Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-06

木造建物の耐震性能を考慮した地震被災危険度評価に関する研究

堀江，啓

(Degree)
博士（工学）
(Date of Degree)
2006-03-25
(Date of Publication)
2014-06-16
(Resource Type)
doctoral thesis
(Report Number)
甲3563
(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1003563

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

博　士　論　文

木造建物の耐震性能を考慮した地震被災危険度評価に関する研究

平成 18 年 1 月

神戸大学大学院自然科学研究科

堀 江　啓

目　次

第1章　序論
1.1　はじめに …… 1-1
1.2　本研究の目的 …… 1-3
第1章の参考文献 …… 1-4

第2章　既往の研究ならびに本研究の構成
2.1　建物被害評価尺度に関する研究 …… 2-1
2.1.1　1995年兵庫県南部地震における被害調査と評価尺度 …… 2-1
2.1.2　兵庫県南部地震以降の建物被害調査の整備 …… 2-5
2.2　建物被害推定に関する研究 …… 2-6
2.2.1　被災経験に基づく推定手法 …… 2-6
2.2.2　地震応答解析による推定手法 …… 2-8
2.3　木造建物の耐震性能評価に関する研究 …… 2-9
2.4　常時微動測定に関する研究 …… 2-10
2.5　人的被害推定に関する研究 …… 2-11
2.6　本研究の構成 …… 2-12
第2章の参考文献 …… 2-14

第3章　1995年兵庫県南部地震の被災経験に基づく建物被害関数の構築
3.1　建物損傷度の分類と層破壊被害建物の同定 …… 3-1
3.1.1　使用データ　ー阪神・淡路大震災GISデータベースー …… 3-1
3.1.2　建物損傷度の分類基準と層破壊被害建物の同定方法 …… 3-4
3.1.3　層破壊建物の被害パターンと空間分布 …… 3-7
3.2　表層地盤震動特性を考慮した地震動強さ指標に関する検討 …… 3-9
3.2.1　地震動分布推定データ …… 3-9
3.2.2　データセットの構築 …… 3-10
3.2.3　層破壊被害と地震動強さ指標の関係 …… 3-14
3.2.4　地震動周期の影響 …… 3-16
3.3　木造建物の総合的な耐震性能評価指標としての建築年区分の設定 …… 3-18
3.3.1　建物属性が層破壊被害に及ぼす影響 …… 3-18
3.3.2　建築年代区分の設定 …… 3-26
3.3.3　数量化Ⅱ類を用いた影響度評価 …… 3-28
3.4　木造建物の損傷度を反映する被害関数の構築 …… 3-30

3.4.1 層破壊被害関数の構築 …… 3-30
3.4.2 損傷度別被害関数の構築 …… 3-35
3.4.3 既存の被害関数との比較 …… 3-36
3.5 まとめ …… 3-40
第3章の参考文献 …… 3-42

第4章 被害関数を用いた地震被災危険度評価手法の適用性に関する考察
4.1 兵庫県西宮市への適用 …… 4-1
4.1.1 層破壊建物の推定方法 …… 4-1
4.1.2 層破壊発生率の面的な空間分布 …… 4-3
4.1.3 層破壊発生棟数の推定 …… 4-4
4.1.4 1棟単位の層破壊建物分布の推定 …… 4-6
4.2 兵庫県神戸市東灘区への適用 …… 4-7
4.3 神戸市街地における木造建物の層破壊被害分布の推定 …… 4-10
4.4 まとめ …… 4-11
第4章の参考文献 …… 4-12

第5章 耐震診断と常時微動に基づく木造建物の耐震性能評価
5.1 神戸市域を対象とした木造住宅の常時微動計測体制 …… 5-1
5.2 計測概要 …… 5-2
5.2.1 計測方法 …… 5-2
5.2.2 計測事例と波形処理方法 …… 5-3
5.3 常時微動計測結果 …… 5-6
5.3.1 常時微動計測の実施住宅の概要 …… 5-6
5.3.2 木造住宅の振動特性 …… 5-7
5.4 木造住宅の固有周期と耐震性能の関係 …… 5-10
5.4.1 固有周期と建築年の関係 …… 5-10
5.4.2 固有周期と耐震簡易診断結果の関係 …… 5-11
5.4.3 耐震一般診断結果との比較 …… 5-14
5.5 常時微動による補強効果の測定 …… 5-22
5.6 まとめ …… 5-23
第5章の参考文献 …… 5-24

第6章　地盤のサイト特性を考慮した建物への入力地震動評価
6.1　震源特性および伝播経路特性を考慮した広帯域地震基盤波の作成 ····· 6-1
6.1.1　ハイブリッド合成法による工学的基盤面上の地震動推定手法の概要 ·· 6-1
6.1.2　検討位置と波形合成方法 ····· 6-2
6.2　表層地盤の増幅特性を考慮した地震動シミュレーション ····· 6-4
6.3　最大速度に着目した推定地震動の検証 ····· 6-10
6.3.1　被害関数を用いた建物被害推定に基づく最大速度の検証 ····· 6-10
6.3.2　死者発生数の推定に基づく最大速度の検証 ····· 6-12
6.4　まとめ ····· 6-16
第6章の参考文献 ····· 6-17

第7章　応答解析に基づく木造建物の地震被災危険度評価
7.1　応答解析に基づく地震被災危険度評価手法 ····· 7-1
7.2　耐震性能を考慮した木造建物の振動解析モデルの設定 ····· 7-3
7.2.1　標準的な構造特性に基づく解析モデルの構築 ····· 7-3
7.2.2　耐震診断結果に基づく構造特性を考慮した解析モデルの構築 ····· 7-6
7.3　地震応答解析に基づく木造建物群の被害推定 ····· 7-7
7.3.1　応答解析結果 ····· 7-8
7.3.2　最大応答変形角と建物損傷度の関係 ····· 7-11
7.4　常時微動計測の利用可能性に関する考察 ····· 7-13
7.5　まとめ ····· 7-14
第7章の参考文献 ····· 7-16

第8章　結論
8.1　本論文のまとめ ····· 8-1
8.2　建物被害軽減に向けた今後の課題 ····· 8-4

発表論文一覧 ····· 9-1

謝辞 ····· 10-1

第1章　序論

1.1　はじめに

防災対策の第 1 目標として「いのちを守る」ことが挙げられる．地震による人的被害を軽減するためには，人的被害発生の主要因として位置づけることができる建物被害の発生を未然に防止する必要がある．特に，1995 年兵庫県南部地震では建物内の生存空間の損失を伴う被害形態である「層破壊」が木造住宅において多く発生し，尊い人命が失われたことが報告されている [1.1)]．この兵庫県南部地震を教訓として建物の耐震化の必要性が再認識され，1995 年 12 月には，主として公共性の高い既存の特定建築物を対象とした「建築物の耐震改修の促進に関する法律（耐震改修促進法）」が制定され，2000 年には建築基準法が改正されるなど耐震関連法規の整備が進められてきた．また自治体の中には耐震化促進に向けて既存建物に対する耐震診断や耐震改修への費用助成や，相談窓口の設置，相談員の無料派遣などが実施されるなどの努力がなされてきた．しかし，建物の耐震化は遅々として進まず，特に現在約 4,700 万戸に計上されている我が国の住宅ストックのうち約 2,450 万戸を占める戸建木造住宅については，約 1,000 万戸が耐震基準に満たない住宅として推計されている [1.2)]．

このような背景から政府の中央防災会議 [1.3) 1.4)]では発生が切迫した東海地震及び，東南海・南海地震によって予測される死者数を半減するために，今後 10 年間で住宅の耐震化率を現状の 75%から 90%に引き上げることを数値目標とした「地震防災戦略」を掲げており，住宅の耐震化促進は地震防災戦略上の急務な課題の一つと位置づけられている．

国や自治体の立場から，住宅の耐震化を柱とした包括的な建物被害軽減策を展開していくためには，地震に対する建物の被災リスクが適切に評価される必要がある．すなわち，被災危険度が高い地域や建物を事前に精度良く予測し，第 1 に被害を極力発生させないこと，次に万一に備えて被害を軽減することを目的としてハード，ソフトの両面からの対策を講じていく必要がある．また，このような対策を推進するために，住民に対しては被災リスク情報を正しく伝達し，リスクに対する認識度を高めていく必要がある．これまでにも，国や自治体では建物被害の発生を予測・評価した地震被害想定が行われ，その想定結果は地震危険度マップとして一般住民にも情報公開がなされている．しかし，公開されるマップはメッシュ単位などによる広域な被害推定結果を提示するに留まり，個別の建物に対する評価ではないため，我が事として受け止められていないことも耐震化が進まない要因の一つと考えられる．

したがって，特に遅れている一般住宅の耐震性向上を図るためには，建物所有者や居住者の理解を容易とする効果的なリスク情報の提示手法を構築する必要があり，そのためには，地震によって予想される損傷度と個々の建物が保有すべき性能（安全性，修復性，使用性）との関

係を明確化したリスク評価手法の確立が求められる．

建物被害の発生を予測・評価するための比較的簡便なツールとして建物被害関数がある．建物被害関数の構築に関する研究[例えば 1.5), 1.6), 1.7), 1.8)]はこれまでにいくつか行われているが，その多くは実際の地震被害調査結果から求められた統計的被害関数である．しかし，これまでに実施された様々な被害調査における損傷度の分類には「全壊」や「大破」といった記述はあっても，それがどのような損傷度を意味するのかについては調査目的によって異なり，さらに建物の安全性評価に不可欠な「層破壊」が定義された損傷度は含まれていない．そのため，過去の地震災害では「層破壊」は被害統計として集計されず，層破壊被害の発生実態は十分に明らかにされていない．

一方，統計的な被害関数のように過去の被災経験に基づく建物被害評価は，実際に被害が発生した結果を記述する点で優れているが，異なる地域や他の地震災害への適用については，さらに地震動特性や建物の耐震性を考慮し，建物被害の発生メカニズムが考慮される必要があると考える．つまり，1)被害発生の誘因となる建物への入力地震動特性と，2)素因となる建物の耐震性能が適切に評価される必要があるといえる．

建設地点毎の地盤のサイト特性を考慮した地震動評価には，1)震源特性，2)波動伝播特性，3)地盤増幅特性の 3 要素が考慮される必要がある．震源特性について，震源破壊過程は強震動地震記録や地殻変動などのデータを用いて逆解析手法（インバージョン解析）によって推定される．最近では，強震観測網の整備とともに解析精度が向上し，断層面での破壊伝播やすべり運動についてより詳細な評価が可能となっている．波動伝播特性について，震源から伝播する地震波は地殻内を 3 次元に広がり，一般に地震波の振幅は震源からの距離に応じて，幾何減衰や内部減衰，地殻や地盤の媒質の不均質性による波の反射，屈折，散乱などの発生に伴う減衰などにより小さくなる．また，地盤増幅特性を評価するためには，地盤構造を把握する必要がある．現在では，反射屈折法や重力探査，ボーリング調査，微動アレイ計測などの方法で，基盤までの堆積構造が解明されつつある．

建物の耐震性能の評価手法としては，基礎の状態や建物の形状，壁量や老朽度などを調査して，耐震性を点数化し，耐震補強の必要性を判断する耐震簡易診断[1.9)]（我が家の耐震診断）や耐震精密診断[1.9)]による方法などが確立し普及している．また，最近では診断方法の改訂[1.10)]が行われ，1)一般の住宅の所有者，居住者を対象とした「誰でもできるわが家の耐震診断」，2)技術者を対象とした「一般診断」，3)より専門性の高い「精密診断」による評価に移行しつつある．しかし，これらの診断方法は建物の動的な振動特性が適切に評価されたものではなく，例えば，1995 年兵庫県南部地震では，激震地において耐震診断の評価が著しく低い場合であっても，軽微な被害であった建物の存在や，反対に評価が高くても大きな被害を受けたことが報告されている[1.11)]．したがって，このような現象を説明するためには，建物の動的な挙動を明らかにする必要がある．そのような動特性の簡便な評価技術として，近年常時微動計測により建物の振動特性を評価する手法が着目されている．

また，単なる地震時の最大応答値に基づく損傷度評価だけではなく，今後 30 年の発生確率が

非常に高い南海地震や東南海地震では，長い周期と継続時間の揺れに対して建物がどのように挙動し，どのような対策をとるべきかを明らかにする必要があり，さらに建物の挙動と密接に関係する家具の転倒のような室内被害による人的被害の発生などの予測精度の高度化を図るためには地震応答解析による動的評価が必要と考える．

1.2　本研究の目的

本研究では，建築構造物の被害軽減を図るために，事前対策から復旧・復興までを視野に入れた効果的な防災対策を講じる上で不可欠である木造住宅の地震被災危険度評価手法を構築し，木造住宅の耐震安全性の向上に貢献することを目指し，1）兵庫県南部地震による木造建物の被災経験に基づき建物損傷度を反映した被害関数を構築するとともに，2）耐震診断による住宅の構造特性に加えて，常時微動による振動特性を評価要素とした地震応答解析による被災危険度評価手法を構築することを目的とする．具体的には，建物の安全性を評価するためには，第1に被害要因や破壊機構を解明する必要があるが，本研究では建物の損傷度基準を明確にした上で木造建物の層破壊発生要因を分析する．その結果から統計的手法により層破壊被害発生の評価が可能な建物損傷度を考慮した被害関数を構築する．また，耐震診断や耐震補強の普及に向けて，建物1棟1棟のリスク評価を行う必要があるが，本研究では建物への地震動の入力波として，建設地点における地盤のサイト特性を考慮した地震動推定を行い，建物の耐震性能として耐震診断による構造特性と常時微動による動的特性が考慮された振動モデルを設定し，地震応答解析による被災危険度評価手法を構築する．

第１章の参考文献

1.1) 西村明儒：わが国の災害医療対策の新たな構築に向けての法医学的検討－わが国の災害医療体制の新たな構築に向けて－，厚生の指標，42 巻 13 号，1995.

1.2) 住宅・建築物の地震防災推進会議：第１回会議資料，http://www.kenchiku-bosai.or.jp/topics/050308.pdf，2005.2.25

1.3) 内閣府防災担当：第１２回会議資料１，www.bousai.go.jp/chubou/12/siryo1.pdf，2005.3.30

1.4) 内閣府防災担当：第１２回会議説明資料１，www.bousai.go.jp/chubou/12/setumei-siryo1.pdf，2005.3.30

1.5) 岡田成幸，鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成，地震，第 2 輯第 44 巻，pp.93-108，1991.

1.6) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫: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，No.502，pp.61-59，1997.

1.7) 長谷川浩一，翠川三郎，松岡昌志：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集，No.505，pp.53-59，1998.

1.8) 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被害関数，日本建築学会構造系論文集，No.527，pp.189-196，2000.

1.9) 日本建築防災協会:木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 建設省住宅局監修, 94p., 1985.

1.10) 日本建築防災協会:木造住宅の耐震診断と補強方法, 国土交通省住宅局建築指導課監修, 364 p.，2004.

1.11) 大橋好光，田端千夏子：新旧診断法と被災度，建築技術，pp.150-153，2，2005.

第2章　既往の研究ならびに本研究の構成

建物の被害軽減に関する研究は，地震動の発生から建物の応答，構造・機能・内容物の被害，そして人的被害など多岐にわたる問題を含んでおり，理学，工学，情報学，社会学など各分野に跨り取り組みが行われている．ここで，本研究対象である木造建物の被害発生には，主として 1)震動や 2)液状化，3)斜面崩壊，4)火災，5)津波などが起因するが，本研究では 1)震動による被害を対象とした地震被災危険度評価手法の構築を目的としている．したがって，以下では，本研究に関わる既往の研究を示す．

まず，2.1 節では過去の地震災害における木造建物の被害評価尺度について述べる．建物被害情報は被災危険度評価手法を構築する上での基礎資料となるが，被害評価尺度は調査目的により多岐にわたり，過去の地震災害時には様々な機関がそれぞれの調査目的に応じて定義された評価尺度により調査を行っている．2.2 節では被害推定手法に関する研究について，1)過去の被災経験に基づく統計的手法と，2)地震応答解析に基づく力学的手法に分類して，それぞれの研究をまとめる．2.3 節では主として建物の静的な耐震性能評価手法を取り上げ，2.4 節では動的な耐震性能評価手法である常時微動計測に関する研究を示す．そして，2.5 節では人的被害の予測手法についてまとめる．

最後に 2.6 節において，本研究の構成と概要を述べる．

2.1　建物被害評価尺度に関する研究

2.1.1　1995 年兵庫県南部地震における被害調査と評価尺度

建物被害調査に関して，地震災害時には様々な目的を持った調査が実施される．まず，1995 年兵庫県南部地震で実施された主な建物調査とその被害評価尺度を示す．兵庫県南部地震では，公的機関により主として以下の 3 調査が実施された．

1) 被害状況把握と災害対応における意思決定の判断のための「初動調査」
2) 二次災害防止のための「応急危険度判定」
3) 住家の被災程度を公的に証明した罹災証明書などの発行根拠となる「被害認定調査」

「初動調査」について，我が国では地震災害や災害の規模に関わらず，災害により被害が発生した場合，災害対策基本法第 53 条に従い，まず市町村が上部機関である国，都道府県に被害状況や措置の概要を報告しなければならない．この報告を基礎資料として災害救助法の適用や激甚災害の指定等の判断が下される．この判断の根拠として住家の滅失世帯数が用いられる．滅失世帯数は次式を用いて算定される．

$$X = A + \frac{B}{2} + \frac{C}{3} \tag{2.1}$$

ここに，X：滅失世帯数，A：全壊，全焼，又は全流失等，住家の滅失した世帯，B：半壊，半焼等，住家が著しく損傷した世帯，C：床上浸水，土砂の堆積等により一時的に居住不能になった世帯である．この滅失世帯の算定に用いられている「全壊」や「半壊」などの被害程度の認定基準は，各省庁間に差異があったことから，1968 年に内閣総理大臣官房審議室長から警察・厚生・建設・消防各省庁あての通知により統一被害認定基準[2.1)]が示された．表-2.1 にこの基準による住家被害の定義を示すように，物理的な被害評価に加えて，建物が補修により再使用可能かどうかについて経済的観点から調査し，建物の資産価値の損失を査定するものである．

表-2.1　統一被害認定基準（昭和 43 年結審第 115 号内閣総理大臣官房審議室長）

被害種類	認定基準
全壊	住家が滅失したもので，具体的には，住家の損壊，焼失若しくは流出した部分の床面積がその住家の延床面積の70%以上に達した程度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50%以上に達した程度のものとする．
半壊	住家の損壊は甚だしいが，補修すれば元通りに再使用できる程度のもの，具体的には損壊部分がその住家の延床面積の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%未満に達した程度のものとする．

