため危険度の算出過程において、特定の地震は考慮されておらず、対象地域全体で震源位置に依らない地震動が仮定されており、複雑な解析を必要とする被害想定に比べ、比較的簡単な算定式と町丁目単位での地盤や建物のデータ等を用いて決定される。しかしながら、東京都による現行の手法は、東京都の特性に合わせて分類された地盤や建物について、専門家の判断に基づく危険性ウェイトが設定されており、危険度評価の精度や普遍性は確認できない。東京都以外には、北海道（1987）が古い住宅の存在率と持ち家率をパラメータとした住宅破壊による危険度評価を行っている。

本研究で行った「実被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案」の目的は、東京都地域危険度の中の建物倒壊危険度評価方法を検討し、モデルとしての簡易性を保ちつつ、より一般的な建物倒壊危険度評価法を提案することにある。

1.2.6 都市デザインと防災都市計画（第8章）

ここでは、村上（1986）、石田（1987）、新建築社（1991）、槻橋・石崎・奈尾（1995）、松永（1998）らの文献を参考として今世紀における都市デザインと防災都市計画の変遷の概要を示す。

（1）今世紀における都市デザインの変遷

ここ数百年にかけて、都市（City）は急激な発展を遂げたと言う事ができる。ルネサンス以降の500年、産業革命以降の200年、第二次世界大戦以降の50年、そしてインターネットが世界的に普及したこの10年、都市あるいは都市生活の急激な変貌は、それぞれのタイムスパンに応じて語る事が可能であろう。これまでの社会的な変化に伴い、都市に住む人々すなわち市民（Citizen）の考え方、価値観も大きく変わり、各時代ごとあるいは都市ごとの理念の違いに応じて、都市デザインに関する様々な提案が行われてきた。19世紀のオスマン男爵による「パリの都市計画」、20世紀初頭のエベネザー・ハワードによる「レッチワース田園都市（1902）」、トニー・ガルニエの「工業都市論（1904）」、ル・コルビジエの「300万人のための現代都市（1922）」などは、社会の変貌とともに提案された都市デザインの例である。1960年代に入ると、菊竹清訓、黒川紀章らによる「メタボリズム思想（1960年代）」、バックミンスター・フラーによる「マンハッタンのジオテックドーム（1961）」、丹下健三研究室（1961）の「東京計画 1960（1961）」、あるいはアーキグラムの「プラグイン・シティ（1964）」、「ウォーキング・シティ（1964）」など、現実の都市計画の提案あるいは近代都市の理想としてのユートピア都市構想が提案されるようになる。1970年には、近代技術の万能思想を究極的に具現化したものとして「大阪万国博覧会（1970）」が開催されるが、それと同時に我々が理想としてきたモダニズムの限界性も露になり、都市レベルのビッグ・プロジェクトは徐々に衰退していき、建築家の関心は相対的に個体としての建築へと向けられるようになった。1980年代にはポストモダンの時代に突入し、停滞していたモダニズムの反動からか、自由な造形、自由なビジョンが描かれるようになる。さらによりコンセプチャルな思想を背景として、ダニエル・リベスキンドの「マイクロメガス（1980）」やザハ・ハジドの「香港ピーク設計競技案（1983）」などのドローイングによって脱構築と呼ばれるプロジェクトが提案されるようになる。1990年代になると、これまでに普及してきたパーソナル・コンピュータおよびインターネットの利用率が一挙に上昇し、それに伴い、コンピュータ・グラフィック技術が向上し、渡辺誠の「誘導都市（1990-）」、島田良一研究室の「2006 Tokyo（1997）」そしてジョン・フレイザーの「フローニンゲン・プロジェクト（1996-）」に見られるようなシミュレーションとしての都市、電腦空間の中での都市像が描かれるようになる。

（2）日本における防災都市計画の変遷

次に今世紀の我が国における防災的な分野から見た都市のビジョンの変遷を示す。

関東大震災により壊滅的な被害を受けた東京では、後藤新平を中心とした震災復興都市計画事業が進められた。ここで整備された幹線道路、土地区画、公園、ライフラインなどのインフラストラクチャー基盤は、東京オリンピックのある1960年代まで都市の基盤として発展した。

その後、1960年代には災害対策基本法が制定されたが、都市の防災問題を解決するためには技術的な対応だけでは不十分であったことから、東京大学に都市工学科が設立され、都市計画の領域での防災研究が始められた。防災都市計画とはその当時に用いられ始めたもので、1971年の東京都震災予防条例の中では、「災害に強い都市づくり計画のため、都市の危険診断を定期的に行う」ことや、「特別危険区域には優先的に都市計画事業を実施して行く」ことが定められている。これを受けて、東京で最も地震災害に対して弱いとされる江東デルタ地帯の防災拠点再開構想が軌道に乗り始めた。そして東京大学高山英華研究室による江東十字ベルト構想（1966）が提案され、1970年代には、その中から村上（1986）らを中心とする白鬚東地区のプロジェクト（1976-84）

が防災再開発事業として具現化した。その後、大きな都市被害をもたらすほどの大地震は発生しなかったが、自治体や住民達の「防災まちづくり」と称した地道な努力が各地で実り、東京都の豊島区東池袋地区や世田谷区太子堂地区などに小さな防災広場等が生まれるようになった。1995年には、兵庫県南部地震により阪神・淡路地域が大災害を受けた。その後、安藤忠雄による「阪神大震災復興プロジェクト(1995)」や竹山聖による「神戸新首都計画(1995)」などが提案された。また尾島(1996, 1998)は、彼の持つ壮大な東京都のプロジェクトの一環として防災も取り上げており、環境・ライフライン・地下構想などに関連した防災都市のビジョンを提案している。

兵庫県南部地震以降、GISが広く普及し、それらを用いた防災シミュレーション等が各自治体等により行われるようになった。GIS、コンピュータ、インターネット等の技術を用いたシミュレーションという概念は、これまでの模型等のみを用いた思考だけでは不可能であった都市のビジョンを描くことが可能となると思われる。日本では、防災関連の各分野でGISを用いた研究も含め、様々な研究がされているが、それらの研究成果をもとに防災都市のビジョンとして提案しているものは数少ない。しかし、社会がさらに複雑になるであろう21世紀において、防災という分野は、エネルギー問題、環境問題などと並んで重要なパラダイムとなるに違いない。本研究のように防災的な視点から描いた都市のビジョンは、地震国の中でも世界に例を見ない高密度の都市を持つ日本にとって、世界における21世紀のアイデンティティを培う上でも大切な意味を持つものと思われる。

1.3 論文の構成と内容

本論文は全部で9章から構成されている。第1章「序論」と第9章「結論」を除いた研究内容は、本研究の基礎となる建物被害データについて整理した「兵庫県南部地震における建物被害調査法の比較」(第2章,第3章),本研究による新たな知見である「灘区の建物被害データに基づく建物被害関数と建物倒壊危険度評価法」(第4章 第7章),そしてこの研究成果をどのように社会的に応用していくかを示した「防災環境都市デザインのビジョン」(第8章)の3つの部分から成り立っている。本論文の構成フローを図-1.1に示す。第1章は「序論」、第2章は「兵庫県南部地震における建物被害調査の比較検討」、第3章は自治体と震災復興都市づくり特別委員会による調査比較に基づく「調査法が異なる場合の建物被害評価変換法」、第4章は「灘区における建物被害のマクロ分析」、第5章は「兵庫県南部地震における灘区の地震動分布の推定」、第6章は推定された地震動分布と建物被害分析に基づく「構造別・建築年代別を考慮した建物被害関数」、第7章は前章により構築された建物被害関数を用いた「実被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案」、第8章は本研究の成果を用いた「防災環境都市デザインのビジョン」、第9章は結論である。以下にその内容の概要を述べる。

第1章「序論」では、まず兵庫県南部地震の概要とその建物被害データを基に建物被害評価に関して研究することの意義・目的・位置付けを述べる。次に建物被害評価に関する研究を、建物被害調査、建物被害関数、被害想定および危険度という側面から振り返り、本研究との関連性を述べる。最後に論文の全体構成と各章の内容を要約して紹介する。

第2章「兵庫県南部地震における建物被害調査の比較検討」では、まず兵庫県南部地震後に実施された建物被害調査に関する問題点を簡潔に述べ、それらを比較・整理し、自治体のための統一された被害調査票を提案することの必要性を述べる。次にいくつかの組織により実施された建物被害調査を取り上げ、その概要と浮き彫りになった問題点を述べる。第三に被災地となった「各自治体」、「地震保険損害査定」、「震災復興都市づくり特別委員会」および「応急危険度判定」による建物被害調査の方法を整理し比較する。さらに各自治体による建物被害調査を、「地震保険損害査定」と「震災復興都市づくり特別委員会」による調査を基準として比較し、それぞれの調査法・判定基準の違いが調査結果にどのような影響を与えたかを分析する。また自治体で実施された建物被害調査の項目別の被害損失ウェイトと、実際に掛かる建築コストとの比較も行っている。以上の結果に基づき建物被害調査票を提案する。最後に第2章で得られた知見をまとめる。

第3章「調査法が異なる場合の建物被害評価変換法」では、第2章で行った建物被害調査の比較に基づき、芦屋市を対象地域とした「自治体」と「震災復興都市づくり特別委員会」との詳細な分析を行う。まず第2章で得られた知見を基に、調査法が異なる場合の建物評価変換法の必要性を述べる。次に兵庫県南部地震後に芦屋市内で実施された上記の2調査について、12万棟の建物を対象とした詳細な比較分析を行い、それぞれの傾向を明らかにする。そして全建物を対象とした建物被害関数を2調査の判定基準ごとに作成し、地震動強さの違いがどのように判定結果に影響を与えたかを評価率という概念を用いて明らかにし、2調査間の建物被害評価変換法を提

案する．最後に第3章のまとめを行う．

第4章「灘区における建物被害のマクロ分析」では，まず兵庫県南部地震による建物被害データを分析することの意義を説明する．次に第4章以降の研究の対象地域となる灘区の概要について述べる．そして神戸市から提供された建物被害データについて説明し，構造・建築年代・階数・屋根等の種別に応じて被害をマクロに分析する．最後に第4章で得られた結論を示す．

第5章「兵庫県南部地震における灘区の地震動分布の推定」では，まず兵庫県南部地震時の強震観測記録が限られていたことを述べ，地震による建物被害評価をするうえでの地震動推定の必要性とその方法について説明する．次に灘区における詳細な地震動推定を行う上で基礎となる建設省建築研究所（1996）のデータを用いた推定地震動の概要を述べる．第三に，この推定地震動と第4章の建物被害データから，暫定的な建物被害関数を構築する．ここで得られた木造年代別建物被害関数と建物被害データを用いて，複数の地震動分布を導き出し，それらを比較検討することにより，微地形を考慮した詳細な地震動分布を決定する．最後に第5章のまとめを行う．

第6章「構造別・建築年代別を考慮した建物被害関数」では，まず建物被害関数について既往研究の概略と，第5章を含めた被害関数構築までのプロセスを説明する．次に第5章で得られた最終的な推定地震動と建物被害データから，構造別・建築年代別の被害関数を構築する．そして，これらの被害関数による建物被害推定値を，第5章の暫定的な被害関数による推定値と比較し，最終的に精度が向上したことを示すとともに，実被害と比較する．最後に第6章のまとめを行う．

第7章「実被害データに基づく建物倒壊危険度評価法の提案」では，まず兵庫県南部地震以降各自治体により気運が高まっている被害想定と危険度についての概略を述べる．次に本章で取り上げた東京都の建物倒壊危険度について説明する．続いて灘区のデータを東京都の方法に適用し，実被害と比較することにより問題点を明らかにする．そして，これらの問題点を解消する新しい建物倒壊危険度評価法を提案する．さらに信頼性解析を用いてこの評価法が灘区だけでなく一般的にも適用出来るような手法を述べる．こうして提案された新建物倒壊危険度評価法を改めて東京都に適用し，東京都の方法による危険度分布との違いを比較する．最後に第7章で得られた知見をまとめる．

第8章「防災環境都市デザインのビジョン」では，まず第6章，第7章で得た建物被害関数と建物倒壊危険度評価法を都市デザインに生かすことの意義を述べる．次に本章で提案する手法のもとになる Lynch（1968）の「都市のイメージ」の概要を説明する．そして防災環境都市デザイン手法 MUSE（The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design）を提案する．さらに MUSE の適用法についていくつかのイメージを示し，今後の防災環境都市デザインのビジョンについて説明する．最後に第8章のまとめを行う．

第9章「結論」では，本研究の全体内容を統括し，本研究で得られた成果を要約する．

兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究

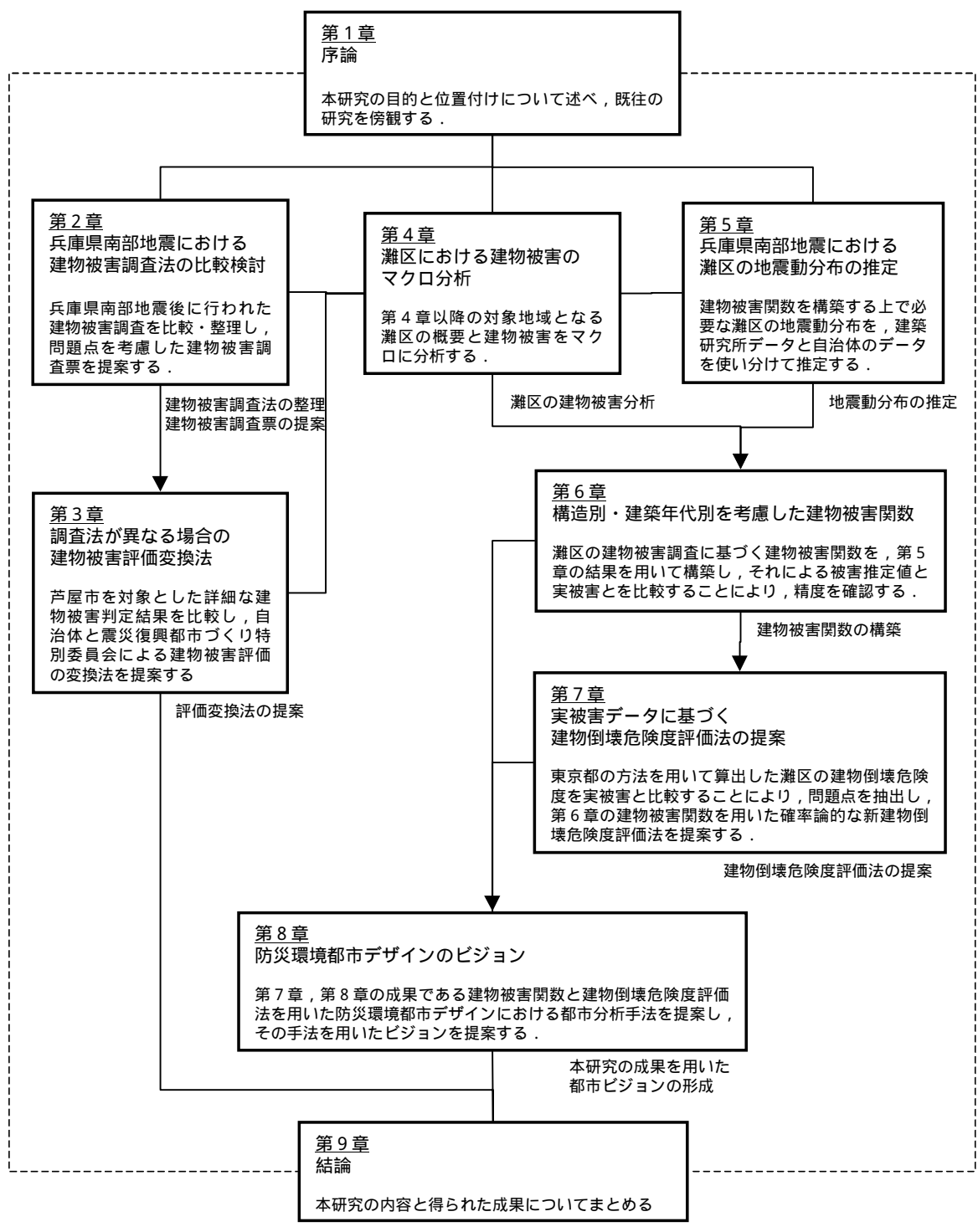


図-1.1 本論文の構成フロー

2.1 はじめに

国土庁(1998)によれば、兵庫県南部地震による住家被害は、全壊が約10万5千棟、半壊が約14万4千棟にも上った。筆者らの研究グループは、これまでに図-2.1に示す自治体による建物被害データの分析を行ってきた。杉浦・山崎(1996)による宝塚市、後藤・山崎・佐藤(1996)による芦屋市、村尾・山崎(1997b)による神戸市灘区、村尾・山崎(1997a)による北淡町、後藤・山崎・若松・浅野(1997)による尼崎市、杉浦・山崎(1997)による伊丹市、山口・山崎・若松(1997)による西宮市等である。建設省建築研究所(1996)によっても建物被害分析が行われており、これらから推定した地震動分布を用いて精度の高い建物被害推定式を導くことが可能となる。しかし、兵庫県南部地震後に実施された建物被害調査の方法は自治体によって異なっており、被害推定式など普遍的な研究成果を導くためには、調査の項目や方法等の比較分析を行っておく必要がある。また調査の仕方や被災程度の判定基準を巡って次節に示す問題も生じた。自治省固定資産税課(1997)によれば、以前から判定基準は「天災、火災等の理由による固定資産税減免のための家屋に対する評価基準」として定められていたが、大災害を想定したものではなかったため、全壊・半壊の判定は自治体の判断に委ねられた(自治省固定資産税課および神戸市に対するヒアリングより)。問題点の多くはこのように統一された評価法がなかったことが原因と思われる。これらの問題を解消するためには、自治体の職員および住民が個々の調査の目的を十分に認識するとともに、地震直後の混乱の中で適切かつ客観的に被害判定ができるよう、全国で統一された評価法が必要である。そのためには今回のように広域で実施された建物調査方法および判定基準等を比較し、整理しておくことが重要である。林・宮腰・田村(1997a)は、鈴木・藤原(1995)が報告している日本建築学会近畿支部が主体となった被害調査、建設省建築研究所(1996)がとりまとめた建物被害調査結果の被災度定義について比較しているが、各自治体調査の詳細についてはこれまで報告されていない。

本章では、大地震により被害を受けた建築物の資産価値を評価する公的な立場(自治体)からの評価法を確立するという目的で、以下の分析を行った。まず自治体以外の組織による3調査を含む建物被害調査の方法と被害判定基準等を整理し、各自治体による調査の相互比較を行った。次に「地震保険損害査定」、「震災復興都市づくり特別委員会(以下、震特委員会)による調査」を基準として建物被害判定の分析を行い、各自治体の調査方法と判定結果の相関を見い出した。また自治体による今回の調査と実際にかかる建築コストとの比較を行い、それらをもとに調査票を提案した。

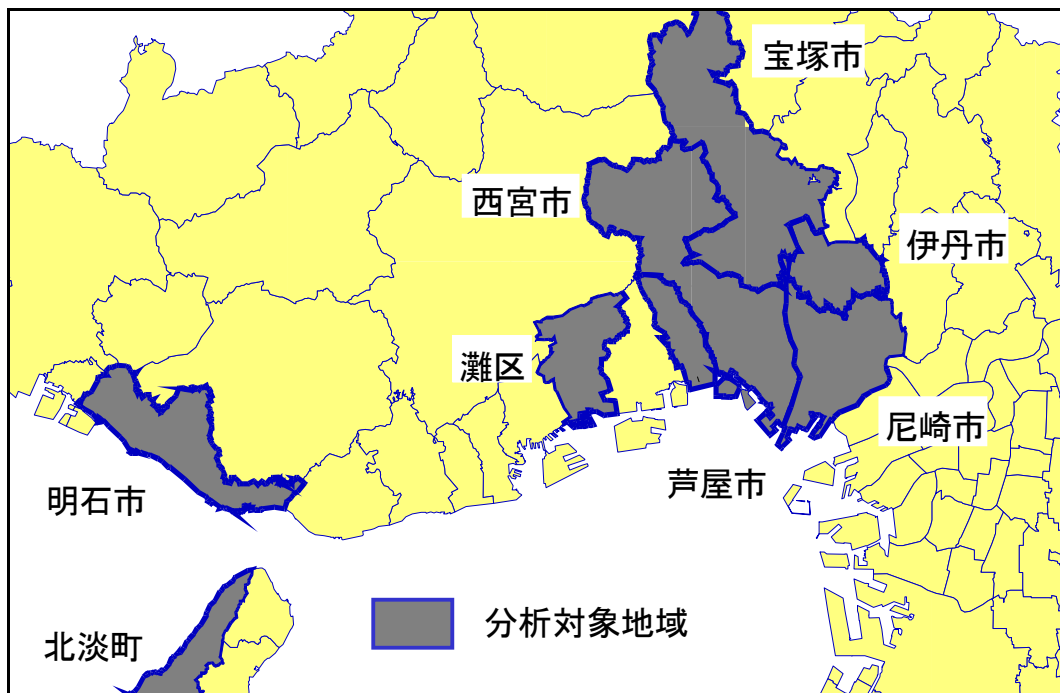


図-2.1 建物被害分析の対象地域

2.2 兵庫県南部地震後の建物被害調査の概要と問題点

兵庫県南部地震後に被災地では保険金支払のための「地震保険損害査定調査」、震特委員会による被災記録のための「被害実態緊急調査」、二次災害防止のための「応急危険度判定調査」、自治体による減免および義援金補助のための「建物被害調査」などが実施された。他にも建築学会近畿支部が主体となった中央区の木造建物被害調査、灘区、東灘区のRC造被害調査等があるが、ここでは上記4調査について比較を行う。

(1) 地震保険損害査定

地震等を原因とした火災、損壊等によって保険対象物について生じた損害の迅速、円滑、公平な処理を期すことを目的としている。

昭和39年に起きた新潟地震を契機として、「地震保険に関する法律」が制定され、地震保険制度が昭和41年6月1日から発足した。調査は保険会社の査定要員または鑑定人によって行われる。

損害保険料率算定会(1997)によれば、兵庫県南部地震による被害の保険金支払状況は約6万5千件(総額780億円)であった。また兵庫県における契約件数は、兵庫県南部地震以前の平成6年12月に約6万件であったものが、平成7年12月には14万件を越え、2倍以上となっている。

(2) 震災復興都市づくり特別委員会による被害実態緊急調査(建設省建築研究所, 1996)

兵庫県南部地震による建物被害の全体像の把握と後の学術的貢献を目的として、日本都市計画学会関西支部と日本建築学会近畿支部都市計画部会(震災復興都市づくり特別委員会, 1995)が中心となって実施した調査である。ただし調査範囲が限られたものであったため、兵庫県都市住宅部が同じ調査方法で追加調査した。本章では両調査を含めて震特委員会調査として扱っている。外観目視により、ランクC(住める見込みは非常に少ない:全壊または大破)、ランクB(大幅な修理で住める可能性あり:中程度の損傷)、ランクA(修理を加えると住める:軽微な損傷)、無被害(見た目に被害がない)の4段階で評価した。

(3) 応急危険度判定(日本建築防災協会, 1991)

余震等による被災建物の倒壊や落下物による人命への危険性を防止、軽減することを目的とし、建物倒壊と落下物の危険性について、判定用シートの項目に従い、軽微な方からA、B、Cの3ランクに区分し、各ランクの総数により「安全」、「要注意」、「危険」と判定する。中埜(1996)によれば、これまで応急危険度判定は国内外の被害地震でも試用されたが、組織的かつ多数の建物を対象としたのは兵庫県南部地震が最初であった。

(4) 各自治体による建物被害調査

被災者に対する義援金の配分、固定資産税の減免措置、および復旧・復興施策のための被害実態把握を目的とする。その判定基準は、政府の通達(内閣官房審議室1968「被害認定統一基準」)に基づいており、表-2.1の自治体における「判定項目及び定義」に示されているように定義づけられている。

(5) 建物被害調査に関する問題点

丹治・増成(1995), 明石市(1996), 西宮市(1996), 芦屋市(1997), 尼崎市(1998)などの報告によれば, 兵庫県南部地震後には, 建物被害調査の方法, 被災程度の判定基準を巡って以下のような問題が生じた。

物理的基準, 機能性基準, 経済性基準など異なった観点から見ることにより判定基準も異なる。

応急危険度判定の結果を, 自治体の職員が減免措置を目的とした全壊・半壊の判定に用いようとしたため, 義援金支給, 応急仮設住宅の入居, 公費解体等の状況の中で混乱を招いた。

災害救助法に基づく家屋調査は, 被災者にとって義援金や税の減免など経済的に直接影響するにもかかわらず, 判定基準が不明確なため調査員の主観による部分も多く, 判定が難しい。

外観目視による全域調査終了後, 判定に対する住民からの苦情があり, 家屋内被害も考慮した再調査を行うことになった。

、 は調査全般に関する問題点である。 のような調査ごとの違いに対する認識の低さが
のような問題を引き起こしている。 、 は自治体調査に関する問題点であり, 客観的な基準が
示されていない() ことにより住民の抱いた不公平感を説得できなかった() ものと考えられる。
このような問題は客観的かつ統一された評価法が用いられるようになることで解消され
れると思われる。

第2章 兵庫県南部地震における建物被害調査の比較検討

表-2.1 兵庫県南部地震後の建物被害調査に関する比較

	伊丹市	尼崎市	宝塚市	西宮市	芦屋市	神戸市	明石市	津名郡北淡町	地震保険損害査定	震特委員会 県都市住宅部	応急危険度判定	
調査方法	市職員が目視により損害度合を調べ百分率で判定	市職員が目視により損害度合を調べ百分率で判定	市職員が目視により損害度合を調べ百分率で判定	市職員が目視により損害度合を調べ百分率で判定	消防本部職員が目視により損害度合を調べ百分率で判定	市職員が目視により損害度合を調べ百分率で判定	居住者立会のうえ、家屋の外観と内部調査	被災家屋調査カードに被災者本人が記入	損害査定要員が地震直後に調査	専門家・学生等(職員)による外観目視	専門家による詳細調査	
調査員	市職員約100名で2人1組	市職員250名	市職員50名と建設関係ボランティア50名が2人1組	市職員を中心に2人1組、再調査は専門家も協力	消防本部職員再調査は専門家も協力(3人1組)	市職員約40人(延べ約300人)	市職員総動員で2人1組	被災者による自己申請	保険会社の損害査定要員または鑑定人で2人1組	建築・土木・都市計画の専門家・学生等(職員)	応急危険度判定士	
調査期間	1/31-3/4頃	2/10-23 その後半年間	3月-5月	1/23-2/6 2/18-2/19 3/3-	1/23-1/29 2/4-2/10 3/17-3/21	1/30-2/5	2/11-7月	3/中旬-4/10	直後-3/17 2/10-3/13	2/1-2/9 2/10-3/13	自治体ごとに適宜	
目的	被災者に対する義援金の配分、固定資産税の減免措置、および復旧・復興施策のための被害実態把握								地震等により保険対象物に生じた損害処理	被災の全体像の把握と後の学術的貢献	被災建物の倒壊や落下物による危険性の防止、軽減	
評価基準	被害認定統一基準	被害認定統一基準	被害認定統一基準 及 固定資産評価基準	被害認定統一基準	被害認定統一基準	被害認定統一基準	被害認定統一基準(同神戸市)	津名郡で定められている基準	被害認定統一基準に基づく査定要項	—	震災建築物等の被災度判定基準及復旧技術指針	
評価方法	独自の調査票により判定	独自の調査票による百分率評価	独自の調査票による百分率評価	独自の調査票により3区分、必要により再評価	独自の調査票による百分率評価	独自の調査票による百分率評価	独自の調査票による百分率評価	0-7の8区分	調査票に従って百分率評価	調査票の定義(構造別)に従って判定	項目ごとにランクづけした後、総合的に評価	
判定項目及び定義	<p>全壊:住家が滅失したもので、住家の損壊焼失もしくは流失した部分の床面積がその住家の延べ面積の70%以上に達した程度のも、又は、住家の主要構造部の被害額がその住家の時価の50%以上に達した程度のもの</p> <p>半壊:住家の損傷が甚だしいが、補修すれば元通りに再利用できる程度のも、具体的には、損壊部分が、その住家の延べ床面積の20%以上70%未満のもの、又は、住家の主要構造部の被害額がその住家の時価の20%以上50%未満のもの</p> <p>一部破損:全壊および半壊に至らないもので、補修を要する程度のもの</p>								<p>7:もう取り壊してしまつた</p> <p>6:取り壊し予定である</p> <p>(屋根瓦、基礎、柱、内外壁の何れかが)</p> <p>5:2/3程度損壊</p> <p>4:1/2程度損壊</p> <p>3:少し損壊</p> <p>2:全体的に少し傷んでいる</p> <p>1:被害なし</p>	<p>全損:主要構造部損壊額が時価の50%以上、または焼失・流失部分が延床面積の70%以上</p> <p>半損:主要構造部損壊額が時価の20%以上50%未満、または焼失・流失部分が延床面積の20%以上70%未満</p> <p>一部損:主要構造部の損壊額が時価の3%以上20%未満</p>	<p>ランクC(全壊または大破):再使用不可</p> <p>ランクB(中程度の損傷):大幅な修理で再使用可能</p> <p>ランクA(軽微な損傷):軽微な損傷で使用可能</p> <p>無被害:見ために被害がない</p>	<p>危険:Cランクが一つでもある。(あるいはBランクが半数以上。)</p> <p>要注意:Cランクがなく、A及びBランクのみの場合。</p> <p>安全:全てがAランク。</p>
判定結果の区分	全壊/半壊/一部損壊/その他	全壊/半壊/一部損壊/その他	百分率	全壊/半壊/一部損壊	全壊/半壊/一部損壊/その他	全壊/半壊/その他	全壊/半壊/一部損壊/その他	0-7(8区分)	全損/半損/一部損/その他	ランクC/B/A/無被害	危険/要注意・安全	
90-100								6-7		ランクC		
80-90								5				
70-80	全壊									ランクB		
60-70								4				
50-60										ランクA		
40-50								3				
30-40	半壊											
20-30								2				
10-20	一部損壊							1		無被害		
0-10												
0	その他							0				
減免率	全壊(10割) 半壊(6割) 一部損壊(1割)	全壊(10割) 半壊(5割) 一部損壊(1割)	損害程度D(%) d≧80(10割) 80>d≧60(8割) 60>d≧40(6割) 40>d≧20(4割) 20>d≧10(2割) 10>d(1割)	全壊(10割) 半壊(5割) 一部損壊(1割)	全壊(10割) 半壊(5割) 一部損壊(2割)	全壊(10割) 半壊(5割) その他(1割)	全壊(10割) 半壊(5割) 一部損壊(1割)	6-7(10割) 4-5(6割) 2-3(4割) 0-1(減免なし)	全損(保険金額の10割) 半損(保険金額の5割) 一部損(保険金額の5割)			

2.3 建物被害調査の比較

ここでは自治体の実施した被害調査を対象として、明石市(1996)、神戸市(1996a)、西宮市(1996)、芦屋市(1997)、北淡町(1997)、伊丹市(1997)、宝塚市(1997)、尼崎市(1998)から発行されている報告書およびヒアリング等により、各調査の整理、比較検討を行った。表-2.1に調査の概要を示す。

調査方法に関しては、被災直後に職員が目視によって被災程度を判断し、その後住民による異議申し立てを受け、専門家等の協力を得て再調査を行ったという自治体が多かった。北淡町では被災者が自己申告し、必要に応じて職員が確認するという方法をとった。

北淡町以外の自治体による評価基準は、地震保険損害査定と同様、国の被害認定統一基準に従っているが、細かい評価方法については各自自治体に委ねられていたため、それぞれ独自の調査票に基づき評価された。西宮市では項目ごとのチェックをした後、調査員により全壊・半壊・一部損壊の判定が下された。伊丹市では調査員の主観により総合的に百分率で評価され、北淡町では自己申告制で8区分に評価された。その他の自治体では建物全体および部分ごとの被害項目により、設定された被害割合に基づく百分率で評価された。

以上の評価の結果、減免のための被害判定が行われた。表中にはその判定区分を百分率表示で示している。自治体および地震保険損害査定の中で、「被害額」をもとにしたものと「床面積」をもとにしたものと二重の判定が定義づけられている。日本損害保険協会(1980)の報告に、「床の被害面積だけから建物全体の損害を認定することは、立体物としての建物全体の損害を認定する方法としては問題がある。しかし、床面積による基準は査定技術上使い易く、一般常識からも容易に理解が得られるため、損害の性格上利用可能な『焼失』、『流失』の被害を受けた場合のみ使用する。」とある。これらの理由から国の基準に基づいている6市では、被害度評価の結果5割以上のものを全壊、2割以上5割未満の被害を半壊とし、減免措置を行っている。宝塚市では、被害率から直接減免措置を行っている。一部損壊については幾つかの違いが見られた。西宮市では全壊、半壊以外の建物も何らかの被害が発生していると判断し、全て一部損壊として判定しているのに対し、神戸市では、全壊、半壊以外の全ての建物に対してその他という判定を行った。したがって西宮市の一部損壊と神戸市のその他は同様の意味を持ち、減免率も同じである。震特委員会の判定についても、「被害率は、自治体の全壊と震特委員会のランクB以上、自治体の半壊以上と震特委員会のランクA以上がほぼ等しい」という次節に示す分析結果から、表中では仮の区分を行った。

表-2.2は各調査票の調査項目を整理し、比較したものである。調査項目は建物全体項目と部分項目とに大きく分かれており、建物部分の各項目について明確な区分はできないが、ここでは外観目視項目、内部項目、建物外工作物、その他の4つに分類している。構造別の比較では、非木造の方が木造よりも内部項目が多くなっている。非木造は木造に比べ倒壊率が少なく、自治体の判定は資産価値も含めた評価をする必要があるために、非木造の室内被害の比率を高くとっているものと思われる。調査主体ごとの比較では、応急危険度判定の項目数は多く、地震保険損害査定と震特委員会は外観目視に比重が置かれている。逆にほとんどの自治体で、室内被害も考慮されており、項目数は西宮が最も多く、北淡町が最も少ない。また宝塚、芦屋、神戸・明石では非木造の項目が木造よりも多くなっている。

表-2.3は調査項目内容を整理したものである。被害項目により被害割合が設定されているものについては判定比率を数字で示している。

伊丹，西宮，北淡町以外では構造別に調査票が分かれており，判定比率も異なっている。また応急危険度判定の調査内容が詳細に設定されていることがわかる。判定の流れとしては，ほとんどの自治体で最初に全体項目として全壊か否かを判定し，その上で部分別に被害割合を導き，全体の被害割合を計算しているのに対し，宝塚市では全体項目と部分項目を含めて全体の被害割合を判定している。

判定比率が設定されている自治体ごとの建物部分項目別の比率を図-2.2に示す。横線下は外観目視で判断できる部分，上は室内判定部分（表-2.2，表-2.3内*の項目）を示している（ただし壁の項目には内壁・外壁が含まれている）。木造の調査項目については7割以上が外観に関するもので，室内に関する比率は小さい。非木造については，外観に関する比率は木造よりも低く，仕上，建具，設備等室内に関する比率は3割から6割と木造の約2倍となっている。その理由は先にも述べた通り，非木造の倒壊率の低さと，自治体による建物被害判定が資産価値としての評価を含んでいることなどが考えられる。

表-2.2 建物被害調査項目の比較

a.木造			伊丹市 *	尼崎市	宝塚市	西宮市 *	芦屋市	神戸市 明石市	北淡町 *	地保損 害査定	震特 委員会	危険度 判定	
建物全体			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
建物部分	外観 目視 項目	基礎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		床	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	
		柱	-	○	-	○	○	○	-	○	○	○	
		梁	-	-	-	○	-	○	-	○	○	○	
		屋根	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	外壁	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	内部 項目	階段*	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	
		天井*	-	○	-	○	○	-	-	-	-	○	
		内壁	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	
		仕上*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	
		建具*	-	○	○	○	-	-	-	-	○	○	
		風呂・トイレ*	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	
		照明器具等*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○
		電気*	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-
	ガス*	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	
	水道*	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	
建物外 工作物	塀	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
	門柱	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
その他	その他*	○	○	○	○	○	○	-	-	○	○		

b.非木造			伊丹市 ※	尼崎市	宝塚市	西宮市 ※	芦屋市	神戸市 明石市	北淡町 ※	地保損 害査定	震特 委員会	危険度 判定	
建物全体			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
建物部分	外観 目視 項目	基礎	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		床	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		柱	-	○	○	○	○	○	-	○	○	○	
		梁	-	-	○	○	○	-	○	○	○	○	
		屋根	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
	外壁	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	内部 項目	階段*	-	-	○	○	○	-	-	-	-	-	○
		天井*	-	-	-	○	○	-	-	-	-	-	○
		内壁	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	
		仕上*	-	○	○	-	○	-	-	-	-	-	○
		建具*	-	○	○	○	○	○	-	○	○	○	
		風呂・トイレ*	-	-	○	-	○	○	-	-	-	-	○
		照明器具等*	-	-	○	-	○	○	-	-	-	-	○
		電気*	-	-	○	○	○	○	-	-	-	-	○
	ガス*	-	-	○	○	○	○	-	-	-	-	○	
	水道*	-	-	○	○	○	○	-	-	-	-	○	
建物外 工作物	塀	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	
	門柱	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	
その他	その他*	○	○	○	○	○	○	-	-	○	○		

※の自治体は木造・非木造の区別なし
*は室内判定比対象項目

第2章 兵庫県南部地震における建物被害調査の比較検討

表-2.3 建物被害調査項目の内容と判定比率

構造別	伊丹市		尼崎市		宝塚市		西宮市		芦屋市		神戸市 明石市		津名郡北 淡町		地震保険損害査定		震特委員会		応急危険度判定				
	×		○		○		×		○		○		×		○		○		○				
	木造		非木造		調査表Ⅰ		調査表Ⅱ		木造		S/R/C		木造		非木造		木造		S/R/C		木造		S
建物全体項目	使用の可否/傾斜	倒壊/傾斜の有無/撤去の状況	倒壊/傾斜の有無/撤去の状況	倒壊/傾斜の有無/撤去の状況	20 倒壊/傾斜の有無/撤去の状況	15 倒壊/傾斜の有無/撤去の状況	傾斜の有無	全体傾斜	全体傾斜	使用の可否	使用の可否	使用の可否/撤去の状況	傾斜/変形	沈下、傾斜の有無	使用の可否/傾斜の有無/撤去の状況	使用の可否/傾斜の有無/撤去の状況	不同沈下/傾斜/内装の亀裂、剥落/落下物危険性	不同沈下/傾斜	不同沈下/傾斜	不同沈下/傾斜			
建物部分項目 (*は室内判定比の対象項目)																							
主要構造	基礎/陥没/亀裂	30 (20) 基礎、床(亀裂/剥落、沈下)(10)柱(損傷、傾斜、ずれ)	50 (10) 基礎(40)屋根、壁体、床、柱	10 基礎/沈下、ひび割れ	25 被覆コンクリートの脱落/主筋の露出/亀裂	基礎柱軸組	30 (20) 基礎(10)柱	60 基礎/柱/梁/耐震壁/その他	20 基礎/柱/床組	40 基礎/躯体	基礎/柱	柱、小屋組の損傷、変形/基礎のひび割れ、沈下	柱のひび割れ/柱頭・柱脚のくずれ	基礎/破断、モルタルの剥離、ひび割れ/柱/破断	基礎/破断/柱梁/破断/座屈/柱脚/アンカーの破断/沈下	基礎/移動、破断、ひび割れ、沈下/床組/落下、脱落、ずれ/軸組/損傷、割れ、たわみ	屋根の有無/筋交いの破断率/継手/柱脚の破損/脚部の有無	ラーメン構造の外周柱、内柱の被害/壁式構造の内装の被害					
屋根	棟瓦、平面瓦のはがれ/屋根のうねり	20 屋根瓦のゆるみ	主要構造を含む	20 ゆるみ/うねり	-	瓦のずれ	20	-	20 棟瓦の損傷/瓦のゆるみ	24	屋根瓦の落下	屋根の破損、ずれ/屋根瓦の落下	-	屋根の破損/屋根瓦の落下	-	小屋組の破損/瓦のずれ、落下、破損	-	庇、バルコニー、パラペットの傾斜					
壁	亀裂/剥落	40 亀裂/剥落、浮き上	-	25 (10) 外壁(15)内装(亀裂/剥落)	10 外壁の亀裂、剥落	外壁	35 外壁、内装	7	60 亀裂、浮き上/剥落	-	外壁/内装	外壁の剥離、剥落、湾曲	外壁のひび割れ、剥離/目地のずれ	外壁の剥離、剥落	外壁の剥離、剥落	軸組壁の変形/ボンド、土塗壁の剥離、のめり込み	亀裂、剥離	外装材の亀裂、ずれ					
階段*	-	-	-	-	10	階段	10	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	内部/屋外階段の傾斜					
天井*	-	屋根を含む	-	-	-	梁天井	屋根を含む	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	落下危険性	仕上落下危険性				
内装仕上	-	壁を含む	35 亀裂/剥落	壁を含む	15 室内の損傷、亀裂	内装	壁を含む	3	-	屋根を含む	壁を含む	-	-	-	-	仕上材の脱落、浮き上げ	間仕切り	間仕切りの倒壊、転倒	間仕切りの倒壊、転倒				
床*	-	-	-	-	-	柱床	基礎を含む	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ひび割れ/たわみ、むくり	-				
建具*	-	10	15	10 骨組の骨折/建付けの不良	10 建具の損傷/わい曲	扉窓等	-	7	-	屋根を含む/ガラスの全損	-	-	-	窓ガラスの破損	ガラス窓の落下	-	建具、サッシの破損	開口部、窓ガラスの破損	窓ガラスの破損				
設備*	-	-	-	5 風呂WCの損傷	5	電気ガス上下水道設備	-	7	-	36	-	-	-	-	-	-	-	照明器具の落下危険	照明、屋上広告塔等の傾斜/電気/ガス/水道/便所				
その他*	扉、門柱、門扉/倒壊/亀裂	-	-	10	10	-	5	3	-	-	-	-	-	隣接建物や電柱の倒れ込みによる破壊など	-	-	-	その他	ブロック塀等の傾斜/隣接建築物倒壊危険性				

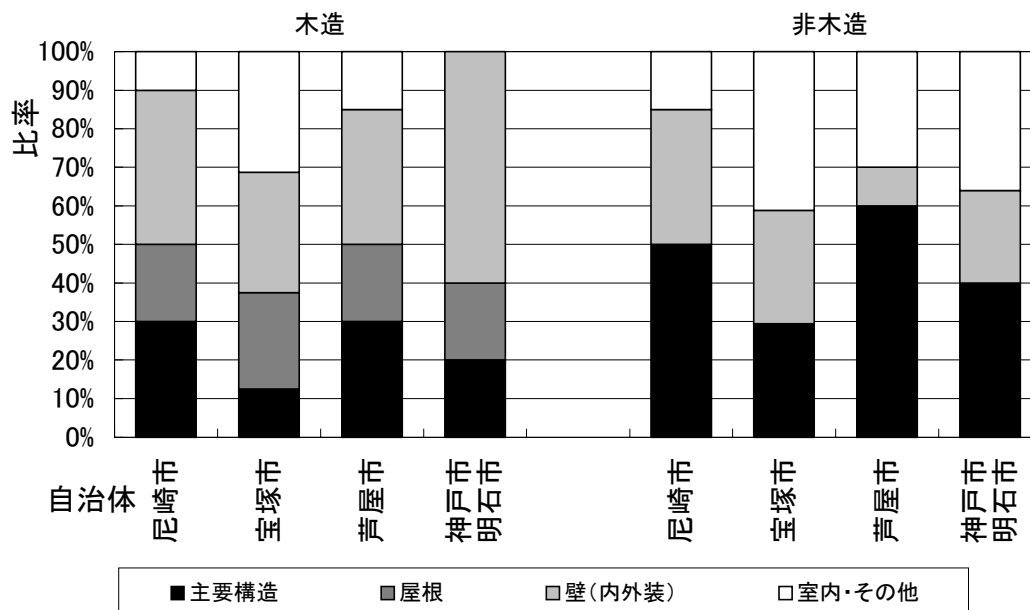


図-2.2 自治体ごとの建物部分項目別判定比率の比較

2.4 建物被害判定の比較

これまでに行ってきた杉浦・山崎（1996）、後藤・山崎・佐藤（1996）、村尾・山崎（1997b）、後藤・山崎・若松・浅野（1997）、杉浦・山崎（1997）、山口・山崎・若松（1997）による自治体の建物被害分析結果と建設省建築研究所（1996）によって報告された震特委員会調査、および地震保険損害査定調査結果（損害保険料率算定会から提供されたデータ）の比較を、表-2.4 と図-2.3 に示す注2）。ただし、宝塚市（1997）では表-2.3 のように全体項目を含めた損害率で判定しているため、全壊を70%以上の損害、半壊を20%以上70%未満の損害として用いている。また震特委員会調査の「ランクC」、「ランクB」、「ランクA」、「無被害」および地震保険損害査定調査の「全損」、「半損」、「一部損」、「その他」を、ここでは「全壊」、「半壊」、「一部損壊」、「その他」として扱った。

ほとんどの自治体で全壊率、全半壊率が、震特委員会<自治体<地震保険支払の順になっている。震特委員会と自治体を比較すると、西宮市以外では震特委員会の全半壊率と自治体の全壊率とがほぼ等しく、宝塚市、西宮市以外では震特委員会の一部損壊以上と自治体の全半壊率が概ね等しくなっている。自治体と地震保険損害査定とを比較すると、伊丹、尼崎、宝塚の3市と灘区での全壊同士がほぼ等しく、全半壊同士では伊丹、尼崎、西宮、芦屋の4市で地震保険損害査定の方がやや高く、灘区ではほぼ等しいという傾向を示した。

図-2.4 は自治体と地震保険損害査定の木造、非木造別判定結果の比較である。木造は全建物とほぼ同様の傾向を示し、非木造については全壊率、全半壊率とも地震保険の方が高くなっており、伊丹、尼崎、芦屋の3市でその傾向が特に著しい。

ここでは震特委員会および地震保険損害査定を基準とした各自治体による判定結果の比較を行い、被害割合が設定されている尼崎、宝塚、芦屋の3市と灘区について室内判定比（階段、仕上・室内、建具、設備他の比率）との関係を調べた。

(1) 地震保険損害査定調査との比較

まず地震保険損害査定と自治体について以下の比較を行った。

比較 It	（全建物：自治体の全壊	地震保険損害査定の全壊）
比較 It	（全建物：自治体の全半壊	地震保険損害査定の全半壊）
比較 Iw	（木造：自治体の全壊	地震保険損害査定の全壊）
比較 Iw	（木造：自治体の全半壊	地震保険損害査定の全半壊）
比較 Is	（非木造：自治体の全壊	地震保険損害査定の全壊）
比較 Is	（非木造：自治体の全半壊	地震保険損害査定の全半壊）

図-2.5 にその結果を示す。全建物 It と木造 Iw では、それぞれ傾きがほぼ1であったが、全半壊同士の相関は $R^2=0.173, 0.255$ と低かった。非木造 Is では、とも相関が低く、ばらつきが見られた。全体として木造よりも非木造の方が、また よりもの方が相関が悪い。図中には室内判定比をシンボルの大きさと表している。地震保険損害査定の棟数が自治体調査に比べ1桁少ないことも関係していようが、室内判定比が相関の低さに影響を与えていると思われる。

(2) 震災復興都市づくり特別委員会との比較

次に図-2.3より自治体の全壊判定と震特委員会の全半壊判定，全半壊判定と一部損壊以上判定がほぼ等しいという前提に基づき，6市についての分析を行った．震特委員会の調査では木造，非木造の区別がないため，全建物について以下の比較を行った．

比較 St (全建物：自治体の全壊 震特委員会の全半壊)

比較 St (全建物：自治体の全半壊 震特委員会の一部損壊以上)

図-2.6に St , St の比較とそれぞれの分布の近似直線を示す．

近似直線の傾きは1.00, 0.99とほぼ1に等しいが，St の方は $R^2=0.142$ と相関が低かった．St にも室内判定比の高いものがあるが，こちらはほぼ近似直線上に位置している．St は St よりも被害の大きいもの同士の比較であるため，地震動が大きい，あるいは構造的に弱いという理由で建物が倒壊・大破している確率が高い．そのような時，室内判定比に関わらず全壊（自治体判定）または全半壊（震特委員会判定）と判定される．このような理由から室内判定比により影響を受け，相関の低くなってしまっているのは，St よりも St の方であるということが出来よう．

(3) 室内判定比との関係

ここでは自治体と震特委員会との比較結果を用いて，室内判定比との関係を分析した．図-2.7に比較 St , 比較 St における被害率の震特委員会比と室内判定比（各地域の木造，非木造棟数を重みとした平均値）の比較を示す．プロットしてある位置は1.00から離れているほど自治体と震特委員会とのずれが大きいことを表している．ずれの最も大きい宝塚市で室内判定比も高くなっていることがわかる．近似直線を求めた結果，St よりも St の方に高い相関（ $R^2=0.87$ ）が見られた．建物被害が大きい時は，調査方法に関わらず被害度は高いと判定されるが，建物被害が小さい時は外観による調査だけでは全体像を把握できず，室内判定比の大きさと判定結果とが密接に関係していることを示している．

これらのことから以下のことが言える．

全建物に関して，自治体の全壊判定は，震特委員会の全半壊，地震保険損害査定の全壊とほぼ等しい．

木造に関して，自治体の全壊判定は，地震保険損害査定の全壊とほぼ等しい．

被害が比較的小さい時（木造よりも非木造，全壊よりも半壊の時），自治体の建物被害調査における室内判定の比率が，判定結果に大きな影響を与えている．

表-2.4 各地域の建物被害判定の比較

地域	判定主体	全壊	半壊	一部損壊	その他	合計
伊丹市	震特委員会	720	2,000	12,946	25,487	41,153
	自治体	2,023	8,516	18,658	3,117	42,319
	地震保険損害査定	73	351	507	189	1,120
尼崎市	震特委員会	993	3,454	21,925	63,154	89,526
	自治体	5,601	27,341	32,111	52,250	117,303
	地震保険損害査定	286	1,081	1,676	841	3,884
宝塚市	震特委員会	1,530	2,066	9,122	25,703	38,421
	自治体	5,814	19,728	12,815	7,258	45,615
	地震保険損害査定	208	518	848	341	1,915
西宮市	震特委員会	9,307	7,745	17,355	35,501	69,908
	自治体	13,342	15,078	52,662	-	81,082
	地震保険損害査定	1,012	898	1,534	689	4,133
芦屋市	震特委員会	2,932	1,558	3,438	5,681	13,609
	自治体	4,797	4,222	4,780	1,979	15,778
	地震保険損害査定	523	333	380	81	1,317
灘区	震特委員会	5,562	2,927	5,733	7,419	21,641
	自治体	13,198	6,053	-	11,293	30,544
	地震保険損害査定	610	361	413	172	1,556

(単位：棟)

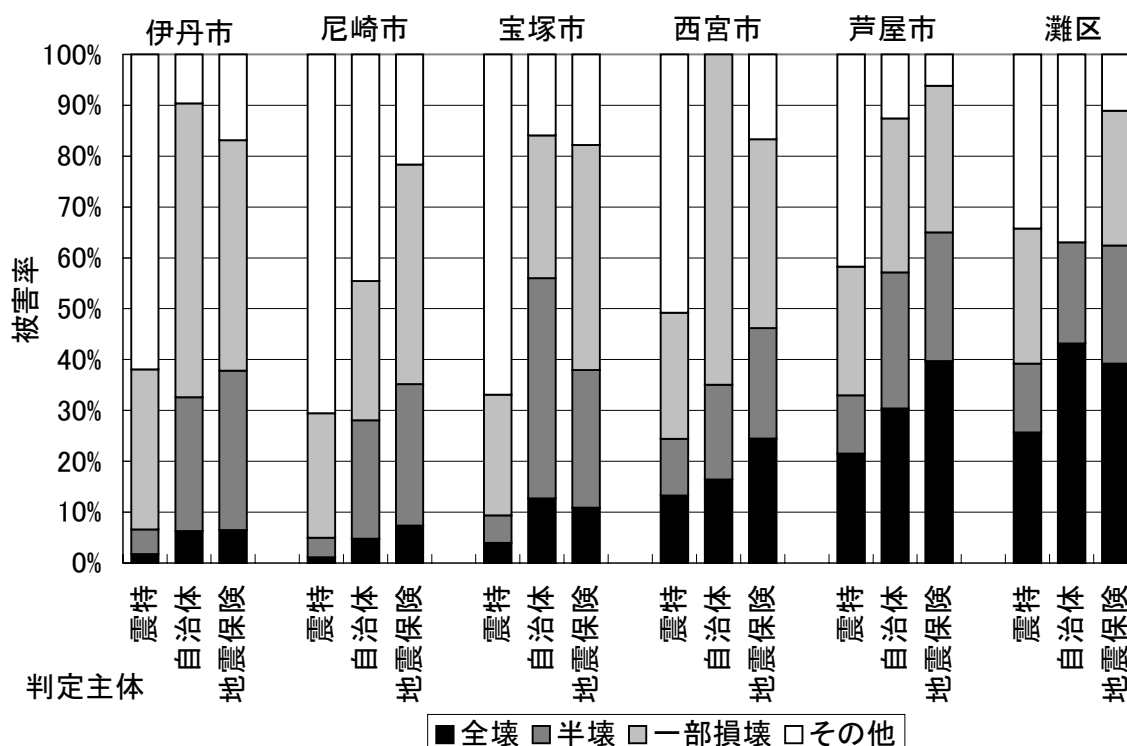


図-2.3 各地域の建物被害率の比較

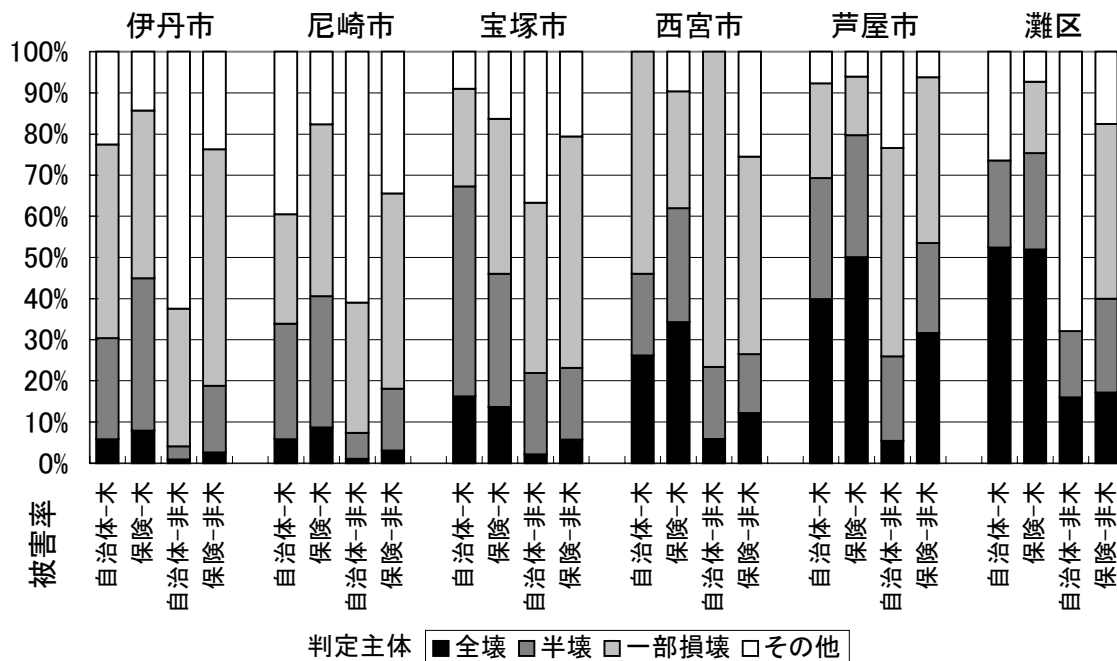


図-2.4 構造別の建物被害率の比較

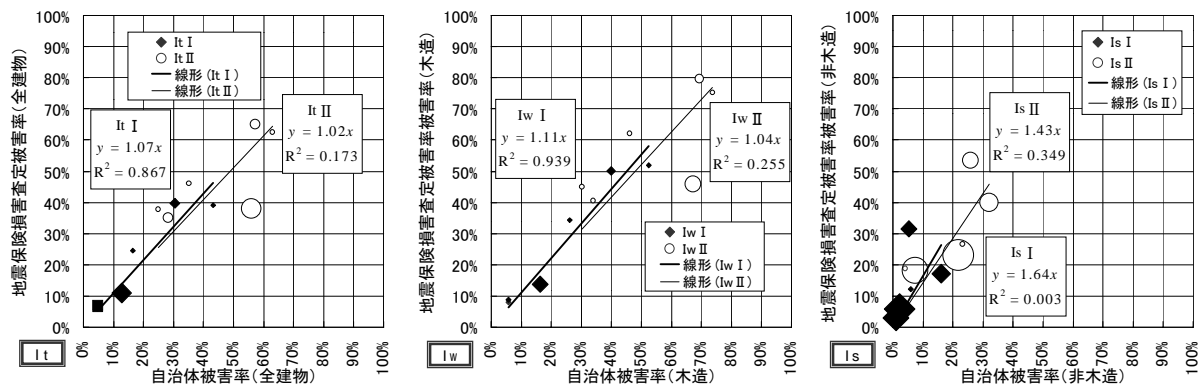


図-2.5 自治体調査と地震保険損害査定との建物被害率比較
(シンボルの大きさは室内判定比を表している)

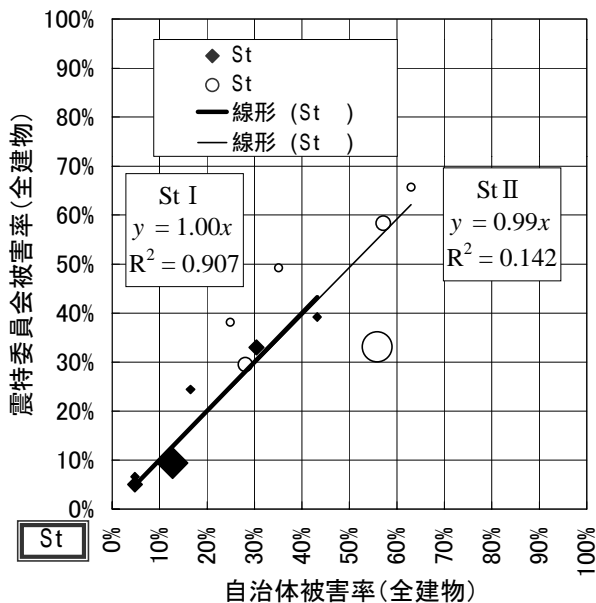


図-2.6 自治体と震特委員会調査による被害率比較 (全建物)

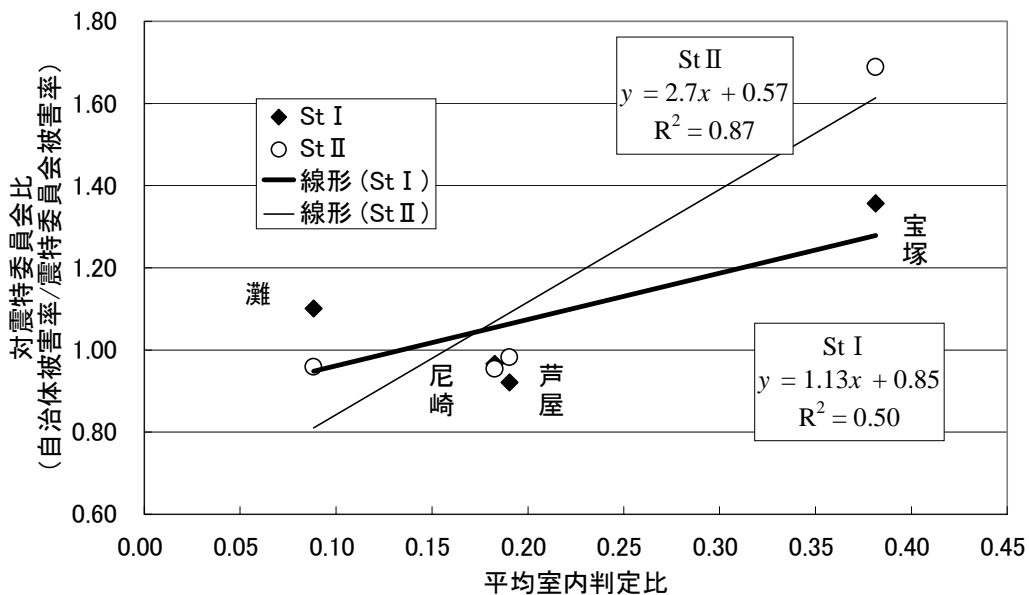


図-2.7 自治体と震特委員会の被害率の比と室内判定比の関係

2.5 自治体による建物被害調査と建築コストとの比較

自治体による建物被害調査は建物の資産的価値の損失度を見積もるという趣旨で行われるため、建築コストとの比較を行った。

表-2.5は、建築知識(1997)の報告に基づき、木造、非木造(S造、RC造)の矩形平面、2階建住宅を想定し、建築総工費(仮設工事を除く)に対する項目ごとの比率を各工事から計算したものである。工事費はここで分類した調査項目ごとに厳密に分けられるものではないが、大まかな傾向をつかむという目的では有効かと思われる。

被害割合が設定されている自治体の建物部分に関する項目を、表-2.5と同様に4種に分類し、木造、非木造ごとの実際の建築コストと比較したものを図-2.8に示す。木造については、主要構造が実際のコストの1/4から1/2、屋根、内外装・仕上は実際よりも高い比率となっている。全体的に木造は非木造に比べコストとの差が著しく大きくなっている。

次に構造ごとの建物部分項目の対建築コスト比を図-2.9に示す。木造に関しては、屋根が約5倍(平均値)と著しく高くなっている。この理由として屋根工事費が主に瓦等にかかる工事費であるのに対し、自治体の判定は瓦・構造も含む屋根全体の被害を見積もっているためと思われる。主要構造と内外装・仕上は約2倍である。一方、S造、RC造は、平均値が共に0.5から1.5の範囲になっており、コストとの差異が小さくなっている。

自治省固定資産税課(1997)によれば、建物としての資産価値は経年劣化によっても評価されるが、建築コストに限って言えば、「資産的な側面から建物被害を評価した場合、自治体による調査は木造よりも非木造の方が建築コストを適切に反映している」と言えよう。しかし、芦屋市の被害調査票作成に関与した東京大学生産技術研究所の中埜良昭助教授によれば、兵庫県南部地震後の調査票作成の段階では時間も限られており、比率の決定は必ずしも厳密な論理に基づいているわけではない。したがって本分析に基づき建築コストを考慮した調査票を提案することは、重要であろう。

表-2.5 工事費の比率（単位：％）

主要構造	工事種類	木造		S造		RC造	
		比率	コスト	比率	コスト	比率	コスト
主要構造	基礎工事	5.7	50.5	-	28.6	-	42.6
	木工事	44.8		-		-	
	土工事	-		2.8		2.1	
	地業工事	-		-		2.1	
	型枠工事	-		3.4		-	
	鉄筋工事	-		2.5		8.5	
	コンクリート工事	-		3.9		29.8	
	鉄骨工事	-		15.9		-	
	屋根	屋根工事	3.1	4.4	-	-	-
	板金工事	1.3		-		-	
内外装・仕上	外壁工事	8.7	22.9	16.5	48.9	-	37.2
	内装工事	11.6		11.4		9.6	
	木工事	-		10.2		14.9	
	防水工事	-		1.8		4.3	
	屋根工事	-		3.7		-	
	左官工事	1.2		3.2		6.4	
	塗装工事	1.5		2.2		2.1	
	室内・その他	雑工事	2.8	22.2	3.9	22.5	1.1
	タイル工事	2.7		0.5		1.1	
	金属工事	-		3.4		2.1	
	金属建具工事	10.3		9.0		8.5	
	木製建具工事	4.9		2.8		5.3	
	ガラス工事	1.6		2.9		2.1	
計		100	100	100	100	100	100

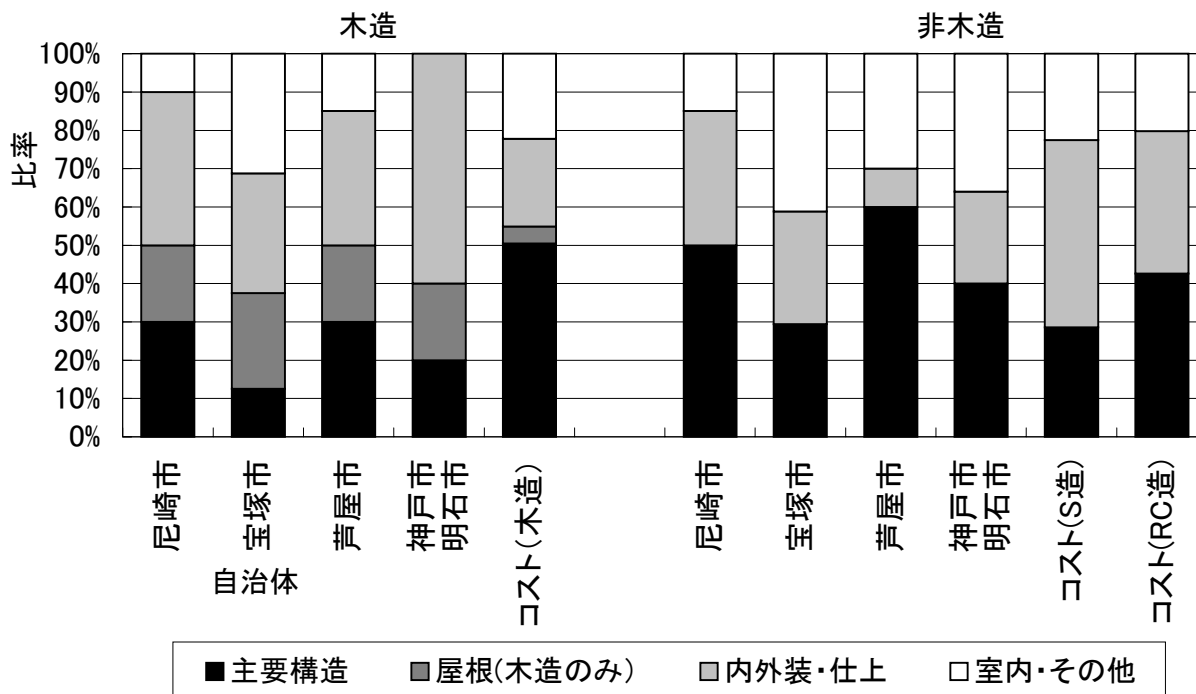


図-2.8 自治体判定における建物部分項目別比率と建築コストの比較

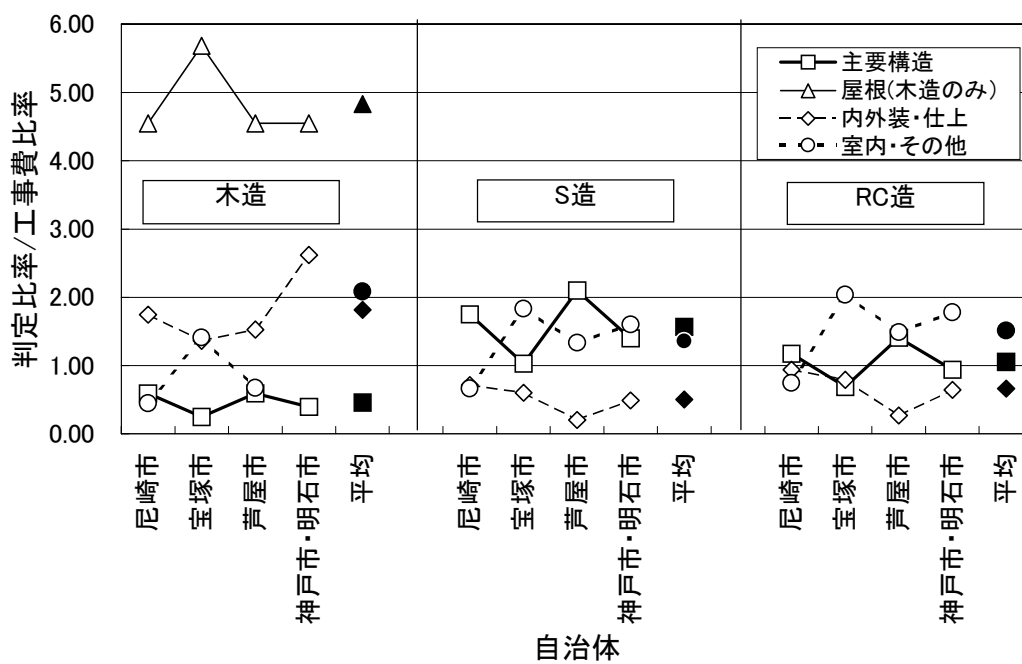


図-2.9 自治体判定における建物部分項目の対建築コスト比

2.6 建物被害調査票の提案

最後に本章の分析結果と兵庫県南部地震後に使われた自治体の調査票を参考にして、大地震発生時の自治体による建物被害調査票を図-2.10、図-2.11のように提案する。以下に設計のプロセスを示す。

木造，非木造と別々の調査票に分けた。非木造の内，RC造，S造と分けることも可能であるが，今回は同一の調査票とした。

評価にばらつきが出ないように，調査者二人分の欄を作った。

2段階評価（ ， ）とし，効率化を図った。また兵庫県南部地震後には修復可能な建物まで取り壊してしまったため復興の妨げになってしまったことから，全壊，半壊，一部損壊，その他に加え，倒壊（修復不能）という判定項目を追加した。

客観的に調査できるよう各部位の構成比を設定した。ただし時間的制限の中で多数の調査を行う必要があり，また建物被害という性格上，現実的に厳密な客観性を持たせるのは難しいため，簡便な方法を用いた。構成比は基本的に表-2.5，図-2.8をもとに決定した。木造屋根については工事費の対象部分以外も破壊されることを考慮して少し高めの16に設定した。また屋根，基礎・床，柱・軸組の合計で48と全体の約半分になるようにした。

非木造の構造部分は致命的な損傷となるためコストよりも高めに設定し，主要構造部（上2段）で48と約半分になるようにした。RC造とS造は内外装にかかるコスト比が異なるため構成比を変えた。

神戸・明石市，尼崎市の調査票に則り，損害の程度を25%刻みに設定し，無被害から大破の5段階とした。

簡便な方法を用いることにより発生する被害判定の著しい格差を補正するため，微調整部分（その他）を12%設けた。

損害割合合計から判定結果が出しやすいように配置した。

焼失（神戸・明石市の調査票に則る），再調査による変更にも対応できるようにした。（備考欄，最終調査結果）

地震保険損害査定に則り，一部損壊を被害率を用いて定義した。

建物被害状況調査票（木造）

整理番号 _____

調査者(1) 所属 _____ 氏名 _____
 調査者(2) 所属 _____ 氏名 _____
 立会者 申請者本人，本人以外（所属 _____ 氏名 _____）
 調査日時 年 月 日 時 分 ~ 時 分

申請者名 （世帯主等）			
住所		電話	
連絡先		電話	
家屋	自宅・借家・社宅等	一戸建・集合住宅	在来木造・木造ﾌﾟﾚﾌﾞ・2×4
	集合住宅名（ _____ ） 階 号室 / 階建 / 竣工（ _____ 年 月）		

建物全体の状況（いずれかを選ぶ）
 1．解体または撤去済み， 2．倒壊， 3．傾斜有 倒壊（修復不能）
 4．その他 へ進む

建物損害割合判定表

部位	構成比	内容	損害の程度				
			無被害	軽微	小破	中破	大破
屋根	16	瓦のゆるみ・落下，屋根のうねり・損傷	0	4	8	12	16
外壁	8	亀裂，剥落，浮上	0	2	4	6	8
内壁	12	亀裂，剥落，浮上	0	3	6	9	12
基礎・床	16	陥没，沈下，亀裂	0	4	8	12	16
柱・軸組	16	傾斜，損傷，割れ，たわみ	0	4	8	12	16
建具	20	建付け不良，ガラス等の損傷・落下	0	5	10	15	20
その他	12	設備器具，階段，その他の全体的な調整	（ _____ ）				
合計	100	（ _____ ）%	結果	全壊	半壊	一部損壊	その他

備考欄	最終調査結果 年 月 日現在 倒壊 全壊 半壊 一部損壊 その他
（焼失の場合： 全焼， 半焼）	

判定基準：全壊（50%以上），半壊（20%以上50%未満），一部損壊（3%以上20%未満），その他（3%未満）

図-2.10 建物被害状況調査票（木造）

建物被害状況調査票（非木造）

整理番号 _____

調査者(1) 所属 _____ 氏名 _____
 調査者(2) 所属 _____ 氏名 _____
 立会者 申請者本人，本人以外（所属 _____ 氏名 _____）
 調査日時 _____年__月__日 _____時__分～_____時__分

申請者名 (世帯主等)			
住所		電話	
連絡先		電話	
家屋	自宅・借家・社宅等	一戸建・集合住宅	RC・SRC・S・軽量S造・ブロック造
	集合住宅名(_____) 階 号室 / 階建 / 竣工(_____ 年 月)		

建物全体の状況（いずれかを選ぶ）
 1．解体または撤去済み，2．倒壊，3．傾斜有 倒壊（修復不能）
 4．その他 へ進む

建物損害割合判定表

部位	構成比	内容	損害の程度 ()内はS，軽量Sの場合				
			無被害	軽微	小破	中破	大破
柱・梁 耐震壁	32	傾斜，損傷，座屈，亀裂， 主筋の露出	0	8	16	24	32
基礎	16	陥没，沈下，亀裂	0	4	8	12	16
外装	8(12)	亀裂，剥落，浮上，ずれ	0	2(3)	4(6)	6(8)	8(12)
内装	12	室内の損傷，亀裂，倒壊	0	3	6	9	12
建具	12	建付け不良，ガラス等の 損傷・落下	0	3	6	9	12
設備等	8(4)	設備器具，階段	0	2(1)	4(2)	6(3)	8(4)
その他	12	その他全体的な調整	()				
合計	100	()%	結果	全壊	半壊	一部損壊	その他

備考欄 (焼失の場合：全焼，半焼)	最終調査結果 _____年__月__日現在 倒壊 全壊 半壊 一部損壊 その他
--------------------------------------	---

判定基準：全壊（50%以上），半壊（20%以上50%未満），一部損壊（3%以上20%未満），その他（3%未満）

図-2.11 建物被害状況調査票（非木造）

2.7 まとめ

自治体という公的な立場からの建物被害評価法を提案するために、兵庫県南部地震後に実施された建物被害調査の内容を整理・分析した。各自治体で行われた調査は国の統一基準に基づいてはいるが、大災害を想定した調査法が確立されていなかったため、自治体ごとに調査内容が異なり、同じ判定結果であっても全壊や半壊等の意味が異なることが分かった。今後も被災度合の尺度や、地震被害想定等でこれらの用語が使われるであろうが、どの調査結果に基づくものなのか、また予測結果をどのような目的に使用するかなどを考慮し、用語を慎重に使い分ける必要がある。また自治体による調査は他調査と異なり、建物内部も考慮したものであり、判定結果に大きな影響を与えていた。さらに自治体による調査は建物を資産価値として評価するという趣旨で行われるため、建築コストとの比較も行った。以上の結果をふまえ、資産価値を評価する自治体という公的な立場からの建物被害調査票を提案した。これは倒壊・傾斜の状況だけを即座に調査することにより、資産価値評価だけではなく地震直後に必要な被害実態の把握にも有効であると思われる。

阪神・淡路大震災での経験を生かし、政令等により全国で統一された評価法が規定されれば、調査方法の違いによる判定結果のばらつきや、それによる住民の不公平感等の問題も解消されるであろう。

3.1 はじめに

地震による建物被害の程度を表すひとつの尺度として「全壊率」や「全半壊率」が用いられることが多い。それらは今後の防災における貴重な記録としてだけでなく、被害推定式の重要なパラメータとして被害想定等にも使われる。しかし一口に「全壊」、「半壊」と言っても、その定義は調査によって異なっており、それらを使用する際には注意が必要である。

国土庁(1998)によれば、1995年1月に発生した兵庫県南部地震による住家被害は、全壊約10万5千棟、半壊約14万4千棟という多大な住家被害を受けた。被災地ではそれぞれ異なる目的で、保険金支払のための「地震保険損害査定調査」、震災復興都市づくり特別委員会による被災記録のための「被害実態緊急調査」、二次災害防止のための「応急危険度判定調査」、自治体による減免および義援金補助のための「家屋被害調査」など、いくつかの建物被害調査が実施されたが、第2章で示したように、方法および判定基準はそれぞれ異なっており、判定結果に大きな影響を与えていたと思われる。本章ではその中から、自治体による減免および義援金補助のための「家屋被害調査」と、日本都市計画学会関西支部および日本建築学会近畿支部都市計画部会を中心として構成された震災復興都市づくり特別委員会(1995)(以下「震特委員会」)が実施し、(建設省建築研究所,1996)がデータ化した被災記録のための「被害実態緊急調査」を取り上げ、比較分析を行った。前者は被災者救済のために政府の通達(内閣官房審議室1968「被害認定統一基準」)に基づき、国から義務づけられているもので大地震時には必ず実施されるが、家屋の資産的価値の損失度を見積もることが主たる目的であるため、実際の建物の被害評価という点では緩い基準となっている。一方後者は、阪神・淡路大震災の全体像の把握と今後への学術的貢献を目的として実施された調査である。主に建物が再使用可能かどうかという視点から建物被害評価を行っており、建築工学・土木工学・都市計画に関わる専門家とそれらの分野を専攻する学生等によって実施されているため、都市防災という観点からすると大変貴重な資料である。被災地域の地震動の面的分布推定には、翠川・藤本(1996)のように墓石転倒調査から求めることができるが、林・宮腰・田村・川瀬(1997)のように広域にわたって同一の基準で判定されているこの建物被害調査を用いて求めることも可能である。しかし、このような調査が今後の大地震時に必ず行われるという保証はない。したがって各自治体によって今後も確実に実施されるであろう「家屋被害調査(建築年・構造等を含む詳細データ)」から、兵庫県南部地震時に震特委員会等が行ったような建物被害判定に変換する評価式を構築しておくことは、今後フラジリティカーブの作成や防災的な都市計画を進めるうえで大いに役立つと思われる。

本章では上で述べた評価変換式の構築を目的として、芦屋市における特定地域の一棟一棟の建物を対象として、自治体と震特委員会による建物被害調査の判定結果を比較し、さらに推定される地震動との関係を分析している。

3.2 芦屋市における建物被害判定結果の比較

(1) 建物被害調査の概要

以下に本章で対象とした建物被害調査の概要を示す。

被災者に対する義援金の配分および固定資産税の減免措置は、各自治体によって実施される「家屋被害調査」の判定結果によって行われる。芦屋市（1997）では「被害認定統一基準」に基づき作成された独自の被害調査票をもとに、数回にわたる調査を実施した。

一方、震災復興都市づくり特別委員会（1995）による被害実態緊急調査は、日本都市計画学会学術委員会と日本建築学会都市計画委員会の間で、淡路島から阪神地域数十キロメートルに及ぶ市街地の、建築物被災の全体像を客観的にデータ化することを目的として実施された。構造種別は明らかでないが、阪神地域というかなり広い範囲での調査である。判定基準は修理・再利用可能性の観点から設定されており、建物の被災度評価は、外観の目視により、ランク C：全壊または大破（以下「大破」）、ランク B：中程度の損傷（以下「中破」）、ランク A：軽微な損傷（以下「軽微」）、無被害の4段階で評価している。

表-3.1 に芦屋市と震特委員会による調査内容の比較を示す。芦屋市の調査は建物の資産的価値の損失度を見積もるという側面も含まれているため、建物内部の床・階段・建具・設備等も評価対象となっているのに対し、震特委員会の方は目視による外観調査であるため、建物内部は調査対象から外れている。