「応急危険度判定[2.2)]」は災害対策基本法第 4 条により，住民の身体，生命および財産を災害から保護する自治体の立場から，兵庫県南部地震では自治体が主体となり，応急危険度判定士ボランティアらの協力を得て実施された．調査は建物の安全性の観点から行われ，1)余震等による建築物の倒壊の危険性や 2)建築物の部分（屋根材や外壁，窓ガラスなど）の崩落の危険性，および 3)地盤の崩壊や隣接建物の倒壊による危険性が主として目視により調査され，当該建物の使用の可否について判断される．調査結果は 3 段階に区分され，「危険（使用不可）」，「要注意（一時立入り可）」，「調査済（使用可）」の判定ステッカーを建物に貼ることにより，住民に対して避難の必要性を判断するための情報提供がなされた．

「被害認定調査」の結果を根拠として発行された罹災証明書は，地方自治法第 2 条において「防災に関する事務」が市町村の事務と規定されていることから災害対策の一環として位置づけられ事実行為として発行されたが，明確な法的発行根拠は存在しない．そのような状況下で調査が進められた兵庫県南部地震では，当初の調査目的が各自治体間で異なり，例えば神戸市[2.3)]のように義援金を配分するために調査が開始された例や，災害援護資金の貸し付け，あるいは市民からの要望により実施されたことが報告されている[2.4)]．調査基準について，表-2.1 の統一被害認定基準が根拠にされたが，具体性に欠けたため各自治体において独自の調査票が作成され使用された．また，表-2.1 の統一被害認定基準には一部損壊に関する定義はないため，自治体の多くは全壊，半壊には至らないが何らかの被害を受けた場合を「一部損壊」や「その他」の被害として認定した．村尾・山崎[2.5)]は，自治体で実施された調査方法を比較し，同じ判定結

果であっても調査内容の相違により全壊や半壊等の意味が異なることを指摘している．また，堀江ら[2.6]は被害認定調査に携わった自治体の職員を対象としてヒアリング調査を実施し，このような各自治体において独自の調査項目が設定されたことに加えて，建築の専門家ではない行政職員が調査を実施した影響によって判定結果にばらつきが生じていたことを明らかにしている．

次に兵庫県南部地震で公的機関以外に実施された以下の代表的な建物被害調査における評価尺度をまとめる．

1) 被災の全体像把握と被災要因究明のための「学術調査」
2) 地震保険損害査定のための「保険査定調査」
3) 建設業者や住宅メーカーによる顧客サービスのための「民間調査」

「学術調査」について，日本都市計画学会関西支部と日本建築学会近畿支部による調査[2.7]（以下，本研究では二学会合同調査と呼ぶ．他の文献では震災特別委員会調査と呼ばれることがあるため留意が必要である．）では，表-2.2 に示す基準が用いられた．また，神戸大学工学部建設学科土木系教室兵庫県南部地震学術調査団による調査[2.8]（以下，神戸大学調査）に用いられた基準を表-2.3 に示す．両調査基準の共通点として，建物の再使用が可能かどうかに着目していたことが挙げられる．

表-2.2　二学会合同調査における判定基準[2.7]

ランク(被害程度)	判定基準	参考例(木造の場合)
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.	既に家屋がない(撤去済み) 全面的倒壊(1階が潰れている. 屋根が落ちている. 傾斜(5度以上)が著しい.) 基礎の破断(上部構造と有利している. ひび割れが著しく上部を支えられない.) 柱などの破壊(柱が折損している. 抜け出している. 軸組が分解している.) 外壁の破壊(外壁の構造体が剥離, 剥落している.)
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.	部分的破壊(傾きが認められる(5度以下)) 基礎の破断(基礎のモルタルが剥離している. 基礎にひび割れが認められる.) 外壁の破壊(大きな亀裂が認められる. 目地が著しくずれている. ガラス窓が破れ落ちている.) 屋根の破損(屋根瓦のズレが著しい(大半が落ちているなど)) その他(被害が顕著でランクCにはいたらない)
ランクA (軽微な被害)	軽微な損傷で使用可能. 少しの修繕で住める可能性あり.	外壁の破壊(モルタルが部分的に落ちている. 壁に僅かなひび割れがある.) 屋根の破損(屋根瓦が部分的に落ちている) その他(被害が軽微でランクBにはいたらない)
無被害 (外観上の被害なし)	見た目には被害がない.	
火災	火災による被害	

表-2.3　神戸大学調査における判定基準[2.8]

被害程度	判定基準
全壊	建物が傾いたり, 完全に倒れている. 修繕が不可能な状態.
半壊	大幅な亀裂, 崩れがあるが修繕すれば住める状態. 現在, 住人は住んでいない状態が多い.
一部損壊	亀裂破壊があるが, そのままでも住める状態.
被害なし	(説明なし)

また，日本建築学会近畿支部では，淡路島，神戸市長田区，中央区，東灘区西部，芦屋市，西宮市において木造建物の被害調査を行った．鎌田[2.9]による淡路島を対象とした調査では，全壊（倒壊したり，構造体が大きく損傷し，または，著しく傾斜し，修復不能なもの），半壊（被害程度が著しく，構造体に損傷があるが修復可能なもの），一部破損または小被害（非構造部材の損傷に留まったもの），無被害（損傷の認められないもの）の 4 ランクに区分されている．鈴木三四郎ら[2.10]による長田区の調査では，大破（倒壊もしくは倒壊の恐れのあるもの），中破（残留変形は見られるものの，倒壊の恐れのないもの），小破（外装材に損傷は見られるものの残留変形はなく，躯体は無被害と見なされるもの．この場合，無被害を含む．）の 3 段階表現が採用されている．鈴木祥之・藤原[2.11]による神戸市中央区の調査，および鈴木祥之ら[2.12]による芦屋市，西宮市の調査では，倒壊，大破，中破，小破，軽微および無被害の 6 段階に区分されている．この調査は，表-2.4 に示す日本建築学会木構造分科会が提案している判定基準に準じて行われた．鈴木有[2.13]は日本建築学会の調査基準を用いた建物被害と残留変形角を対応させ，大破は 1/20rad 以上，中破は 1/60～1/20rad，小破は 1/60rad 以下と定義している．村上ら[2.14]による神戸市東灘区の西部地区を対象とした調査では，倒壊（Ⅴ）（1 階部分の層崩壊，2 階部分の層崩壊，全階層崩壊（瓦礫状態）），大～中破（Ⅳ）（下屋等の一部崩壊，柱の折損や傾斜大，外壁の大部分が剥離落下，基礎の崩壊，小屋組の崩壊など），中～小破（Ⅲ～Ⅱ）（瓦のズレや脱落，外壁や基礎のひび割れなど（目視による傾斜は認められない）），小破以下（Ⅱ以下）（外壁開口部の軽微なひび割れなど，および外観上被害無し）の 5 段階区分が用いられた．なお，ギリシャ数字のⅡ~Ⅴは被災度区分判定[2.2]で定義されている被害尺度に対応している．

表-2.4　日本建築学会近畿支部による調査における判定基準

被害程度	判定基準
倒壊	屋根・壁・床・柱等の破損が全面にわたり，建物の変形が著しい． 周辺地盤の崩壊により，建物の変形が著しい．
大破	大部分の壁・垂れ壁が破損し，内外装材がほとんど脱落している． 筋かいが折損し，柱・はりに割れが生じ，床が破損している．
中破	大部分の壁・垂れ壁・腰壁にひび割れが生じ，一部が脱落している． 大部分の屋根瓦が破損している． 基礎のひび割れが著しい．
小破	大部分のれんがおよび一部の屋根瓦が破損している． 一部の壁にひび割れが生じている． 一部の壁仕上げ材が脱落している． 基礎の一部にひび割れが生じている．
被害軽微	一部の屋根瓦に損傷が見られる． 一部の垂れ壁・腰壁・仕上げ材にひび割れが生じている．
無被害	外見上被害が全くない．

「保険査定調査」において代表的な地震保険[2.15]の損害査定基準では，居住用建物と生活用動産に対して定義されている．居住用建物の損害を認定する基準には「主要構造部の被害程度による基準」，「床面積の被害程度による基準」，「床上浸水等による認定基準」の三つがある．通常，地震による被害建物の損害認定には「主要構造部の被害程度による基準」が用いられ，被害程度から全損，半損，一部損を認定する．この基準は 1980 年 7 月の地震保険制度改正後は，表-2.1 に示した国の災害被害認定統一基準と整合するように定められている．

「民間調査」では，顧客に対するサービスの形として，建設業者や住宅メーカーなどの民間企業が被災度区分判定[2.2)]などを参考にした調査方法により，解体・補修の判断に必要な情報の提供を行っている．調査方法について，「基礎」，「床組」，「軸組」，「軸組壁」，「仕上材」，「屋根」について調査を行い，被災度の判定は各部位の被災度をランクⅠ～Ⅴに分類する部位別被災度と，全部位の被災度の平均値から求められる総合被災度がある．最終的に総合被災度と被災震度階から補修により再使用可能かどうかの判断がなされる．

以上のように被害調査結果の記述は，調査目的により異なり，建物の被害程度の大きさに応じて，「全壊」，「半壊」，あるいは，「大破」，「中破」などに分類されている．このような様々な建物被害程度が比較可能となるように，各種建物被害の対応関係を明らかにするための研究が行われている．

宮腰ら[2.16)]は，1)日本建築学会近畿支部による調査，2)二学会合同調査，3)自治体による被害認定調査の結果を比較し，日本建築学会による調査は二学会合同調査の被害基準を詳細に区分したものと報告している．また，被害認定調査の「全壊」は二学会合同調査の「軽微な損傷」から「中程度の損傷」に対応し，「一部損壊」は「外観上被害なし」に対応していたことを明らかにしている．

小檜山ら[2.17)]は二学会合同調査と神戸大学調査の判定基準を，両者の町丁目単位，街区単位の被害率の対応から定量的に比較し，神戸大学調査の被害率は二学会合同調査の約 6 割に相当していたことを明らかにしている．

村尾・山崎[2.5)] は兵庫県南部地震で実施された自治体による被害認定調査と二学会合同調査との結果を比較し，自治体の全壊率と二学会合同調査の中破以上の被害率がほぼ等しいと指摘している．また，牧ら[2.18)]は，兵庫県南部地震において「全壊」と評価された建物の破壊状態に関する分析を行い，「全壊」には，完全に瓦礫状態のものから外観上の被害は軽微なものまで，様々な破壊形態が含まれているということが明らかにされている．

このように必ずしも「全壊」=「大破」の関係は成り立っていないなど，被害評価を行う上で調査目的により被害評価尺度が異なる点に留意が必要となる．

2.1.2　兵庫県南部地震以降の建物被害調査の整備

兵庫県南部地震の経験から建物被害調査の重要性が再認識され，各調査において改訂や新たな提案がなされている．

「初動調査」は早期の被害把握が困難であった事由から，地震計により計測された地震動分布からの被害推定[例えば 2.19)]やリモートセンシング技術の利用[例えば 2.20)]などによる早期に広域的な範囲の被害状況把握を行うための手法が提案されている．

「応急危険度判定」は 1998 年に判定マニュアル[2.21)]が改訂され，調査体制や各種マニュアルの整備が進められている．

「被害認定調査」は村尾ら[2.5)]により建物の資産価値を評価する自治体という公的な立場からの被害調査票の提案が行われている．また，小檜山らは[2.22)]は兵庫県西宮市へのヒアリング調査

結果に基づき，より迅速，公正かつ効率的な被害認定のための認定プロセスとして，外観目視による調査と建物内部を含めた詳細調査で構成される 2 段階の調査プロセスを提案している．また，内閣府[2.23]では 1968 年に規定された国の統一認定基準が実状に合わなくなったなどの事由から，災害に係る住宅等の被害認定基準検討委員会が 2000 年 12 月に発足し，認定基準の見直しが行われた．この新しい認定基準では，より補修の可否との関係を明確にしており，住家が居住のための基本的機能を喪失し補修により再使用が困難ものを「全壊」，基本的機能の一部を喪失しているが，補修すれば元通りに再使用可能なものを「半壊」と定義している．また，補修費用との関係については経済的被害を評価するとしているが，被害額を算定することは実務上困難であるため，「住家の主要な構成要素の経済的被害を住家全体に占める損害割合で表す」という形として評価する．さらに，認定基準の的確かつ円滑な運用を目的として，調査方法，判定方法を規定した被害認定基準運用指針が示されている．この認定基準および運用指針の規定により，認定作業の効率化，認定結果の全国的な統一化が期待される

「学術調査」は，岡田・高井[2.24]，高井・岡田[2.25]により，建物全体からの被害判断により重点を置いた調査手法として，建物の破壊パターンを視覚的に分類した被害パターンチャートの活用が提案されている．木造軸組工法の建物破壊パターンは，兵庫県南部地震の被災写真集を主資料として，European Macroseismic Scale 1998[2.26]（EMS-98）を参考にダメージグレード D0～D5 の 6 段階被害尺度に分類されている．また，Horie *et al.*[2.27]は，チャートの充実を図るために兵庫県南部地震における尼崎市の液状化被害事例から木造建物の液状化による被害パターンチャートの提案を行っている．これらのパターンチャートの活用により悉皆調査への対応が容易となり，建物被害調査における被害定義の相違や調査者による判定結果のばらつきが少ない，かつ生存空間の有無に立脚した信頼性の高い建物被害分類の実施が期待できる．実際に最近発生した地震災害時では，学術的な目的とした被害調査に用いられている[例えば2.28),2.29),2.30)]．

2.2　建物被害推定に関する研究

2.2.1　被災経験に基づく推定手法

地震による建物被害発生の評価手法として，過去の地震被災経験に基づき地震動強さと建物被害率の関係を記述した建物被害関数があり，これまでに多くの研究が行われている．建物被害関数は物部[2.31]が定式化したのが始まりであり，ある木造家屋群の耐震強さを確率変数として扱い，倒壊率 50％に対する合震度 K_0 を平均とし，標準偏差 σ で正規分布している仮定のもとに標準正規分布関数で記述されている．米国カリフォルニア州では，78 の構造種別について専門家の意見を整理し，Applied Technical Council[2.32] より資料集が出版されている．我が国においても，岡田・鏡味[2.33]は東京都防災会議の震度階解説表を基に，建物の構造や機能，設備を含む内容物に関する被害や，建物以外の構造物被害，ライフライン被害などの気象庁震度階に対する被害関数を構築している．童・山崎[2.34]は過去の強震記録と家屋被害データを用いて SI 値と家

屋被害率との関係式を求めている.

兵庫県南部地震の被災経験に基づく被害関数については多くの研究が報告されている．学術的な調査結果を用いた被害関数として，林ら[2.35),2.36)]は神戸市中央区三宮地域における最大地動速度を，地盤モデルに基づくFEM解析による地震動シミュレーションを行って求め，最大地動速度と二学会合同調査[2.7)]による用途別・階数別の被害率との関係式を構築し，その構築した被害関数を用いて兵庫県南部地震の最大地動速度の再評価を行っている．長谷川ら[2.37)]は，二学会合同調査結果[2.7)]を基に，村上ら[2.14)]が東灘区西部地区において行った被害調査結果データを用いて建築年に関する補完を行い，最大地動速度に対する木造建物の建築年代別被害関数を構築している.

藤井[2.38)]は，神戸市の東部，中部，西部の3箇所に解析測線を設定して表層地震動の推定を行い，最大地動速度と木造構造物被災密集度をパラメータにし，建築年代を考慮した被害関数により，木造構造物被災ポテンシャルによる被害評価手法を提案している．表層地震動の推定は，深層地盤は松島・川瀬[2.39)]の3次元盆地構造モデルを用いた3次元解析結果を用い，浅層地盤については1次元等価線形解析より求めている．また，液状化地域に対しては1次元有効応力解析を行っている.

自治体による被害認定調査結果を用いた被害関数の構築も行われている．山口・山崎[2.40)]は，西宮市を対象として，全壊率と全半壊率の被害関数を構築している．村尾・山崎[2.41)]は，二学会合同調査結果データ[2.7)]に自治体調査結果から得られた建物の構造，建築年代などの情報を付与して，神戸市灘区を対象とした構造別，建築年代別の被害関数を構築している.

地震保険損害査定のための調査データに基づく被害関数として，佐伯・翠川[2.42)]は，地震保険の兵庫県南部地震の支払いデータから，計測震度と支払い率の関係式を求め，経済被害評価を行っている.

次に耐震診断結果を活用した被害関数の構築に関する研究を示す．梅村・山崎[2.43)]は，横浜市が実施した木造軸組構法住宅に対する耐震簡易診断結果[2.44)]を用いて，村尾・山崎[2.41)]による神戸市灘区を対象とした経験的被害関数を基として，木造耐震性能指標（Iw値）を考慮した被害関数を構築している．小檜山・山崎[2.45)]は加速度応答スペクトルと精密診断法による耐震診断結果を用いて，建築基準法で規定される建物の耐力と地震力との関係に着目し，被害関数の定式化を行っている.

層破壊に着目した被害関数として，田畑ら[2.46)]，岡田ら[2.47)]は東灘区の震度7の地域を対象に，航空写真により木造住宅の破壊パターン判読を行い，林ら[2.35),2.36)]による木造低層独立住宅の被害率から逆算された最大地動速度を震度に変換し，1975年の建築年を境とした木造建物の崩壊パターン別被害関数を提案している.

以上のように，過去の地震被災経験に基づく被害関数の構築に関する研究は数多く行われている．しかし，人的被害発生の主要因であった層破壊に着目した被害関数の構築やその適用性に関する検証はほとんど行われていない.