筆者らの研究グループでは、杉浦・山崎（1996）による宝塚市、後藤・山崎・佐藤（1996）による芦屋市、村尾・山崎（1997a）による神戸市灘区、後藤・山崎・若松・浅野（1997）による尼崎市、杉浦・山崎（1997）による伊丹市、山口・山崎・若松（1997）による西宮市等、これまでに兵庫県南部地震における建物被害分析を行ってきたが、ほとんどの地域で自治体の方が震特委員会の判定基準よりも緩くなっている。

表-3.2、図-3.1 に芦屋市におけるによる自治体調査（後藤・山崎・佐藤，1996）と震災復興都市づくり特別委員会（1995）による調査の建物被害棟数と被害率の比較を示す。ただし両調査には、目的、調査地域、対象建物等に違いがあるため、合計棟数は異なっている。この結果から、概して芦屋市の全壊は震特委員会の中破以上、芦屋市の全半壊は震特委員会の軽微以上とほぼ等しいと仮定できる。本章で一棟一棟の判定結果を比較することにより、より詳細な傾向を見いだすことが可能であろう。

(2) 研究の方法

研究を進めるにあたり、芦屋市内で被害の大きかった住宅地区を15のエリアに区分し、分析対象地域とした（図-3.2）。各エリアの建物棟数と町名を表-3.3に示す。この中で臨海部にあるN、Oの2エリア（芦屋浜）は地震動よりも液状化による被害が多発した地域であり、また高層集合住宅が多いために比較的木造建物比が小さく、他エリアとは異なった特性を持っている。以上の15エリアについて、芦屋市（1997）による建物被害状況図と震災復興都市づくり特別委員会（1995）による被災度別建物分布状況図を見比べ、対応のついた12,138棟の建物の被害判定結果注2)を比較し、エリアごとの分析を行った。ただし、芦屋市が実施した建物被害調査では全壊・半壊・一部損壊・その他の4区分となっているが、参照した建物被害状況図上では一部損壊・その他の区

分がつけられていなかったため、本章では芦屋市の判定結果を全壊・半壊・その他の3区分として分析した。

(3) エリアごとの建物被害判定結果の比較

対象地域全域での判定結果と芦屋市による建物被害判定に占める震特委員会判定の比率を表-3.4、図-3.3に示す。全壊判定の中では大破が、半壊判定の中では軽微が、その他判定の中では無被害がそれぞれ63%、47%、77%を占めている。また全壊判定の中に無被害が4.5%、その他判定の中に大破が0.6%と正反対の判定も含まれていた。

建物被害調査の判定結果をGIS上に表示し、比較したものを図-3.4に示す。液状化の激しかった臨海2エリアを除き、全体的に震特委員会の中破以上が芦屋市の全壊判定に近く、また軽微以上が全半壊判定に近い傾向を見せている。

図-3.5は芦屋市による建物被害判定ごとの震特委員会判定の内訳である。全壊と判定された建物の中には大破の判定が多く見られるが、特に震度7の帯(図-3.2)の中でその傾向が特に高い。臨海2エリアの内エリアNでは全壊棟数が0であり、エリアOでは芦屋市により全壊と判定されていた建物が軽微な損傷とされているのがわかる。また芦屋市によりその他と判定された建物の大半は無被害と判定されており、震度7の帯から離れたエリアでその傾向が高くなっている。以上のことから芦屋市による判定と震特委員会による判定の対応は地震動の強さとも関係がありそうである。

半壊判定は主に中破と軽微な損傷によって占められているが、全壊とその他の中間に位置するためか、その内訳が場所によって大きく異なっている。

図-3.6は芦屋市の全壊判定と震特委員会の中破以上の判定(大破+中破)をエリアごとの率でプロットしたものである。線形近似をとったところ全15エリアでは $R^2=0.98$ 、臨海2エリアを除いた場合は0.97という高い相関が見られ、共に傾きは1.09となった。

次に芦屋市による全半壊の判定と震特委員会による軽微以上の判定の比較を図-3.7に示す。まず全15エリアについて回帰したところ、点線で示した近似直線のようになり、 $R^2=0.22$ と相関が著しく低くなったため、木造率が低く液状化の激しかった臨海2エリアを除外して再度回帰した。その結果、 $R^2=0.80$ まで上がり、傾きは1.03となった。臨海2エリアのように木造が少ない地域では、建物自体の被害が小さく、家具の転倒等により内部被害は大きいという事態が発生する。したがって、外観目視による震特委員会の判定と、内部評価を含んだ自治体の判定が大きく異なることが考えられる。図-3.6と図-3.7の中で、臨海2エリアによる影響に違いが見られたのは、このような理由からであろう。

以上のことから、全体としてとらえた場合、芦屋市の全壊判定は震特委員会の中破以上とほぼ等しく、また臨海2エリアを除いたほとんどのエリアで芦屋市の全半壊判定は震特委員会の軽微な損傷以上とほぼ等しいということが言える。

表-3.1 建物被害調査内容の比較

	芦屋市	震特委員会
調査方法	消防本部職員が目視により損害度合を調べ判定	専門家・学生等による外観目視
調査員	消防本部部員 再調査は専門家の協力有（3人1組）	建築工学・土木工学・都市計画に関わる専門家・学生等
調査期間	1/23-1/29 2/4-2/10 3/17-3/21	2/1-2/9 2/10-3/13
評価方法	独自の調査票による百分率評価	調査票の定義（構造別）に従って判定
被災度評価判定定義	<ul style="list-style-type: none"> ・全壊：住家滅失（損害程度が50%以上） ・半壊：損壊が甚だしいが、再使用可（損害程度が20%以上50%未満） ・一部破損：全壊および半壊に至らないもので、補修を必要とする程度のも ・その他：全壊・半壊・一部損壊以外のもの 	<ul style="list-style-type: none"> ・ランクC（全壊または大破）：再使用不可 / 住める見込みが非常に少ない ・ランクB（中程度の損傷）：大幅な修理で再使用可能 / 大幅な修理で住める可能性あり ・ランクA（軽微な損傷）：軽微な損傷で使用可能 / 少しの修繕で住める可能性あり ・無被害：見た目に被害がない
木造調査項目	全体傾斜 / 屋根（天井） / 壁（外壁・内壁） / 基礎・床 / 柱 / 階段 / その他	全面的倒壊（使用の可否、傾斜の有無、撤去の状況） / 各階の倒壊 / 傾斜 / 構造材（基礎の破断、モルタルの剥離・ひび割れ、柱の破壊） / 屋根（破損、瓦の落下） / 外壁（剥離、剥落）、ガラス窓（落下） / 隣棟等による破壊
非木造調査項目	全体傾斜 / 柱 / 梁 / 耐震壁 / 基礎 / 外部雑壁 / 階段 / 内部壁・仕上 / 建具 / 天井 / 床 / 設備 / その他	各階の倒壊 / 傾斜 / 構造材（基礎の破断、柱梁の破壊・座屈、柱脚アンカーの破断、沈下） / 外壁（剥離、剥落）

表-3.2 建物被害棟数の比較

判定主体	全壊 大破（C）	半壊 中破（B）	一部損壊 軽微（A）	その他 無被害	合計
芦屋市	4,797	4,222	4,780	1,979	15,778
震特委員会	2,932	1,558	3,438	5,681	13,609

（単位：棟）

第3章 調査法が異なる場合の建物被害評価変換法

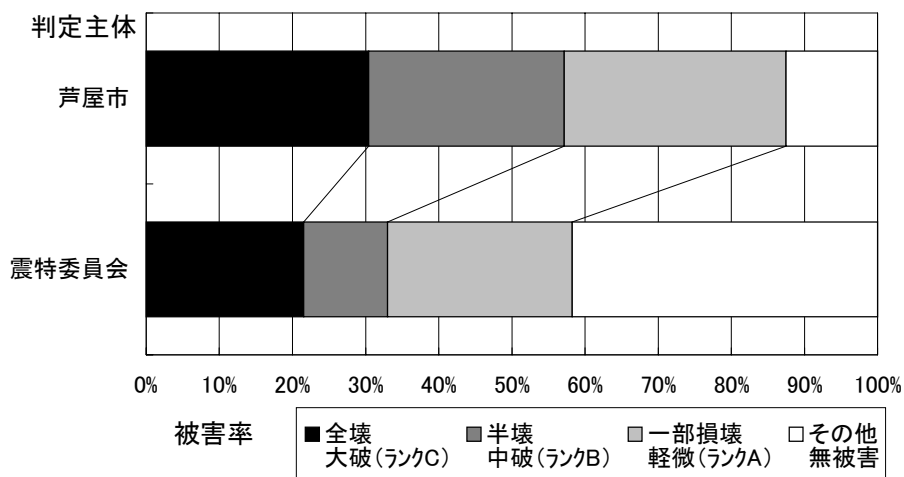


図-3.1 建物被害率の比較

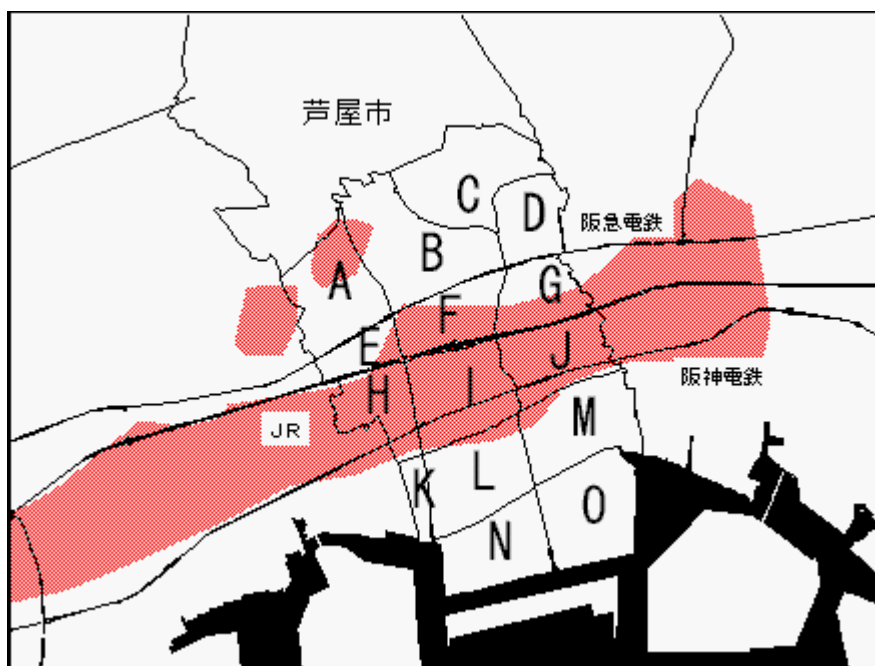


図-3.2 芦屋市対象地域と震度7の帯

表-3.3 エリアごとの建物棟数と町名

エリア	建物棟数	町名
A	941	三条町・山芦屋町・西山町
B	1,208	山手町・東芦屋町・東山町
C	830	朝日ヶ丘町・六麓荘町
D	604	岩園町
E	537	三条南町・西芦屋町・月若町
F	812	松ノ内町・船戸町・大原町
G	800	親王塚町・翠ヶ丘町
H	733	清水町・前田町・津知町・川西町・平田北町
I	1,401	業平町・公光町・大榭町・茶屋之町・精道町・上宮川町・宮塚町・宮川町
J	1,080	楠町・打出小槌町・春日町・若宮町・打出町
K	142	平田町
L	1,060	浜芦屋町・松浜町・伊勢町・竹園町・呉川町
M	1,014	西蔵町・浜町・南宮町・大東町
N	493	緑町・潮見町・若葉町
O	483	高浜町・新浜町・浜風町

表-3.4 対象地域全域における建物被害判定結果

		震災復興都市づくり特別委員会				
		大破	中破	軽微	無被害	合計
芦屋市	全壊	2,150	624	481	153	3,408
	半壊	186	654	1,861	1,296	3,997
	その他	28	145	896	3,664	4,733
	合計	2,364	1,423	3,238	5,113	12,138

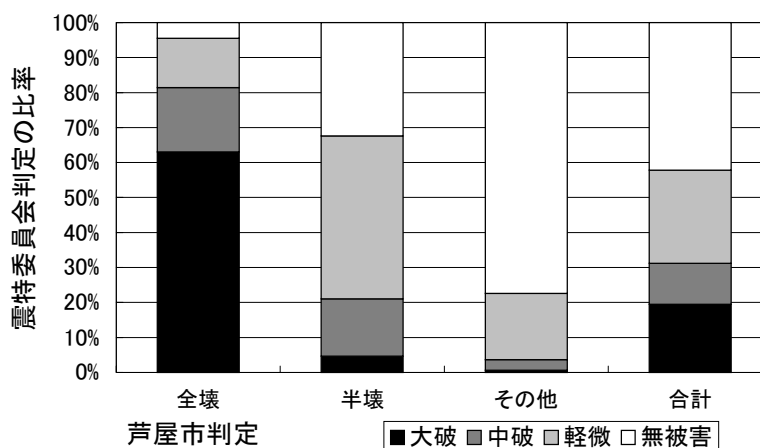
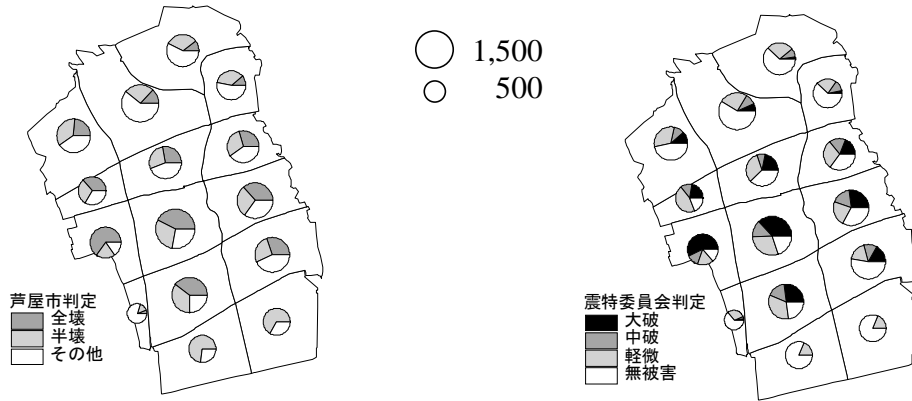


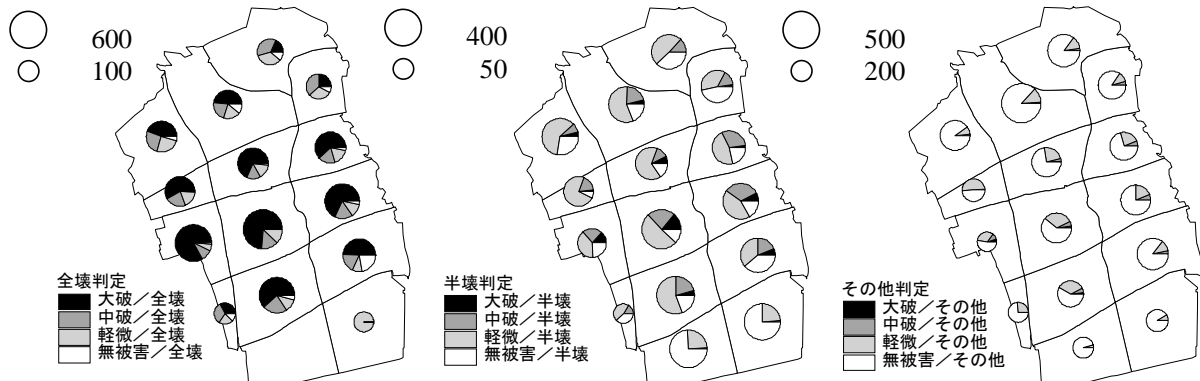
図-3.3 芦屋市による建物被害判定に占める震特委員会判定の比率

第3章 調査法が異なる場合の建物被害評価変換法



(円の大きさはエリアごとの全棟数を示す)

図-3.4 エリアごとの建物被害判定結果の比較



(円の大きさはエリアごとの棟数を示す)

図-3.5 芦屋市による建物被害判定ごとの震特委員会判定の内訳

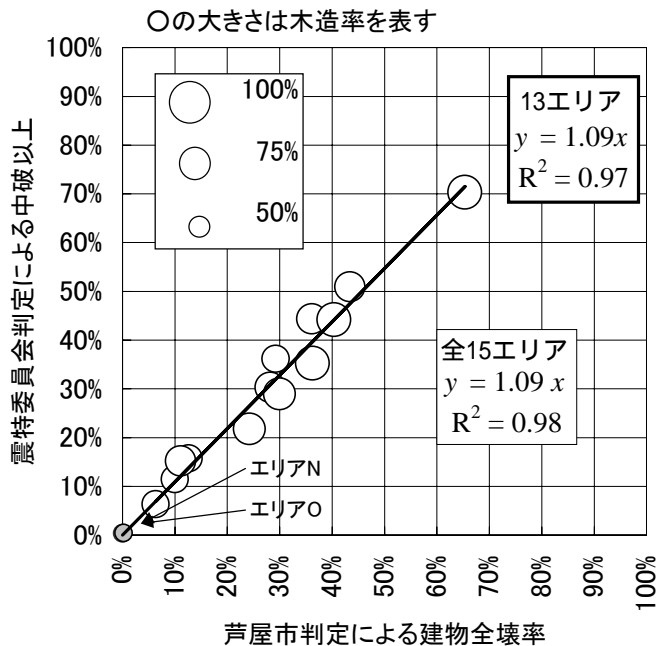


図-3.6 エリアごとの判定比較

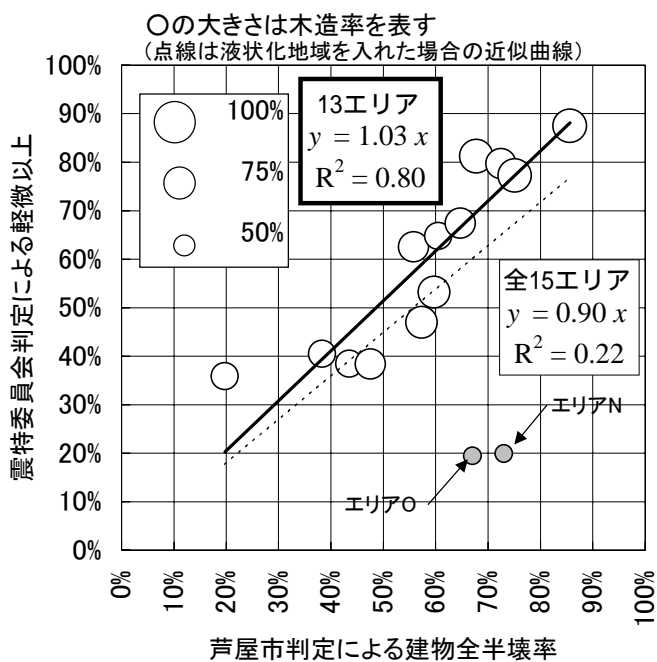


図-3.7 エリアごとの判定比較

3.3 建物被害判定ごとの被害率曲線の比較と評価変換法

前章で、芦屋市による判定と震特委員会による判定の対応関係は地震動強さに関係しているらしいことを述べた。ここでは低層建物被害と地震動観測値から推定された地震動分布を用いて、建物被害関数（フラジリティカーブ）を求め、地震動の最大速度と建物被害判定の関係を調べた。

(1) 対応レベルの設定

まず芦屋市と震特委員会判定の対応関係を調べる。前章の結果から「芦屋市の全壊は震特委員会の中破以上と等しい」、「芦屋市の全半壊は震特委員会の軽微な損傷以上と等しい」と仮定し、芦屋市と震特委員会の判定の関係を以下のように4つのレベルに設定した。

Level 1：仮定どおり芦屋市の判定基準の方が緩いもの

Level 2：仮定以上に芦屋市の判定基準の方が緩いもの

Level 3：仮定と逆になっているもので Level 4 以外のもの

Level 4：「全壊と無被害」、「その他と大破」のように正反対の判定が出てしまっているもの

対応レベルの内容とその棟数およびエリアごとの比率を図-3.8 に示す。芦屋市の判定基準の方が緩くなっている Level 1 と Level 2 は全体の 95.8% と大半を占めている。また Level 3, Level 4 は、それぞれ 2.7%, 1.5% と少なかった。Level 3, Level 4 のような対応関係は調査項目に室内の被害が含まれるか否かという2調査の差から発生すると考えられる。さらに Level 4 のように正反対の判定が出てしまった理由としては、調査時に使用した地図の違いによる建物の誤認、地図にプロットする際の写し間違いなどから発生する両調査記録の不一致なども考えられる。エリアごとの対応レベルの比率を見ると臨海2エリアで他エリアと違う傾向が見られ、Level 1 と Level 2 が半分ずつで、Level 3, Level 4 は存在しなかった。その理由として液状化現象による被害、木造比の少なさ等が考えられるが、ここでは判断できない。

(2) 建物被害関数

山口・山崎（1999）は、兵庫県南部地震時に得られた強震記録と、震特委員会および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災度調査結果を建設省建築研究所（1996）が数値化したデータを用いて、建物被害関数を作成し、阪神地域の地震動の空間分布を推定した。ただし、この検討で用いた建物データは構造種別や建築年代の属性が含まれていないため、木造戸建住宅にほぼ相当すると思われる低層戸建住宅のデータを用いた。本章では、ここで得られた芦屋市内の推定地震動（町丁目単位の最大速度）を用いて、芦屋市と震特委員会の実施した2調査に基づく全建物に関する建物被害関数の構築を試みた。ただしこの地震動データは町丁目を単位としているため、全棟数による重み付き平均により対象エリアごとの地震動に換算した。また対象エリアは臨海2エリアを除いた13エリアとしている。

ここで求めた地震動強さ（最大速度）と被害率の関係から、調査ごとの建物被害関数を求める。算出した推定地震動強さ（最大速度）と建物被害率を表-3.5 に示す。ある地震動 x のときに被災ランク R 以上の被害が発生する確率 $P_R(x)$ は、標準正規分布の累積確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて、対

数正規分布で表せると仮定した。すなわち、

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \quad (3-1)$$

となる。ここで係数 λ 、 ζ は、 $\ln PGV$ の平均値および標準偏差であり、図-3.9、図-3.10に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果を表-3.6に示す。また各被害関数を図-3.11(芦屋市)、図-3.12(震特委員会)に示す。図-3.13は芦屋市と震特委員会のそれぞれの建物被害関数を重ねて比較したものである。芦屋の判定は曲線を用いて、震特委員会の各判定は領域を用いて表現している。ただし、最大速度は、再現地震動の最大速度値から、50~150cm/s程度までが適用範囲であると考えられる。

この図から芦屋市判定(全壊、半壊)と震特委員会判定(大破、中破、軽微)の関係を見ると、大破の発生確率は地震動の大きさに関わらず、全壊のものより小さくなっている。中破以上の発生確率は約60cm/s以下で全壊の発生確率とほぼ等しいが、地震動が大きくなるにしたがい、全壊判定よりも大きな発生確率となっている。また軽微以上の発生確率も60cm/s以下で全半壊のものとはほぼ等しいが、地震動が大きくなるにつれ、全半壊判定よりも大きな発生確率となっている。

(3) 建物被害関数による比較と評価率

前節では建物被害関数を構築することにより、芦屋市と震特委員会における各判定ごとの関係を調べた。しかし実際には図-3.13のように大破の判定が全て全壊と判定されているわけではない。そこで芦屋市判定のフラジリティカーブを固定して、その内訳を調べた。

ここでは前節と同様に図-3.14に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めている。表-3.7に判定ごとの $\ln PGV$ の平均値(λ)および標準偏差(ζ)を示す。図-3.15は芦屋市の各判定(全壊、半壊、その他)ごとに震特委員会でのどのように判定されたかの条件付被害率を建物被害 k 関数で表したものである。図-3.15では、半壊以上(全半壊)と全壊の曲線に挟まれた領域が半壊を表し、半壊以上の曲線よりも上の部分がその他の判定を表している。全壊と判定されたもののが大半が大破と判定され、半壊と判定されたものの中では地震動が大きい所ほど大破と判定されたものの比率が大きくなっている。またその他と判定されたものの中では無被害が大きい比率を占めているが、地震動が大きくなるにつれ、中破と判定される比率も大きくなっている。

芦屋市による各判定が、地震動の大きさによって震特委員会にどのように判定され、どの程度合致したかを評価率という尺度で示したのが、図-3.16(全壊)、図-3.17(半壊)、図-3.18(その他)である。評価率は判定ごとの震特委員会の各被害率を芦屋市による各被害率で除して求めている。また対応レベルに応じて線種を変えており、Level 1とLevel 2は太線で示している。

全体として見ると、地震動の強さによって各判定のされ方が違っているのがわかる。市によって全壊と判定された建物は地震動の小さいところでは、大破として判定されている率が低いが、地震動が大きくなるにつれて評価率も上がり、0.9まで上がっている。逆に中破の判定は地震動50cm/sのあたりで評価率が0.3程であり、大破と判定されるものよりも比率が大きいが、70cm/sあたりで逆転され、地震動が大きくなるにしたがい、評価率が下がっている。地震動の小さい地域では一見建物の被害が小さくても、建物内部の被害は大きいということも考えられる。その場合に外観目視による評価を行った震特委員会の判定は中破だが、内部評価を含む市の判定は全壊

であるということが起きる。図-3.16のような現象はこのような理由によると思われる。

次に半壊の判定では、50cm/s 付近から 180cm/s まで軽微の評価率がほぼ 0.5 と安定している。中破の判定は地震動の増加とともに緩やかに上昇している。また無被害の判定は 40cm/s 付近で中破と同程度の評価率であったが、地震動が大きくなるにつれて 0.1 まで減少している。

「その他」の中では、無被害の評価率が高いが、地震動が大きくなると 0.5 まで下がり、逆に軽微の判定は地震動の増加とともに 0.3 程度まで上がっている。「その他」の中での大破、中破判定の評価率は、地震動が大きくなると多少増加しているが、それでも 0.1 以下と比較的に小さい。

(4) 自治体による全壊率からの評価変換

前節では地震動と被害率の関係から芦屋市と震特委員会の建物被害判定を比較した。ただし、ここで用いた地震動分布は震特委員会による低層戸建住宅の被害率と複数地点の地震観測値から導いた推定地震動である。したがって、もともとの地震動そのものが、震特委員会の建物被害率と高い相関関係にあると言える。ここではこれまでの結果から媒介変数である地震動を消去し、自治体全壊率および震特委員会大破率から、他の被害率へと変換する方法を提案する。

図-3.13 で被害関数の比較を示したように、自治体の全壊率がわかれば、地震動がわかり、そこから半壊率、あるいは震特委員会の被害率（大破、中破等）がわかる。図-3.19 に自治体の全壊率から他の被害率へと変換するグラフを示す。どちらも横軸に自治体の全壊率をとっている。全壊率（地震動）が大きくなるにつれ、被害のない建物すなわちその他の割合は減り続ける。また半壊は全壊率が 20% 位になるまで増加するが、それ以上の被害になると全壊として判定されるため、半壊率は下がっていくのがわかる。全壊+半壊（全半壊率）はその他の判定以外のものであるため、その他を表す曲線と被害率 50% の線を軸とした線対称の関係になっている。

図-3.20 は自治体の全壊率から、震特委員会の被害率を求めるグラフである。大破率は全壊率が大きくなるにつれ直線状に増加している。軽微は全壊率が 20% 程度になるまで急激に増加するが、それ以降は中破へと変わるため減少していく。軽微がピークを過ぎたあたりでそれらの建物は中破へと移行していき、軽微よりも少し高い 40% 付近で中破はピークとなる。また中破以上（大破+中破）は図-3.6 でも示したように全壊率とほぼ同じ値をとっている。

図-3.21 は震特委員会の大破率から震特委員会の他の被害率へと変換できるようにしたグラフである。図-3.20 と同じような傾向があるが、軽微のピークは 10% あたり、中破のピークは 30% あたりと、自治体の全壊率でみるよりも少し低いところに位置している。図-3.22 は震特委員会の大破率から自治体の被害率への変換グラフである。図-3.19 と比べると、その他、半壊、全壊+半壊のどの曲線もやや大破率の低い方向へスライドしたような形になっている。

これらの変換グラフは、今後の大地震時に実施されるであろう自治体による建物被害調査を兵庫県南部地震時の被害と比較する場合、あるいは判定基準の異なった兵庫県南部地震に関する自治体による詳細な建物被害データを分析する場合に、有効に利用できるものと思われる。しかし、残念ながら今回分析したデータは、村上・田原・藤田・三澤（1996）の研究のように詳細な建物属性を考慮したものではないため、建物全体としての平均的な関係であることに注意する必要がある。またデータ数の不足により、大きい地震動地域における精度は低いと思われる。適用範囲があることにも注意しなくてはならない。

第3章 調査法が異なる場合の建物被害評価変換法

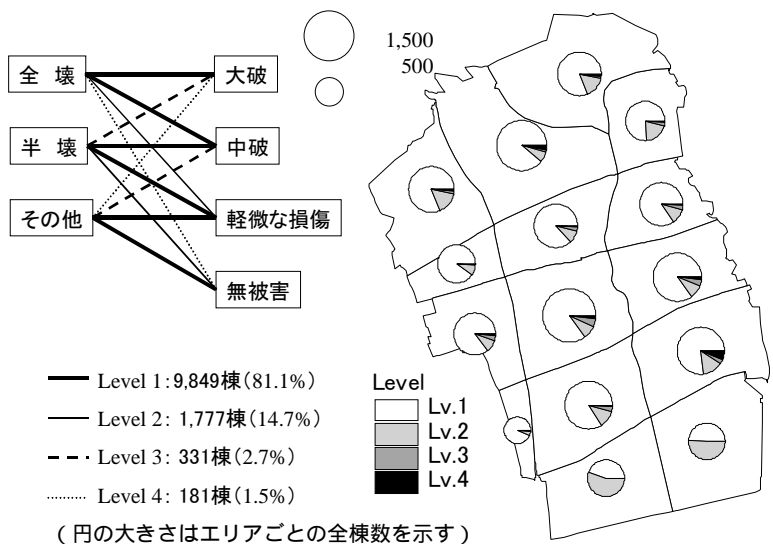


図-3.8 被害判定の対応レベルとエリアごとの比率

表-3.5 建物被害関数の構築に用いた推定地震動と建物被害率

I/J	PGV (cm/s)	建物棟数 (棟)	芦屋市調査		震特委員会調査		
			全壊率	全半壊率	大破	中破以上	軽微以上
A	84.2	941	24.2%	59.7%	12.1%	21.8%	53.1%
B	76.2	1,208	12.7%	38.3%	7.2%	15.7%	40.5%
C	63.6	830	10.0%	43.5%	2.0%	11.4%	38.4%
D	66.0	604	11.1%	47.5%	3.5%	15.2%	38.4%
E	95.7	537	36.3%	67.8%	21.8%	35.2%	81.2%
F	99.7	812	28.2%	55.8%	21.8%	30.3%	62.6%
G	100.0	800	29.3%	60.5%	19.1%	36.1%	64.8%
H	177.4	733	65.3%	85.7%	57.3%	70.3%	87.4%
I	122.0	1,401	43.4%	72.4%	36.5%	50.9%	79.7%
J	111.2	1,080	36.1%	64.7%	27.0%	44.4%	67.4%
K	62.7	142	6.3%	19.7%	2.1%	6.3%	35.9%
L	100.1	1,060	40.4%	75.1%	26.7%	44.2%	77.3%
M	97.0	1,014	30.0%	57.3%	16.6%	28.9%	46.9%

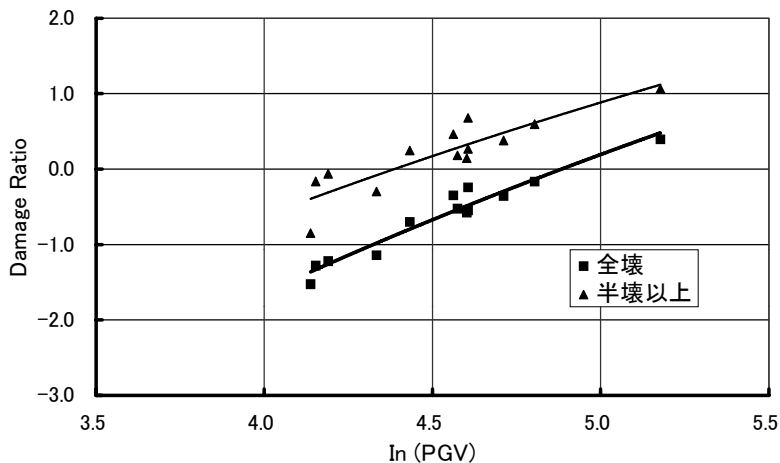


図-3.9 最大速度と芦屋市による建物被害率の関係の確率紙表示

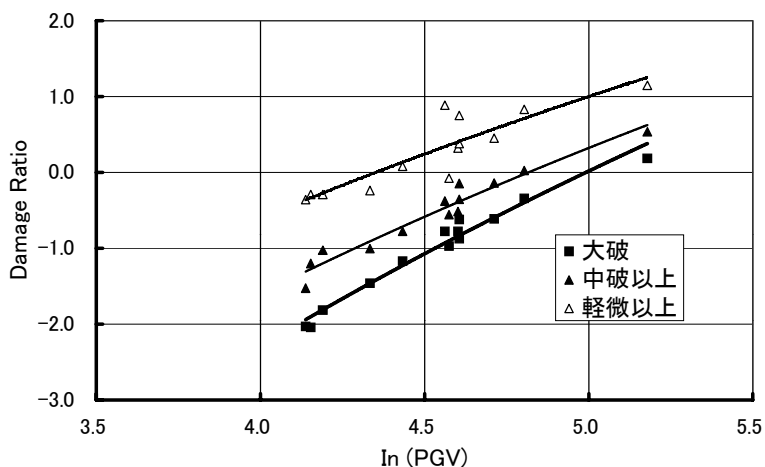


図-3.10 最大速度と震特委員会による建物被害率の関係の確率紙表示

表-3.6 建物被害関数の係数

芦屋市ランク	λ	ζ	R^2
全壊	4.88	0.559	0.94
半壊以上	4.39	0.680	0.78

震特委員会ランク	λ	ζ	R^2
大破	4.98	0.444	0.96
中破以上	4.83	0.535	0.94
軽微以上	4.34	0.637	0.78

第3章 調査法が異なる場合の建物被害評価変換法

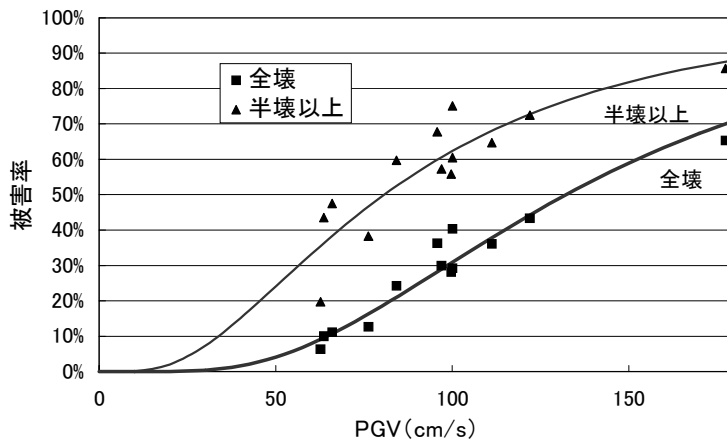


図-3.11 芦屋市データに基づく建物被害関数

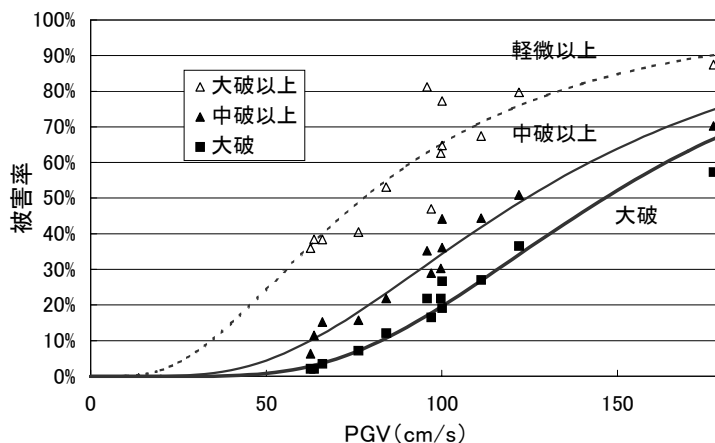


図-3.12 震特委員会データに基づく建物被害関数

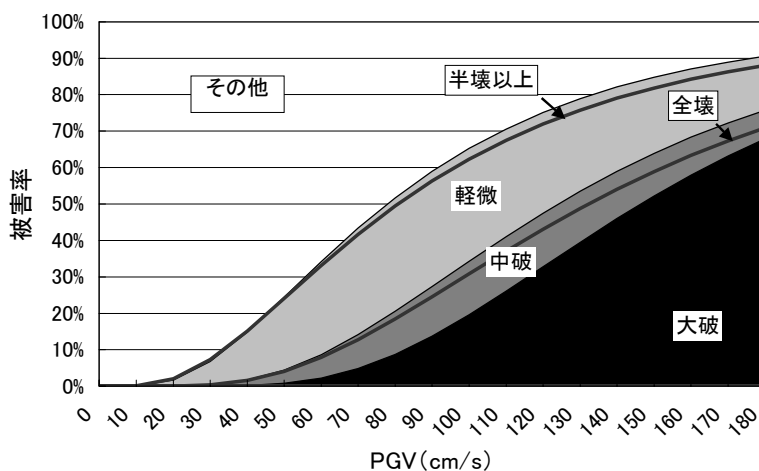


図-3.13 芦屋市と震特委員会の建物被害関数の比較

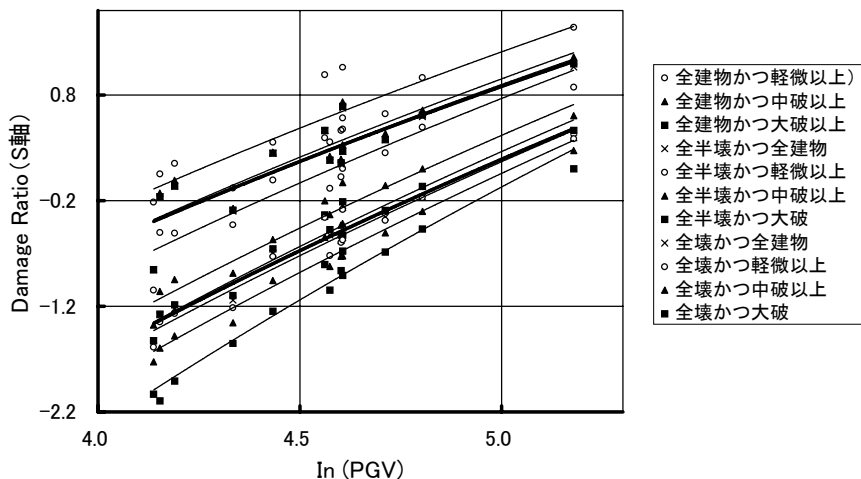


図-3.14 最大速度と各建物被害率の関係の確率紙表示

表-3.7 各判定ごとの建物被害関数の係数

芦屋市ランク	震特委員会ランク	λ	ζ	R^2
全壊	大破	5.05	0.455	0.96
	中破以上	4.95	0.515	0.95
	軽微以上	4.90	0.543	0.93
	全建物	4.88	0.559	0.94
半壊以上	大破	4.84	0.538	0.94
	中破以上	4.76	0.552	0.94
	軽微以上	4.52	0.606	0.84
	全建物	4.39	0.680	0.78
その他以上	大破	4.40	0.671	0.78
	中破以上	4.38	0.654	0.78
	軽微以上	4.17	0.667	0.78
	全建物	-	-	-

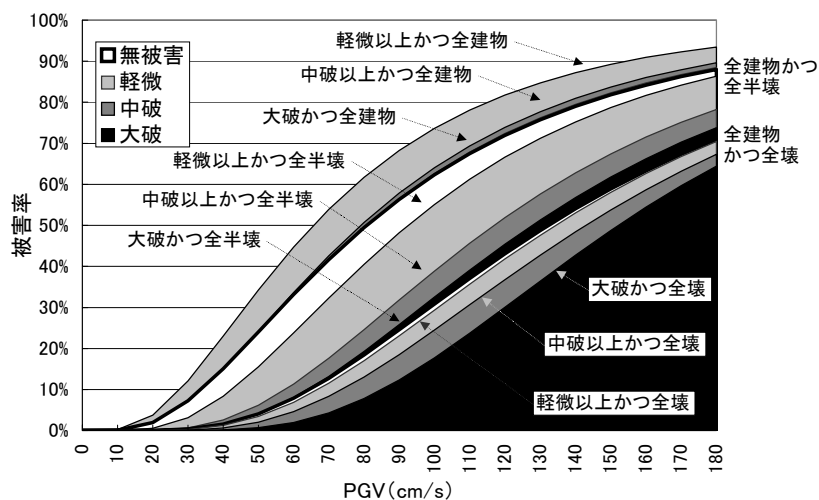


図-3.15 建物被害関数における芦屋市判定の内訳

第3章 調査法が異なる場合の建物被害評価変換法

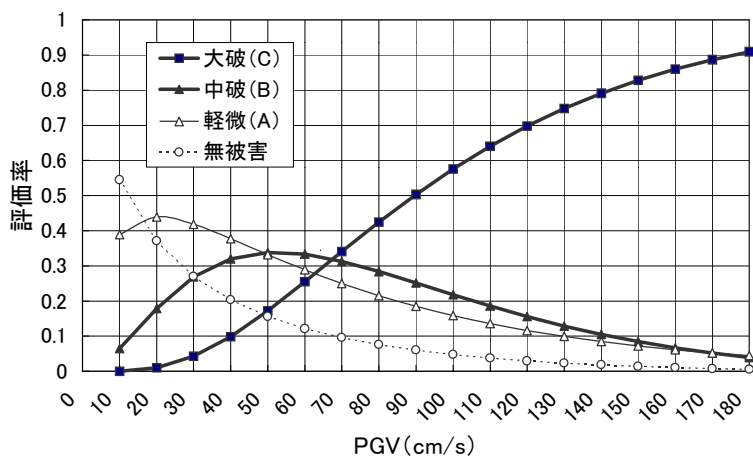


図-3.16 建物被害判定の評価率（全壊）

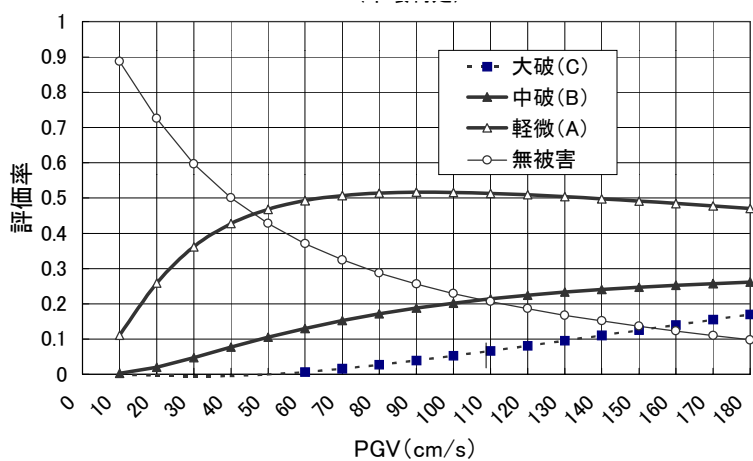


図-3.17 建物被害判定の評価率（半壊）

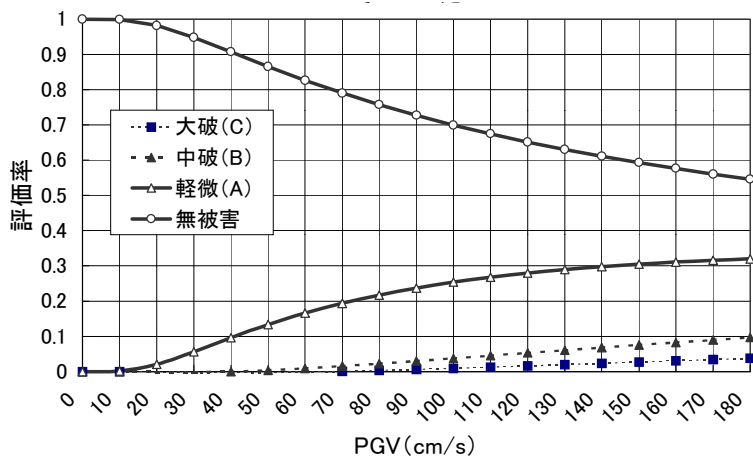


図-3.18 建物被害判定の評価率（その他）

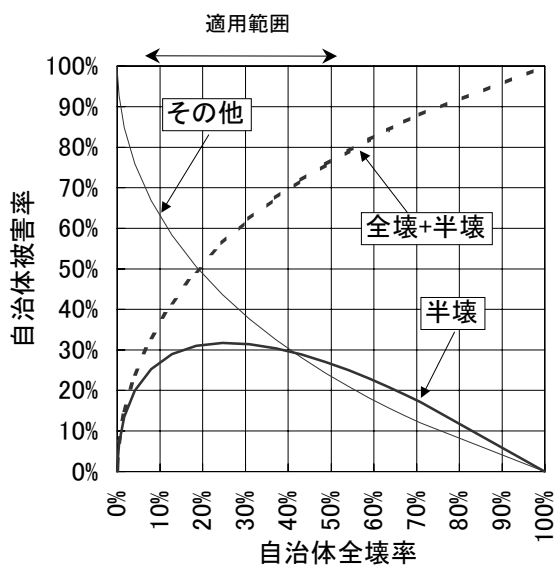


図-3.19 自治体全壊率から被害率への評価変換

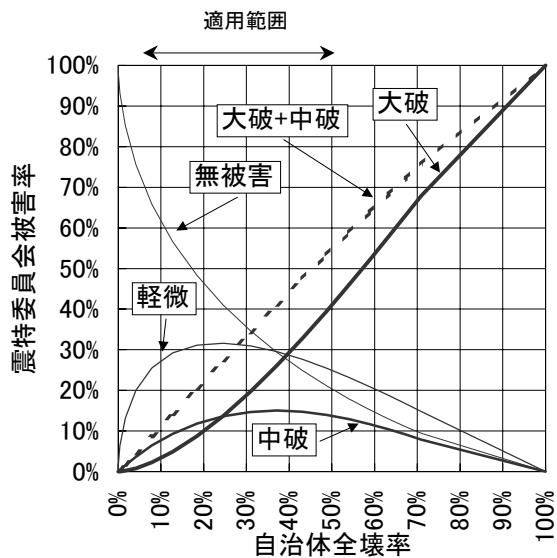


図-3.20 自治体全壊率から震特委員会被害率への評価変換

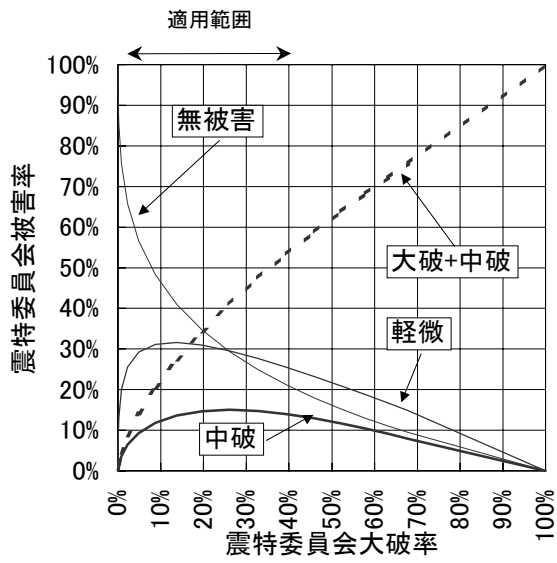


図-3.21 震特委員会大破率から被害率への評価変換

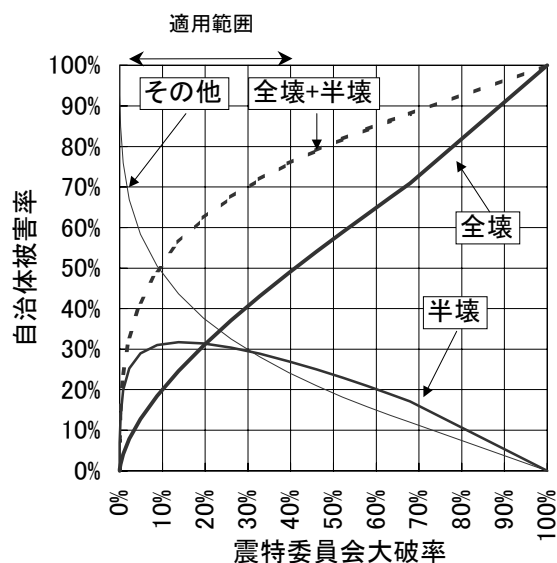


図-3.22 震特委員会大破率から自治体被害率への評価変換

3.4 まとめ

兵庫県南部地震で被害を受けた芦屋市の約 12,000 棟の建物を対象として、自治体と震特委員会による建物被害調査の判定結果を比較した。その結果、全体としては芦屋市の全壊判定は震特委員会の中破以上、芦屋市の全半壊判定は震特委員会の軽微な損傷以上にほぼ等しいことがわかった。また判定結果と推定地震動（最大地震速度）との関係を調べた結果、地震動の大きさが 2 調査による被害判定結果の違いに影響を与えていることがわかった。地震動の小さいエリア内、そして強固な建物等は倒壊・全壊することが少ない。しかし家具の転倒等により、内部被害は発生しているということが考えられる。そのような時、建物内部被害の判定項目の有無が、建物被害調査結果の大きな違いとなって現れてくる。地震動の大きさが判定結果の違いに影響を与えているのは、このような理由によるものと考えられる。以上の分析により、自治体による資産的評価を重視した建物被害調査の判定結果を、震特委員会の調査に基づく被害判定へと変換する評価法を提案した。

今後、大地震が発生した際に実施されるであろう被災地域の自治体による調査結果を、判定項目内容を考慮したうえで、本評価法により変換することにより、兵庫県南部地震との比較を定量的に行うことが可能になる。

4.1 はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、これまでに経験したことの無いほどの都市災害をもたらした。今後も各地で発生するであろう大地震に備え、これまで使われてきた地震被害推定式を、この地震による膨大な被害データを取り入れて、より精度の高いものへと向上させることは重要であろう。さらに建物の被害データを分析することは、地震記録数が十分でないために把握しきれない地震動の分布状況を逆推定する上でも有効である。

膨大な数の建物が被害を受けた兵庫県南部地震の被害データを分析することにより、これまでは得られなかった多くの知見を得ることが可能である。兵庫県南部地震発生後には、第2章で述べたように、その目的・組織に応じていくつかの建物被害調査が実施されたため、いくつかの異なる被害データが存在している。その結果、各研究グループにより様々な建物被害分析の報告がされている。

自治体によって行われた建物被害調査に基づくデータを用いたものとしては、杉浦・山崎(1996)による宝塚市、後藤・山崎・佐藤(1996)による芦屋市、村尾・山崎(1997a)による北淡町、後藤・山崎・若松・浅野(1997)による尼崎市、杉浦・山崎(1997)による伊丹市、山口・山崎・若松(1997)あるいは岩井・亀田・碓井(1997)による西宮市、Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa(1997)による神戸市、そして小川・山崎(1998)による明石市等がある。いずれも構造別・建築年代別を基本として建物被害の分析をしており、データに応じて階数別・屋根別等も行っている。

自治体による調査以外のデータとしては、震災復興都市づくり特別委員会(日本都市計画学会関西支部、日本建築学会近畿支部都市計画部会)および兵庫県都市住宅部計画課が行った建物被災度調査結果のデータが挙げられる。それを数値化した建設省建築研究所(1996)は構造別・建築年代別・階数別・用途別等詳細な分析を行っている。緑川・長谷川・向井・西山・福田・山内(1997)は神戸市内の特定地域の調査データを用いて鉄骨造の被害レベルと建築年代との関係や年代と階数別の分析を行っている。村上・田原・藤田・三澤(1996)は、神戸市東灘区の木造住宅の密集した震度7の地域内における詳細調査に基づくデータを用いて、建築年代、建物規模などと被害の関係を明らかにしている。

本章では、第5章、第6章で地震動分布の推定や建物被害関数の構築を行っていく上で基盤となる建物被害調査のデータを用いて、神戸市灘区における建物被害の分析を行った。

4.2 灘区の概要

灘区の概要図を図-4.1 に示す。

灘区は、南北に長く、北に六甲山、摩耶山、南に大阪湾をひかえ、海と山に囲まれた地域で、昭和4年に神戸市に編入され、臨海部の神戸製鋼所をはじめとする大規模工場と背後の工業地や住宅地、商業地と、山麓部の緑豊かな住宅地の整備を通じて発展してきた。また区内には神戸大学、松蔭女子学院などの大学、短期大学や王子公園、近代美術館、王子市民ギャラリーなど神戸市の広域的な文化・教育・スポーツ施設が立地し、神戸の文化・教育・スポーツの核として機能している。昭和45年当時約17万人であった人口はその後徐々に減少し、高齢者人口比率は増加してきた。

兵庫県南部地震時には、良好な環境の住宅地である北部は比較的被害が少なかったが、中央部以南では、火災が発生し焼失した地区や、住宅がほとんど倒壊した地区もある。神戸市(1996b)の統計によれば、灘区全体では全壊12,757棟、半壊5,675棟、全焼327棟、半焼43棟、死亡者924人という被害を受けた。神戸市内においてこれらの被害は、全壊数では長田区(15,521棟)、東灘区(13,687棟)について、全焼数では長田区(4,759棟)、兵庫区(940棟)について、死亡者数では東灘区(1,461人)について被害が大きかった。図-4.2による兵庫県南部地震における灘区周辺の強震記録観測点(日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会,1996)と気象庁(1997)が発表した震度7の帯を示す。強震記録が観測された点はこのように数が少なく、4.1で述べたように建物被害関数を構築するためには、地震動の分布を推定しなければならないことがわかる。震度7の帯は、東西に伸びた阪急電鉄と阪神電鉄の間にあることがわかる。

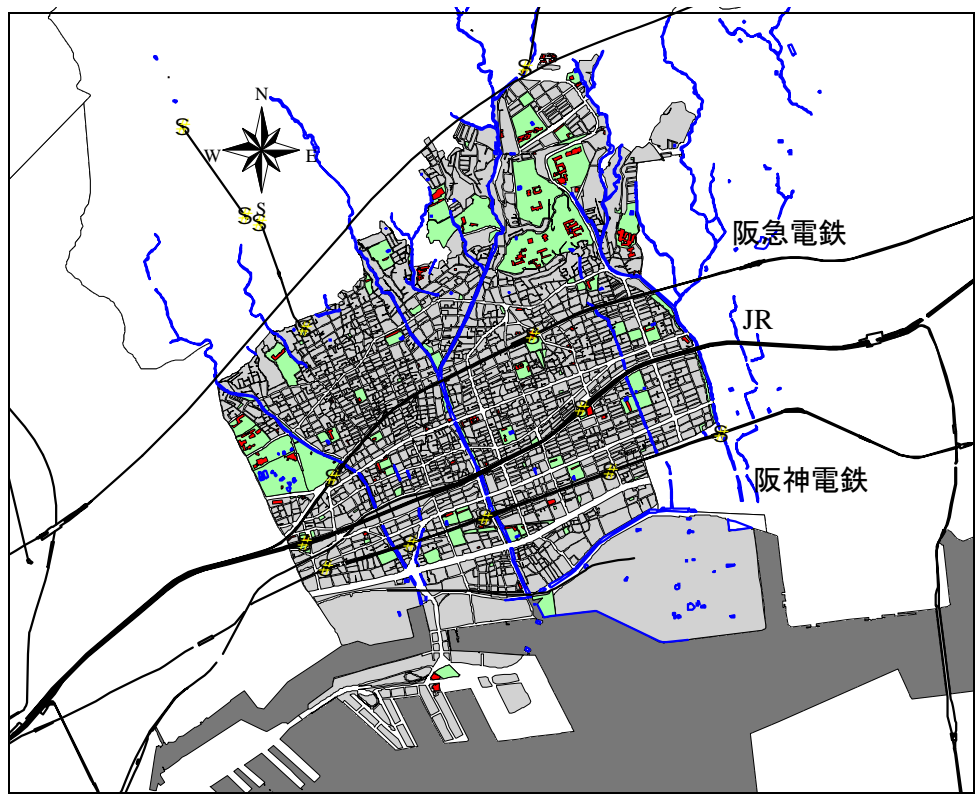


図-4.1 灘区の概要図

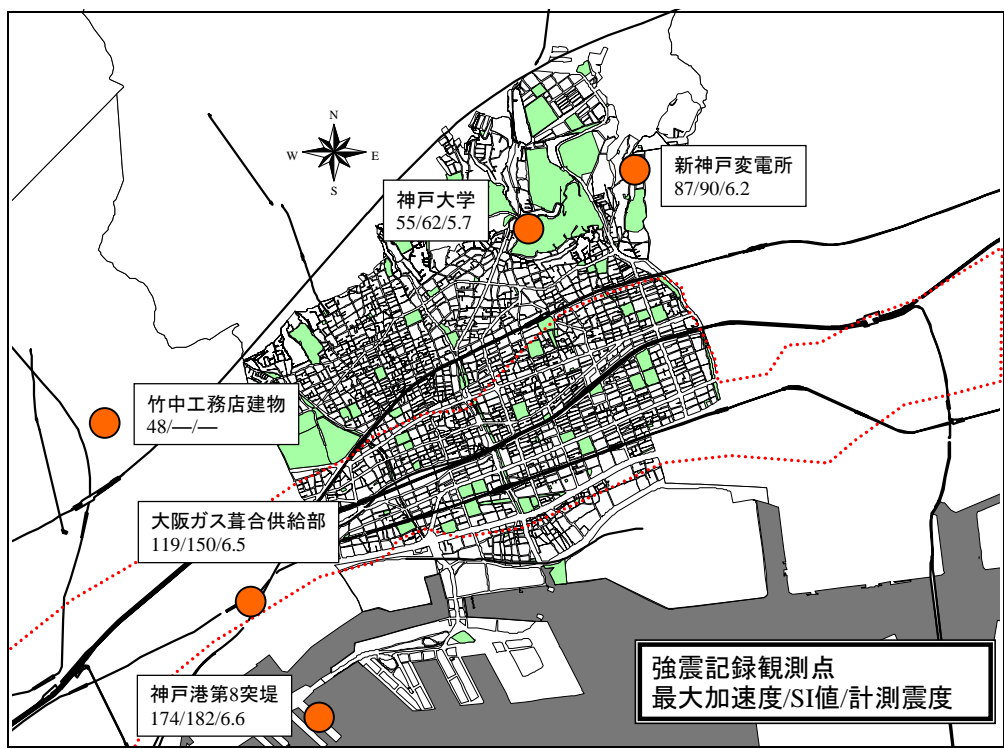


図-4.2 兵庫県南部地震における強震記録観測点と震度7の帯

4.3 灘区の建物被害データ

本章に使用した建物被害データは、兵庫県南部地震後に神戸市によって実施された建物被災度調査に基づくもので、調査項目は一棟ごとの町丁目、建築構造（7分類：木造、軽量鉄骨造、鉄骨造、鉄骨鉄筋コンクリート造、コンクリートブロック造、レンガ造）、建築日付、合計床面積、屋根（5分類：瓦葺き、スレート葺き、金属葺き、板葺き、その他）、階層、被害区分（3分類：全壊、半壊、全焼）である。第2章で述べたように、被害区分に関して、「一部損壊」という区分を取り入れた自治体もあるが、神戸市では、どの建物も何らかの被害を受けており「一部損壊」と「無被害」の区別をするのは難しい、という判断をしたため、「全壊」、「半壊」、「全焼」以外のものを「その他」としている。これらのデータの内、床面積10㎡未満のデータ（2,542件）、地上階のないデータ（213件）、建築日付が特定されていないデータ（35件）を削除した後、ゼンリン（1994）の住宅地図と照合したうえで、約3万件の灘区建物被害データベースを作成し、被害の分析を行った。

表-4.1に各主要構造の建築年代別の建物被害棟数を示す。図-4.3に示した通り、これらの建物データを構造別に見ると、全体の約4分の3を木造建物が占め、次いで鉄筋コンクリート造（以下、RC造）、鉄骨造（以下、S造）、軽量鉄骨造（以下、軽量S造）が全体のほぼ残りを占め、コンクリートブロック造、鉄骨鉄筋コンクリート造およびレンガ造などを含むその他の構造（以下、その他）はわずかであった。

構造別に見てみると、木造建物は、建築年の新しいものほど少なくなっており、最も多い1951年以前の建物の中には明治初期のものも含まれている。一方、日本において伝統的な建物構造である木造と比べて、新しい構法であるRC造、S造および軽量S造は建築年の新しいものほど増加している。ただし、表-4.1では軽量S造に関して1971年以前のものを全て一区分にしているため、1972-81年の棟数が最も少なくなっている。

灘区の建物の構造別被害率を図-4.4に示す。コンクリートブロック造、煉瓦造など棟数が少ない割に被害率が高いものを含むその他の構造を除けば、全壊率および全半壊率ともに、木造が最も高く、次いでS造、軽量S造、RC造と低くなっている。棟数が全体の4分の3を占める木造と残りの約半分を占めるRC造とを比較すると、木造の全壊率（52.4%）は鉄筋コンクリート造（9.3%）の約6倍となっている。

表-4.1 灘区の建物被害棟数

構造	建築年代	全壊	半壊	その他	計
木造	-1951	5,032	1,636	1,138	7,806
	1952-61	2,897	936	992	4,825
	1962-71	2,588	928	1,126	4,642
	1972-81	1,006	764	1,218	2,988
	1982-94	384	542	1,523	2,449
	計	11,907	4,806	5,997	22,710
RC造	-1951	10	5	18	33
	1952-61	30	27	125	182
	1962-71	131	123	623	877
	1972-81	126	224	906	1,256
	1982-94	57	153	1,256	1,466
	計	354	532	2,928	3,814
S造	-1951	2	1	32	35
	1952-61	11	9	121	141
	1962-71	227	92	145	464
	1972-81	185	157	288	630
	1982-94	107	203	593	903
	計	532	462	1,179	2,173
軽量S造	-1971	221	77	245	543
	1972-81	25	39	231	295
	1982-94	26	48	389	463
	計	272	164	865	1,301
その他		133	89	324	546
全建物		13,198	6,053	11,293	30,544

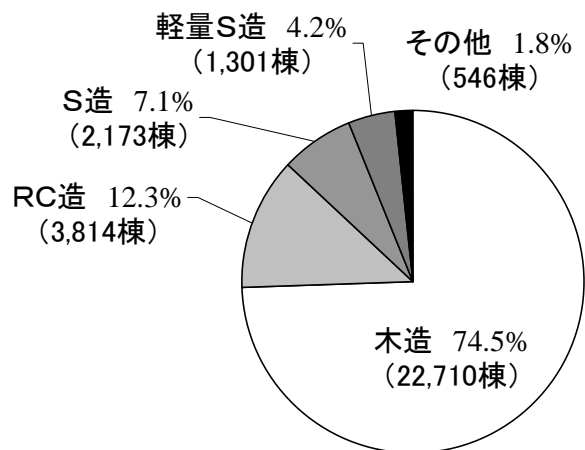


図-4.3 灘区内建物の構造別比率

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

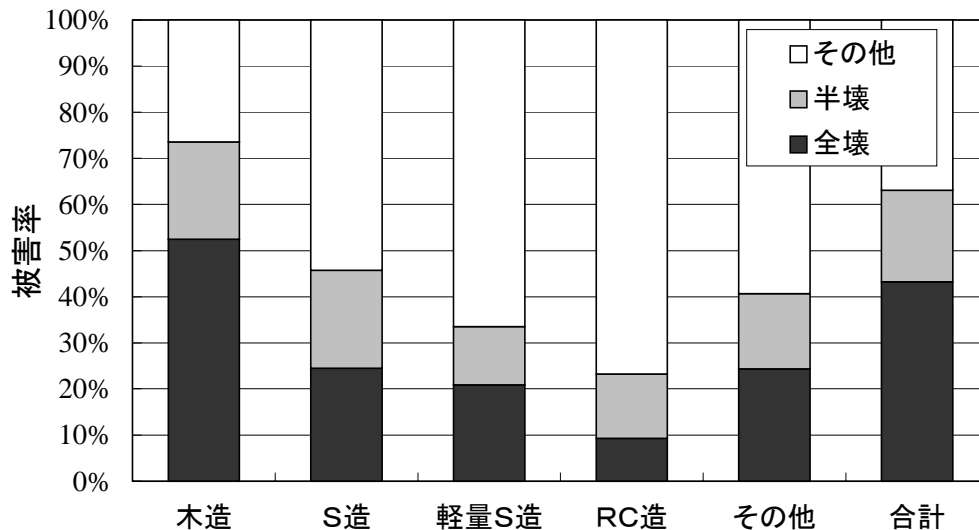


図-4.4 建物の構造別被害率

4.4 建物被害のマクロ分析

(1) 建築年代別被害分析

ここでは木造，RC造，S造および軽量S造の建築年代別の被害を分析する．非木造建物については耐震基準改正による影響を考慮し，1971年と1981年を境に10年ごとに区切り分析したが，木造建物に関しても比較検討のため同様の区分を施した．

図-4.5に木造建物の建築年代別被害状況を示す．全壊率及び全半壊率は建築年代が新しくなるとともに減少している．とくに1971年，1981年を境に全壊率の減少幅が大きくなっている．

次にRC造の建築年代別被害を図-4.6に示す．全壊率及び全半壊率は新しい建物ほど小さくなっており，木造と同様の傾向が見られる．とくに1951年，1981年を境に全半壊率の減少幅が大きくなっており，また全壊率は1971年にも大きく減少している．これらは耐震基準改正による影響かと思われる．

図-4.7にS造建物の建築年代別被害率を示す．1962年以降の建物に関しては，木造，RC造と同様に全壊率及び全半壊率が，新しい建物ほど低くなっているが，1961年以前は著しく小さい．そこで，この時期の建物分布を調べた結果，それらの多くは臨海部に位置しており，液状化の影響を強く受けている．またこの建物群の中には製鋼所の工場・倉庫などが多く含まれており，他の地域の鉄骨造と違う特性を持っていたことも考えられる．1961年以前と1962年から1971年までの建物の用途を調べてみると，1951年以前に全壊，半壊した3棟の中で2棟が居宅であり，被害のない32棟の内31棟は工場，倉庫，停車場等であった．続いて1952年から1961年の建物の内，全壊または半壊した居宅，事務所等は全56棟中5棟(8.9%)，工場，倉庫等は85棟中15棟(17.6%)である．1962年から1971年になるとS造の居宅，事務所等が256棟とそれ以前の5倍近くに増え，その内の76.6%である196棟が全壊または半壊を受けた．工場，倉庫等の建物の中で全壊または半壊の被害を受けたのは208棟中，59.1%の123棟であった．さらに全壊を受けた建物の居宅，共同住宅，事務所，店舗等の占める割合を調べると，1961年以前に13棟中6棟と半分以下であったものが，1962年から1971年にかけては227棟中153棟となり，67.4%の占有率であった．また3階建て以上のS造建物が建てられるのは1960年代になってからであった．以上のことから全半壊率が1961年を境に大きく変わった理由として，1960年代から1970年代の高度経済成長を背景として増加した鉄骨造の住宅，事務所等が大きな被害を受け，それ以前に造られた建物の多くは低層の固定荷重の少ない工場，倉庫等が多く，被害が少なかったことなどが考えられる．

図-4.8に示した軽量S造も他の構造と同様に，古い建物ほど被害率が高いという傾向が見られる．とくに1981年を境に全壊率の減少率が大きくなっており，耐震基準改正による影響を受けているようである．この古い建物ほど被害率が高いという傾向は，杉浦・山崎(1996)による宝塚市，後藤・山崎・佐藤(1996)による芦屋市，村尾・山崎(1997b)による津名郡北淡町，後藤・山崎・若松・浅野(1997)による尼崎市，杉浦・山崎(1997)による伊丹市，山口・山崎・若松(1997)による西宮市等，他の地域でも見られる

また図-4.9から図-4.12のように各構造について，1年ごとに区分した被害率の変化も調べてみたが，ほぼ連続的に年代が古くなるほど被害率の増加が見られ，経年による劣化の影響を受けていると思われる．

(2) 建築階数別被害分析

ここでは建築階数による被害を分析した。

表-4.2 および図-4.13 に灘区における RC 造建物の階数別被害棟数と被害率を示す。全体的に 8 階建てまで階数が増すほど全壊率および全半壊率が大きくなっている。8 階以上は棟数が減少し、統計的な解釈が困難だが、低層建築に比較して全壊率および全半壊率が大きくなっている。

次に S 造建物の階数別被害棟数と被害率を表-4.3 および図-4.14 に示す。RC 造と同様に、全半壊率は、1 階建てから 5 階建てまで高さが増すほど大きくなっている。6 階建て以上の建物は棟数が少ないため統計的解釈をするのが困難である。

(3) 木造建物の屋根別被害

ここでは、木造建物の屋根別被害について分析する。全木造の屋根種別の比率は瓦葺き(18,236 棟)が全体の 80.2%を占め、次に金属葺き(2,308 棟)が 10.2%、スレート葺き(1,742 棟)が 7.7%となり、板葺き(134 棟)とガラス、ビニール等を含むその他(290 棟)の屋根がわずかに 2%弱であった。

表-4.4、図-4.15 に木造建物に関する主要な 3 種の屋根(瓦葺き、金属葺き、スレート葺き)ごとの建築年代別被害棟数および被害率を示す。総棟数で見ると、全壊率は瓦葺きが最も高く 57.2%、続いてその他 55.2%、板葺き 47.8%、金属葺き 45.1%となる。スレート葺きは 11.4%と木造の 5 分の 1 と最も低かった。建築年代ごとに見ると、どの年代においても全壊率、全半壊率は瓦葺きが最も高く、スレート葺きが最も低いという傾向が見られた。

新耐震設計法(1981 年)に定められた固定荷重と、杉山(1996)によれば、下地を含む屋根重量は瓦葺き(65~150kg/m²)、スレート(20~55kg/m²)、金属(データは主に亜鉛鉄板葺き)(5~25kg/m²)の順に軽くなり、各年代ごとで最も被害率の高い屋根の重量が最も重くなっている。しかし金属の屋根とスレートの屋根とでは被害率と重量の関係が逆転している。データからではその理由が確認できなかったが、屋根の違いによる構法の違い、あるいは屋根種の選択と建物所有者の経済的事情などが関係していると思われる。

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

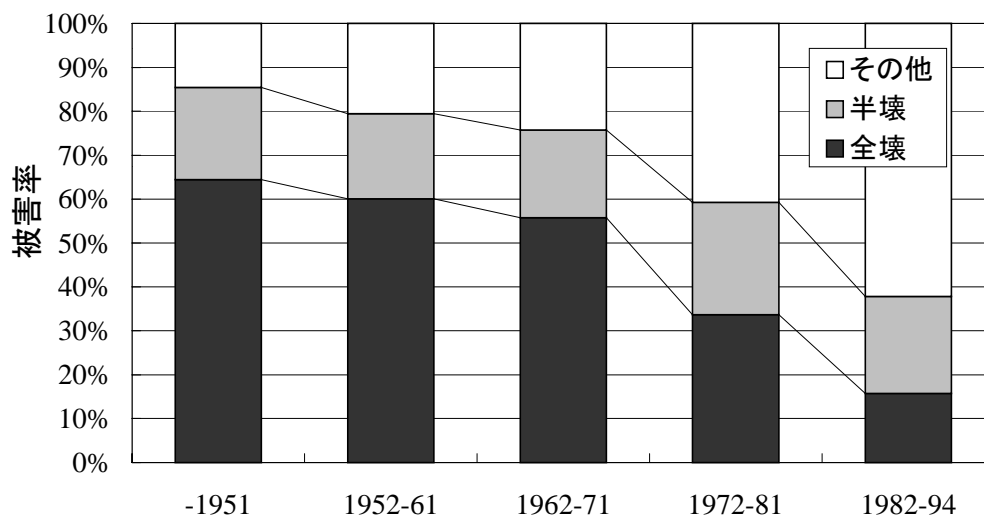


図-4.5 木造の建築年代別被害率

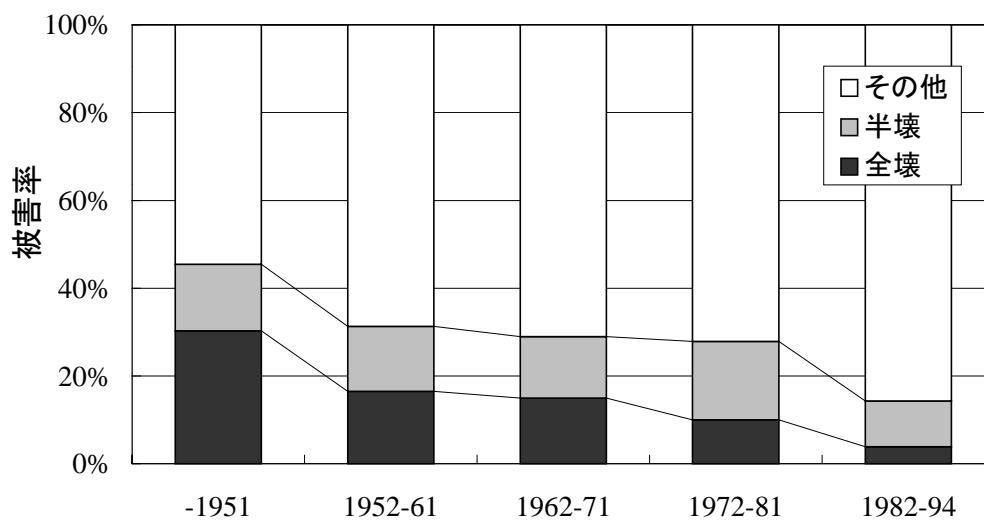


図-4.6 RC造の建築年代別被害率

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

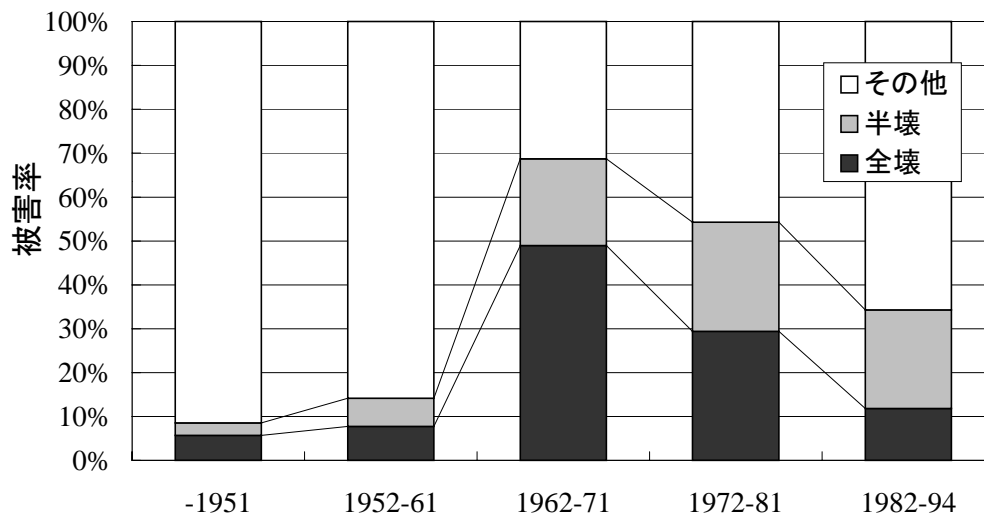


図-4.7 S造の建築年代別被害率

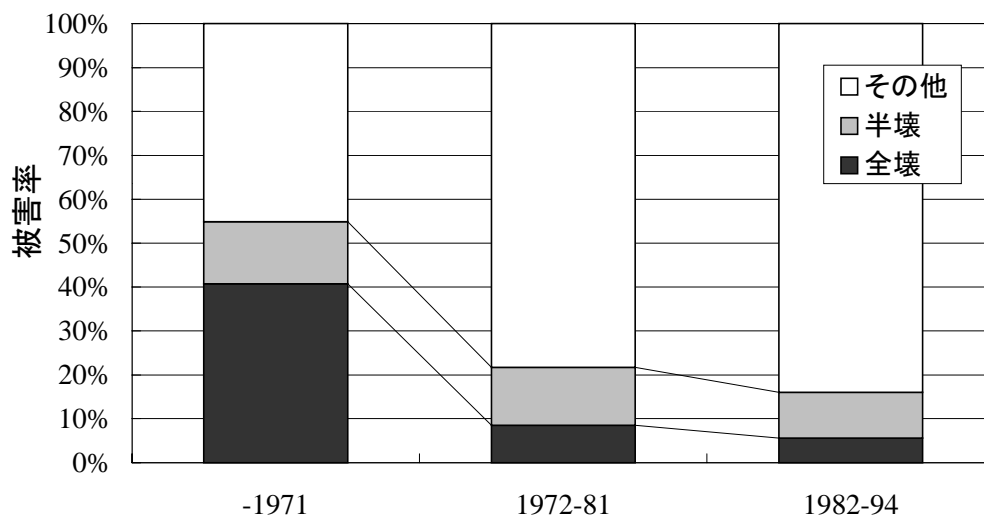


図-4.8 軽量S造の建築年代別被害率

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

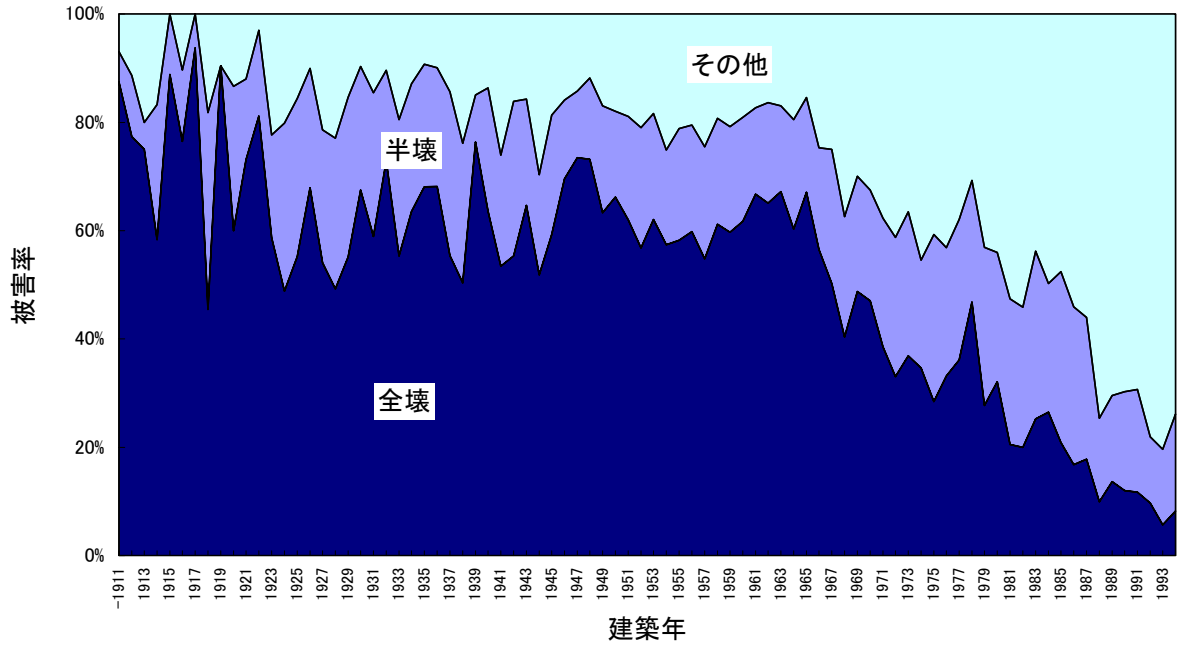


図-4.9 木造の建築年別被害率

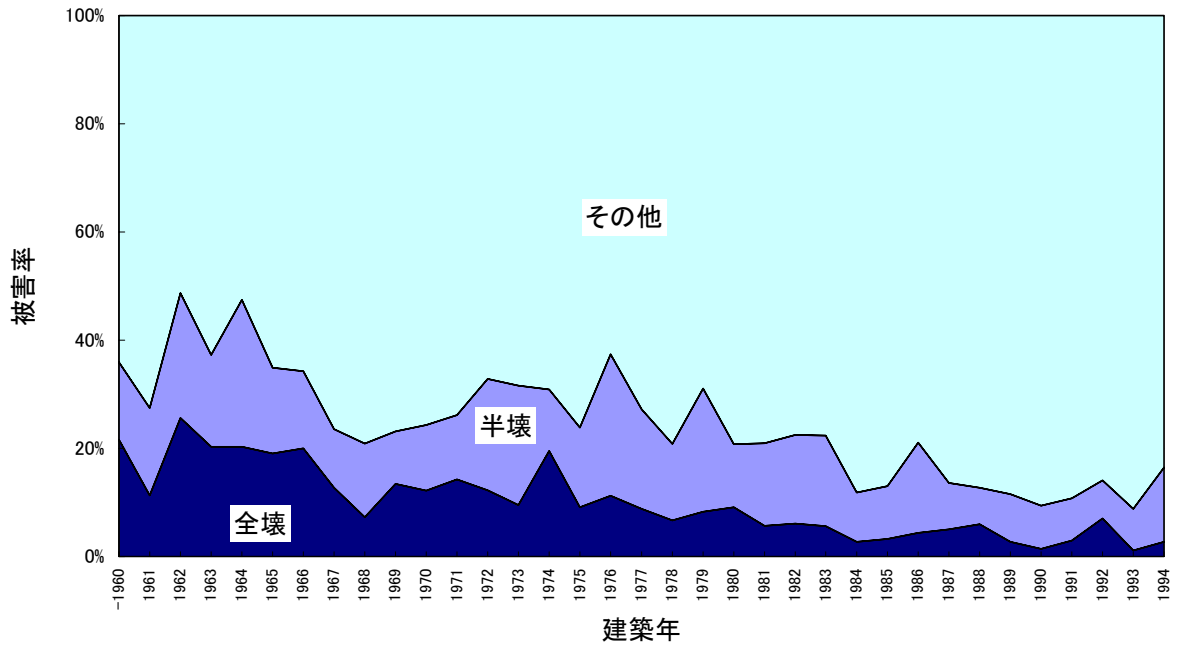


図-4.10 RC造の建築年別被害率

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

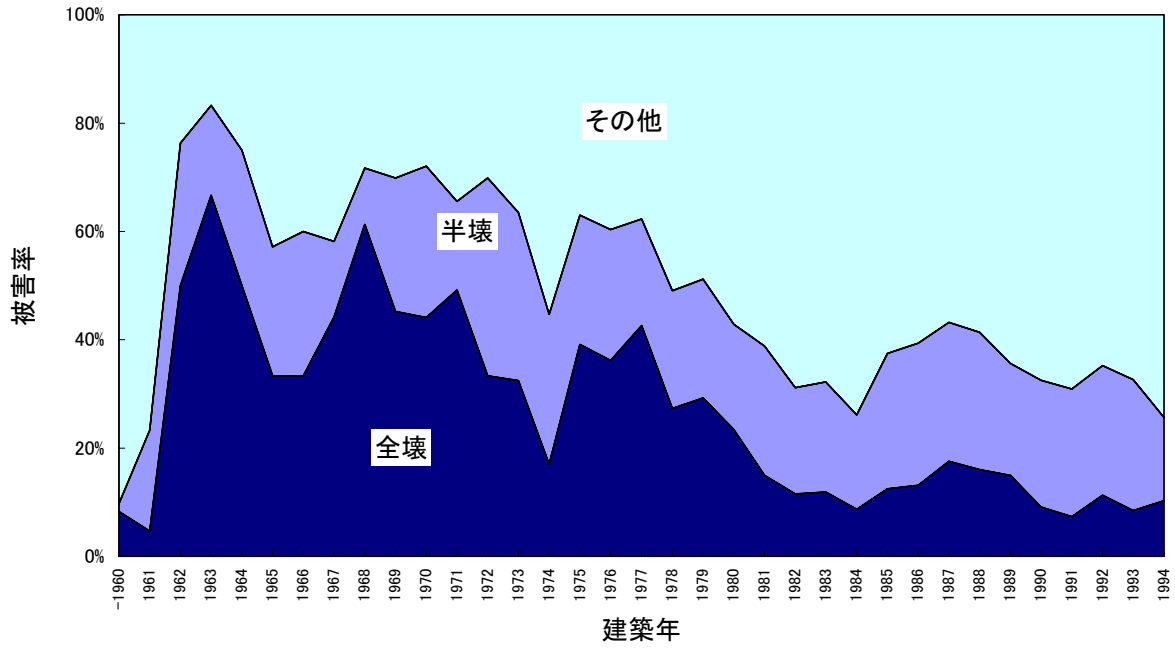


図-4.11 S造の建築年別被害率

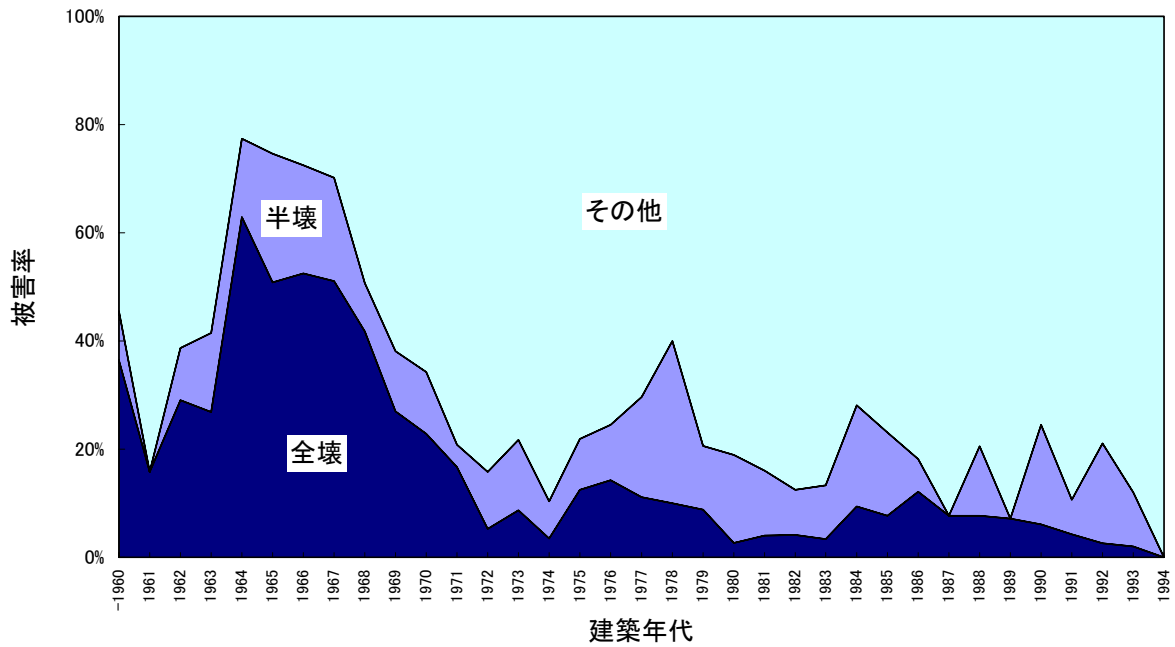


図-4.12 軽量S造の建築年別被害率

表-4.2 RC造の階数別被害棟数

建物階数	全壊	半壊	その他	計
1F	70	119	584	773
2F	52	59	540	651
3F	53	102	720	875
4F	76	82	561	719
5F	55	78	330	463
6F	21	48	94	163
7F	9	21	53	83
8F	11	15	17	43
9F	3	4	12	19
10F	2	3	12	17
11-14F	2	1	5	8
計	354	532	2928	3814