2.2.2　地震応答解析による推定手法

地震応答解析による推定手法に関して，表・楢橋[2.48]は，木造家屋の復元力モデルを構築し，壁率分布から固有周期分布を明らかにし，人工地震波を用いたシミュレーションによる被害予測を行っている．建物応答と被害の関係については，層間変形角 1/100rad で力学的特性が変化し，家屋に被害が発生する 3/100rad を中程度被害としている．

柴田[2.49]は，都市の建築群にばらつきをもたせ，信頼性理論により建築群の被害率を求めている．また，柴田・赤松[2.50] は 1978 年宮城県沖地震の仙台地域における木造建物の被害率と地表加速度の関係，建物の固有周期と加速度応答倍率の関係から，木造建築群の降伏震度分布を推定し，弾塑性応答解析モデルを用いたシミュレーションを行い，最大塑性率により被害判定を行う手法を提案している．

北原・藤原[2.51]は壁率の分布から木造建築群の耐力分布を推定し，動的解析により最大応答変位を求める手法を提案している．

耐震性能のクライテリアに関して，鈴木ら[2.52]は，構造体の動的特性として等価粘性減衰定数を用いて簡便に応答を評価可能な限界耐力計算による耐震性能評価法を提案し，軸組の層間変形角を基準として，伝統構法などの軸組構法の場合には，1/120rad（損傷限界），1/60rad（再使用可能限界），1/30rad（補修・再使用可能限界），1/15rad（安全限界）と設定している．

建物応答と損傷度の関係に関する研究に関して，森井ら[2.53]は過去の地震被害の分析結果に基づいて建物の最大応答変形角から損傷確率を予測する損傷確率曲線を設定し，耐震診断の結果を反映する木造住宅の損傷度予測手法の提案を行っている．この手法は，限界耐力計算に基づき耐震性能評価を行い，想定地震動に対する最大応答変形角について，性能等価加速度応答スペクトルを用いて推定し，最大応答変形角から損傷度評価を行っている．

吉田ら[2.54]は兵庫県南部地震による木造建物の被害に対応した木造建物の耐震性の検討を行っており，モンテカルロシミュレーションによる応答解析を行った結果，一部損壊では 1/60rad，半壊は 1/40rad，全壊は 1/30rad で被害と対応することを示している．

また地震動特性と建物応答の関係に関する研究として，境ら[2.55]は，地震動の破壊力指標と建物被害率との関係を検討し，建物の塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期帯域におけるパワーを持った地震動の影響が建物被害に対して大きいことを示している．その等価周期帯は 1.2～1.5 秒と指摘している．

小檜山・山崎[2.56]は，時刻歴応答解析により木造建物の最大層間変形角に適した地震動強さ指標の検討を行っている．その結果，周期の伸びを考慮した減衰 20%の変位応答，加速度応答が，比較的高い精度で最大応答変形角を説明できることを示している．

地震動シミュレーション結果を用いた被害予測に関する研究として，長戸・川瀬[2.57]は地震被害予測を行うための木造建物モデルを設計基準に準じて作成し，兵庫県南部地震による再現波を入力して非線形応答解析を行い，実被害を説明できるように木造建物モデルを構築している．また，川瀬・増田[2.58]は日奈久断層系からの想定地震動を統計的グリーン関数法と 3 次元有限差分法を組み合わせたハイブリッド法を用いて作成し，被害予測を行っている．

層破壊に着目した応答解析に関する研究として，村上ら[2.59]は層破壊発生機構に関して，層破壊と建築年代，規模，屋根種別との関係を明らかにし，さらに倒壊限界必要壁率，倒壊限界変形角，必要終局せん断係数に関する検討を行っている．その結果，兵庫県南部地震における倒壊は，入力地震波の大振幅の第1波もしくは第2波で大きく変形したことにより発生したと推察しており，その倒壊限界変形角を1/10～1/7.5 rad.と指摘している．ただし，対象範囲は東灘区西部地区に限定されており，地震動を震度6, 7の地域として画一的に取り扱っているため，個々の建物に入力された地震動の大きさの影響に関する検討は十分になされていない．

以上の研究のように，地震応答解析に基づいた被害予測を精度良く行うためには，建物の耐震性能と地震動特性が考慮される必要がある．また，建物の応答量と損傷度の関係は，定義により予測結果が影響される点に留意する必要がある．

2.3　木造建物の耐震性能評価に関する研究

建物の耐震性能の評価手法としては，耐震補強の必要性を判断する耐震簡易診断[2.44]（我が家の耐震診断）や耐震精密診断[2.44]による方法などが確立し普及している．耐震診断結果は総合評点として与えられる．総合評点は，A）地盤・基礎，B）建物の形，C）壁の配置，D）筋かい，E）壁の割合，F)老朽度の6指標を調査し点数化して求められる．

また，最近では診断方法の改訂[2.60]が行われ，1)一般の住宅の所有者，居住者を対象とした「誰でもできるわが家の耐震診断」，2)技術者を対象とした「一般診断」，3)より専門性の高い「精密診断」による評価に移行しつつある．

上記の耐震診断結果を利用して，耐震性の地域的な特徴に関する分析が行われている．小檜山・山崎[2.61]は，全国で実施された耐震精密診断の結果をもとに，評点分布傾向を分析し，その地域的特徴について，東北は他地域より偏心が低い建物が多く分布している一方で，水平抵抗力の評点が高い建物が多い傾向があることを指摘している．

石原ら[2.62]は横浜市と姫路市における在来木造住宅の耐震診断データを分析し，両市では同じ建築年代であっても総合評点が顕著に異なること，および横浜市では同一市内でも地域により耐震性が大きく異なること示しており，建物被害推定には各地域の耐震性能分布を把握することが不可欠であることを指摘している．

一方，上記の診断方法は建物の動的な振動特性が適切に評価されたものではなく，例えば，1995年兵庫県南部地震では，激震地において耐震診断の評価が著しく低い場合であっても，軽微な被害であった建物の存在や，反対に評価が高くても大きな被害を受けたことが報告されている[2.63]．

2.4　常時微動測定に関する研究

常時微動に関する研究は，理学，地盤工学分野などで多くの研究が行われているが，本研究では常時微動を用いた建物の振動特性評価を対象としているため，本研究に関わる研究について以下にまとめる．

建物の振動特性として，常時微動から比較的簡易に求められる固有周期や減衰定数，地盤と建物間における応答の増幅率に着目した研究が行われている．中村・西永[2.64)]は，兵庫県南部地震で被災した住宅 28 棟の常時微動を測定し，地盤と建物の振動特性を含む被災危険度指標として，以下の式（2.2）に示すような建物の水平動と地盤の上下動のスペクトル比から求めた建物の固有周期を基に算定する Kwg を提案し，この Kwg と損傷の間には相関がみられたことを報告している．

$$Kwg = (25 \times e / \pi^2) \times \mathrm{Awg} / Fw^2 / h \tag{2.2}$$

ここで，

e ：実効層変形角の最大層変形角に対する比率（e=60%と仮定）

Awg ：地盤と建物の連成作用を考慮した基盤地震動に対する増幅倍率

Fw ：建物の水平動と地盤の上下動のスペクトル比から求めた建物の固有周期

h ：柱（1 階）の高さ

毎熊ら[2.65)]は，常時微動から得られる建物の固有周期 T_0 と減衰定数 h から求められるQ値(Q=1/2h)，および地盤振動に対する建物応答の振幅倍率 R から次式（2.3）に示すような耐震性評価指数 C を提案している．

$$C = (T_0 / 0.1)^2 \times \sqrt{Q \times R} \tag{2.3}$$

林ら[2.66)]は伝統軸組構法による木造住宅を 1 質点系置換した時の等価高さ He と等価質量を Me とし，最大応答変形角 R に対する等価固有振動数 f と降伏時ベースシア係数 C_y の関係を定式化して，常時微動から計測された固有振動数 f_0 を用いて C_y の算定を行っている．この時に降伏時の層間変形角 R_0 を 1/1,000rad に設定し，限界耐力計算に基づく C_y と比較した結果，良い対応が得られたことを示している．

上記の研究のように，常時微動により建物の動特性を定量的に扱うことが可能であるが，さらに耐震診断結果と比較を行うことで，より簡便な診断手法の構築が期待できる．

2.5　人的被害推定に関する研究

人的被害の軽減を図るためには，被害を予測し事前に備えることが重要である．各自治体では地震被害想定[2.67]を行い，想定された事態に応じた対策を講じるべく努力を行っている．その地震被害想定の一つに人的被害の予測があり，これまでに震動，津波，火災，斜面崩壊，道路災害などに対する人的被害の予測手法が提案されている．これらのうち，本研究対象となる震動による建物被害を誘因とする死者発生数の予測手法に関する研究として，河角[2.68]は地震発生から家屋被害が発生し，死者が発生するという死者発生過程に基づく推定手法を提案している．この時の家屋被害の指標として全壊家屋数を用いている．

太田ら[2.69]は，全壊棟数に統計的に求めた係数を乗じ，さらに建物内への滞在時間を考慮した時間帯係数や，建築年を考慮した時代係数をとりいれた死者数の推定手法を提案している．

このように予測手法の多くは災害による建物被害規模の程度を表現する指標である全壊建物数または全壊率から推定する方法が用いられている．

建物被害と人的被害の関係について，日本の明治以降に発生した地震別の集計値を用いた検討結果によると，この建物被害評価指標と人的被害の間には有意な相関性がないことが呂，宮野[2.70]により明らかにされている．その要因として 2.1 節に示したように「全壊」という定義が明確ではなかった点が挙げられる．

ここで，Lu *et al.*[2.71]　は，兵庫県西宮市を対象として，兵庫県南部地震時に撮影された建物の被害写真を用いて，死者が発生した建物の被害パターンを岡田，高井[2.24]が提案した被害パターンチャートを用いて分類し，その結果，死者の 84.6%が層破壊した建物に居住していたことを明らかにしている．

岡田ら[2.47]は，建物被害評価の定義の不明確さによる人的被害の推定精度の問題を指摘しており，兵庫県南部地震時の木造建物の層破壊を含めた崩壊パターンを分析し，崩壊パターンに立脚した人的被害発生予測式を提案している．この予測式を利用するためには，建物の崩壊パターン別の被害発生を評価する必要があるため，岡田らは，1975 年を境とした木造建物の崩壊パターン別の被害関数を構築している．しかし，構築対象とした地域は東灘区東部地区に限られており，さらに建物の破壊に関する資料を蓄積し，特に層破壊がどのような条件下で発生したのか，その発生機構を解明する必要がある．

2.6　本研究の構成

本論文は全 8 章で構成されている．研究内容は大きく，1）被災経験に基づく地震被災危険度評価手法の構築と2）応答解析に基づく地震被災危険度評価手法の構築について検討を行っている．図-2.1 に本論文の構成とフローを示し，以下に各章の概要を述べる．

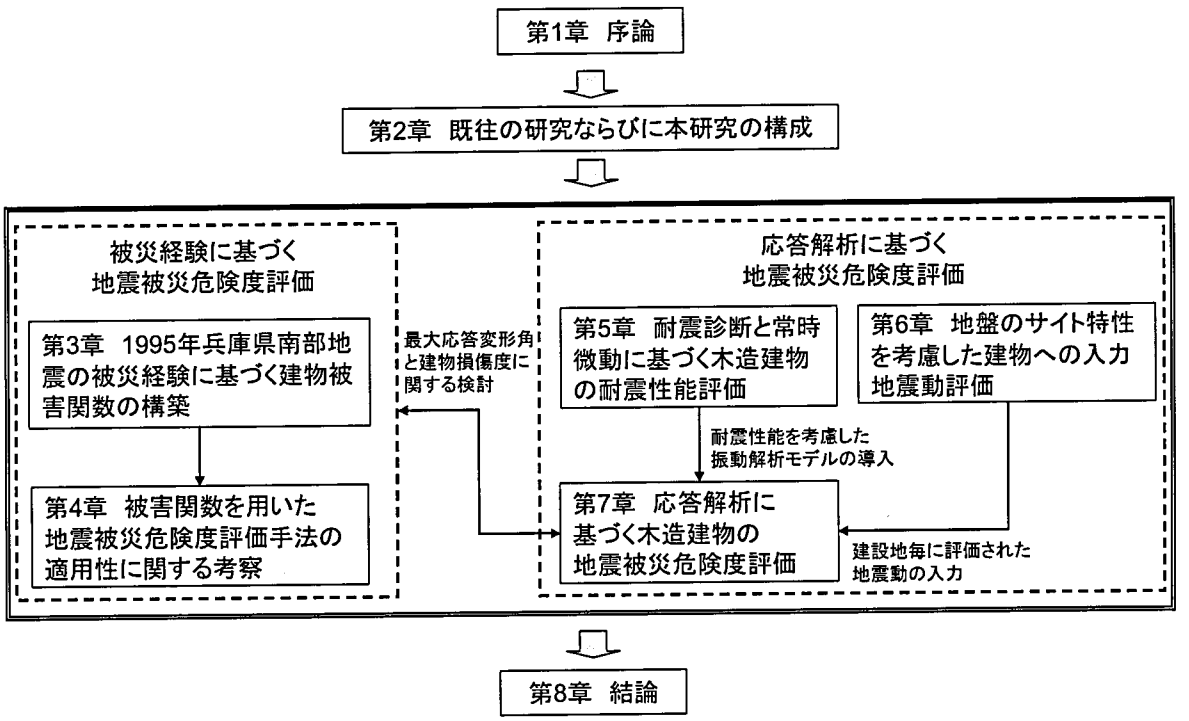


図-2.1 論文の構成とフロー

第 1 章 「序論」，第 2 章 「既往の研究ならびに本研究の構成」に続いて，第 3 章 「1995 年兵庫県南部地震の被災経験に基づく建物被害関数の構築」では，これまで十分に明らかにされてこなかった木造建物の層破壊被害に着目し，兵庫県南部地震時に撮影された被害写真から損傷度を可視化した被害パターンチャートを用いて建物の損傷度分類を行い，層破壊建物を同定する．その結果から木造建物の層破壊発生要因に着目し，地震動強さとの関係について検討を行い，被害関数構築のための最適な地震動強さ指標を設定する．また，木造建物の耐震性能評価指標として建物属性に着目して数量化Ⅱ類による分析を行い，層破壊被害発生に影響を与えていた要因を分析する．その結果から，住宅の変容過程を考慮した建築年代区分を設定し，建物属性を考慮した層破壊の発生率を評価可能な損傷度別被害関数の構築を行う．また，その構築した被害関数について，兵庫県南部地震で実施された調査結果に基づいて作成された被害関数と比較することにより妥当性を確認する．

第 4 章 「被害関数を用いた地震被災危険度評価手法の適用性に関する考察」では，前章で構築した被害関数を兵庫県西宮市および神戸市東灘区に適用し，兵庫県南部地震による木造建物

の被害分布を推定した結果，実被害を精度良く評価可能なことを示す．

第5章 「耐震診断と常時微動に基づく木造建物の耐震性能評価」において，統計的手法に基づく建物被害関数の課題となる他地域や他の地震災害への適用を図るためには，建物の耐震性能や地震動特性を考慮し，建物被害の発生メカニズムを解明する必要がある．そこで建物の耐震性能を明らかにするために，一般的な耐震診断による評価と，常時微動を用いた動的な振動特性評価に関する検討を行う．具体的には兵庫県神戸市域を中心として，耐震診断を受診した戸建木造住宅を対象として常時微動計測を行い，振動特性として固有周期に着目し，建築年や耐震診断結果との関係を分析する．また，地震応答解析の主要なパラメータとなる降伏時のベースシア係数に着目し，常時微動に基づく固有周期からの推定方法について検討を行う．さらに補強過程において常時微動測定を行い，振動特性の変化と耐震性能の関係について考察する．

第6章 「地盤のサイト特性を考慮した建物への入力地震動評価」において，建設地点毎に地震動特性を評価するためには，1)震源特性，2)波動伝播特性，3)地盤増幅特性の3要素が考慮される必要があり，そこで，工学的基盤面までの地震動を長周期帯は3次元有限差分法によって推定された地震動に，短周期帯は兵庫県南部地震の震源パラメータやスペクトル特性を反映させた統計的予測モデルによる推定結果を合成し，工学的基盤から地表までの地震動の増幅については非線形解析手法を用いて設定した解析測線上の地震動推定を行う．さらに，地震動評価手法の妥当性を検証するために，作成波形から得られた最大速度に着目して建物被害および人的被害推定を行い，地震動と実被害の関係を考察する．

第7章 「応答解析に基づく木造建物の地震被災危険度評価」では，第5章から得られた常時微動計測に基づく固有周期を用いて木造建物群のモデル化を行う．木造建物群のモデル化は，在来軸組構法による2階建ての住宅を対象として，1）常時微動から得られた固有周期の分布を考慮したモデル，および2）固有周期の分布を考慮したモデルに耐震診断結果から得られた木造住宅の構造特性の分布を考慮したモデル，の2種類を構築する．構築した解析モデルを用いて木造建物群の建物1棟毎に，第6章の結果から得られた地盤のサイト特性を考慮した地震動を入力して地震応答解析を行い，最大応答変形角から被害率の算定を行う．この被害率と第3章および第4章において構築した損傷度別被害関数を用いて，最大応答変形角と建物損傷度との関係を考察する．

第8章 「結論」では本論文の総括ならびに建物被害軽減に向けた今後の課題を示す．

第 2 章の参考文献

2.1) 「災害の認定基準の統一について」昭和 43 年 6 月 14 日付結審第 115 号内閣総理大臣官房審議室長通知，1969.

2.2) 財団法人日本建築防災協会：震災建築物などの被災度判定基準および復旧技術指針（木造編）,111p.，1991.

2.3) 神戸市震災復興本部総括局復興推進部企画課：阪神・淡路大震災神戸復興誌，pp.120-124，2000.

2.4) 重川希志依：「被害程度の認定の課題とあり方」,兵庫県震災対策国際総合検証会議,阪神・淡路大震災震災対策国際総合検証事業検証報告,第 4 巻（被災者支援）,pp.1-67，2000.

2.5) 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.

2.6) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：震災時における建築物の被害調査手法の開発－公的機関による建物被害調査の課題－，比較防災学ワークショップ，No.1，pp.195-202，2001.

2.7) 震災復興都市づくり特別委員会：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，1995.

2.8) 神戸大学工学部：兵庫県南部地震緊急被害調査報告書　第 2 報，301p.，1995.

2.9) 鎌田輝男：淡路島における木造建物の被害状況について，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.11-26，1995.

2.10) 鈴木三四郎，井上隆二，井上寿也，工藤一嘉，高橋正義，坂上実：神戸市長田区における被害，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.27-40，1995.9.

2.11) 鈴木祥之，藤原悌三：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.41-48，1995.

2.12) 鈴木祥之，標智仁，中治弘行，北山宏貴，東樋口護，橋本清勇：芦屋市，西宮市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.73-84，1995.

2.13) 鈴木有：木造大被害の原因，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.175-191，1995.

2.14) 村上雅英，藤田宜紀，三澤文子，田原賢：東灘西部と中心とした被害調査とその考察，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.49-68，1995.9.

2.15) 日本損害保険協会：地震保険損害査定指針，141p.，1990.