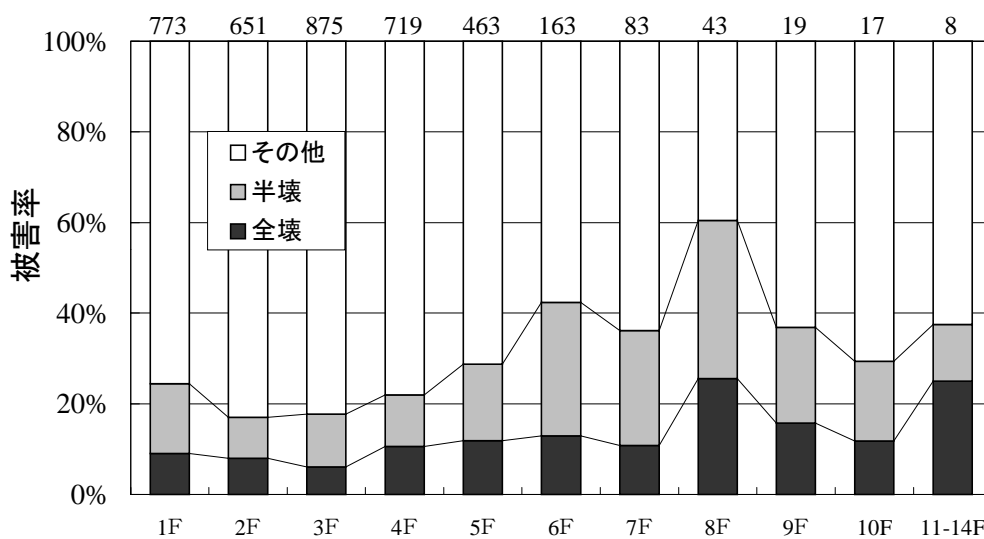


図-4.13 RC造の階数別被害率

表-4.3 S造の階数別被害棟数

建物階数	全壊	半壊	その他	計
1F	77	41	358	476
2F	131	75	262	468
3F	207	229	412	848
4F	78	86	122	286
5F	28	20	14	62
6F	6	7	9	22
7F	1	3	1	5
8F	1	0	1	2
9F	3	1	0	4
計	532	462	1179	2173

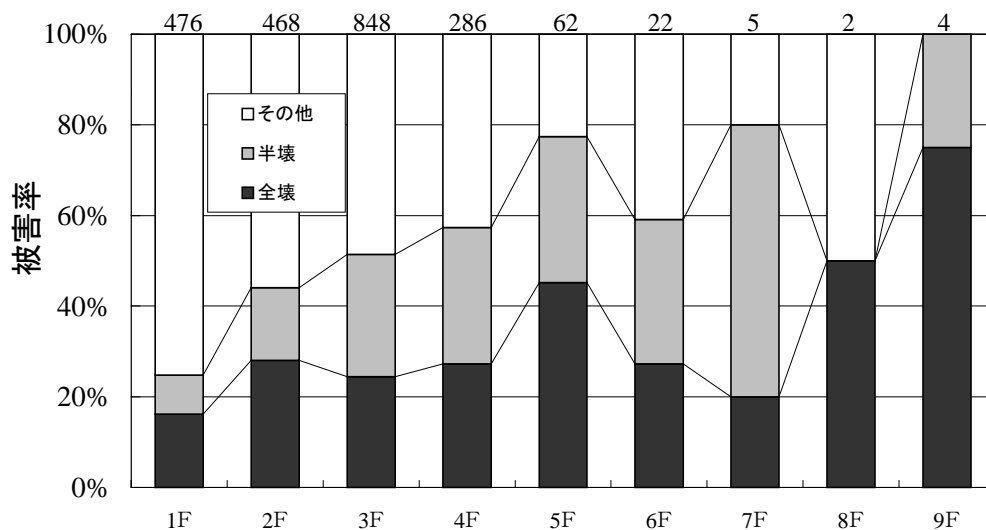


図-4.14 S造の階数別被害率

表-4.4 木造の屋根種別・建築年代別被害棟数

建築年代	屋根種別	全壊	半壊	被害なし	計
-1951	瓦	4467	1471	1021	6959
	金属	441	128	222	791
	スレート	23	13	67	103
1952-61	瓦	2572	830	749	4151
	金属	253	84	237	574
	スレート	24	10	33	67
1962-71	瓦	2226	776	773	3775
	金属	286	121	329	736
	スレート	22	16	59	97
1972-81	瓦	887	612	890	2389
	金属	54	31	81	166
	スレート	50	111	252	413
1982-	瓦	291	371	645	1307
	金属	7	11	53	71
	スレート	80	159	844	1083
合計	瓦	10443	4060	4078	18581
	金属	1041	375	922	2338
	スレート	199	309	1255	1763

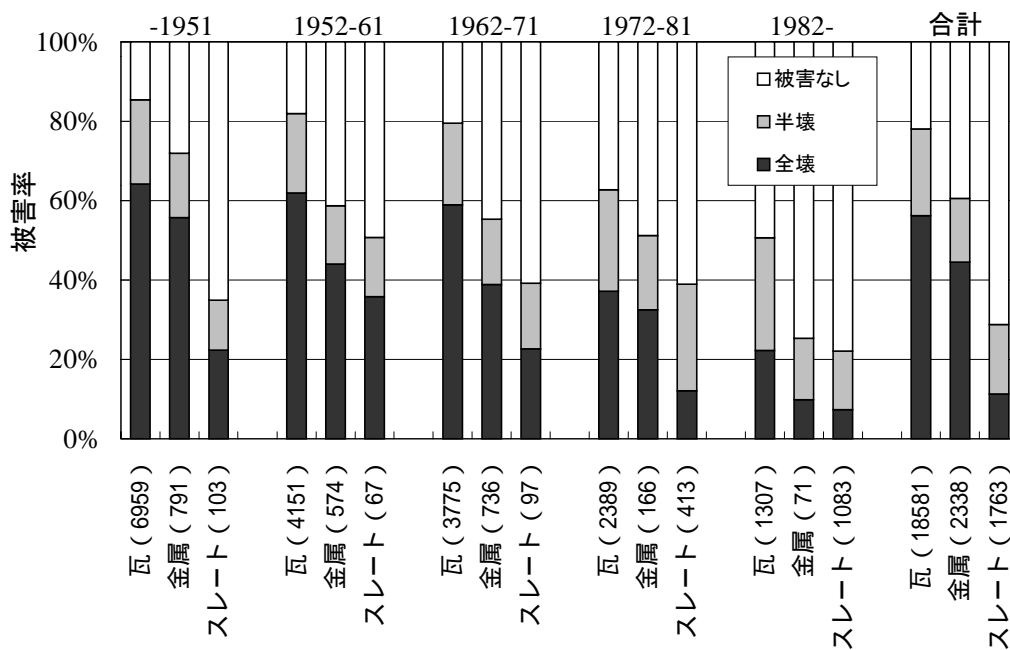


図-4.15 木造の屋根種別・建築年代別被害率

4.5 GISを用いた建物被害分析

次に、灘区内の山麓部を除く 350 町丁目を対象として、地理情報システム（GIS）を用いた建物被害分析を行う。

（2）建物の分布と被害の状況

図-4.16 から図-4.18 は主要構造（木造，RC 造，S 造）別の棟建物数分布である。灘区における建物の約 3/4（図-4.3 参照）を占める木造は、臨海部を除き広範囲に分布しているのに対して、RC 造および鉄骨造は 50 棟以下の町丁目が大半を占めている。

町丁目ごとの構造別全壊率を図-4.19 から図-4.21 に示す。木造全壊率が 60%以上の町丁目は全体の 52%にあたる 182 町丁目であり、棟数の著しく少ない臨海部を除いた南部から阪急電鉄にかけての地域に広がっており、阪急電鉄の北側では全壊率 20%未満の地域が急増している。鉄骨造および RC 造の全壊率 60%以上の地域は、それぞれ 8 町丁目、46 町丁目と木造に比べて著しく少ないが、どの構造においても、臨海部以北より阪急電鉄までの東西方向の帯状地域で被害率が高いという傾向が見られた。それぞれの構造について全壊率の分布が類似しているということから、第5章において地震動を推定するうえで、最も棟数の多い木造建物の被害率を用いることが最も有効であることがわかる。

次に建物全壊率の分布と兵庫県南部地震により発生した死者の関係について調べる。神戸市（1996b）の統計によれば、兵庫県南部地震による灘区内の死亡者は 924 人であり、神戸市内では東灘区（1,461 人）について二番目に大きかった。今回調査した 350 町丁目の中では、約 46%の 160 町丁目で死者が発生しており、最も多かったのは琵琶町 1 丁目の 40 人であった。図-4.22 に神戸市（1991）の各町丁目の人口を基に作成した町丁目ごとの死者発生率を示す。ただし新しく生まれた町である大月台については、平成 7 年版国勢調査を使用した。死者発生率の高い地域は臨海部以北から阪急電鉄に挟まれた帯状の地域であり、全壊率の高かった地域と同様の傾向を示している。

（3）木造建物の微地形区分別被害

兵庫県南部地震における各種構造物の被害分布が微地形と密接に関係していたことが、吉岡・宮地・寒川・下川・奥村・水野・松村（1995）により指摘されている。本章では国土地理院（1966，1996）による土地条件図にもとづき、被害の著しく小さかった山麓部及び液状化による影響が大きい臨海部を除いた地域を、図-4.23 のように町丁目単位で 6 種の微地形に区分し、木造建物の被害率と微地形（土地条件）との関係を調べた。その結果を図-4.24 に示す。この中で、微地形区分は左より右に向かって標高の高い順に配列しているが、これは表層の堆積物の粒径とも対応しており、左より順次細粒な堆積物に移行している。

台地・段丘の全壊率および全半壊率を見ると、地質年代の若い低位面の方が上位面よりも高い被害率となっている。また低位面の台地・段丘上には小河川に沿って浅い谷が分布していることから、ここでは谷部分とそれ以外の一般面を区別して示している。両者における全壊率および全半壊率を比較すると、浅い谷が一般面よりも高い被害率となっており、谷地形もしくはこれに起因する表層の地盤条件の違いが建物の全半壊率に大きく影響していることが窺われる。

さらに沖積低地についても比較すると、扇状地、緩扇状地、海岸平野・三角州の順に全半壊率（とくに全壊率）が大きくなっており、標高が高く粗粒な砂礫で構成されている扇状地より、細粒の砂ないし粒土で構成されている海岸平野・三角州の方が全半壊率が高いことがわかる。

沖積低地上の被害率が台地・段丘と比較して、必ずしも大きくなっていない理由として、地震動の大きさが被害率に影響していたことなどが考えられる。

（4）建築研究所との全壊率判定の比較

本章で用いた神戸市の調査データと震災復興都市づくり特別委員会（1995）による建物被害調査をもとにした建設省建築研究所（1996）のデータを、町丁目ごとの木造建物の全壊率で比較したものを図-4.25 に示す。建築研究所データには、構造種別による分類がされていないため、低層住宅（2階以下）という分類を木造と仮定し、神戸市調査データの全壊率と比較している。灘区のデータは固定資産税減免を目的とした神戸市による建物被災度調査にもとづくもので、「住宅が滅失したもの・あるいは、補修しても家屋として再使用することが困難なもの（損害の程度が50%以上）」（神戸市罹災証明）を全壊と定義している。一方、建築研究所の用いたデータの判定基準は第2章で説明したようにそれとは異なっているため、「倒壊あるいは大破」を全壊として比較した。図4-25はこのような判定基準の違いを示しており、全体的に本章で用いた神戸市調査による被害データの方が、建築研究所データよりも高い全壊率となっていることがわかる。これは第2章および第3章で得た結果と一致する。図中、一部判定基準が逆になっている町丁目があるが、これらは主に臨海部の建築棟数が少ない地域で、それぞれの母集団の棟数の少なさの影響が大きくなってしまった結果と思われる。

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

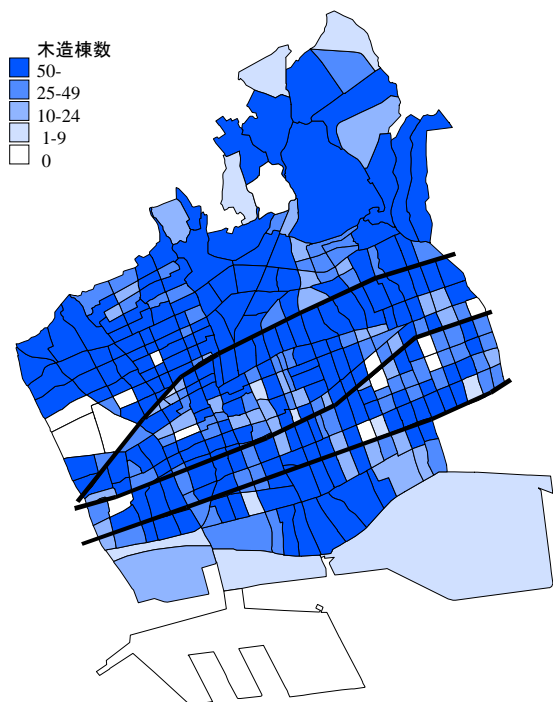


図-4.16 町丁目ごとの木造棟数分布

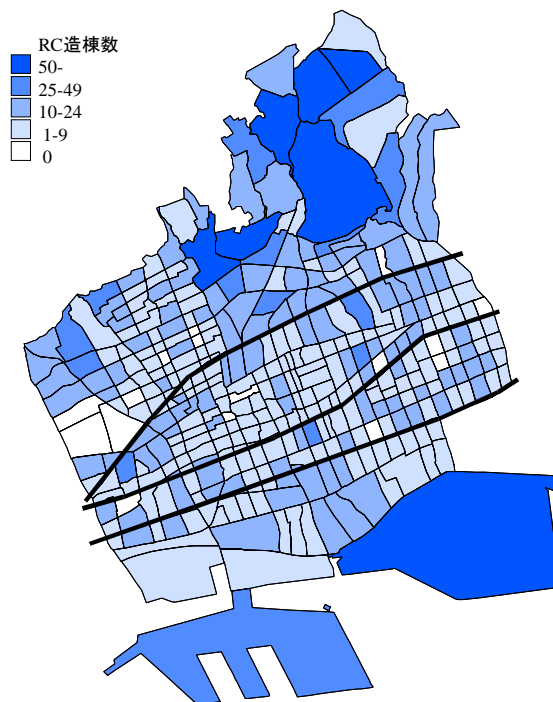


図-4.17 町丁目ごとのRC造棟数分布

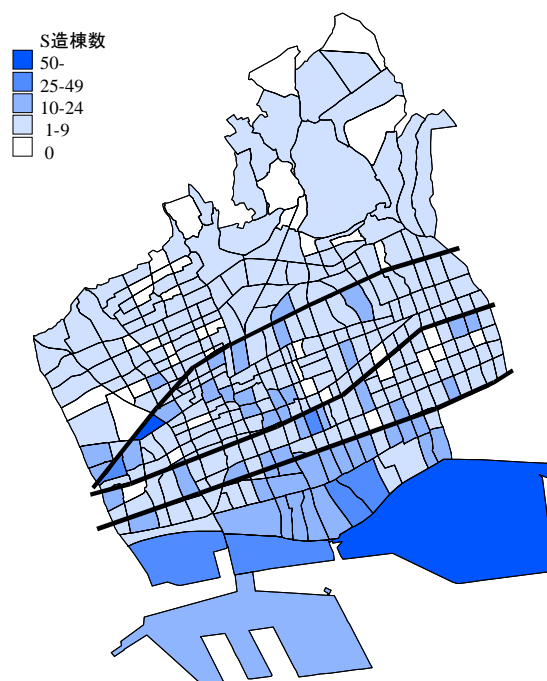


図-4.18 町丁目ごとのS造棟数分布

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

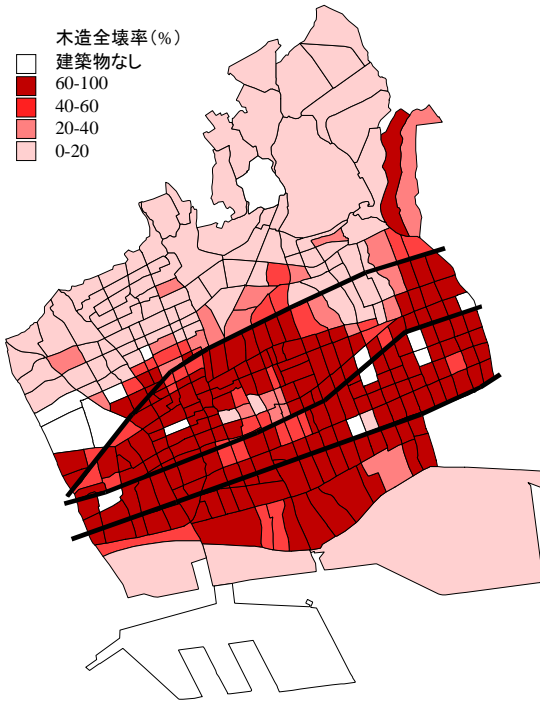


図-4.19 町丁目ごとの木造全壊率

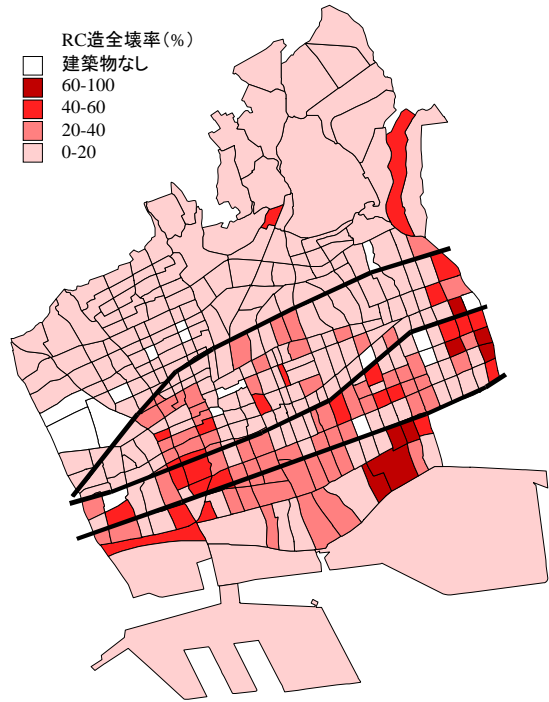


図-4.20 町丁目ごとのRC造全壊率

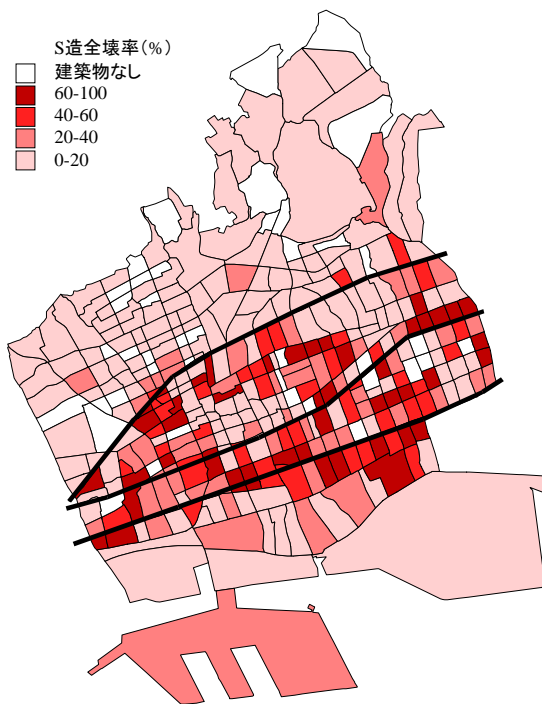


図-4.21 町丁目ごとのS造全壊率

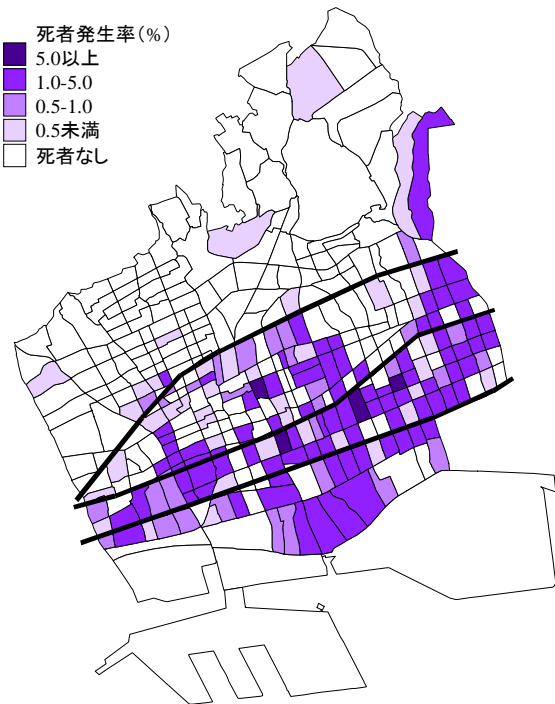


図-4.22 町丁目ごとの死者発生率

第4章 灘区における建物被害のマクロ分析

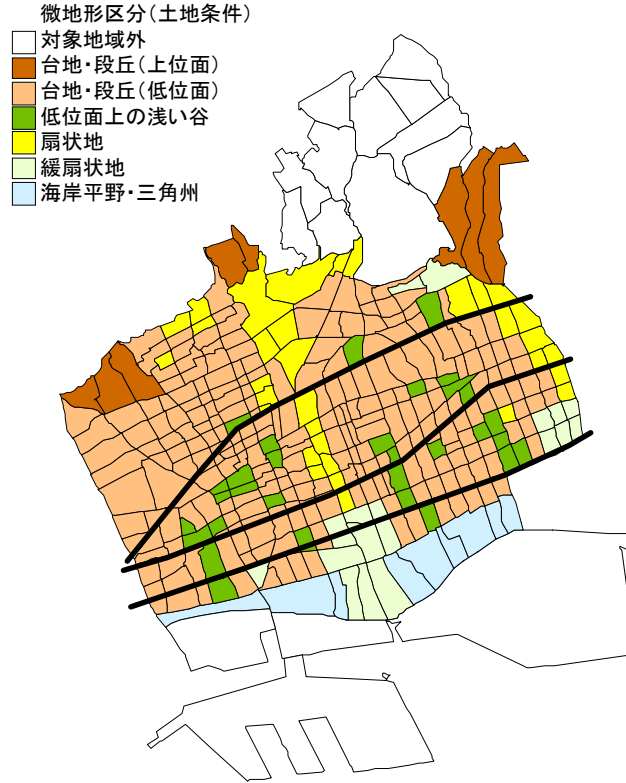


図-4.23 町丁目ごとの微地形区分(土地条件)

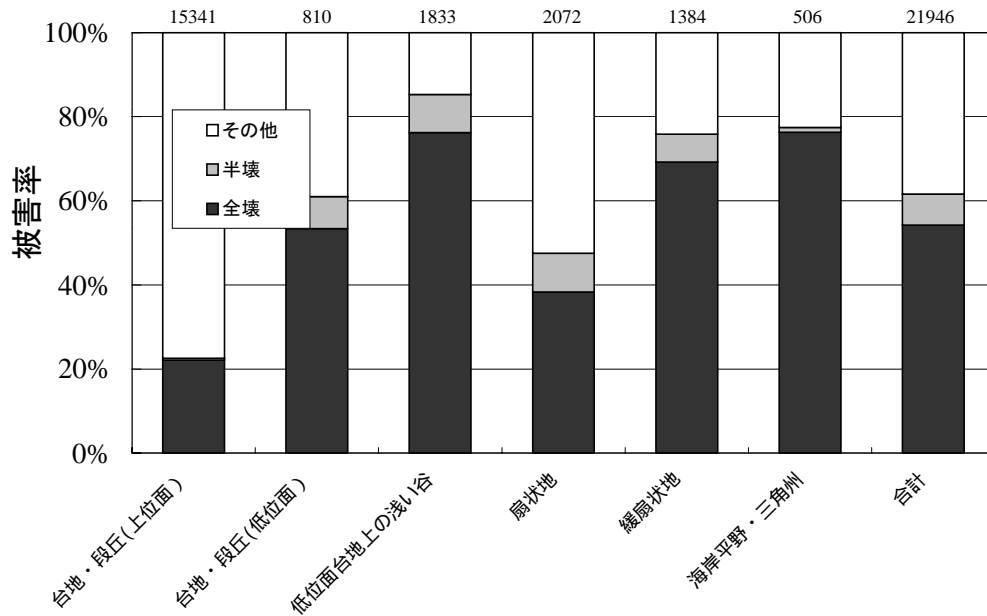


図-4.24 木造建物の微地形区分別被害率

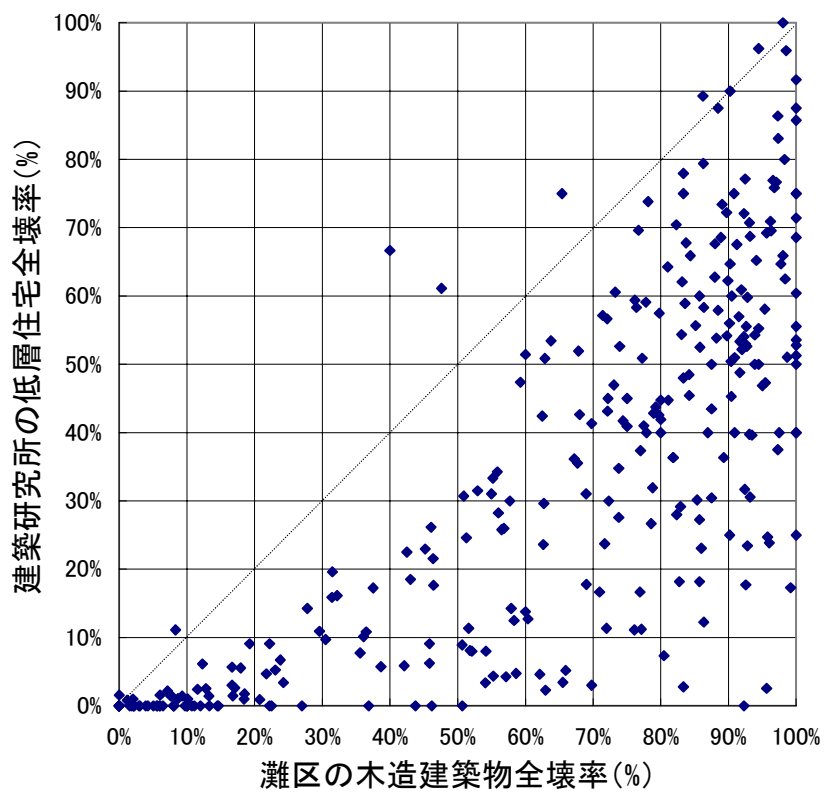


図-4.25 建設省建築研究所（1996）データと神戸市調査データの町丁目別全壊率判定の比較

4.6 まとめ

本章では灘区における建物被害のマクロ分析を行った。その結果、構造別の全半壊率はレンガ造が最も高く、続いて木造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄骨造、軽量鉄骨造、コンクリートブロック造、鉄筋コンクリート造の順であった。各構造ごとの建築年代および建築年別の被害率は、どの構造においても、一部の例外を除いて建築年代が新しいほど小さくなる傾向が見られた。また耐震基準の改正による影響も見られた。建物の階数別の被害分析では、鉄骨造、鉄筋コンクリート造とも高層になるほど被害率が高かった。木造建物の屋根別の被害は、どの建築年代においても重量の大きい瓦葺きが最も大きかったが、スレート葺きと金属葺きとでは被害率と屋根重量との関係が逆転していた。データからではその理由が確認できなかったが、屋根の違いによる構法の違い、あるいは屋根種の選択と建物所有者の経済的事情などが関係していると思われる。

また GIS を用いた灘区の建物被害分析も行った。木造建物は RC 造、鉄骨造と比較して棟数が多く、広い地域に分布している。どの構造においても、全壊率の高い地域はいわゆる「震災の帯」上に広がっているという傾向が確認された。これらは地震動の分布を推定するための尺度として、木造建物の被害率が有効に用いられる可能性を示している。また全壊率の高い地域で死者発生率も高いという傾向が見られた。木造建物の被害率と微地形（土地条件）との関係を調べた結果、台地・段丘上では上位面、低位面、浅い谷の順に、また沖積低地においては扇状地、緩扇状地、海岸平野・三角州の順に、木造建物の全半壊率（とくに全壊率）が大きかった。このことから表層の地盤条件の違いが建物の全半壊率に大きく影響していることが窺われた。ただし、地震動の大きさによる影響も大きいと思われる。さらに本章で用いた減免用被災度調査データと建築研究所データを、各町丁目ごとの全壊率に関して比較した。その結果、神戸市調査データの方が、建築研究所データよりも判定基準が緩くなっていることが確認された。

5.1 はじめに

地震による構造物被害を評価するためには、被災地域での地震動強さの面的分布を推定することが重要である。しかし兵庫県南部地震についての強震記録は、これのみからその地域の地震動分布を求めるに十分なほどは得られていない。

兵庫県南部地震の被災地域における地震動分布推定および建物被害関数に関する研究としては、これまでに、翠川・藤本(1996)が地形条件と被災地域での墓石転倒率の分布から神戸市およびその周辺での最大速度分布を推定し、藤本・翠川(1996)は各種被害データを重合して阪神・淡路地域での震度6の分布を推定している。また林・宮腰・田村・渡辺(1996)、林・宮腰・田村・川瀬(1997)は一連の研究の中で、地盤モデルのFEM解析による再現地震動と建設省建築研究所(1996)によってまとめられた建物被害調査データを用いて、最大地動速度と低層独立住宅被害との被害関数(林・宮腰・田村, 1997b)を構築し、同調査の建物被害率から被害地域全域での最大地動速度分布を推定している。さらに長谷川・翠川・松岡(1998)は、同じ建設省建築研究所(1996)のデータと東灘区西部地区の建物について村上・田原・藤田・三澤(1996)が行った建築年代別被害調査結果を用いて木造建築物の建築年代別被害関数を作成している。

筆者らの研究グループは、地震動強さと建物被害との詳細な被害関数を構築することを目的として、これまでに兵庫県南部地震による建物被害データを各自治体から収集し、分析を行ってきた。杉浦・山崎(1996)による宝塚市、後藤・山崎・佐藤(1996)による芦屋市、村尾・山崎(1997a)による神戸市灘区、村尾・山崎(1997b)による北淡町、後藤・山崎・若松・浅野(1997)による尼崎市、杉浦・山崎(1997)による伊丹市、山口・山崎・若松(1997)による西宮市等である。図-5.1に建物被害関数を構築するまでのフローチャートを示す。まず強震観測記録とその周辺地域の低層独立住宅被害データ(建設省建築研究所, 1996)とを用いて低層独立住宅の被害関数()を求め、その関数を同データのもととなった調査地域に適用し、阪神地域の地震動分布を推定する。ここまでは山口・山崎(1999)によりまとめられており、次節で詳しく述べる。本章(図中、太線で囲った部分)では、この地震動分布の推定結果と神戸市から提供された灘区の建物被害データ(第4章参照)の中から最も被害率が高く、絶対数も多い木造のデータを用いて木造建物の年代別被害関数()を構築し、それぞれの関数を再度灘区に適用することにより地震動分布を再推定し、地震動推定の精度を高めることを目的としている。以上の過程を経ることにより、地震動分布の推定範囲も広がり、構造、建築年、屋根種別など詳細な属性を含む自治体データとともに用いることにより、詳細な建物被害関数()を構築することが可能となる。

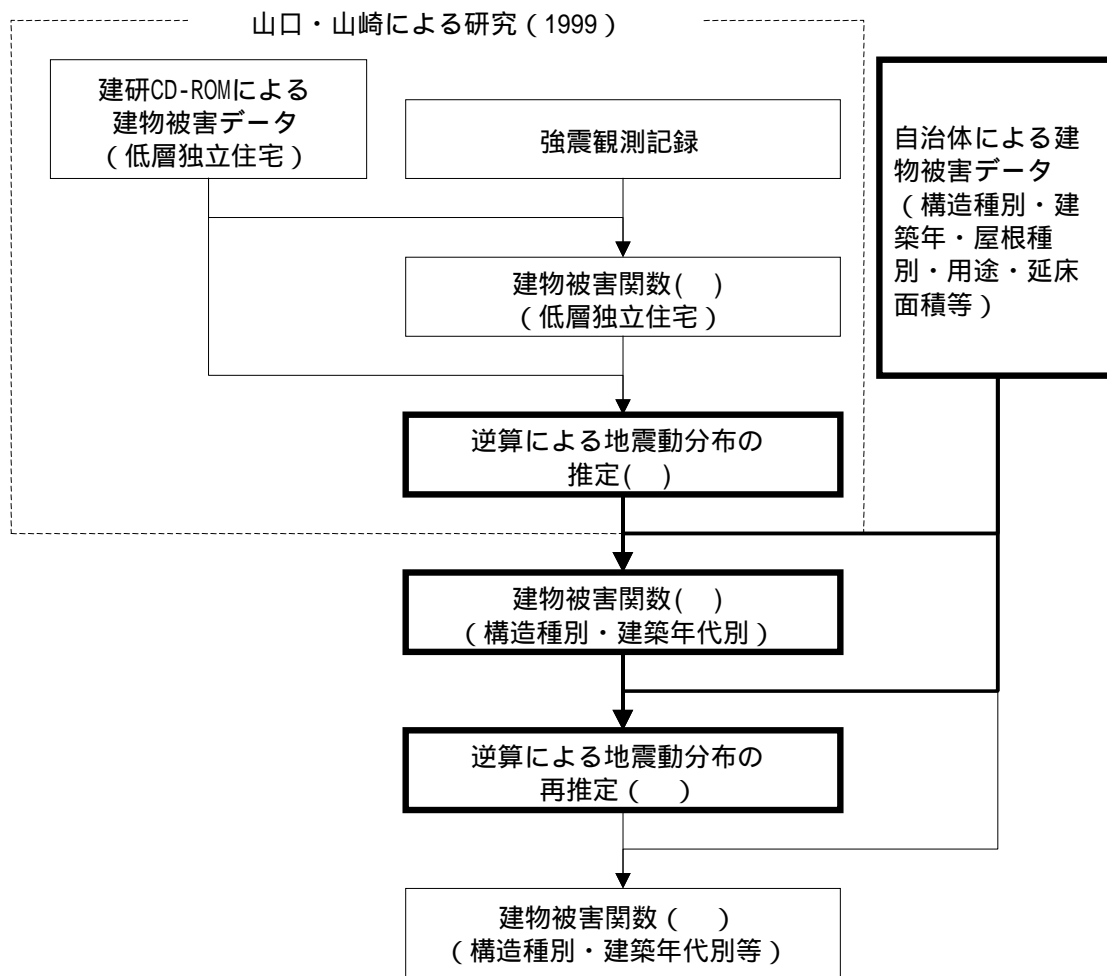


図-5.1 詳細な建物被害関数構築までのフローチャート

5.2 建築研究所データを用いた地震動分布推定の概要

山口・山崎(1999)は強震記録数が不足している兵庫県南部地震の地震動分布の推定法として、いくつかの観測値と被災地域全域にわたって同一基準で被災度判定を行っている建設省建築研究所(1996)のデータを用いて、低層独立住宅と最大加速度、最大速度などの地震動強さとの関係を調べ、地震動強さに対する低層独立住宅の被害関数を構築し、建物被害率による地震動強さの面的分布の逆推定を行っている。

本章では、この推定結果を前提として分析が行われているため、以下にその概要を示す。

(1) 使用したデータ

山口・山崎(1999)の研究では、被害関数を構築するための地震動強さの値として、公表されている17地点(図-5.2)の地盤上での記録(振り切れた記録についても、復元によって最大値が予測されたものは含まれる)を用いている。建物被害データとしては、震災復興都市づくり特別委員会(1995)および兵庫県都市住宅部計画課が行った建築物被災度調査結果を、建設省建築研究所(1996)が数値化したデータ(以下、建築研究所データ)を使用している。この調査は阪神地域全域を統一された評価基準で調査したものである。また被害の小さかった地域の地震動強さを被害関数に反映させるために、大阪市消防局(1996)による大阪府内の強震記録と大阪府(1997)による調査結果も使用している。

(2) 低層独立住宅の被害関数

山口・山崎は地盤条件、震源断層からの距離、建物棟数等を考慮した上で、地震計設置地点を中心とした対象地域範囲を決定し、その地域の建物被害率から被害関数を求めている。その際、建物階数と用途による分類となっている建築研究所データの内、棟数が多く被害率も高い木造建物と最も傾向が似ていると思われる低層(2階建て以下)独立住宅のデータを使用している。また自治体の調査に基づいている大阪府内のデータは、建築研究所データとは評価基準が異なっており、その違いを修正するために山口・山崎・若松(1997)が行った西宮市の被害分析に基づき換算している。

被害関数は、「ある地震動 x のときに全壊、半壊以上、一部損壊以上の各被害が発生する確率 $P_R(x)$ は、標準正規分布の累積確率 $\Phi(x)$ を用いて、対数正規分布(x が計測震度 I の場合は正規分布)で表せる。」という仮定から、確率紙を用いた最小二乗法により求められた。最大速度に関する被害関数を図-5.3に示す。

(3) 兵庫県南部地震における地震動分布

(2)で求められた被害関数と建築研究所データから兵庫県南部地震における地震動分布が推定された。その過程を以下に示す。

はじめに、火災による損傷等を除いた有効棟数を考慮した上で、建物棟数町丁目単位(神戸市内は町丁目面積が小さく、有効棟数が少なくなってしまうため町単位)ごとの低層独立住宅に関する全壊率、全半壊率、一部損壊以上の比率が計算された。次に図-5.3の被害関数から3種の被害率による最大速度値を計算し、それぞれ西宮市の町丁目について比較し、分布傾向が似ている

ことを確認した上で、町丁目ごとの推定地震動分布が決定された。これは気象庁（1997）が発表した震度7の帯と似た分布となっている。また低層独立住宅の棟数が少ないなどの理由により地震動の推定が難しかった地域については、低層建物全体の被害率を代替して補正している。阪神地域における地震動分布（最大速度）の推定結果を図-5.4に示す。

山口・山崎は以上の研究の中で、この推定法は「全体的な分布を把握するのに有効である」としながらも、今後の課題として「建築研究所データのない地域の取り扱い」や、「被害率が大きい地域で発生する著しく高い地震動推定値の補正」を挙げている。

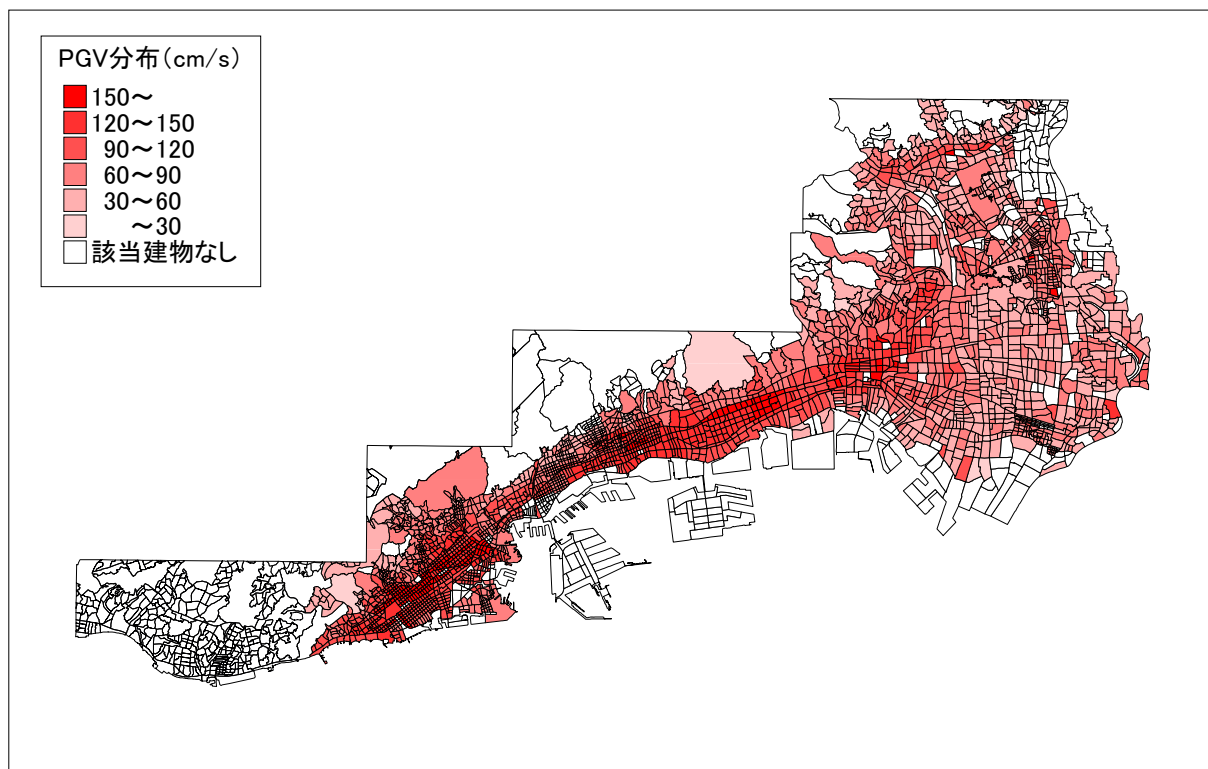


図-5.4 山口・山崎により推定された地震動分布 (最大速度)

5.3 自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数

ここでは山口・山崎により推定された兵庫県南部地震の地震動を用いて、自治体の調査に基づく灘区の建物被害関数（フラジリティカーブ）を求める。

(1) 兵庫県南部地震における灘区の被害の概要

まずは兵庫県南部地震における灘区の被害の概要を述べる。良好な環境の住宅地である北部は被害が比較的少なかったが、中央部以南では、焼失した地区や、ほとんどの住宅が倒壊してしまった地区もある。神戸市（1996b）の統計によれば、区全体では全壊約 13,000 棟、半壊約 6,000 棟、全焼 327 棟、半焼 43 棟、死亡者 924 人という被害を受けた。神戸市内においては、全壊数では長田区（15,521 棟）、東灘区（13,687 棟）について、全焼数では長田区（4,759 棟）、兵庫区（940 棟）について、死亡者数では東灘区（1,461 人）について被害が大きかった。

第4章で、神戸市により調査された建物被害データを用いて、建物被害分析を行った。その結果、建築構造別の被害率では木造が最も高く、鉄筋コンクリート造が最も低く、建築年代別ではそれぞれの構造において建築年代が新しくなるほど被害率が低かったことがわかった。

(2) 使用したデータと山口・山崎による灘区の地震動分布

本章で使用したデータは、第4章で説明した通り、神戸市が兵庫県南部地震後に実施した調査に基づく約 31,000 棟の灘区内の建物被害データである。被害項目は全壊・半壊・その他（一部損壊を含む全壊・半壊以外のもの）の3区分となっており、第2章で述べた通り、建築研究所データのものとは定義が異なっている。また各データには、町丁目、建築構造、建築年、床面積、屋根種別等の属性が含まれている。

前節で説明した、山口・山崎が建築研究所データを用いて推定した灘区の地震動分布を図-5.5 に示す。本章では、液状化の影響による被害が大きかった臨海部と、被害が著しく少なかった山麓地域以外を対象地域としている。これを見ると地震動の大きい地域が東西方向に帯状に伸びており、気象庁（1997）による震度7の帯の存在が読み取れる。白い部分は町丁目全てが公園であるため建物がなかったり、建築研究所データのもととなった調査の対象地域外であるなどの理由から推定できなかった地域である。また灘区内には3つの川が流れており、町丁目ごとに微地形分類などが違うが、山口・山崎の研究では神戸市内の地域は、町丁目ごとの建物棟数が比較的少ないという理由で、町単位で処理されているため、微地形分類は考慮されていない。この地震動推定のもととなった建築研究所データの低層独立住宅は、建築年代の区分がないため、地域によって建築年代ごとの建物分布が異なることの影響を受けていると思われる。この推定地震動を30cm/sごとにランク分けし、木造建物の建築年代ごとの棟数率を比較したものを図-5.6に示す。最も被害率の高い1951年以前の建物は、PGVの最も大きな150-180cm/sで半数以上を占め、0-30cm/sでは30%に満たない。また被害率の低い1972年以降に建てられた比較的新しい建物の割合は、PGVが大きくなるにつれ、減少しているのがわかる。建築年代を考慮した被害関数を用いて、地震動の再推定を行い、それらを比較検討することにより、建築年代ごとの建物分布の影響を除去することが可能となろう。

(3) 灘区の建物被害関数

ここでは、(2) で得られた灘区対象地域内の推定地震動（町丁目単位の最大速度）を用いて、神戸市の実施した建物被害調査に基づく建物被害関数（フラジリティカーブ）（ ）（図-5.1 参照）の構築を試みた。

表-5.1 に対象地域内の建物被害棟数を示す。被害関数構築の対象としたのは構造別には、木造、鉄筋コンクリート造（以下、RC 造）、鉄骨造（以下、S 造）、軽量鉄骨造（以下、軽量 S 造）の4種である。また木造は灘区全体の約 4 分の 3 を占めているため、建築年に応じて 5 区分し、建築年代ごとの被害関数構築も試みている。1971 年、1981 年に、建築基準法に基づく RC 造、S 造等の耐震基準が改正されたため、木造建物についても同様の建築年代区分を用いた（第四章参照）。

被害関数を構築するためには、被害率算定のためにある一定数以上の建物データ集合が必要である。ここで用いた建物被害データは町丁目を単位としているが、建物棟数が不十分であったり、被害の少ない町丁目が存在するため、表-5.2 のように地震動指標の大きさを町丁目を並び替えた上で、被害率算定のための十分な棟数が得られるよう、棟数に応じて区分した。各構造・建築年代分類ごとの区分数と区分棟数は表-5.1 に示した通りである。尚、被害データを区分した際には、棟数による重みつき平均により区分ごとの地震動値を求めている。

ここで求めた地震動強さ（最大速度）と被害率の関係から、調査ごとの建物被害推定式を求める。ある地震動 x のときに被災ランク R 以上の被害が発生する確率 $P_R(x)$ は、標準正規分布の累積確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて、対数正規分布で表せると仮定した。すなわち、

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \quad (5-1)$$

となる。ここで係数 λ 、 ζ は、 $\ln x$ の平均値および標準偏差であり、図-5.7 に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果を表-5.3、表-5.4 に示す。

構造別では木造が全壊率、全半壊率ともに相関係数が 0.9 を超えており最も高く、S 造は全壊率、全半壊率ともに 0.8 以下で最も低い。軽量 S 造と RC 造では、前者の方がやや高いがほぼ同じような値となっている。全壊率と全半壊率を比べると、全半壊率（平均 0.88）では S 造以外の 3 種の相関係数が 0.9 を超えており、全壊率（平均 0.84）よりも高い相関を見せている。木造の年代別では、1972-81 の相関係数が平均 0.93 と最も高く、1982 以降が平均 0.84 と最も低い。全壊率と全半壊率では平均が 0.89、0.86 であり全壊率の方がやや高い相関が見られる。多少の違いはあるが、構造別も木造建築年代別も相関係数が平均 0.86、0.88 と比較的高いといえよう。しかし、ここで回帰分析に用いた地震動はもともと建築研究所の低層独立住宅被害データから推定したもので、神戸市による建物被害データと相関が高いのは当然ともいえる。

構造別の建物被害関数を図-5.8、図-5.9 に示す。全壊率、全半壊率ともに木造が最も高く、RC 造が低い。S 造と軽量 S 造は木造と RC 造の間でほぼ同じような曲線を描いている。また木造の建築年代別の被害関数を図-5.10、図-5.11 に示す。どちらの図も基本的に建築年代の早い建物ほど、小さい地震動で被害が発生し始め、被害率は地震動の範囲によらず大きい。ただし 1952-61 と 1962-71 はほぼ重なってしまっており、大きな違いが見られない。以上の結果は第 4 章の構造別、建築年代別の被害分析結果とも整合している。

以上のように、本節では灘区における構造別、木造建築年代別の被害関数（ ）を構築した。

しかし、ここで用いた地震動データの対象地域は建築研究所データに基づいているため、建物年代分布が地域によって異なることの影響を受ける。また図-5.5に示されているように地震動が推定されていない地域の建物被害データを用いることはできなかった。ここで構築された被害関数()をもとに地震動を再推定することより、建築年代分布による地震動推定分布の誤差を取り除くことができ、また今回使われなかった建物被害データも使うことができるため、より精度が高く詳細な被害関数()を構築することが可能となる。

第5章 兵庫県南部地震における灘区の地震動分布の推定

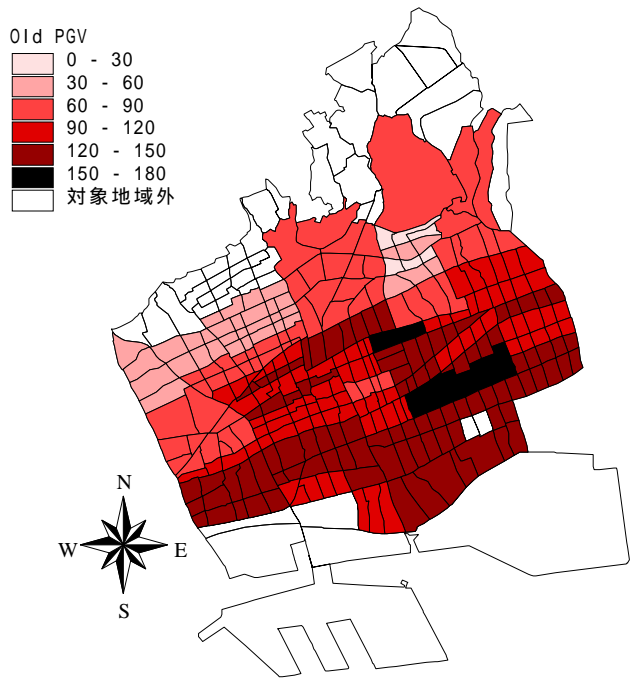


図-5.5 山口・山崎（1999）による灘区の推定地震動分布（最大速度）(単位：cm/s)

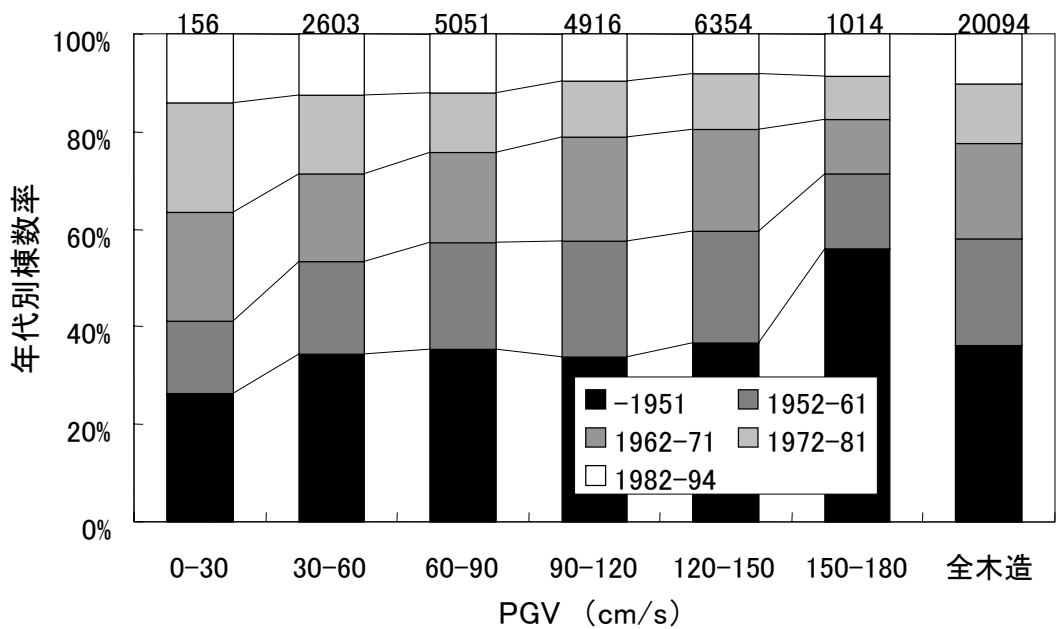


図-5.6 山口・山崎（1999）による推定 PGV のランク別建築年代別棟数率

表-5.1 灘区の対象地域内（臨海・山麓地域以外）の建物被害棟数

		全壊	半壊	その他	計	区分数	区分棟数
木造	-1951	4,987	1,474	834	7,295	20	360
	1952-61	2,854	822	714	4,390	20	220
	1962-71	2,531	773	629	3,933	20	200
	1972-81	991	675	779	2,445	20	120
	1982-94	384	512	1,135	2,031	20	100
	小計	11,747	4,256	4,091	20,094	20	1,000
RC造		358	496	2,033	2,887	20	140
S造		502	408	848	1,758	17	100
軽量S造		255	142	543	940	10	100
その他構造		98	48	111	257	-	-
計		12,960	5,350	7,626	25,936	-	-

表-5.2 統合された区分の例（140棟ごとに統合されたRC造の場合）

区分コード	町丁目コード	町丁目名	PGV	RC造棟数	区分棟数
17	：	：	：	：	140
	：	：	：	：	
	211	天城通八丁目	64.6	10	
	10	寺口町	61.9	8	
18	〃	〃	61.9	14	140
	9	六甲台町	60.1	60	
	45	宮山町一丁目	58.4	7	
	46	宮山町二丁目	58.4	17	
	47	宮山町三丁目	58.4	17	
	199	畑原通一丁目	55.4	5	
	201	畑原通三丁目	55.4	13	
	203	畑原通五丁目	55.4	7	
19	〃	〃	55.4	1	140
	291	青谷町二丁目	52.9	19	
	：	：	：	：	
	：	：	：	：	

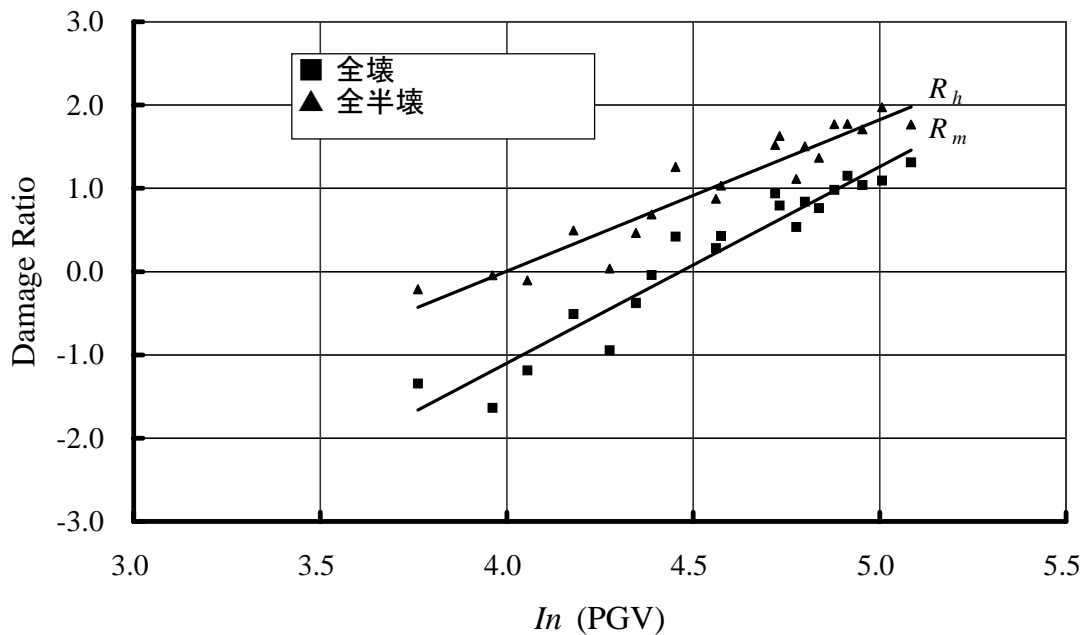


図-5.7 最大速度と木造建物被害率の関係の確率紙表示

表-5.3 建物被害関数の回帰係数（構造別）

建築構造	全壊			全半壊		
	λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2
木造	4.47	0.42	0.93	4.00	0.55	0.91
RC造	5.40	0.64	0.80	4.99	0.79	0.90
S造	5.04	0.53	0.78	4.65	0.62	0.77
軽量S造	5.06	0.65	0.83	4.71	0.61	0.92

表-5.4 建物被害関数の回帰係数（木造建築年代別）

建築年代	全壊			全半壊		
	λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2
-1951	4.32	0.42	0.91	3.69	0.62	0.83
1952-61	4.40	0.36	0.88	3.95	0.49	0.85
1962-71	4.39	0.37	0.92	3.93	0.48	0.86
1972-81	4.69	0.34	0.92	4.23	0.42	0.94
1982-94	5.01	0.40	0.84	4.60	0.46	0.83

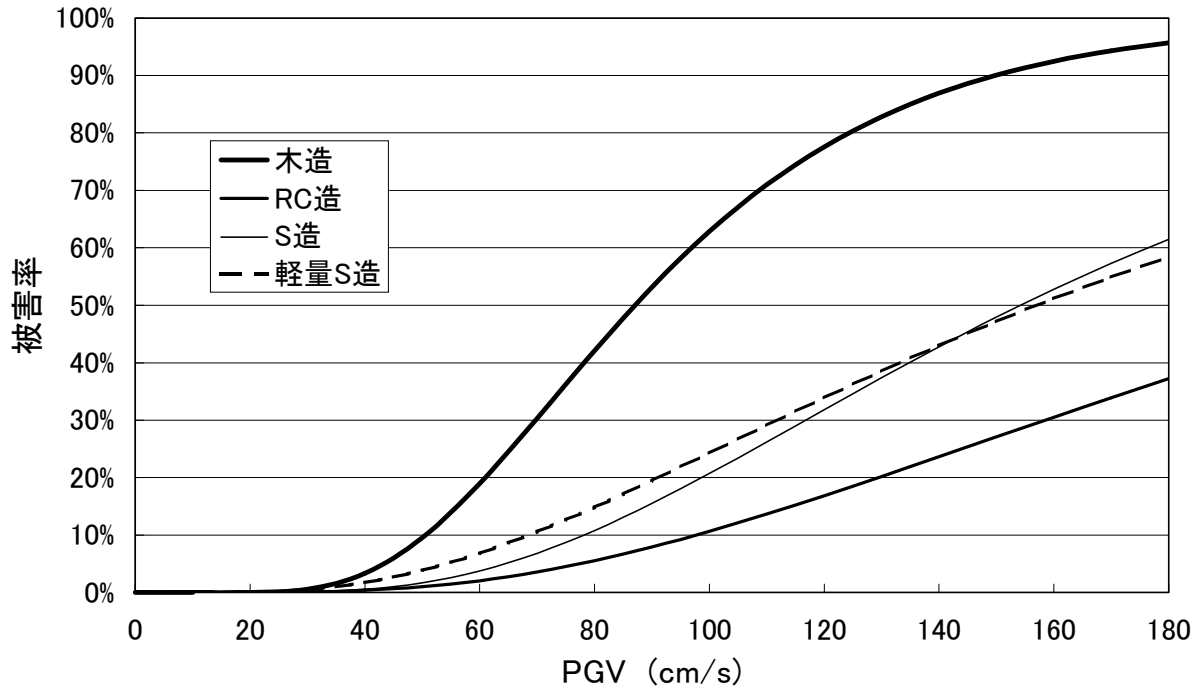


図-5.8 構造別被害関数 (全壊率-最大速度)

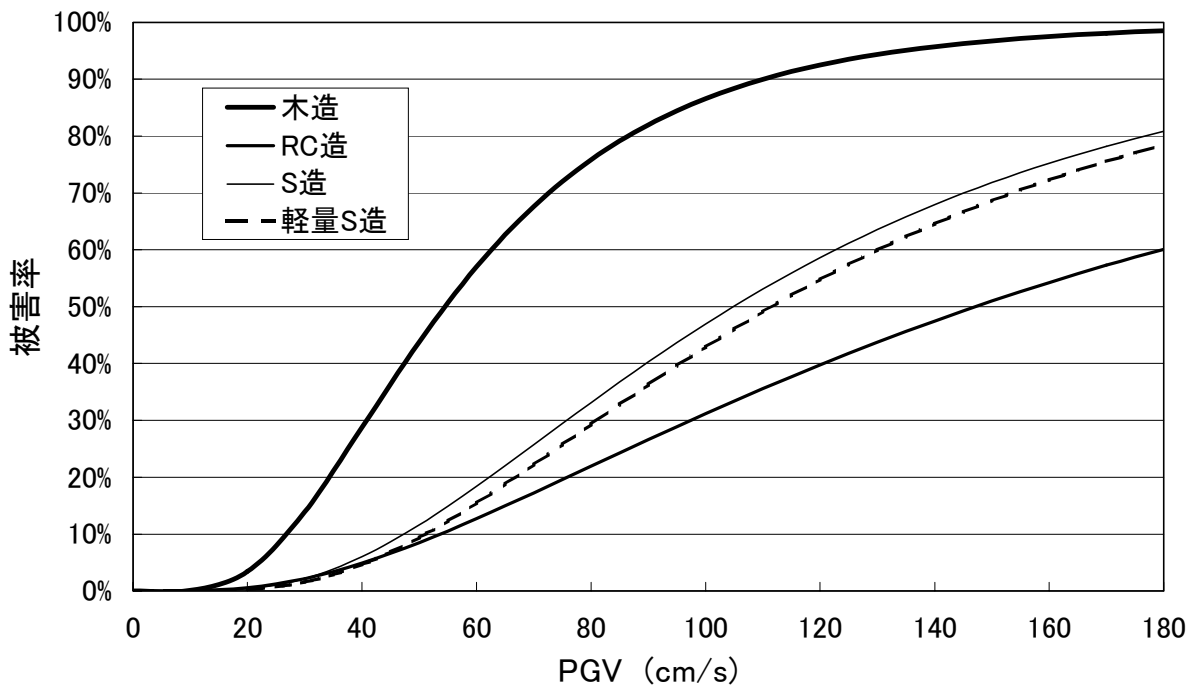


図-5.9 構造別被害関数 (全半壊率-最大速度)

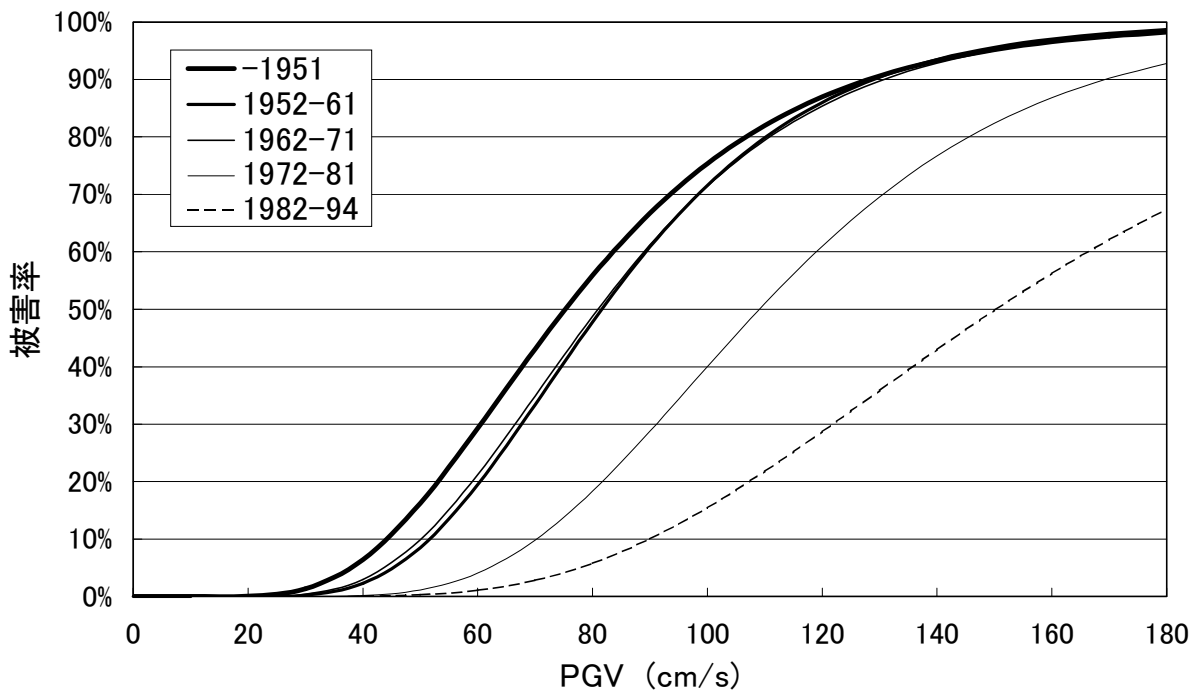


図-5.10 木造建築年代別被害関数（全壊率-最大速度）

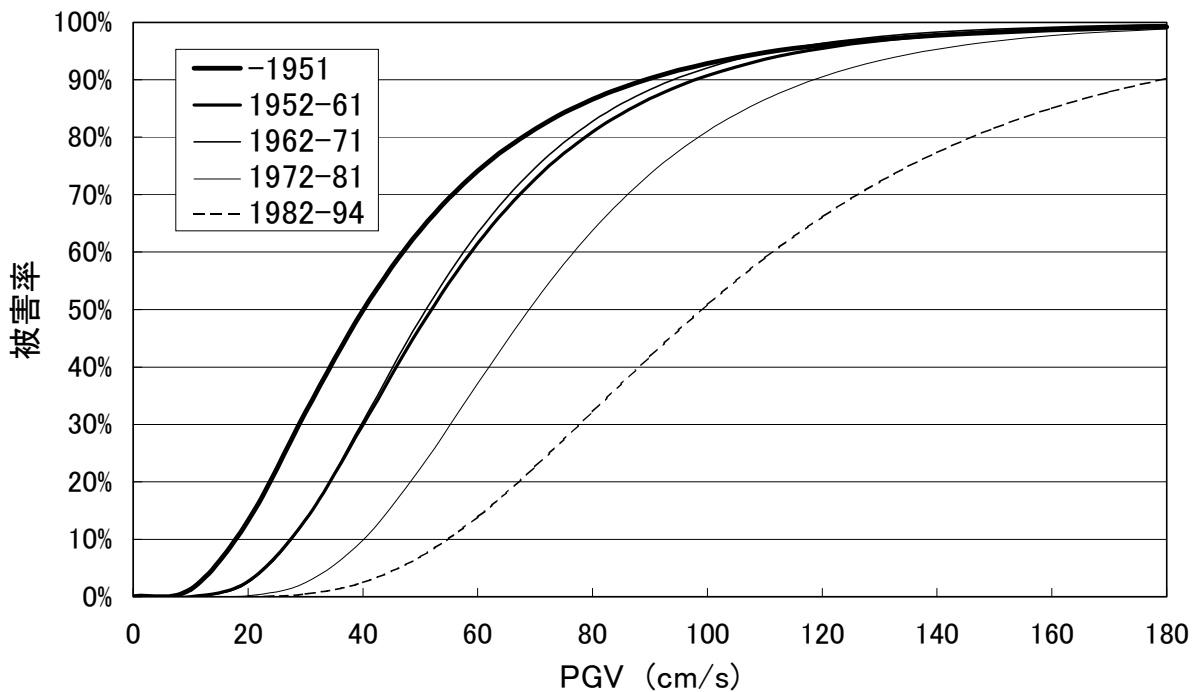


図-5.11 木造建築年代別被害関数（全半壊率-最大速度）

5.4 灘区における地震動分布の再推定

(1) 地震動分布再推定の方法

次に前節で求めた被害関数を用いて、灘区の地震動分布を推定した。ここでは4.5で指摘したようにどの主要構造も被害率の分布が類似していたことから、最も建物棟数が多く、最も被害関数の相関が高い(表-5.3参照)木造建物の建築年代ごとの被害関数(図-5.10, 図-5.11)を用いて、以下のような方法で推定した。

対象地域内の346町丁目について、それぞれの建築年代(5区分)ごとの被害関数(全壊率と全半壊率)から地震動を推定する。

第4章で述べたように微地形ごとに建物被害率は異なっているため、各年代ごとの建物の全棟数が15未満の町丁目については、図-5.12に示すような微地形分類を考慮したうえで、15棟以上となるように周辺の町丁目と統合する。さらに全壊率と全半壊率がともに0%または100%となる地域は、地震動が0または著しく高い数値となってしまうため、同様の方法で統合する。

の結果得られた10通りの推定地震動(5建築年代ごとの全壊率、全半壊率)を比較検討し、最終的な推定地震動を決定する。

(2) 全壊率、全半壊率による地震動推定の比較

(1)の結果、各建築年代ごとに全壊率と全半壊率の被害関数による2通りの地震動が推定された。図-5.13に各建築年代ごとの全壊率と全半壊率により推定されたPGVの比較を示す。ただし全壊率と全半壊率のどちらか一方が0%または100%となる場合は除外している。表-5.1に見られるように建物棟数は新しくなるほど減少しているため、推定のために統合された後の地域数も建築年が新しくなるほど少なくなっている。また地域数の少ない1972-81と1982-94の相関が比較的低くなっている。全壊率と全半壊率の傾きに関しては、最も相関の低い1982-94以外はどれも0.9と1.0の間にあり、全体的には全壊率による推定値と全半壊率による推定値はほぼ等しいと言えよう。

(3) 建築年代ごとの地震動推定の比較

次に、各建築年代ごとの地震動推定値を全壊率と全半壊率による推定値平均から求めた。ここで全壊率と全半壊率のどちらかが0%または100%の場合は、もう片方の推定値を用いている。このようにして得られた5種の建築年代ごとの地震動推定値を、対象地域内の346町丁目について比較する。5つに区分された建築年代のうち、相関係数、建物棟数の点から最も平均的な指標(表-5.1, 表-5.4参照)と思われる1962-71を基準として、他の建築年代および全木造による推定値と比較した。その結果を図-5.14に示す。各相関係数は0.51(-1951)から0.68(1962-71)とそれほど高くはないが、傾きは0.92から1.06の間でほぼ1.0に等しく、建築年代による推定値の差はそれほど異なっていないと言える。山口・山崎(1999)による研究では、建築年代ごとの建物被害関数を使っているわけではないので、地震動分布を推定するうえで、建築年代ごとの建物分布の影響を受けてしまっている可能性がある(図-5.6参照)。しかし本章において、各建築年代ごとの被害関数を用いることにより、それらの影響が解消されていることを図-5.14は示している。

(4) 灘区における地震動の再推定

ここでは、これまでの結果をふまえて、木造建物の被害関数を用いた灘区における地震動の再推定値を決定する。(3)で求めた各年代により推定された地震動値の最大差を町丁目ごとに調べたところ、346町丁目の平均は46cm/sで、最も大きかったのは、対象地域内北東部に位置する土山町と桜ヶ丘町で、約130cm/sであった。

これらの地域のデータを調べたところ、著しく大きな差が出てきてしまった理由として、建物棟数の少ないことなどが考えられる。このような各年代ごとの被害関数による推定値差を補正するために、各年代ごとの推定値平均をとることとする。ただし1951以前に建築された建物の中には、明治時代に建てられた古いものも含まれており、ばらつきが多いと考えられるので除外する。

以上のような方法で再推定した灘区の地震動分布を図-5.15に示す。この結果と山口・山崎により推定された灘区の推定地震動分布(図-5.5)を町丁目ごとに比較したものを図-5.16に示す。ばらつきがあるが、全体的には傾きが1.06であり、大まかな分布傾向は近似している。また再推定した地震動分布をもとに、再度、木造建築年別の建物被害関数を構築し、その結果を同様の方法を用いて計算し、地震動の再々推定を行った。なお、新しく構築された被害関数は、図-5.10、図-5.11のものと傾向はほぼ同じであるが、より実被害を再現しているものとなっている。図-5.17に地震動分布の再推定値と再々推定値の比較を示す。図-5.16に比べ、ばらつきがほとんどなくなり、本章により地震動推定値が収束していることがわかる。