2.16) 宮腰淳一，林康裕，福和伸夫：建物被害データに基づく異なる判定基準による被災度指標の対応関係の分析，第 4 回都市直下地震災害総合シンポジウム，pp.249-252，1999.

2.17) 小檜山雅之，水越薫，石田寛，鳥澤一晃：1995 年兵庫県南部地震の建物被害データに基づく被害率集計単位に関する考察，日本建築学会構造系論文集，第 522 号，pp.137-142，1999.

2.18) 牧紀男，堀江啓，林春男：阪神・淡路大震災における建物被害調査結果の分析，地域安全学会論文集，No.3，pp.117-122，2001.

2.19) 桐山孝晴：地震防災情報システム（DIS）の開発，第１回リアルタイムシンポジウム論文集，土木学会, pp. 59-62，1999.

2.20) 松岡昌志他：人工衛星リモートセンシングを利用した地震被害分布の把握，第１回リアルタイムシンポジウム論文集，土木学会, pp. 89-94，1999.

2.21) 財団法人日本建築防災協会，全国被災建築物応急危険度判定協議会：被災建築物応急危険度判定マニュアル, 97p. 1998.

2.22) 小檜山雅之，堀江啓，牧紀男，田中聡，林春男：災害対応としての建物被害認定過程に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.531，pp.189-196，2000.

2.23) 内閣府：災害に係わる住家の被害認定基準運用指針，108p.，2001.

2.24) 岡田成幸，高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文集，No.524，pp.65-72，1999.

2.25) 高井伸雄，岡田成幸：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類，日本建築学会構造系論文集，No.549，pp.67-74，2001.

2.26) Gronthal G.: European Macroseismic Scale 1998, Cahiers du Centre Eupopeen de Geodynamique et de Seismologie, Volume 15, 1998.

2.27) Horie, K., Maki, N., Kohiyama, M., Lu, H., Tanaka, S., Hashitera, S. and Hayashi, H.: Development of Building Damage Chart for Post Disaster Management, Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, CD-ROM，2000.

2.28) 日本建築学会：2003 年 7 月 26 日宮城県沖北部の地震災害調査報告，pp.181-184，2005.

2.29) 柴山明寛，井戸田秀樹，五十田博，中村友紀子，田畑直樹，佐藤健，久田嘉章，田守伸一郎：2004 年新潟県中越地震における建物被害調査，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-Ⅱ分冊，pp.575-576，2005.

2.30) 日本建築学会：福岡県西方沖地震災害調査報告，266p.，2005.

2.31) 物部長穂：土木工事震害調査報告，地震予防調査会報告，第 100 号（丁），pp.1-65，1926.

2.32) Applied Technology Council: Earthquake Damage Evaluation Data for California (ATC-13), Redwood City, CA, 348p., 1985.

2.33) 岡田成幸，鏡味洋史：震度による地震被害系統評価のためのバルナラビリティ関数群の構成，地震，第 2 輯第 44 巻，pp.93-108，1991.

2.34) 童華南，山崎文雄，佐々木裕明，河本省吾：被害事例に基づく地震動強さと家屋被害の関係，第 9 回日本地震工学シンポジウム，pp.2299-2304，1994.

2.35) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫，川瀬博:1995 年兵庫県南部地震の低層建物被害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，No.494，pp.59-66，1997.

2.36) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫: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，No.502，pp.61-59，1997.

2.37) 長谷川浩一，翠川三郎，松岡昌志：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集，No.505，pp.53-59，1998.

2.38) 藤井紀之：地震動増幅特性および構造物分布を考慮した神戸市域における建築構造物地震危険度評価に関する研究，神戸大学大学院修士論文，54p.，2002.

2.39) 松島信一，川瀬博：1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，第 534 号，pp.33-40，2000.

2.40) 山口直也，山崎文雄：詳細な建物情報を含む被災調査結果に基づく西宮市の地震動分布の再推定，土木学会論文集，No.640/Ⅰ-50，pp.203-214，2000.

2.41) 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被害関数，日本建築学会構造系論文集，No.527，pp.189-196，2000.

2.42) 佐伯琢磨，翠川三郎：住宅建物の経済被害評価のための被害関数の作成―兵庫県南部地震の際の地震保険支払データに基づいて―，日本建築学会構造系論文集，No.545，pp.79-85，2001.

2.43) 梅村幸一郎，山崎文雄：横浜市の耐震診断結果に基づく木造住宅被害関数の構築，日本建築学会構造系論文集，No.556，pp.109-116，2002.

2.44) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震精密診断と補強方法，建設省住宅局監修，p.94，1985.

2.45) 小檜山雅之，山崎文雄：耐震診断データに基づく木造建物の被害関数－加速度応答スペクトルによる一部損壊以上の被害評価－，日本建築学会構造系論文集，No.570，pp.137-144，2003.

2.46) 田畑直樹，岡田成幸，高井伸雄，湊寛子，黒田誠宏：地震時の木造低層建物破壊に伴う死者数推定法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.103-104，2001.

2.47) 岡田成幸，高井伸雄，田畑直樹，黒田誠宏，湊寛子：木造住家の破壊パターンを用いた地震時死者推定法の提案，東濃地震科学研究所報告，Seq. No.7，地震防災分野，pp.77-84，2001.

2.48) 表俊一郎，楢橋秀衛：在来工法木造家屋の耐震性能に関する実態調査とこれに基づく被害予測研究，第 17 回自然災害科学総合シンポジウム，pp.665-668，1980.

2.49) 柴田明徳：都市地域における建築群の震害確率の予測に関する考察，第 6 回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.521-528，1982.

2.50) 柴田明徳，赤松正教：都市における木造建築物群の震害度予測，東北大学建築学報，第 27 号，pp.91-101，1988.

2.51) 北原昭男，藤原悌三：都市における建築物の地震被害推定に関する基礎的研究（1）－木造構造物の地震応答推定－，京都大学防災研究所年報，第 31 号 B-1，pp.1-22，1988.

2.52) 鈴木祥之，斉藤幸雄，樫原健一，五十嵐幸樹，野島千里：木造軸組の耐震性能評価法－小変形から大変形・倒壊の領域まで評価する限界耐力計算－，第 11 階日本地震工学シンポジウム，pp.1523-1528，2002.

2.53) 森井雄史，林康裕，更谷安紀子：耐震性能評価と地震被害経験に基づいた木造住宅の地震時損傷度予測手法，地域安全学会論文集，No.7，pp.281-289，2005.

2.54) 吉田伸一，大井昌弘，水谷守，田内建次，今塚善勝，藤原広行：木造建物群の地震損傷度評価手法に関する検討，（その２）モンテカルロ解析による検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.51-52，2003.

2.55) 境有紀, 纐纈一起, 神野達夫:建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85-91, 2002.

2.56) 小檜山雅之, 山崎文雄：木造建物の最大層間変形予測に適した地震動指標の比較検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-Ⅱ分冊, pp.47-48, 2003.

2.57) 長戸健一郎, 川瀬博：観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物群被害予測モデルの構築と観測強震動への適用, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.1315-1320, 2002.

2.58) 川瀬博, 増田有周：八代市およびその周辺地域の日奈久断層系による地震被害想定, 日本建築学会構造系論文集, No.581, pp.39-46, 2004.

2.59) 村上雅英, 鈴木祥之, 田原　賢：阪神淡路大震災における木造住宅の倒壊原因に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.95-101, 1999.

2.60) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法, 国土交通省住宅局建築指導課監修, p.364, 1985.

2.61) 小檜山雅之, 山崎文雄:全国の耐震診断結果に基づく木造建物耐震性能指標の地域性分析, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.2097-2102, 2002.

2.62) 石原祐紀, 小檜山雅之, 山崎文雄：横浜市・姫路市の耐震診断結果に基づく木造建物耐震性能指標の地域性分析, 第 11 回日本地震工学シンポジウム, pp.2091-2096, 2002.

2.63) 大橋好光, 田端千夏子：新旧診断法と被災度, 建築技術, pp.150-153, 2, 2005.

2.64) 中村豊, 西永雅行：常時微動による二階建住家の耐震性評価, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.405-408, 1997.

2.65) 毎熊輝記他：住宅の動的耐震性評価に関する試み, 物理探査学会第 104 回学術講演会論文集, pp.31-34, 2001.

2.66) 林康裕, 新居藍子, 森井雄史：木造軸組構法住宅の振動計測の活用に関する研究, 日本地震工学会大会－2005 梗概集, pp.114-115, 2005.

2.67) 損害保険料率算定会：地震被害想定資, 地震保険調査報告, 28, 1998.

2.68) Kawasumi, H: Intensity and Magnitude of Shallow Earthquake, Bureau Central Seism. Intern., Ser. A. Trav Sci.19, pp.99-114, 1954.

2.69) 太田裕, 後藤典敏, 大橋ひとみ：地震時の死者発生予測に関する実験式の一構成, 地震 2, 36, pp. 463-466. 1983.

2.70) 呂恒倹, 宮野道雄：地震時の人的被害と家屋被害の関係に対する震源距離の影響, 自然災害科学, Vol.14-2, pp.287-296, 1995.

2.71) Lu, H., Kohiyama, M., Horie, K., Maki, N., Hayashi, H., and Tanaka, S.: Building Damage and Casualties after Earthquake –Relationship between Building Damage Pattern and Casualty Determined Using Housing Damage Photos in the 1995 Hanshin-Awaji Earthquake Disaster–, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Volume 29, Issue 3, pp.387-403, 2003.

第3章　1995年兵庫県南部地震の被災経験に基づく建物被害関数の構築

本章では，まず、兵庫県南部地震時の被害写真から建物の損傷度分類を行い，被害統計データとして不足している層破壊被害の発生実態を明らかにする．次に木造建物の層破壊発生要因を究明するため，地震動強さや建物属性との関係について分析を行い，層破壊被害を評価可能な損傷度別被害関数を構築する．

3.1　建物損傷度の分類と層破壊被害建物の同定

地震災害時にはこれまでに様々な機関によって建物の被害調査が実施されたが，層破壊に着目した調査は少なく，その発生実態に関するデータは十分ではない．本節では，まず1995年兵庫県南部地震時に撮影された被害写真から建物の損傷度分類を行い，層破壊建物を同定する．そのデータを用いて層破壊建物の被害パターンの特徴と空間分布について検討を行う．

3.1.1　使用データ　－阪神・淡路大震災GISデータベース－

震災被害に関する時空間情報を記録するためには地理情報システム（Geographic Information System：GIS）の活用が有効である．独立行政法人防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センターでは兵庫県西宮市を対象として阪神・淡路大震災 GIS データベース「西宮 Built Environment データベース[3.1)]（以下，西宮BEDB）」の構築を行っている．図-3.1に対象とした西宮市の位置と日本都市計画学会関西支部と日本建築学会近畿支部による調査[3.2)]（以下，二学会合同調査）による建物全壊率の分布を示す．西宮市は兵庫県南部地震による被害が比較的小さい地域から甚大な気象庁震度7の地域を含んでいる．

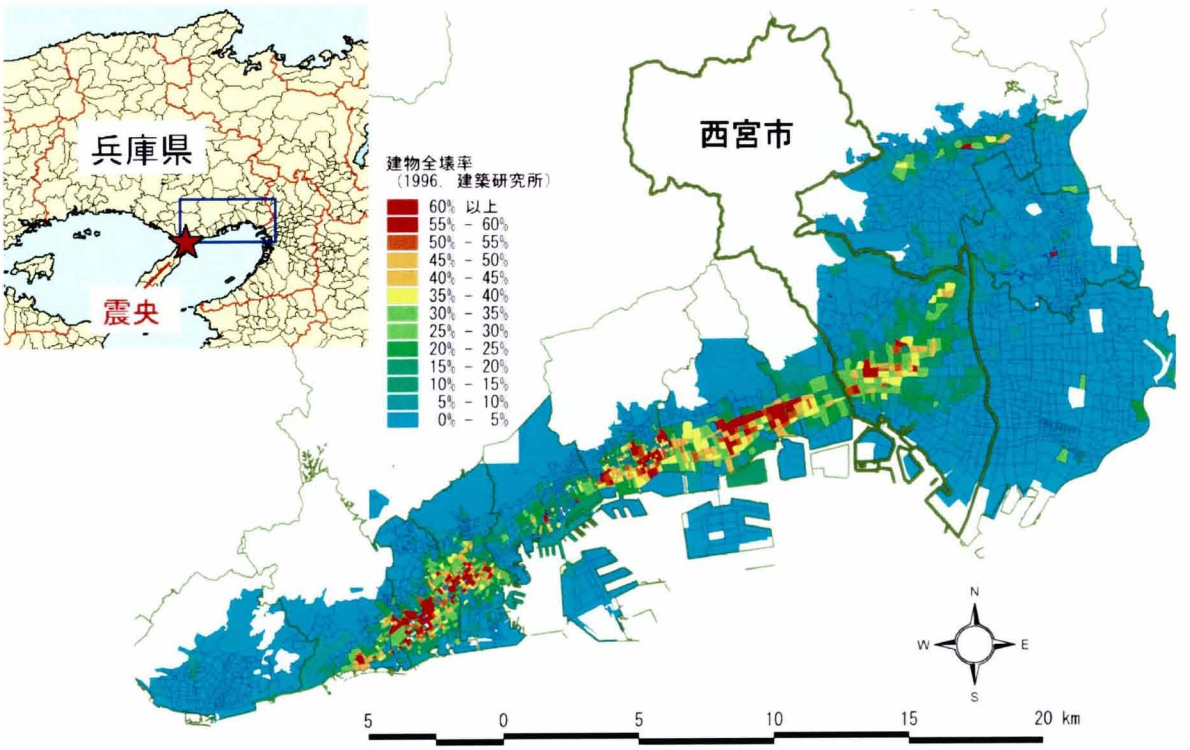


図-3.1　「西宮 Built Environment データベース」の対象地域と兵庫県南部地震における建物被害の分布 [3.2)]

西宮市の地形の様相を図-3.2 に，建物の分布を図-3.3 に示す．西宮市の面積は約 100km^2 で，北部は山地が多く，南部の平野部に市街地が広がっている．地震発生時の人口は 424,101 人（1995 年 1 月 1 日現在）で，特に南部の山陽新幹線と阪神電鉄線の間に人口が集中していた．被害（2002 年 12 月 26 日現在）について西宮市による罹災調査結果[3.3)]によると全壊 20,667 棟，半壊 14,597 棟であった．また関連死を含み 1,126 名の死者が発生した．図-3.4 に西宮 BEDB の構成概要を示す．西宮 BEDB には，被災者の生活再建を果たす上で最重要課題である「すまい」を基本単位とし，建物 1 棟毎に 1)バルナラビリティ（都市情報，建物情報など），2)ハザード（地震動など），3)被害（死者，建物被害など），4)事後対策（避難所，仮設住宅，公費解体など）のデータが相互参照可能な形式でリンクしている．

図-3.2　西宮市の地形の様相

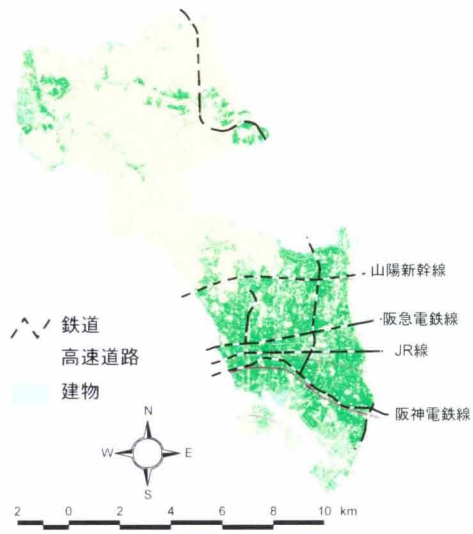


図-3.3　西宮市の建物の分布

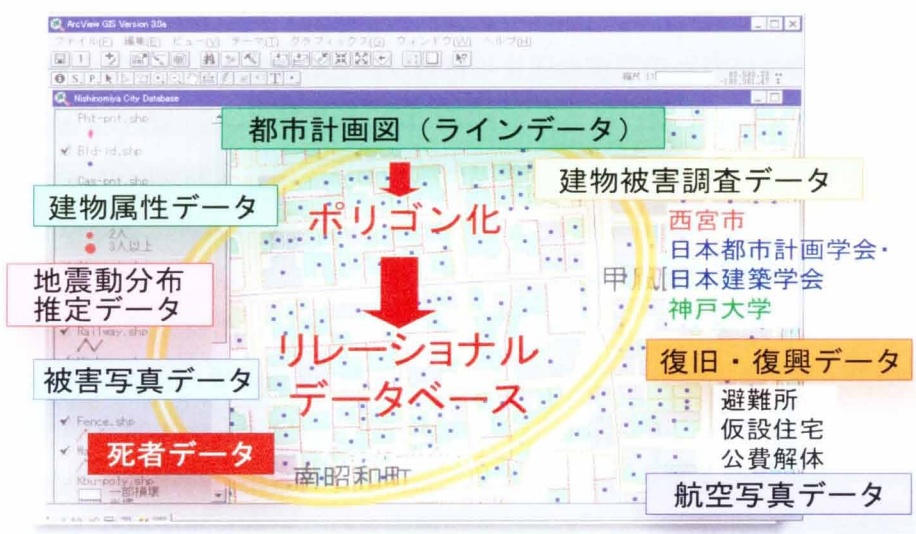


図-3.4　「西宮 Built Environment データベース」の構成

これらのデータの内，建物情報データは，西宮市から提供されたものであり，用途，構造，階数，建築年，建築面積，延床面積などの詳細な情報がリンクされている．また，被害イメージデータとして，二学会合同調査[3.2)]の時に撮影された 11,426 枚の被害写真がデジタル化され撮影位置とその方向が矢印として表現されたポイントデータとリンクされている．これらの被害写真には 26,075 棟の建物が撮影されている．図-3.5 に被害写真データの GIS 画面上の表示例を示す．

図-3.5　被害写真データの表示例

3.1.2　建物損傷度の分類基準と層破壊被害建物の同定方法

(1)　建物損傷度の分類基準

兵庫県南部地震で様々な目的のもとに行われた建物の被害調査における被害程度の記述は，調査目的によって異なり，「全壊」，「半壊」，あるいは，「大破」，「中破」などに分類されたが，前章で述べたように必ずしも「全壊」=「大破」の関係は成り立っていない．また，自治体による罹災証明書発行のための調査のように同じ調査目的，基準のもとに実施された調査であっても，各自治体において独自の調査項目が設定されたことや，建築の専門家ではない行政職員が調査を実施した影響などによって判定にばらつきが生じていたことが堀江ら[3.4), 3.5), 3.6)]により明らかにされている．これらの研究から同じ全壊であってもその被害程度は様々となっていると思われる．