次に3(2)で行ったように、新たに得た地震動を30cm/sごとにランク分けし、木造建物の建築年代ごとの棟数率を比較したものを図-5.18に示す。再推定では30cm/s以下のPGVが得られなかったため、それよりも上のランクについて示してある。図-5.6と比較すると150-180cm/sにおける1951年以前の建物の比率が20%ほど下がっている。各ランクをみると30-60cm/sでやや古い建築年代の比率が小さいが、全体的に図-5.6に比べて平均化されており、PGV各ランクの建築年代による影響が除かれていると思われる。地震動を再推定したことによる成果を以下に述べる。

建築年代ごとの被害データから推定された地震動を比較検討し、平均値をとることにより、建築年代ごとの棟数分布が地域によって異なることの影響を取り除くことができた。

建築年代および全壊率、全半壊率ごとの10通りの地震動推定値を比較検討することにより、建物棟数が著しく少ないことによって生じる極端な地震動推定値を補正することができた。

第2章で述べたように、兵庫県南部地震後に実施した各自治体の建物被害調査は、調査方法、判定基準等がそれぞれ異なっていたため、山口・山崎(1999)は広域にわたって調査方法が統一されていた建設省建築研究所(1996)のデータを使い、被災地域全域の地震動分布推定を行った。その中で「建築研究所データのない地域の取り扱い」等を今後の課題として挙げている。本章では、棟数の多い木造建物の建築年代ごとの被害関数を用いることにより、これらの課題を解消することができた。

再推定をすることにより、地震動の推定された地域が広がった。新たに地震動が推定されたこれらの地域内には、木造約2,000棟、RC造700棟、S造100棟、軽量S造200棟の建物被害データが含まれている。この結果、構造、建築年、屋根種別、延床面積などを考慮した詳細な建物被害関数() (図-5.1参照)を構築するためのより多くのデータ数を獲得することができる。

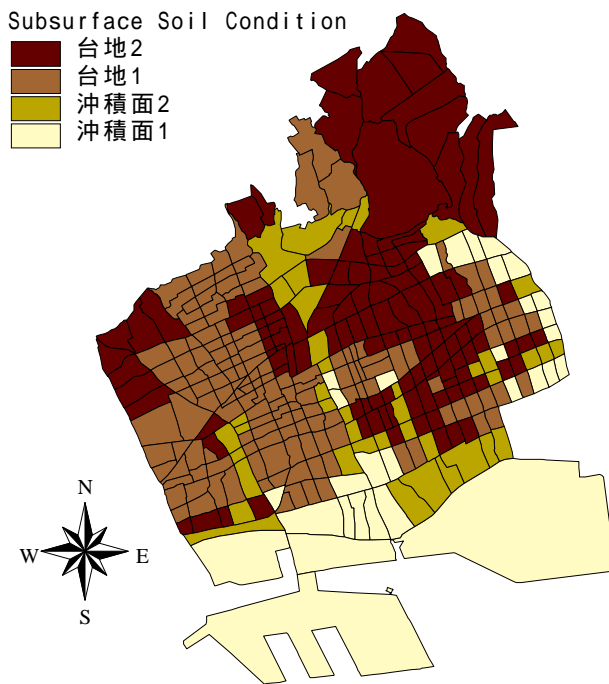


図-5.12 灘区の微地形分類

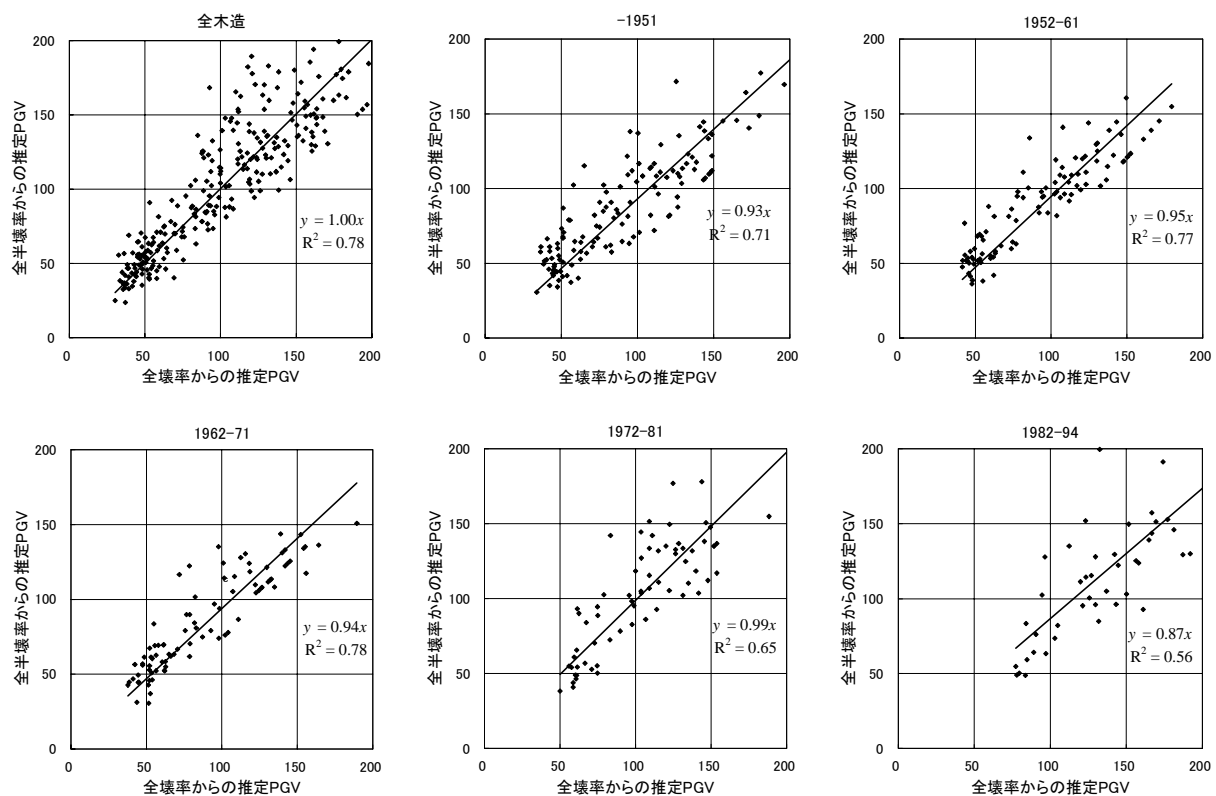


図-5.13 各建築年代ごとの全壊率と全半壊率により推定された最大速度値の比較 (単位: cm/s)

第5章 兵庫県南部地震における灘区の地震動分布の推定

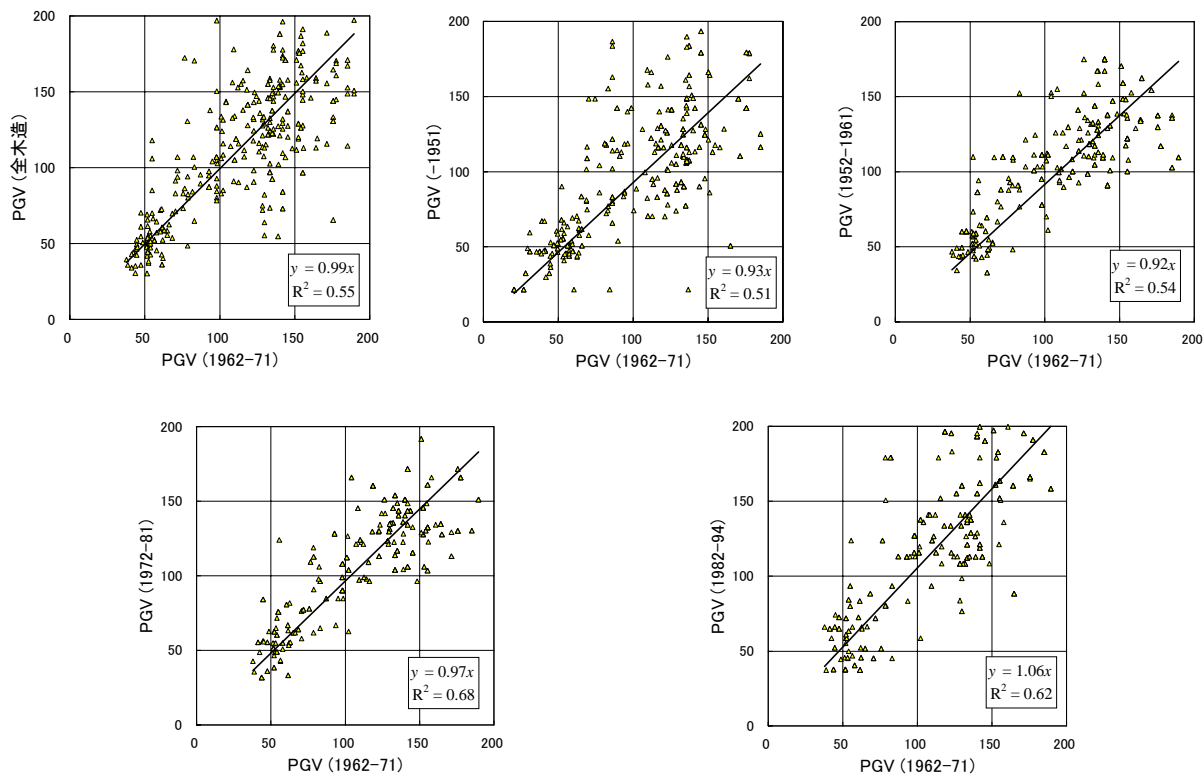


図-5.14 各建築年代ごとの被害データから推定された最大速度値の比較 (単位: cm/s)

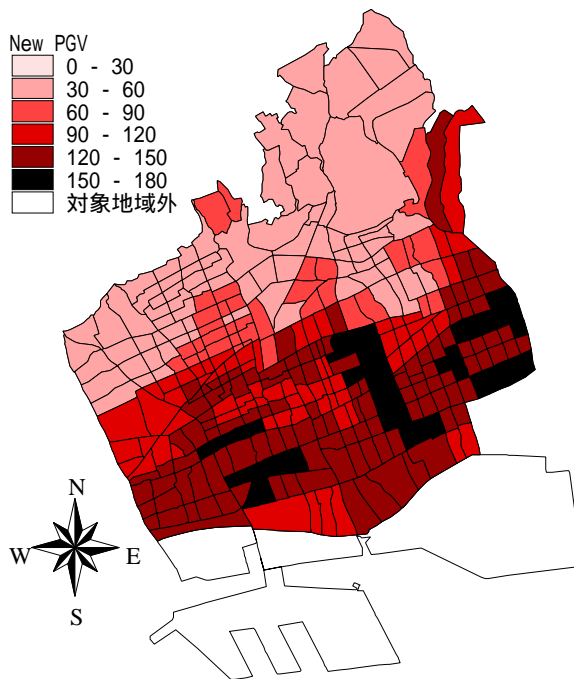


図-5.15 再推定した灘区の地震動分布 (最大速度) (単位: cm/s)

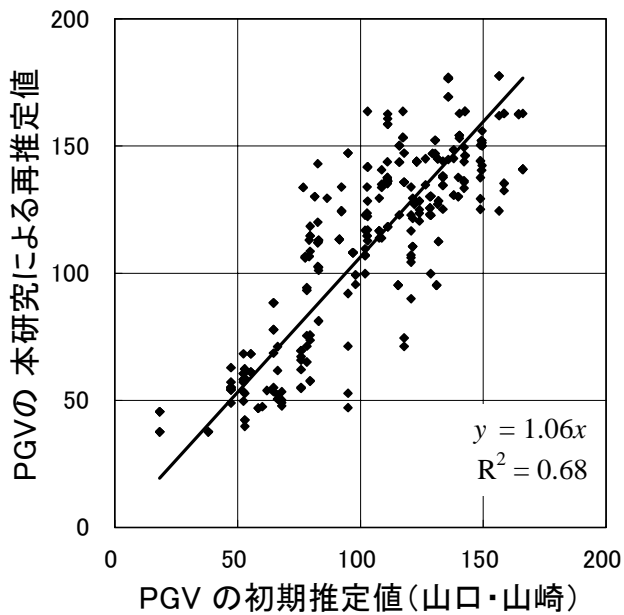


図-5.16 再推定値と初期推定値との比較 (単位: cm/s)

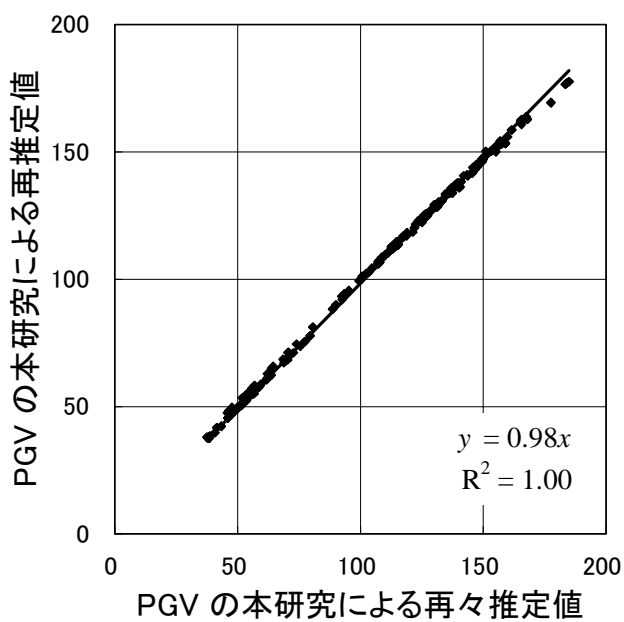


図-5.17 再推定値と再々推定値との比較 (単位: cm/s)

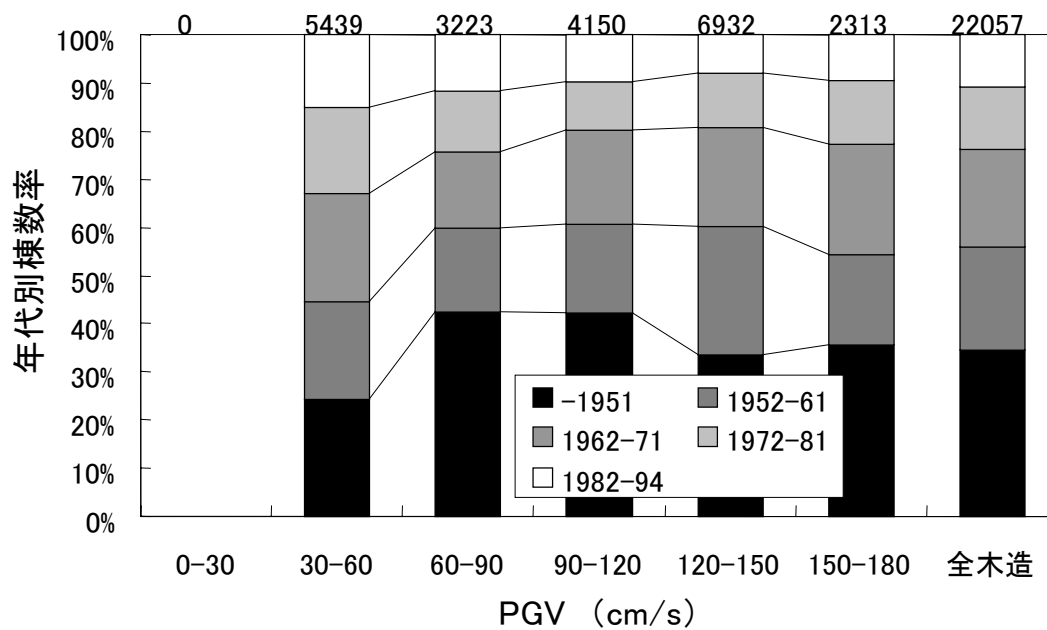


図-5.18 再推定 PGV のランク別建築年代別棟数率

5.5 まとめ

本章では、兵庫県南部地震後に震災復興都市づくり特別委員会等が調査を行い、建設省建築研究所（1996）がまとめた建物被害データを用いて推定した地震動分布と、神戸市により実施された調査に基づく建物被害データを用いて、構造・建築年代を考慮した建物被害関数を求めた。その結果、構造別の被害関数では、地震動の大きさに関わらず、全壊率、全半壊率ともに木造が最も高く、RC造が低いことがわかった。S造と軽量S造の被害率は、木造とRC造の間にあり、ほぼ同じような被害率曲線を描いていた。また木造の建築年代別の被害関数では、全壊率、全半壊率とも建築年代の早い建物ほど、小さい地震動で被害が発生し始め、被害率は地震動の範囲によらず大きいことがわかった。1952-61と1962-71は、大きな違いが見られなかった。ただし、これらの被害関数は本章で地震動を再推定するために用いたものであり、さらに改良していく必要がある。

この被害関数を用いて、灘区における地震動分布を再推定した。木造建物の建築年代ごとの被害関数から推定された地震動を比較検討することにより、建築年代ごとの棟数分布が地域によって異なることの影響を取り除くことができ、町丁目ごとの微地形も考慮した精度の高い地震動を推定することができた。

本章で推定された地震動分布と詳細な建物被害データを用いることにより、構造、建築年、屋根種別、延床面積などを考慮した建物被害関数を構築することが可能となる。それらを各自治体の所有する固定資産管理のための建物データ等に適用することにより、被害想定や大地震直後の対応などに役立てることができると思われる。

6.1 はじめに

本章では、神戸市によって実施された灘区の建物被害調査データを用いて、建物被害関数の構築を試みている。

これまで我が国では、1930年代の物部(1926)による研究を皮切りとして、岡田・鏡味(1991)によるものなど、様々な震害の経験に基づく、建物被害関数あるいは建物被害率曲線(バルナビリティ関数またはフラジリティカーブ)に関する研究が報告されてきた。しかし、建物被害関数のもとになるデータは限られていたため、その精度についての十分な確証は得られていなかった。最近では、兵庫県南部地震による膨大な被害データを用いた被害関数に関する研究が、いくつかの研究グループにより報告されている。建物被害関数を構築するためには、対象地区の地震動分布と建物被害データが必要であるが、兵庫県南部地震時の強震記録はそれほど多くは観測されていなかったため、地震動分布を何らかの方法で推定する必要がある。また第2章で述べたように、実施されたいくつかの建物被害調査もその目的・方法によって判定基準が異なっていたため、これまでに報告されてきた被害関数も、使用したデータによる違いを見せている。鏡味(1998)が建築学会等で報告しているようにこれらの被害関数を使用する際には、作成された被害関数がどのデータを用いたものが正しく認識しておく必要がある。

林・宮腰・田村(1997b)は、地盤モデルのFEM解析による再現地震動と建設省建築研究所(1996)のデータを用いて推定された林・宮腰・田村・川瀬(1997)の最大地動速度分布から、低層建物および中高層建物の用途別の被害関数を構築しているが、建築年代については考慮していない。Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa(1997)は、同推定地動速度分布と神戸市の調査データから構造・建築年代別の被害関数を求めているが、ここで用いた地震動分布は、町単位であり、比較的大きな強震記録のみから推定されたものである。また長谷川・翠川・松岡(1998)は、建設省建築研究所(1996)のデータと東灘区西部地区の建物について村上・田原・藤田・三澤(1996)が行った建築年代別被害調査結果を用いて、木造建築物の建築年代別被害関数を作成しているが、他の構造については行っていない。本研究では、低い地震動レベルや微地形分類を考慮した町丁目単位の推定地震動分布と3万棟を超える灘区の詳細な建物被害データを用いることにより、構造・建築年代別の建物被害関数を構築し、その精度を上げることを目的としている。

本章は、神戸市から提供された建物被害データ(第4章参照)と独自の方法で推定した灘区の地震動分布を用いて建物被害関数を構築する。それらを多くの自治体が固定資産管理のために所有している構造・建築年別の建物データに適用することにより、被害想定や建物倒壊危険度の算定に役立てることが可能となるであろう。

建物被害関数を構築するためには、建物被害データとその地域の地震動分布が必要である。地震動分布を推定するためには、翠川・藤本(1996)の行ったように墓石の転倒率や太田・小山・中川(1998)の行ったアンケート調査を用いる方法等があるが、本研究では、神戸市から提供された3万棟の建物データが、そのデータ数ゆえに地震動推測の尺度として有効であると考え、それらの被害率を用いて地震動分布を推定した。図-6.1のフローチャートに建物被害関数構築までの過程を示す。まず強震観測記録と建設省建築研究所(1996)がまとめた周辺地域の低層独立住宅被害データとを用いて低層独立住宅の被害関数()を求め、その関数を同データのもととなった調査地域に適用し、阪神地域の地震動分布を推定する。次にこの地震動分布の推定結果と神

戸市から提供された灘区の建物被害データ（最も被害率が高く，絶対数も多い木造のデータ）を用いて木造建物の年代別の建物被害関数（ ）を構築する．そしてそれぞれの関数を再度灘区に適用することにより地震動分布を再推定し，地震動推定の精度を高める．ここまでは山口・山崎（1999）の研究および第5章で行っている．本章（図中，太線で囲った部分）では，第5章で推定された灘区の地震動と，神戸市の調査に基づく約3万棟の灘区の建物被害データを用いて，構造・建築年代別の建物被害関数（ ）を構築し，さらにその結果を実被害と比較し，精度が向上したことを確認している．

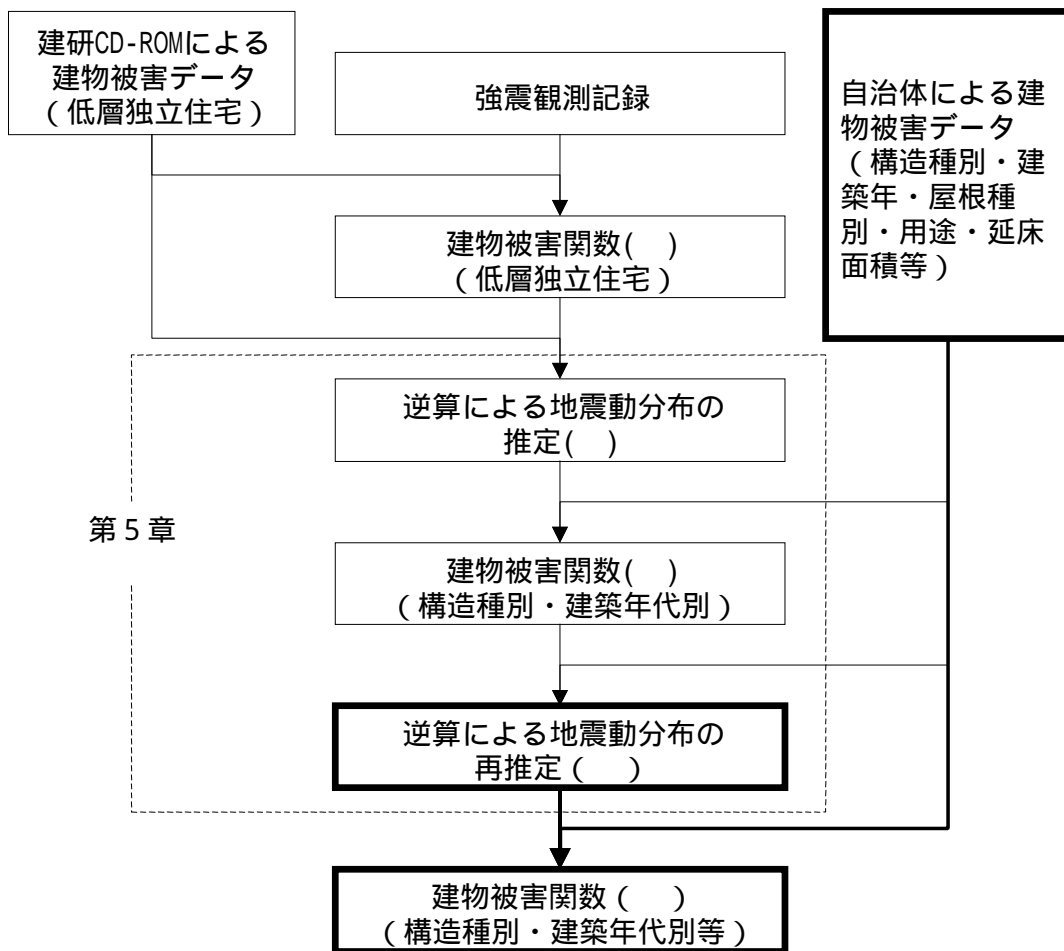


図-6.1 建物被害関数構築までのフローチャート

6.2 自治体の建物被害調査に基づく灘区の建物被害関数

ここでは第5章で推定された図-5.15 に示す灘区の地震動分布（町丁目単位の最大速度）を用いて、自治体調査に基づく建物被害関数を求める。液状化の影響による被害が大きかった臨海部と、被害が著しく少なかった山麓地域を除いた灘区を対象地域としている。これにより4.4の建物被害分析で、特殊な傾向が見うけられた1961年以前のS造建物は大幅に減少し、かつS造の被害関数は1971年以前を一区分としているため、図-4.7における特殊な傾向による被害関数への影響は取り除かれている。

(1) 建物被害関数構築の方法と回帰係数

ここで用いた建物被害データは町丁目を単位としているが、建物被害関数を構築するうえで、建物棟数が不十分であったり、被害の少ない町丁目が存在するため、表-6.1に示すように地震動指標の大きさで並び替えた上で、十分な棟数が得られるよう、棟数に応じて被害データの統合を行った。各構造・建築年代ごとの棟数と区分分類は表-6.2に示す通りである。木造以外は、棟数が比較的少ないため、建築年代を3区分とした。なお、被害データを統合した際には、棟数による重みつき平均により区分ごとの地震動値を求めている。

ここで求めた地震動強さ（最大速度 = PGV）と被害率の関係から、建物被害推定式を求める。ある地震動 x のときに被災ランク R 以上の被害が発生する確率 $P_R(x)$ は、標準正規分布の累積確率分布関数 $\Phi(x)$ を用いて、対数正規分布で表せると仮定した。すなわち、

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda) / \zeta) \quad (6-1)$$

となる。ここで係数 λ , ζ は、 $\ln x$ の平均値および標準偏差であり、図-6.2に示すような確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果得られた回帰係数を表-6.3に示す。相関係数を構造別（全年代）にみると、S造が全壊、全半壊ともに0.7前後とやや低いが、それ以外の構造については全て0.9以上と高い相関を示している。各構造ごとの建築年代別の係数をみると、木造が1982-94（全壊）と1951（全半壊）を除く全てにおいて1.0に近く、相関が高い。しかし、ここで回帰分析に用いた地震動はもともとと同じ木造建物データから推定したものであるため、木造の相関が高いのは当然ともいえる。その他の構造についても一部0.7程度のものがあるがほとんどは0.9以上であり、建築年代別についても高い相関を示していると言えよう。ただし、中には建築年代別の ζ の値が、全年代のものよりも大きくなってしまったもの、すなわち分散が増えたものがいくつかある。これらは構造別のデータを年代別に区分したために、確率的処理をする上で十分なデータ数を得られなかったものと思われる。今後、これらのパラメータを被害推定等に使用するうえでは、その点を理解し注意する必要がある。

(2) 構造別建物被害関数

図-6.3、図-6.4に(1)から求めた構造別の被害関数を示す。全壊率、全半壊率ともに木造の被害率が最も高く、RC造が最も低い。また全壊率、全半壊率ともに木造は小さな地震動での立ち上がりがあるが、その他の構造は比較的滑らかなカーブを描きながら、徐々に被害率が上がって

いるのがわかる。

ここで、神戸市の建物被害データ（地域・データ数などの詳細は示されていないが被害区分・定義は同じと思われる）と建設省建築研究所（1996）のデータから林・宮腰・田村・川瀬（1997）により推定された地震動を用いて Miyakoshi, Hayashi, Tamura, and Fukuwa（1997）（以下、宮腰・林ら）により構築された構造・年代別の被害関数と比較する。図-6.5、図-6.6 に各構造ごとの被害関数の比較を示す。全壊率、全半壊率ともに、全ての構造において傾向は似ているが、宮腰・林らのカーブはいずれも立ち上がりが高く、小さな地震動で被害が発生している。宮腰・林らの用いた林・宮腰・田村・川瀬（1997）による推定地震動が被害の大きかった地域のみを観測記録をもとにしているのに対し、本章で用いた推定地震動は、被害率の小さかった大阪府の観測記録も考慮して推定された山口・山崎（1999）による地震動を、発展させたものである。そのため低い観測値が式に反映され、被害率曲線の違いとして表れているものと思われる。

(3) 各構造の建築年代別建物被害関数

ここでは（1）で求めた建築年代別被害関数について考察する。

まず木造の建築年代別の被害関数を図-6.7、図-6.8 に示す。これを見ると、1952-61、1962-71の曲線は全壊率、全半壊率ともに近接したカーブを描いている。同様の傾向は第4章の図-4.5でも見られた。全体的にはそれぞれのPGVにおいて古いものほど高く、新しいものほど低い被害率となっているが、古い3曲線は120 cm/sを超えたあたりからほとんど重なってしまっている。本章で扱ったデータの中には明治時代初期の建物もあり、それらも1951年以前の建物に含まれている。これら古くから残っている建物に関しては、強度の高い良好なもののみが残っている可能性があり、新しい年代の曲線と地震動の高い付近で重なることもありうると思われる。全壊率では1951年以前の建物は30cm/sを超えたあたりで被害が発生し始めるのに対し、1982年以降に建てられたものは60 cm/sあたりから被害が発生し始めている。また全半壊率ではそれよりも小さなPGVでそれぞれ被害が発生し始めている。

図-6.9にRC造についての被害関数を示す。全壊率について見ると、1971年以前のものは40 cm/sあたりから被害が発生し、1982-94のものは80 cm/s位まで被害が出ないのがわかる。180 cm/sでの1971年以前（耐震基準改正以前）のRC造建物全壊率は50%強であり、これは図-6.7に見られる最も新しい木造建築物の全壊率よりも小さく、RC造建物が被害を受けにくいことがわかる。

S造、軽量S造については図-6.10、図-6.11に示す通りであるが、木造、RC造と同様に、いずれも古い建物ほど小さなPGVで被害を受けていることがわかる。また図-6.11 軽量S造の1971年以前の建物被害率曲線は他の2つの建築年代の違いに比べて著しく立ち上がりが高くなっているが、軽量S造の年代別被害率を示した第4章の図-4.6にもこれと同様の傾向が見られる。

表-6.1 統合された地域区分の例（1951年以前の木造の場合）

区分コード	町丁目コード	町丁目名	PGV	木造（-1951）棟数	区分棟数
11	：	：	：	：	380
	：	：	：	：	
	105	篠原南町二丁目	104.3	38	
	304	城内通五丁目	102.6	23	
12	＼	＼	102.6	9	380
	214	福住通三丁目	102.3	112	
	215	福住通四丁目	102.3	103	
	219	福住通八丁目	101.1	7	
	287	味泥町	100.0	7	
	220	中原通一丁目	99.8	113	
	227	倉石通一丁目	99.8	29	
13	＼	＼	99.8	55	380
	285	大石南町二丁目	99.4	23	
	：	：	：	：	
	：	：	：	：	

表-6.2 被害関数作成のための構造・年代区分の分類

	木造(20区分)		RC造(10区分)		S造(10区分)		軽量S造(10区分)	
	建物棟数	区分棟数	建物棟数	区分棟数	建物棟数	区分棟数	建物棟数	区分棟数
-1951	7,603	380						
1952-61	4,707	230						
1962-71	4,498	220	913	90	481	48	450	45
1972-81	2,875	140	1,195	120	526	52	243	25
1982-94	2,374	120	1,455	140	848	85	442	44
全体	22,507	1,100	3,563	360	1,855	180	1,135	110

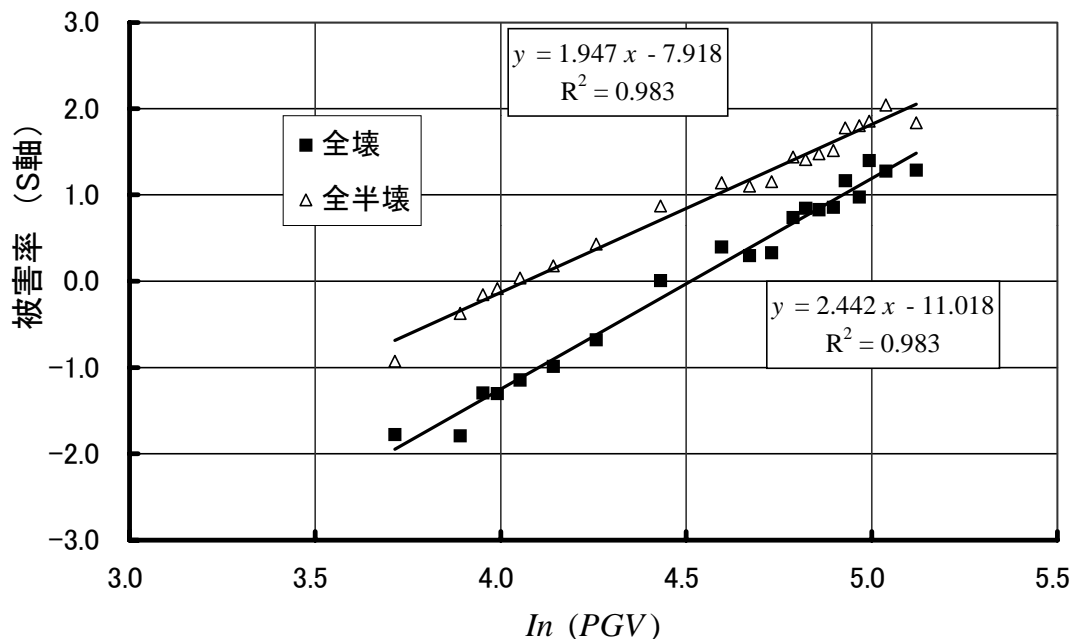


図-6.2 最大速度と木造建物被害率の関係の確率紙表示

表-6.3 建物被害関数の回帰係数

		全壊			全半壊		
		λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2
木造	-1951	4.36	0.411	0.957	3.66	0.674	0.880
	1952-61	4.44	0.353	0.976	3.97	0.490	0.952
	1962-71	4.45	0.342	0.977	4.02	0.456	0.966
	1972-81	4.73	0.378	0.974	4.25	0.395	0.976
	1982-1994	5.12	0.496	0.881	4.61	0.474	0.969
	全年代	4.51	0.410	0.983	4.07	0.514	0.983
RC造	-1971	5.12	0.646	0.954	4.72	0.691	0.929
	1972-81	5.33	0.575	0.941	4.85	0.612	0.844
	1982-94	6.00	0.789	0.902	5.33	0.789	0.917
	全年代	5.50	0.705	0.968	4.99	0.716	0.924
S造	-1971	4.64	0.619	0.718	4.25	0.712	0.788
	1972-81	4.97	0.490	0.941	4.49	0.549	0.797
	1982-94	5.64	0.731	0.893	5.01	0.733	0.824
	全年代	5.14	0.628	0.752	4.69	0.672	0.686
軽量S造	-1971	4.70	0.550	0.928	4.41	0.504	0.913
	1972-81	5.82	0.972	0.728	4.95	0.855	0.783
	1982-94	6.19	1.101	0.858	5.28	0.865	0.849
	全年代	5.03	0.564	0.944	4.73	0.601	0.970

は全年代よりも分散が大きくなってしまったもの

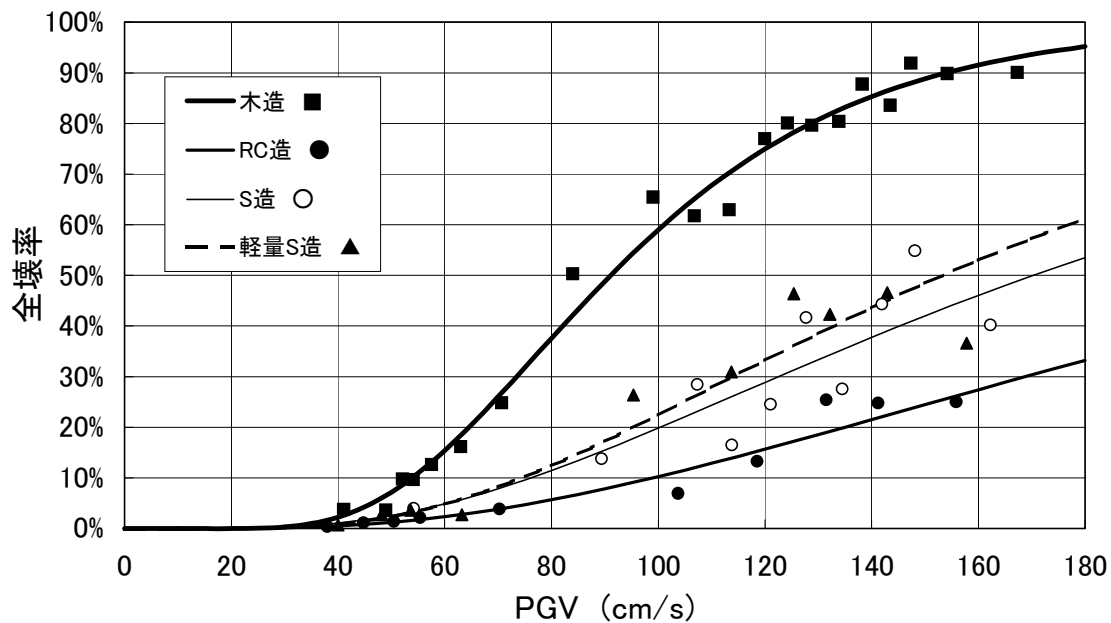


図-6.3 構造別建物被害関数（全壊率）

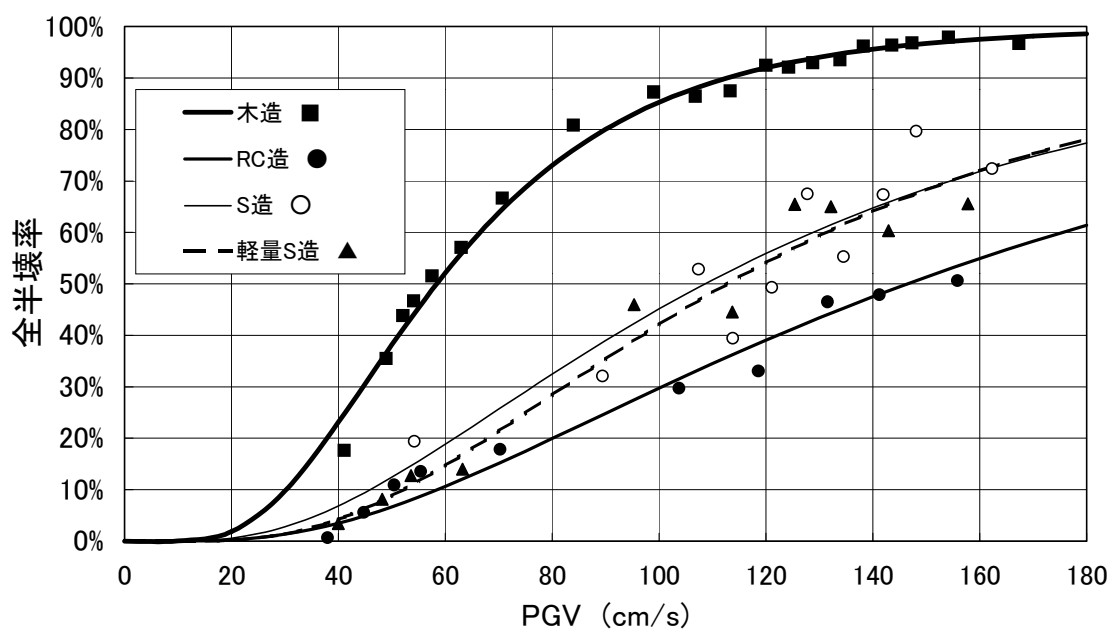


図-6.4 構造別建物被害関数（全半壊率）

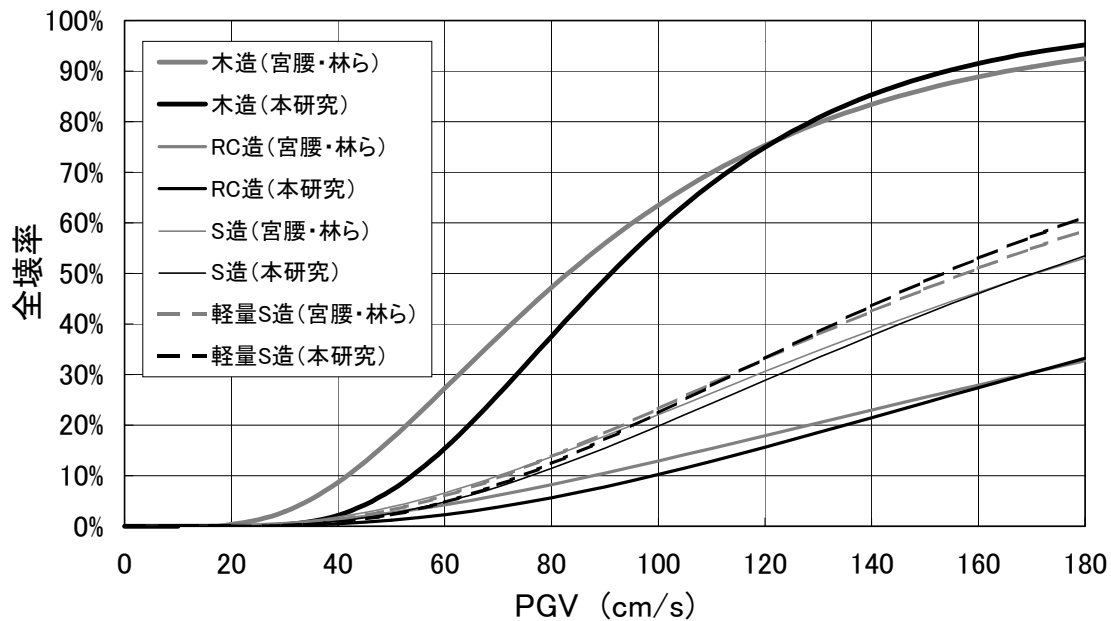


図-6.5 被害関数の比較（全壊率）

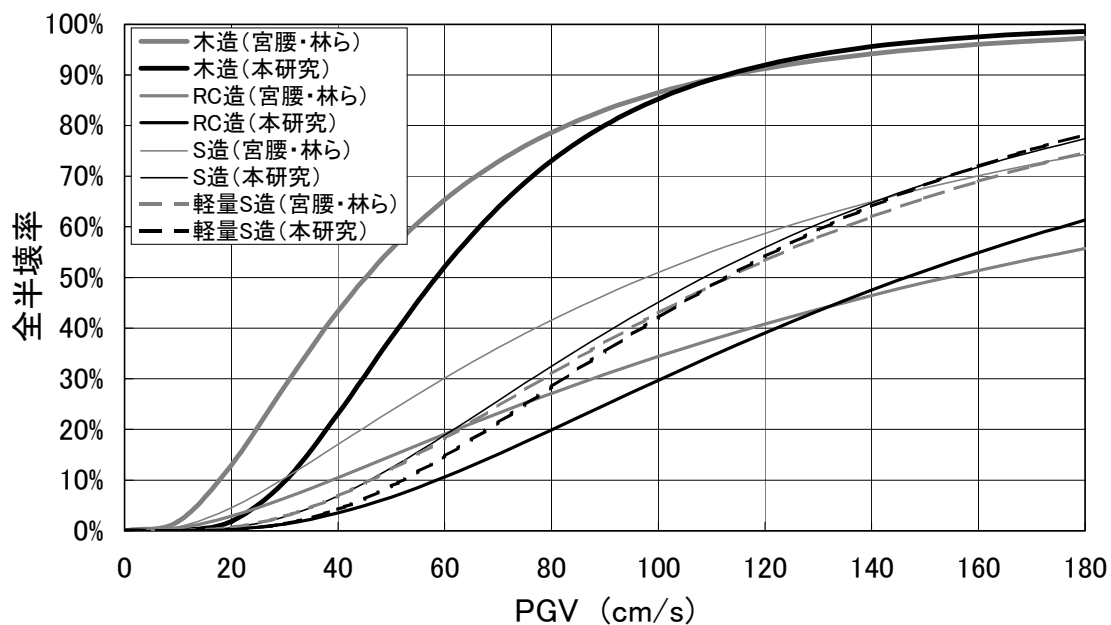


図-6.6 被害関数の比較（全半壊率）

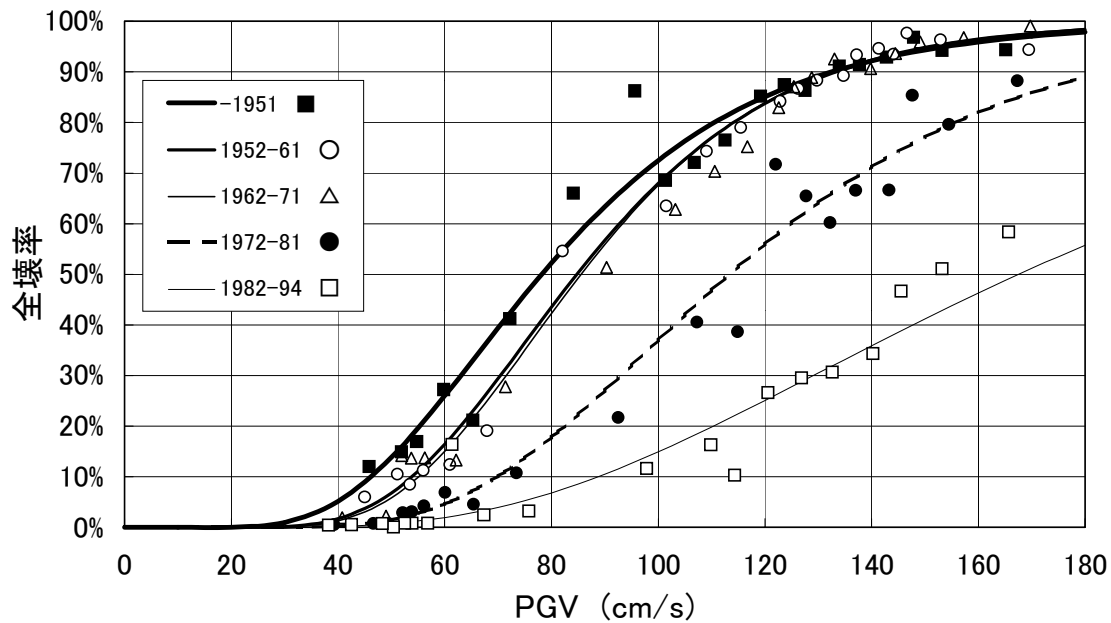


図-6.7 木造の建築年代別被害関数（全壊率）

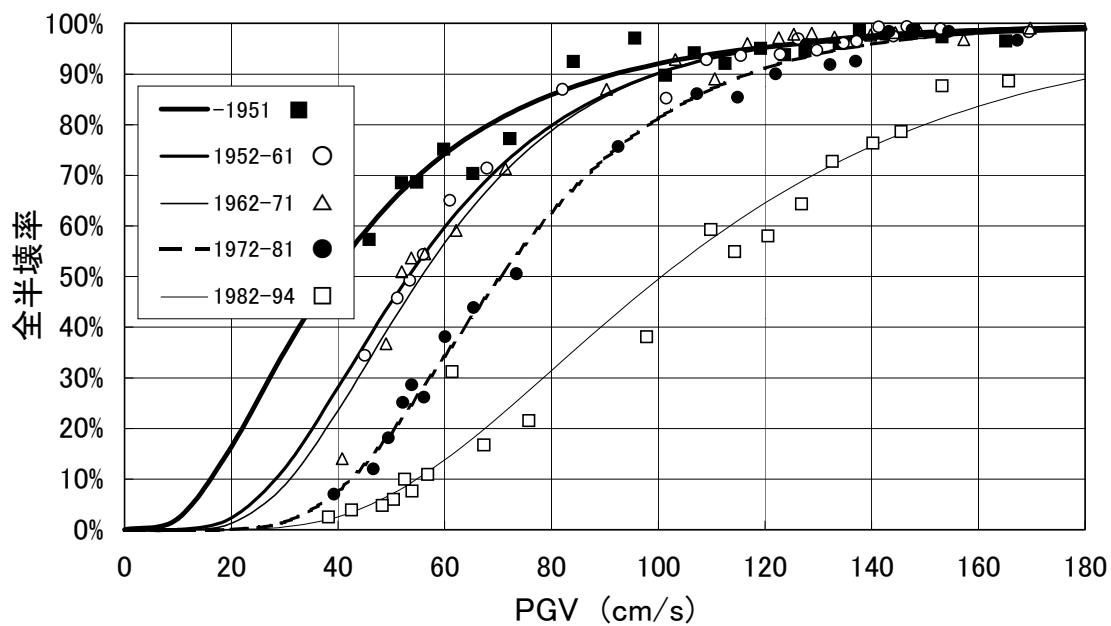


図-6.8 木造の建築年代別被害関数（全半壊率）

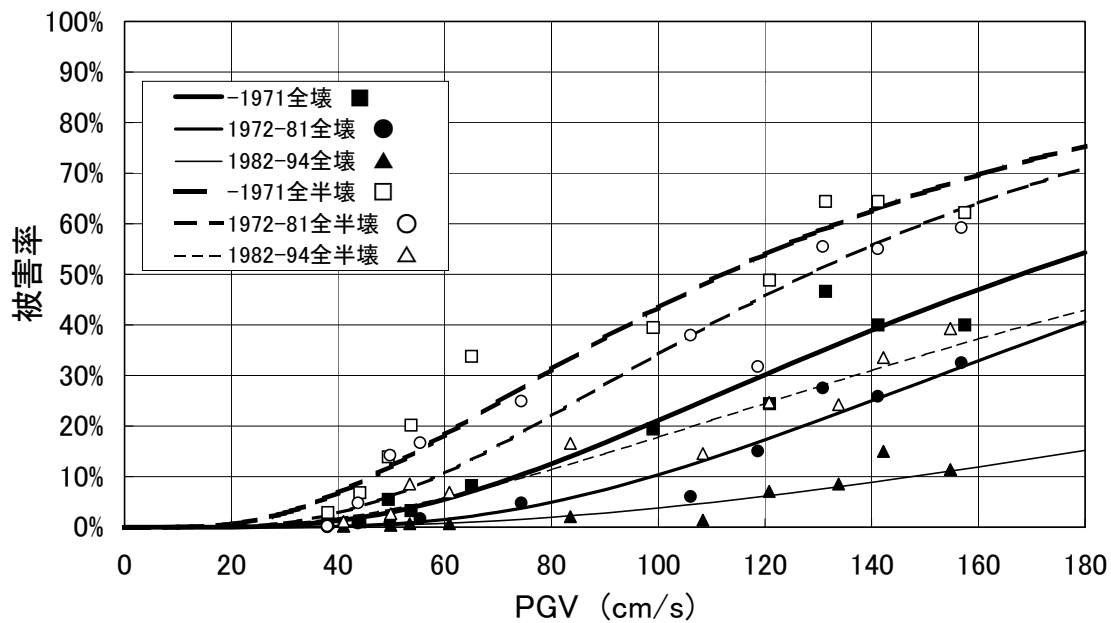


図-6.9 RC造の建築年代別被害関数

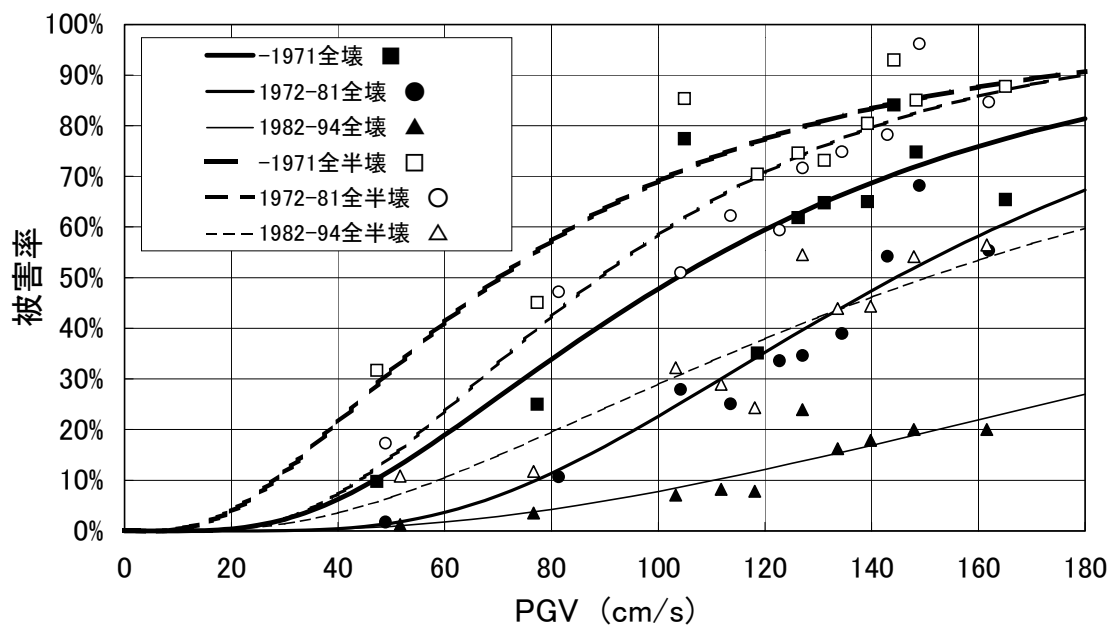


図-6.10 S造の建築年代別被害関数

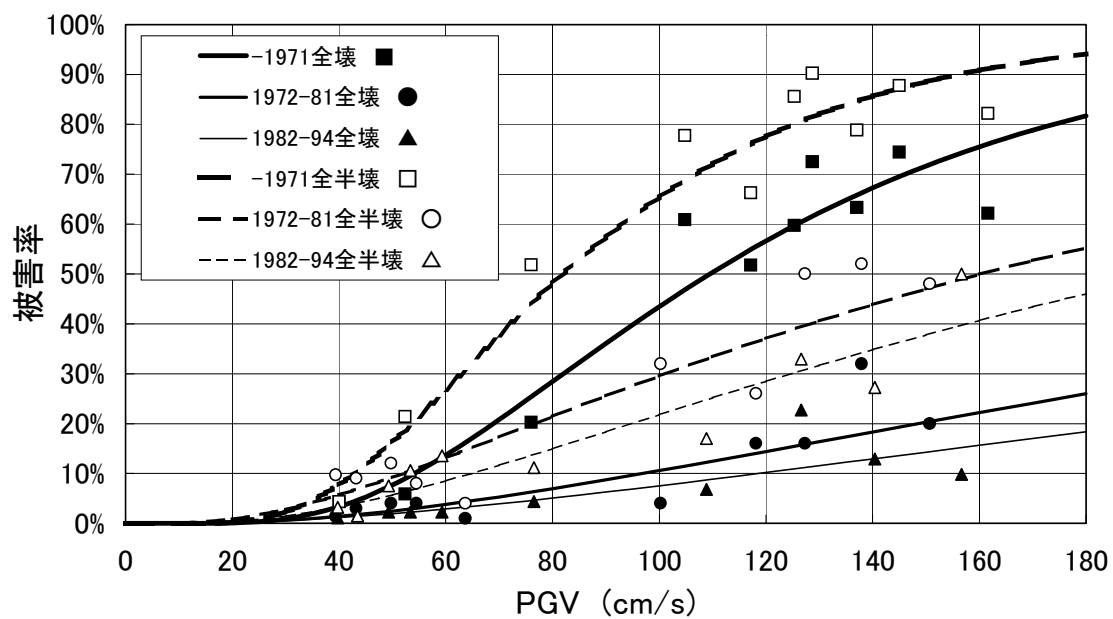


図-6.11 軽量S造の建築年代別被害関数

6.3 建物被害関数による推定値と実被害との比較

第5章では、山口・山崎（1999）による推定地震動を用いて建物被害関数（ ）を求め、それをもとにして灘区における地震動分布を再推定した。その結果、建築年代ごとの棟数分布が地域によって異なることの影響を取り除くことができ、町丁目ごとの微地形も考慮した精度の高い地震動を推定することができた。本章はこの再推定した地震動をもとにして、より精度の高い建物被害関数（ ）を求めることを目的としている。この建物被害関数（ ）とは6.2で求めたものであり、図-6.1のようなプロセスを得てようやく得られるものである。被害関数を構築するためには建物被害データと地震動分布が必要であるが、兵庫県南部地震の際の観測記録は限られており、町丁目ごとの正確な地震動分布を測定することは不可能であった。そこで図-6.1に示したように、地震動のような推定値と仮説（建研低層独立住宅データを木造建物と仮定して計算するなど）を含む過程を経て、最終的な被害関数構築へと至ったのである。ここでは、これらの過程の最終段階として、建物被害関数（ ）と（ ）を町丁目ごとの実被害との関係から比較し、精度が上がったことを確認する。

(1) 町丁目ごとの建物被害関数計算値と実被害との比較

ここでは灘区の推定地震動分布と二つの木造被害関数（ ）と（ ）を用いて、町丁目ごとの建物被害棟数を計算し、実際の建物棟数と比較する。図-6.12、図-6.13は木造（全半壊）の被害関数による比較である。前者が被害関数（ ）と山口・山崎（1999）による推定地震動を用いたものであり、後者は被害関数（ ）と第5章で求めた再推定地震動を用いたものである。左上には近似直線の式と相関係数が示されている。被害関数（ ）よりも第5章で構築された被害関数（ ）の方が、実被害との相関が高く、また直線の傾きが1.00に近くなっている。これは図-6.1に示したように、微地形や建物分布の偏りを考慮することにより、地震動を再推定し、さらにその地震動の再推定値から被害関数を構築することにより、精度が高くなったことを示している。6.2で得た構造別および建築年代別全ての被害関数で同様の比較を行ったところ、全ての関数において精度が上がっていることが確認された。また木造の建物被害関数（ ）と（ ）の比較は図-6.14のようになる。これらのカーブの違いは、被害関数構築の基となった地震動の違いを示している。

(2) 灘区における建物被害推定棟数と実被害との比較

最後に本章によって得られた建物被害関数（ ）を用いて、灘区全体（対象地域内）の建物被害棟数を求め、実被害と比較する。表-6.4に建物被害棟数の推定値と実被害との比較を示す。上段の表は構造別の被害関数を用いた場合、下段は建築年代別の被害関数を用いた場合であり、合計という欄は各年代ごとの被害関数による推定値を合計したものである。どの項目も推定値と実被害が良く近似していることがわかる。実被害に対する推定値の平均比率（構造・建築年代別18種の平均）は、全壊の場合が99.6%、全半壊の場合が100.9%と高い精度であった。また木造のようにデータ数の多いものに比べて、軽量S造のように少ないデータから構築した被害関数（特に建築年代別）は、表-5.4に見られるように相関が低いものが一部あるため、その精度に多少の問題があると思われたが、これを見る限りかなり良い結果となっている。構造別の関数も建築年代

別の関数も、同精度に見えるが、それは灘区全体の合計としてとらえているためであり、町丁目毎の棟数で見れば、建築年代別の被害関数を用いる方がより良い被害想定ができると思われる。今後、各自治体で被害想定等を行う場合に、可能ならば建築年代別の被害関数を使用した方がよい。しかし、建築年代別の建物データがない場合あるいは簡易的なシステムを作る場合には構造別被害関数を用いるなど、状況に応じて使い分けることも可能であろう。

以上(1),(2)の結果から、本章によって構築された構造別・建築年代別の建物被害関数は、建物被害の状況をかなりの高精度で再現するものであるということが出来る。

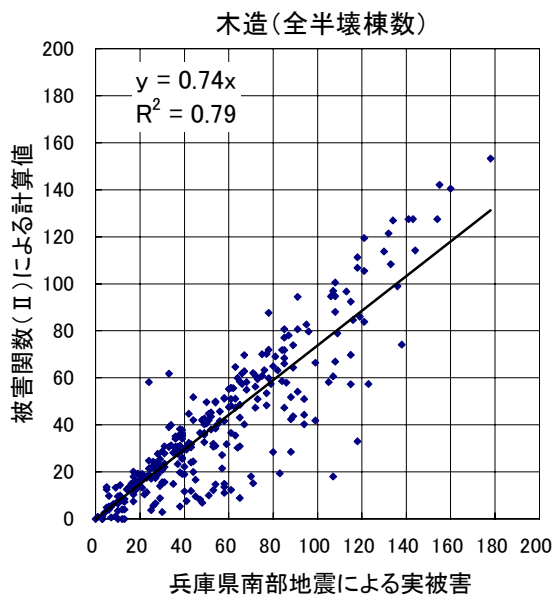


図-6.12 建物被害関数()による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較

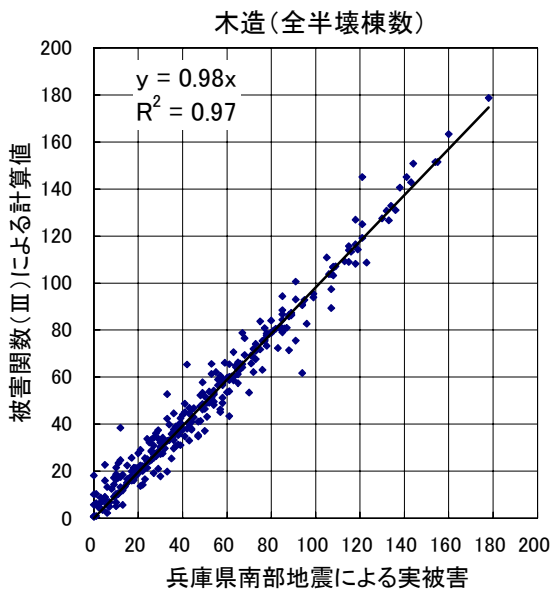


図-6.13 建物被害関数()による町丁目ごとの推定被害棟数と実被害との比較

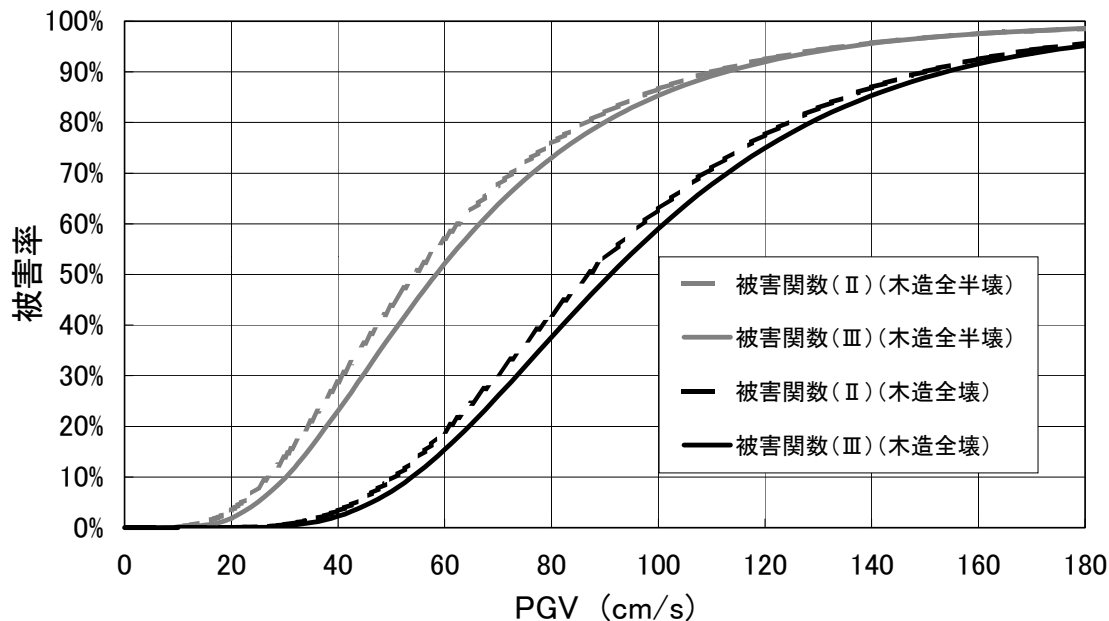


図-6.14 建物被害関数(Ⅱ)と(Ⅲ)の比較(木造)

表-6.4 灘区における推定建物被害棟数と実被害との比較

構造別の建物被害関数(Ⅲ)を用いた場合

構造	全壊棟数		全半壊棟数	
	推定値(Ⅲ)	実被害	推定値(Ⅲ)	実被害
木造	11,868	11,901	16,625	16,693
RC造	367	373	914	921
S造	506	520	935	940
軽量S造	258	263	423	425

建築年代別の建物被害関数(Ⅲ)を用いた場合

構造	建築年	全壊棟数		全半壊棟数	
		推定値(Ⅲ)	実被害	推定値(Ⅲ)	実被害
木造	-1951	5,031	5,029	6,691	6,659
	1952-61	2,915	2,897	3,836	3,831
	1962-71	2,626	2,585	3,500	3,510
	1972-81	1,021	1,006	1,771	1,767
	1982-94	390	384	962	926
	合計	11,983	11,901	16,760	16,693
RC造	-1971	170	169	316	320
	1972-81	137	137	351	359
	1982-94	61	67	240	242
	合計	368	373	907	921
S造	-1971	232	231	300	298
	1972-81	183	182	344	335
	1982-94	104	107	307	307
	合計	519	520	951	940
軽量S造	-1971	212	214	287	291
	1972-81	23	25	70	62
	1982-94	27	24	76	72
	合計	262	263	433	425

6.4 まとめ

本章では、神戸市によって実施された兵庫県南部地震による灘区の建物被害データと、第5章で推定した詳細な地震動分布を用いて、構造別（木造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造・軽量鉄骨造）および建築年代別（木造5区分、その他の構造は3区分）の建物被害関数を構築した。

構築された構造別の建物被害関数では、木造の被害は小さい地震動から発生し始め、かつどの最大速度値においても他の構造に比べて被害率が高くなるのに対し、RC造は高い地震動になっても被害率が低かった。また建築年代別では、木造以外の全てにおいて古い建物ほど小さい地震動で被害率が上がり始め、それぞれの地震動においても新しい建物より高い被害率を示した。これらと同様の傾向は、第4章の建物被害分析の結果からも見られた。木造に関しては、基本的にそれぞれのPGVにおいて古いものほど高く、新しいものほど低い被害率となっていたが、古い3曲線は120 cm/sを超えたあたりからほとんど重なってしまっていた。本章で扱ったデータの中には明治時代初期の建物もあり、それらも1951年以前の建物に含まれている。それらの建物は強度が高く良好なものばかりであった可能性もあり、そのような理由から、新しい年代の曲線と地震動の高い付近で重なることもありうると思われる。

また、本章の中で詳細な地震動分布を用いて構築された建物被害関数と、第4章で構築した建物被害関数とを町丁目ごとの実被害を用いて比較した。その結果、本章により、建物被害関数の精度が向上したことが確認された。

以上の結果から、本章によって構築された構造別・建築年代別の建物被害関数は、兵庫県南部地震の建物被害の状況を高精度で再現するものであり、固定資産管理のための建物データを所有する自治体等が被害推定や危険度評価を実施する際に、有用な被害推定式を提供すると思われる。ただし、中には建築年代別の ζ の値が、全年代のものよりも大きくなってしまったもの、すなわち分散が増えたものがいくつかある。これらは構造別のデータを年代別に区分したために、確率的処理をする上で十分なデータ数を得られなかったものと思われる。今後、これらのパラメータを被害推定等に使用するうえでは、その点を理解し注意する必要がある。また本研究で構築された建物被害関数における全壊・半壊の定義は神戸市が実施した調査の判定基準に基づくものであり、第2章、第3章で述べたように他の自治体や震災復興都市づくり特別委員会による建物調査の基準とは異なっている。一般に適用する際には、その旨を理解し、それらを示したうえで利用することが重要であり、関数が一人歩きしないよう注意すべきである。

今回用いた建物被害データには、構造・建築年の他に階数・用途・屋根種別・延床面積等の属性が含まれている。これまでに行ってきた分析によれば、それぞれの属性が少なからず建物被害に影響を与えており、各属性に応じたさらに細かい被害関数を構築することも可能かと思われる。しかし、「木造は住宅が多い」、「古い建物は瓦屋根が多い」など各属性がお互いに関係しており、被害関数を更に細かくしていくためには、数量化理論等を用いて、どの属性による影響が最も大きいかが検討する必要がある。本章では、多くの自治体が所有している構造・建築年別の建物データに適用出来るよう、構造・建築年別の被害関数のみを構築した。用途・屋根等の被害関数構築に関しては、今後の課題としたい。

7.1 はじめに

兵庫県南部地震（阪神・淡路大震災）を契機に、国、地方自治体、個人とあらゆるレベルで地震防災への意識が高まり、大規模かつ多岐にわたった被害を考慮して、被害想定を見直し、あるいは新たに検討する気運が高まっている。損害保険料率算定会（1998a）によれば、各自治体で行われている地震被害想定には様々な手法が存在するが、それらの多くは、ある地震の発生を仮定した上で地震動を推定し、経験的な被害関数などから地震発生時の被害を予測するものである。東京都（1997a, 1997b）でも被害想定を実施しているが、本章で取り上げた東京都（1998）および東京都都市計画局（1998a, 1998b）による「東京都地域危険度測定調査」（第4回）は、これまでの被害想定とは違った角度から、都内の地震に対する危険度を算定したものである。これは東京都が東京都震災予防条例に基づき、5年ごとに実施している調査であり、その目的は、「都市災害に強い都市づくりの指標とする」、「震災対策事業を優先的に実施する地域を選択する際の参考とする」、「地震災害に対する都民の認識を深め、防災意識の高揚に役立てる」などである。地震が発生することを仮定して被害を予測するという点では、被害想定も地域危険度評価も同じ性質のものであるが、被害想定が特定の地震動発生を仮定し、その地震によって生じる具体的な被害量を想定することを目的としているのに対し、地域危険度評価は、被災ポテンシャルを地域間で比較し、相対的に危険な地域を抽出することを目的としているという点で、その算定方法・考え方に違いがある。このため危険度の算出過程において、特定の地震は考慮されておらず、対象地域全体で震源位置に依らない地震動が仮定されており、複雑な解析を必要とする被害想定に比べ、比較的簡単な算定式と町丁目単位での地盤や建物のデータ等を用いて決定される。東京都による現行の手法は、東京都の特性に合わせて分類された地盤や建物について、専門家の判断に基づく危険性ウェイトが設定されており、危険度を被害率ではなく被害総量という意味でとらえている。

本章の目的は、東京都地域危険度の中の建物倒壊危険度評価方法を検討し、モデルとしての簡易性を保ちつつ、より一般的な建物倒壊危険度評価法を提案することにある。そのために、ここでは東京都による手法を神戸市灘区に適用し、その結果求められた建物倒壊危険度と兵庫県南部地震により実際に発生した建物被害を比較する。さらに確率論的な概念も取り入れ、地盤や構造物の地震に対する危険性ウェイトの設定方法を具体的に定義し、新建物倒壊危険度の評価手法を提案する。

7.2 東京都の建物倒壊危険度

東京都(1998)および東京都都市計画局(1998a, 1998b)により発表された「建物倒壊危険度」は、地震動によって建物が壊れたり傾いたりする危険性の度合を、建物、地盤などの面から評価し、他地域と比較した相対的な危険の度合を単位面積当たりの被害総量という観点から5段階に分類したものである。建物倒壊危険度決定までの過程を図-7.1に示す。

分類項目は表-7.1の通りである。建物については、構造別、年代別、階数により20に分類し、「その他」を除く19分類に対して耐震性能を評価し、ウェイトとして算定式に反映させている。また建物倒壊に最も影響すると考えられている基礎地盤については、地震被害の発生しやすさの観点から地形・地質によって10種類に分類している。さらに地盤による影響を補完するために、液状化の可能性、大規模造成地、埋立地、急傾斜地の有無についても考慮されている。各ウェイトは6人の専門家により、0と1の間で危険なものほど0に近くなるよう6パターン設定されている。これらを基に、あるパターン n における建物ごとの倒壊危険量 Q_{kn} は以下のように算定される。

$$Q_{kn} = D_k (1 - W_{kn} \cdot U_{kn}) \quad (k=1-19: \text{建物分類}) \quad (7-1)$$

ここでパターン n ($n=1-6$) における各パラメータは、それぞれ Q_{kn} : 建物ごとの倒壊危険量(棟数/単位面積), D_k : 建物棟数密度(棟数/単位面積), W_{kn} : 耐震性能ウェイト(無次元量), U_{kn} : 地盤特性ウェイト(無次元量)である。地盤特性ウェイト U_{kn} は次式により算定される。

$$U_{kn} = u_{1n} \cdot u_{2n} \cdot u_{3n} \cdot u_{4n} \cdot u_{5n} \quad (7-2)$$

パターン n におけるウェイトの各要素は、 u_{1n} : 基礎地盤, u_{2n} : 液状化, u_{3n} : 大規模造成地, u_{4n} : 埋立地, u_{5n} : 急傾斜地である。

上記の建物ごとの倒壊危険量 Q_{kn} を次式のように合算したものが、パターン n における町丁目の建物倒壊危険量 Q_{in} となる。

$$Q_{in} = \sum_{k=1}^m Q_{kn} \quad (m=19: \text{建物分類数}) \quad (7-3)$$

(7-1)式, (7-2)式により算出した6種のパターン($n=1-6$)ごとの建物倒壊危険量 Q_{in} を標準偏差の3倍で除して規準化し、平均したものが建物倒壊危険量 Q_i (無次元量)となる(以下、この Q_i を建物倒壊危険量と呼ぶこととする)。そして最終的な建物倒壊危険度 Q は、 Q_i を大きいものから順に5段階に割り当てたものである。

東京都(1997a)の各ウェイトの設定基準は、過去の地震被害事例および耐震基準改正の時期等が考慮されているが、それぞれの専門家のウェイトを比較してみると、6つのパターンに大きな差異が存在しており、ウェイト付けの困難さが窺える。東京都の建物倒壊危険度は、被害率では

なく被害総量という意味でとらえているため，建物棟数密度が建物倒壊危険量算定に最も影響を与えており，区部（平均建物棟数密度 3,460 棟/km²）の建物倒壊危険度が多摩地区（平均建物棟数密度 830 棟/km²）と比較して圧倒的に高くなっている．本章では東京都の方法とは別の観点から，一棟一棟の建物の特性とそれが立地している地盤に起因する建物倒壊危険度について検討する．

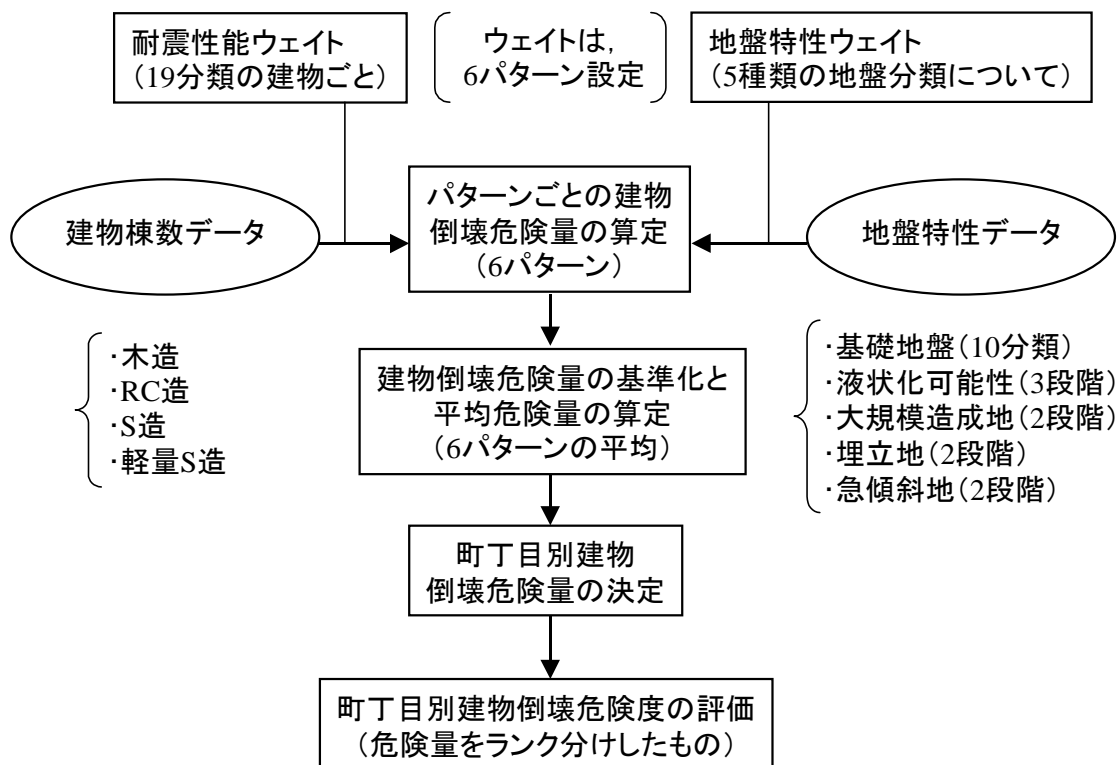


図-7.1 東京都の建物倒壊危険度決定までのフロー

表-7.1 東京都の建物倒壊危険度評価における建物・基礎地盤分類項目

分類番号	構造	種類	分類番号	基礎地盤分類	地形・地質の特徴		
1	木造	住宅	昭和45年以前	1	山地・丘陵	山地及び丘陵地	
2			昭和46年以降				
3		店舗・併用住宅	昭和45年以前	2	台地1	河成礫層の上に関東ローム層をのせる台地	
4			昭和46年以降				
5	RC造	1～3F	昭和45年以前	3	台地2	海成粘土・砂層の上に関東ローム層をのせる台地	
6			昭和46～55年				
7			昭和56年以降	4	谷底低地1	軟弱な堆積層の厚さが10m程度以上	
8			昭和45年以前				
9		4～7F	昭和46～55年	5	谷底低地2	軟弱な堆積層の厚さが10m程度未満	
10			昭和56年以降				
11			8F以上	昭和45年以前	6	沖積面1	沖積層が主に河成礫からなるところ
12				昭和46～55年			
13	昭和56年以降	7		沖積面2	軟弱な堆積層の厚さが10m程度未満		
14	昭和55年以前						
15	S造	1～5F	昭和56年以降	8	沖積面3	軟弱な堆積層の厚さが10m以上25m未満	
16			昭和55年以前				
17		6F以上	昭和56年以降	9	沖積面4	軟弱な堆積層の厚さが25m以上40m未満	
18			昭和55年以前				
19	軽S造	昭和56年以降	10	沖積面5	軟弱な堆積層の厚さが40m以上		
20	その他	(石造, ブロック造, 土蔵)					

7.3 東京都の方法による灘区の建物倒壊危険度と実被害との比較

(1) 灘区の建物特性と地盤特性

東京都の方法を用いて、灘区の353町丁目についてそれぞれの地盤特性と建物を分類した。ただし北部山麓部は図中省略している。

建物の分類にあたっては、第4章で解説した神戸市による建物被害調査データを使用した。灘区における木造、RC造、S造、軽量S造の割合は、それぞれ74.6%、12.7%、7.0%、4.2%となっており、木造建物の比率が全体の3/4を占めている。木造建物の中では、住宅、店舗併用住宅の割合がそれぞれ92.7%、7.3%で、圧倒的に住宅の割合が高い。各町丁目の面積は、町丁目ごとの統計資料が入手できなかったため、GISの機能を用いて算出した。以上の結果得られた建物棟数密度分布を図-7.2に示す。

地盤に関しては東京都と灘区とは本質的に異なる。そのため地盤を分類するにあたり、山地、台地、沖積面などの微地形分類は国土地理院(1966,1996)の土地条件図や濱田・磯山・若松(1995)による液状化、地盤変位及び地盤条件により判断した。また軟弱な堆積層の厚さは、神戸市企画局(1980)の地盤のボーリング柱状図に基づき、砂・礫層ではN値10以下、粘土層ではN値4以下の地層を軟弱層とみなして算定した。

図-7.3から図-7.7に灘区の地盤特性分類を示す。東京都の方法では基礎地盤が10種類に分類されているが、「灘区には谷底低地の項目に当てはまる町丁目がない」、「東京都には『軟弱な堆積層が10mを超える沖積面』が存在するのに対し、灘区の大部分の地域では軟弱地盤が10m以下であり、町丁目単位で見た場合、軟弱な堆積層が10m以上という項目(沖積面3,4,5)に当てはまる地域がない」などの理由により、5種類の分類となった。その中で六甲山町、摩耶山町等、「山地・丘陵」と分類された山麓地区を省略したものを図-7.3に示す。液状化可能性(図-7.4)については、兵庫県南部地震によって実際に液状化が発生した地区を液状化可能性大として判定した。それ以外の地区では大規模な液状化は起こらなかったため、全て液状化可能性なしと判定した。大規模造成地の分類(図-7.5)においては、「人工地形」が町丁目の50%を占めるか否かで判定した。埋立地(図-7.6)、急傾斜地(図-7.7)についても国土地理院(1966,1996)の土地条件図により分類したが、急傾斜地の分類は、「極急斜面」の存在の有無で判定した。また埋立地は灘区において液状化可能性のある地区と合致した。

(2) 灘区の建物倒壊危険度

(1)のように建物・地盤を分類集計し、東京都の算定式に適用した結果、灘区内の各町丁目における建物倒壊危険量が算出された。灘区の建物倒壊危険量は平均的に見て東京都の建物倒壊危険量よりも少し高い程度であった。算出された建物倒壊危険量を5段階にランク分けした建物倒壊危険度を図-7.8に示す。比率割当は、実被害と容易に比較できるように全壊率の20%間隔に分類される町丁目の数に合わせた。例えば、全壊率80-100%の町丁目数と建物倒壊危険度5の町丁目数が同数となっている。

建物倒壊危険度の分布は非常に疎らなものになっており、建物倒壊危険度1の町丁目と建物倒壊危険度5の町丁目が隣り合っている個所が随所に見られる。また、図中北西部(王子公園駅東側一帯)に建物倒壊危険度5の地域が多く集中しているが、これは建物棟数密度の高い地域(図2

参照)と一致する。液状化可能性の高い臨海部の埋立地域では建物倒壊危険度が1となっているが、これは当該地域の建物がその広さに比べて少ないためである。建物倒壊危険度1の町丁目は、その他に北部の丘陵地帯にも広がっている。

(3) 兵庫県南部地震による灘区の被害概要と地震動の推定

第4章で灘区における建物被害を分析した。それによれば、全焼建物が474棟、全壊建物が13,196棟、半壊建物が6,053棟、その他の建物が11,257棟であった。特に、過半数の木造建物が全壊しており、全木造建物の74%が全半壊の判定を受けている。また木造建物は灘区における全建物の75%を占めているため、木造建物の被害率は、灘区全体の被害率に多大な影響を与えている。

第5章で推定した灘区の最大速度(PGV)分布を図-7.9に示す。この分布は、翠川・藤本(1996)が墓石の転倒から推定した最大速度分布とも類似しているものである。気象庁(1997)の震度7の帯(阪急電鉄神戸線とJR線に挟まれた地域)内で、一様に地震動が大きくなっているのが確認できる。また町丁目単位でまとめた建物の全壊率分布(図-7.10)から、震度7の帯に沿って、被害が顕著に表れていることがわかる。全壊率20%以上の町丁目のほとんどは、阪急電鉄神戸線以南に集まっており、同線の北側では、ほとんど被害がなかった。

(4) 建物倒壊危険度と実被害との比較

ここでは、(2)で得た東京都の方法による灘区の建物倒壊危険度と兵庫県南部地震による実被害とを比較する。図-7.8と図-7.10を比較すると、実被害が大きかった震度7の帯内でも建物倒壊危険度の小さい地域が多数存在し、また北西部(王子公園駅東側一帯)には実被害が少ないにもかかわらず建物倒壊危険度の大きい地域がある。

東京都の方法による建物倒壊危険度は第3回調査(東京都,1993)と同様に被害総量を見積もったものと考えられるため、そのような観点から、建物倒壊危険量と実被害の比較を数量的に行ったものを図-7.11及び図-7.12に示す。縦軸には建物倒壊危険量、横軸は建物倒壊危険量に対応した値として、全壊および全半壊建物棟数密度(町丁目内の建物被害棟数/町丁目の面積)をとっている。またPGVの大きさに応じて図中のシンボルを区別して示している。全体的に見て図-7.11の全壊建物($R^2=0.292$)よりも図-7.12の全半壊建物($R^2=0.765$)の方が相関が高くなっていることがわかる。図-7.11の全壊建物との関係を見ると、PGVの弱いものほど分布の傾きが急になっている。つまり小さな被害に対して大きな建物倒壊危険量が見積もられていることであり、同じ建物倒壊危険量でもPGVが大きい方が実被害は大きかったということを示している。

兵庫県南部地震の際には、建物倒壊により多くの死者が発生し、それらは火災など2次災害の原因にもなっていた。被災ポテンシャルとしての建物倒壊危険度は、全壊率に対応するものであることが望ましいと考えられる。ここで、図-7.13に、全壊率と建物倒壊危険量との比較を示す。ここでもPGVについてシンボルを変えて示している。これを見る限り、全壊率と建物倒壊危険量との間に明確な相関は見られない。しかしPGVの大きさに応じて分布の特徴が見られる。これは第5章で推定された地震動が、建物被害率に基づいているため、PGVと全壊率の相関が強くなっているためである。

一方、図-7.11から図-7.13と同様の図を用いて、基礎地盤に関する分布の相関も調べてみたが、関係性が認められなかった。

(2)で建物倒壊危険度5の集中している地域が、建物棟数密度の高い地域と類似していることを述べた。建物倒壊危険量と基礎地盤の間に明確な相関がないことから、建物倒壊危険量が建物棟数密度を主因として決定されていることがわかる。これは建物棟数密度と建物倒壊危険量とを比較した図-7.14からも明らかである。前節において、東京都の建物倒壊危険度算定における建物密度の影響を指摘したが、灘区においては更に顕著であると思われる。その理由として、台地1, 2, 沖積面1, 2で設定された地盤特性ウェイトには大差がなく、(7-1)式における建物棟数密度 D_k の寄与度が著しく高くなってしまったことが考えられる。そのため、図-7.15に示したように建物棟数密度と実際の全壊率の間には、相関が見られない。したがって全壊率に対応する指標として建物倒壊危険度を考えるとき、建物棟数密度の影響を取り除く必要がある。ある町丁目において全壊率が高いということは、地震動入力を一定と考えた場合、その町丁目内の地盤条件を含めた建物の倒壊可能性が高いということである。行政が震災対策事業によって改善すべき地域を選択する場合に、全壊率に対応した指標を用いることが出来ればより有効であると思われる。次節では、以上のことを踏まえた評価法として、東京都の建物倒壊危険度評価法の簡易性を保ちながらも、建物棟数密度の影響を取り除き、確率論的な概念に基づくウェイト設定を用いた、より実被害に適合する評価法を提案する。

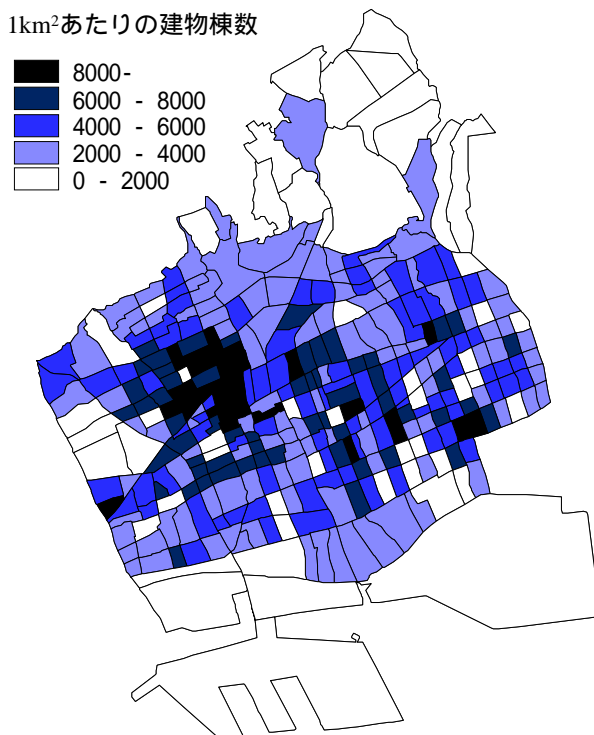


図-7.2 灘区の建物棟数密度分布

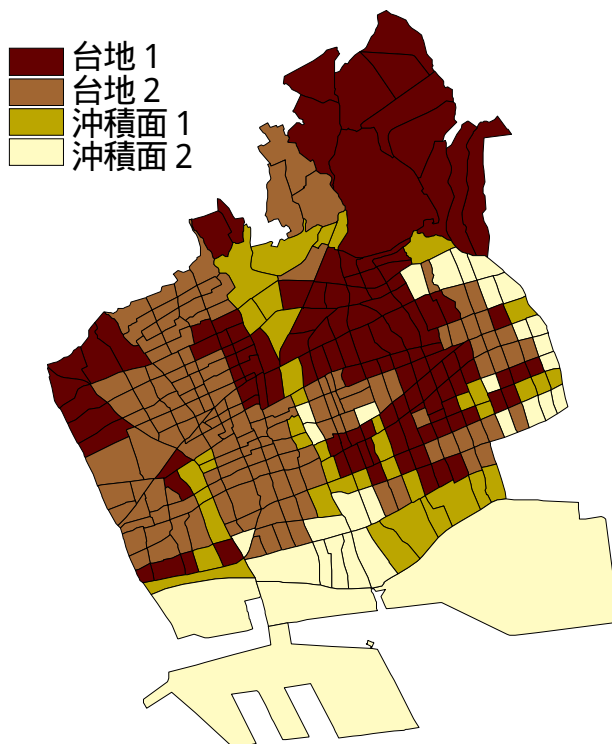


図-7.3 灘区の基礎地盤分類



図-7.4 灘区の大規模造成地占有率

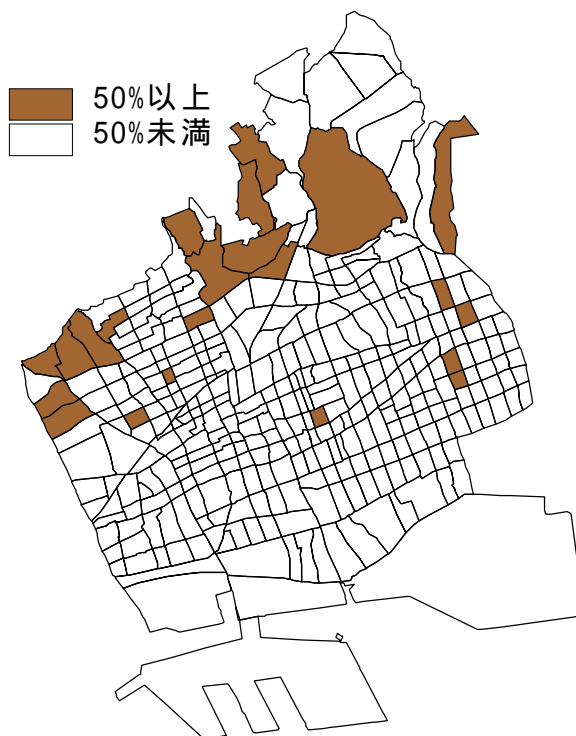


図-7.5 灘区の大規模造成地占有率

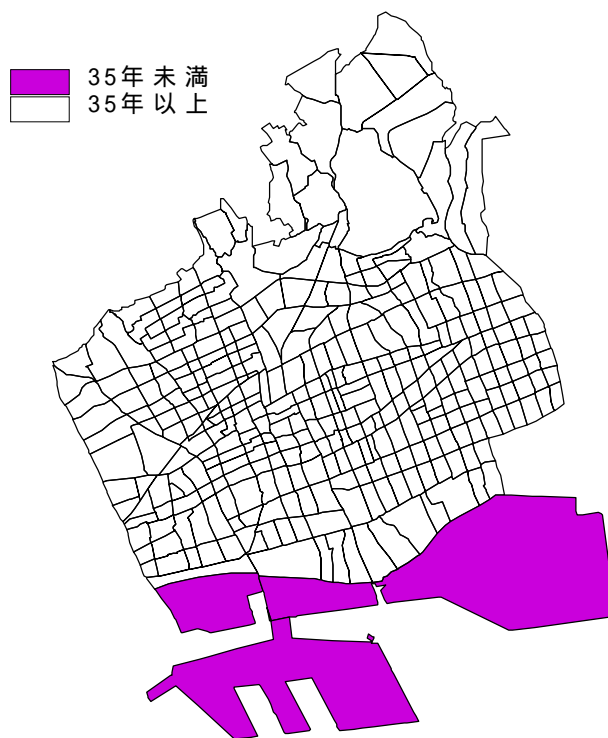


図-7.6 灘区の埋立地

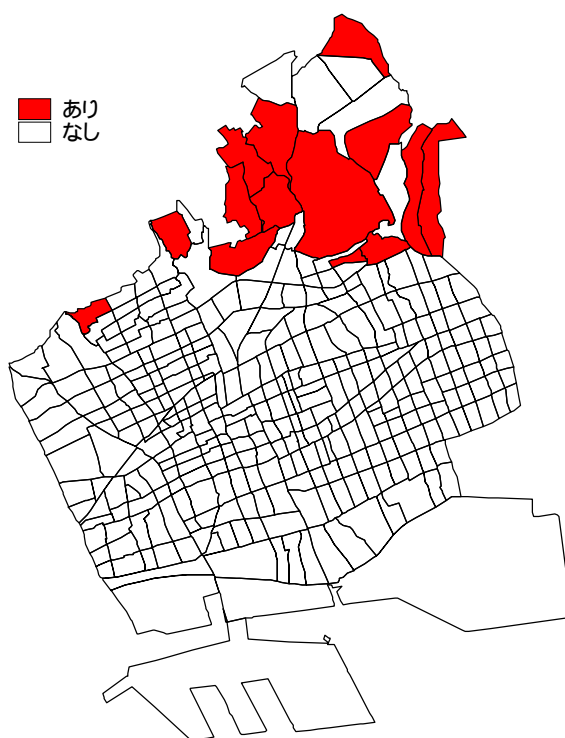


図-7.7 灘区の急傾斜地

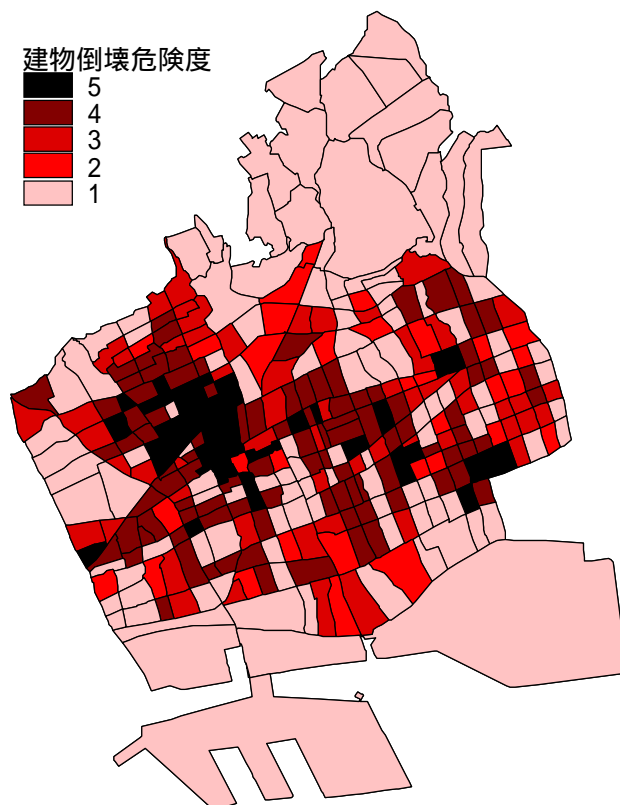


図-7.8 灘区の建物倒壊危険度

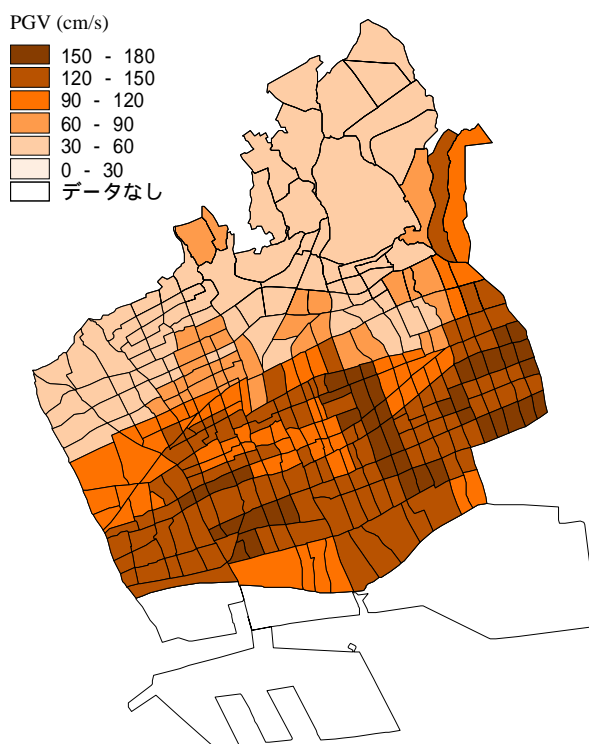


図-7.9 灘区の町丁目単位の推定 PGV

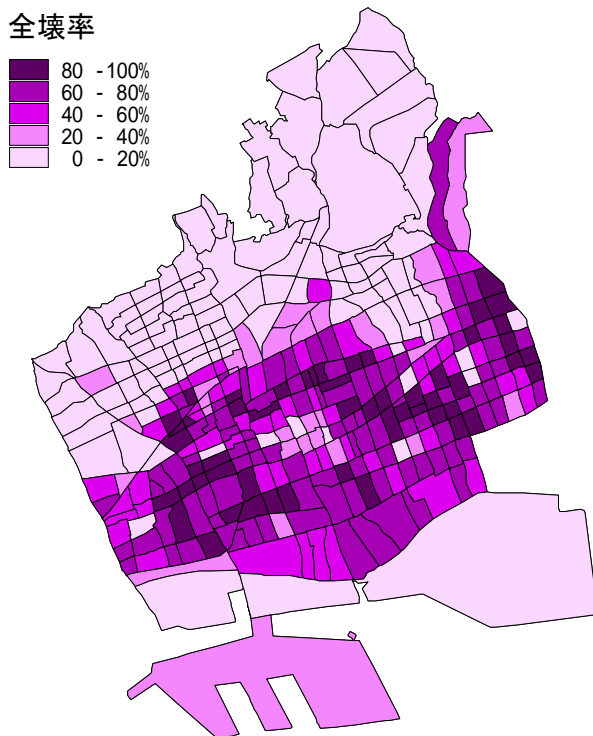


図-7.10 灘区の建物全壊率

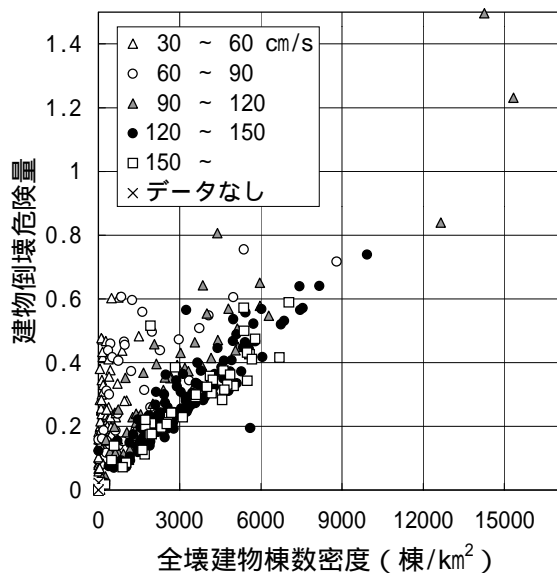


図-7.11 全壊建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較

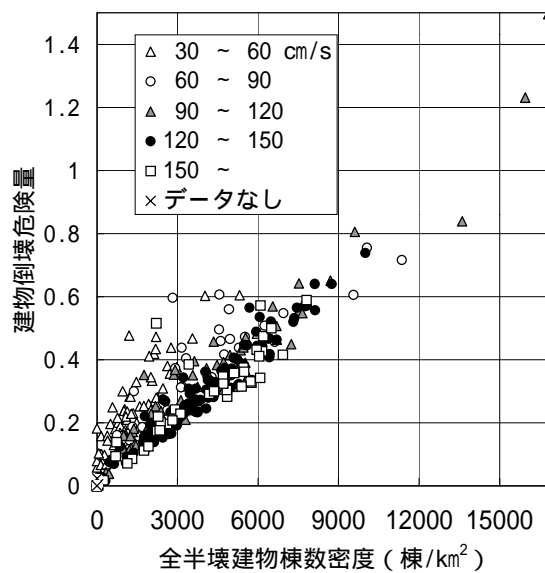


図-7.12 全半壊建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較

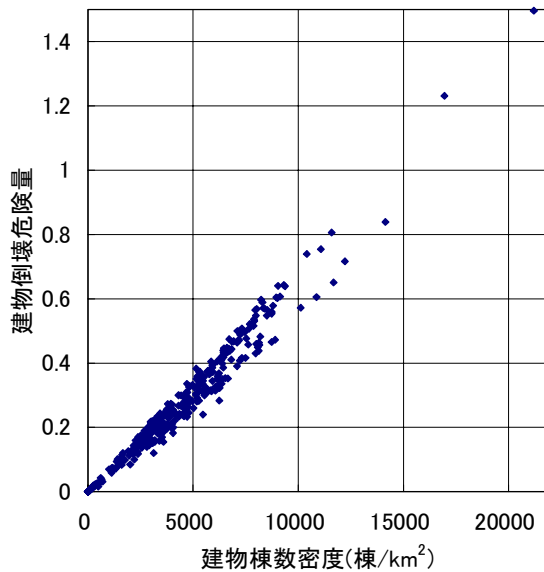
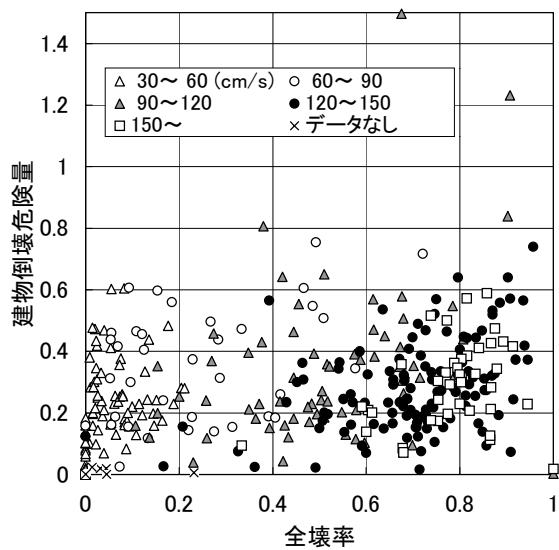


図-7.13 全壊率と建物倒壊危険量の比較

図-7.14 建物棟数密度と建物倒壊危険量の比較

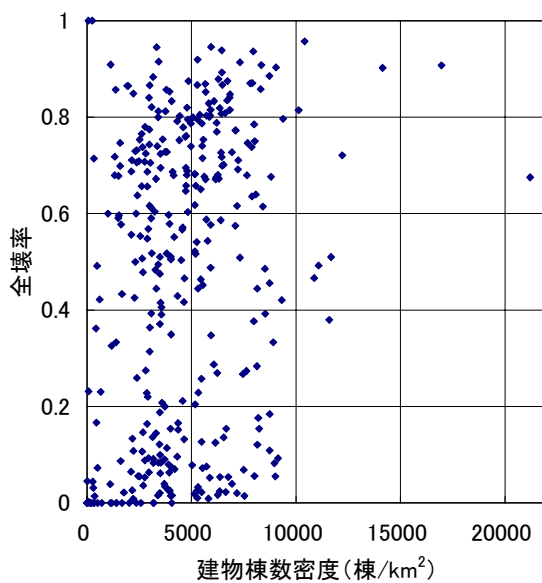


図-7.15 建物棟数密度と全壊率の比較

7.4 実被害データに基づく新建物倒壊危険度評価法の提案

(1) 建物存在率とマトリクスタイプのウェイト設定

ここでは、危険度を実被害における全壊率に対応するものとして評価する、建物特性と地盤特性に関する実被害データに基づくウェイトを設定する、の2点について検討し、新建物倒壊危険度評価法について提案する。

まず、東京都建物倒壊危険度に関する(7-1)式において、「 D_k ：建物棟数密度」を「 N_k ：建物存在比率」とする(例：木造建物の存在比率 = 町丁目内の木造建物棟数 / 町丁目内の全建物棟数)。これにより、全壊率に対応した建物倒壊危険度が求められる。

次にウェイトの設定を見直す。(7-1)式のように、東京都の方法では、建物耐震特性と地盤特性がそれぞれ独立のものとして設定されているが、まずは、その有効性について検討する。

建物耐震特性は、第6章で構築した建物被害関数に基づき、構造・建築年代から分類している。また地盤分類については、灘区の地盤をより正確に表すものとして、山口・山崎・若松(1997)による西宮市や、後藤・山崎・若松・浅野(1997)による尼崎市の分析における地盤分類と同様に、国土地理院(1966, 1996)の土地条件図および神戸市企画局(1980)のボーリング柱状図等から、山地、段丘、扇状地、デルタ、埋立地の5つの表層地盤タイプに分類した(図-7.16)。ただし、臨海部の埋立地4町丁目に関しては大規模な液状化が発生し、それらが建物被害に大きな影響を与えているため、対象地域から外してある。

表-7.2は、各地盤・建物の分類項目ごとの建物全壊率と規準化数値を示したものである。規準化数値とは、1982-94年に建造されたRC造建物の全壊率を1.0として、各項目で、被害を受ける確率の比率がどれ位かということを表している。建物分類項目ごとに地盤項目を比較すると、それぞれ規準化数値の変動が大きく、地盤による全壊率の影響は一定ではない。これは建物耐震特性と地盤特性とのウェイトがそれぞれ独立して設定できないことを示している。

したがって、ここでは表-7.2の全壊率をマトリクスタイプの地震危険性ウェイトとして取り扱う。このウェイト設定によって建物耐震特性と地盤特性との関係を表現することが可能となり、より実際の地震被害に近い建物倒壊危険度が得られる。なお、ここで設定した危険性ウェイトは兵庫県南部地震の経験に基づいており、この地震による地震動分布や阪神地域の建物特性の影響を含んでいる。

(2) 新建物倒壊危険度

新たな指標は表-7.2の全壊率を危険性ウェイトとして扱っており、東京都の用いた「危険量」よりも「危険率」の方が名称として適切であると考え、下記のように建物ごとの倒壊危険率 P_k を定義する。

$$P_k = N_k \cdot W_{kl} \quad (k=1-14: \text{建物分類}, l=1-4: \text{地盤分類}) \quad (7-4)$$

ここで、 P_k ：建物ごとの倒壊危険率(%)、 N_k ：建物存在比率(%)、 W_{kl} ：危険性ウェイト(%)である。

このようにして各町丁目内の地盤・建物に応じた建物ごとの倒壊危険率 P_k が求まり、それら全種の建物ごとの倒壊危険率を次式によって合算したものが各町丁目における建物倒壊危険率 P_i となる。

$$P_i = \sum_{k=1}^m P_k \quad (m=14: \text{建物分類数}) \quad (7-5)$$

新建物倒壊危険度 P は、(7-5)式により求められた町丁目ごとの新建物倒壊危険率 P_i を大きいものから順に5段階に割り当てられたものである。算出された灘区の建物倒壊危険率を前節(2)の比率割当てに従ってランク分けし、新建物倒壊危険度として表したものが図-7.17である。東京都の方法による建物倒壊危険度(図-7.8)と比較してみると、危険度の高い地域が比較的南側へ移動した。

(3) 新建物倒壊危険度と実被害との比較

新しく算出された町丁目ごとの建物倒壊危険率と全壊率の関係を、PGVの大きさによってシンボルを区分し、図-7.18に示す。PGVの比較的小さかった町丁目でも、全壊率よりも建物倒壊危険率が高く評価されていることが読み取れる。危険性ウェイトは灘区全域での全壊率を基に設定されているため、必ずしも各町丁目ごとに建物倒壊危険率と全壊率が一致するとは言えないが、図-7.13と比べ相関が高くなったことがわかる。全壊率と建物倒壊危険率に大きな差が生じた地域を調べてみた結果、その原因として、「町丁目内の棟数が極めて少ない(1-4棟)」、「建物棟数密度が高く、古い木造建物で占められている地域であるため、算出された建物倒壊危険率は高くなったが、兵庫県南部地震の際には、震災の帯から外れたため実被害が小さかった」ことなどが考えられる。

建物の絶対棟数が少ない地域における建物倒壊危険率と全壊率のずれを補正するため、町丁目内の全建物棟数をかけたもの、すなわち町丁目ごとの全壊棟数と倒壊危険棟数の関係を図-7.19に示す。この図においては、図-7.18に比べ、より強い相関が窺える。

以上のことから、ここで算出された建物倒壊危険率は、地域の被災ポテンシャルを表す上で、有効な指標であると思われる。

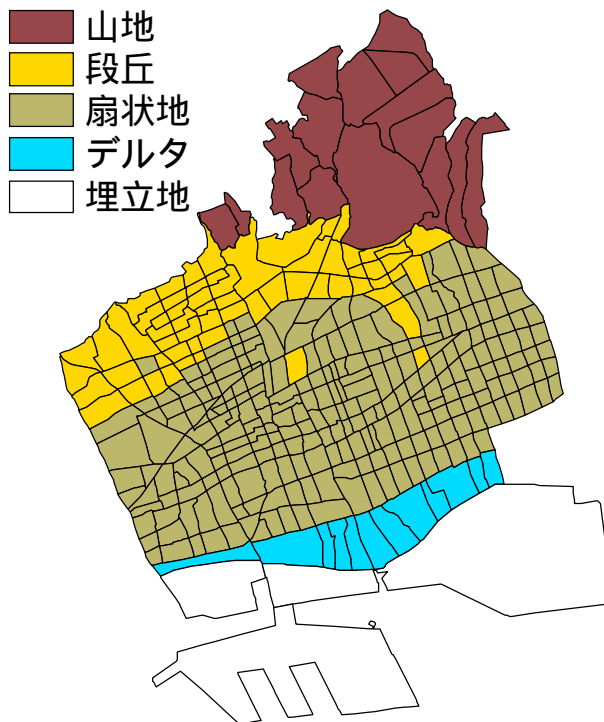


図-7.16 瀬区の地盤分類

表-7.2 分類項目ごとの建物全壊率(%)と規準化数値

分類			山地		段丘		扇状地		デルタ	
			1	2	3	4				
構造	年代	番号	全壊率	規準化数値	全壊率	規準化数値	全壊率	規準化数値	全壊率	規準化数値
木造	-1951	1	0.9	1.9	19.6	19.7	76.0	11.2	87.8	10.1
	1952-61	2	20.1	40.7	12.5	12.5	76.9	11.3	77.1	8.9
	1962-71	3	11.0	22.4	11.1	11.1	74.0	10.9	79.4	9.1
	1972-81	4	8.0	16.2	4.1	4.1	50.2	7.4	48.9	5.6
	1982-94	5	3.8	7.6	0.8	0.8	24.2	3.6	26.2	3.0
RC造	-1971	6	1.7	3.5	6.0	6.0	29.5	4.3	29.0	3.3
	1972-81	7	2.6	5.3	1.2	1.2	17.5	2.6	31.3	3.6
	1982-94	8	0.5	1.0	1.0	1.0	6.8	1.0	8.7	1.0
S造	-1971	9	5.7	11.6	5.7	5.7	54.2	8.0	40.0	4.6
	1972-81	10	0.0	0.0	6.7	6.7	41.5	6.1	18.6	2.1
	1982-94	11	0.0	0.0	2.6	2.6	13.7	2.0	13.1	1.5
軽S造	-1971	12	2.9	5.9	3.7	3.7	62.5	9.2	50.0	5.7
	1972-81	13	1.7	3.4	4.3	4.3	15.4	2.3	10.0	1.1
	1982-94	14	1.2	2.5	0.9	0.9	8.4	1.2	14.3	1.6

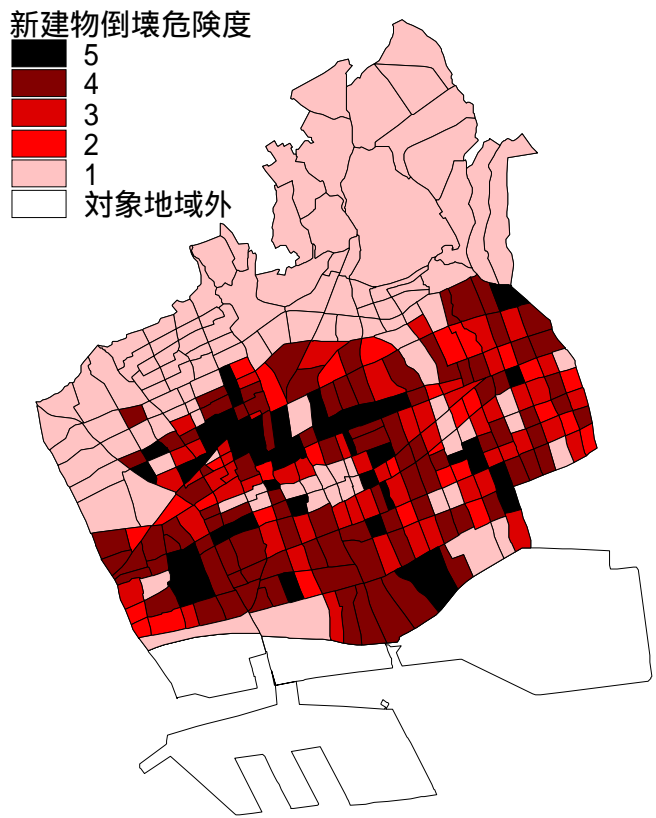


図-7.17 灘区の新建物倒壊危険度

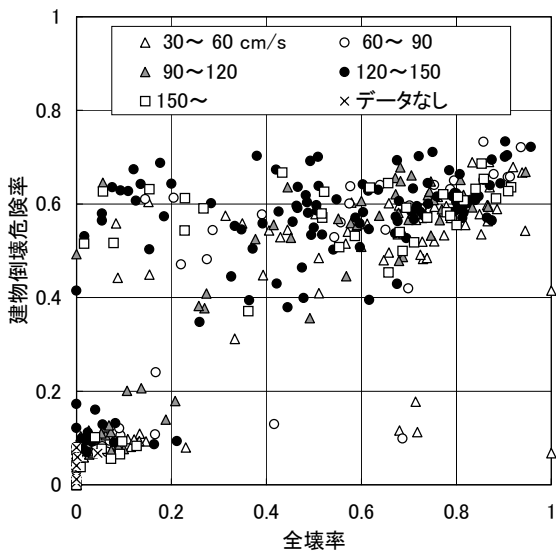


図-7.18 全壊率と建物倒壊危険率との比較

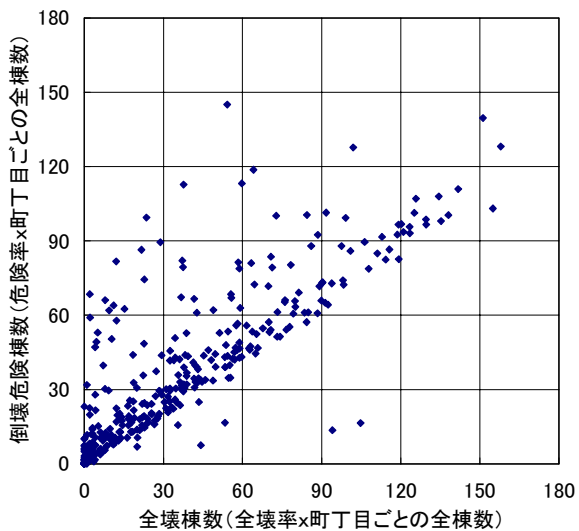


図-7.19 全壊棟数と新建物危険棟数との比較

7.5 汎用ウェイトの設定手法

(1) 実被害に基づく確率密度関数

ここでは、灘区以外の一般的な地域においても建物倒壊危険率および新建物倒壊危険度が算定できるよう、これまでに星谷(1973)、中埜・岡田(1989)が行ってきた信頼性解析を用いた危険性ウェイトを設定する。信頼性解析には、建物強度確率密度関数 R と地盤ごとの最大速度の生起確率密度関数 S が必要である。以下に、確率密度関数の求め方についてまとめる。

建物強度確率分布を対数正規分布と仮定し、対数正規確率紙上で横軸に町丁目単位の PGV、縦軸に全壊率をプロットし、回帰直線を引く。この回帰直線の傾きを a 、切片を $-b$ とすれば、建物強度確率密度関数

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (0 < x < \infty) \quad (7-6)$$

が得られる。ただし、 $\lambda = b/a$ 、 $\zeta = 1/a$ であり、それぞれ $\ln x$ の平均値及び標準偏差となっている。

ここでは、 λ_r 、 ζ_r の値として第6章で構築した灘区の被害関数の値を使用した。図-7.20 から図-7.23 に全壊に対応する各種建物強度の確率密度関数を示す。1971年以前の木造建物の確率密度分布には大きな差は見られないが、基本的にどの構造でも新しいものほど、高い地震動にピークがあり、耐震性が強くなることを表している。また、新しいものほど分散が大きく、平らな分布形を呈している。同様に求めて兵庫県南部地震に対する地盤ごとの PGV 生起確率密度分布関数を図-7.24 に示す。ピーク時の PGV 指標は山地、段丘、扇状地、デルタの順に高くなっている。また、揺れの分布は山地、扇状地で比較的広範に分布しており、段丘、デルタではピーク値周辺に集中している。各分類のパラメータの値を表-7.3 に一覧する。山地、扇状地では ζ_s の値がそれぞれ 0.53、0.33 と大きくなっており、広範に分布している。段丘・デルタの ζ_s はそれぞれ 0.24、0.15 で、山地や扇状地に比べると分布範囲は狭くなっている。

(2) 信頼性解析による汎用ウェイト設定手法

建物強度の確率密度関数を R 、地形区分ごとの PGV 生起確率密度関数を S と置くと、全壊の確率 P_f は、次の式で表される。

$$P_f = P\left(\frac{R}{S} < 1\right) \quad (7.7)$$

ここで、 $Z = R/S$ と置くと、上式より、

$$P_f = \int_0^1 f_z(z) dz \quad (7.8)$$

となる．ところで， R, S は正規対数分布を仮定しており（図-7.25），その自然対数はその平均値をそれぞれ λ_r, λ_s ，標準偏差を ζ_r, ζ_s とすれば， $\ln Z = \ln R - \ln S$ より， $\ln Z$ も正規分布となる．ここで R と S が無相関と仮定すれば， $\ln Z$ の平均値及び標準偏差はそれぞれ， $\lambda_z = \lambda_r - \lambda_s$ ，

$\zeta_z = \sqrt{\zeta_r^2 + \zeta_s^2}$ で与えられる．よって，

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_z} \int_0^1 \frac{1}{z} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln z - \lambda_z}{\zeta_z}\right)^2} dz \quad (7.9)$$

$y = \frac{\ln z - \lambda_z}{\zeta_z}$ と置換すると

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\lambda_z}{\zeta_z}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy = 1 - \Phi\left(\frac{\lambda_z}{\zeta_z}\right) \quad (7.10)$$

となり，ある R と S に対する破壊確率が決定される．ここで， (λ_z/ζ_z) は標準正規確率分布関数である．

これを各地盤 (S)・建物分類 (R) の組み合わせごとに算定した危険性ウェイトを表-7.3 に示す．図-7.26 のように表-7.2 の全壊率と比較したところ，高い相関 ($R^2=0.94$) が得られ，この方法による全壊率の再現性が確認された．ここで使用した建物強度の確率密度関数は，他の地域においても適用できると考えられることから，地域の地盤特性による PGV 分布確率密度関数を用意することで，地域特性に応じた危険性ウェイトが設定できる．

(3) 汎用ウェイト設定手法を用いた新建物倒壊危険度評価法

以上のことと(7.4)式，(7.5)式から，改めて次のような新建物倒壊危険度評価法を提案する．建物倒壊危険率 P_i を，次式で定義する．

$$P_i = \sum_k (N_k \cdot W_{kl}) \quad (k: \text{建物分類}; \quad l: \text{地盤分類}) \quad (7.11)$$

ここで， P_i ：建物倒壊危険率， N_k ：建物存在比率， W_{kl} ：危険性ウェイトで， P_i は，地域の被災ポテンシャルを相対的に表す指標である．危険性ウェイトは，建物・地盤分類のマトリクス形式で定義される．

地盤分類は地域的な特性に応じて自由に設定することができる．但し，PGV 生起確率分布が算出できる分類を用いる必要がある．

危険性ウェイト (W_{kl}) は，信頼性解析による手法で決定する．建物の全壊確率分布と地盤ごとの PGV 生起確率分布を用意することにより，地域特性に応じたウェイト設定が可能である．

で算出された建物倒壊危険率 P_i を大きいものから順にランク付けし、新建物倒壊危険度 P とする。ランク分けの比率割当については、東京都の方法のように危険度 5 に分類される町丁目を少なくしてもよいし、20% ずつに分類してもよい。地域の大きさに応じた比率割当が可能である。

このように、地盤の分類に自由度を残したことにより、一般的な地域で新建物倒壊危険度の算出が可能な評価法となっている。

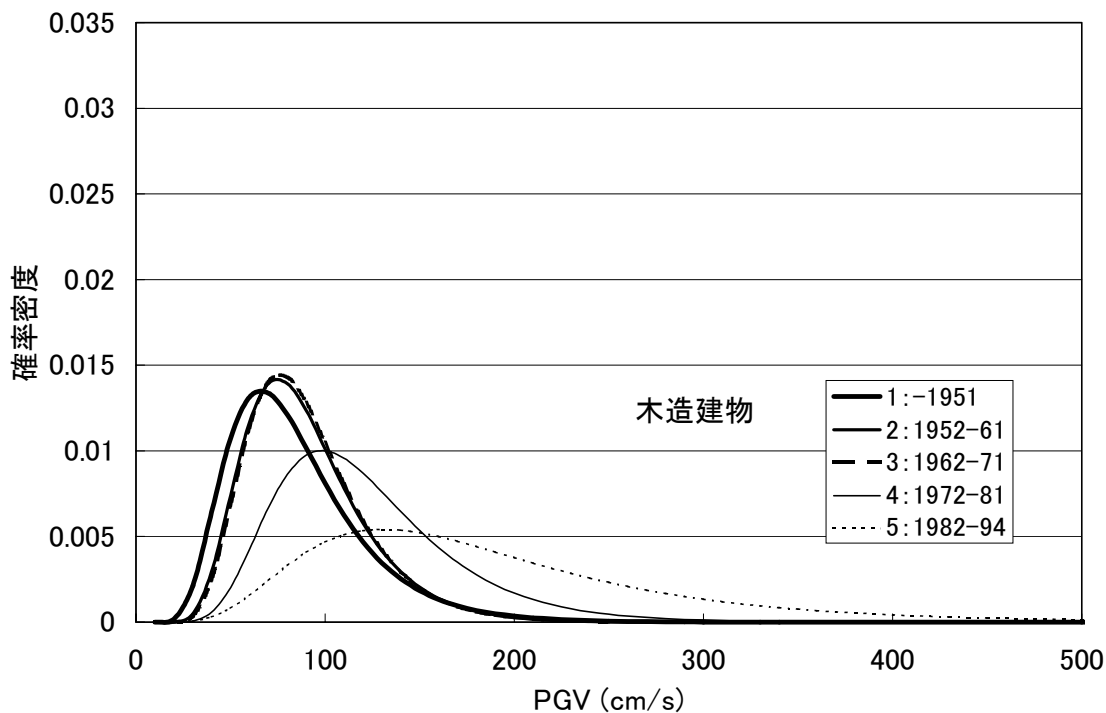


図-7.20 全壊に対応した建物強度の確率密度関数（木造）

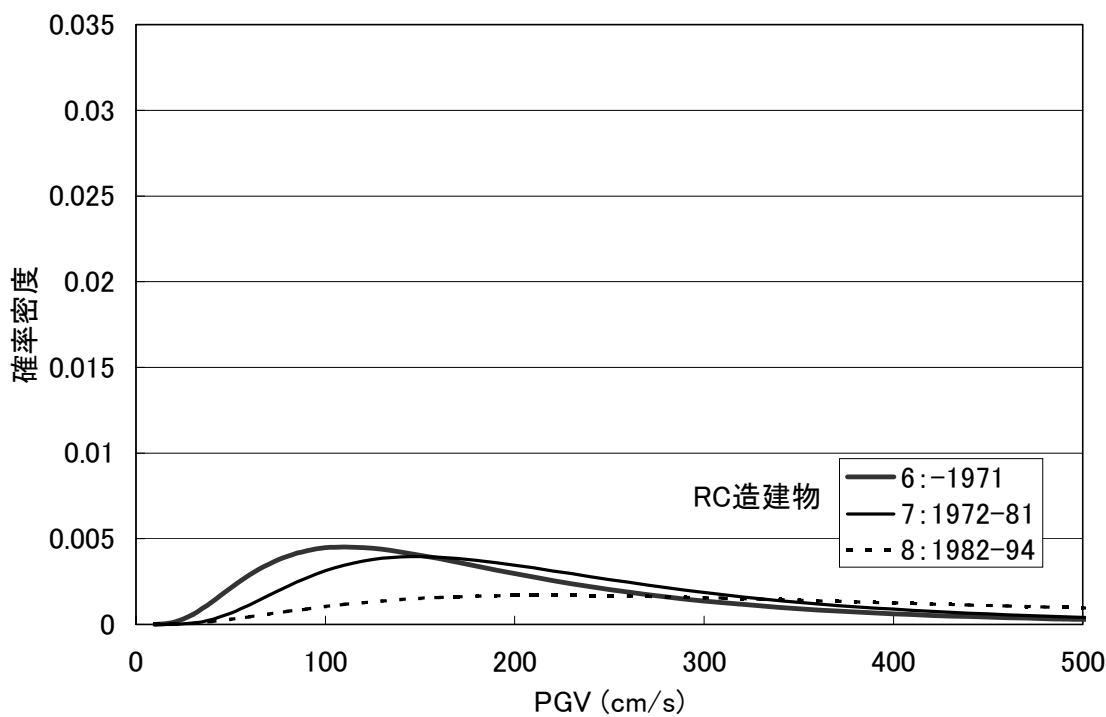


図-7.21 全壊に対応した建物強度の確率密度関数（RC造）

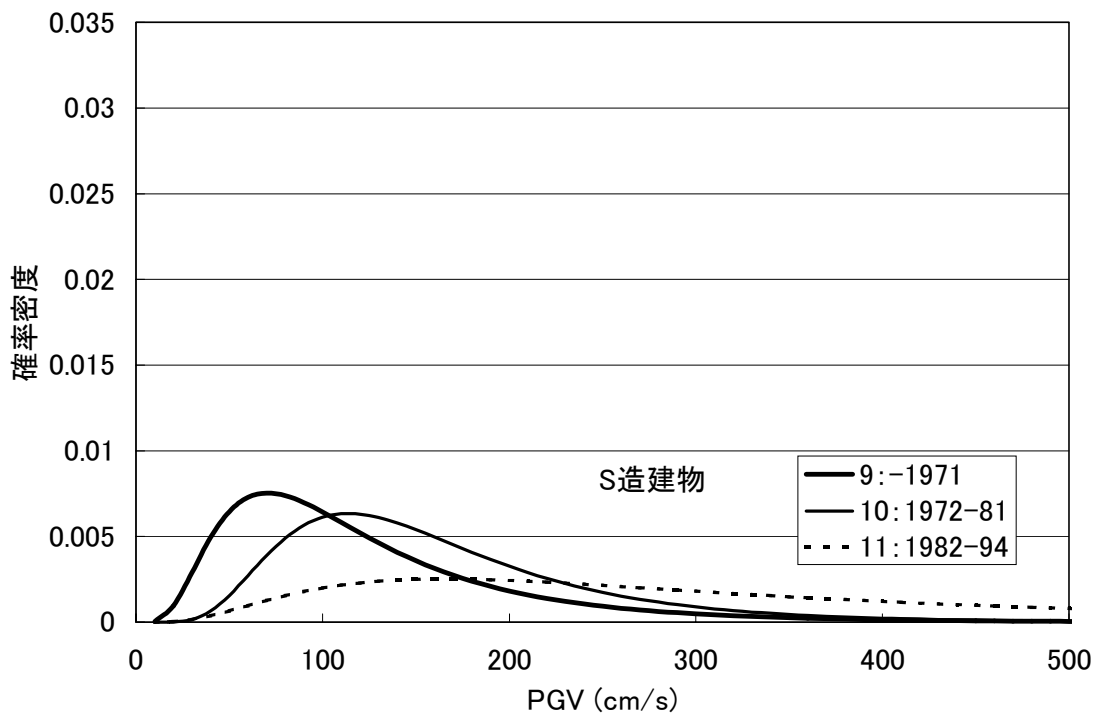


図-7.22 全壊に対応した建物強度の確率密度関数 (S造)

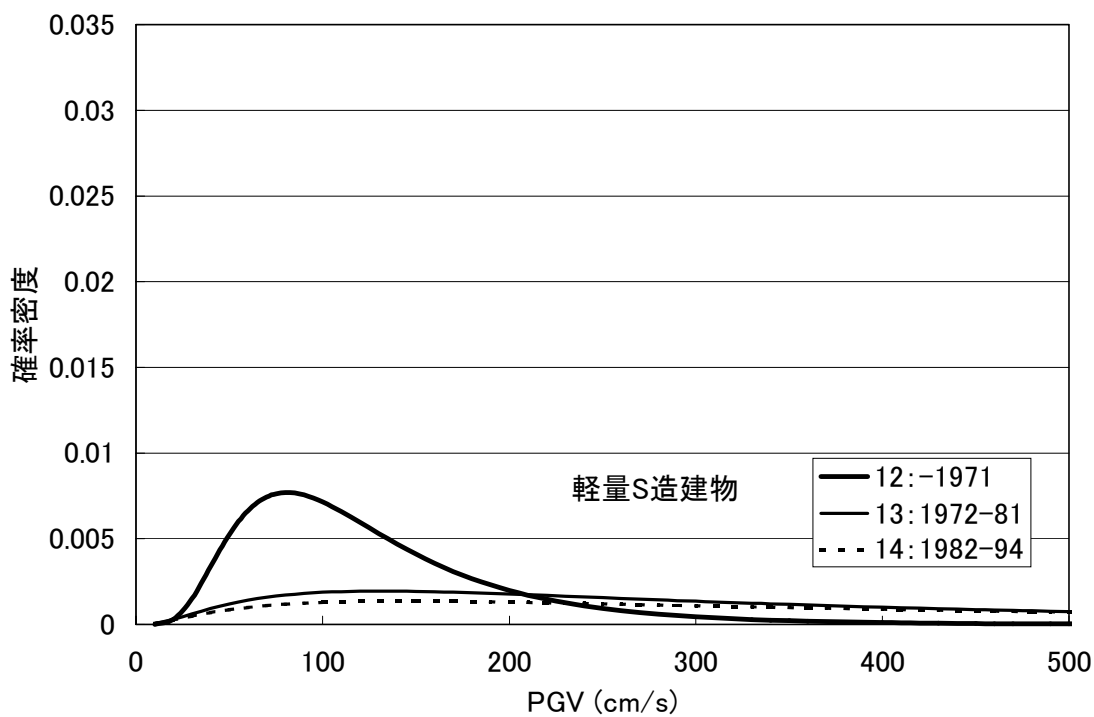


図-7.23 全壊に対応した建物強度の確率密度関数 (軽量S造)

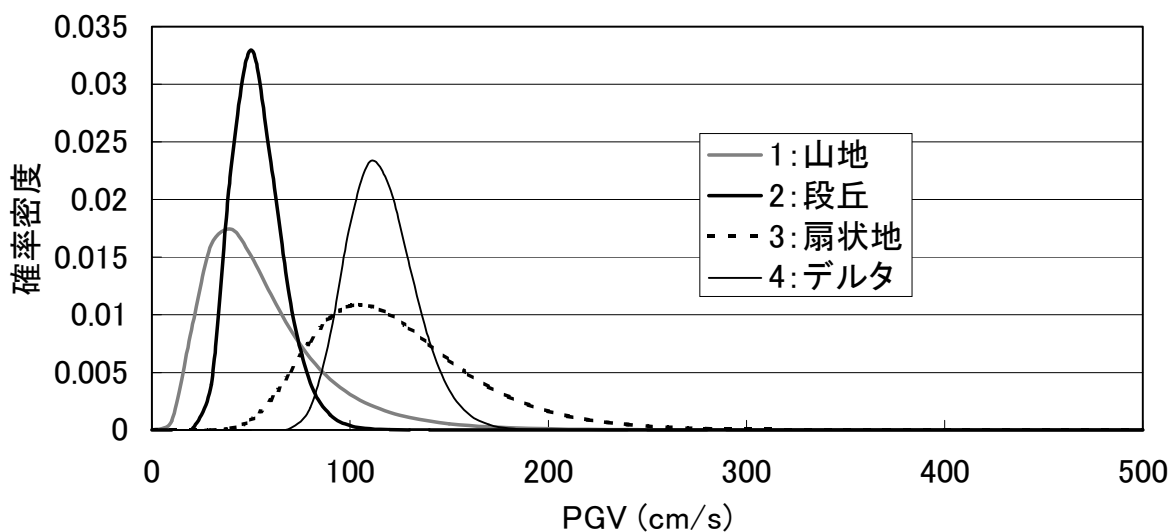


図-7.24 地盤ごとのPGV 生起確率密度分布関数

表-7.3 確率密度関数のパラメータと全壊率をほぼ再現するような危険性ウェイト (%)

				山地	段丘	扇状地	デルタ	
		r	r	1	2	3	4	
s		-	-	3.90	3.95	4.76	4.74	
s		-	-	0.53	0.24	0.33	0.15	
木造	-1951	1	4.36	0.41	24.6	19.5	77.9	80.8
	1952-61	2	4.44	0.35	19.8	12.6	74.8	78.3
	1962-71	3	4.45	0.34	19.1	11.6	74.6	78.2
	1972-81	4	4.73	0.38	10.1	4.1	52.7	51.0
	1982-94	5	5.12	0.50	4.6	1.7	27.5	23.1
RC造	-1971	6	5.12	0.65	7.1	4.4	31.0	28.2
	1972-81	7	5.33	0.58	3.4	1.3	19.7	16.1
	1982-94	8	6.01	0.79	1.3	0.6	7.3	5.8
S造	-1971	9	4.64	0.62	18.2	15.0	57.0	56.2
	1972-81	10	4.97	0.49	6.8	3.0	36.1	32.4
	1982-94	11	5.64	0.73	2.7	1.4	13.7	11.3
軽S造	-1971	12	4.70	0.55	14.8	10.7	54.2	53.1
	1972-81	13	5.82	0.97	4.1	3.1	15.2	13.6
	1982-94	14	6.19	1.10	3.1	2.4	10.8	9.7

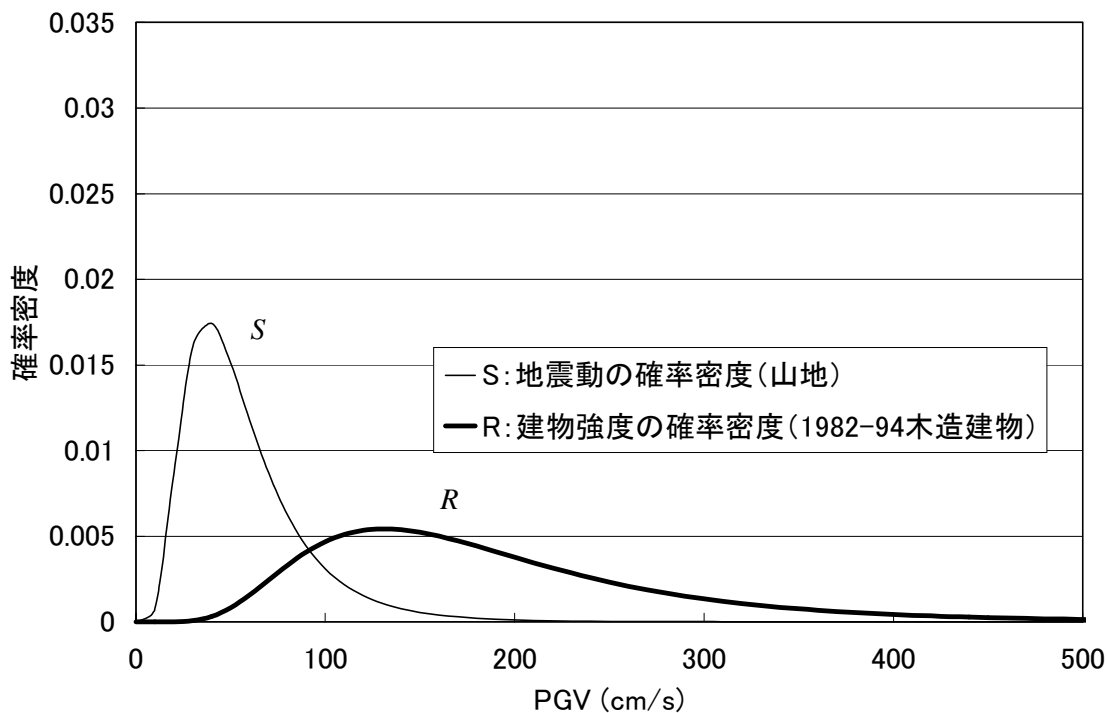


図-7.25 信頼性解析における被害確率の説明図

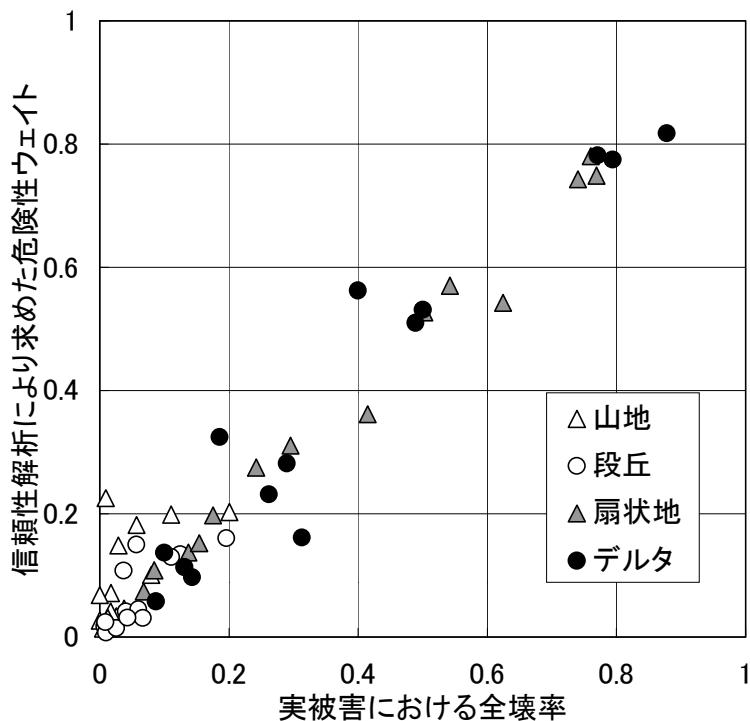


図-7.26 危険性ウェイトの地盤ごとの再現性の評価

7.6 新建物倒壊危険度評価法による東京都の危険度

ここでは、本章で提案した評価法を東京都に適用し、評価する。

まず危険性ウェイトを設定する際に必要な地盤ごとの PGV の生起確率密度分布については、大西・山崎・若松(1998)による地盤増幅度を用いて決定する。また国土数値情報の山地における PGV 生起確率密度分布のパラメータとして、東京都(1997a, 1997b)の直下地震被害想定における基盤地震動レベルの最大速度を 30cm/s とした時の $\lambda_s=3.40$ を用いて建物倒壊危険率と新建物倒壊危険度を求めた。(別のパターンとして、兵庫県南部地震時の灘区山地における $\lambda_s=3.90$ の場合でも新建物倒壊危険度を算定したが、結果はそれほど違わなかった。)最大速度の ζ_s としては、Molas and Yamazaki(1995)による、最大速度の距離減衰回帰式の地域内の変動成分を使用した。これらの数値を表-7.4に示す。前節で使用した建物分類項目における建物強度確率密度関数のパラメータをそれぞれ λ_r 、 ζ_r とし、地盤における PGV 生起確率密度関数のパラメータをそれぞれ λ_s 、 ζ_s とすると、(7.10)式より危険性ウェイトが求められる(表-7.5)。

以上のデータと5節で提案した評価法に基づき、東京23区の新建物倒壊危険度を算出した。その過程で東京都の建物分類方法で集計された建物棟数データを使用したため、木造の1971年以前、1972年以降、鉄骨造の1981年以前、軽量鉄骨造の1981年以前の建物については、東京都の分類と対応する複数の建物分類項目での危険性ウェイトを平均して用いた。図-7.27に現行の東京都による方法と新評価法に基づく危険度分布の比較を示す。

東京都の方法は単位面積当たりの被害総量を表しているのと同時に、3(4)で記したように地盤条件に比べて、建物全体としての棟数密度が支配的要因であるため、建物倒壊危険度の高い地域が環状に分布している。一方、本章の方法では、地盤の危険性ウェイトが高く、倒壊可能性の高い木造建物の多い地域(東部下町)で新建物倒壊危険度が高くなっている。これは本章の評価法により、建物強度や地盤の影響がより一層考慮されるようになったためである。

本章で提案された新建物倒壊危険度は、東京都の簡易的な方法を継承する一方で、指標としては異なった意味を持っている。これは、地域の被災ポテンシャルを表す指標が実際の地震による建物全壊率に相当するものであると考えている点にある。

表-7.4 東京都の地盤分類ごとの PGV 地盤増幅度と生起確率密度関数のパラメータ値

国土数値情報の地形分類	東京都の地盤分類	最大速度の地盤増幅度	s	s
山地	なし	1.00	3.40	-
丘陵地	山地・丘陵	1.71	3.94	0.10
扇状地性低地	沖積面1	1.48	3.79	0.10
砂礫台地	台地1	1.62	3.88	0.10
火山灰台地	台地2	2.50	3.88	0.10
	谷底低地2			
三角州性低地(砂)	沖積面2	2.39	4.27	0.10
三角州性低地(泥)	谷底低地1	2.92	4.47	0.10
	沖積面3			
	沖積面4			
	沖積面5			

表-7.5 本章のウェイトを東京都に適用した場合の汎用危険性ウェイト(%)

		丘陵地	扇状地性低地	砂礫台地	火山灰台地	三角州性低地(砂)	三角州性低地(泥)
木造	-1951	16.0	9.1	13.1	46.0	41.9	60.6
	1952-61	8.6	3.9	6.5	36.9	32.4	53.6
	1962-71	7.6	3.3	5.7	35.6	31.0	52.7
	1972-81	2.2	0.8	1.5	14.6	12.1	25.6
	1982-94	1.0	0.4	0.7	5.6	4.7	10.0
RC造	-1971	3.5	2.1	2.9	10.9	9.7	16.0
	1972-81	0.9	0.4	0.7	4.2	3.5	7.1
	1982-94	0.5	0.3	0.4	1.7	1.5	2.7
S造	-1971	13.2	8.8	11.4	30.3	27.9	39.5
	1972-81	1.9	0.9	1.5	9.5	8.0	15.8
	1982-94	1.0	0.6	0.9	3.6	3.2	5.7
軽S造	-1971	8.8	5.3	7.3	24.9	22.4	34.5
	1972-81	2.7	1.9	2.4	6.2	5.7	8.4
	1982-94	2.1	1.5	1.9	4.5	4.2	6.1

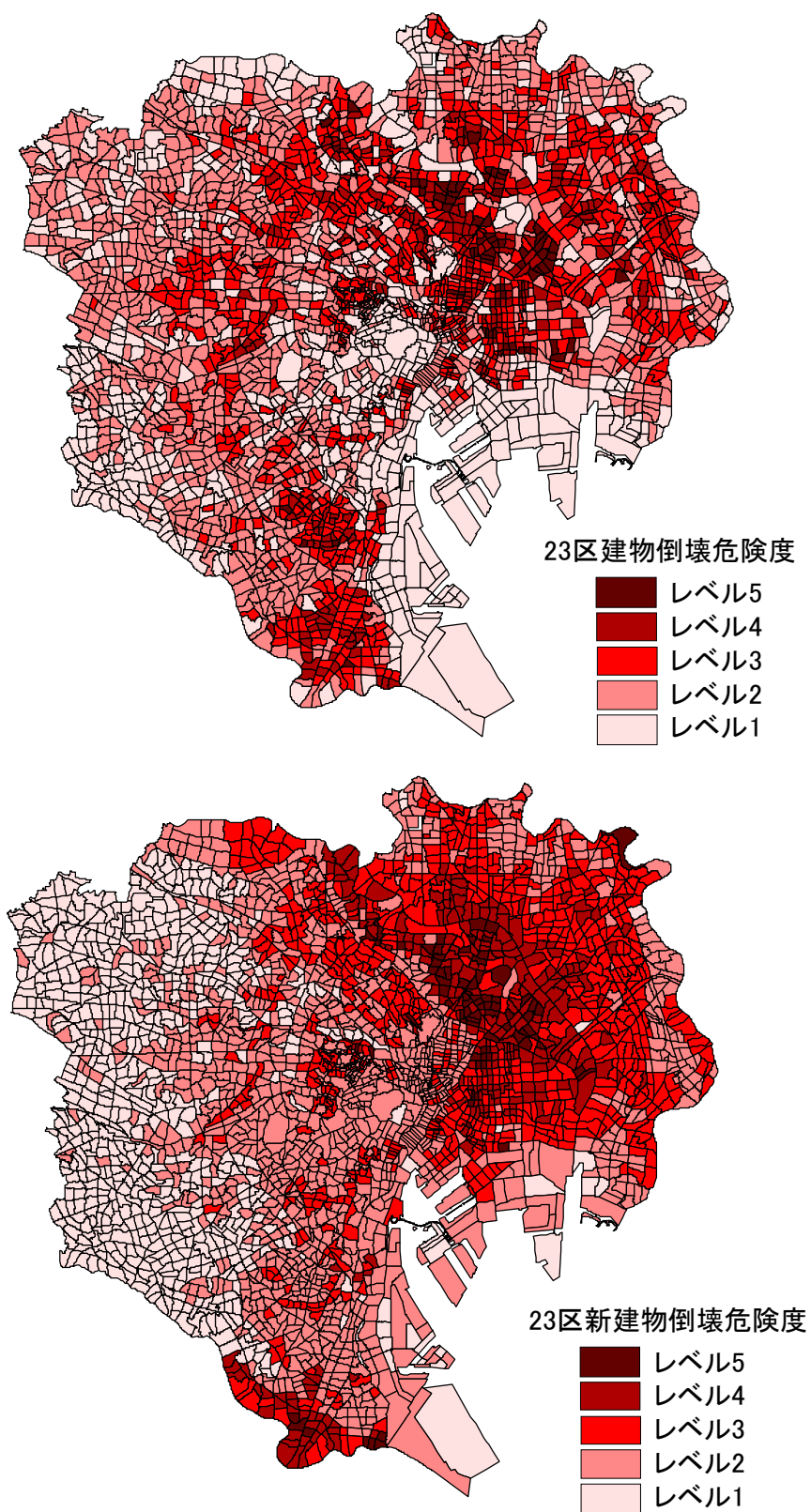


図-7.27 東京 23 区における建物倒壊危険度の比較

7.7 まとめ

本章では、東京都の建物倒壊危険度の手法を神戸市灘区に適用して、兵庫県南部地震による建物被害との比較を行った。その結果、建物棟数密度が大きく建物倒壊危険率に影響していることがわかった。次に、地域の被災ポテンシャルを表す指標は、その地域での地盤条件を含めた建物倒壊の危険率であると考え、建物倒壊の危険度を地震発生時の全壊率に対応する指標として、信頼性解析に基づく評価式を構築した。ここで提案した新建物倒壊危険度は、ある地域の建物存在比率と建物および地盤から決定されるマトリクスタイプの危険性ウェイトから求められるもので、灘区の実被害と比較した結果、強い相関が確認された。この評価式を用いて各地域の地域特性を含んだ新建物倒壊危険度を算定することができる。最後にここで提案した評価式を用いて東京都の新建物倒壊危険度を評価した。その結果、東京都の方法では支配的要因であった建物棟数密度の影響を取り除き、建物強度や地盤の影響を考慮した新建物倒壊危険度を評価することができた。ただし、今後この評価法を用いる際には、ここで設定した危険性ウェイトが兵庫県南部地震の経験に基づいており、この地震による地震動分布や阪神地域の建物特性の影響を含んでいることを考慮する必要がある。

今後の課題として、盛土及び切土地盤、液状化などの地盤変状発生による建物被害の取扱いなどがあげられる。また本章では東京都都市計画局（1998a, 1998b）の発表した「地震に関する地域危険度測定調査」中の4つの危険度のうち、最も根幹的な建物倒壊危険度について取り上げたが、火災、人的被害、避難など他の3つの危険度手法や、それらの組み合わせについても、検討が必要である。

8.1 はじめに

(1) 今世紀における都市デザインの変遷

まず最初に、村上(1986)、石田(1987)、新建築社(1991)、槻橋・石崎・奈尾(1995)、松永(1998)らの文献を参考として今世紀における都市デザインと防災都市計画の変遷の概要を示す。

ここ数百年にかけて、都市(City)は急激な発展を遂げたと言う事ができる。ルネサンス以降の500年、産業革命以降の200年、第二次世界大戦以降の50年、そしてインターネットが世界的に普及したこの10年、都市あるいは都市生活の急激な変貌は、それぞれのタイムスパンに応じて語る事が可能であろう。これまでの社会的な変化に伴い、都市に住む人々すなわち市民(Citizen)の考え方、価値観も大きく変わり、各時代ごとあるいは都市ごとの理念の違いに応じて、都市デザインに関する様々な提案が行われてきた。19世紀のオスマン男爵による「パリの都市計画」、20世紀初頭のエベネザー・ハワードによる「レッチワース田園都市(1902)」、トニー・ガルニエの「工業都市論(1904)」、ル・コルビジェの「300万人のための現代都市(1922)」などは、社会の変貌とともに提案された都市デザインの例である。1960年代に入ると、菊竹清訓、黒川紀章らによる「メタボリズム思想(1960年代)」、バックミンスター・フラーによる「マンハッタンのジオテックドーム(1961)」、丹下健三研究室(1961)の「東京計画1960(1961)」、あるいはアーキグラムの「プラグイン・シティ(1964)」、「ウォーキング・シティ(1964)」など、現実の都市計画の提案あるいは近代都市の理想としてのユートピア的都市構想が提案されるようになる。1970年には、近代技術の万能思想を究極的に具現化したものとして「大阪万国博覧会(1970)」が開催されるが、それと同時に我々が理想としてきたモダニズムの限界性も露になり、都市レベルのビッグ・プロジェクトは徐々に衰退していき、建築家の関心は相対的に個体としての建築へと向けられるようになった。1980年代にはポストモダンの時代に突入し、停滞していたモダニズムの反動からか、自由な造形、自由なビジョンが描かれるようになる。さらによりコンセプチャルな思想を背景として、ダニエル・リベスキンドの「マイクロメガス(1980)」やザハ・ハジドの「香港ピーク設計競技案(1983)」などのドローイングによって脱構築と呼ばれるプロジェクトが提案されるようになる。1990年代になると、これまでに普及してきたパーソナル・コンピュータおよびインターネットの利用率が一挙に上昇し、それに伴い、コンピュータ・グラフィック技術が向上し、渡辺誠の「誘導都市(1990-)」、島田良一研究室の「2006 Tokyo(1997)」そしてジョン・フレイザーの「フローニンゲン・プロジェクト(1996-)」に見られるようなシミュレーションとしての都市、電脳空間の中での都市像が描かれるようになる。

(2) 日本における防災都市計画の変遷

次に今世紀の我が国における防災的な分野から見た都市のビジョンの変遷を示す。

関東大震災により壊滅的な被害を受けた東京では、後藤新平を中心とした震災復興都市計画事業が進められた。ここで整備された幹線道路、土地区画、公園、ライフラインなどのインフラストラクチャー基盤は、東京オリンピックのある1960年代まで都市の基盤として発展した。

その後、1960年代には災害対策基本法が制定されたが、都市の防災問題を解決するためには技術的な対応だけでは不十分であったことから、東京大学に都市工学科が設立され、都市計画の領

域での防災研究が始められた。防災都市計画とはその当時に用いられ始めたもので、1971年の東京都震災予防条例の中では、「災害に強い都市づくり計画のため、都市の危険診断を定期的に行う」ことや、「特別危険区域には優先的に都市計画事業を実施して行く」ことが定められている。これを受けて、東京で最も地震災害に対して弱いとされる江東デルタ地帯の防災拠点再開構想が軌道に乗り始めた。そして東京大学高山英華研究室による江東十字ベルト構想（1966）が提案され、1970年代には、その中から村上（1986）らを中心とする白鬚東地区のプロジェクト（1976-84）が防災再開構想として具現化した。その後、大きな都市被害をもたらすほどの大地震は発生しなかったが、自治体や住民達の「防災まちづくり」と称した地道な努力が各地で実り、東京都の豊島区東池袋地区や世田谷区太子堂地区などに小さな防災広場等が生まれるようになった。1995年には、兵庫県南部地震により阪神・淡路地域が大災害を受けた。その後、安藤忠雄による「阪神大震災復興プロジェクト（1995）」や竹山聖による「神戸新首都計画（1995）」などが提案された。また尾島（1996, 1998）は、彼の持つ壮大な東京都のプロジェクトの一環として防災も取り上げており、環境・ライフライン・地下構想などに関連した防災都市のビジョンを提案している。

（3）21世紀日本における防災環境都市デザイン手法の必要性

地震国であり、かつ高密度の日本の都市では防災的な観点から都市を設計する必要がある。しかしながらこれまでは、いくつかの事例を除き、防災的な研究成果が具体的に魅力的な都市ビジョンとして描かれたことはあまり多くなかった。地震国であるが故に蓄積された日本の数々の教訓を都市設計に生かし、未来の都市像を提案することは地震国日本の使命ではなからうか。これは21世紀世界における日本のアイデンティティを培い、地震対策が必要な地球上の他の都市にも役立つものと思われる。一方で、地球的な規模での環境問題は21世紀の都市にとって取り組むべきテーマのひとつであるが、防災的に必要な要素と環境的に必要な要素とは、水辺や緑地の扱い方など共通する項目が多いと思われる。またそれら防災・環境という側面は、都市の公共空間にとっても重要な意味をなし、市民にとって快適な公共性を引導することにもなる。防災・環境の他に、高度に情報化したネットワーク空間の存在も、21世紀の都市デザインを考えるうえで忘れてはならない。兵庫県南部地震以降、GISが広く普及し、それらを用いた防災シミュレーション等が各自治体等により行われるようになった。GIS、コンピュータ、インターネット等の技術を用いたシミュレーションという概念は、これまでの模型等のみを用いた思考だけでは不可能であった都市のビジョンを描くことが可能となるとと思われる。またネットワーク化された社会の中では、災害時におけるリアルタイムでの対応も不可欠になるであろう。日本では、防災関連の各分野でGISを用いた研究も含め、様々な研究がされている。

以上のことから、社会がさらに複雑になるであろう21世紀において、防災という分野は、環境問題、高度ネットワーク化と関連して重要なパラダイムとなるに違いない。

本章では、Lynch（1968）の「都市のイメージ」を参考とした、防災的、環境的な観点からの都市の解析およびデザイン手法すなわち『防災環境都市デザイン手法 MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design)』を提案する。また第6章、第7章で得た建物被害関数と建物倒壊危険度評価法の適用を含むいくつかのMUSEのイメージを示し、今後の防災環境都市デザインのビジョンについて説明する。

8.2 都市のイメージ

(1) 都市をとらえる試み

「都市の違いを示せ」と言われてどのようなことを思うだろうか。首都東京をひとつの都市と捉えることも可能であろうが、もう少し規模を狭めて山手線内の駅周辺を考えてみよう。「品川」、「渋谷」、「新宿」、「池袋」、「日暮里」、「上野」、「東京」、「有楽町」、「新橋」とそれぞれ、「若者が多い」、「業務地区」、「ターミナル駅」など様々なイメージが思い浮かぶことであろう。

では、建築・都市計画を扱う立場として考えると、どうであろうか。「古い木造住宅が多い」、「道路が整備されている」、「副都心として開発されているため高層ビルが多い」などのイメージが浮かぶであろう。しかし、具体的に物的な要素を取り上げてその違いを認識するのは難しい。

「都市の姿は、その中を動きまわる人々の目にどのように写っているであろうか」、「そのイメージは彼らにとってどんな意味を持っているであろうか」、「人々が求めるイメージはどんなものだろう」、「そのイメージを与える環境のあるべき姿はどんなものだろうか」、「そのために都市計画家たちに何ができるだろうか」。Lynch (1968) は著書「都市のイメージ」の中で、これらの問題に答えるためにイメージアビリティという新しい基準を提案した。そしてボストン、ジャージーシティ、ロサンジェルス の 3 都市を調査対象として取り上げ、この考え方が都市を解析し、デザインするためにいかに役立つかを示そうとした。この「都市のイメージ」という概念は、都市にある物的要素を 5 種に分類し、その配置によって都市の特性を記述することができるというものであり、それまで都市を解析する上で欠けていた視覚的認識について、客観的な指標・基準を設定した実験的な試みであった。

以下にその詳細を示す。

(2) 都市のイメージとエレメント

Lynch (1968) は、イメージを 3 つの次元から分類している。それは、アイデンティティ identity (そのものであること)、ストラクチャー structure (構造)、ミーニング meaning (意味) である。アイデンティティとは、後で説明する「パス (path)」、「エッジ (edge)」、「ディストリクト (district)」、「ノード (node)」、「ランドマーク (landmark)」の 5 つの要素 (図-8.1) そのものであり、形態を持つ独立した物的実体である。ストラクチャーとは、上記 5 つの要素間同志の空間的關係あるいはパターンの關係であり、ミーニングは観察者にとっての実際的・感情的を含む何らかの意味である。ミーニングは時代的、文化的、社会的など様々な要因によって変化し、また対象を個人的、集団的にするかによっても変化するため、研究の対象からははずされている。

ここでは、以上の 3 つの次元から最も基本的なものであるアイデンティティについて述べる。

パス path (道路)

パスとは、観察者が日ごろあるいは時々通る、もしくは通る可能性のある道筋のことである。街路、散歩道、運送路、運河、鉄道などである。多くの人々にとっては、これらが支配的なエレメントになっている。人々は移動しながらその都市を観察している。そしてこうしたパスにそってその他の要素が配置され、関連づけられているのである。

エッジ edge (縁)

エッジとは、観察者がパスとしては用いない、あるいはパスとはみなさない、線状の要素をいう。つまり海岸、鉄道線路の切通し、開発地の縁、壁など、2つの局面の間にある境界であり、連続状態を中断する線状のもののことである。これは点を示す座標軸というよりは、人々が領域を知るために横側から参照するものである。これは多少の通り抜けのある障壁かも知れないし、2つの地域を相互に関連させる継ぎ目かも知れない。この要素はおそらく、パスほど支配的なものではないが、それでも多くの人々にとって組立てのための重要な要素であり、とくに、水面や壁が都市の輪郭を形づくっている場合のように、漠然とした地域をひとつにまとめる役割を果たすという点で重要である。

ディストリクト district (地域)

ディストリクトとは、中から大の大きさを持つ都市の部分であり、2次元の広がりを持つものとして考えられ、観察者は心の中で“その中に”入るものであり、また何か独自の特徴がその内部の各所に共通して見られるために認識されるものである。多くの人々はかなりこの方法に基づいて、彼らの住む都市を組み立てている。ただし、パスとディストリクトのどちらを支配的なエレメントとするかについては個人差もあり、また都市によっても差が生じているようである。