こういった建物の被害評価における問題の解として，岡田・高井[3.7), 3.8)]は木造建物および RC 建物の被害パターンの分析を行い，建物被害を視覚的に分類した被害パターンチャートを提案している．岡田・高井[3.7)]によって提案されている被害パターンチャートを図-3.6 に示す．このパターンチャートは，建物内の生存空間の損失に着目して開発されたものである．また，堀江ら[3.9)]は，チャートの充実を図るために兵庫県南部地震における尼崎市の液状化被害事例から木造建物の液状化による被害パターンチャートの提案を行っており，液状化による主要な被害モードは震動による被害と異なり，尼崎市の事例では内部空間が滅失するような被害形態が発生

していなかったことが明らかにされている．これらの被害パターンチャートを用いることにより，建物被害調査における被害定義の相違や調査者による判定結果のばらつきの最小化が期待でき，生存空間の有無に立脚した信頼性の高い建物被害分類が可能となる．したがって，本研究では，被害パターンチャートをベースとした建物損傷度の分類基準を採用する．

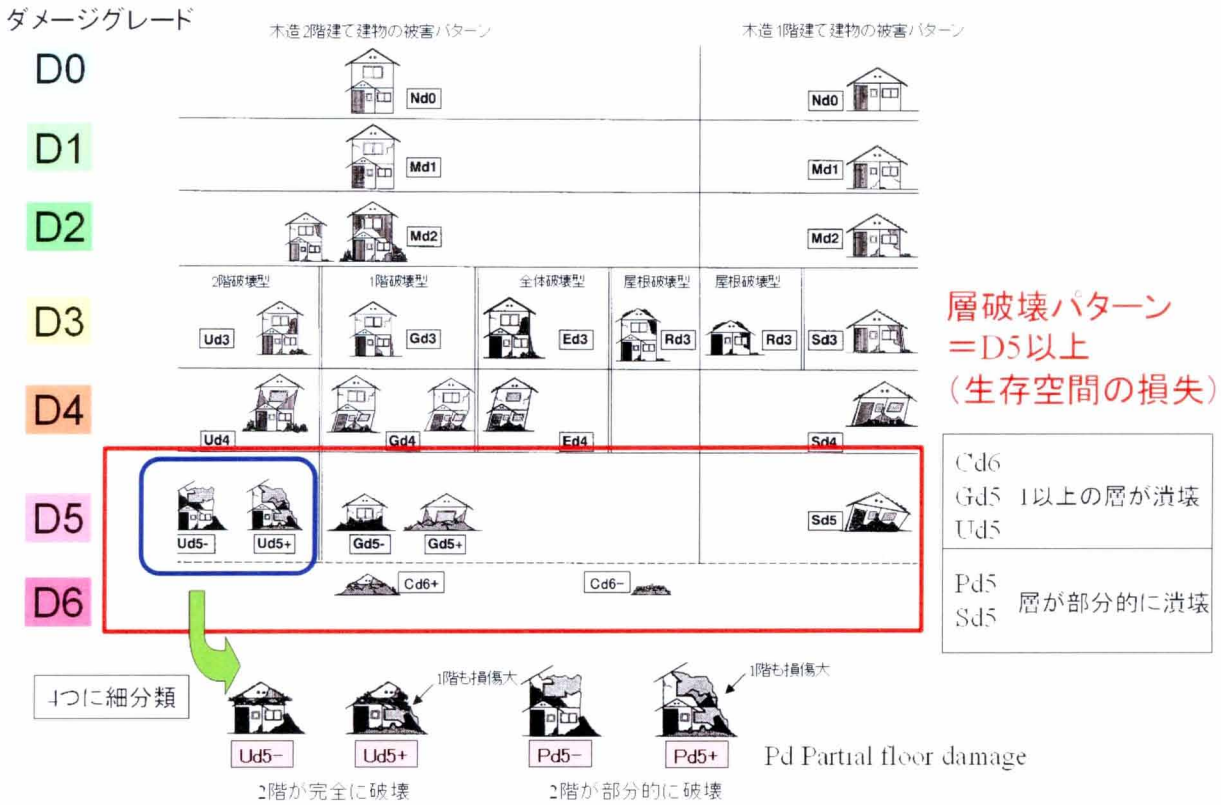


図-3.6　木造用被害パターンチャートを用いた建物損傷度の定義（岡田・高井[3.7]によるチャートに一部加筆）

ここで，堀江ら[3.10]は兵庫県南部地震時に撮影された被災建物の写真をもとに，パターンチャートによる分類結果と国の統一被害認定基準[3.11]との対応について分析を行い，ダメージグレードと被害認定基準との関係について，「D4」は「全壊」に D3 は「半壊」に対応すると結論づけている．したがって，ダメージグレードで定義される建物損傷度と，人的被害との関係や，被害認定基準との関係から，建物が保有すべき性能との対応は以下のように位置づけることができる．

D5：生存空間の損失を伴い，「安全性」が損なわれた状態．

D4：被害認定基準において住家が滅失したものと定義される．すなわち建物が保有すべき「修復性」が損なわれた状態．

D3：被害認定基準において住家の損壊は甚だしいが，補修すれば元通りに再使用できる程度のもの．すなわち，「使用性」が損なわれた状態．

(2) 層破壊被害建物の同定方法

西宮 BEDB を用いて，西宮市における層破壊被害建物の同定を行った．具体的には図-3.7 に示すようにこのデータベース内の被害写真に撮影された 26,075 棟の建物について，液状化被害は確認できなかったため基本的には，(a) 岡田・高井 [3.7),3.8)]により提案された被害パターンチャートに基づく被害分類，(b)航空写真を用いた被害判読，および(c)現地聞き取り調査による被害確認の 3 段階の手法により層破壊の発生有無を判別した．

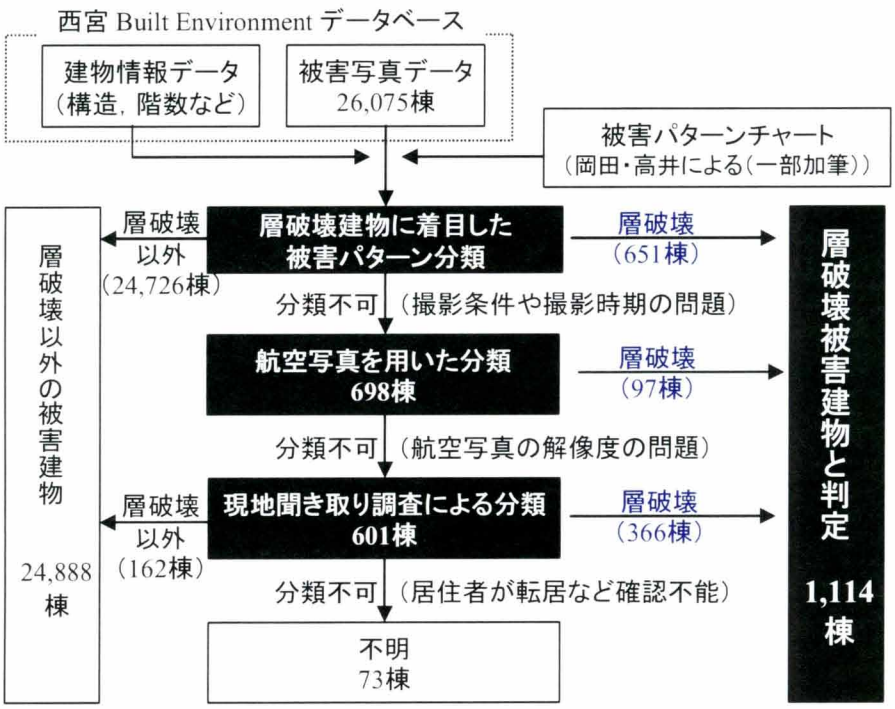


図-3.7 層破壊建物の同定方法

(a) 被害写真と被害パターンチャートによる分類

図-3.6 に示した被害パターンチャートを基に被害写真に撮影された建物の被害パターン分類を行った．ただし，建物の 2 階部分が層破壊を起こすパターンである Ud5+, Ud5-については，内部空間の損失量から細分類を行い，図-3.6 に併せて示すように Pd5+, Pd5-を新たに設定した．層破壊の定義は部分的に内部空間が損失したパターンである Pd5 と, Sd5（1 階建て建物の内部空間の損失が著しいパターン）を含め，被害パターンチャートのダメージグレード D5 レベル以上とした．この層破壊の物理的破壊現象の側面から定義すると，本研究における層破壊(D5,D6)とは，地震水平力が建物に作用して建物の水平変形が進展し，それに伴い架構の破壊が進行して水平力抵抗能力を失う破壊であり，その結果として，生存空間の損失が生じるような破壊状態として定義する．ここで，写真の撮影角度や距離などの問題で判断が困難な場合や，撮影時期

が本震後 2 週間以上経過していたため，既に解体された建物や震災によって瓦礫状態になったかどうか判断できない建物が存在した．

(b) 航空写真を用いた分類

被害写真で分類できなかった建物について，震災直後の 1995 年 1 月 18 日～22 日に撮影され，西宮 BEDB にリンクされている航空写真を用いて層破壊の有無を判断した．しかし，航空写真では損傷が大きく，瓦礫化した D6 レベルの建物は判断可能であったが，他の被害については航空写真の画像解像度(地上解像度 40cm/1pixel）が被害の判別に十分ではなかったため，分類が不可能な建物が存在した．

(c) 現地聞き取り調査による分類

最終的に，住民に対して被害状態に関する聞き取り調査を行った．調査は，西宮 BEDB と住宅地図を基に対象建物の住所を特定し，その住所の居住者にパターンチャートからどのような被害形態であったかを選択してもらう方法で行った．証言の信頼性が低いと判断した建物や，土地区画整理事業などで街の様相が一変してしまったため，居住者や近隣住民が分からない建物は不明とした．

3. 1. 3 層破壊建物の被害パターンと空間分布

被害パターン分類の結果，西宮市で写真撮影された建物の内，1,114 棟を層破壊と判定した．図-3.8 に層破壊パターンの詳細を示す．2 階建て建物の 1 階が層破壊するパターン（Gd5+, Gd5-）が最も多く，次に多い全ての層が層破壊するパターン（Cd6+, Gd6-）と合わせると全体の 89.1％を占めていた．

図-3.9 に層破壊建物分布および二学会合同調査結果を旧建設省建築研究所[3.12)]が GIS 化したデータによる建物全壊率の分布を併せて示す．全体的には二学会合同調査による全壊率が高い地域に分布する傾向がある．また，木造建物は非木造建物に比較して広い範囲に層破壊が分布している．これは，耐震性能の差が一因しているためと考えられる．

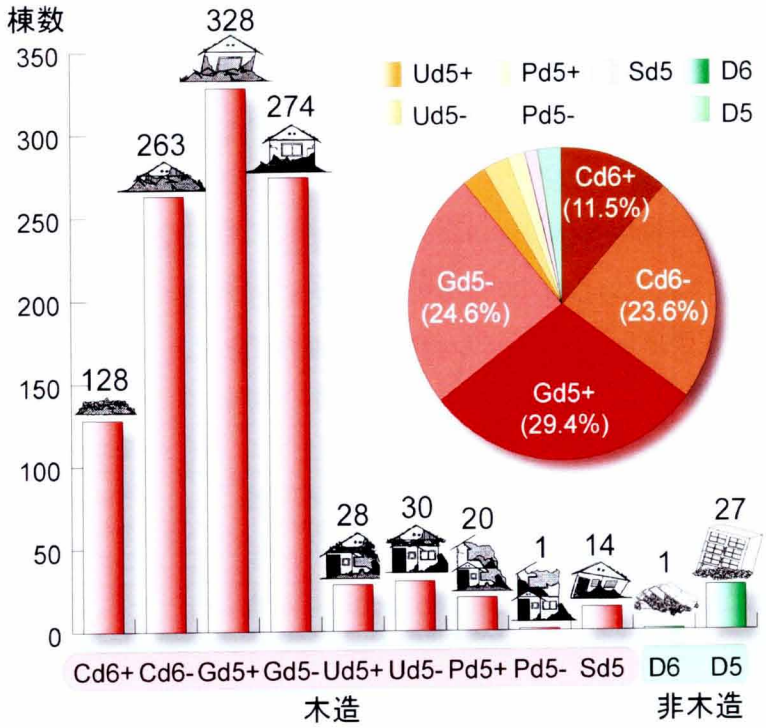


図-3.8　層破壊建物の被害パターン

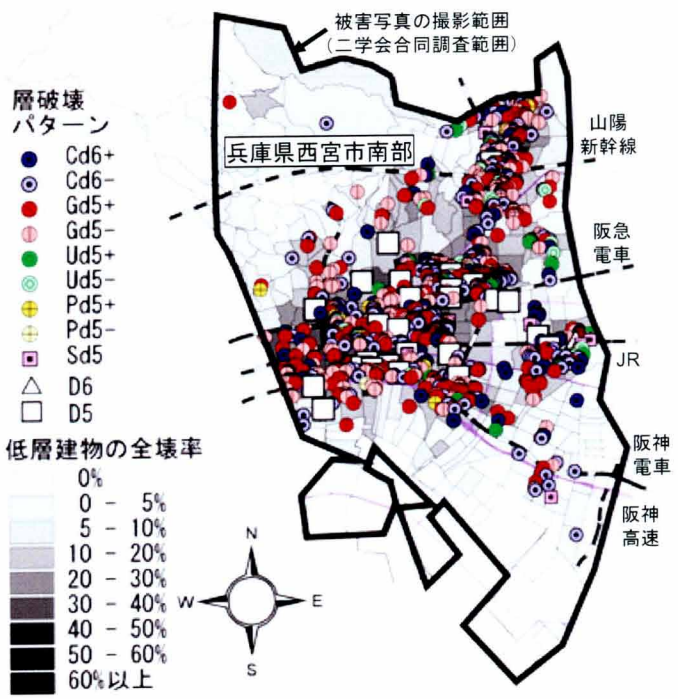


図-3.9　層破壊建物の分布

3.2　表層地盤震動特性を考慮した地震動強さ指標に関する検討

本節では，地震による建物被害発生の誘因となる外力に着目して，表層地震動特性と層破壊被害との関係について検討を行い，建物被害関数構築のための地震動強さ指標を設定する．

3.2.1　地震動分布推定データ

本研究では，地震動データとして Kohiyama *et al.*[3.13]が西宮 BEDB を用いて地震動分布推定を行った結果を使用して，以降における検討を行った．はじめに，その地震動データの概要を以下に記す．Kohiyama *et al.*は佐藤ら[3.14]の手法により西宮市南部地域について地震動分布シミュレーション解析を行っている．このシミュレーション解析は断層の破壊点から観測点までの地震動の伝播経路の影響と地盤の増幅特性を考慮するため，震源断層モデル，深層地盤モデル，表層地盤モデルを構築して 1 次元重複反射理論により地表面の地震動のフーリエスペクトルを求めたものである．震源断層モデルは Sekiguchi *et al.*[3.15]の断層破壊過程モデルが採用されている．このモデルは，震源域および近地地震記録を用いたマルチタイプウィンドウ線形波形インバージョンを行うことにより得られ，淡路島側から神戸側はそれぞれ 7×7，5×7，7×8 の合計 140 要素区域で構成されている．深層地盤モデルは阪神地域活断層調査委員会[3.16]による深度分布図，断面図，断面位置図から，地震基盤面上面～工学基盤面上面までの大阪層群の 3 層層厚モデルが構築され，表層地盤モデルは西宮市から提供された 109 地点のボーリングデータに基づいて作成されている．空間分布は，求められた各ボーリング地点のフーリエスペクトルから，近傍 4 点による 2 次の Inverse Distance Weighted (IDW)法により内挿計算されて求められたものである．その結果，西宮 BEDB には最大地表加速度（PGA），最大地表速度（PGV），スペクトル強度（SI）が建物 1 棟単位でリンクされている．図-3.10 に 109 地点のボーリング位置と推定結果の一例として PGV の分布を示す．

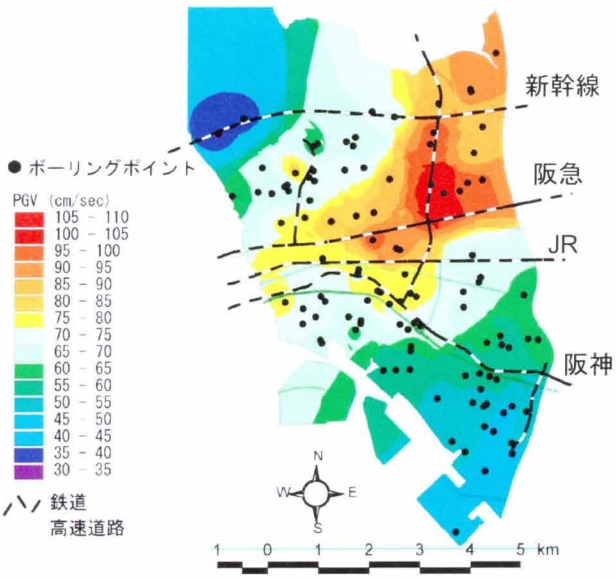


図-3.10　ボーリング位置と最大地表速度（PGV）の分布

3.2.2　データセットの構築

検討にあたり，層破壊被害分析を行うためのデータセットを構築した．ここで，前節において被害写真を用いて層破壊を同定した結果，西宮市における層破壊建物の 97%は木造建物であった．そこで，以降において木造建物の層破壊発生要因の分析を行うためにデータセットは木造建物を対象とした．構築の流れを図-3.11 に示す．西宮 BEDB には 96,176 棟の建物（ポリゴン枠）が備わっている．まず，この建物に地震動データを空間結合によりリンクさせた．地震動分布の解析は西宮市南部を対象に行ったものであり，109 点ボーリングポイントについての応答スペクトルシミュレーション結果から地震動強さを求め，内挿計算を行い評価されたものである．したがって，図-3.12 に示すように解析結果の信頼性が高いと考えられるボーリングポイントで囲まれる範囲を分析対象エリアとして設定した．

対象エリア内の建物数は西宮 BEDB 全体の約 8 割にあたる 75,240 棟である．この建物に属性情報をリンクさせ，属性情報をもとに木造建物を選別し，その結果 32,825 棟を分析対象建物として設定した．ここで，西宮市から提供された建物属性データはポイントデータで作成されており，建物ポリゴン（家枠）との位置関係から，ポリゴン内に含まれるポイントをその建物の属性としてリンクした．その結果，位置関係によってはリンクが不可能であった建物が存在している．属性情報のリンクは無作為に行われており，これらのデータを分析することで対象エリア内の木造建物全体の傾向を把握することが可能と考えている．さらに，これらのデータから写真データを持つ建物データ 11,908 棟をサンプルデータとして抽出した．ただし，写真は無意識のうちに被害が大きい建物や角地に建設されている撮影しやすい建物，あるいは建物の形状に特徴があるような写り映えの良い建物を撮影している可能性があり，サンプルデータが偏って抽出されていないかどうかを $\chi 2$ 乗検定により確かめている．表-3.1 に分析対象建物 32,825 棟の建物種類と階数，構造との内訳を示す．また，表-3.2 にサンプルとして抽出したデータ 11,908 棟のクロス集計を示す．ここで，西宮 BEDB では建物種類は 26 種類に分類されているが，表-3.3 に示すように建築年数や建物規模，被害率を考慮して，1)一戸建住宅，2)共同住宅，3)長屋建住宅，4)農家住宅，5)商工業施設，6)その他の 6 グループに統合した．

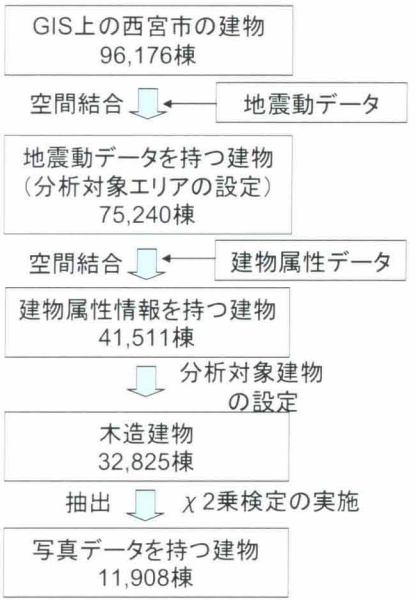


図-3.11　データセット構築の流れ

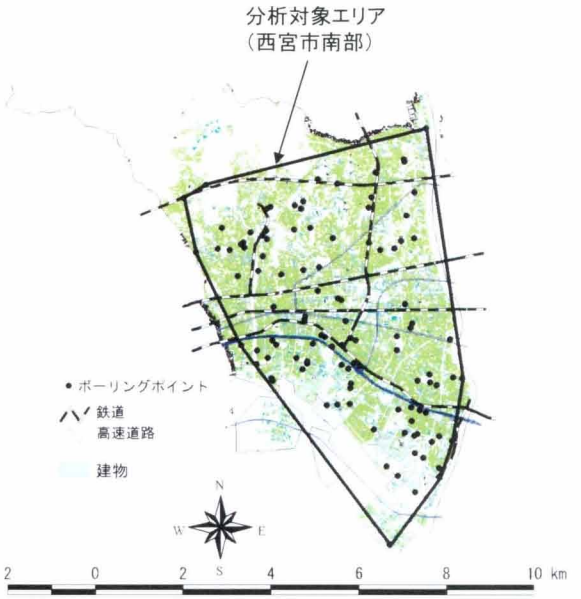


図-3.12　分析対象エリア

表-3.1　分析対象建物の建物種類と階数，構造の内訳

階数	構造(屋根種) \ 種類	一戸建住宅	共同住宅	長屋建住宅	農家住宅	商工業施設	その他	総計
1階建	在来(瓦屋根)	2089	35	68	76	10	20	2298
	在来(瓦以外)	205	1	1	2	48	149	406
	プレハブ	5	0	0	0	1	0	6
	小計	**2299**	**36**	**69**	**78**	**59**	**169**	**2710**
2階建	在来(瓦屋根)	21777	1498	251	70	72	36	23704
	在来(瓦以外)	4135	230	55	0	86	101	4607
	プレハブ	467	27	2	0	0	0	496
	小計	**26379**	**1755**	**308**	**70**	**158**	**137**	**28807**
3階建以上	在来(瓦屋根)	600	6	2	0	3	0	611
	在来(瓦以外)	627	5	1	0	5	2	640
	プレハブ	57	0	0	0	0	0	57
	小計	**1284**	**11**	**3**	**0**	**8**	**2**	**1308**
	総計	29962	1802	380	148	225	308	32825

表-3.2　抽出建物の建物種類と階数，構造の内訳

階数	構造(屋根種) \ 種類	一戸建住宅	共同住宅	長屋建住宅	農家住宅	商工業施設	その他	総計
1階建	在来(瓦屋根)	719	14	36	41	5	7	822
	在来(瓦以外)	60	0	1	0	13	46	120
	プレハブ	1	0	0	0	0	0	1
	小計	**780**	**14**	**37**	**41**	**18**	**53**	**943**
2階建	在来(瓦屋根)	7886	667	115	39	39	11	8757
	在来(瓦以外)	1375	106	27	0	34	40	1582
	プレハブ	154	8	2	0	0	0	164
	小計	**9415**	**781**	**144**	**39**	**73**	**51**	**10503**
3階建以上	在来(瓦屋根)	213	4	0	0	3	0	220
	在来(瓦以外)	213	3	0	0	1	1	218
	プレハブ	24	0	0	0	0	0	24
	小計	**450**	**7**	**0**	**0**	**4**	**1**	**462**
	総計	10645	802	181	80	95	105	11908

表-3.3　分析対象エリアの建物種類別の平均的な属性

グループ名	種類	建物数	平均築年数（年）	建物規模 平均階数	建物規模 平均建築面積(m^2)	建物規模 平均面積比※	西宮市罹災調査 全壊率(%)
一戸建住宅	一戸建専用住宅	28555	25.5	2.0	69.5	1.8	30.9
	一戸建併用住宅	1407	31.6	2.0	88.0	1.8	34.0
	グループ全体	29962	25.8	2.0	70.4	1.8	31.1
共同住宅	共同専用住宅	1500	25.5	2.0	138.9	1.9	47.7
	ｱﾊﾟｰﾄ・寄宿舎	302	32.9	2.0	195.9	1.9	58.3
	グループ全体	1802	26.7	2.0	148.5	1.9	49.4
長屋建住宅	長屋建専用住宅	250	43.9	1.7	140.0	1.6	51.2
	長屋建併用住宅	130	28.5	2.0	151.9	1.9	31.5
	グループ全体	380	38.6	1.8	144.0	1.7	44.5
農家住宅	農家住宅	148	66.8	1.5	213.9	1.2	78.4
	グループ全体	148	66.8	1.5	213.9	1.2	78.4
商工業施設	店舗・百貨店	88	33.0	1.7	100.2	1.6	33.0
	事務所・銀行	63	21.2	1.9	96.2	1.9	15.9
	その他用工場	32	45.2	1.5	673.9	1.3	37.5
	旅館・料亭	16	40.3	2.1	158.1	2.3	37.5
	浴場	15	45.2	1.9	283.2	1.4	46.7
	病院	8	16.5	1.6	110.9	1.6	0.0
	劇場・映画館	2	42.0	2.0	203.5	1.2	0.0
	ﾎﾃﾙ・簡易旅館	1	38.0	2.0	98.0	1.9	100.0
	グループ全体	225	32.3	1.8	198.3	1.7	28.9
その他（寺社，付属屋，倉庫，土蔵，温室）	その他	150	38.7	1.5	268.2	1.4	4.0
	その他用倉庫	104	26.7	1.5	172.3	1.4	17.3
	その他用付属屋	2	20.0	1.5	63.0	1.4	0.0
	一般住宅用付属屋	20	46.6	1.4	106.6	1.4	50.0
	一般住宅用土蔵	1	83.0	2.0	15.0	2.0	0.0
	農家用倉庫	12	20.4	1.4	115.2	1.3	0.0
	農家用付属屋	10	40.5	1.2	161.9	1.1	60.0
	農地上家屋農業用倉庫	6	26.8	1.0	32.7	1.0	0.0
	簡易付属屋	1	30.0	1.0	6.0	1.0	0.0
	農家用土蔵	1	74.0	2.0	94.0	1.3	0.0
	農地上家屋温室	1	24.0	1.0	1470.0	1.0	0.0
	グループ全体	308	34.3	1.5	211.6	1.4	13.0
全体		32825	26.3	2.0	78.4	1.8	32.3

※面積比：延床面積/建築面積

表-3.1，表-3.2 を元に行った $\chi 2$ 乗検定の結果，$\chi 2$ 乗値は 0.01 であり，自由度 40 の有意水準 5%における $\chi 2$ 乗値は 55.8 であることから，抽出データは分析対象の全建物と同じ傾向を持つことが確認された．さらに同様の検定を建築年と被害の関係に基づいて行った．表-3.4 に分析対象の全建物のクロス集計を，表-3.5 に抽出データのクロス集計を示す．$\chi 2$ 乗値は 0.01 であり，自由度 12 の有意水準 5%の $\chi 2$ 乗値は 21.0 であることから，同様に同じ傾向を持つことが確認された．抽出されたデータの概要を表-3.6 に示す．抽出された建物の約 9 割は一戸建住宅である．平均築年数をみると，農家住宅は 68.2 年であり，他の建物用途に比較して古い．また，建物規模を比較すると，農家住宅は建築面積が広い平屋建ての住宅が多く，一戸建住宅，共同住宅，商業住宅は平均階数および平均面積比から 2 階の床面積が 1 階と同定度を有する総 2 階建ての建物が多いことがわかる．被害については，西宮市による罹災調査結果に基づく全壊率が高いのは農家住宅，共同住宅の順であった．

表-3.4　分析対象建物の被害（罹災調査）と建築年の内訳

被害＼建築年		～1951	1952～61	1962～71	1972～81	1982～94	総計
西宮市罹災調査結果	全壊	2323	1738	3406	2614	513	10594
	半壊	761	1100	2522	3192	1344	8919
	一部損壊	725	1065	2680	4691	3967	13128
	その他	52	52	40	25	15	184
総計		3861	3955	8648	10522	5839	32825

表-3.5　抽出建物の被害（罹災調査）と建築年の内訳

被害＼建築年		～1951	1952～61	1962～71	1972～81	1982～94	総計
西宮市罹災調査結果	全壊	999	720	1410	1059	159	4347
	半壊	288	395	902	1180	476	3241
	一部損壊	248	393	857	1379	1380	4257
	その他	13	19	17	9	5	63
総計		1548	1527	3186	3627	2020	11908

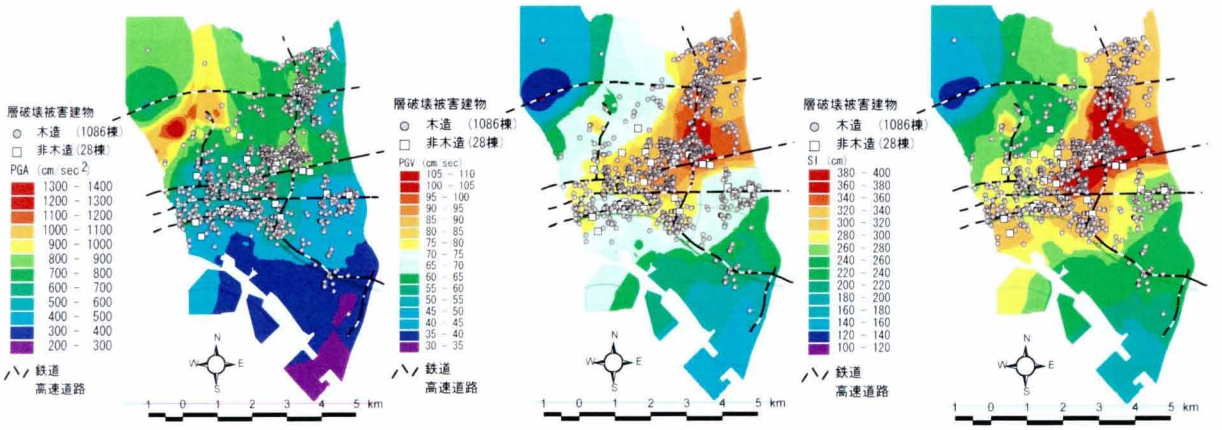
表-3.6　抽出建物データの概要

グループ名	建物数	平均築年数（年）	建物規模			西宮市罹災調査
			平均階数	平均建築面積(m^2)	平均面積比	全壊率(%)
一戸建住宅	10645	26.6	2.0	71.6	1.8	35.0
共同住宅	802	26.9	2.0	158.0	1.9	53.9
長屋建住宅	181	37.6	1.8	159.9	1.7	41.4
農家住宅	80	68.2	1.5	216.7	1.2	83.8
商工業施設	95	33.8	1.9	188.6	1.8	32.6
その他	105	35.3	1.5	291.7	1.4	12.4
全体	11908	27.2	2.0	82.6	1.8	36.5

3.2.3　層破壊被害と地震動強さ指標の関係

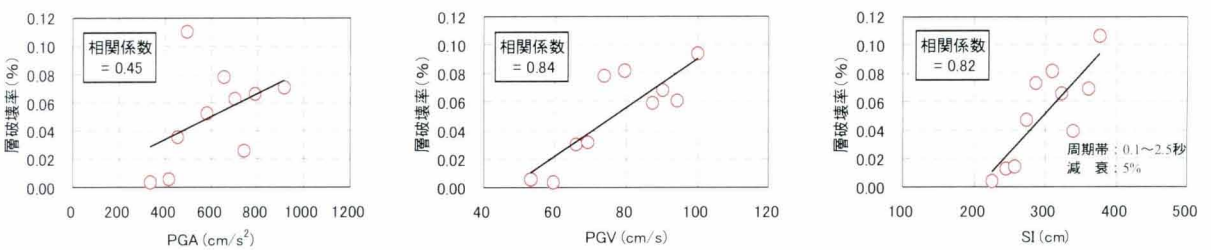
被害関数を構築する際の地震動強さの指標として，PGA，PGV，SI などが用いられている．そこで，層破壊被害がそれらの指標とどのような関係にあるかを明らかにするために検討を行った．図-3.13 に(a) PGA，(b) PGV，(c) SI の分布と層破壊が発生した建物の分布を示す．なお，SI は減衰率 5%の速度応答スペクトルを周期 0.1～2.5 秒で積分して求めたものである．図-3.13 を比較すると，層破壊は PGV および SI の大きい地域で多く発生している．一方，PGA は北部の山間地で大きくなっているが，層破壊が多く発生した地域は異なっている．さらに，詳細に各指標と層破壊発生の関係を分析するために，データセットとして抽出した木造建物 11,908 棟のうち，層破壊の有無が不明を除く 11,890 棟を対象として地震動強さ指標と層破壊率との対応を検討した．図-3.14 に各地震動強さ指標－層破壊率関係を示す．表-3.7 に各階級の建物棟数，地震動強さの値範囲，平均値および層破壊パターンの詳細を示すように，各階級に含まれる建物棟数は各階級の重みを等しくするために，原則として同数とした．また，各階級を代表するそれぞれの指標値は，階級に含まれる建物の平均値で表し，層破壊率は各階級に属する層破壊建物数を建物総数で除して算定している．ここで，各指標における階級数（プロット数）は，建物棟数を同数としたために，階級の代表値である地震動強さの平均値は等間隔ではない．本研究では，PGV の平均値の間隔が，5～10cm/s となるように階級数を 10 点に設定し，PGA および SI と相互で比較するため，PGA, SI についても同条件の 10 点に統一した．結果として，各階級の建物棟数は原則として 1,200 棟となっている．

図-3.14 の相関係数を比較すると PGV および SI と層破壊率は良好な関係が得られ，これらの指標により層破壊発生の評価が可能と思われる．



(a) PGA (cm/s2)　　(b) PGV (cm/s)　　(c) SI (cm)

図-3.13　地震動強さ指標と層破壊建物の分布



(a) PGA (cm/s2)　　(b) PGV (cm/s)　　(c) SI (cm)

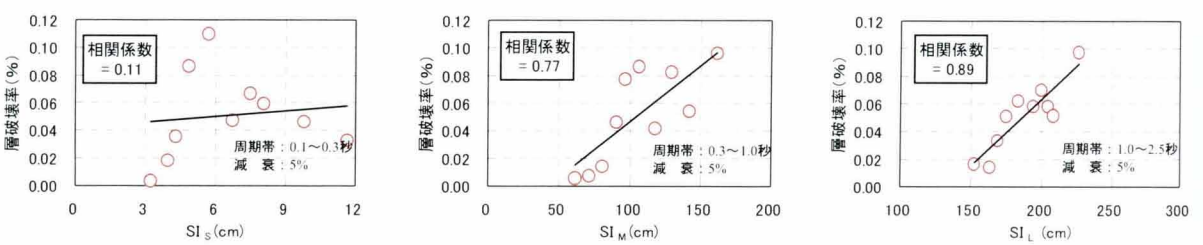
図-3.14　地震動強さ指標と層破壊率の関係

表-3.7　地震動強さ指標と木造建物の層破壊被害の詳細

	階級No.	建物	値範囲		平均値	2階建層破壊パターン数								1階建層破壊パターン数		
		棟数	最小値	最大値		Cd6+	Cd6−	Gd5+	Gd5−	Ud5−	Ud5+	Pd5+	Pd5−	Cd6+	Cd6−	Sd5
PGA (cm/s^2)	1	1200	272.2	375.9	336.4	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	2	1200	376.0	448.6	418.7	1	2	3	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	1200	448.6	460.3	453.5	4	14	9	5	3	3	0	0	1	2	2
	4	1200	460.3	534.5	493.8	14	21	39	41	4	2	2	0	2	4	3
	5	1200	534.7	627.3	583.0	4	11	18	22	1	1	2	0	0	2	2
	6	1200	627.4	682.6	656.1	10	7	36	23	3	1	3	0	4	5	2
	7	1200	682.6	724.5	703.2	8	11	23	22	1	0	0	0	1	4	5
	8	1200	724.5	758.9	742.1	3	3	9	8	2	4	1	0	0	0	1
	9	1200	758.9	831.1	790.0	5	18	23	19	5	2	3	0	2	1	1
	10	1090	831.1	1312.1	915.1	9	22	16	15	1	6	2	0	4	1	1
PGV (cm/s)	1	1200	47.9	57.4	53.2	1	3	1	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	1200	57.4	62.8	59.5	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	1200	62.8	67.7	65.9	3	9	8	5	3	3	1	0	1	1	2
	4	1200	67.7	71.1	69.2	6	6	15	8	0	0	0	0	0	1	2
	5	1200	71.1	76.0	73.7	6	15	24	40	1	2	1	0	1	2	2
	6	1200	76.0	85.2	79.5	11	18	29	19	4	4	5	0	3	3	2
	7	1200	85.2	89.0	87.3	5	16	18	20	3	3	2	0	0	2	2
	8	1200	89.0	91.9	90.2	8	10	34	17	0	1	1	0	3	3	5
	9	1200	91.9	96.4	94.3	7	8	19	21	6	2	1	0	1	6	2
	10	1090	96.4	107.1	100.2	11	24	28	24	3	4	2	0	5	1	0
SI (cm)	1	1200	194.2	240.1	225.2	1	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0
	2	1200	240.2	250.4	245.0	1	3	5	6	0	0	0	0	0	0	0
	3	1200	250.4	266.3	256.9	3	5	1	4	0	1	1	0	1	0	1
	4	1200	266.3	279.9	273.4	9	15	13	8	4	3	0	0	1	2	2
	5	1200	279.9	299.1	287.3	9	10	29	25	3	2	4	0	0	3	3
	6	1200	299.1	317.4	309.6	6	22	26	32	0	2	2	0	2	3	3
	7	1200	317.4	325.9	322.4	5	10	30	20	2	4	3	0	1	2	2
	8	1200	325.9	351.4	339.0	1	11	17	11	3	1	0	0	1	1	1
	9	1200	351.4	368.8	360.7	10	7	27	20	4	2	2	0	2	4	5
	10	1090	368.8	392.9	377.0	14	26	28	29	4	4	1	0	6	4	0