ノード node (接合点, 集中点)

ノードは点である。都市内部にある主要な地点である。観察者がその中に入ることが出来る点であり、彼がそこへ向かったり、そこから出発したりする強い焦点である。ノードとなるのは、まずは接合点、すなわち道路の交差点ないし集合点であり、次に街角の寄り合い所や囲われた広場のように集中点であることもある。何らかの用途または物理的な性格がそこに凝縮されているために重要性を持つものである。こうした集中点のノードはディストリクトの焦点とも縮図ともなることがあり、その影響力はディストリクト全体に広がり、そのディストリクトの象徴の役割も果たしている。ノードはほとんど全てのイメージから発見できるものであり、それが最も支配的な要素になっている場合もある。

ランドマーク landmark (目印)

ランドマークもやはり、点を示すものであるが、この場合は観察者はその中に入らず、外部から見るのである。これは普通は、建物、看板、商店、山など、どちらかと言えば単純に定義される物理的な物を指す。何かをランドマークとして用いるということは、必然的に、限りなく多くの可能性の中から、あるひとつの要素を取り出すことを意味している。これらはしばしば、アイデンティティの手がかりとして、そしてストラクチャーの手がかりとして用いられている。

これらの要素は、観察者によってそのタイプが変わってくることがある。つまり高速道路は運転する者にとってはパスであり、歩行者にとってはエッジであろう。しかし、それらの関係性は安定しているようである。すなわち、ディストリクトはノードで組み立てられ、エッジに囲まれ、パスに貫通され、ランドマークで彩られている。

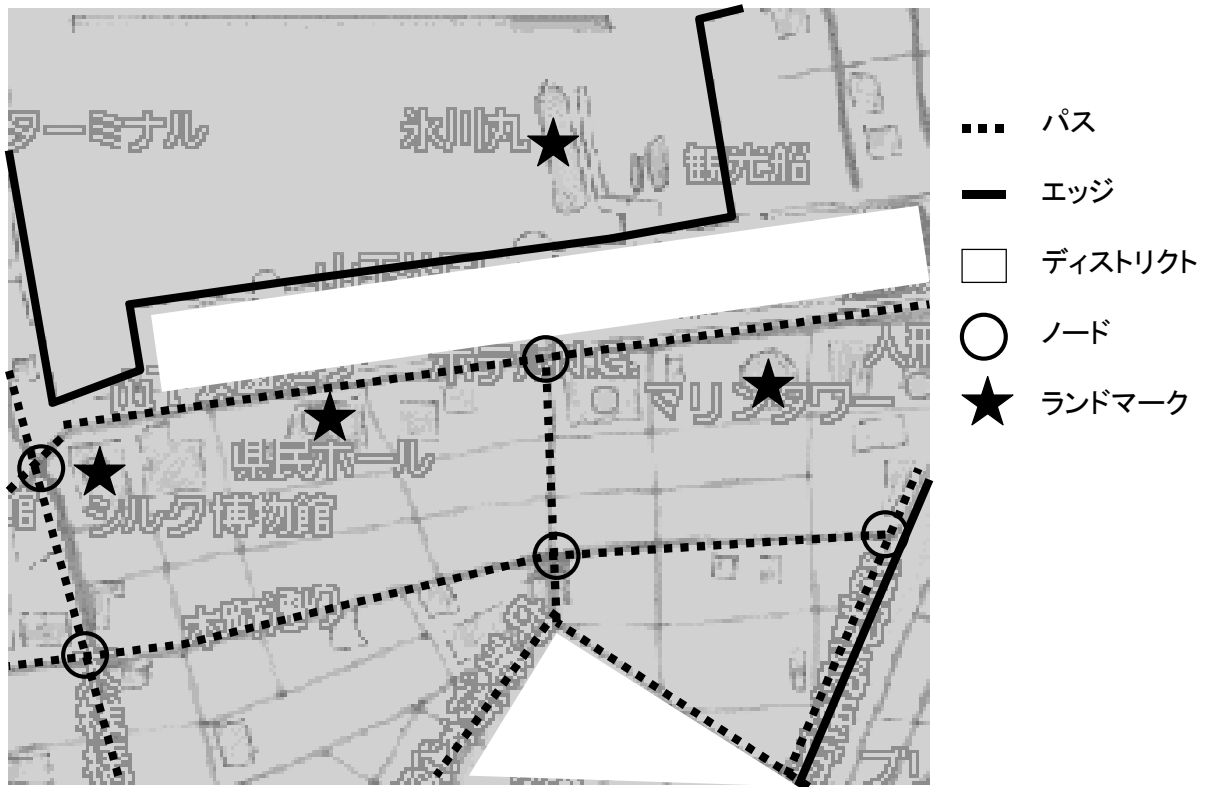


図-8.1 横浜山下公園周辺の都市のイメージ

8.3 生態的都市論

(1) これまでの生態的都市論

第二次大戦後、世界的に大規模な建設の時代がおとずれ、ニュータウンの建設や再開発が行われるようになると、都市をデザインする上で従来の都市計画技術では対応できなくなってきた。そして、ル・コルビジェのアルジェリア計画、丹下健三研究室(1961)の東京計画1960(図-8.2)、Smithson(1971)の都市論(図-8.3)など、人体の構造、植物の幹、枝、葉といった有機体のアナロジーによって、都市の機能を統合しようという動きが現れた。これらは緑地帯、河川、交通網、都市設備などを都市の骨格とし、空間に秩序を与えようとする方法である。土木的なスケールを持つ耐久性の大きな構造物(メイジャー・ストラクチャー)で骨格を構成し、耐久性の小さなスケールの小さい個々の構造物(マイナー・ストラクチャー)でコントロールされると考えられた。これらの理論は、新しい都市をつくる場合には有効かも知れないが、一方で、複雑に成長発展を続けている巨大な現代都市では通用しないという考え方もあった。そして1960年代には、部分からスタートし、それらを結ぶネットワークとして都市をつくっていくというメタボリズム(新陳代謝の意)という都市理論も生まれた。菊竹清訓の「海上都市」、「塔状都市」、「海洋都市」、黒川紀章の「空間都市」、「農村都市」、「垂直壁都市」、槇文彦・大高正人の「新宿副都心計画」、「人工土地計画」などがこれにあたる。これらの理論は高度密集化し、スクラップ・アンド・ビルドを繰り返す日本の都市に適合するものとして広く受け入れられた。

しかし、石油危機が叫ばれ、高度経済成長にも落ちつきが見られるようになる1970年代には、大気汚染・水質汚濁などの公害や交通渋滞などの都市問題が浮き彫りになり、夢をもたらしべき都市づくりに対する気運が薄れていく。また1980年代にはバブル経済の影響によりスクラップ・アンド・ビルドの周期は早まり、もはや空間的な観点と言うよりも経済的な要因により都市がコントロールされるようになる。そのバブル経済もはじけ、不景気の中兵庫県南部地震が発生したのである。

生態的都市論が叫ばれた1960年代から40年近くの年月が経った。そしてここ数年のコンピュータ技術の進展は凄まじく、今現在も世界的規模での高度なネットワーク化が進められていることであろう。兵庫県南部地震では、この複雑化した社会の脆弱さが露呈してしまったが、それらは都市の機能が麻痺した結果である。この複雑化した高度情報化社会において、防災的な観点から、あるいは21世紀の環境問題に対処するために、改めて都市を生態的に見なし、解析する手法は今後の都市づくりのために大変有効であると思われる。

(2) 都市の器官系

ここではNewton(1992)を参考文献として、都市を人体の器官系に例えて、どのような都市機能が各系に対応しているのかを考える。

人間が活動するには体を支える、動かすなどの機能、生命を維持するには食事をとる、呼吸する、全身に養分や酸素を供給するなどのさまざまな機能が必要である。人体にはそれぞれの機能を分担するいくつかの器官系が発達している。体を支える骨格系、骨を互いに結び付け、引っ張ることによって体を動かす筋肉系、運動のエネルギーを与え体を維持する内臓系、全身に養分や酸素を供給する血管系、そして運動を結合して体の維持などのさまざまな機能を調節する神経系

などが、代表的な器官系である（図-8.4，図-8.5）。

筋肉系

筋肉は線維状の筋細胞が多数集まって、全体として一つの活動を行うように組織されている。各筋肉は1本の神経に支配され、その中の多数の筋線維は同じ活動を行う。いくつかの筋肉が集まって一つの活動を行うことも多いが、その際はそれぞれの筋肉を支配する神経が協調して同じ活動を行う。

都市の実在である土地そのものは人間のように運動するわけではないので、人間の運動に必要なこの筋肉系に対応するものは思い浮かばない。しかし筋肉は骨格を守りクッションのような役割もするため、強いて挙げれば、筋肉系とは道路・橋等の都市基盤、建物の構造的靱性であろう。

骨格系

人体は骨格という骨組みで支えられている。8個の頭の骨，14個の顔の骨，52個の首と胴体の骨，64個の手の骨，62個の足の骨，合わせて200個の骨から人間の骨格が形成されている。これらの骨は関節と靱帯で連結している。関節は骨の自由な動きを可能にする。

都市の骨格系とは2つの側面から考えられる。ひとつは都市のフレームという意味での構造であり、これは都市交通、ライフラインなど都市生活を支える上で基盤となる道路の配置であり、人の流れや流通など都市の特性を形成する主要因である。もうひとつは重力・地震力などの外力から都市を守るためのストラクチャーという側面であり、道路・橋等の都市基盤から個々の各施設まで考慮しなくてはいけない系である。それぞれ違う二つの側面から見た上でも、都市の骨格系として道路は重要な要素である。

内臓系

内臓は体の内部の空間にある。内臓の機能はさまざまで、食物を消化して養分を吸収する胃や小腸などの消化器、酸素を取り入れて二酸化炭素を放出する肺などの呼吸器、不要な物質を排出する腎臓などの排出器、子孫をつくる生殖器などに分けられる。

この内臓系は生物としての人間にとって必要な各種機能を司る系である。したがって都市に置き換えてみると、内臓とは都市機能を司る施設であり、下水処理場、発電所、遊戯施設、病院、商業施設（地域）、業務施設（地域）など多種多様のものが挙げられるだろう。

血管系

心臓から出る大動脈によって全身に運ばれる血液は、体の各部の細胞へ養分や酸素を運ぶ。毛細血管を流れる血液と細胞の間で物質のやりとりが行われ、血液は静脈を通過して心臓へ戻り、肺へ送られる。さらに肺から心臓へ戻り、血液は再び全身へ送られる。

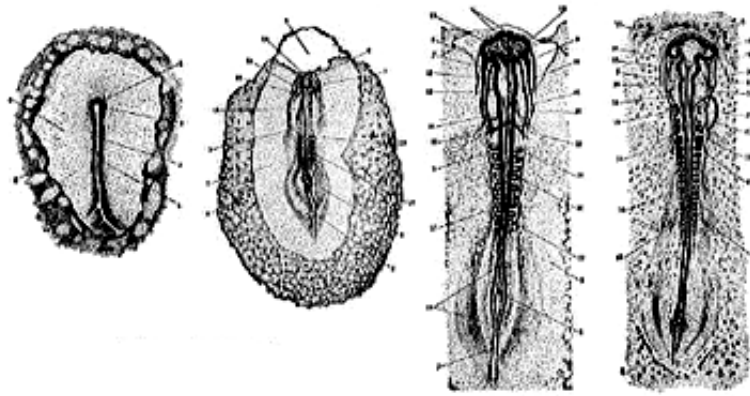
兵庫県南部地震による都市機能の麻痺とは、言い換えれば道路・ライフライン経路の遮断によって都市の循環システムが麻痺したとすることが出来る。血管系とはこのような交通・ライフライン系に対応するものであり、血管とは、人・自動車が走り、その下の共同溝が埋まっている道路に他ならない。ただし骨格系が構造的な観点からの道路であるのに対し、ここでは機能的な側面からの道路という意味合いが強くなる。動脈系・静脈系など酸素・二酸化炭素を運ぶ主要な血

管は都市の幹線道路であり，それ以外の組織に酸素や栄養素を運ぶ毛細血管は各家庭にエネルギー等を供給する小道・路地などに例えることが可能であろう．また血管を流れる血液は，第一に人・自動車という都市の主体であり，次に水・ガス・電気・食料など生活に必要な各種のものに例えることができよう．

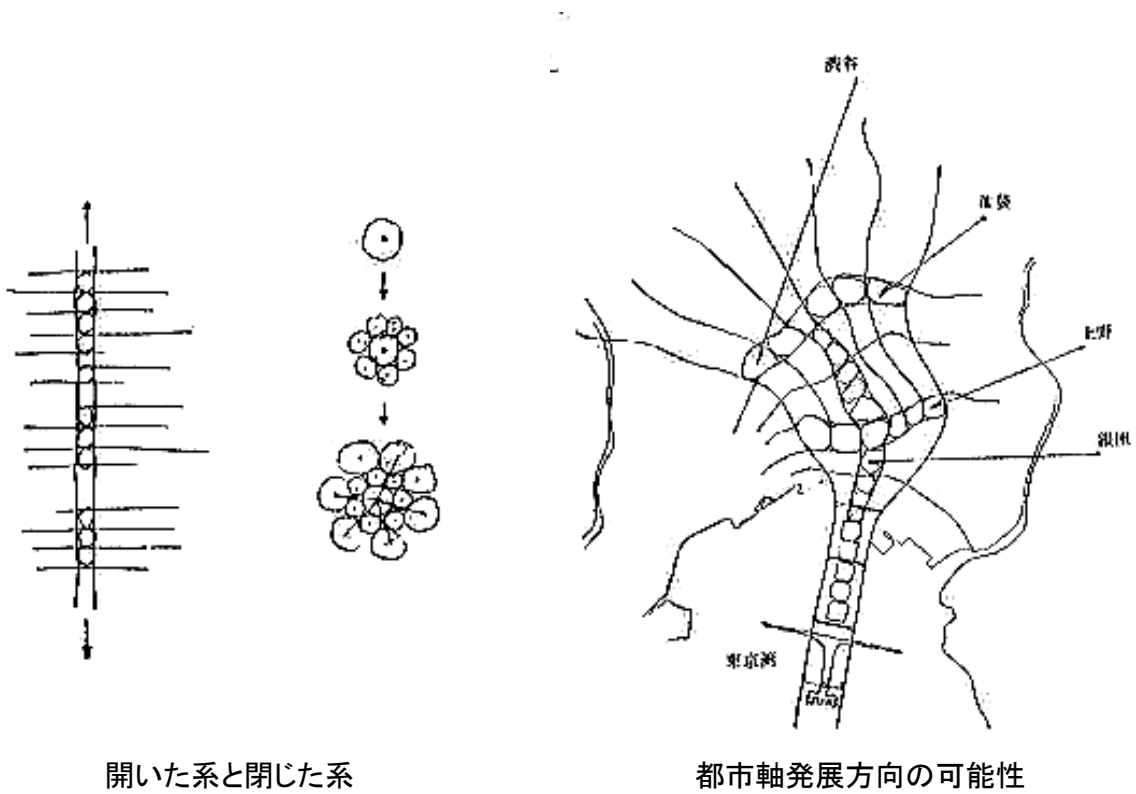
神経系

目や皮膚などの感覚器が得た情報は，「神経の興奮」と呼ばれる信号となって神経線維を伝わる．信号は脳や脊髄の中樞神経へ伝わって処理され，体を動かしたり，意識したりする指令となる．体の各部と中樞神経とを連絡しているのが末梢神経である．

最後の都市における神経系は，情報伝達機能に例えることができるだろう．この系は有線であれば道路と密接に関連するだろうが，無線であれば，いくつかの拠点となる施設を除いて物理的な制約は受けなくなる．



有機生命体の成長の過程



開いた系と閉じた系

都市軸発展方向の可能性

図-8.2 丹下健三研究室(1961)の東京計画1960

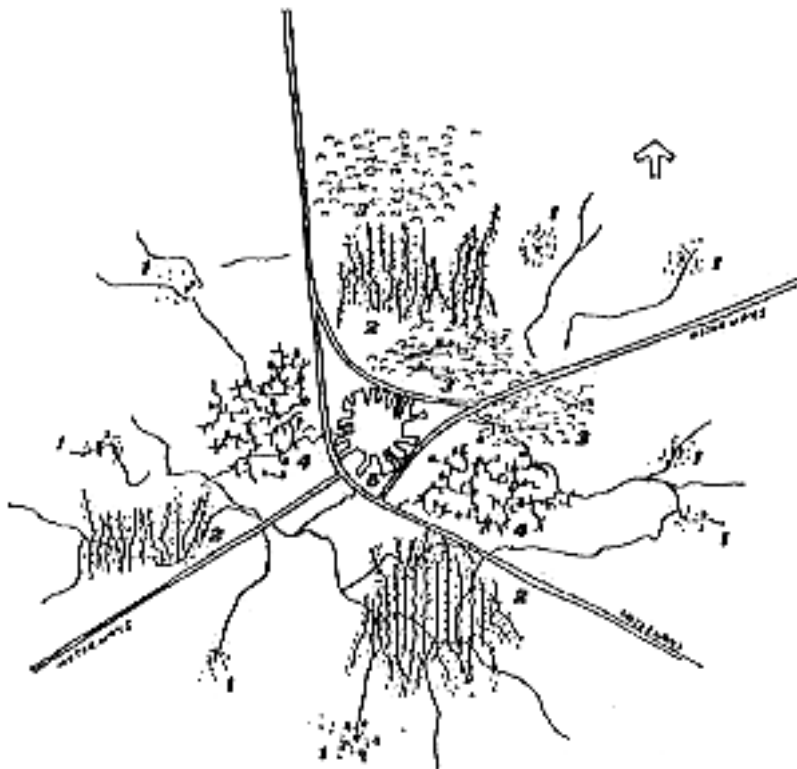


図-8.3 Smithson (1971) の都市論 (クラスターとしての都市)

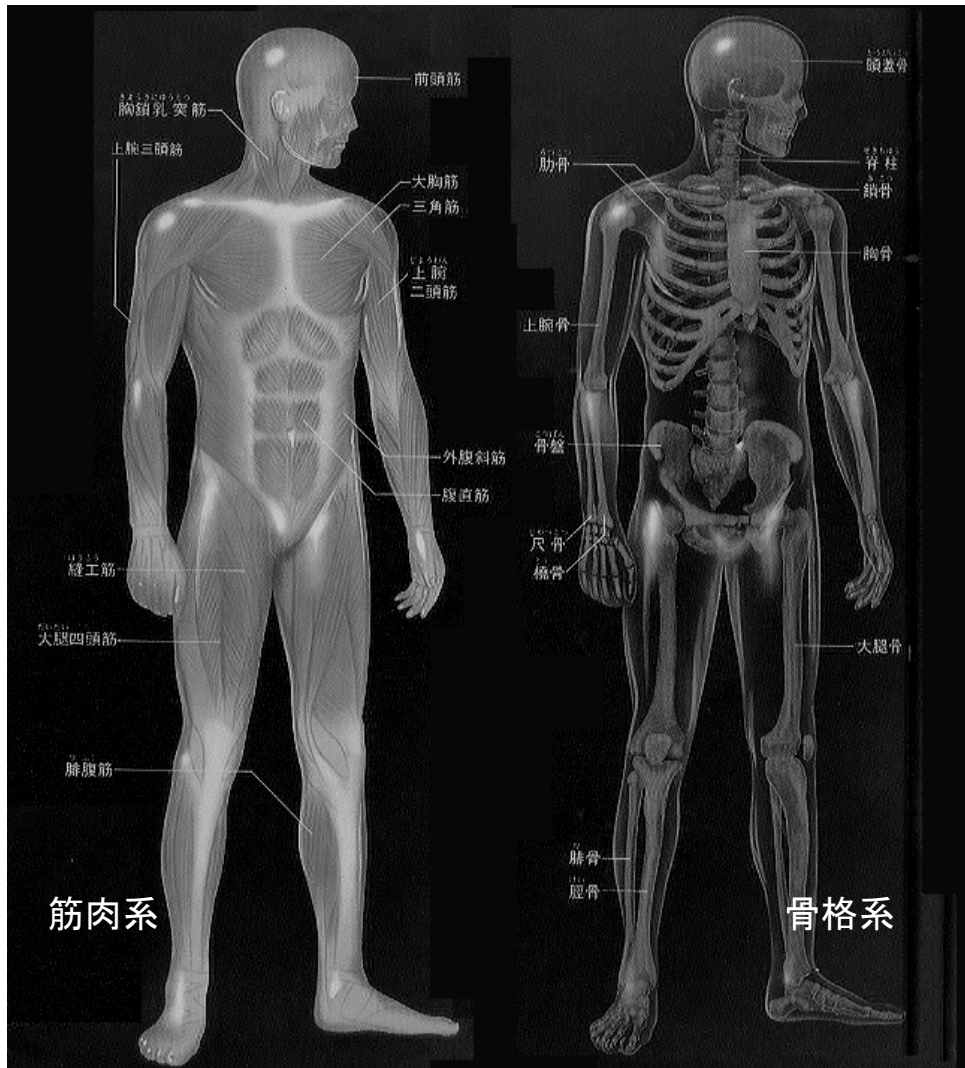


図-8.4 人体の器官系(1)(Newton, 1992)

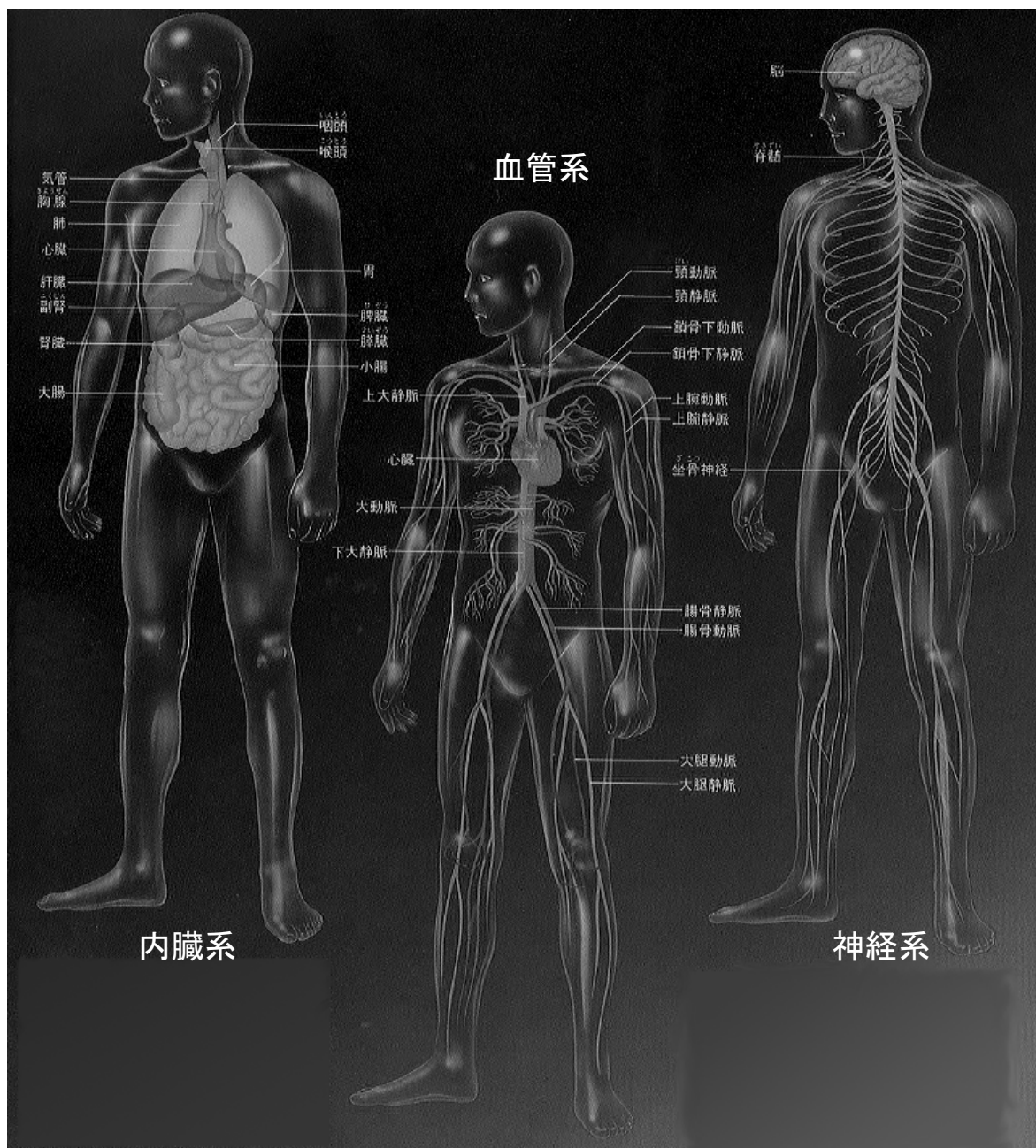


図-8.5 人体の器官系(2)(Newton, 1992)

8.4 都市防災環境デザイン手法 MUSE の提案

本節では、8.2 で説明した「都市のイメージ」の概念を参考にして、かつ 8.3 で述べたように都市を生態的に見たてて、21 世紀に向けた防災的・環境的な観点からの都市解析およびデザイン手法を提案したい。これは、都市を防災的・環境的観点から捉えなおすために、都市空間の物的環境を要素に分類し、それらを基本要素として防災都市計画原論を体系化し直すことを目的としている。

(1) 防災環境都市デザイン手法 MUSE の体系

ここで提案する防災環境都市デザイン手法を MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design) と名づけた。MUSE とは、ある都市をひとつの閉じた有機的な系に見立て、8 種の物的要素に分類し、都市の様相を可視化することにより、それぞれの要素あるいは要素間相互の関係性から都市を解析し、設計およびシミュレートするための手法である。この 8 種の要素は大きく 4 種に分類され、「形態要素」はさらに 5 つの要素に分類される。またひとつの地域を仮想的に閉ざすための準要素として「仮想壁」を想定している。

MUSE の要素

0 仮想壁 Imaginary Wall

主体 Subject (Physical Dynamic Element) : 人間, 自転車, 自動車, 鉄道等

形態要素 Shape (Physical Static Element)

- a. パス Path (Leading Path, Secondary Path) : 幹線道路, 街路, 小路, 裏道等
- b. エッジ Edge : 海岸, 鉄道線路の切通し, 開発地の縁, 壁等
- c. セル Cell : 街区, ブロック等
- d. ヴォイド Void : 公共空間のオープンスペース, 学校の校庭, 広場, 駐車場, 空地等
- e. コア Core : 役所, 病院, 消防署, 警察署, ライフラインの拠点施設等

ウェブ Web (Systematical Element) : ライフラインの配管, 共同溝, 電線等

自然 Nature (Natural Element) : 水辺, 河川, 緑地, 農地等

8.2 で述べたように Lynch (1968) は「都市のイメージ」をアイデンティティ identity (そのものであること), ストラクチャー structure (構造), ミーニング meaning (意味) の 3 つの次元に分類した。MUSE は、その使用に際して次の 3 つの段階に分類される。MUSE は都市を構成する物的要素を語彙 (Vocabulary) として取り扱うものであり、この 3 つの段階は言語における語彙, 文法, 話法に対応する (池上, 1984)。

要素の意味 Semantics in MUSE

MUSE では、都市を構成する物的要素を基本的な単位としている。これは言語における語彙に例えられ、道路の持つ機能, オープンスペースの持つ機能, 街区の特性などそれぞれの要素とそれらが持つ防災的・環境的意味を論じるものである。

要素の統辞 Syntactics in MUSE

MUSEにおける各要素は、その性質に応じて防災的・環境的に様々な意味を持つ。また道路とライフラインとの関係、道路とオープンスペースとの関係、オープンスペースと消防署との関係など、各要素相互の関係性により、より高度な都市解析を行うことが可能となる。統辞論とはこのように言語における語彙と語彙とを結びつける文法のように、都市における各要素の関係性を論じるものである。

MUSEの実用 Pragmatics in MUSE

MUSEの実用とは、の意味論と統辞論を用いてMUSEを社会的に適用する方法について論じるものである。都市を解析していくつかのタイプに分類する、被害想定などのシミュレーションと危険性を可視化することによる市民への情報発信、これらを踏まえてより良い都市づくりをするためのデザイン手法などが挙げられよう。

(2) MUSEの要素

ここでは前述した各要素について説明する(図-8.6)。

MUSE-Element: 0 仮想壁 Imaginary Wall

ある地域を分析する時に、それらを閉じた系として考える必要がある。通常は行政区域で閉じるのが都合が良からう。また状況に応じて規模を変えることも可能である。日本全国を対象としたマクロゾーネーションを検討する時には東海地方、近畿地方など大きく分ける必要があるであろうし、都道府県単位になることも在り得る。市、区、町村、町丁目、学校区など状況に応じて規模を変えていけば良い。その時にその地域を閉ざす役割をするのが仮想壁である。

仮想壁は地域の境界上に想定された鉛直面である。この仮想壁によって地域はその内部と外部に区分される。地域を取り巻く仮想壁のある部分を限定することにより断面積あたりまたは距離あたりの交通路数、交通量、物資の流通量、人口移動量等を計測することが可能になる。観察者は仮想壁を肉眼で見ることができないが、モニターや装着型映像装置(ソニーのグラストロンなど)上に視覚化することにより、ある地域の各種情報を感覚的に把握できるようになる。

MUSE-Element: 主体 Subject (Physical Dynamic Element)

都市を舞台と考えれば、一人一人の人間は、そこで演じる役者であり観客でもある。都市という人工的な環境は見る・見られるという両方の立場を共有している一人一人の人間のために造られてきた。都市とは物的環境と人間活動を積分したものであり、政治・経済・防災・娯楽等都市活動のほとんどは、一部の地球環境中心的な考えを除いて、人間を中心としたものであろう。そこでMUSEにおける主要な第一要素として都市の主役である主体を定義する。主体とは人間であり、その人間の移動手段である自転車、自動車、鉄道等を指す。それらは多くの場合移動可能な点として扱われる。多くの場合この主体の移動によりエネルギー、物資、情報等が伝達されるため、この主体という概念は都市における血液のようなものでもある。

MUSE-Element: 形態要素 Shape (Physical Static Element)

MUSE は、主に都市空間を取り扱う手法である。そのため経済、政治、哲学など形而上学的なものではなく空間的な要素（位置、長さ、高さ、幅、面積、体積、形等の属性を持ち、触れることができる物的なもの）を対象としている。この形態要素とは都市の地上に存在し、空間上で移動したり操作したりすることができる要素である。ただし主体とは異なり、自らの意思では動くことの出来ない静的な要素である。

-a. パス Path (Leading Path, Secondary Path)

パスとは、街路、散歩道、運送路、運河、鉄道など人々の通行路である。形態的には線状であり、ネットワーク化された要素である。地上においてパスは、主体の公共的な通行路であり、それに沿って並木道のように自然要素を組み込むことも可能である。また通常その地下にはウェブが組み込まれ、ライフラインのネットワークとも密接にからんでくる。防災的には道路下に共同溝を設け、ウェブを組み込むのが有効とされている。以上のことからパスを生態的に例えれば、ものの通路である血管系であり、それらを保護すべき骨格系であり、情報経路である神経系でもあり、重要な要素である。

パスは、その規模、役割に応じてさらにリーディングパスとセカンダリーパスに分類される。リーディングパスとは主に幹線道路を指し、地域間を結び、ライフラインの主要経路ともなる。また災害時には延焼遮断帯となることもあり、被災者を避難場所へと迅速に正確に導く役割もするため、計画する時にはわかりやすさなどを考慮する必要もある。一方、セカンダリーパスとは小路、裏道など比較的規模の小さい道路であり、個々の家庭の日常生活の中で密着した存在である。このセカンダリーパスは都市における毛細血管のようなもので、幹線道路から分岐して各家庭に様々なものを供給する役割をする。

-b. エッジ Edge

エッジとは、観察者がパスとしては用いない、あるいはパスとはみなさない、線状あるいは面状の要素をいう。つまり海岸、鉄道線路の切通し、開発地の縁、壁など、2つの局面の間にある境界であり、連続状態を中断する線状のもののことである。これは点を示す座標軸というよりは、人々が領域を知るために横側から参照するものである。これは多少の通り抜けのある障壁かも知れないし、2つの地域を相互に関連させる継ぎ目かも知れない。この要素は、防災的には延焼遮断の役割が大きいであろう。ある都市機能を持つエッジとしての壁状の要素を、木造密集地域等に挿入することにより、延焼危険性を低減させることも可能である。また港湾など平常時には歩行者にとってエッジとされる場所も、災害時には水路のパスになることもある。

-c. セル Cell

セルとは街区（ブロック）である。ほとんどの都市は区画整理され街区と街区の間を道路が通っている。そのような街区は都市においてセル（細胞）のようなもので、MUSE においては面的な最小単位と位置付けた。街区の中は建物が立ち並んでおり、それらの建物は構造・建築年代等の属性を持っている。それら建物の倒壊危険性と街区の地盤条件によって街区ごとの建物倒壊危険度や地震が発生した時の被害棟数を想定することが可能である。街区の中には建物に占有された部分と駐車場のように空地となっている部分があるが、それらの空地は私有地である場合が多

く、災害時においても中に入れないものと仮定し、基本的にはヴォイドとは区別したマスとして考えることとする。すなわちセルは一般の人が中に入ることが出来ないマス（Mass）として考えることとする。

セルは、面積、建物棟数、建物倒壊危険度、空地率、想定死亡者数等の属性を持っている。

-d. ヴォイド Void

ヴォイドとは、都市の中の公共的なオープンスペース、広場、駐車場、学校の校庭、空地等を指す。パスを幅を持たないネットワークとして考えれば、建物に占められたセルを反転したものと考えられるかも知れない。しかし基本的には、ヴォイドとパスは独立したものとして考え、ヴォイドは閉じた面として考えることとする。ヴォイドは主体にとって、都市の中で憩う場、公共的な活動をするために集まる場、災害時には避難をする場など公共空間として様々な機能を持つ重要な場である。災害時には、パスと共に都市の流通にとって重要な役割を担い、パスとのネットワークの良し悪しによって、災害時におけるヴォイドの機能は大きく左右される。

-e. コア Core

コアとは、役所、病院、消防署、警察署、ライフラインの拠点施設等、都市生活において核となる重要な機能を持つ各施設を指す。それらは点として扱われ、位置情報を持つ。災害時には、各施設の持つ、収容人員数、出勤可能数などのパラメータが有効となるであろう。

MUSE-Element: ウェブ Web (Systematical Element)

地上における物的要素である5種類の形態要素に対し、ネットワークシステムが重要な意味を持ち、必ずしも地上に設置されてはいないライフラインなどの要素をウェブと定義した。ウェブは、ライフライン（上下水道、ガス、電気、情報通信等）の配管、共同溝、電線等を指すが、衛星通信等の不可視な要素も含まれる。

MUSE-Element: 自然 Nature (Natural Element)

都市の中には、水辺、河川、緑地、農地等、様々な自然の要素が存在する。それらは、災害時における生活用水、消火用水、延焼遮断帯等として防災面で重要であるだけでなく、都市におけるヒートアイランドの防止などの環境面や、快適な公共空間をつくるなど日常生活においても重要な要素である。これらの自然要因は都市のアイデンティティを形成していることが多く、それらをうまく生かすことが、都市を計画する上では必要不可欠である。

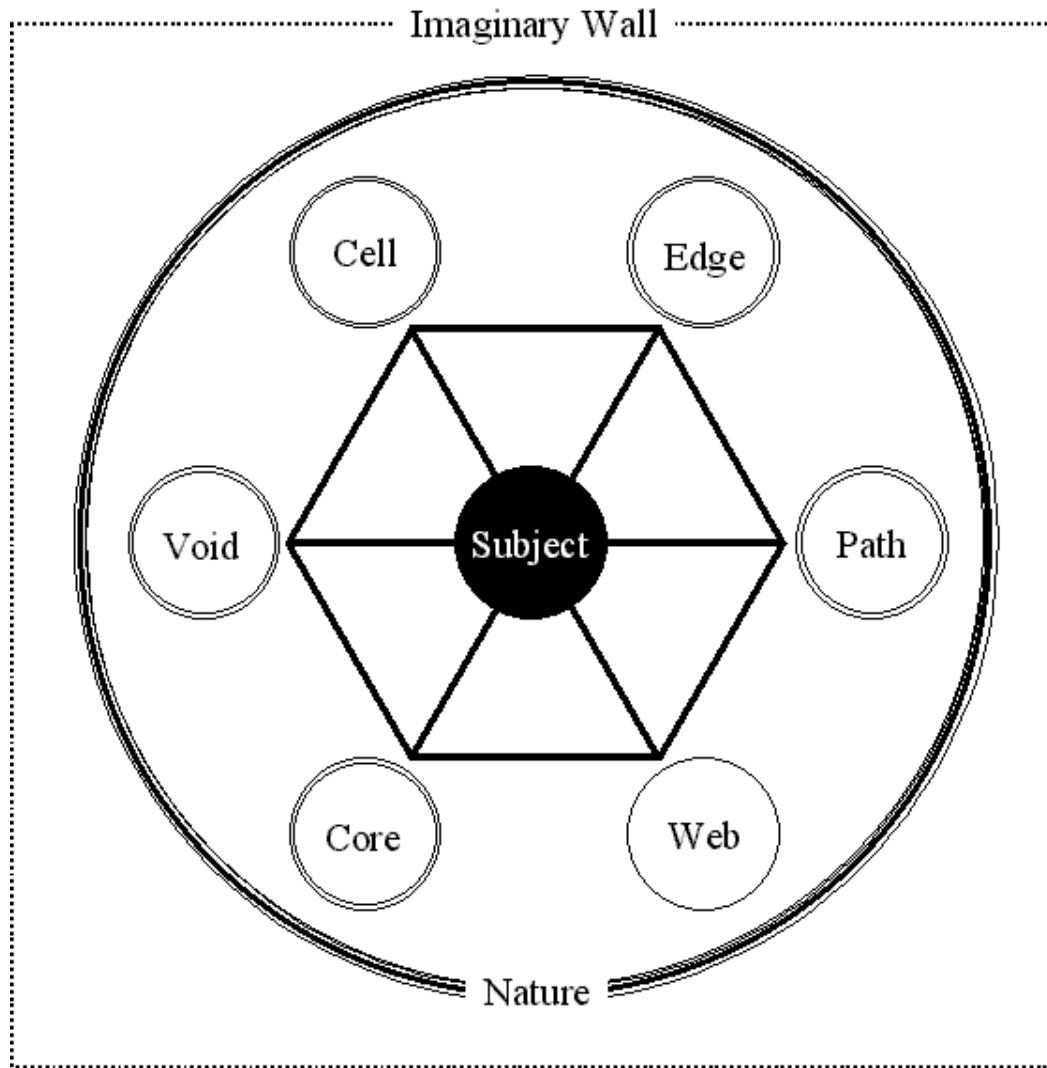


図-8.6 MUSEの要素の概念図

8.5 都市防災環境デザイン手法 MUSE のイメージ

前節で各要素についての説明をした。これらは MUSE の出発点であり，防災的，環境的に都市を考えた場合，各要素がそれぞれどのような意味・機能・可能性を持つのかさらなる研究が必要であろう。またそれらの関係について考えた場合，さらに深く検討する必要がある。ここでは，MUSE という考え方を提案するに留め，詳細な研究は今後の課題としたい。

その上で，本論文の成果を含めた，防災的な観点から見た MUSE のイメージと利用法具体例を提示する。

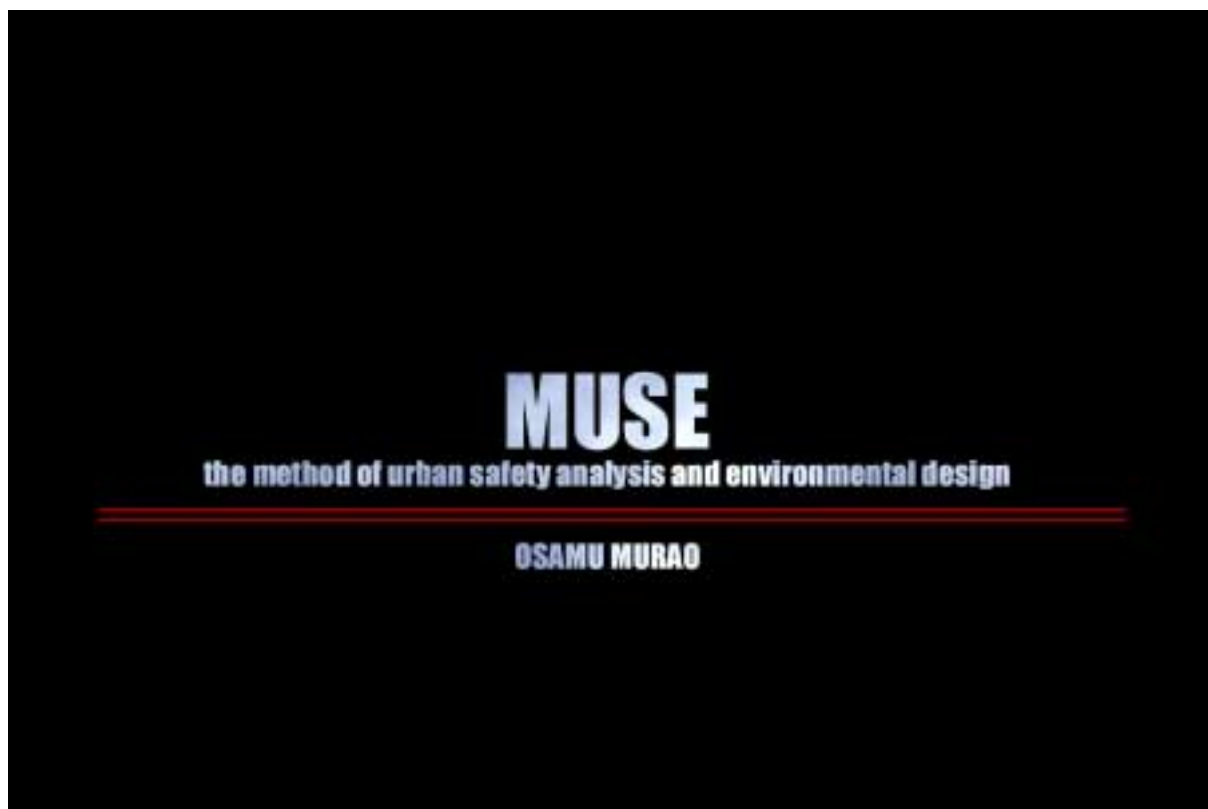


図-8.7 MUSE タイトル

(1) MUSE のトータルイメージ

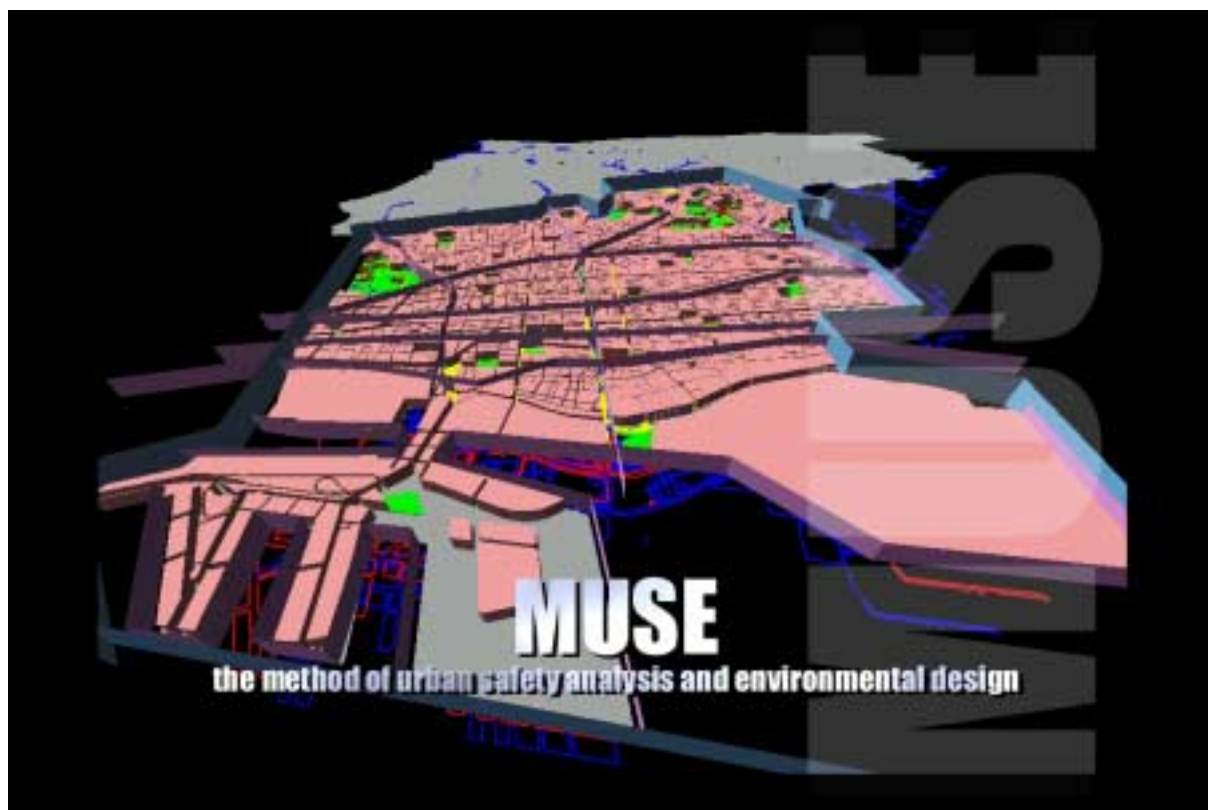


図-8.8 MUSE の全体イメージ

MUSEの要素

- 0 仮想壁 Imaginary Wall
- I 主体 Subject (Physical Dynamic Element) : 人間、自転車、自動車、鉄道等
- II 形態要素 Shape (Physical Static Element)
 - a. パス Path (Leading Path, Secondary Path) : 幹線道路、街路、小路、裏道等
 - b. エッジ Edge : 海岸、鉄道線路の切通し、開発地の縁、壁等
 - c. セル Cell : 街区、ブロック等
 - d. ヴォイド Void : 公共空間のオープンスペース、学校の校庭、広場、駐車場、空地等
 - e. コア Core : 役所、病院、消防署、警察署、ライフラインの拠点施設等
- III ウェブ Web (Systematical Element) : ライフラインの配管、共同溝、電線等
- IV 自然 Nature (Natural Element) : 水辺、河川、緑地、農地等

図-8.9 MUSE の概要

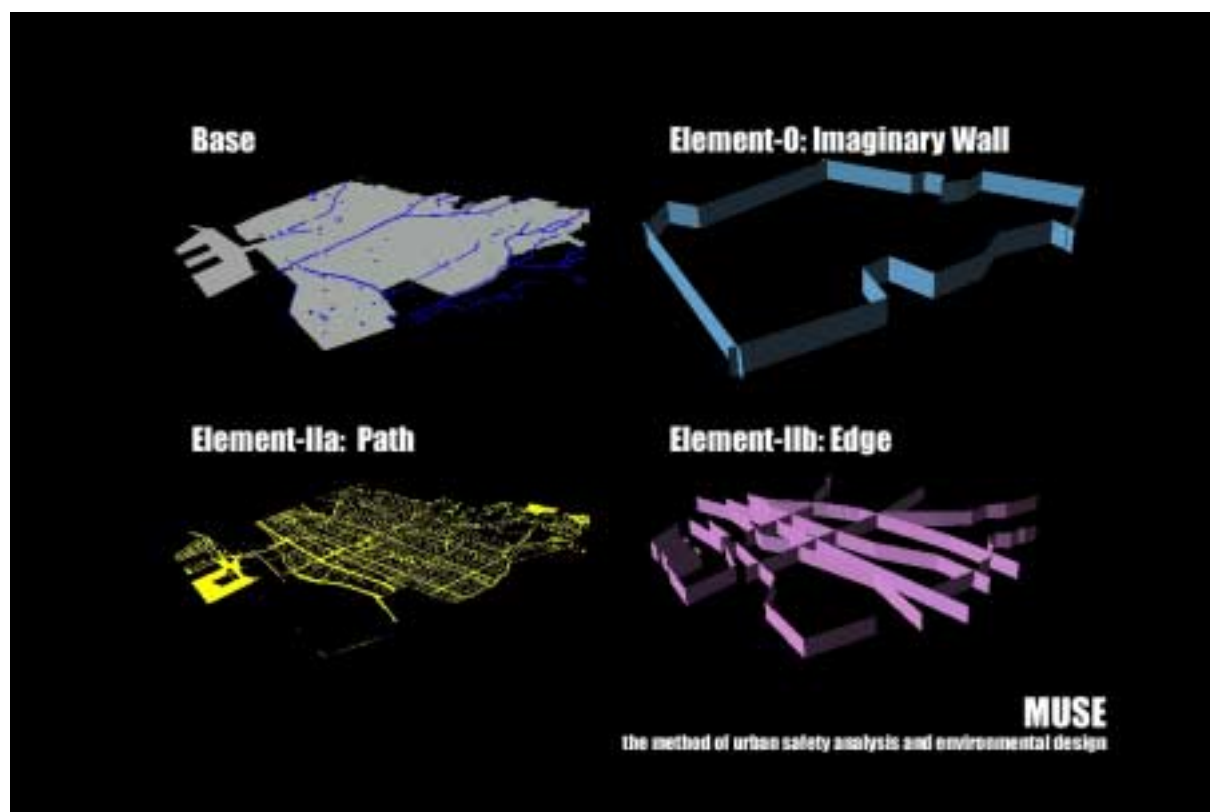


図-8.10 MUSE の各要素 (1)

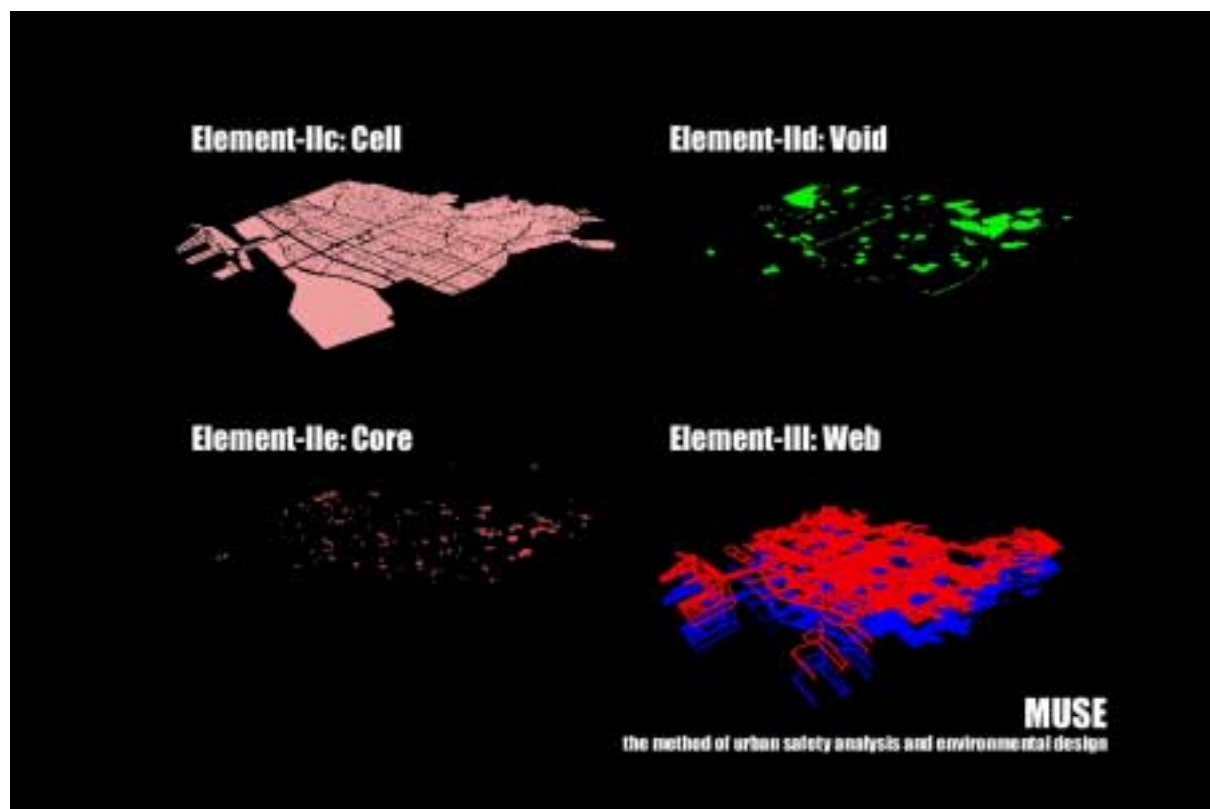


図-8.11 MUSE の各要素 (2)

(2) Imaginary Wall

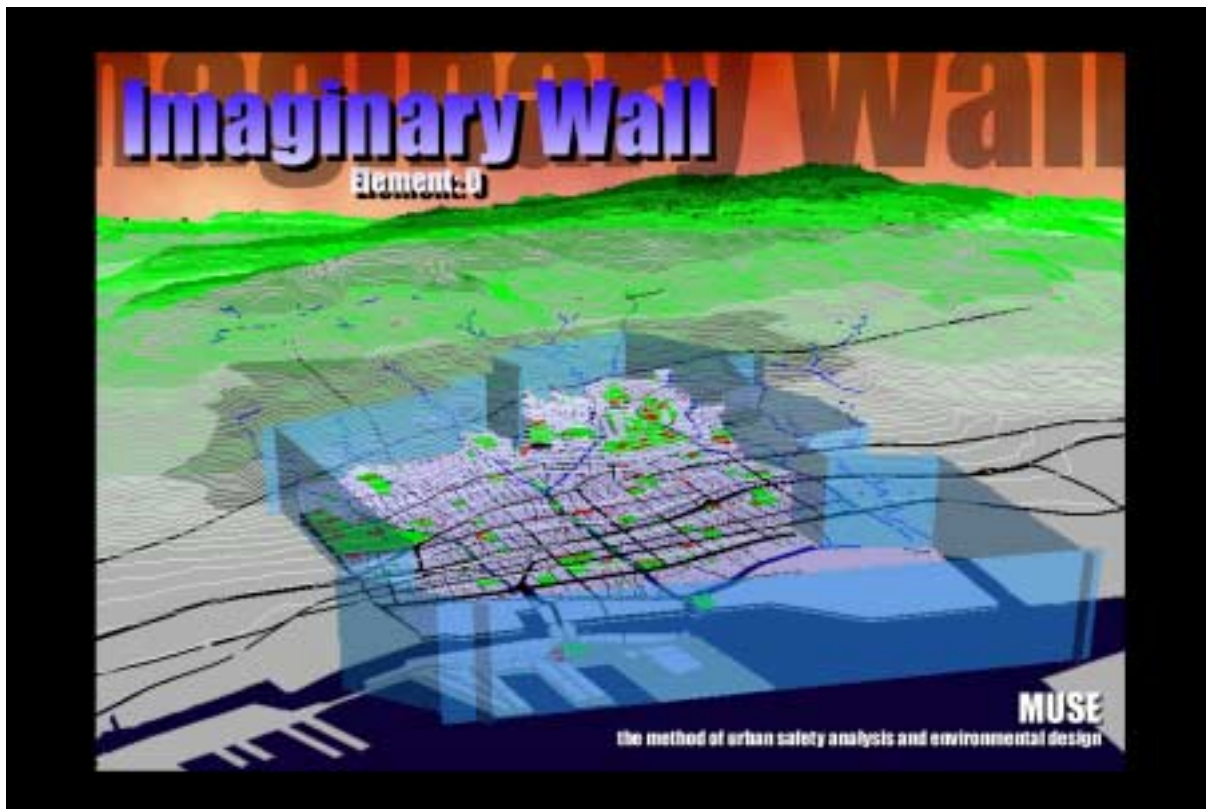


図-8.12 Imaginary Wall (1): 灘区を囲う仮想壁

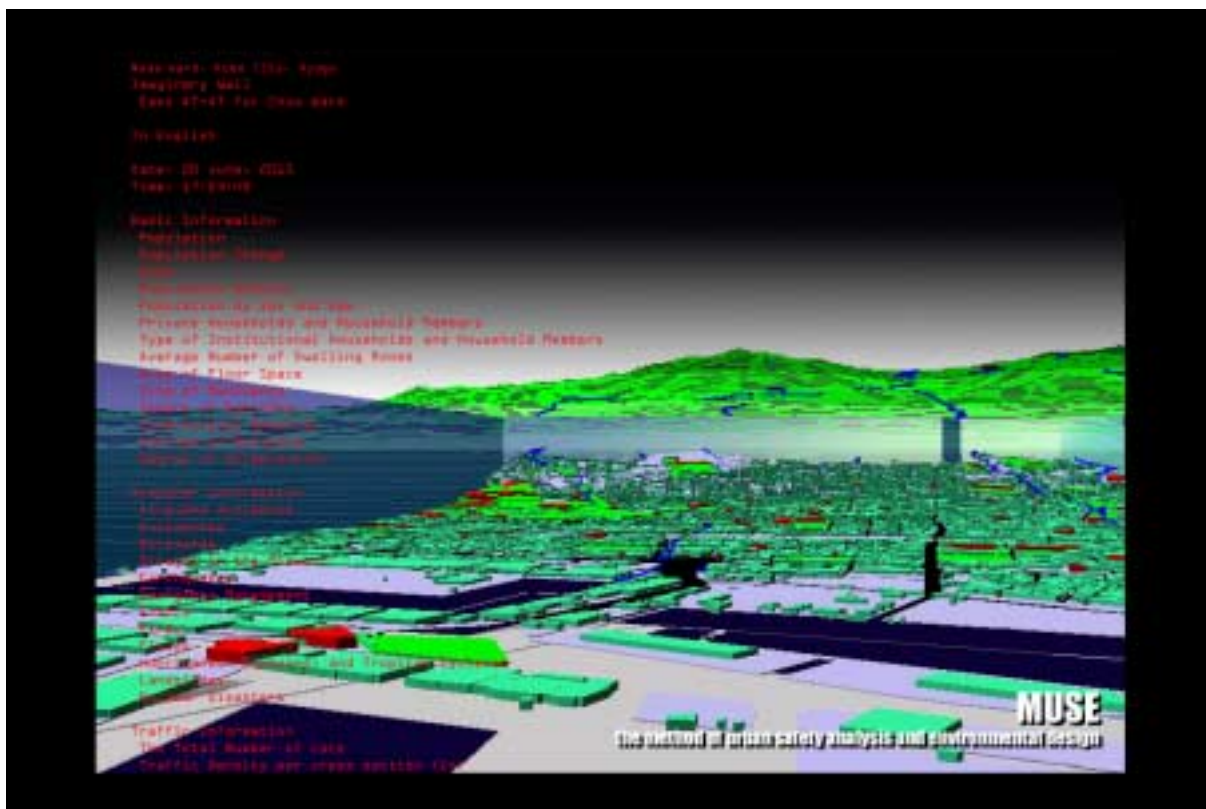


図-8.13 Imaginary Wall (2): 仮想壁と都市のデータ

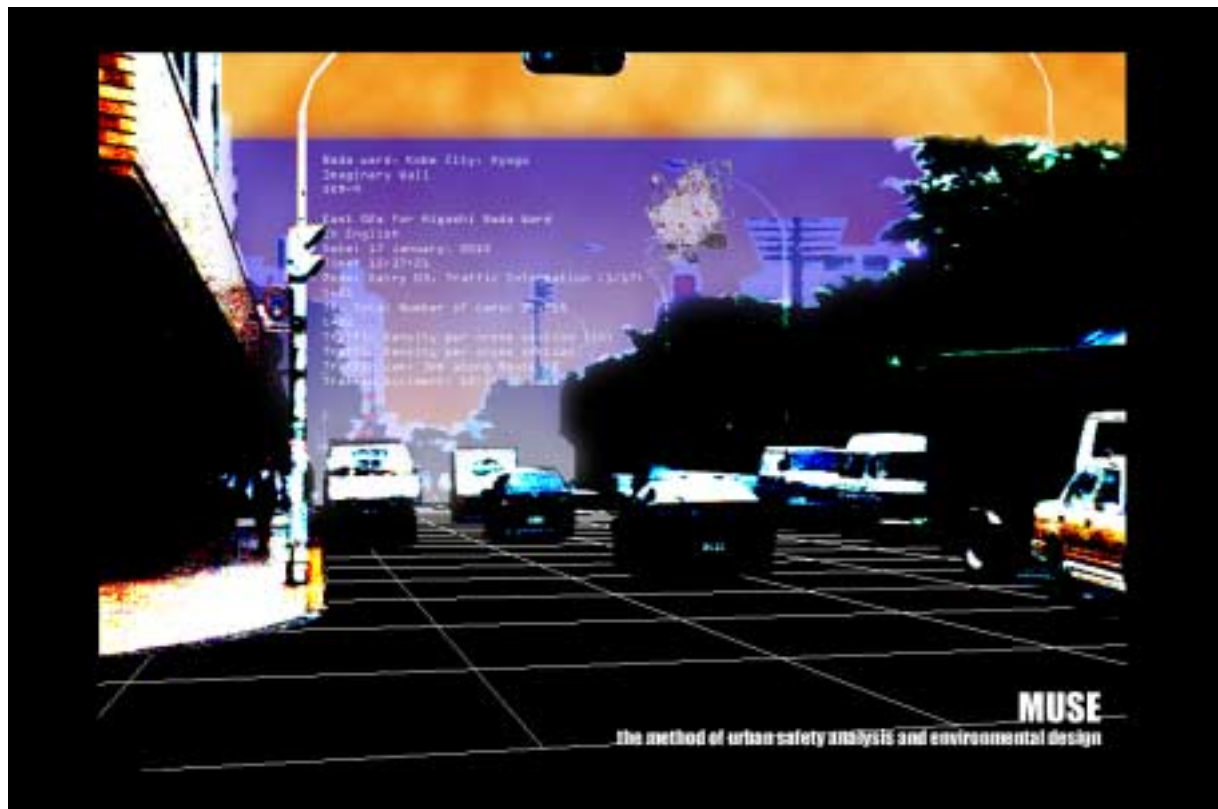


図-8.14 Imaginary Wall (3): 仮想壁に投影される平常時交通情報



図-8.15 Imaginary Wall (4): 仮想壁の概要

(3) Path



図-8.16 Path (1): 網の目のような都市のパス



図-8.17 Path (2): 主要なリーディングパスとそれを木目の細かいセカンダリーパス



図-8.18 Path (3): バスと交通情報



図-8.19 Path (4): バスの概要

(4) Edge



図-8.20 Edge (1): 港湾におけるエッジのイメージ

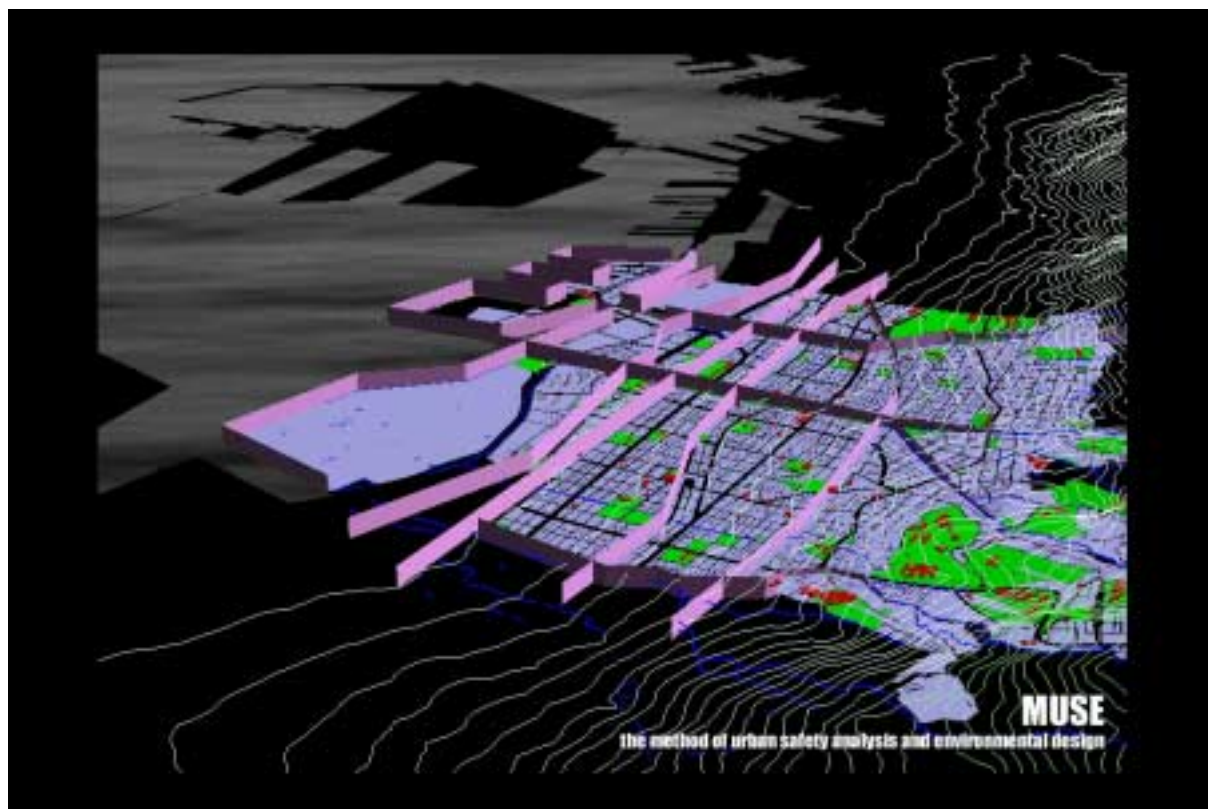


図-8.21 Edge (2): 主要エッジの全体像

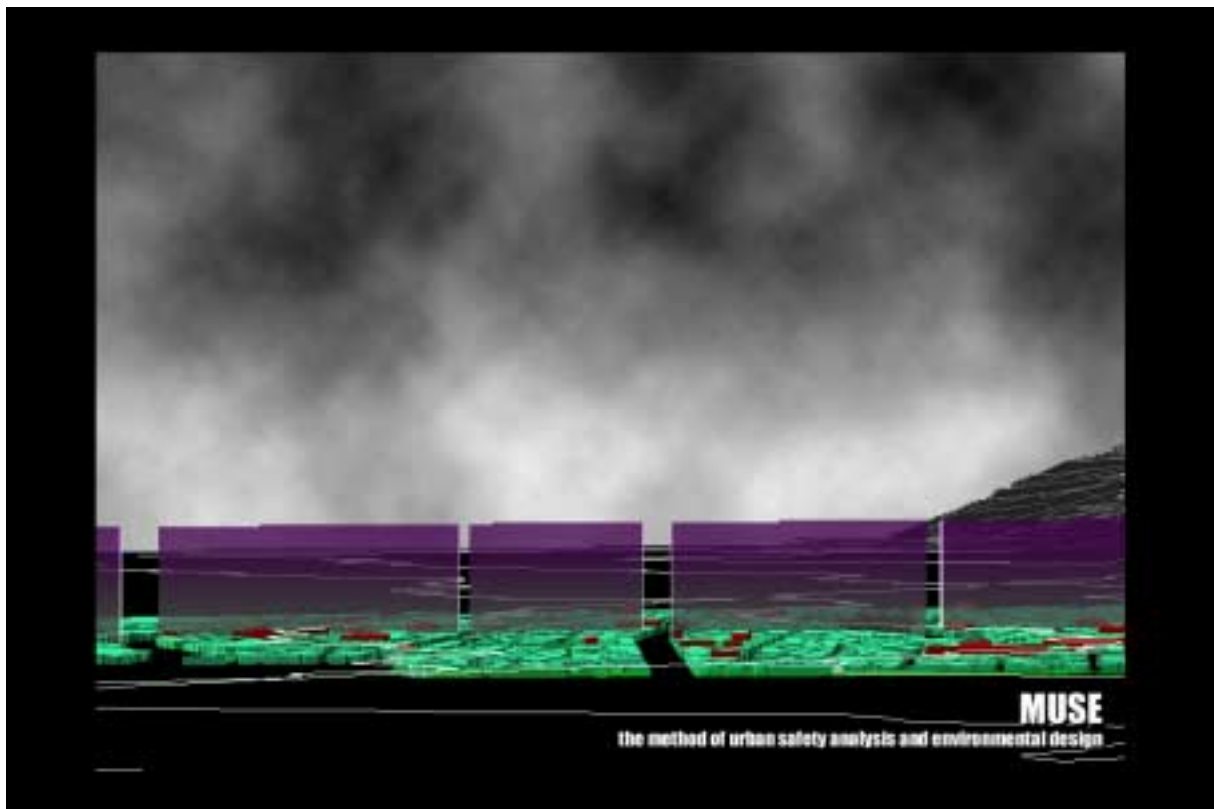


図-8.22 Edge (3): ある方向から見たエッジとパスによるスリット



図-8.23 Edge (4): エッジの概要

(5) Cell

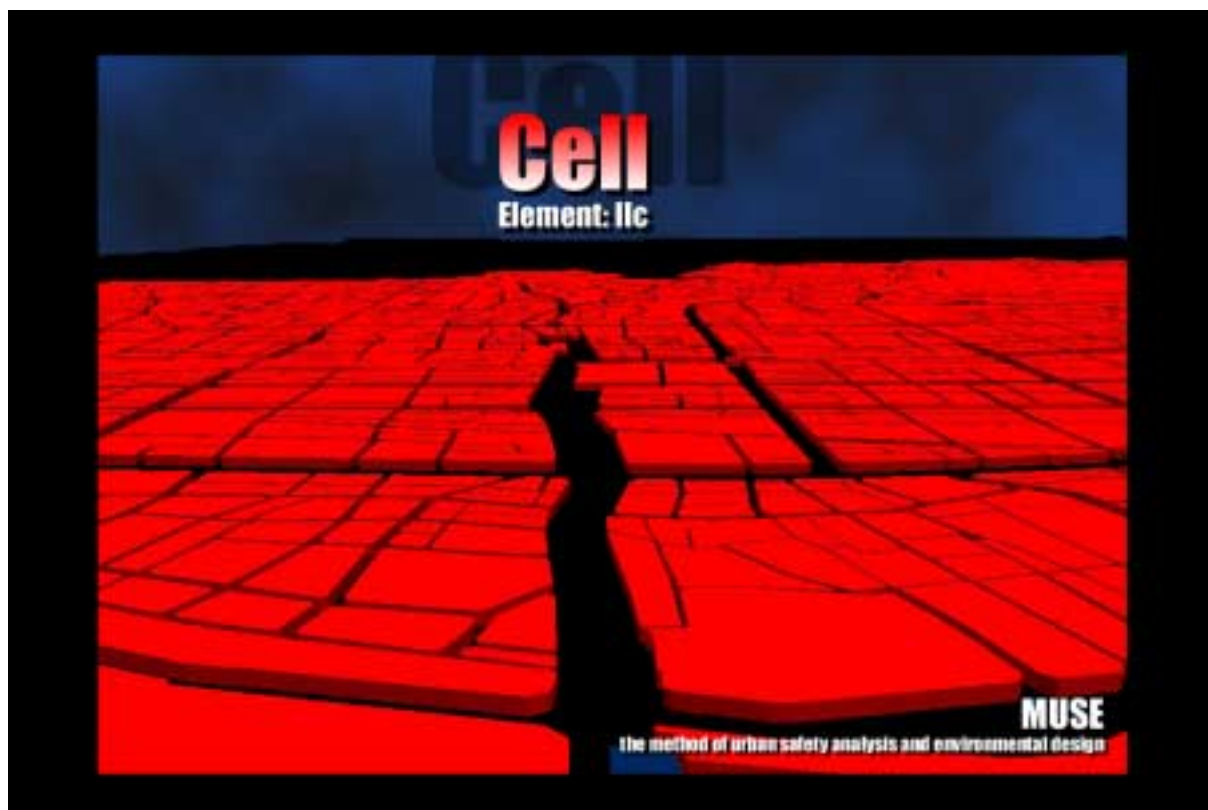


図-8.24 Cell (1): 都市における細胞のようなセル

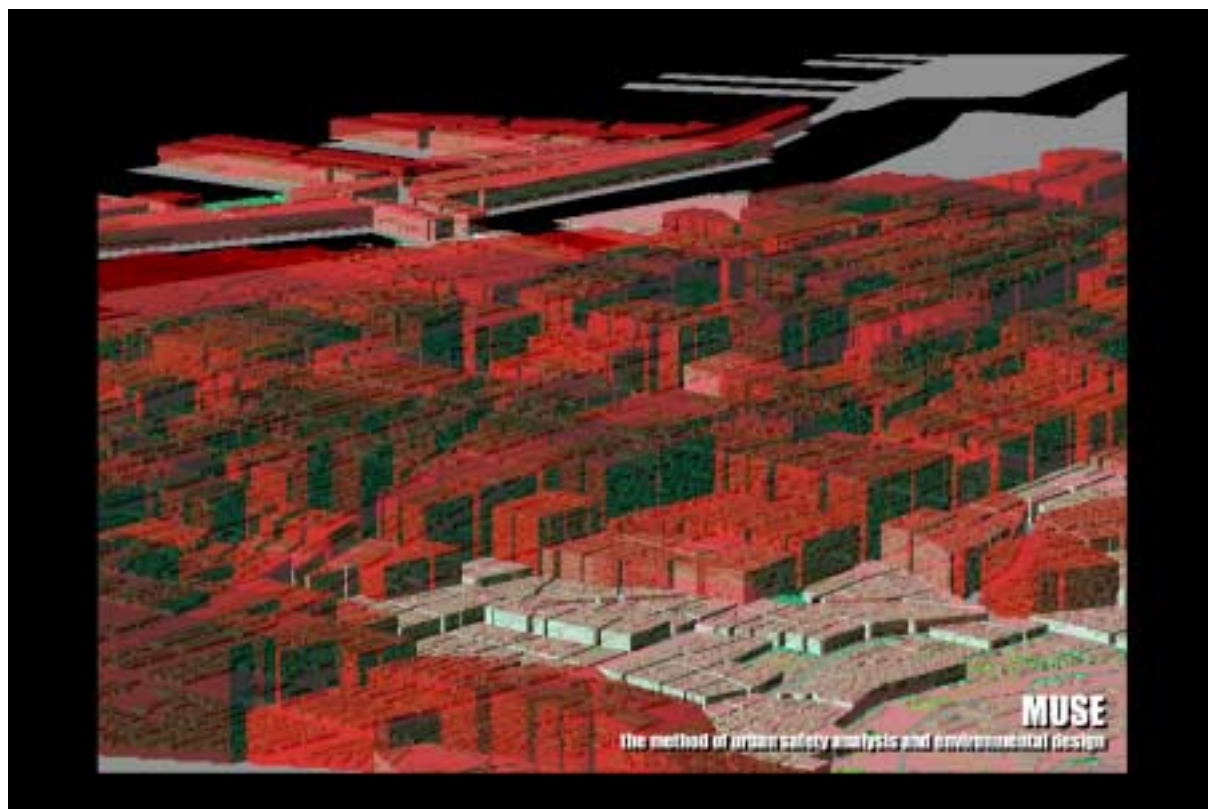


図-8.25 Cell (2): 色彩と高さで表現された地震発生時のセルごとの地震動分布

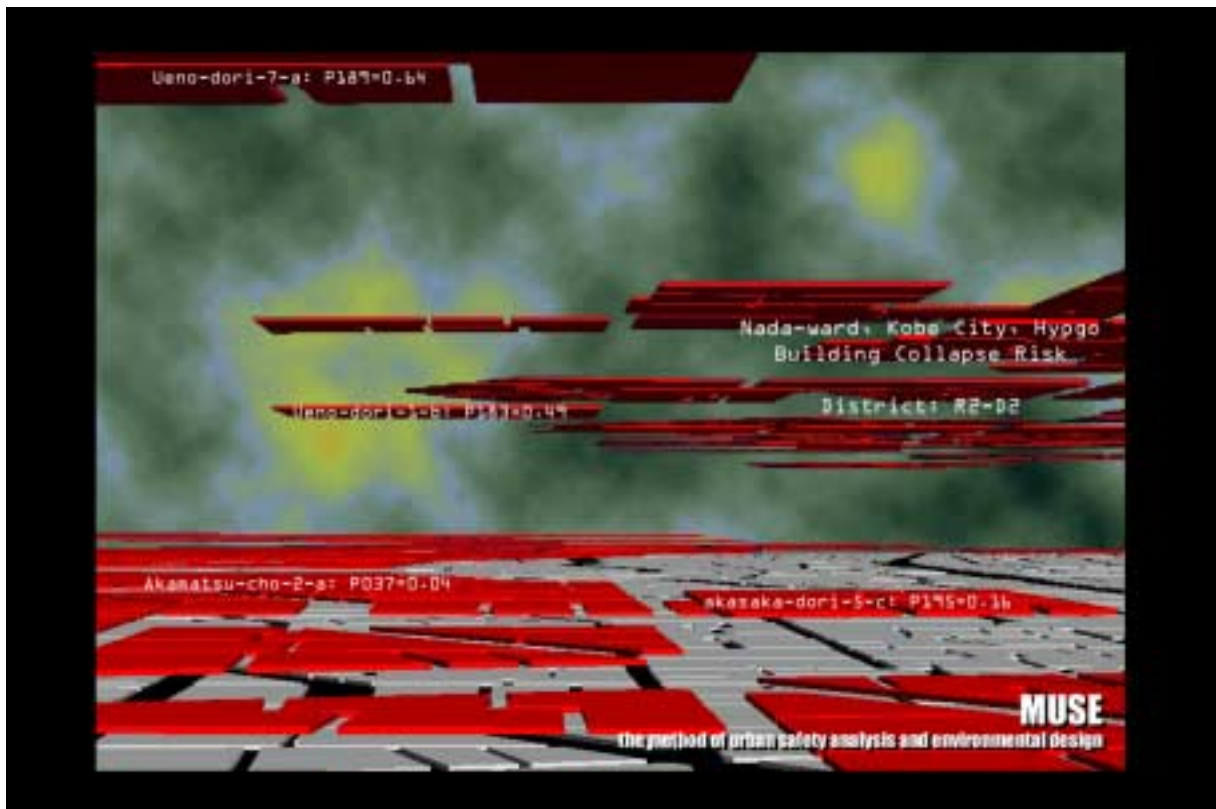


図-8.26 Cell (3): 3次元で表現されたセルごとの建物倒壊危険度



図-8.27 Cell (4): セルの概要

(6) Void



図-8.28 Void (1): ヴォイドの全体イメージ

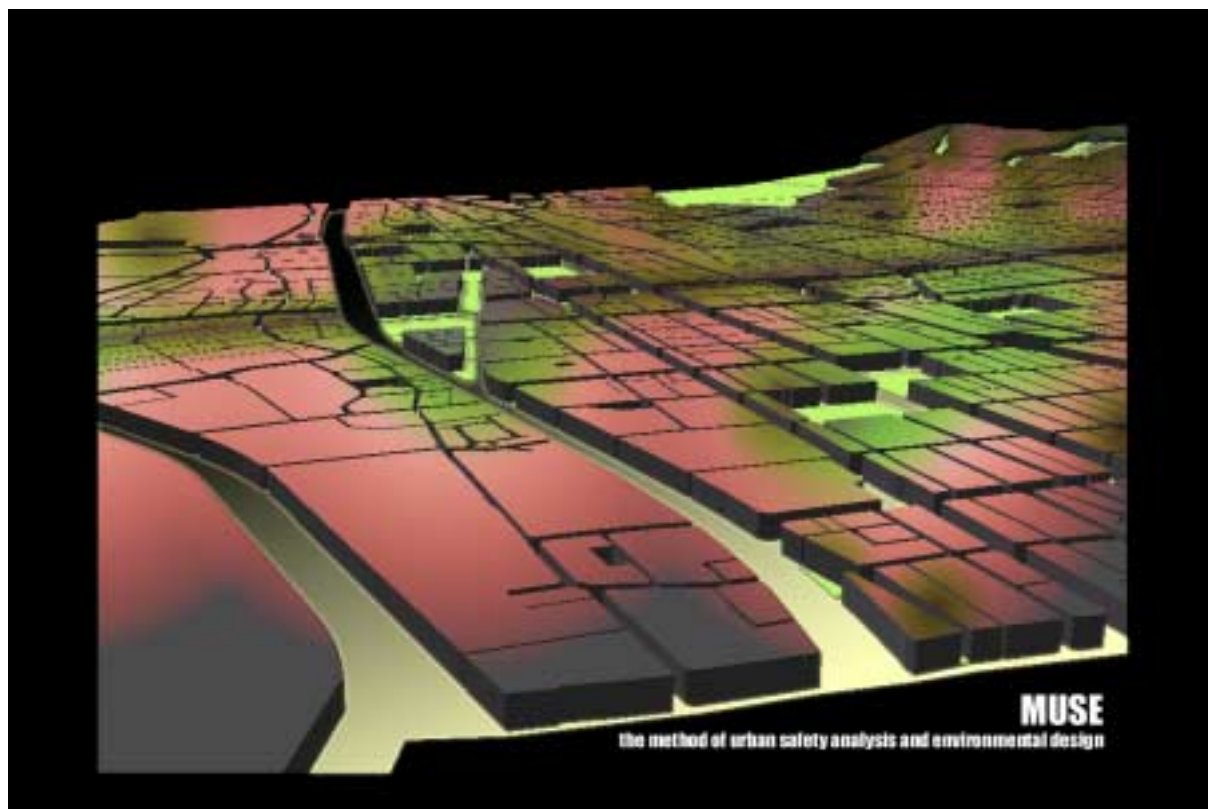


図-8.29 Void (2): ヴォイドによる延焼安全度のイメージ



図-8.30 Void (3): 装着型映像装置から見えるヴォイドのイメージ



図-8.31 Void (4): ヴォイドの概要

(7) Core



図-8.32 Core (1): ネットワーク化されたコア

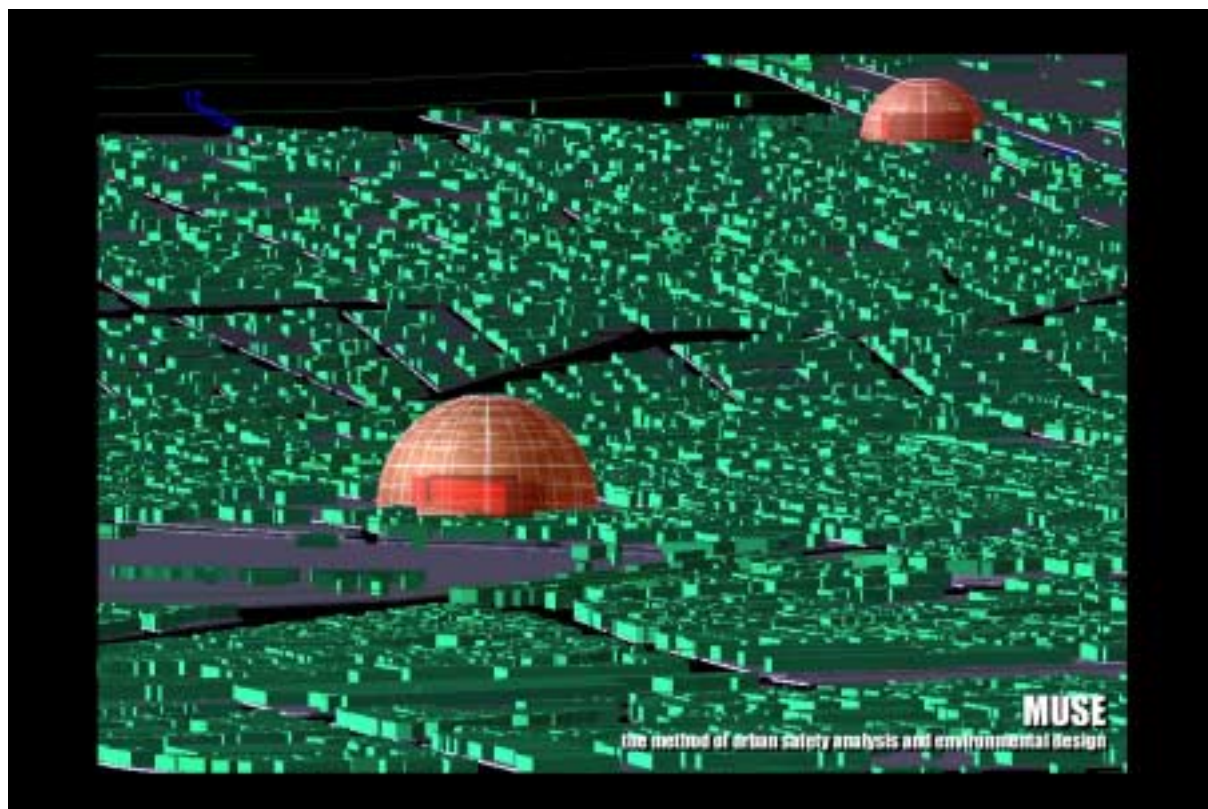


図-8.33 Core (2): 都市におけるコア



図-8.34 Core (3): 装着型映像装置に映し出されるコアのデータ



図-8.35 Core (4): コアの概要

(8) Web

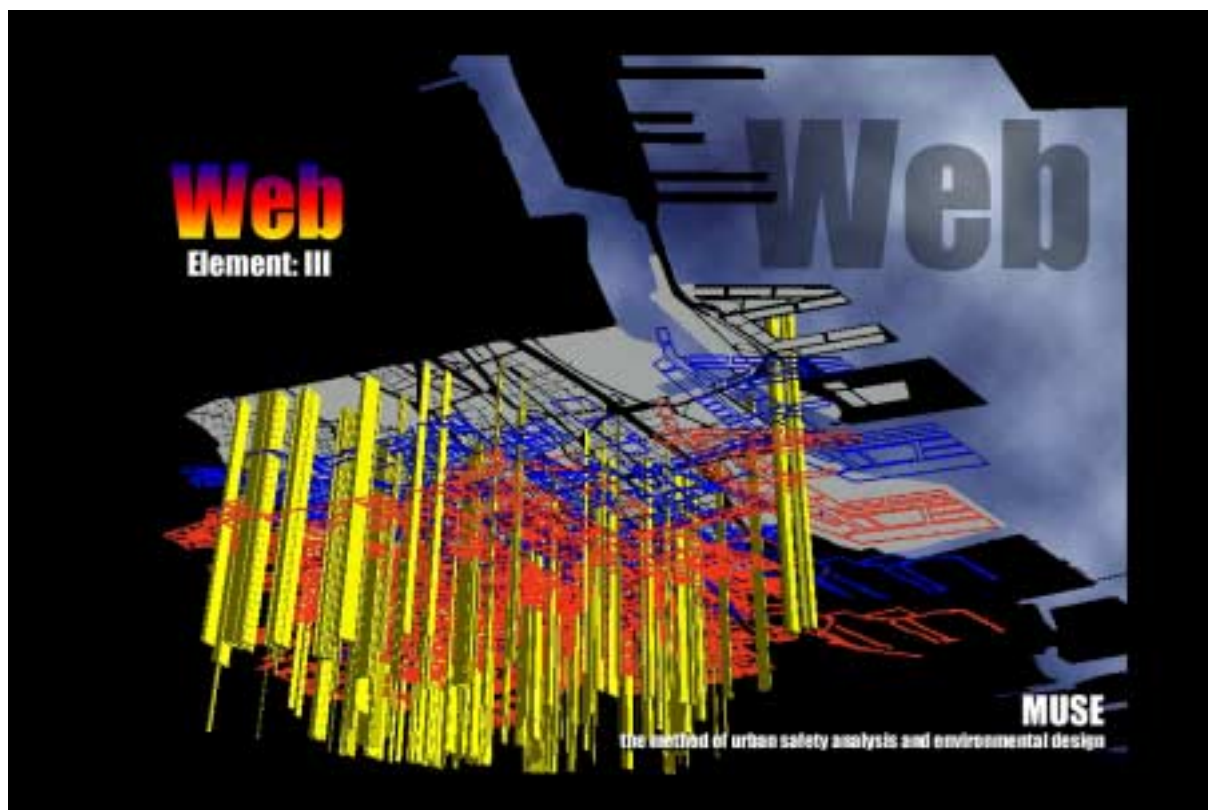


図-8.36 Web (1) : 地中から見たウェブの全体イメージ

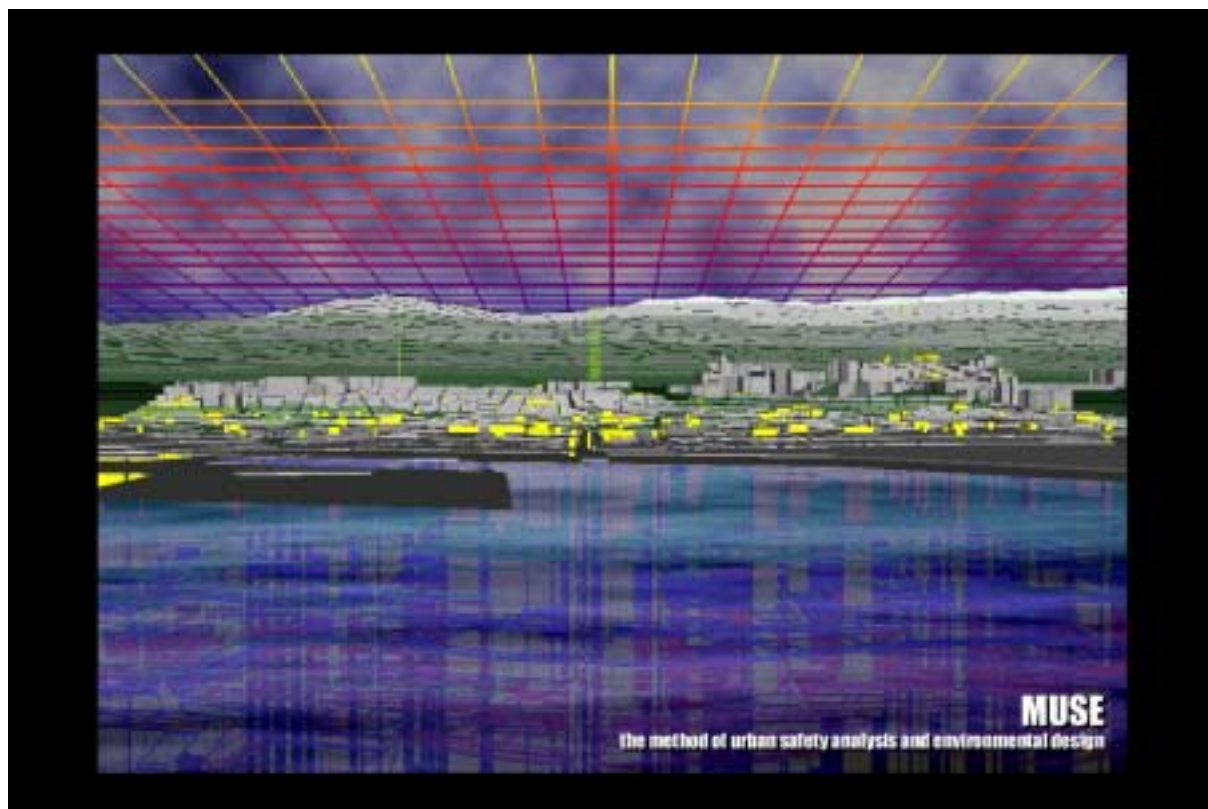


図-8.37 Web (2) : システム化されたウェブ

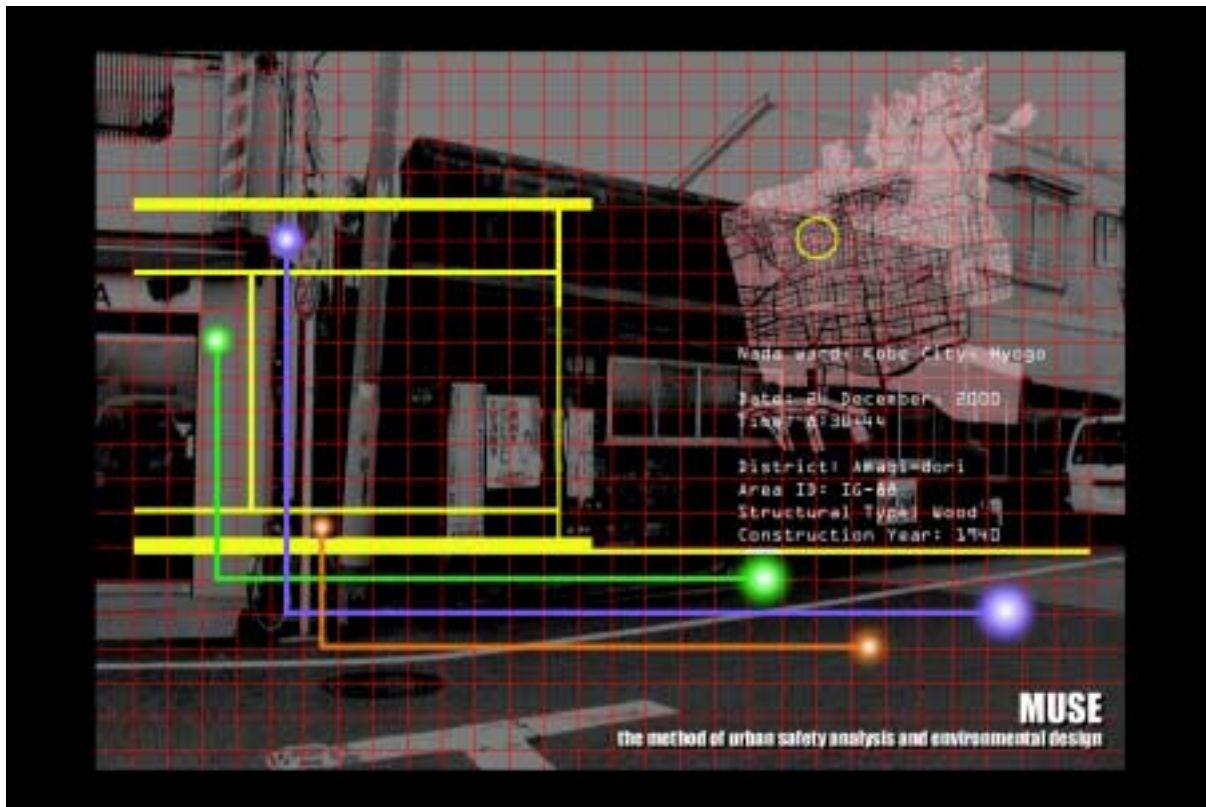


図-8.38 Web (3): モニターに映し出されるウェブのデータ



図-8.39 Web (4): ウェブの概要

表-8.1 MUSE 利用法の具体例

ID	要素		解析に必要と思われる 主なパラメータ、キー ワード	研究者 設計者	自治体	住民
0	仮想壁	Imaginary Wall	・通行可能道路幅 ・道路数 ・仮想壁長さ ・地域面積 ・各種移動量など	・閉鎖系空間を作る ・他地域との関係を明確化	・避難地区への誘導	・カーナビゲーションシステムとの連動 ・交通情報受信 ・被災情報把握
I	主体	Subject (Physical Dynamic Element) 人間, 自転車, 自動車, 鉄道 等	・人口, 人口密度 ・交通量 ・速度など	・避難誘導シミュレーション	・被災者行動の把握 ・交通状態の把握 ・各種情報送信	・被災時必要情報の把握 ・避難場所への被誘導 ・交通情報の把握
II	形態要素	Shape (Physical Static Element)		・都市空間設計	・各種シミュレーション ・各種情報送信 ・公共空間の提供	・各種情報受信 ・公共空間の享受
	a. パス	Path (Leading Path, Secondary Path) 幹線道路, 街路, 小路, 裏道 等	・道路幅 ・ネットワーク ・交通量など	・交通シミュレーション ・路地裏等の有効活用 ・道路閉塞推定	・交通情報の把握 ・道路被害把握 ・閉塞状況の把握 ・交通情報の伝達	・各種交通情報の受信
	b. エッジ	Edge 海岸, 鉄道線路の切通し, 開 発地の縁, 壁等	・エッジ幅 ・エッジ高さ ・延焼遮断性能 ・代替交通可能性など	・延焼遮断シミュレーション ・マイナス要素のプラス要素 への変換	・延焼遮断シミュレーション ・港湾等の災害時利用計画 への把握	・延焼遮断情報の受信
	c. セル	Cell 街区, ブロック等	・建物被害率 ・建物存在比率 ・建物倒壊危険量 ・空地率など	・建物被害推定 ・建物倒壊危険度推定 ・避難場所シミュレーション	・建物被害推定 ・建物倒壊危険度推定 ・避難場所シミュレーション ・危険度の把握と広報	・建物倒壊危険度等の把握 ・リアルタイム被害率の受信
	d. ヴォイド	Void 公共空間のオープンスペ ース, 学校の校庭, 広場, 駐車 場, 空地等	・空地率 ・面積 ・延焼遮断性能 ・用途など	・延焼遮断シミュレーション ・公共空間の設計 ・避難シミュレーション	・延焼遮断シミュレーション ・公共空間の設計 ・避難シミュレーション ・避難情報の把握と広報	・快適な公共空間の享受 ・避難所位置の把握 ・被災情報の受信
	e. コア	Core 役所, 病院, 消防署, 警察 署, ライフラインの拠点施設 等	・用途 ・施設棟数 ・施設配置 ・建物性能など	・建物設計 ・空間配置シミュレーション ・被災シミュレーション	・建物設計 ・空間配置シミュレーション ・被災シミュレーション ・被災状況と広報	・各種サービスの享受 ・建物被災情報の受信
III	ウェブ	Web (Systematical Element) ライフラインの配管, 共同溝, 電線等	・ネットワーク ・共同溝率 ・配置 ・代替性など	・ライフライン破壊シミュレ ーション ・幹線道路(含共同溝)の設 計	・ライフライン破壊シミュレ ーション ・幹線道路(含共同溝)の設 計	・ライフラインの享受 ・ライフライン情報の受信
IV	自然	Nature (Natural Element) 水辺, 河川, 緑地, 農地等	・緑地率 ・配置 ・連動帯率 ・面積など	・公共空間設計 ・延焼遮断シミュレーション	・公共空間設計 ・延焼遮断シミュレーション ・快適な公共空間の提供	・快適な公共空間の享受
	意義			・三次元的思考 ・都市シミュレーション ・都市解析 ・都市設計	・情報把握 ・都市シミュレーション ・街づくり ・情報送信	・情報把握 ・情報受信

8.6 まとめ

本章では、Lynch (1968) の「都市のイメージ」という考え方を参考にして、都市を生態的に見立て、21世紀に向けた防災的・環境的な観点からの都市解析およびデザイン手法を提案した。ここで提案した防災環境都市デザイン手法を MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design) と名づけた。MUSE とは、ある都市をひとつの閉じた有機的な系と考え、8種の物的要素に分類し、都市の様相を可視化することにより、それぞれの要素あるいは要素間相互の関係性から都市を解析し、設計およびシミュレートするための手法である。この8種の要素は「主体」、「形態要素」、「ウェブ」、「自然」の4種に大きく分類され、「形態要素」はさらに5つの要素(パス、エッジ、セル、ヴォイド、コア)に分類される。またひとつの地域を仮想的に閉ざすために準要素として「仮想壁」を想定している。この防災環境都市デザイン手法を用いた将来的なビジョンを描いた。

本研究の成果である建物被害関数や建物倒壊危険度は MUSE の要素における「セル(街区)」の評価に適用できる。その他の要素の評価に関しては、これまでも各方面の専門家により研究されているため、今後の課題として検討していく必要がある。各要素および各要素間の関係の評価手法を整理し、ここで提案したビジョンに肉付けしていくことにより、防災的な観点からの都市の特性の比較が可能となると思われる。また GIS や GPS との関連性についても検討していく必要がある。

Vitruvius (1979) は、建築を「強・用・美」を備えた総合芸術であると述べている。「強」とは構造的に丈夫であること(安全性)、「用」とは建築としての各機能を備えていること(機能性)、「美」とはそこに住む人々、あるいは公共の場からその建築を見る人々にとって美しく思えること(芸術性)である。この考え方を都市に置き換えてみると、「強・用・美」は「安全性・機能性・快適性」と言い換えることができる。これら3要素が調和することによって都市にとって重要なキーワードである「公共性」というものが生まれるのではないかと考えている。この3要素はそれぞれ独立しているものではなく、それぞれがバランスを保ちながら共存しなければならない概念である。しかし、これまでの日本の高度経済成長期において、あまりにも機能的な観点(経済性)に偏りすぎて公共空間が整備されてきたように思える。その結果、ほとんどの道路は自動車中心のものとなり、歩行者が安心して楽しめる賑わいのある限界は、海外の都市に比べて、とても少ない。また GIS による防災システムや公園の防災設備など災害に備えたシステムは多数存在するが、度々指摘されているように、頻度の少ない災害時のみにしか使えないものは形骸化してしまう。公共性という観点から都市を眺めてみれば、「安全性・機能性・快適性」というものは共有可能なものである。例えば、公園において水辺のある快適な広い空間は災害時には広域避難場所になり、火災の延焼を防ぎ、避難時の生活用水等にも使われる。そこをバーベキューが可能な場所にすれば、人々から愛され、親しまれる場となり、いざという時に特別な設備を探さなくても簡単なテント生活が出来る。またそこに地域住民が楽しめる銭湯があれば、その公共空間を中心としたコミュニティができ、それが人々の日常生活に潤いを与える。

都市を防災的な観点から考えるということは、特別に日常生活からかけ離れたことを考えるものではない。地震等で都市が被害を受けた時に都市生活におけるあらゆる分野においてそれらの

重要性が浮き彫りになるだけであり、防災という特別な分野があるのではない。災害時に、それらが機能しなくなり、改めて日常生活の意味が問われているにすぎない。防災的な観点から都市をデザインするというのは、平常時に見過ごしがしな都市生活を防災というマイナス側からのフィルターを用いて見つめ、平常時における都市を再構築しようという考え方である。このような考え方を前提として、MUSE を発展させていきたいと思う。

本論文では、兵庫県南部地震により被害を受けた建物データを用いて、建物被害評価に関する研究を行い、かつ防災環境都市デザイン手法 MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design) を提案し、本研究成果を用いた防災的観点からの将来的な都市ビジョンを示した。

各自治体で所有している建物データを用いて、地域の建物倒壊危険度を評価し、建物被害推定等を行うことは、都市の防災対策をする上で極めて重要である。本研究ではそれらに必要な建物被害関数および建物倒壊危険度評価法を構築するために次のような方法で検討を行った。

まず、本研究で主として用いた神戸市の建物被害データの位置付けを明確にするため、兵庫県南部地震におけるいくつかの建物被害調査を比較検討し、問題点を浮き彫りにし、今後大地震が発生した時にそれらの問題点が解消されるような調査票を提案した。また調査法が異なる場合の建物被害評価変換法を提案した。そして神戸市の建物被害データを用いて兵庫県南部地震による建物被害を分析し、建物構造や建築年代によって異なる建物被害の傾向を明らかにした。次に、地震動観測記録が限られていたために不充分であった兵庫県南部地震における地震動分布を、上記建物被害データと微地形分類を用いて詳細に推定し、構造・建築年代別の建物被害関数を構築した。さらにこの被害関数を基にして信頼性解析を用いた建物倒壊危険度評価法を提案した。最後に本研究の成果である建物被害関数や建物倒壊危険度評価法等を都市デザインに適用するために、防災環境都市デザイン手法 MUSE (The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design) を提案した。

以下に本研究の成果を要約して示す。

第1章では、兵庫県南部地震の概要を含む本研究の背景を述べ、本研究の目的と位置付けを示した。次に、建物被害調査法、建物被害分析、兵庫県南部地震における地震動分布推定、建物被害関数、建物被害想定および危険度評価、そして都市デザインと防災都市計画など本研究に関連した各項目に関する既往の研究について概観した。最後に本研究の構成と内容を説明した。

第2章では、自治体という公的な立場からの建物被害評価法を提案するために、兵庫県南部地震後に実施された建物被害調査の内容を整理・分析した。各自治体で行われた調査は国の統一基準に基づいてはいるが、大災害を想定した調査法が確立されていなかったため、自治体ごとに調査内容が異なり、同じ判定結果であっても「全壊」や「半壊」等の用語の定義が異なることが分かった。今後も被災度合の尺度や、地震被害想定等でこれらの用語が使われる時に、どの調査結果に基づくものなのか、また予測結果をどのような目的に使用するかなどを考慮し、用語を慎重に使い分ける必要があることを示した。また自治体による調査は学会等による調査とは異なり、建物内部も考慮したものであり、判定結果に大きな影響を与えていた。さらに自治体による調査は建物を資産価値として評価するという趣旨で行われるため、建築コストとの比較も行った。以上の結果をふまえ、資産価値を評価する自治体という公的な立場からの建物被害調査票を提案した。これは倒壊・傾斜の状況だけを即座に調査することにより、資産価値評価だけではなく地震直後に必要な被害実態の把握にも有効であり、また政令等により全国で統一された評価法が規定されれば、調査方法の違いによる判定結果のばらつきや、それによる住民の不公平感等の問題も

解消されると思われる。

第3章では、兵庫県南部地震で被害を受けた芦屋市の約12,000棟の建物を対象として、自治体と震特委員会による建物被害調査の判定結果を比較した。その結果、全体としては芦屋市の全壊判定は震特委員会の中破以上、芦屋市の全半壊判定は震特委員会の軽微な損傷以上にほぼ等しいことがわかった。また判定結果と推定地震動（最大地震速度）との関係を調べた結果、地震動の大きさが2調査による被害判定結果の違いに影響を与えていることがわかった。地震動の小さいエリア内、そして強固な建物等は倒壊・全壊することが少ない。しかし家具の転倒等により、内部被害は発生しているということが考えられる。そのような時、建物内部被害の判定項目の有無が、建物被害調査結果の大きな違いとなって現れてくる。地震動の大きさが判定結果の違いに影響を与えているのは、このような理由によるものと考えられる。以上の分析により、自治体による資産的評価を重視した建物被害調査の判定結果を、震特委員会の調査に基づく被害判定へと変換する評価法を提案した。

第4章では灘区における建物被害のマクロ分析を行った。その結果、構造別の全半壊率はレンガ造が最も高く、続いて木造、鉄骨鉄筋コンクリート造、鉄骨造、軽量鉄骨造、コンクリートブロック造、鉄筋コンクリート造の順であった。各構造ごとの建築年代および建築年別の被害率は、どの構造においても、一部の例外を除いて建築年代が新しいほど小さくなる傾向が見られた。また耐震基準の改正による影響も見られた。建物の階数別の被害分析では、鉄骨造、鉄筋コンクリート造とも高層になるほど被害率が高かった。木造建物の屋根別の被害は、どの建築年代においても重量の大きい瓦葺きが最も大きかったが、スレート葺きと金属葺きとでは被害率と屋根重量との関係が逆転していた。データからではその理由が確認できなかったが、屋根の違いによる構法の違い、あるいは屋根種の選択と建物所有者の経済的事情などが関係していると思われる。

またGISを用いた灘区の建物被害分析も行った。木造建物はRC造、鉄骨造と比較して棟数が多く、広い地域に分布している。どの構造においても、全壊率の高い地域はいわゆる「震災の帯」上に広がっているという傾向が確認された。これらは地震動の分布を推定するための尺度として、木造建物の被害率が有効に用いられる可能性を示している。また全壊率の高い地域で死者発生率も高いという傾向が見られた。木造建物の被害率と微地形（土地条件）との関係を調べた結果、台地・段丘上では上位面、低位面、浅い谷の順に、また沖積低地においては扇状地、緩扇状地、海岸平野・三角州の順に、木造建物の全半壊率（とくに全壊率）が大きかった。このことから表層の地盤条件の違いが建物の全半壊率に大きく影響していることが窺われた。ただし、地震動の大きさによる影響も大きいと思われる。さらに本章で用いた減免用被災度調査データと建設省建築研究所（1996）のデータを、各町丁目ごとの全壊率に関して比較した。その結果、神戸市調査データの方が、建築研究所データよりも判定基準が緩くなっていることが確認された。

第5章では、兵庫県南部地震後に震災復興都市づくり特別委員会等が調査を行い、建設省建築研究所（1996）がまとめた建物被害データを用いて推定した地震動分布と、神戸市により実施された調査に基づく建物被害データを用いて、構造・建築年代を考慮した建物被害関数を求めた。この被害関数を用いて、灘区における地震動分布を再推定した。木造建物の建築年代ごとの被害

関数から推定された地震動を比較検討することにより，建築年代ごとの棟数分布が地域によって異なることの影響を取り除くことができ，町丁目ごとの微地形も考慮した精度の高い地震動を推定することができた。

第6章では，神戸市によって実施された兵庫県南部地震による灘区の建物被害データと，第5章で推定した詳細な地震動分布を用いて，構造別（木造・鉄筋コンクリート造・鉄骨造・軽量鉄骨造）および建築年代別（木造5区分，その他の構造は3区分）の建物被害関数を構築した。

構築された構造別の建物被害関数では，木造の被害は小さい地震動から発生し始め，かつどの最大速度値においても他の構造に比べて被害率が高くなるのに対し，RC造は高い地震動になっても被害率が低かった。また建築年代別では，木造以外の全てにおいて古い建物ほど小さい地震動で被害率が上がり始め，それぞれの地震動においても新しい建物より高い被害率を示した。これらと同様の傾向は，第4章の建物被害分析の結果からも見られた。木造に関しては，基本的にそれぞれのPGVにおいて古いものほど高く，新しいものほど低い被害率となっていたが，古い3曲線は120 cm/sを超えたあたりからほとんど重なってしまっていた。また，本章の中で詳細な地震動分布を用いて構築された建物被害関数と，第4章で構築した建物被害関数とを町丁目ごとの実被害を用いて比較した。その結果，本章により，建物被害関数の精度が向上したことが確認された。

第7章では，東京都の建物倒壊危険度の手法を神戸市灘区に適用して，兵庫県南部地震による建物被害との比較を行った。その結果，建物棟数密度が大きく建物倒壊危険率に影響していることがわかった。次に，地域の被災ポテンシャルを表す指標は，その地域での地盤条件を含めた建物倒壊の危険率であると考え，建物倒壊の危険度を地震発生時の全壊率に対応する指標として，信頼性解析に基づく評価式を構築した。ここで提案した新建物倒壊危険度は，ある地域の建物存在比率と建物および地盤から決定されるマトリクスタイプの危険性ウェイトから求められるもので，灘区の実被害と比較した結果，強い相関が確認された。この評価式を用いて各地域の地域特性を含んだ新建物倒壊危険度を算定することができる。最後にここで提案した評価式を用いて東京都の新建物倒壊危険度を評価した。その結果，東京都の方法では支配的要因であった建物棟数密度の影響を取り除き，建物強度や地盤の影響を考慮した新建物倒壊危険度を評価することができた。ただし，今後この評価法を用いる際には，ここで設定した危険性ウェイトが兵庫県南部地震の経験に基づいており，この地震による地震動分布や阪神地域の建物特性の影響を含んでいることを考慮する必要がある。

第8章では，Lynch（1968）の「都市のイメージ」という考え方を参考にして，都市を生態的に見たてて，21世紀に向けた防災的・環境的な観点からの都市解析およびデザイン手法を提案した。ここで提案した防災環境都市デザイン手法を MUSE（The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design）と名づけた。MUSE とは，ある都市をひとつの閉じた有機的な系に見立て，8種の物的要素に分類し，都市の様相を可視化することにより，それぞれの要素あるいは要素間相互の関係性から都市を解析し，設計およびシミュレートするための手法である。この8種の要素は「主体」，「形態要素」，「ウェブ」，「自然」の4種に大きく分類され，「

形態要素」はさらに5つの要素（パス，エッジ，セル，ヴォイド，コア）に分類される．またひとつの地域を仮想的に閉ざすために準要素として「仮想壁」を想定している．これは，都市を防災的・環境的観点から捉えなおすために，都市空間の物的環境を，の要素に分類するものである．さらに，防災環境都市デザイン手法を用いた将来的なビジョンを描いた．

以上のことから，本研究の主な成果をまとめると次のようになる．

- (1) 兵庫県南部地震後に実施された建物被害調査および問題点が整理された．
- (2) これらの問題点を解消するような大地震時の自治体用建物被害調査票が提案された．
- (3) 兵庫県南部地震における灘区の詳細な地震動分布が推定された．
- (4) 精度の高い構造・建築年代別の建物被害関数が構築された．
- (5) 建物倒壊危険度評価法が提案された．
- (6) 防災環境都市デザイン手法（MUSE）が提案され，上記の建物被害関数や建物倒壊危険度評価法を用いた具体的な都市解析ビジョンが示された．

参考文献

- 明石市 (1996): 兵庫県南部地震 明石市の災害と復興への記録
- 尼崎市 (1998): 阪神・淡路大震災 尼崎市の記録
- 芦屋市 (1997): 阪神・淡路大震災 芦屋市の記録 '95-'96
- 藤本一雄, 翠川三郎 (1996): 被害分布から推定した兵庫県南部地震の震度分布とその解釈, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.97-100
- 後藤寛子, 山崎文雄, 片山恒雄 (1995): 地震被害想定調査の現状および今後の課題, 地域安全学会論文報告集, No.5, pp.361-368
- 後藤寛子, 山崎文雄, 佐藤修 (1996): 兵庫県南部地震における芦屋市の建築物被害, 地域安全学会論文報告集, No.6, pp.155-160
- 後藤寛子, 山崎文雄, 若松加寿江, 浅野進一郎 (1997): 兵庫県南部地震における尼崎市の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1233-1236
- 濱田政則, 磯山龍二, 若松加寿江 (1995): 1995 年兵庫県南部地震液状化, 地盤変位及び地盤条件, (財)地震予知総合研究振興会
- 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志 (1998): 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測 その 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 505 号, pp.53-59
- 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫 (1997a): 1995 年兵庫県南部地震の地震動強さと建物被害の検討, IRI 研究報告 97-01, 清水建設 (株)
- 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫 (1997b): 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 502 号, pp.61-68
- 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬博 (1997): 1995 年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 494 号, pp.59-66
- 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 渡辺宏一 (1996): 兵庫県南部地震の建物被害に基づく地震動強さの評価, 第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.89-92
- 北海道 (1987): 北海道における地震災害の地域特性に関する調査研究
- 北淡町 (1997): 阪神・淡路大震災 北淡町の記録
- 星谷勝 (1973): 確率論手法による構造解析, 鹿島出版会
- 池上嘉彦 (1984): 記号論への招待, 岩波新書 258
- 石田頼房 (1987): 日本近代都市計画の百年, 自治体研究社
- 伊丹市 (1997): 災害と対応の記録-阪神・淡路大震災-
- 岩井哲, 亀田弘行, 碓井照子 (1997): 阪神・淡路大震災における西宮市の都市施設の被害と復興の総合分析のための GIS 利用, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1265-1268
- 自治省固定資産税課 (1997): 評価ハンドブック 平成 9 年度固定資産評価基準
- 鏡味洋史 (1998): 地震動特性と建物被害の関係, 地震動の特性と建築物の被害 経験と予測, 日本建築学会災害委員会, pp.3-8
- 建設省建築研究所 (1996): 平成 7 年兵庫県南部地震被害調査最終報告書
- 建築知識 (1997): 構造別コスト・シミュレーション, No.491, pp.49-143

参考文献

- 気象庁 (1997): 平成 7 年 (1995 年) 兵庫県南部地震調査報告 災害時自然現象報告書 , 気象庁技術報告, 第 119 号
- 国土地理院 (1966): 1/25,000 土地条件図
- 国土地理院 (1996): 1/10,000 地震防災土地条件図
- 国土庁 (1998): 平成 10 年版防災白書
- 神戸市 (1991): 神戸市町別世帯数・年齢別人口 -平成 2 年国勢調査結果-
- 神戸市 (1996a): 阪神・淡路大震災-神戸市の記録 1995 年-
- 神戸市 (1996b): 神戸市統計要覧 1996
- 神戸市企画局 (1980): 神戸の地盤
- Lynch, Kevin (1968): 都市のイメージ, 丹下健三, 富田玲子訳, 岩波書店
- 松永直美 (1998): サイバースペースの超建築, 日経 BP 社
- 緑川光正, 長谷川隆, 向井昭義, 西山功, 福田俊文, 山内泰之 (1997): 1995 年兵庫県南部地震における特定地域の鉄骨造建物被害調査, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 493 号, pp.115-120
- 翠川三郎, 藤本一雄 (1996): 墓石の転倒調査から推定した兵庫県南部地震の際の神戸市およびその周辺での震度分布, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 490 号, pp.111-118
- 三重県 (1997a): 三重県地域防災計画被害想定調査報告書
- 三重県 (1997b): 三重県地域防災計画被害想定調査報告書 手法編
- Miyakoshi, J., Hayashi, Y., Tamura, K., and Fukuwa, N. (1997): Damage Ratio Functions of Building using Damage Data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, Proceedings of the 7th International Conference on the Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), pp.349-354
- Molas, G., L., and Yamazaki, F. (1995): Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan, Including Deep Focus Events, Bulletin of the Seismological Society of America, 85, 5, pp.1343-1358
- 物部長穂 (1926): 土木工事震害報告, 震災予防調査会報告, 第 100 号 (丁), pp. 1-65
- 村上雅英, 田原賢, 藤田宜紀, 三澤文子 (1996): 阪神・淡路大震災にみる在来木造都市型住宅の問題点, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 481 号, pp.71-80
- 村上處直 (1986): 都市防災計画論, 同文書院
- 村尾修, 山崎文雄 (1997a): 兵庫県南部地震における灘区の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会論文集, pp.1261-1264
- 村尾修, 山崎文雄 (1997b): 兵庫県南部地震における北淡町の建物被害分析, 第 2 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.367 - 370
- 名古屋市 (1997): 名古屋市地震被害想定調査報告書
- 中埜良昭 (1996): 阪神大震災被害レポート 被災建築物の応急危険度判定, 建設物価, No.840, pp.2-5, 建設物価調査会
- 中埜良昭, 岡田恒男 (1989): 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 406, pp.37-43
- Newton (1992): Newton 別冊 人体の不思議, ニュートンプレス
- 日本建築防災協会 (1991): 震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針
- 日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会 (1996): 1995 年兵庫県南部地震強震記録資料集

参考文献

- 日本損害保険協会 (1980): 地震保険のすべて, 保険毎日新聞社
- 西宮市 (1996): 1995・1・17 阪神・淡路大震災-西宮の記録-
- 小川直樹, 山崎文雄 (1998): 兵庫県南部地震における明石市の建物被害分析, 地域安全学会論文報告集, No. 8, pp. 62-67
- 太田裕, 小山真紀, 中川康一 (1998): アンケート震度算定法の改訂 高震度領域, 自然災害科学, Vol. 16, No. 4, pp. 307-323
- 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江 (1998): 気象庁地震記録に基づく地盤増幅度と地形分類との関係, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.909-914
- 尾島俊雄 (1996): 安心できる都市, 早稲田大学理工総研シリーズ 7
- 尾島俊雄 (1998): 環境革命時代の建築 巨大都市東京の限界と蘇生, 彰国社
- 岡田成幸, 鏡味洋史 (1991): 震度による地震被害系統評価のためのバルナビリティ関数群の構成, 地震, 第 2 輯, 第 44 巻, 第 2 号, pp.99-108
- 大阪市消防局 (1996): 阪神・淡路大震災大阪市消防活動記録
- 大阪府 (1997): 平成 7 年 1 月 17 日阪神・淡路大震災の記録
- 滋賀県 (1996): 滋賀県域における直下型地震の被害想定報告書
- 新建築社 (1991): 建築 20 世紀
- 震災復興都市づくり特別委員会 (1995): 阪神・淡路大震災被害実態緊急調査 被災度別建物分布状況図集
- Smithson, Alison & Peter (1971): 都市の構造, 藤井博己訳, 美術出版社
- 損害保険料率算定会 (1997): 阪神・淡路大震災資料集, 地震保険調査報告 26
- 損害保険料率算定会 (1998a): 地震被害想定資料集, 地震保険調査報告 28
- 損害保険料率算定会 (1998b): 地震の被害を受けた建築物の被災度の評価方法の概要 (応急危険度判定制度の概要), RISK, 48
- 杉浦正美, 山崎文雄 (1996): 兵庫県南部地震における宝塚市の被害分析, 地域安全学会論文報告集, No.6, pp.147-154
- 杉浦正美, 山崎文雄 (1997): 兵庫県南部地震における伊丹市の建物被害分析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1257-1260
- 杉山英男 (1996): 地震と木造住宅, 丸善
- 鈴木祥之, 藤原悌三 (1995): 神戸市中央区における木造建物の被害, 1995 年兵庫県南部地震 木造建物の被害, 日本建築学会近畿支部, pp.41-48
- 宝塚市 (1997): 阪神・淡路大震災-宝塚市の記録 1995-
- 丹下健三研究室 (1961): 東京計画 1960 その構造改革の提案
- 丹治初彦, 増成牧 (1995): 被災不動産の法と鑑定, 三省堂
- 栃木県 (1995): 栃木県直下の地震被害想定調査報告書
- 東京都 (1997a): 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書
- 東京都 (1997b): 東京における直下地震の被害想定に関する調査報告書 (被害想定手法編)
- 東京都 (1998): あなたのまちの地域危険度
- 東京都防災会議 (1980): 地震の震度解説表
- 東京都都市計画局 (1993): 地震に関する地域危険度測定調査報告書 (第 3 回)

参考文献

- 東京都都市計画局 (1998a): 地震に関する地域危険度測定調査報告書 (第4回)
- 東京都都市計画局 (1998b): 第4回地震に関する地域危険度測定調査 調査結果活用の手引
- 槻橋修, 石崎順一, 奈尾信英 (1995): 世界の都市プロジェクト 1960-1995, 建築文化, Vol.50, No. 588, 彰国社
- Vitruvius, Pollio (1979): ウィトルウィウス建築書, 森田慶一訳, 東海大学出版会
- 山口直也, 山崎文雄 (1999): 1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, No.612/I-46, pp.325-336
- 山口直也, 山崎文雄, 若松加寿江 (1997): 兵庫県南部地震における西宮市の建物被害分析, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1237-1240
- 山梨県 (1996): 山梨県地震被害想定調査報告書, 三菱総合研究所
- 吉岡敏和, 宮地良典, 寒川旭, 下川浩一, 奥村晃史, 水野清秀, 松村紀香 (1995): 兵庫県南部地震に伴う阪神地区の被害分布と微地形, 地質ニュース 491号, pp.24-28
- ゼンリン (1994): ゼンリン住宅地図'94 神戸市灘区

付録 1：建物被害調査票

付録 1：建物被害調査票
伊丹市

付録 1：建物被害調査票

伊丹市

付録 1 : 建物被害調査票

尼崎市

付録 1：建物被害調査票

尼崎市

付録 1：建物被害調査票

宝塚市

付録 1 : 建物被害調査票

宝塚市

付録 1：建物被害調査票

西宮市

付録 1：建物被害調査票

芦屋市

付録 1：建物被害調査票

芦屋市

付録 1：建物被害調査票

神戸市・明石市

付録 1：建物被害調査票

神戸市・明石市

付録 1 : 建物被害調査票

津名郡北淡町

付録 1：建物被害調査票

震災復興都市づくり特別委員会

付録 1：建物被害調査票

震災復興都市づくり特別委員会

付録 2：灘区の町丁目データ

コード	町丁目名	全建物 全壊率	再推定PGV (本研究)	建物倒壊危険量 (東京都)	建物倒壊危険率 (本研究)
1	鶴甲一丁目	0.00	38.29	0.01	0.06
2	鶴甲二丁目	0.00	38.29	0.03	0.05
3	鶴甲三丁目	0.00	38.29	0.06	0.06
4	鶴甲四丁目	0.00	38.29	0.08	0.05
5	鶴甲五丁目	0.00	38.29	0.01	0.03
6	土山町	0.22	108.41	0.04	0.08
7	桜ヶ丘町	0.71	129.50	0.08	0.11
8	一王山町	0.13	65.78	0.12	0.11
9	六甲台町	0.00	47.49	0.02	0.05
10	寺口町	0.11	53.85	0.23	0.08
11	弓木町一丁目	1.00	163.64	0.02	0.42
12	弓木町二丁目	0.86	163.64	0.21	0.56
13	弓木町三丁目	0.71	146.24	0.15	0.48
14	弓木町四丁目	0.92	146.24	0.37	0.68
15	弓木町五丁目	0.64	146.24	0.31	0.60
16	大和町一丁目	0.74	163.64	0.18	0.48
17	大和町二丁目	0.86	153.37	0.43	0.60
18	大和町三丁目	0.78	153.37	0.20	0.53
19	大和町四丁目	0.57	153.37	0.20	0.56
20	大和町五丁目	建物なし	153.37	0.00	0.00
21	中郷町一丁目	0.93	163.64	0.23	0.54
22	中郷町二丁目	0.82	141.75	0.32	0.60
23	中郷町三丁目	0.64	141.75	0.23	0.48
24	中郷町四丁目	0.67	141.75	0.22	0.60
25	中郷町五丁目	建物なし	141.75	0.00	0.00
26	徳井町一丁目	0.86	149.48	0.14	0.58
27	徳井町二丁目	0.56	143.88	0.26	0.52
28	徳井町三丁目	0.43	133.44	0.23	0.53
29	徳井町四丁目	0.76	136.32	0.27	0.62
30	徳井町五丁目	0.72	135.76	0.21	0.57
31	記田町一丁目	0.76	154.16	0.17	0.52
32	記田町二丁目	0.56	154.16	0.22	0.55
33	記田町三丁目	0.34	154.16	0.09	0.31
34	記田町四丁目	0.74	153.03	0.24	0.59
35	記田町五丁目	0.76	162.81	0.50	0.58
36	赤松町一丁目	0.15	37.58	0.16	0.09
37	赤松町二丁目	0.00	37.58	0.18	0.04
38	赤松町三丁目	0.00	37.58	0.08	0.04
39	曽和町一丁目	0.02	37.54	0.16	0.06
40	曽和町二丁目	0.01	37.54	0.20	0.08
41	曽和町三丁目	0.08	37.54	0.17	0.07
42	山田町一丁目	0.00	45.53	0.16	0.07
43	山田町二丁目	0.13	45.53	0.24	0.09
44	山田町三丁目	0.11	45.53	0.13	0.10
45	宮山町一丁目	0.08	46.90	0.18	0.56
46	宮山町二丁目	0.12	46.90	0.19	0.10
47	宮山町三丁目	0.10	46.90	0.08	0.44
48	八幡町一丁目	0.15	57.67	0.24	0.60
49	八幡町二丁目	0.08	57.47	0.16	0.08
50	八幡町三丁目	0.30	73.67	0.15	0.58
51	八幡町四丁目	0.40	75.67	0.18	0.54

付録 2 : 灘区の町丁目データ

52	日尾町一丁目	0.44	95.26	0.18	0.54
53	日尾町二丁目	0.15	95.26	0.20	0.45
54	日尾町三丁目	0.57	95.26	0.21	0.60
55	森後町一丁目	0.34	95.26	0.21	0.56
56	森後町二丁目	0.68	95.26	0.26	0.12
57	森後町三丁目	0.71	95.26	0.31	0.57
58	永手町一丁目	0.50	108.03	0.24	0.58
59	永手町二丁目	0.40	108.03	0.15	0.45
60	永手町三丁目	0.50	108.03	0.19	0.48
61	永手町四丁目	1.00	108.03	0.00	0.07
62	永手町五丁目	0.66	108.03	0.30	0.54
63	深田町一丁目	0.56	143.85	0.23	0.54
64	深田町二丁目	0.81	143.85	0.34	0.56
65	深田町三丁目	0.50	143.85	0.20	0.41
66	深田町四丁目	0.80	143.85	0.02	0.18
67	深田町五丁目	0.62	143.85	0.29	0.50
68	備後町一丁目	0.87	162.81	0.11	0.60
69	備後町二丁目	0.78	162.81	0.29	0.60
70	備後町三丁目	0.82	135.35	0.26	0.69
71	備後町四丁目	0.86	135.35	0.32	0.69
72	備後町五丁目	0.86	132.45	0.52	0.64
73	桜口町一丁目	0.79	162.81	0.36	0.57
74	桜口町二丁目	0.85	140.86	0.31	0.54
75	桜口町三丁目	0.94	140.86	0.42	0.67
76	桜口町四丁目	0.72	140.86	0.19	0.49
77	桜口町五丁目	0.67	140.86	0.19	0.52
78	友田町一丁目	0.85	148.50	0.56	0.59
79	友田町二丁目	0.91	148.50	0.57	0.66
80	友田町三丁目	0.66	145.10	0.34	0.55
81	友田町四丁目	0.54	130.70	0.36	0.53
82	友田町五丁目	0.29	130.70	0.03	0.24
83	浜田町一丁目	0.55	112.48	0.13	0.56
84	浜田町二丁目	0.78	128.45	0.33	0.65
85	浜田町三丁目	0.72	128.45	0.47	0.59
86	浜田町四丁目	0.71	112.48	0.10	0.42
87	大土平町一丁目	0.00	48.20	0.07	0.07
88	大土平町二丁目	0.04	48.20	0.21	0.08
89	篠原北町一丁目	0.09	50.13	0.16	0.11
90	篠原北町二丁目	0.04	47.76	0.19	0.09
91	篠原北町三丁目	0.05	49.05	0.17	0.08
92	篠原北町四丁目	0.06	53.38	0.13	0.07
93	篠原本町一丁目	0.41	71.14	0.26	0.13
94	篠原本町二丁目	0.16	61.76	0.24	0.11
95	篠原本町三丁目	0.09	52.15	0.20	0.12
96	篠原本町四丁目	0.00	50.50	0.14	0.08
97	篠原本町五丁目	0.08	50.50	0.24	0.09
98	篠原中町一丁目	0.39	69.54	0.19	0.58
99	篠原中町二丁目	0.26	69.54	0.14	0.48
100	篠原中町三丁目	0.28	62.12	0.31	0.54
101	篠原中町四丁目	0.20	55.09	0.28	0.61
102	篠原中町五丁目	0.14	54.73	0.20	0.61
103	篠原中町六丁目	0.21	67.19	0.14	0.47
104	篠原南町一丁目	0.72	122.94	0.35	0.59
105	篠原南町二丁目	0.68	104.33	0.35	0.60
106	篠原南町三丁目	0.56	107.16	0.39	0.60
107	篠原南町四丁目	0.64	116.65	0.45	0.64

付録 2 : 灘区の町丁目データ

108	篠原南町五丁目	0.68	133.92	0.24	0.10
109	篠原南町六丁目	0.57	89.97	0.34	0.64
110	篠原南町七丁目	0.77	106.08	0.32	0.63
111	神前町一丁目	0.88	177.62	0.34	0.66
112	神前町二丁目	0.91	177.62	0.42	0.66
113	神前町三丁目	0.75	161.94	0.30	0.64
114	神前町四丁目	0.86	124.49	0.27	0.73
115	将軍通一丁目	0.94	124.49	0.57	0.72
116	将軍通二丁目	0.81	124.49	0.45	0.65
117	将軍通三丁目	0.75	124.16	0.52	0.65
118	将軍通四丁目	0.82	133.92	0.29	0.60
119	神ノ木通一丁目	0.69	114.71	0.33	0.68
120	神ノ木通二丁目	0.44	114.71	0.24	0.56
121	神ノ木通三丁目	0.74	123.65	0.33	0.62
122	神ノ木通四丁目	0.57	133.92	0.07	0.51
123	千旦通一丁目	0.57	114.71	0.11	0.56
124	千旦通二丁目	0.27	114.71	0.37	0.38
125	千旦通三丁目	0.27	108.57	0.46	0.41
126	千旦通四丁目	0.11	118.46	0.16	0.20
127	稗原町一丁目	0.82	152.15	0.33	0.59
128	稗原町二丁目	0.87	152.15	0.28	0.59
129	稗原町三丁目	0.69	147.03	0.12	0.49
130	稗原町四丁目	0.68	140.50	0.25	0.54
131	上河原通一丁目	0.67	113.29	0.35	0.66
132	上河原通二丁目	0.14	113.29	0.12	0.21
133	上河原通三丁目	0.25	113.29	0.24	0.38
134	上河原通四丁目	0.21	134.75	0.16	0.18
135	琵琶町一丁目	0.80	162.67	0.57	0.62
136	琵琶町二丁目	0.79	162.39	0.32	0.60
137	琵琶町三丁目	0.73	147.03	0.15	0.57
138	下河原通一丁目	0.67	128.35	0.30	0.65
139	下河原通二丁目	0.44	116.98	0.46	0.64
140	下河原通三丁目	0.38	112.73	0.43	0.52
141	下河原通四丁目	0.44	122.32	0.30	0.53
142	下河原通五丁目	0.57	145.00	0.09	0.56
143	烏帽子町一丁目	建物なし	152.27	0.00	0.00
144	烏帽子町二丁目	0.77	152.27	0.33	0.59
145	烏帽子町三丁目	0.56	147.03	0.16	0.45
146	鹿ノ下通一丁目	0.68	127.07	0.41	0.59
147	鹿ノ下通二丁目	0.94	145.00	0.37	0.67
148	鹿ノ下通三丁目	0.74	145.00	0.27	0.61
149	大石東町一丁目	0.68	150.34	0.09	0.58
150	大石東町二丁目	0.55	137.62	0.24	0.57
151	大石東町三丁目	0.74	144.17	0.11	0.53
152	大石東町四丁目	0.80	144.17	0.36	0.62
153	大石東町五丁目	0.68	129.26	0.45	0.57
154	大石東町六丁目	0.73	125.07	0.22	0.63
155	新在家北町一丁目	0.67	150.34	0.07	0.48
156	新在家北町二丁目	0.61	150.34	0.14	0.61
157	新在家南町一丁目	0.53	128.35	0.02	0.36
158	新在家南町二丁目	0.69	128.35	0.15	0.58
159	新在家南町三丁目	0.70	124.98	0.19	0.66
160	新在家南町四丁目	0.63	120.45	0.15	0.57
161	新在家南町五丁目	0.67	123.62	0.23	0.62
162	灘浜東町	0.04	*	0.02	*
163	箕岡通一丁目	0.10	51.85	0.22	0.08

付録 2：灘区の町丁目データ

164	箕岡通二丁目	0.07	52.51	0.25	0.07
165	箕岡通三丁目	0.08	51.38	0.17	0.08
166	箕岡通四丁目	0.03	51.38	0.14	0.06
167	高尾通一丁目	0.06	49.63	0.25	0.12
168	高尾通二丁目	0.03	49.63	0.31	0.11
169	高尾通三丁目	0.00	49.63	0.10	0.07
170	高尾通四丁目	0.03	49.63	0.24	0.07
171	五毛通一丁目	0.06	48.08	0.23	0.11
172	五毛通二丁目	0.01	50.11	0.38	0.10
173	五毛通三丁目	0.02	48.97	0.22	0.09
174	五毛通四丁目	0.02	48.97	0.25	0.07
175	薬師通一丁目	0.18	53.27	0.23	0.14
176	薬師通二丁目	0.03	53.27	0.26	0.12
177	薬師通三丁目	0.02	53.27	0.35	0.09
178	薬師通四丁目	0.02	48.65	0.30	0.07
179	国玉通一丁目	0.06	62.30	0.19	0.12
180	国玉通二丁目	0.05	62.30	0.31	0.11
181	国玉通三丁目	0.07	58.11	0.36	0.11
182	国玉通四丁目	0.02	58.78	0.43	0.09
183	上野通一丁目	0.00	60.50	0.16	0.49
184	上野通二丁目	0.05	60.50	0.46	0.65
185	上野通三丁目	0.07	68.27	0.42	0.13
186	上野通四丁目	0.08	57.12	0.60	0.13
187	上野通五丁目	0.02	53.40	0.42	0.11
188	上野通六丁目	0.01	49.65	0.48	0.08
189	上野通七丁目	0.08	58.06	0.38	0.64
190	上野通八丁目	0.21	58.25	0.28	0.09
191	赤坂通一丁目	0.02	55.16	0.28	0.53
192	赤坂通二丁目	0.18	55.16	0.48	0.69
193	赤坂通三丁目	0.09	62.84	0.61	0.63
194	赤坂通四丁目	0.05	57.21	0.60	0.13
195	赤坂通五丁目	0.04	54.06	0.47	0.16
196	赤坂通六丁目	0.03	54.06	0.33	0.09
197	赤坂通七丁目	0.02	48.92	0.47	0.09
198	赤坂通八丁目	0.08	54.72	0.25	0.09
199	畑原通一丁目	0.11	68.21	0.47	0.63
200	畑原通二丁目	0.12	68.21	0.46	0.67
201	畑原通三丁目	0.19	61.12	0.56	0.57
202	畑原通四丁目	建物なし	61.12	0.00	0.00
203	畑原通五丁目	0.05	61.12	0.44	0.56
204	天城通一丁目	0.28	77.79	0.44	0.60
205	天城通二丁目	0.46	77.79	0.61	0.64
206	天城通三丁目	0.51	88.32	0.51	0.70
207	天城通四丁目	0.48	88.32	0.75	0.69
208	天城通五丁目	0.48	88.32	0.55	0.60
209	天城通六丁目	0.12	68.50	0.40	0.61
210	天城通七丁目	0.13	53.36	0.44	0.64
211	天城通八丁目	0.06	54.95	0.41	0.58
212	福住通一丁目	0.33	81.19	0.47	0.55
213	福住通二丁目	0.72	81.19	0.72	0.70
214	福住通三丁目	0.38	102.27	0.81	0.70
215	福住通四丁目	0.90	102.27	1.23	0.70
216	福住通五丁目	0.68	112.63	0.58	0.56
217	福住通六丁目	0.46	112.98	0.55	0.56
218	福住通七丁目	建物なし	112.98	0.00	0.00
219	福住通八丁目	0.20	101.09	0.25	0.64

付録 2：灘区の町丁目データ

220	中原通一丁目	0.51	99.84	0.65	0.64
221	中原通二丁目	0.41	106.98	0.64	0.67
222	中原通三丁目	0.36	106.98	0.40	0.55
223	中原通四丁目	0.50	106.98	0.17	0.40
224	中原通五丁目	0.67	109.59	1.50	0.69
225	中原通六丁目	0.87	122.85	0.53	0.64
226	中原通七丁目	0.51	116.86	0.24	0.53
227	倉石通一丁目	0.89	99.84	0.84	0.70
228	倉石通二丁目	0.75	122.79	0.57	0.71
229	倉石通三丁目	0.38	122.79	0.57	0.56
230	倉石通四丁目	0.55	130.22	0.34	0.50
231	倉石通五丁目	0.81	130.22	0.26	0.59
232	倉石通六丁目	0.88	130.22	0.33	0.56
233	水道筋一丁目	0.72	137.57	0.23	0.64
234	水道筋二丁目	0.95	137.57	0.74	0.72
235	水道筋三丁目	0.79	135.34	0.64	0.62
236	水道筋四丁目	0.70	135.34	0.49	0.57
237	水道筋五丁目	0.67	136.89	0.37	0.54
238	水道筋六丁目	0.85	143.81	0.47	0.62
239	岸地通一丁目	0.90	121.54	0.64	0.73
240	岸地通二丁目	0.48	110.50	0.22	0.46
241	岸地通三丁目	0.61	110.50	0.47	0.55
242	岸地通四丁目	0.57	110.50	0.10	0.56
243	岸地通五丁目	0.59	129.50	0.23	0.51
244	大内通一丁目	0.50	113.80	0.20	0.53
245	大内通二丁目	0.58	116.63	0.37	0.57
246	大内通三丁目	0.79	116.63	0.55	0.67
247	大内通四丁目	0.45	116.63	0.31	0.38
248	大内通五丁目	0.00	116.63	0.02	0.12
249	大内通六丁目	0.71	129.50	0.39	0.60
250	泉通一丁目	0.26	113.80	0.12	0.35
251	泉通二丁目	0.00	133.71	0.12	0.17
252	泉通三丁目	0.63	133.71	0.54	0.63
253	泉通四丁目	0.62	133.71	0.16	0.40
254	泉通五丁目	0.81	134.98	0.44	0.58
255	泉通六丁目	0.83	140.62	0.44	0.61
256	灘北通一丁目	0.35	118.21	0.18	0.39
257	灘北通二丁目	0.79	118.21	0.44	0.66
258	灘北通三丁目	0.67	118.21	0.51	0.61
259	灘北通四丁目	0.67	162.59	0.36	0.43
260	灘北通五丁目	0.89	158.56	0.43	0.64
261	灘北通六丁目	0.86	158.56	0.47	0.69
262	灘北通七丁目	0.83	160.74	0.41	0.61
263	灘北通八丁目	0.86	136.21	0.09	0.65
264	灘北通九丁目	0.46	136.21	0.36	0.60
265	灘北通十丁目	0.49	136.21	0.17	0.59
266	灘南通一丁目	0.69	125.64	0.17	0.63
267	灘南通二丁目	0.50	125.64	0.15	0.55
268	灘南通三丁目	0.46	123.09	0.31	0.59
269	灘南通四丁目	0.80	123.09	0.22	0.57
270	灘南通五丁目	0.72	130.07	0.18	0.58
271	灘南通六丁目	0.69	130.07	0.15	0.58
272	船寺通一丁目	0.79	144.74	0.27	0.62
273	船寺通二丁目	0.82	169.33	0.21	0.60
274	船寺通三丁目	0.87	169.33	0.13	0.57
275	船寺通四丁目	0.80	176.97	0.30	0.59

付録 2 : 灘区の町丁目データ

276	船寺通五丁目	0.80	176.50	0.35	0.58
277	船寺通六丁目	0.79	176.50	0.32	0.60
278	都通一丁目	0.32	143.65	0.07	0.44
279	都通二丁目	0.60	143.65	0.32	0.64
280	都通三丁目	0.60	150.17	0.21	0.58
281	都通四丁目	0.77	150.17	0.23	0.62
282	都通五丁目	0.73	122.89	0.17	0.57
283	大石北町	0.76	127.14	0.34	0.62
284	大石南町一丁目	0.54	99.31	0.20	0.61
285	大石南町二丁目	0.48	99.36	0.23	0.62
286	大石南町三丁目	0.41	95.56	0.16	0.58
287	味泥町	0.43	100.04	0.04	0.43
288	灘浜町	0.06	*	0.02	*
289	摩耶埠頭	0.24	*	0.01	*
290	青谷町一丁目	建物なし	42.22	0.00	0.00
291	青谷町二丁目	0.02	42.22	0.10	0.07
292	青谷町三丁目	0.16	52.70	0.17	0.09
293	青谷町四丁目	0.01	39.79	0.28	0.10
294	王子町一丁目	0.15	112.96	0.35	0.50
295	王子町二丁目	建物なし	106.55	0.00	0.00
296	王子町三丁目	0.00	106.55	0.00	0.42
297	原田通一丁目	0.36	106.11	0.23	0.50
298	原田通二丁目	0.61	106.11	0.57	0.63
299	原田通三丁目	0.50	106.55	0.27	0.60
300	城内通一丁目	0.69	143.05	0.21	0.53
301	城内通二丁目	0.74	120.05	0.31	0.60
302	城内通三丁目	0.66	112.01	0.41	0.57
303	城内通四丁目	0.49	112.01	0.39	0.58
304	城内通五丁目	0.51	102.64	0.35	0.63
305	岩屋北町一丁目	0.69	144.11	0.28	0.59
306	岩屋北町二丁目	0.85	138.25	0.27	0.69
307	岩屋北町三丁目	0.65	125.18	0.20	0.64
308	岩屋北町四丁目	0.79	137.69	0.18	0.58
309	岩屋北町五丁目	0.65	137.69	0.17	0.45
310	岩屋北町六丁目	建物なし	134.60	0.00	0.00
311	岩屋北町七丁目	0.50	134.60	0.20	0.57
312	岩屋中町一丁目	0.84	130.07	0.17	0.63
313	岩屋中町二丁目	0.78	137.66	0.28	0.58
314	岩屋中町三丁目	0.68	130.07	0.32	0.54
315	岩屋中町四丁目	0.56	130.07	0.14	0.51
316	岩屋中町五丁目	0.72	130.07	0.12	0.52
317	岩屋南町	0.33	137.66	0.02	0.37
318	日出町	0.01	*	0.02	*
319	高羽町一丁目	0.43	94.29	0.12	0.67
320	高羽町二丁目	0.51	93.18	0.36	0.58
321	高羽町三丁目	0.23	75.40	0.37	0.61
322	高羽町四丁目	0.06	71.27	0.16	0.63
323	高羽町五丁目	0.09	65.04	0.30	0.09
324	楠丘町一丁目	0.91	147.25	0.24	0.64
325	楠丘町二丁目	0.79	147.25	0.41	0.55
326	楠丘町三丁目	0.62	92.03	0.38	0.64
327	楠丘町四丁目	0.22	71.27	0.19	0.54
328	楠丘町五丁目	0.08	52.81	0.26	0.52
329	楠丘町六丁目	0.02	47.07	0.20	0.52
330	高德町一丁目	0.88	147.25	0.19	0.61
331	高德町二丁目	0.91	135.79	0.07	0.63

付録 2 : 灘区の町丁目データ

332	高德町三丁目	0.67	135.79	0.19	0.50
333	高德町四丁目	0.57	135.79	0.40	0.53
334	高德町五丁目	0.27	74.54	0.50	0.59
335	高德町六丁目	0.15	71.19	0.60	0.63
336	六甲町一丁目	0.74	150.08	0.52	0.57
337	六甲町二丁目	0.79	150.08	0.39	0.61
338	六甲町三丁目	0.85	151.31	0.59	0.65
339	六甲町四丁目	0.76	142.36	0.46	0.62
340	六甲町五丁目	0.81	155.89	0.38	0.62
341	長峰台一丁目	0.09	60.83	0.16	0.07
342	長峰台二丁目	0.06	60.83	0.03	0.06
343	城の下通一丁目	0.04	52.46	0.07	0.10
344	城の下通二丁目	0.05	54.84	0.16	0.08
345	城の下通三丁目	0.13	52.22	0.33	0.08
346	篠原台	0.01	41.70	0.10	0.04
347	篠原伯母野山町一丁目	0.00	37.95	0.01	0.01
348	篠原伯母野山町二丁目	0.00	37.95	0.01	0.04
349	篠原伯母野山町三丁目	0.00	37.95	0.10	0.08
350	六甲山町	0.00	*	0.00	*
351	大石	0.05	*	0.00	*
352	摩耶山町	0.00	*	0.00	*
353	大月台	0.00	41.70	0.02	0.01

- : 推定不可地域

* : 対象地域外

Vulnerability Functions for Japanese Buildings based on Damage Data due to the 1995 Kobe Earthquake

Fumio Yamazaki and Osamu Murao

Institute of Industrial Science, University of Tokyo

Introduction

More than hundred thousand buildings were severely damaged and about one hundred and fifty thousand buildings were moderately damaged due to the Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake on January 17, 1995 (National Land Agency, 1997). A large amount of data obtained in this earthquake should properly be analyzed for estimating and mitigating damage due to future seismic events. In order to evaluate the building damage in the affected area by the Kobe Earthquake, the strong motion distribution is required. However, since the number of recorded motions was not large enough to estimate the detailed spatial distribution of ground motion (JMA, 1997), the strong motion distribution is necessary to be estimated using other data sources.

To estimate the strong motion distribution, the results of the building damage survey by the group of the Architectural Institute of Japan (AIJ), the City Planning Institute of Japan (CPIJ) and Hyogo Prefectural Government (AIJ & CPIJ, 1995) may be most useful since the survey was conducted for the entire affected area using the unified damage classification. The data obtained by this survey were digitized on a geographic information system (GIS) by the Building Research Institute, Ministry of Construction (BRI, 1996). Miyakoshi et al. (1998) estimated the distribution of the peak ground velocity (PGV) by comparing the BRI data and the PGV obtained from a

two-dimensional response analysis. More recently, Yamaguchi and Yamazaki (1999) also estimated the distribution of the peak ground acceleration (PGA), PGV, spectrum intensity (SI), and the instrumental JMA intensity (Shabestari and Yamazaki, 1998) using the BRI's building damage data and the strong motion indices calculated from the records.

Note that, although the BRI data are very useful, the inventory of buildings (type of structure, construction period, etc.) was not associated with the data. Only the use of buildings (residential, commercial/office, or industrial) and story classification (one or two-storied, or higher than that) were given since the survey by the AIJ & CPIJ group was conducted visually from the outside of buildings. To construct the building vulnerability functions to be used for damage assessments, however, building damage data associated by inventory are necessary. In this view point, the results of building damage survey conducted by local governments are highly useful although the damage classification was different from that of the AIJ & CPIJ and it was even not the same among the local governments in the affected area (Murao and Yamazaki, 1999).

The present authors have collected the building damage data surveyed by local governments and performed basic analyses on damage (Murao and Yamazaki, 1997; Yamaguchi et al., 1998; Sugiura and Yamazaki, 1998). Combining the damage survey data by Kobe City with the estimated ground motion distribution by Yamaguchi and Yamazaki (1999), this paper aims to construct the vulnerability functions (fragility curves) for Japanese buildings that consider the structural type and construction period.

Figure 1 shows the flowchart for the development of the (empirical) vulnerability functions. First, vulnerability functions (I) were created by using the 17 recorded ground motion indices and the BRI damage data for one or two-storied residential buildings. Employing these vulnerability functions (I) to all the district blocks (corresponding to the postal address) in the stricken area, the distributions of PGA, PGV, SI and JMA intensity (I) were estimated (Yamaguchi and Yamazaki, 1999). Using these estimated ground motion distributions and the building damage data for Nada Ward surveyed by Kobe City, the vulnerability functions (II) considering structural type and construction period are developed in this paper. Employing the vulnerability functions (II) to each district block of Nada Ward, the distribution of PGV is further refined. Using the updated strong motion distribution (II), further refined vulnerability functions (III) are finally obtained.

Vulnerability Functions

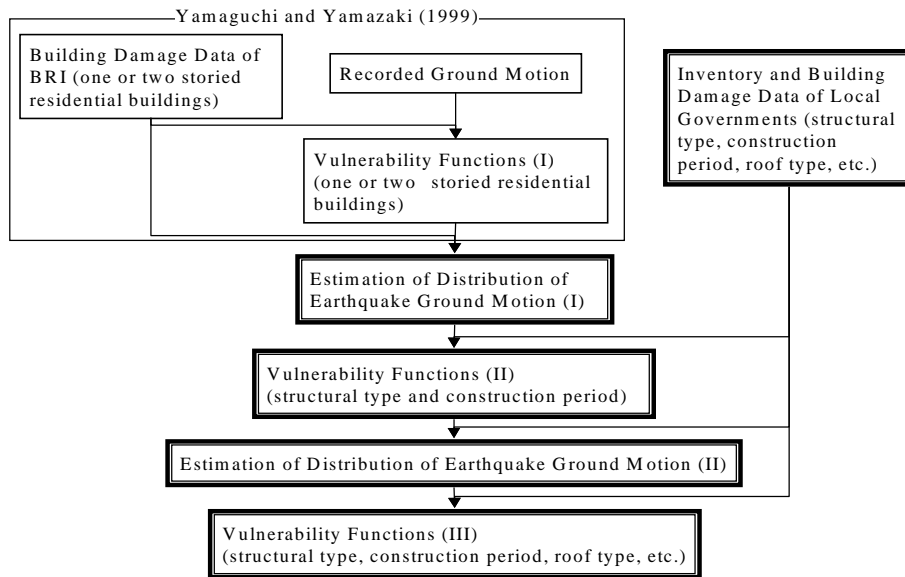


Figure 1. Flowchart for the development of vulnerability functions based on the damage data due to the Kobe Earthquake

Overview of Building Damage in Nada Ward

Nada Ward is one of the nine wards in Kobe City having population of approximately 125,000 in 1994. While the northern part of the ward suffered only slight damage, a large number of buildings were seriously damaged or collapsed in the southern part due to strong shaking. Some buildings were burnt down due to fires and some buildings near the coast were suffered from displacements associated with liquefaction. As a whole, about thirteen thousand buildings were heavily damaged, about six thousand buildings were moderately damaged, and 924 people were killed in Nada Ward by the earthquake (Kobe City, 1996).

Table 1 shows the number of buildings in Nada Ward with respect to the structural type and the period of construction (wood-frame only) for three damage levels: heavy (H), moderate (M), and slight/no damage (N). This damage classification was used for the purpose of property tax reduction for the damaged buildings in the fiscal year of 1995. Note that the damage classification is different from that of the BRI data (Murao and Yamazaki,

1999). The following information such as “district block”, “structural type”, “construction period”, “roof type”, and “use” is associated with each building as well as the damage classification.

The type of structures is classified into four categories: wood-frame (W), reinforced concrete (RC), steel-frame (S), and light gauge steel frame (LS). In Nada Ward, wood-frame buildings were about three-quarters of all buildings. Since the number of buildings was large enough for wood-frame buildings, they were further classified into five construction periods.

Figures 2 and 3 show the damage ratio of buildings in Nada Ward with respect to the structural type and construction period (for wood-frame). The figures indicate that: 1) the damage ratio for wood-frame buildings is largest among all the structural types; 2) the damage ratio for old buildings is larger than that for new buildings for the most structural types.

Table 1. Summary of building damage in Nada Ward due to the Kobe Earthquake

Type of Buildings	Heavy	Moderate	No/Slight	Total
Wood-frame (W)	-1951	5,032	1,636	7,806
	1952-61	2,897	936	4,825
	1962-71	2,588	928	4,642
	1972-81	1,006	764	2,988
	1982-94	384	542	2,449
Subtotal	11,907	4,806	5,997	22,710
Rainforced Concrete (RC)	354	532	2,928	3,814
Steel (S)	532	462	1,179	2,173
Light Gauge Steel (LS)	272	164	865	1,301
Others	133	89	324	546
Total	13,198	6,053	11,293	30,544

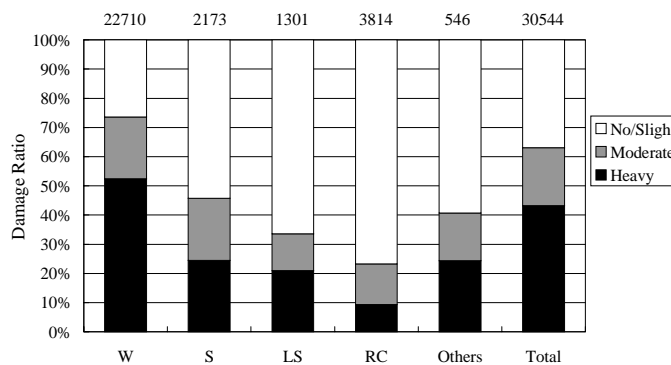


Figure 2. Damage ratio of buildings in Nada Ward for different structural types

Vulnerability Functions

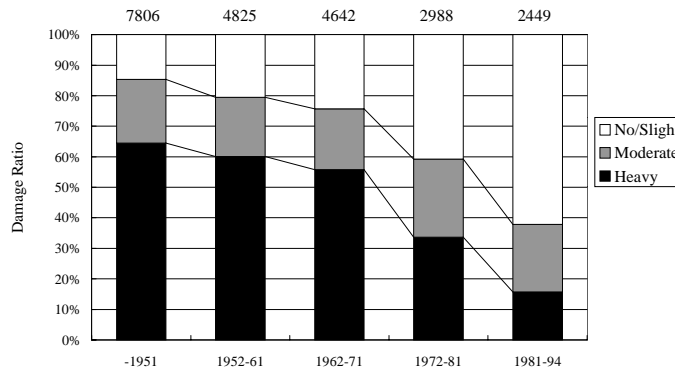


Figure 3. Damage ratio of wood-frame buildings classified by construction period

Re-estimation of Ground Motion Distribution in Nada Ward

The distribution of PGV in Nada Ward estimated by Yamaguchi and Yamazaki (1999) is shown in Figure 4 (a). The seaside area where liquefaction occurred and the mountain area with small number of buildings were excluded from the area to study since, for these areas, the estimation of strong motion indices was difficult from the building damage. In some blocks in Figure 4 (a), PGV was not determined because a block consists of a large park with almost no residential buildings or blocks were outside of the investigation by the AIJ & CPIJ group.

Since the building damage data used for the development of Figure 4 (a) do not include detailed building information, such as the construction year, the estimated PGV may be affected by the characteristics of buildings in each block. Hence, it is desirable to correct this bias using another damage data associated with the detailed building information.

First, (interim) vulnerability functions of wood-frame buildings were constructed using the damage ratio of buildings in each block level of Nada Ward and the estimated PGV distribution shown in Figure 4 (a). The damage ratios of buildings were first calculated for each block (containing about scores to a few hundred buildings). However, after classifying the buildings within a block using the category in Table 1, the number of buildings in each block with the same category becomes small. Hence the several neighboring blocks having a certain range of the estimated strong motion indices were synthesized when calculating the damage ratios.

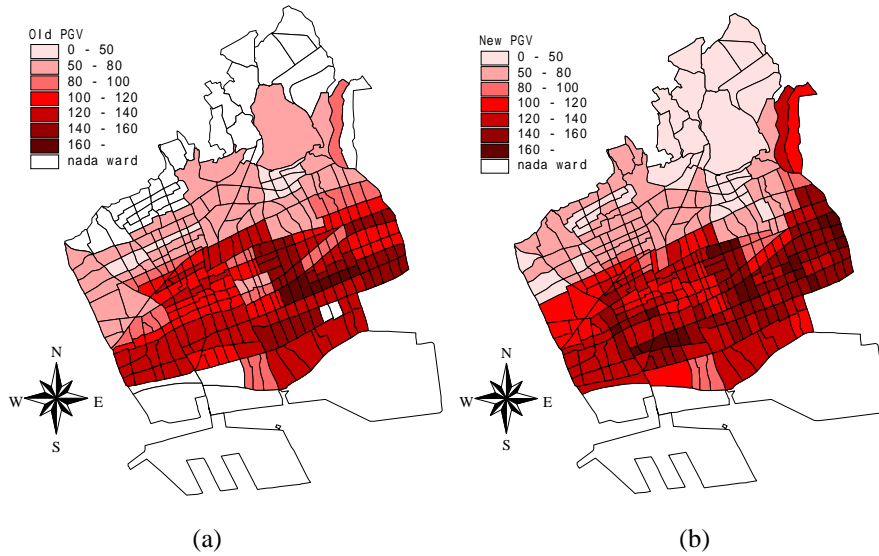


Figure 4. Comparison of (a) estimated PGV by Yamaguchi and Yamazaki (1999) and (b) re-estimated PGV from the interim vulnerability functions (II) in Nada Ward, Kobe City due to the 1995 Kobe Earthquake

In selecting the neighboring blocks to combine damage data, the extent of damage and the subsurface soil condition of the blocks were considered. For each construction period of wood-frame buildings, 20 combined blocks were used with the approximate number of buildings in each block as: 360 buildings for period -1951, 220 buildings for period 1952-61, 200 buildings for period 1962-71, 120 buildings for period 1972-81, and 100 buildings for period 1982-94. Such regional grouping was adopted to obtain reliable damage statistics that correspond to the estimated PGV.

For a strong motion index x , the cumulative probability $P_R(x)$ of the occurrence of damage equal or higher than rank R is assumed to be lognormal as follows:

$$P_R(PGV) = \Phi((\ln PGV - \lambda)/\zeta) \quad (1)$$

In which Φ is the standard normal distribution and λ and ζ are the mean and the standard deviation of $\ln PGV$. The two parameters of the distributions, λ and ζ , were determined by the least square method on lognormal probability paper.

Vulnerability Functions

Figure 5 shows the interim vulnerability functions for wood-frame buildings in Nada Ward for different construction periods based on the building survey data of Kobe City.