3.2.4　地震動周期の影響

建物および地震動の周期特性を考慮することにより層破壊発生の推定精度の向上が期待できる．そこで，表層地盤の地震動の周期特性が層破壊発生に与えた影響をみるために，SI の周期帯を短周期から長周期に分けて算定したスペクトル強度との対応について検討を行った．周期帯は 3 種類とし，SI_S は 0.1～0.3 秒，SI_M は 0.3～1.0 秒，SI_L は 1.0～2.5 秒を積分範囲とした．それぞれの減数定数は5％である．図-3.15 に周期帯別のスペクトル強度と層破壊率の関係を示す．各図の階級数および階級に含まれる建物棟数は前述どおりである．相関係数で比較すると，1.0～2.5 秒の周期帯との対応が最も良い．一方，0.1～0.3 秒の短周期帯の相関係数は小さく，今回の検討では層破壊発生への寄与が少ないことが示された．



(a)　SI_S　(0.1～0.3 秒)　　(b)　SI_M (0.3～1.0 秒)　　(c)　SI_L (1.0～2.5 秒)

図-3.15　地震動強さ指標と層破壊率の関係

境ら[3.17]は，地震動の破壊力指標と建物被害率との関係を検討し，建物の塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期帯域におけるパワーを持った地震動の影響が建物被害に対して大きいことを示している．その等価周期帯は 1.2～1.5 秒と指摘しており，今回の結果はその境らの結果と整合している．これより，層破壊の発生過程は，一瞬の衝撃力による部材の破壊というよりも，他の「全壊・半壊」といった破壊の延長上にあり，建物の変形が進展した結果として，多くの木造建物が層破壊に達したと考えられる．

村上ら[3.18),3.19)]は層破壊発生機構に関して，層破壊と建築年代，規模，屋根種別との関係を明らかにし，さらに倒壊限界必要壁率，倒壊限界変形角，必要終局せん断係数に関する検討を行っている．その結果，兵庫県南部地震における倒壊は，入力地震波の大振幅の第 1 波もしくは第 2 波で大きく変形したことにより発生したと推察しており，その倒壊限界変形角を 1/10～1/7.5 rad.と指摘している．したがって，木造建物の層破壊を防止するためには，このような限界変形を設定し，その変形までは，層破壊を発生させない，その変形を超えるような変形は起こさせないといった考え方が重要である．

これまでの検討結果より，PGA, PGV, SI と木造建物の層破壊被害発生率との相関分析から，PGA に比較して PGV, SI は相関が高いことが明らかになった．さらに SI については周期帯を考慮することにより，層破壊被害との相関が高くなった．したがって，層破壊被害との相関が高い周期帯を考慮した SI を用いることにより地震被害予測精度の向上が期待できる．しかし，SI を求めるためには，煩雑な地震動解析を必要し，また，周期帯を考慮する際に，どの周期帯が最も被害に影響を与え，その周期帯は建物の属性や被害程度にかかわらず，一定であるかどうかについて，今後の検討を必要とする．一方，速度は SI に比較して簡便な手法で推定することが可能で，本研究においては，被害関数を構築するにあたり，その地震動強さ指標として PGV を採用することとする．

3.3　木造建物の総合的な耐震性能評価指標としての建築年区分の設定

簡便に利用することが可能な被害関数を構築するためには，建物の耐震性を考慮した被害関数を作成することが有効である．木造建物の場合には，壁量や耐震診断結果など，直接的に耐震性を評価した指標を用いることが理想であるが，建物内部の詳細調査が必要であり，とくに層破壊を対象とした場合，実際に層破壊した建物のこのような指標データを十分に得ることは困難である．そこで，本節では，1) 自治体が保有している建築年や屋根種類などの建物情報と層破壊被害との関係について分析を行い，2) 被害関数を構築するための建築年代区分について検討を行う．また，それらの結果と前節の地震動データを加えて，どのような要因が層破壊発生にどの程度寄与していたのかを検討するため，3) 数量化Ⅱ類を用いた影響度評価を行う．

3.3.1　建物属性が層破壊被害に及ぼす影響

(1)　建築年と層破壊被害

建築年は建物被害の大きさと相関があることが知られており，一般に建築年が古い建物ほど被害率が高い．層破壊被害についても同様の傾向が見られるかどうかを確認するために検討を行った．検討に使用したデータは，前節で構築したデータセットを用いている．図-3.16 に建築年と層破壊率の関係を示す．層破壊被害においても建築年が古いほど層破壊率が高くなる傾向がある．ここで，建築年次ごとの建物棟数のばらつきにより，層破壊率が 1 年毎ごとに大きく変動することを抑えるため，建築年の前後 2 年を含めた 5 年平均から移動平均線を求めた．図-3.16 に併せて示す．図-3.16 より，層破壊率は，1960 年くらいから緩やかに低下している．

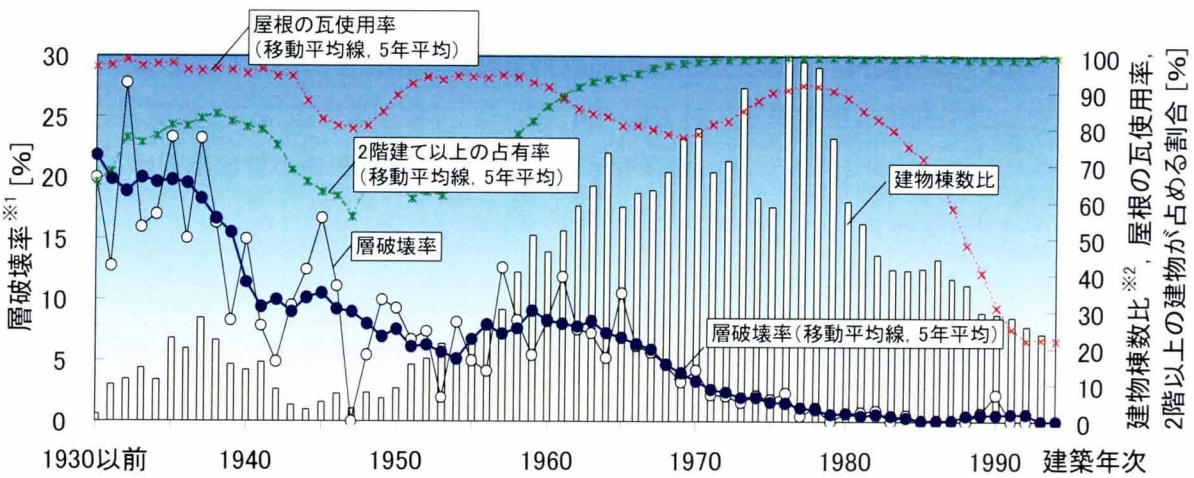


図-3.16　建築年と層破壊率の関係

牧, 林[3.20]は西宮市を対象として, 建築年と被害の関係を建築法規の有効性の観点から分析し, 木造建物の場合, 全壊率が大きく減少するのは 1962 年, 1970 年, 1980 年であり, 1959 年, 1971 年, 1981 年の建築法規改正の影響は少なく, 被害率は緩やかに低下することを明らかにしており, この傾向と一致している. 一方, 1940 年から 1960 年までは層破壊率はあまり大きくならず, むしろ新しい年次よりも小さい場合がみられる. この傾向は, 山口, 山崎[3.21] による西宮市の自治体調査結果をもとにした被害率の分析結果と整合している. この要因として, 図-3.16 に建築棟数, 屋根の瓦の使用率, 2 階建て以上の建物が占める割合の推移を併せて示しているが, この 1940 年から 1960 年は戦中, 戦後期であり, 建設された建物数が少なく, 屋根の瓦使用率が下がり, 2 階建て建物の建設が減って相対的に平屋建ての建物が増えるなど特殊な建築事情であった時期であり, その影響が考えられる. このように建築年以外の属性が層破壊の発生に影響した可能性があり, この観点からの検討を次に行う.

(2) 建物種類, 屋根種類, 階数の影響

建物の各種属性と層破壊率の関係を建物種類ごとにまとめた結果を表-3.8 に示す. ただし, ここでは構造耐力に影響する壁量等についてはデータがないため評価せずに, 主として建物の外観から判断可能な屋根種や建築規模などの指標について検討を行った. 表-3.8 をみるとプレハブ造の建物には層破壊が発生していない. また, 3 階以上の建物についても, 発生件数が 2 件と少ないため, 以降の分析では 2 階以下の在来工法について, 層破壊率との関係を検討する. 図-3.17 に建物種類, 屋根の種類, 階数別の層破壊率の関係を示す. 瓦屋根と瓦以外の屋根を比較すると「その他」の建物を除いて全ての建物種類で瓦屋根の方が層破壊率は高くなっている. また, 階数を比較すると, 瓦屋根については農家住宅を除いて, 2 階建ての方が層破壊率が高い. 瓦以外の屋根についても一戸建住宅以外は 2 階建ての方が高い.

表-3.8 構造（屋根種類），階数，建物種類別の層破壊率

	種類	一戸建住宅		共同住宅		長屋建住宅		農家住宅		商工業施設		その他		総計	
階数	構造(屋根種)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)	%	(棟)
1	在来(瓦屋根)	4.0	(29)	7.1	(1)	0.0	(0)	25.6	(10)	0.0	(0)	0.0	(0)	4.9	(40)
	在来(瓦以外)	1.7	(1)	−		0.0	(0)	−		0.0	(0)	4.3	(2)	2.5	(3)
	プレハブ	0.0	(0)	−		−		−		−		−		0.0	(0)
	小計	3.9	(30)	7.1	(1)	0.0	(0)	25.6	(10)	0.0	(0)	3.8	(2)	4.6	(43)
2	在来(瓦屋根)	5.1	(399)	14.7	(97)	7.0	(8)	23.1	(9)	17.9	(7)	0.0	(0)	5.9	(520)
	在来(瓦以外)	0.7	(9)	11.3	(12)	0.0	(0)	−		2.9	(1)	12.5	(5)	1.7	(27)
	プレハブ	0.0	(0)	0.0	(0)	0.0	(0)	−		−		−		0.0	(0)
	小計	4.3	(408)	14.0	(109)	5.6	(8)	23.1	(9)	11.0	(8)	9.8	(5)	5.2	(547)
3以上	在来(瓦屋根)	0.9	(2)	0.0	(0)	−		−		0.0	(0)	−		0.9	(2)
	在来(瓦以外)	0.0	(0)	0.0	(0)	−		−		0.0	(0)	0.0	(0)	0.0	(0)
	プレハブ	0.0	(0)	−		−		−		−		−		0.0	(0)
	小計	0.4	(2)	0.0	(0)		(0)		(0)	0.0	(0)	0.0	(0)	0.4	(2)
総計		4.1	(440)	13.8	(110)	4.4	(8)	24.4	(19)	8.4	(8)	6.7	(7)	5.0	(592)

※括弧内の数字は層破壊棟数を示している.

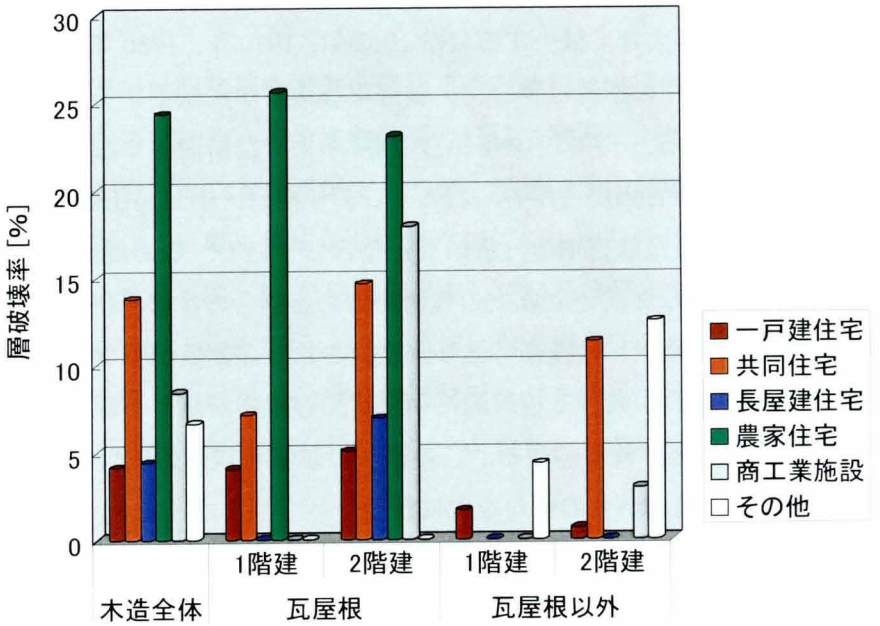


図-3. 17　建物種類，屋根の種類，階数別の層破壊率

図-3.17 について，木造建物全体の建物種類と層破壊率との関係をみると，農家住宅の層破壊率が最も高い．この要因として，前掲の表-3.3 をみると，農家住宅は建築年が古く，屋根に瓦を使用する割合が高いことによるものと思われる．次いで層破壊率が高い建物種類は共同住宅である．共同住宅と長屋建住宅を表-3.6 より比較すると，平均築年数は共同住宅の方が新しいが，層破壊率は長屋建住宅の 2 倍以上となっている．表-3.6 の平均建築面積はほぼ等しいが平均延床面積および平均面積比（延床面積の建築面積に対する比）は長屋建の方が小さく，層破壊の発生に建物規模の影響が考えられる．

(3) 建物規模，形状の影響

共同住宅と長屋建住宅の建物規模および形状を比較するため，図-3.18，図-3.19 にそれぞれの建築面積と面積比の関係を示す．ここで，共同住宅と長屋建住宅の違いについて，多くの場合は，共同住宅とは一棟の建物が、共同部分を除き、構造上、数個の部分に区画され、各区画がそれぞれ独立して住居に供される住宅で，長屋建住宅とは一棟の建物が、共同部分を除き、構造上、水平方向に連続する数個の部分に区画され、各区画がそれぞれ独立して住居に供される住宅である．図-3.18，図-3.19 を比較すると両者の傾向は異なり，共同住宅は面積比が小さいものが少なく，面積比 1.6～2.2 の範囲に集中しており，総 2 階建てに近い形状をしているものが多いことが分かる．一方，長屋建住宅は面積比が小さいものを多く含んでおり，1 階に対して規模が小さい 2 階が建てられるといった形状が多い特徴を有している．

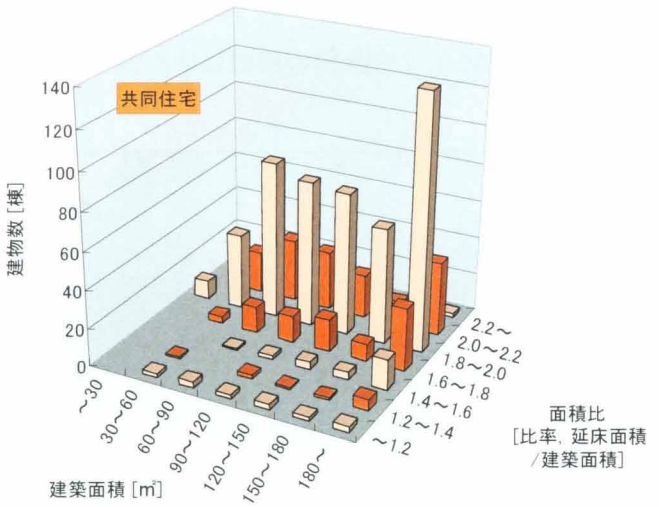


図-3.18　共同住宅の建物規模と形状

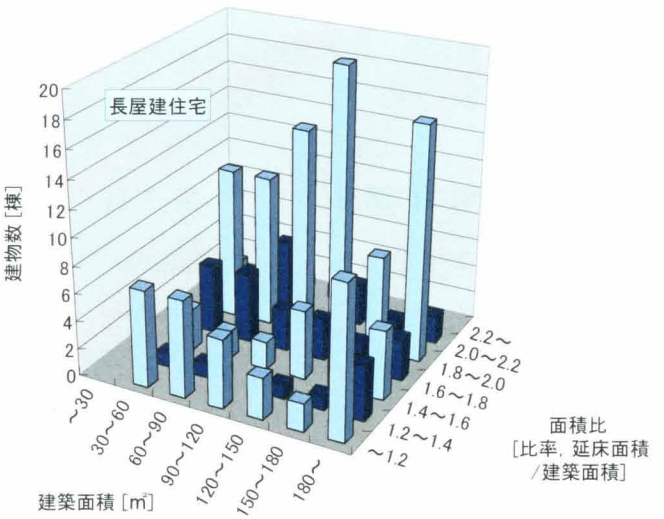


図-3.19　長屋建住宅の建物規模と形状

図-3.20 に建築面積と層破壊率の関係および図-3.21 に面積比と層破壊率との関係を示す．建築面積が大きくなると層破壊率も大きくなる傾向があり，とくに一戸建住宅および共同住宅においてその傾向は顕著である．面積比については，一戸建住宅，共同住宅，長屋建住宅の全てについて，1.4～1.6 で層破壊率が最も高くなっている．これは，1 階の約半分程度の規模の 2 階が設置されるような形状である．つまり，2 階の建設場所によっては建物に偏心が生じたり，間取りによっては通し柱が使えなかったりなど，立面的，平面的な構造計画の不備が建物の耐震性能に影響を与えている可能性があり，その結果として，層破壊率が高くなっているものと推察される．また，共同住宅は面積比 1.8～2.2 においても層破壊率が高くなっている．これは 2 階のボリュームが大きいこと，および共同住宅の場合，各階の各戸に出入り口や窓を設けるなど，特に間口側の壁量が少なくなることの相乗効果により層破壊率が高くなった可能性がある．写真-3.1，写真-3.2 に典型的な共同住宅と長屋建て住宅の被害写真を示す．