As demonstrated in Figure 5, the interim vulnerability functions for wood-frame buildings are dependent on the period of construction. However, no such information was available for the building damage data of BRI. Hence, in estimating the distribution of PGV from the BRI data, we implicitly assumed that the construction periods of one or two-storied residential buildings had similar distribution in all the studied area. But this assumption is obviously not true. Some districts consist of old buildings and some others consist of new buildings.

Considering these issues, the distribution of PGV was re-estimated using the interim vulnerability functions shown in Figure 5. From the damage ratio of buildings for one construction period in a block, one PGV value in the block can be estimated. Using the five interim vulnerability functions corresponding to the different construction periods, the five PGV values are obtained. Similarly, the two damage levels (heavy, heavy + moderate) give two PGV values for a block. These estimated PGV values were averaged for the re-evaluation of PGV. Figure 4 (b) shows the distribution of re-evaluated PGV.

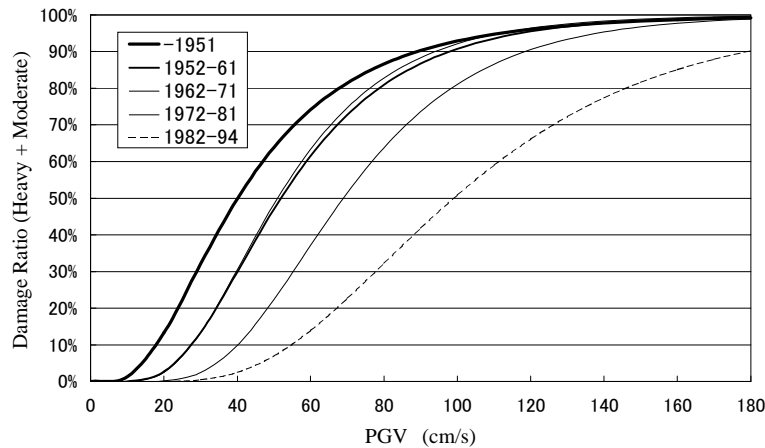


Figure 5. Interim vulnerability functions of wood-frame buildings with respect to PGV for different construction periods

Vulnerability Functions of Buildings

In the similar manner, the vulnerability functions for all of the buildings based on the re-estimated PGV were constructed with regard to structural types and construction periods. Table 2 summarizes the results of the regression analysis. With regard to R_h and R_m in Table 2, the square of correlation coefficients (R^2) for wood-frame building are largest. This fact can be explained by 1) the PGV was re-estimated from the mean value of damage ratio for wooden buildings; and 2) the number of wood-frame buildings is largest among structural type, thus they gave the most stable statistics. R^2 values for other type of structures are lower than those for wood-frame buildings. But they are, in general, very high.

Table 2. Parameters of vulnerability functions for Japanese buildings

		Heavy (R_h)			Heavy + Moderate (R_m)		
		λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2
Wood-frame (W)	-1951	4.36	0.41	0.96	3.66	0.67	0.88
	1952-61	4.44	0.35	0.98	3.97	0.49	0.95
	1962-71	4.45	0.34	0.98	4.02	0.46	0.97
	1972-81	4.73	0.38	0.97	4.25	0.39	0.98
	1982-1994	5.12	0.50	0.88	4.61	0.47	0.97
	All	4.51	0.41	0.98	4.07	0.51	0.98
Rainforced Concrete (RC)	-1971	5.12	0.65	0.95	4.72	0.69	0.93
	1972-81	5.33	0.58	0.94	4.85	0.61	0.84
	1982-94	6.00	0.79	0.90	5.33	0.79	0.92
	All	5.50	0.71	0.97	4.99	0.72	0.92
Steel (S)	-1971	4.64	0.62	0.72	4.25	0.71	0.79
	1972-81	4.97	0.49	0.94	4.49	0.55	0.80
	1982-94	5.64	0.73	0.89	5.01	0.73	0.82
	All	5.14	0.63	0.75	4.69	0.67	0.69
Light Gauge Steel (LS)	-1971	4.70	0.55	0.93	4.41	0.50	0.91
	1972-81	5.82	0.97	0.73	4.95	0.86	0.78
	1982-94	6.19	1.10	0.86	5.28	0.87	0.85
	All	5.03	0.56	0.94	4.73	0.60	0.97

Figure 6 shows the vulnerability functions for the four structural types. In each figure, wood-frame buildings show the smallest seismic capacity and RC structures show the largest seismic capacity. The functions for steel-frame and light-gauge steel-frame structures look very similar.

Vulnerability Functions

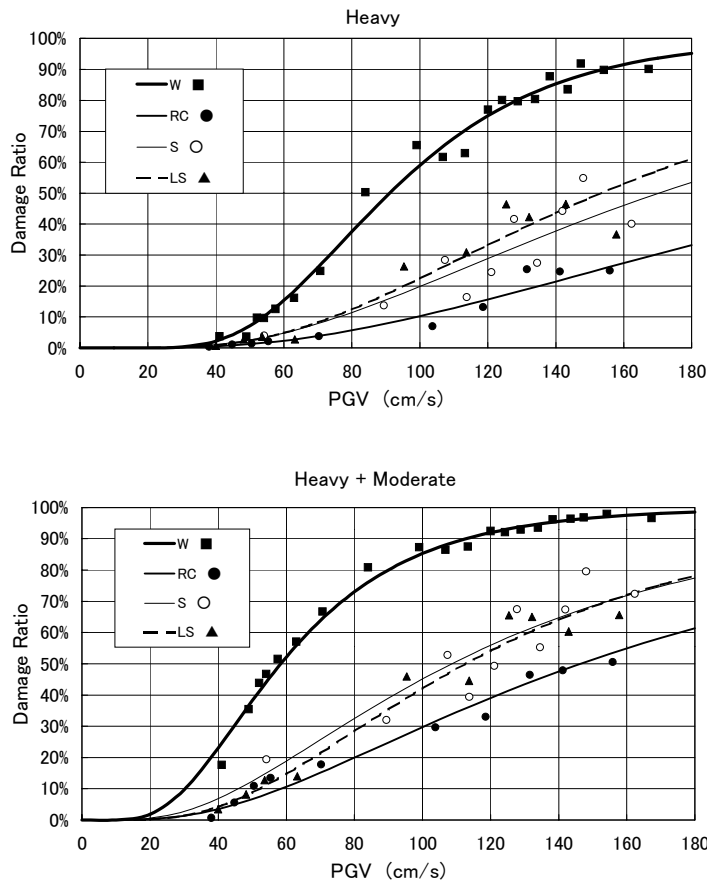


Figure 6. Vulnerability functions with respect to PGV for different structural types

Figures 7 and 8 show the vulnerability functions for reinforced concrete and steel buildings with different construction periods. It is clearly seen in the figures that the older buildings are more vulnerable than the newer buildings. For these engineered structures (S and RC), the revision of the seismic design code in each construction period may have a significant effect for the improvement of seismic resistance. However, for other structural types, especially for wood-frame buildings, it is concluded that the aging of buildings is mostly responsible for this observation, based on the plot of building damage ratios year by year (of construction).

The vulnerability functions developed here may be further improved by introducing the damage data from neighboring cities in the 1995 Kobe Earthquake (e.g. Yamaguchi and Yamazaki, 2000) and the results of numerical simulation for building damage.

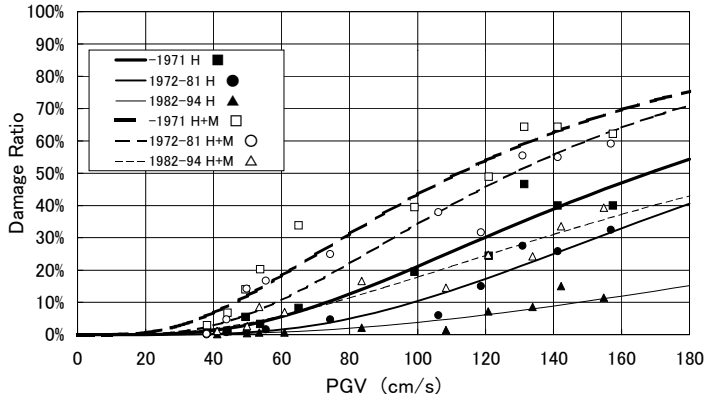


Figure 7. Vulnerability functions for RC buildings

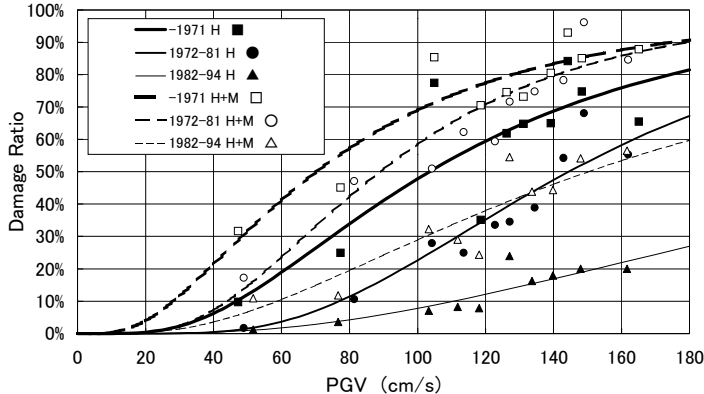


Figure 8. Vulnerability functions for steel buildings

Conclusions

The 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake caused unprecedented damage in Kobe and its surrounding area. A number of building damage surveys were carried out for different purposes. The results of these surveys contain highly valuable information on building fragility and ground motion estimation. In this paper, the building damage data for Nada Ward of Kobe surveyed by Kobe City Government were employed to construct vulnerability functions that consider the structural type and construction period. The resultant vulnerability functions show that the structural type and construction period are important parameters to determine the occurrence probability of damage.

In developing the empirical vulnerability functions, the distribution of strong motion indices estimated using the recorded ground motion and other building damage survey data were used. Since the estimated PGV was affected by the inventory characteristics of each district block, the PGV distribution was re-evaluated using the obtained vulnerability functions that consider the construction period of wood-frame buildings. Using the re-evaluated PGV distribution, refined vulnerability functions considering more detailed characteristics of buildings were developed. The final vulnerability functions may be useful for damage assessments and early damage estimation systems in Japan.

Acknowledgement

The damage survey data used in this paper were provided by the Architectural Institute of Japan, the City Planning Institute of Japan, Building Research Institute, and Kobe City.

References

- Architectural Institute of Japan and City Planning Institute of Japan (1995). Report of Emergency Damage Survey of the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.
Building Research Institute (1996). Final Report of Damage Survey of the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake (in Japanese).

- Japan Meteorological Agency (1997). "Report on the Hyogo-ken-Nanbu Earthquake," Technical Report of JMA, No. 119, 1995 (in Japanese).
- Kobe City (1996). Statistical Year Book 1996 (in Japanese).
- Miyakoshi, J., Hayashi, Y., Tamura, K., and Fukuwa, N. (1998). "Damage Ratio Functions of Building using Damage Data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake," Proceedings of the 7th International Conference on the Structural Safety and Reliability, Vol. 1, 349-354.
- Murao, O., and Yamazaki, F., (1997). "Analysis on Building Damage in Nada Ward due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake," Proceedings of the 24th JSCE Earthquake Engineering Symposium, Vol. 2, 1261-1264 (in Japanese).
- Murao, O., and Yamazaki, F. (1999). "Comparison of Building Damage Evaluation by Local Governments after the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake," Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, 515, 187-194 (in Japanese).
- National Land Agency (1997). White Paper for Disaster Prevention 1997 (in Japanese).
- Shabestari, K. T. and Yamazaki, F. (1998) "Attenuation Relation of JMA Seismic Intensity Based on JMA-87-Type Accelerometer Records," Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center, No. 31, 13-21, Institute of Industrial Science, University of Tokyo.
- Sugiura, M., and Yamazaki, F. (1998). "Fragility Curves for Buildings based on Damage Data in Takarazuka due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake," Proceedings of the 10th Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol. 2, 3385-3390 (in Japanese).
- Yamaguchi, N., Yamazaki, F., and Wakamatsu, K. (1998). "Analysis of Building Damage in Nishinomiya City due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake," Proceedings of the 6th U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Seattle, USA, 11p, CD-ROM.
- Yamaguchi, N., and Yamazaki, F. (1999). "Estimation of Strong Motion in the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake based on Building Damage Data," Proceedings of the Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and its Applications, Taipei, Taiwan, 478-489.
- Yamaguchi, N., and Yamazaki, F. (2000). "Fragility Curves for Buildings in Japan Based on Damage Surveys after the 1995 Kobe Earthquake," Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

RISK EVALUATION METHOD OF BUILDING COLLAPSE FROM THE EXPERIENCE OF THE KOBE EARTHQUAKE

Osamu MURAO¹, Hiroyuki TANAKA² and Fumio YAMAZAKI¹

SUMMARY

Tokyo Metropolitan Government (TMG) recently published “The Earthquake Area Vulnerability Assessment of Tokyo” based on soil conditions, building inventory and social conditions. It shows relative seismic risks in Tokyo. “The area danger levels” were determined with respect to building collapse, fire outbreak and spread, human casualties, and access for evacuation. The method used in the report was applied to Nada Ward, Kobe City using the inventory before the 1995 Hyogoken-Nanbu (Kobe) Earthquake. The obtained “building collapse risk” was compared with the actual damage of the ward due to the earthquake. The result of the comparison indicates that the weights used in the TMG method should be adjusted since the obtained collapse risk was strongly influenced by the building density of each city block. Then a revised method to evaluate “building collapse risk” was proposed. The new building collapse risk corresponds to the severe damage ratio of buildings and it reflects the characteristics of buildings and sites. The proposed method may be useful for seismic risk assessments by local governments in Japan.

1. INTRODUCTION

In recent years, scores of earthquake damage assessment studies have been conducted by local and national governments in Japan. An earthquake causes fires, liquefaction, land slides and lifeline interruptions as well as damage to buildings and infrastructures. The characteristics of an area influence the appearance of seismic damage. It is very important for local governments, not only of prefectures but also of cities or wards, to grasp seismic vulnerability of each city block. Recently, GIS technologies enable us to assess seismic risk and to predict earthquake damage visually using inventory and other natural and social data [Yamazaki et al., 1995].

Tokyo Metropolitan Government [TMG, 1998] recently published “The Earthquake Area Vulnerability Assessment of Tokyo” based on building inventory, soil conditions, and social conditions. The earthquake area vulnerability assessment by TMG is similar to damage assessments for scenario earthquakes [TMG, 1997]. But there are differences in the methods to predict various kinds of damage. In the damage assessment of TMG, specific earthquake source models were used and amounts of various damage were enumerated while in the area vulnerability assessment of TMG, no specific source model was considered and only relative seismic risks of each city block were evaluated using rather simple methods. “The area danger levels” in the TMG report, which are basic indices to assess seismic vulnerability of each district block (corresponding to the postal address), were

¹ *Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106-8558, Japan*

² *Graduate School of Engineering, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan*

determined with respect to building collapse, fire outbreak and spread, human casualties, and access for evacuation. The method may be useful for the authority of each administrative ward to identify high-risk areas for which they give priorities for urban redevelopment.

In this study, in order to examine the assessment method of building collapse risk due to earthquakes, the method used in the TMG's report was applied to the Nada Ward, Kobe City using building inventory before the 1995 Kobe Earthquake. The obtained "building collapse risk" was compared with the actual damage of the ward due to the earthquake and a revised method to estimate "building collapse risk" which fits the actual damage was proposed.

2. APPLICATION OF THE METHOD OF TMG TO NADA WARD

2.1 Building Collapse Risk by the Method of TMG

"The Earthquake Area Vulnerability Assessment of Tokyo" [TMG, 1998] shows high-risk zones in Tokyo. "The area risk levels" were determined with respect to building collapse, fire outbreak and spread, human casualties, and access for evacuation. In this study, the building collapse risk was adopted as a research object.

The building collapse risk by the method classified all the district blocks in Tokyo into five levels using the amount of risk calculated using weights for several elements related to seismic vulnerability of buildings. The elements are building characteristics and site characteristics. These weights were determined by experiences of six professionals. The amount of risk (simply call "risk" hereafter) for building collapse was calculated by the following equations (1) and (2):

$$Q_{kn} = D_k (1 - W_{kn} \cdot U_{kn}) \quad (1)$$

$$U_{kn} = u_{1n} \cdot u_{2n} \cdot u_{3n} \cdot u_{4n} \cdot u_{5n} \quad (2)$$

in which k is the building category (1-19), Q is the amount of risk, D is the number of buildings per 1 km², W is the weight for earthquake resistant capacity of buildings of the category k , U is the weight for site characteristics, u_i 's are the weights for subsurface condition (u_1), for possibility of liquefaction (u_2), for large-scale cut-and-fill (u_3), for reclaimed land (u_4), and for steep slope (u_5), n is each value by the 6 specialists. By adding Q_k 's for all the structural types in a block, the amount of risk for the block is evaluated.

This method is simple and easy to use. However, the physical meaning and objectivity of the weights are unclear.

2.2 Building Collapse Risk of the Nada Ward

The building collapse risk of the Nada Ward in Kobe City was calculated using the inventory and soil data by the method of TMG. Buildings in the Nada Ward were classified into 19 categories by the structural type and construction period. The site characteristics of each district block (Figure 1) were employed to calculate the seismic risk. As a result, the building collapse risk was determined as shown in Figure 2(a).

Figure 2(b) shows the ratio of severely damaged buildings due to the 1995 Kobe Earthquake investigated by Kobe City and Figure 2(c) shows the distribution of the peak ground velocity (PGV) estimated by Murao and Yamazaki (2000) from the building damage. The area of large PGV value in the figure almost corresponds to the belt of JMA intensity 7 determined by JMA's field survey [JMA, 1997] while this general tendency was also recognized in the distribution of high severe damage ratio in Figure 2(b). It is noticed that the distribution of building collapse risk evaluated by the method of TMG (Figure 2(a)) and the density of buildings (Figure 1(c)) look quite similar.

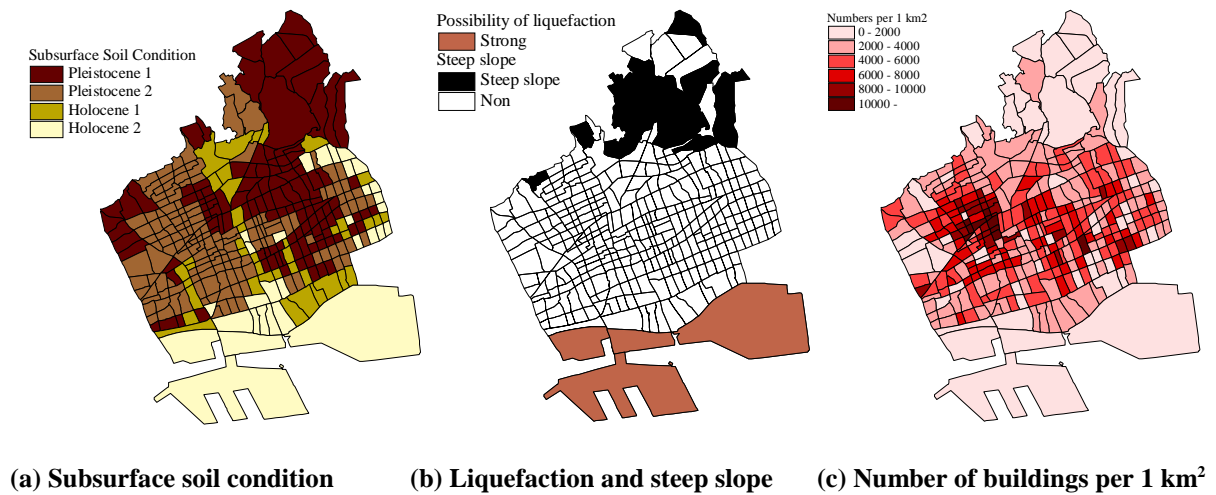


Figure 1: Site characteristics of each district block in Nada Ward

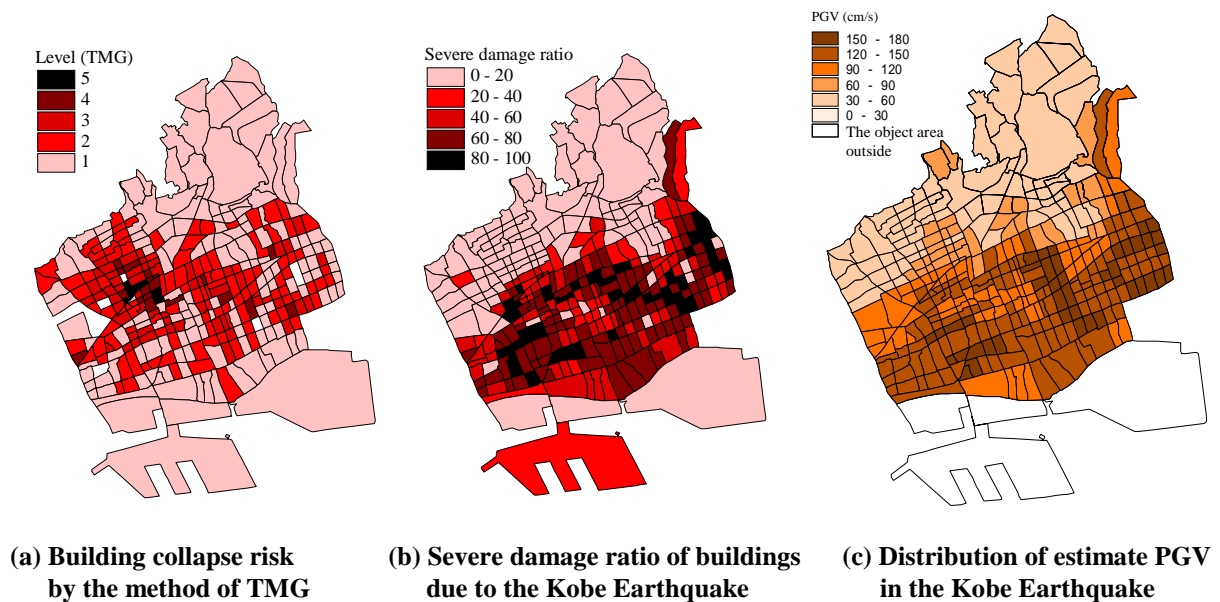
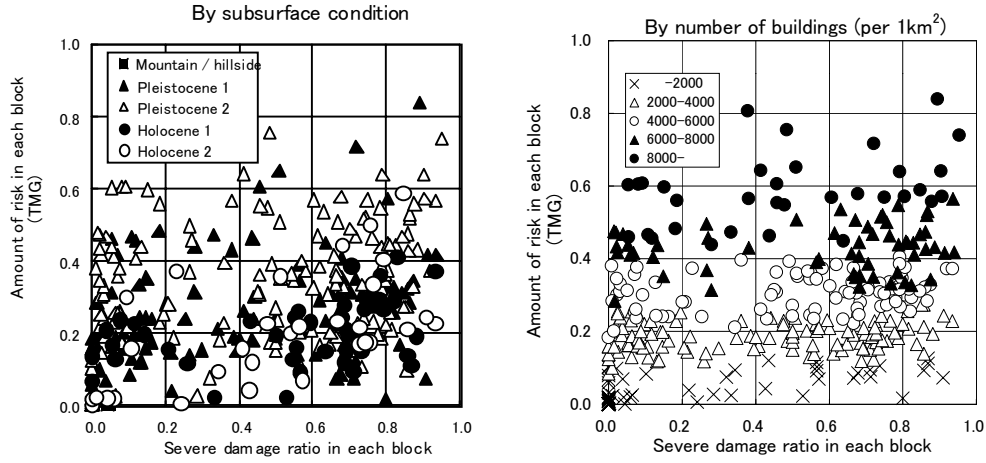


Figure 2: Building collapse risk and actual damage in Nada Ward

2. 3 Building Collapse Risk by the Method of TMG and Actual Damage in the Nada Ward

The building collapse risk and the actual damage ratio for each district block were compared in Figure 3. In the figure, the amount of risk was standardized to have a value between 0 to 1. The left figure shows the influence of the subsurface soil condition while the right figure shows the influence of the density of buildings (number of buildings per 1 km²). It seems that these two factors, the building collapse risk and the actual severe damage ratio, do not look highly related although the former is strongly influenced by the building density of each district block.

In the method of building collapse risk evaluation by TMG, the amount of risk is the product of the number of buildings per unit area and the term consisting of the weights as shown in equation (1). Thus the risk in densely built-up areas became high by this method. “The building collapse risk” by TMG may be related to the human casualty and the evacuation risk since these risks are related to the number or density of buildings. However, “the collapse of a building” itself is usually not influenced by the density of buildings in an area. Hence a revised amount of risk, which divides the evaluated amount of risk (by TMG method) by the total number of buildings in the block, is proposed.



(a) Comparison by subsurface soil condition (b) Comparison by density of buildings

Figure 3: Comparison between the collapse risk (TMG) and the actual damage due to the Kobe Earthquake in Nada Ward

3. NEW EVALUATION METHOD OF BUILDING COLLAPSE RISK COMPATIBLE WITH ACTUAL DAMAGE RATIO

3.1 Modifications to the Method of TMG

We will introduce modified “building collapse risk” as an index that reproduces the actual severe damage ratio of buildings in Nada Ward due to the Kobe Earthquake. First, in equation (1), “ D_k : the number of buildings per 1 km²” is replaced by “ N_k : the ratio of buildings with category k in number”. By this, the building collapse risk which reproduces the severe damage ratio can be obtained. Next, the weights used in equation (1) were examined. In the method of TMG, the weights for the seismic resistance of buildings and the site condition are simply multiplied when evaluating the collapse risk. However, the collapse risk may be affected by the both parameters at the same time. Hence matrix-type weights should be introduced to consider the joint effect of the building resistance and the site condition (intensity of strong motion) on the collapse risk.

The seismic resistance of buildings was determined based on the fragility curves proposed by the present authors [Murao and Yamazaki, 2000], which consider the structural type and construction period. The site condition was classified into five subsurface soil types (mountain, terrace, alluvial fan, delta and reclaimed land) from borehole logging data of Nada area and geomorphological land classification maps. In this study, matrix-type weights were determined and then the building collapse risk which is equivalent to the result of a fragility analysis was obtained.

3.2 Method of New Building Collapse Risk Evaluation

A new building collapse risk evaluation method is proposed in this study. In the proposed method, “ P_i : the building collapse risk” is defined in the following equation as an index instead of “the amount of risk” in the method of TMG.

$$P_i = \sum_{k=1}^m N_k \cdot W_{kl} \quad (3)$$

in which k is the building category (1-14), l indicates the subsurface soil condition (1-4), N_k is the ratio of buildings with category k in number, W_{kl} is the matrix-type weight for building category k and soil condition l . Classifying the collapse risk into 5 levels, a risk level of each block is obtained. By this equation (3), the effect of the building density is removed from the collapse risk evaluation, and more realistic risk that represents the building characteristics and site condition of an area can be calculated.

3. 3 Reliability Analysis to Obtain Damage Probability

The method to determine the weights for building collapse risk applicable to other areas in Japan is proposed using the basic reliability analysis theory [Ang and Tang, 1984; Okada and Nakano, 1988]. The vulnerability functions (fragility curves) for severely damaged buildings developed by the authors [Murao and Yamazaki, 2000] were used as the resistance of buildings. Figure 4 shows the probability density functions for the seismic resistance of various kind of buildings with respect to PGV. In these functions, the seismic resistance for each structural type and construction period was modeled by a log-normal distribution based on the actual damage data in Nada Ward due to the 1995 Kobe Earthquake. It is observed in the figure that the seismic resistance of buildings has large variability even for the same structural type and construction period. The values of the two parameters of the log-normal distributions are listed in Table 1.

Figure 5 shows the probability density functions of the estimated PGV in the Kobe Earthquake for different topographical conditions in Nada Ward. These functions were also obtained by a statistical analysis of the estimated PGV values in Nada Ward and the values of their parameters are shown in Table 1. The peak PGV value of the density function becomes large in the order of softer ground: mountain, terrace, alluvial fan, and delta. The PGV value is widely distributed for mountain and alluvial fan while the range is comparatively narrower for terrace and delta. But, of course, this observation is the case for Nada Ward in the Kobe Earthquake; not necessarily the general trend of strong ground motion in Japan.

Using the basic reliability analysis theory, the probability for severe damage P_f is obtained by the following equation:

$$P_f = P(R/S < 1) = 1 - \Phi(\lambda_z / \zeta_z) \quad (4)$$

in which R is the probability density function for the seismic resistance of buildings, S is the probability density function for the strong motion index (e.g. PGV), Φ is the cumulative probability of the standard normal distribution, $\lambda_z = \lambda_r - \lambda_s$, and $\zeta_z = (\zeta_r^2 + \zeta_s^2)^{1/2}$, assuming independence between R and S . Using this equation, the weights for the building collapse risk can be calculated and the values are shown in Table 1. Figure 6(a) plots the comparison of the weights for the building collapse risk evaluated by equation (4) and the severe damage ratio observed in the Kobe Earthquake. It is seen that the obtained weights are compatible with the actual severe damage ratio. The building collapse risk of Nada Ward calculated by this method is plotted in Figure 6(b). Comparing this figure with the distribution of severe damage ratio in Figure 2(b), they look quite similar. Thus, it is conducted that the severe damage ratio was almost reproduced by the proposed method.

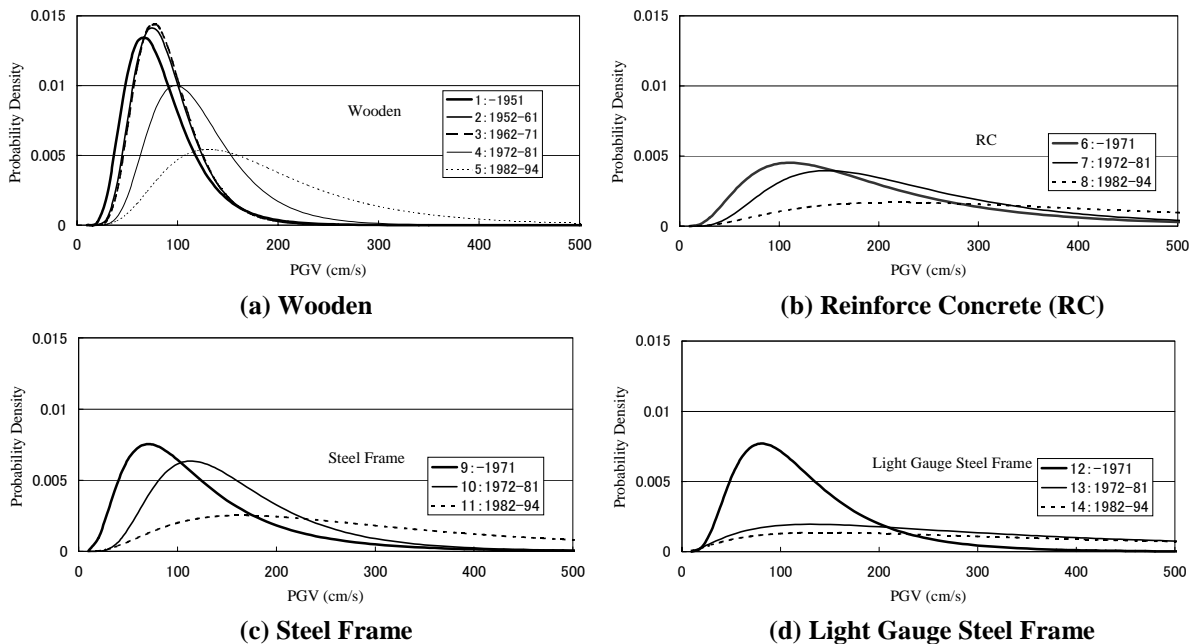


Figure 4: Probability density functions for the seismic resistance of buildings with respect to PGV

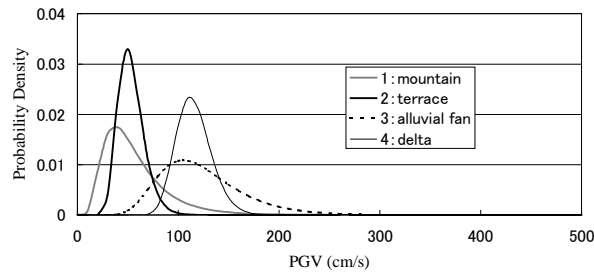


Figure 5: Probability density function of the estimated PGV in the 1995 Kobe Earthquake for different topographical conditions in Nada Ward

Table 1: Parameters of the probability density functions and obtained weights that reproduce the severe damage ratios due to the Kobe Earthquake

		r		Mountain	Terrace	Alluvial Fan	Delta	
		r	r	1	2	3	4	
s	-	-	-	3.90	3.95	4.76	4.74	
s	-	-	-	0.53	0.24	0.33	0.15	
Wooden	-1951	1	4.36	0.41	24.6	19.5	77.9	80.8
	1952-61	2	4.44	0.35	19.8	12.6	74.8	78.3
	1962-71	3	4.45	0.34	19.1	11.6	74.6	78.2
	1972-81	4	4.73	0.38	10.1	4.1	52.7	51.0
	1982-94	5	5.12	0.50	4.6	1.7	27.5	23.1
RC	-1971	6	5.12	0.65	7.1	4.4	31.0	28.2
	1972-81	7	5.33	0.58	3.4	1.3	19.7	16.1
	1982-94	8	6.01	0.79	1.3	0.6	7.3	5.8
Steel Frame	-1971	9	4.64	0.62	18.2	15.0	57.0	56.2
	1972-81	10	4.97	0.49	6.8	3.0	36.1	32.4
	1982-94	11	5.64	0.73	2.7	1.4	13.7	11.3
Light Gauge Steel Frame	-1971	12	4.70	0.55	14.8	10.7	54.2	53.1
	1972-81	13	5.82	0.97	4.1	3.1	15.2	13.6
	1982-94	14	6.19	1.10	3.1	2.4	10.8	9.7

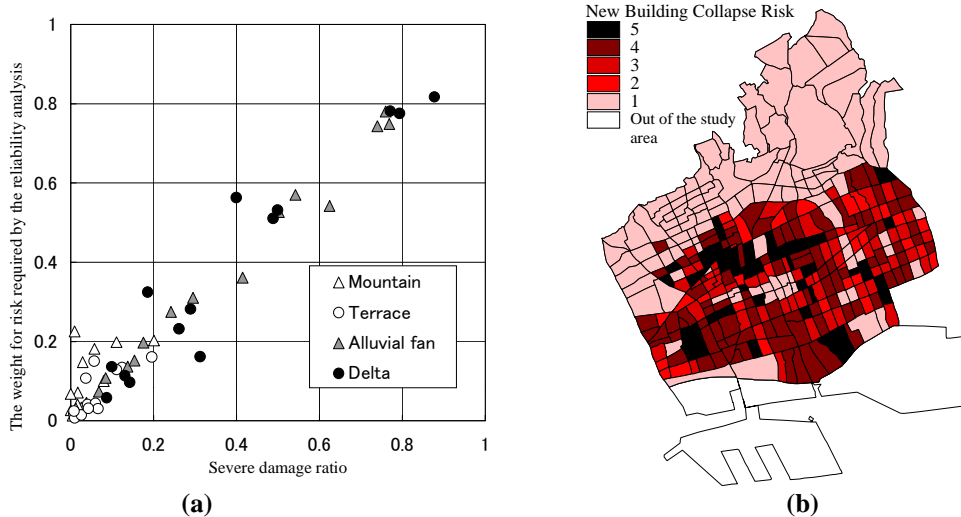


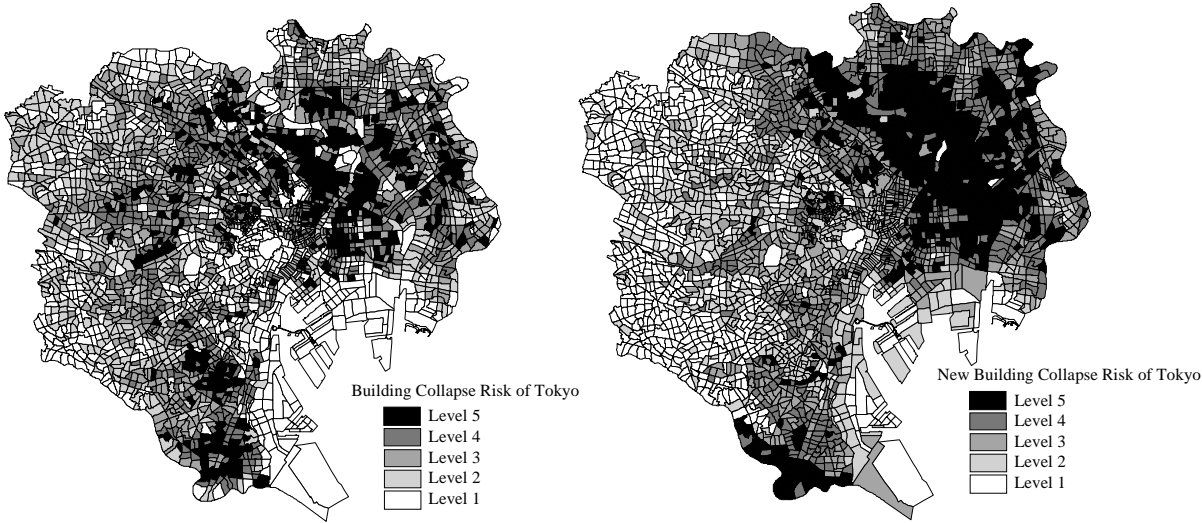
Figure 6: (a) Comparison between the actual severe damage ratio and the evaluated severe damage probability; (b) The proposed building collapse risk of Nada Ward

3. 4 New Building Collapse Risk of Tokyo

Using the method proposed above, the building collapse risk in Tokyo was evaluated. In calculating the new building collapse risk, the median of PGV in mountain areas was assumed to be 30cm/s, which was used in the

damage assessment study of TMG (1997) for near-field earthquakes. The median values of PGV in other topographical conditions were obtained by multiplying the amplification factors proposed by Yamazaki et al. (1999) using the observed records by JMA-87-type accelerometers. The logarithmic standard deviation of PGV was assumed as the record-to-record (intra-event) variation in the attenuation relation of PGV proposed by Molas and Yamazaki (1995).

Under these assumptions, the new building collapse risk of Tokyo was calculated and it was compared with that by TMG as shown in Figure 7. It is seen in the figure that the risk level in the eastern part of Tokyo (lowland with soft soil) is large by the proposed method while the high-risk blocks are distributed outside of Yamanote Line circle (highly built-up wooden building areas) by the TMG method. Soil condition and building type are dominant factors to determine the collapse risk in the proposed method. In the method of TMG, the density of buildings per unit area almost determines the building collapse risk. However, since the Urban Planning Bureau of TMG uses this building collapse risk in the selection of areas for urban redevelopment, the risk by the TMG method may have different meaning from the risk evaluated by the proposed method.



(a) Building collapse risk by TMG (1998) (b) Building collapse risk by the proposed method

Figure 7: Comparison of building collapse risk in Tokyo by two methods

4. CONCLUSIONS

In this study, the building collapse risk of the Nada Ward, Kobe City was calculated based on the method of Tokyo Metropolitan Government (TMG) using building inventory and soil condition data. The evaluated building collapse risk was compared with the actual building damage due to the 1995 Kobe Earthquake. Since the number of buildings in unit area is a dominant factor to determine the building collapse risk by the TMG method, the evaluated risk was high for densely built-up areas and it was not very good agreement with the actual damage distribution. We considered that “the collapse of a building” itself is not influenced by the density of buildings in an area. Hence a revised method, which divides the evaluated amount of risk by the total number of buildings in an area (removing the effect of building density in an area), was proposed.

As the index of building collapse risk, the severe damage ratio of buildings in a city block is considered. Based on the actual damage in Nada Ward due to the Kobe Earthquake, the probability density functions for the seismic resistance of buildings and the peak ground velocity (PGV) were obtained. These functions consider the structural type and construction period for the building resistance and the topographical condition for the ground motion intensity. Employing the basic reliability analysis theory, the severe damage probability of buildings was evaluated analytically and it was confirmed that the obtained the severe damage ratio reproduce the actual one.

The proposed method was further applied to the building collapse risk evaluation of Tokyo and its result was compared with that by the TMG method. It is observed that the building collapse risk in the eastern lowland of Tokyo is large by the proposed method while the high-risk zone is distributed in highly built-up wooden building areas by the TMG method. These observations can be explained by the fact that the soil condition and building type are dominant factors to determine the collapse risk in the proposed method and the density of buildings per unit area almost determines the building collapse risk in the TMG method.

The physical meaning of *building collapse risk* was interpreted properly by the proposed approach and it is generally applicable to entire Japan. Assessment of building collapse risk in urban areas is one of the important factors to be considered in urban planning. Hence the proposed method may be conveniently used by local governments in Japan for the seismic risk assessment of district level.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their gratitude to Kobe City and Tokyo Metropolitan Government for providing the building data and inventory used in this paper.

REFERENCES

- Ang, A. H-S., and Tang, W. H. (1984), *Probability Concepts in Engineering Planning and Design*, Vol. II, John Wiley & Sons.
- Japan Meteorological Agency (1997), "Report on the Hyogo-ken-Nanbu Earthquake", *Technical Report of JMA*, No. 119 (in Japanese).
- Molas, G. L., Yamazaki, F. (1995), "Attenuation of Earthquake Ground Motion in Japan Including Deep Focus Events," *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85, 5, pp. 1343-1358.
- Murao, O., and Yamazaki, F. (1999), "Re-estimation of Strong Ground Motion in Nada Ward based on Inventory and Building Damage Data", *Journal of Structural and Construction Engineering*, AIJ, 523 (in Japanese).
- Murao, O., and Yamazaki, F. (2000), "Development of Fragility Curves for Buildings Based on Damage Survey Data of a Local Government after the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake", *Journal of Structural and Construction Engineering*, AIJ, 527 (in Japanese).
- Okada, T., and Nakano, Y. (1988), "Reliability Analysis on Seismic Capacity of Existing Reinforced Concrete Buildings in Japan", *Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. VII, pp. 333-338.
- Tokyo Metropolitan Government (1997), *The Report on the Damage Assessments for Scenario Earthquakes in Tokyo due to Near-field Earthquakes* (in Japanese).
- Tokyo Metropolitan Government (1998), *The Fourth Report of Survey of the Earthquake Area Vulnerability Assessment* (in Japanese).
- Yamazaki, F., Katayama, T., Nanbu, S., Kato, T., and Tsubokawa, H. (1995), "Earthquake Scenario of Urban Residential Areas Using Microscopic GIS Data", *Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation*, 2, pp. 1416-1423.
- Yamazaki, F., Wakamatsu, K., Onishi, J., and Yamauchi, H. (1999), "Relationship between Geomorphological Land Classification and Soil Amplification Ratio Based on JMA Strong Motion Records", *Bulletin of Earthquake Resistant Structure Research Center*, No. 32, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, pp. 17-33.

Use of GIS for the Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design

Osamu MURAO and Fumio YAMAZAKI
Institute of Industrial Science
University of Tokyo
4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505, JAPAN
Tel: (81)-3-5452-6388, Fax: (81)-3-5452-6389
E-mail: murao@iis.u-tokyo.ac.jp

KEY WORDS: Urban Safety, GIS, *Image of the City*, Environmental Design, Disaster

ABSTRACT: In Japan, where earthquakes occur frequently, it is important to carry out urban planning considering natural disasters. However, it appears that Japanese cities have not been designed with any definite visions of urban safety based on previous research concerning natural disasters in Japan, except for a few cases. It is necessary for people in Japan, which has been plagued with many earthquakes throughout history, to propose a future vision of a city from the viewpoint of urban safety. On the other hand, recent computer technology enabled the improvement of real-time monitoring systems after the 1994 Northledge Earthquake and the 1995 Kobe Earthquake. In this paper a method of analyzing and designing a city, based on the viewpoint of urban safety, is proposed. This method, named MUSE (Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design), is based on the theory of *The Image of the City* by Lynch (1961), and some urban physical elements are defined as parts of an organic system. Using the MUSE with *Arc/View 3D analyst*, we can easily and visually simulate the city as a three-dimensional world, a task which previously required much time to express by models, on a monitor. The authors constructed vulnerability functions (Murao and Yamazaki, 1999) and proposed the *Method for Building Collapse Risk Assessment* (Murao and Yamazaki, 2000). Applying these methods of urban safety assessments to the MUSE should make it useful for early damage assessment systems. Moreover, by combining it with recent technology the MUSE will be realized for urban safety in the future.

1. Introduction

In Japan, where earthquakes occur frequently, it is important to carry out urban planning considering natural disasters. However, it appears that Japanese cities have not been designed with any definite visions of urban safety based on previous research concerning natural disasters in Japan, except for a few cases. It is necessary for people in Japan, which has been plagued with many earthquakes throughout history, to propose a future vision of a city from the viewpoint of urban safety. The proposed vision must also be useful for other countries in which earthquakes often occur. On the other hand, the recent computer technology enabled the improvement of real-time monitoring systems after the 1994 Northledge Earthquake and the 1995 Kobe Earthquake. Using future technology, it will become possible to easily simulate urban visions according to various situations. The authors constructed vulnerability functions for buildings based on actual damage data of the 1995 Kobe Earthquake (Murao and Yamazaki, 1999) and proposed the *Method for Building Collapse Risk Assessment* (Murao et al., 1999, Murao and Yamazaki, 2000). The use of future technology and the proposed method of urban safety assessment should be useful for early damage assessment systems. This paper focuses on urban physical environments, and we propose a method named MUSE (the Method of Urban Safety

Analysis and Environmental Design) to analyze a city from the viewpoints of urban safety.

2. Image of a City

It might be difficult for us to recognize differences among cities with physical elements. Lynch (1960) proposed the method called “*The Image of the City*” to consider the differences between Boston, Jersey City and Los Angeles. In his theory, Lynch classified physical elements of cities into five types and analyzed the cities using the idea called *imagability*, as shown in Figure 1. These five types of elements which were “paths”, linear elements on which people can pass, such as like streets; “edges”, other linear elements which people cannot cross, like coasts; “districts”, areas that people recognize to be identical; and “nodes”, important intersections and symbolized “landmarks” in the city. The proposed method was an experimental attempt to analyze cities visually using urban physical elements.

3. Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design

3.1 City as an organic system

After World War II, large-scale development for new towns was carried out worldwide. In those days, some new methods for designing cities were considered by many architects to deal with the social situation. Tange (1961) in *Tokyo Project 1960* and Smithon and Smithon (1967) in *Urban Structuring* tried to design cities in analogy to living organisms (structure of human body, trunks or leaves of trees, etc.), as shown in Figure 2. These theories or an organic city can

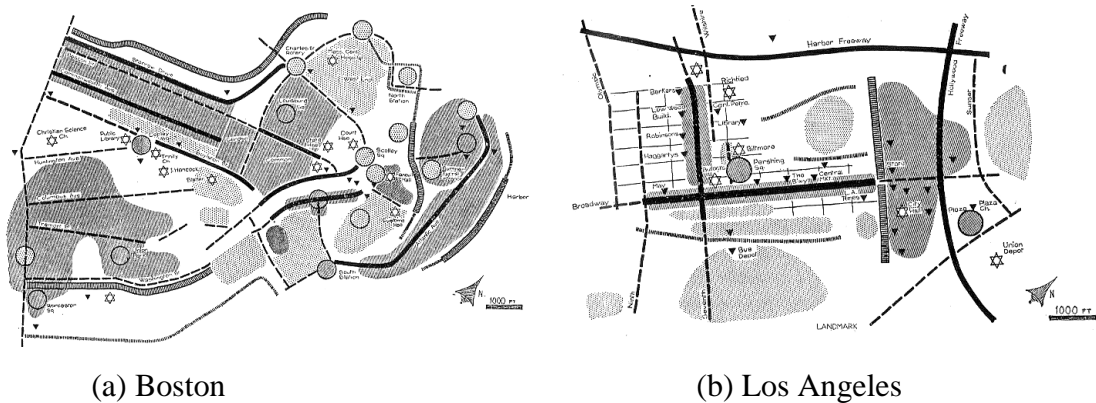


Figure 1 Images of cities by Lynch (1960)

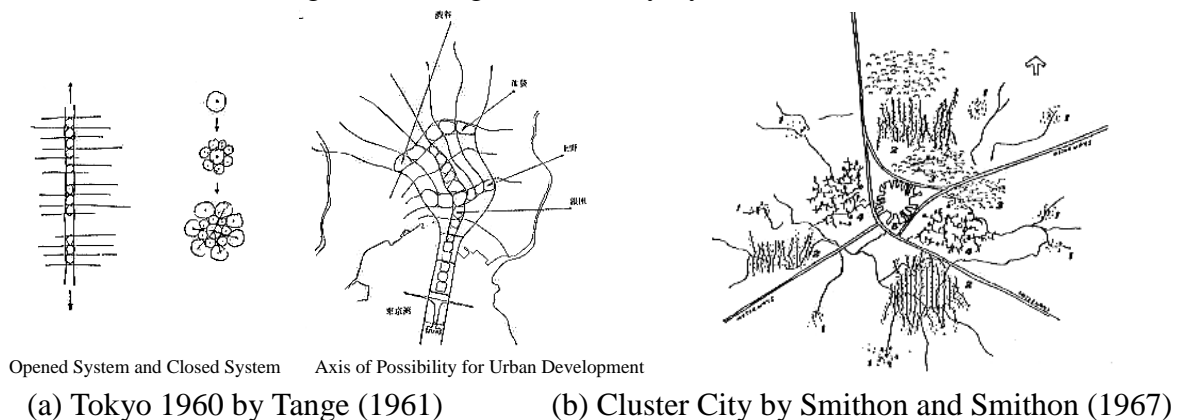


Figure 2 City as an organic system

be applied for urban safety planning. Referring to *The Image of the City*” by Lynch (1960) and considering the city to be an organic system, the MUSE is proposed.

3.2 Elements of MUSE

MUSE is a method of analyzing, designing and simulating a city, in which urban physical elements are defined as parts of the organic system in GIS. The physical elements are classified into the following 10 types (Figure 3, 4 and Figure 5).

Element-0: Imaginary Walls

Element-I: Subjects (as Physical Dynamic Elements): people, bicycles, cars, trains, etc.

Element-II: Shapes (as Physical Static Elements)

a. Paths (Leading Paths and Secondary Paths): streets, expressways, alleys, railways, etc.

b. Edges: coastlines, riverbanks, long walls, edges of developed districts, etc.

c. Cells: town blocks, etc.

d. Voids: open spaces, public squares, parks, playgrounds, campuses, parking lots, etc.

e. Cores: city halls, ward offices, elementary schools, hospitals, etc.

Element-III: Webs (as Systematic Elements): common ducts, lifelines, water supply, etc.

Element-IV: Nature (as Natural Elements): ponds, lakes, rivers, green belts, farms, etc.

Element-0: Imaginary Walls

It is important to deal with an area as a closed system. The “imaginary walls” are defined as invisible walls on the boundaries of the area. Usually the area may be an administrative district like a city. It is also possible to change the boundaries according to each occasion. The “imaginary walls” are vertical planes to close off the area. Imagining these walls in the area of analysis, it becomes possible to divide the city into inside and outside and to measure such factors as the amount of traffic, traffic density, and the number of distribution channels.

Element-I: Subjects (as Physical Dynamic Elements)

We often compare a city to a stage as described by Lewis Mumford (1895-1990). It seems that the city has been developed as an artificial stage for people, the actors, and an audience. Subjects, such as people, cars, and trains, are defined as the principal dynamic element in the MUSE. In most cases, the materials and some information are transported by the movement of the “subjects”, like blood in a body.

Element-II: Shapes (as Physical Static Elements)

In the MUSE the main objects are urban physical environments, which are represented by

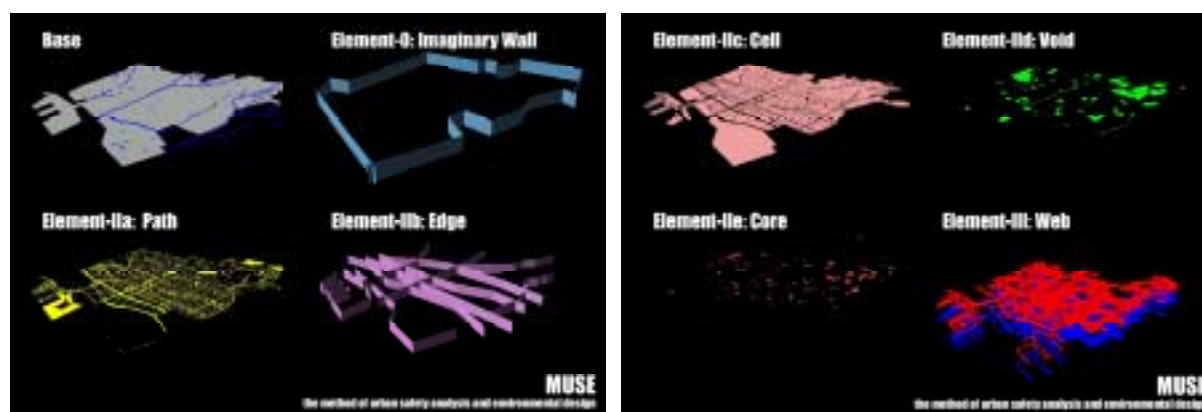


Figure 3 Elements of MUSE

the “shapes” as physical static elements. By operating these elements and considering these relationships, we can analyze the city.

Element-IIa. Paths (Leading Paths and Secondary Paths)

“Paths” are linear networked elements on which the “subjects” can travel, such as streets, expressways, alleys, and railways. The “paths” are public streets for the “subjects” in most cases; it is possible to put the “nature”, such as trees, on them to make a good view, and to put “webs”, such as a common ducts, under them for urban safety. The network of “paths” is like blood vessels and make up the structure of the city. Moreover, according to the size or the purpose, the “paths” are classified into two types: “leading paths” and “secondary paths”. Connected to other areas, the “leading paths” lead human activities in the city and can make up the principal networks of lifelines. In contrast, “secondary paths” are narrow humanscale streets, such as alleys, which are familiar to the residents.

Element-IIb: Edges

“Edges” are other linear elements which people cannot cross, such as coastlines, riverbanks, long walls, and edges of developed districts. These elements are useful in preventing of the spread of fires. By making on “edge” in a dangerous zone occupied by many old wooden houses, it is possible to lessen the amount of risk of the area.

Element-IIc: Cells

“Cells” are town blocks as fundamental units of the organic city in the MUSE. There are many different buildings in each “cell” and it has different characteristics according to the



(a) Total Image of MUSE



(b) Element 0: Imaginary Wall



(c) Element II-a: Path



(d) Element II-b: Edge

Figure 4 Image of MUSE (1)

structural types and construction period. By applying the vulnerability functions derived by Murao and Yamazaki (1999) or the *Building Collapse Risk Assessment* (Murao and Yamazaki 2000) to the “cell”, as shown in Figure 6, we can estimate the dangerous area in the city.

Element-II-d: Voids

“Voids” are places not occupied by buildings, such as open spaces, public squares, parks, playgrounds, campuses, parking lots. People gather in the “voids” to take part in various urban activities: taking a walk, meeting with others, playing, evacuating from fires, etc. Networks of “voids” and “paths” influence urban safety.

Element-II-e: Cores

“Cores” are point elements, such as buildings important in the case of a disaster: city halls, ward offices, elementary schools, hospitals, electric substations, etc. These buildings have special functions for disaster management, evacuation, utilities, lifeline control, and health care.

Element-III: Webs (as Systematic Elements)

While the “shapes” are the physical elements on the ground, the “webs” are basically systematic elements underground. The “webs” include each lifeline system, such as common ducts, water pipes, and optical fiber cables, and the systems are related to the “cores”.

Element-IV: Nature (as Natural Elements)

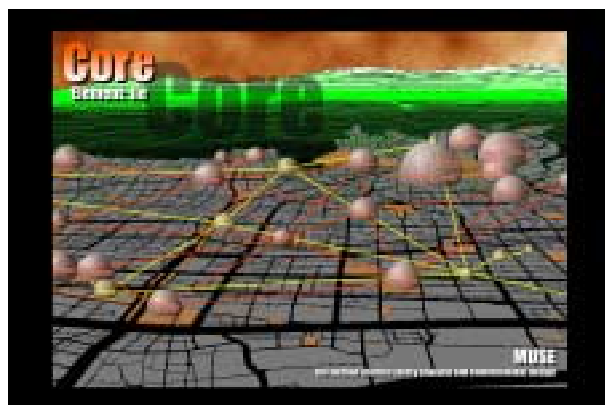
A city has its own nature, such as lakes, rivers, forests, groves and fields, according to its geographical features or climate. These natural elements, “nature”, will be essential elements in



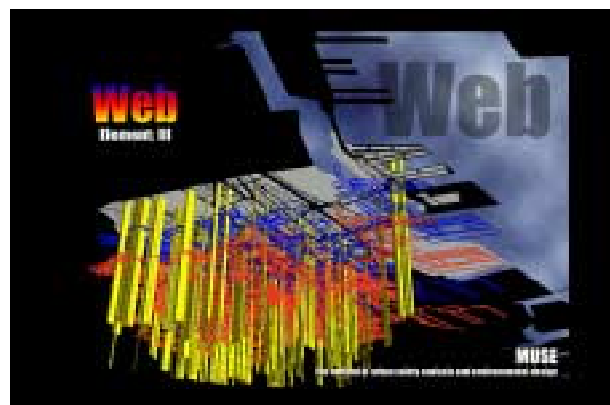
(e) Element II-c: Cell



(f) Element II-d: Void

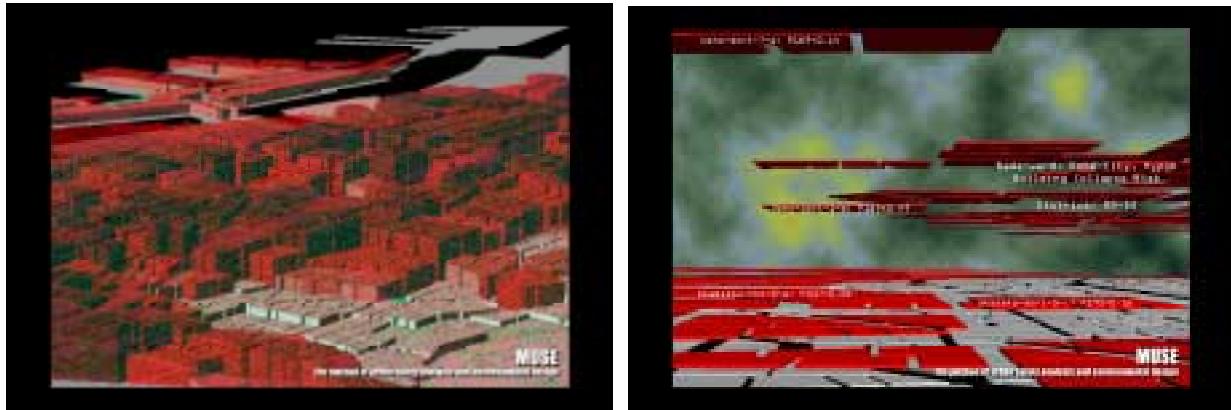


(g) Element II-e: Core



(h) Element III: Web

Figure 5 Image of MUSE (2)



(a) Distribution of Strong Ground Motion

(b) Building Collapse Risk

Figure 6 Display of urban safety analysis by the MUSE

the urban safety analysis and environmental design. Water from a river is useful for extinguishing fires, and networked greenbelts in the city can be firebreak belts. By combining “nature” with artificial elements, it is possible to make the city comfortable and safe.

4. Conclusions

In this paper a method of analyzing and designing a city was proposed, from the viewpoint of urban safety. The proposed method, called MUSE (the Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design), is based on the theory of *The Image of the City* by Lynch (1961), and the urban physical elements are defined as parts of an organic system. Using the MUSE with *Arc/View 3D analyst*, we can easily visually simulate the city as a three-dimensional world, a task which previously required much time by making models, on a monitor. The authors constructed vulnerability functions (Murao and Yamazaki, 1999) and proposed the *Method for Building Collapse Risk Assessment* (Murao and Yamazaki, 2000). By applying these urban safety assessment methods to the MUSE, it should be useful for early damage assessment systems. Moreover, by combining it with recent technology, the proposed method will be realized for urban safety in the future.

References

- Lynch, Kevin, (1960). *The Image of the City*, MIT Press.
- Murao, O., Tanaka, H., and Yamazaki, F., (1999). “Comparison of Building Collapse Risk and Actual Building Damage Due to the 1995 Kobe Earthquake,” *Proceedings of 6th Japan/United States Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction*, Kobe, Japan.
- Murao, O., and Yamazaki, F., (1999). “Development of Fragility Curves for Buildings Based on Damage Data due to the Hyogoken-Nanbu Earthquake,” *Proceedings of the Asian-Pacific Symposium on Structural Reliability and Its Applications*, 259-269, Taipei, Taiwan.
- Murao, O., and Yamazaki, F., (2000). “New Method for Building Collapse Risk Assessment Based on Damage Data Due to the 1995 Kobe Earthquake,” *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering* (in printing).
- Smithon, P., and Smithon, A., (1967). *Urban Structuring*, Studio Vista Ltd.
- Tange, K., (1961). *Tokyo Project 1960*, Kenzo Tange Laboratory.

謝辞

謝辞

本論文は、莫大な社会的損害を与え、多くの犠牲者を出した兵庫県南部地震の被害データを基に研究させていただき、博士論文としてまとめたものである。東京大学生産技術研究所に来て3年の月日が流れようとしているが、改めてこれら一連の研究が多くの犠牲の上に成り立っているという事実を謙虚に受け止めるとともに、今後も災害による被害を少しでも軽減させるための研究を続けようと、防災に関わる身として責任を感じる今日この頃である。

東京大学の山崎文雄先生、藤野陽三先生、小出治先生、中埜良昭先生、目黒公郎先生、そして横浜国立大学の村上處直先生らには、主査・副査として多大なる助言をいただいた。これらの貴重なアドバイスのおかげで、本論文を完成させることが出来、それと同時に今後の研究の方向性も見つけることが出来た。この場を借りて深く御礼申し上げたい。

本論文では、兵庫県南部地震の被災地域である尼崎市、伊丹市、宝塚市、西宮市、芦屋市、神戸市、明石市、北淡町の建物被害データを使用させていただくと同時に、建物被害調査の研究に関して協力をしていただいた。特に神戸市、北淡町の役所の方々には、研究の目的を理解していただき、データ使用に関して多大なる便宜をはかっていただいた。建築学会、都市計画学会、震災復興都市づくり特別委員会、兵庫県、建築研究所によるデータおよび資料は高頻度で利用させていただいた。関係者の方々に深く感謝したい。さらに、この場を借りて兵庫県南部地震により亡くなられた多くの方々のご冥福を祈るとともに、被災地の更なる復興を願う次第である。

指導教官である山崎文雄先生には、生産技術研究所で助手として研究をする機会を与えてくださったことに対して深く感謝したい。また各委員会、研究会等に参加させていただいたことで、多くの人々と知り合うことができた。そして本論文をまとめるにあたり、研究の方向づけから、詳細に至るまで熱心に指導していただいた。私が計画系出身であるため、構造的な観点からの指導は多いに刺激的であると同時に、専門知識が欠けていたばかりに戸惑いを感じることも少なくなかったが、山崎先生の根気良く暖かい指導のお蔭で、幅広い視点で研究をすることが出来た。

同じ研究グループの須藤研先生、目黒公郎先生、若松加寿江先生、及び INCEED の A. S. Herath 先生、D. Dutta 助手には、ミーティングやその他の行事を通して、公私それぞれの立場から数々の助言をいただくと共に、研究者としての生き方を教えていただいた。特に目黒先生とは飲む機会も多く、ある時は防災の研究者として、ある時は六本木の先輩として、ある時は兄貴分として、数多くの貴重なアドバイスをいただいた。研究室の学生、秘書にも感謝したい。同じ研究グループの仲間として、杉浦正美研究員、杉本寛子研究員、山口直也君らと交した多くの議論は研究の原動力となった。また田中宏幸君の協力により危険度評価の部分をもとめることが出来た。秘書の山田瑞枝さん、伊藤はるなさん、鼻戸友紀子さん、江上静さんらには、研究室の雑務を肩代わりしていただいた。生産技術研究所の先生方にもお世話になった。中埜良昭先生には芦屋市の調査および応急危険度判定について貴重な助言をいただいた。三神厚助手には、博士論文提出の事務手続きの面で何度も相談にのっていただいた。所内に KOBE net という情報の宝庫があったこと

謝辞

も研究をするうえでプラスになった。これまでに資料を提供してくださった方々，そして常にアンテナを張り巡らせ資料を収集するなど KOBEnet の運営をされてきた先生方にも感謝したい。

各研究会，委員会を通して知り合った多くの学会関係者の方々にもお世話になった。損害保険料率算定会の坪川博彰氏，佐伯琢磨氏，日本総合研究所の入江さやか女史には灘区，北淡町のデータ整理に関して協力していただいた。地震予知総合研究振興会の池田潤一氏，東京ガスの清水善久氏をはじめとする「地震時被害推定・対応システムの開発に関する研究」の委員会の方々との打合せは研究の方向性を定める上で参考になった。また文部省の特定領域研究「社会基盤システムの実時間制御技術」研究の打合せからも多いに刺激を受けた。京都大学の清野純史先生，鳥取大学の野田茂先生，名古屋大学の福和伸夫先生，飛田潤先生，日立製作所の瀬古沢照治氏からは貴重な助言をいただいた。鳥取大学の盛川仁先生，松岡昌志氏をはじめとする地震防災フロンティア研究センターのスタッフには，同世代ということで飲みながら，相談にのっていただいた。奈良大学の確井照子先生には GIS の使用に関して 1 週間に渡り特別に指導をしていただいた。そのお蔭で，MUSE をはじめとする自分のイメージを視覚化することが出来た。エコプランの三船康道氏には防災および都市デザインの世界に身を置くという共通の立場から，相談にのっていただき，貴重な資料も快く貸していただいた。これらの方々にも心からお礼申し上げたい。

経済的な援助としては，山崎先生代表の文部省科学研究費および山崎研究室に対する各組織からの補助によるところが大きかったが，個人的にも 2 年間に渡る奨励研究が採用されたお蔭で，研究費に困ることなく研究することが出来た。改めて感謝したい。

本論文で提案した MUSE という考え方は，生産技術研究所以前の経験から生まれている。横浜国立大学の村上處直先生，佐土原聡先生には，アメリカ研修など多くの素晴らしい経験をさせていただき，大学院卒業後も多にお世話になっている。兵庫県南部地震直後に防災都市計画研究所で働く機会を与えてくれた両先生に感謝したい。Virginia Polytechnic Institute の G. Hunt 先生には実際の建築・都市に触れながら多くのことを教えていただいた。また生産技術研究所に来る際に便宜を図って下さった早稲田大学の尾島俊雄先生，防災科学技術研究所の片山恒雄先生にも心よりお礼申し上げたい。尾島俊雄先生には早稲田大学内の災害情報センターに所属していた際に，壮大な都市ビジョンについて触れる機会を与えてくださり，勉強させていただいた。防災都市計画研究所，災害情報センターの所員の方々にも，災害・防災という分野に関して多くのことを教えていただいた。特に元谷豊，井田敦之の両氏とは建築について議論することが多く，良き友人として大変お世話になった。接することは少なかったが，東京大学教授であり建築家の安藤忠雄氏の考え方，言動，作品からは，心の師として多くの影響を受けてきた。コンピュータシミュレーションに対する考え方は，大学院時代にお世話になった建築家の渡辺誠氏からの影響が大きい。また横浜国立大学助教授であり建築家でもある北山恒氏には，建築に関する多くのことを教えていただいた。「防災という立場から，村尾君にしか出来ないことがあるはずだ。」という氏の言葉を思い出し，どれだけ励みとなったことか。これらの方々から受けた影響は計り知れず，今後も研究を続けていく上でまだまだ学ぶことは多いであろう。

謝辞

大学院時代に経済的な面で支援していただいた(株)工都冷熱にも深く感謝したい。大学時代の仲間である SLUICEWAY の友人達には私的な立場から常に励まされて来た。中でも伊藤寛隆、青山文彦の両氏は、私の良き理解者であった。高校時代からの友人である阿部皇二、中島均、針谷俊也らは、数学的思考、都市環境、建築設計という各立場から相談にのってくれた。

弟の俊彰、妻の家族も応援してくれた。妻の奈保はことあるごとに、励まし、力づけ、ある時は批判し、ある時は誉め、この数年間の悲しみと喜びを共有してくれた。私の一番の理解者である彼女がいてくれたお蔭で、多いに勇気づけられ、精神的にも安定し、本論文を書き上げることが出来たと思う。

これらの方々の御理解、御協力なくして本論文は完成しえなかった。博士論文を書き上げられたことにことに対して、これまでお世話になった全ての方々に改めて謝意を表したい。

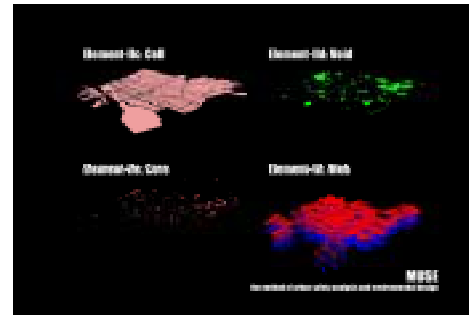
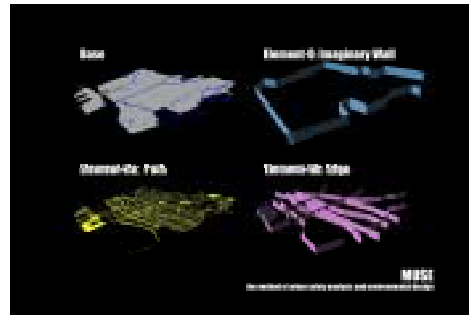
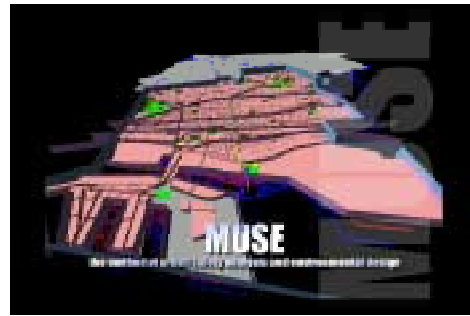
最後に、本論文を書き終えたことを最も喜んでくれたであろう、親不孝ばかりかけていた両親に、感謝を込めて本書を捧げる。

1999年11月 村尾 修

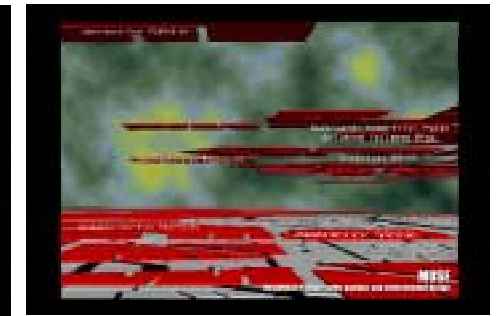
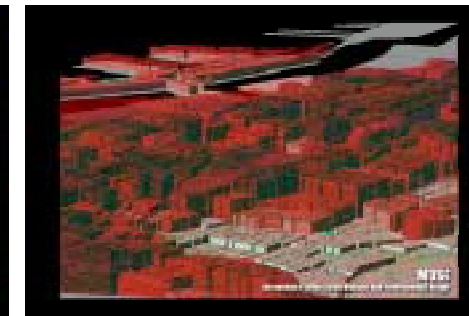
MUSE

The Method of Urban Safety Analysis and Environmental Design

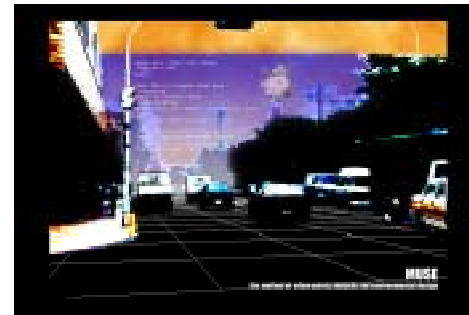
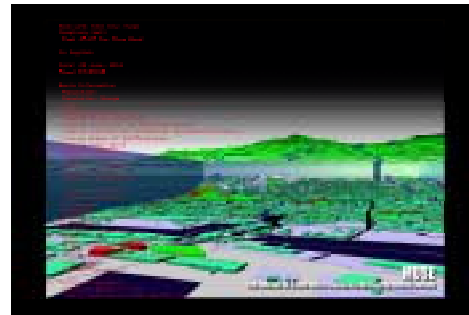
Total Image



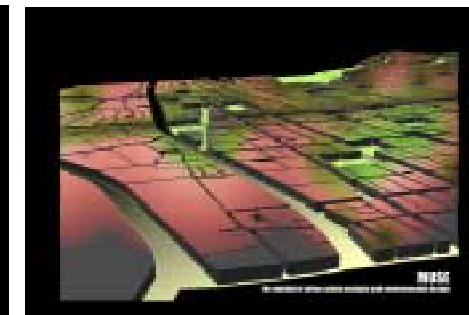
Element-IIc: Cell



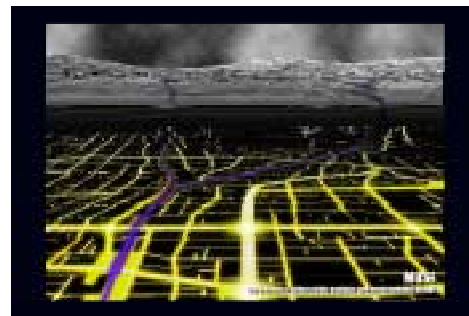
Element-0: Imaginary Wall



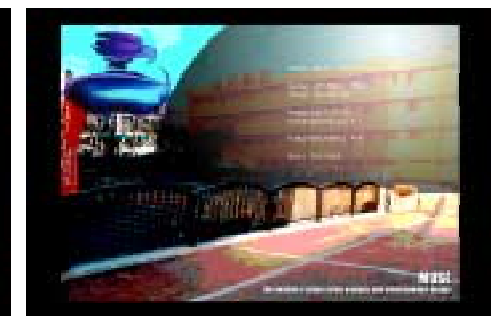
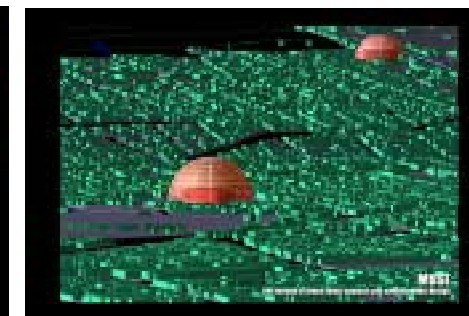
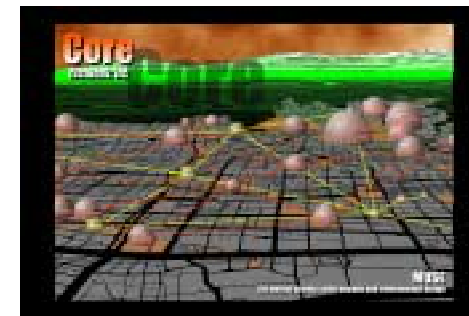
Element-IId: Void



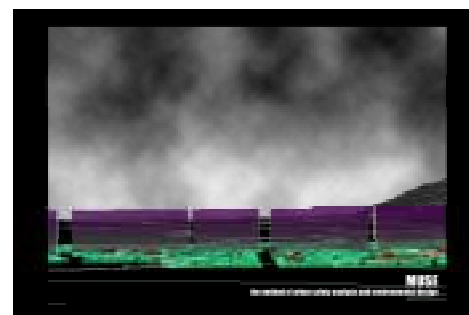
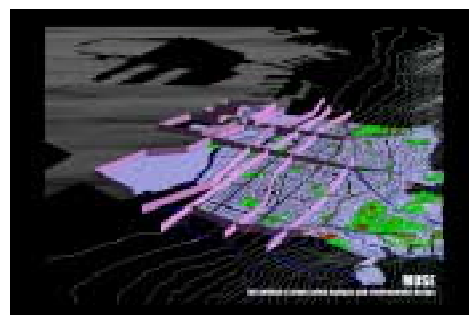
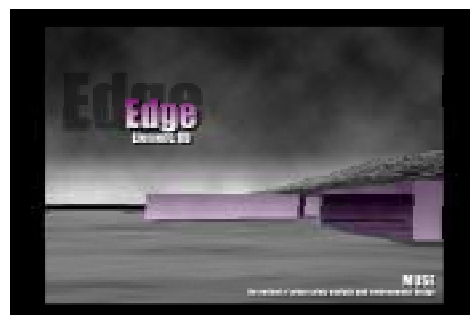
Element-Iia: Path



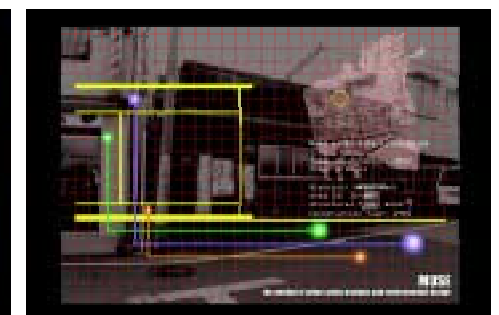
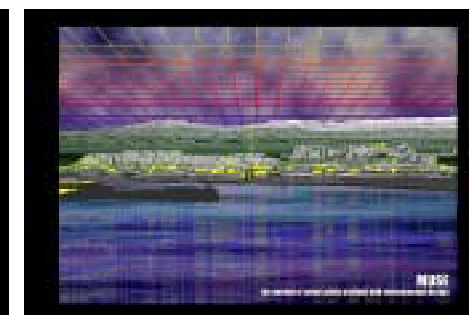
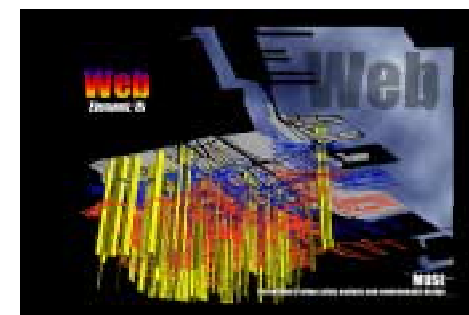
Element-Ile: Core

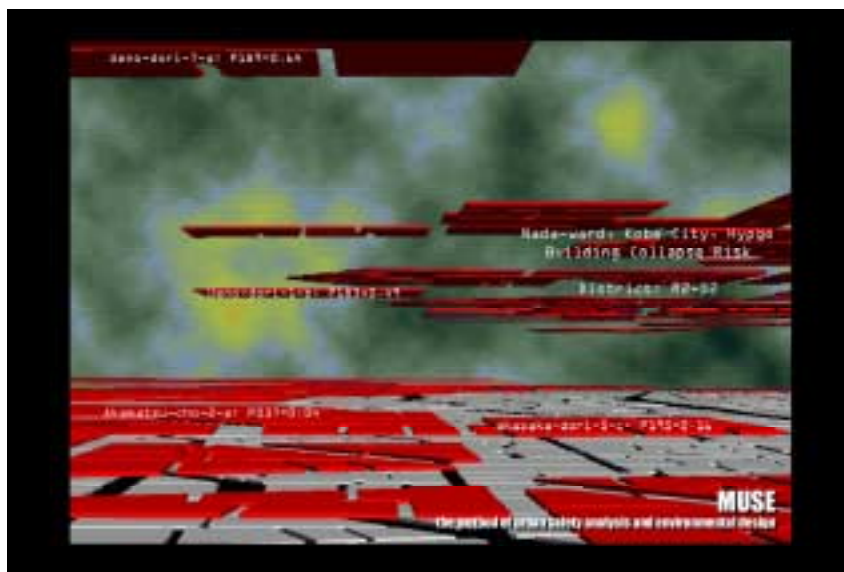


Element-IIb: Edge



Element-III: Web





O S A M U M U R A O
w w w . m u r a o . n e t

兵庫県南部地震の実被害データに基づく建物被害評価に関する研究

2000年1月

村尾 修

東京大学生産技術研究所

耐震防災工学研究室

〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1

E-mail: murao@iis.u-tokyo.ac.jp