以上の結果より，共同住宅は建築面積が大きく且つ面積比が 1.8～2.2 の範囲において，建物が多く層破壊したため，長屋建住宅よりも全体の層破壊率が高くなったものと思われる．

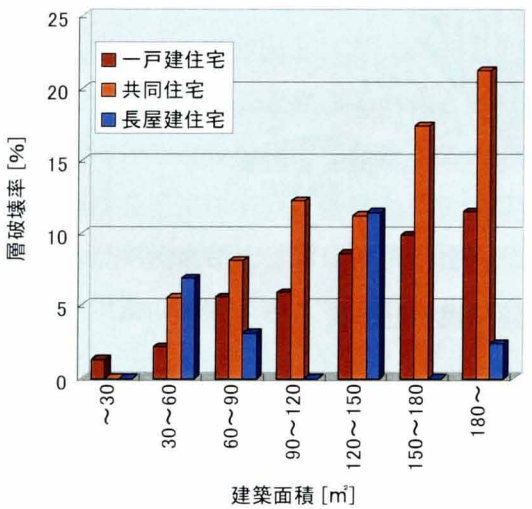


図-3.20　建築面積と層破壊率の関係

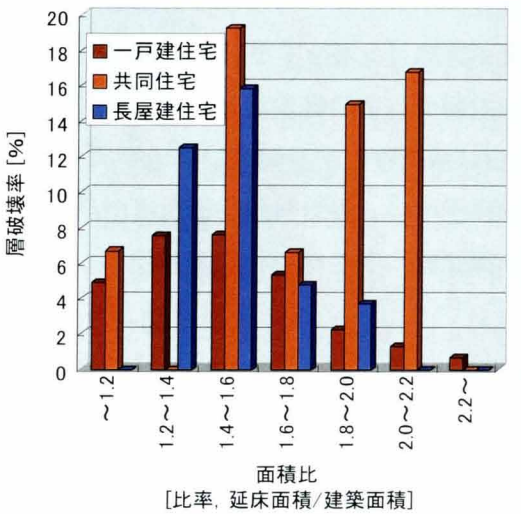


図-3.21　面積比と層破壊率の関係

建物ID	66712
建物種類	共同専用住宅
PGV [cm/s]	70.4
建築年	1963
建築面積[m^2]	230
延床面積[m^2]	457
面積比	1.99

写真-3.1　共同住宅の被害写真（総 2 階建て）

建物ID	80462
建物種類	長屋建専用住宅
PGV [cm/s]	70.4
建築年	1941
建築面積[m^2]	150
延床面積[m^2]	253
面積比	1.69

写真-3.2　長屋建住宅の被害写真（2 階が 1 階より小さい）

(4)　建物属性が層破壊の被害形態に与える影響

図-3.22(a)～(c)に一戸建住宅について層破壊建物の詳細な被害形態毎の建築面積と面積比の関係を示す．1 階層破壊型（Gd5＋, Gd5－)の建物は建築面積が広く，面積比も大きい傾向がある．これより，2 階のボリュームに対して 1 階の耐力が不十分であったことにより，1 階の層破壊が起こったものと思われる．2 階層破壊型（Ud5＋，Ud5－)については，建築面積が広く，面積比が小さい建物で発生した傾向がみられ，1 階と 2 階の剛性のバランスの影響により 2 階が大変形し，層破壊に至ったものと考える．全体層破壊型(Cd5＋, Cd5－)は，1 階層破壊型と 2 階層破壊型の中間に近いような関係を示している．これより建物の属性は層破壊被害の形態に影響を与えていたことが明らかにされた．

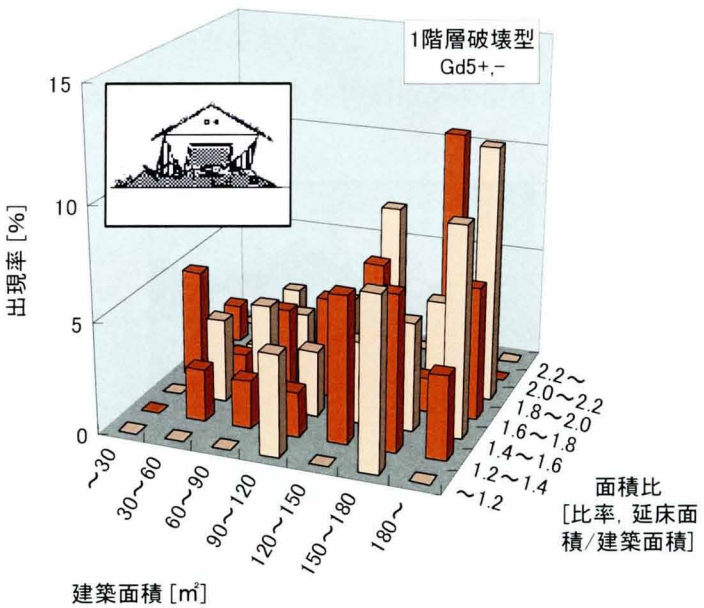


図-3.22(a)　建築面積，面積比と被害形態（1 階層破壊型 [Gd5+, Gd5－]）

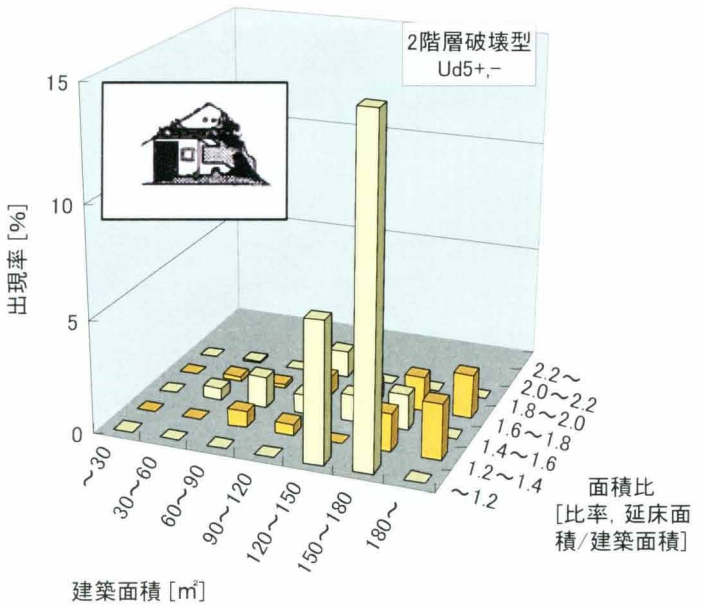


図-3.22(b)　建築面積，面積比と被害形態（2階層破壊型［Ud5+, Ud5-］）

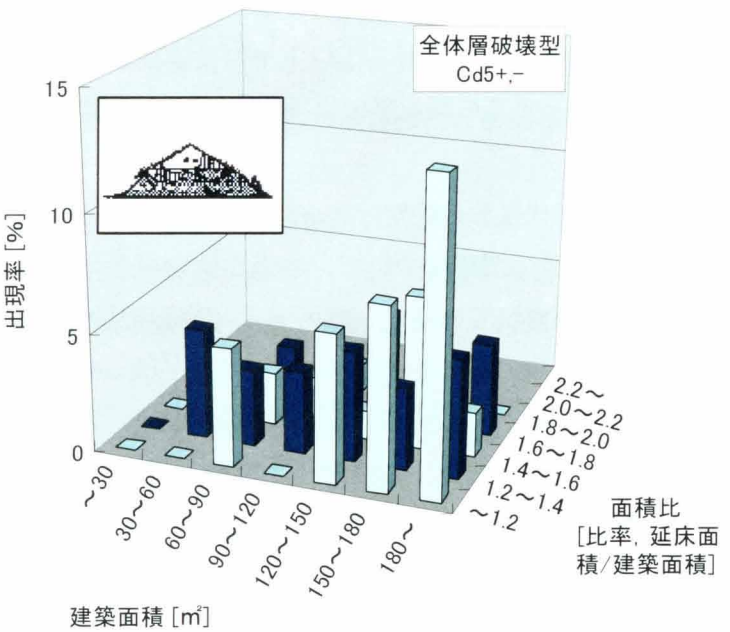


図-3.22(c)　建築面積，面積比と被害形態（全体層破壊型［Cd5+, Cd5-］）

3.3.2　建築年代区分の設定

(1)　層破壊被害と建物属性の関係

汎用的な被害関数を構築するためには，建物の耐震性を適当にグループ化し，耐震性を考慮した被害関数を作成することが有効である．前節において行った分析から，自治体が保有している建物情報と層破壊被害との関係について，以下の結論を得た．

1) 建築年が古いほど層破壊率が高くなる傾向がある．
2) 屋根に瓦を使用している方が瓦以外を使用している場合よりも層破壊率が高くなる傾向がある．
3) 2 階建て建物の方が 1 階建てより層破壊率が高くなる傾向がある．
4) 建築面積が大きくなると層破壊率が高くなる傾向がある．
5) 共同住宅，農家住宅の層破壊率が一戸建住宅，長屋建住宅，商工業施設，その他の住宅（寺社，付属屋，倉庫など）に比較して高い．
6) 建物の形状が層破壊発生要因の一因となっている．
7) 2 階建て一戸建住宅について，建物の属性が 1 階層破壊型，2 階層破壊型，全体破壊型のように，層破壊の被害状態に影響を与えている．

以上の結果の中で，建築年数は層破壊の発生に顕著に影響を与えており，耐震性を表す総合的な指標として用いることができると考えられる．以下では被害関数を構築するにあたり，適当な建築年代区分を設定するため，建築年数と層破壊被害の関係を考察する．

(2)　住宅の変容を考慮した建築年代区分の設定

既に述べたように，建築年と被害の関係について，木造建物の場合，建築法規改正の影響は少ないことが牧，林[3.20]により指摘されている．したがって，建築年代の区分を行う場合，建築法規以外も考える必要がある．

鈴木[3.22]は，住宅の変容要因を 1)外からの影響（社会的状況の変化，技術の発達，外来文化との接触），2)内からの要求（家族形態の変化，住要求・住意識の変化），3)計画の力（法的規制などの人為的な変革）の 3 種に分類し，第二次大戦後の住宅変容過程を次の 3 期に時代区分している．

1)　戦後復興期（1945～1955 年）
2)　高度成長期（1955～1973 年）
3)　低成長期　（1973 年～）

したがって建築年代区分を考える場合，基本的には上記の区分に従い，建築法規の改正は，耐震性に関する住宅の変容を左右する要因として捉えることにした．図-3.23 に建築年と層破壊率の関係に建築法規の改正年，および鈴木[3.22]による住宅時代区分を重ねて示す．

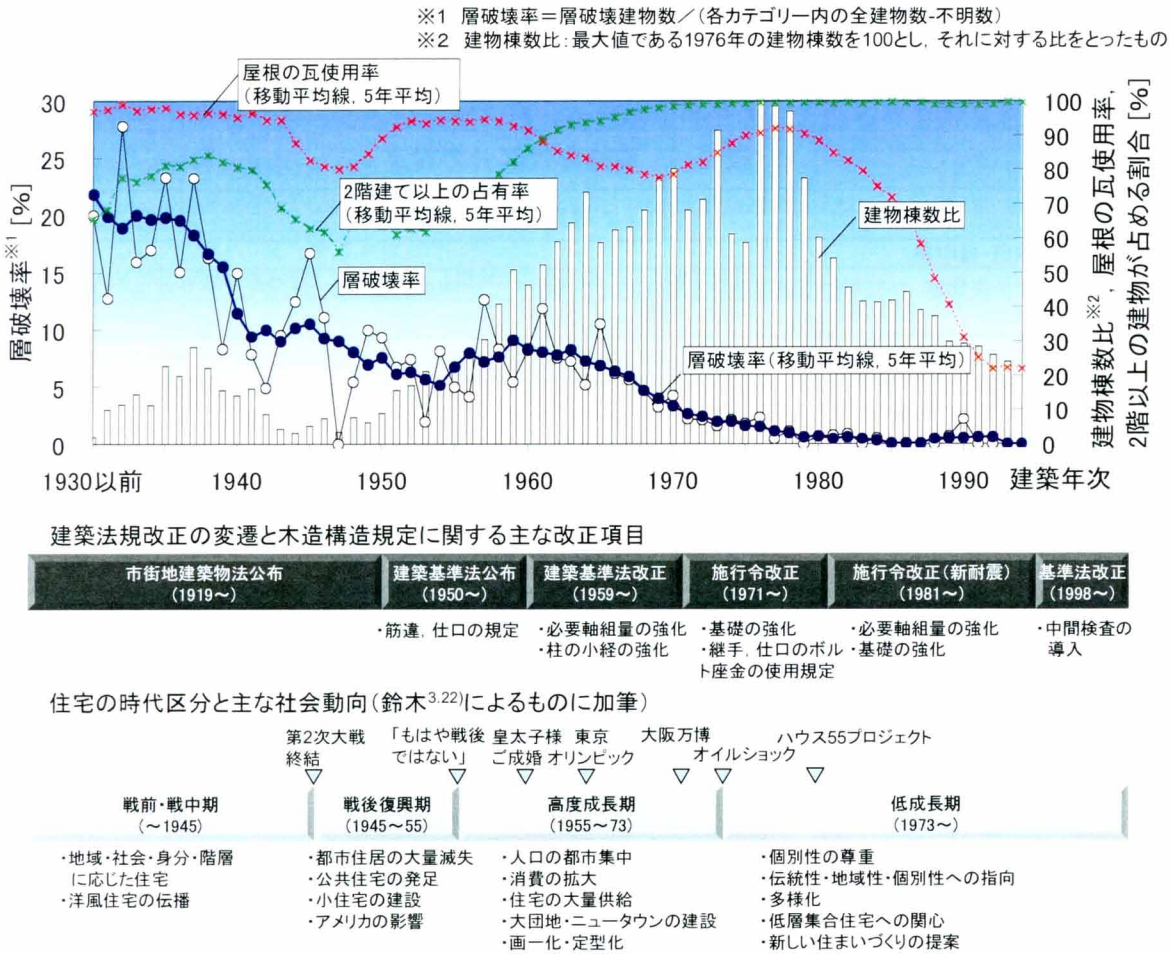


図-3.23　住宅変容過程と層破壊率の関係

ここで，建築年代区分は基本的には細かい方が良いが，細かすぎると使用面で煩雑となる．また，被害関数を統計的に構築する場合，十分な建物棟数が必要となるため，細分化は現実ではない．一方，区分解像度が最も必要な時期として，1955 年～1973 年の高度成長期がある．この時期は空前の建設ブームにあたり，住宅の質も分散が大きく，その結果として住宅の不良ストックが多い．そこで，この時期の代表的な社会変動を考慮して，以下のような細区分を本研究では提案する．

1) 高度成長期前期（1955～1960 年）：1959 年の皇太子ご成婚により，テレビが爆発的に普及し，それまでのマスメディアの役割を大きく変容させた．テレビの普及によって全国的に画一化された情報提供が促進され，住宅に対する意識にも大きな影響を与えたと推測される．
2) 高度成長期中期（1961～1964 年）：国家プロジェクトとしての 1964 年の東京オリンピック開催は，我が国の都市基盤整備を大きく促進させ，建設ラッシュを生んだ．
3) 高度成長期後期（1965～1971 年）：オイルショックによって低成長期へと移行するまでの間，関西圏での 1970 年の大阪万国博覧会の開催をはじめ，経済成長の影響が全国に拡大していったと考える．

以上のような高度成長期の細区分を含め，最終的には表-3.9 のように建築年代を 7 区分に設定した．

表-3.9　建築年代区分の設定

建築年代区分	設定に考慮した事項
-1945	戦前・戦中期
1946-1955	戦後復興期．1950年に建築基準法が公布されているが，この時期の建物棟数が少ないため区分することができない．
1956-1960	高度成長期前期．社会的には1959年の皇太子様ご成婚により，テレビが爆発的に普及し，それまでのマスメディアの役割を大きく変容させた．テレビの普及によって全国的に画一化された情報提供が促進され，住宅に対する意識にも大きな影響を与えたと推測される．また，1959年注)の建築基準法改正も考慮した．
1961-1964	高度成長期中期．社会的には国家プロジェクトとしての1964年の東京オリンピック開催は，我が国の都市基盤整備を大きく促進させ，建設ラッシュを生んだ．
1965-1971	高度成長期後期．社会的にはオイルショックによって低成長期へと移行するまでの間，関西圏での1970年の大阪万国博覧会の開催をはじめ，経済成長の影響が全国に拡大していったと考える．また，区分には1971年の建築基準法施行例改正も考慮した．
1972-1981	低成長期前期．1981年の建築基準法施行例改正を考慮した．また，社会的には，1980年から，当時の建設省と通産省が推進した国家的事業として，高品質の住宅を低廉な価格で供給することを目的とした「ハウス55プロジェクト」がスタートしたことも考慮した．
1982-1994	低成長期後期．

注）1959年の改正は12月23日から施行されており，1960年はその移行期となるため，1960年を区分境界に設定した．

3.3.3　数量化Ⅱ類を用いた影響度評価

上述の自治体保有情報に基づく建物属性に加えて，3.2 節において検討した層破壊発生要因の一つである地震動強さを加えて，それぞれがどの程度層破壊の発生に寄与していたのかを明らかにするために数量化Ⅱ類による検討を行った．外的基準とアイテム・カテゴリーを図-3.24 に示す．外的基準は層破壊を発生していたか否かで，アイテム・カテゴリーは 1) 地震動強さ，2) 建物種類，3) 建築年代，4) 建築面積，5) 面積比（延床面積を建築面積で除したもの），6) 階数，7) 屋根種類である．サンプルデータは，データセットを構築した図-3.12 の対象地域において地震動データ，建物属性データ，写真データの全て情報が備わっている木造建物 11,908 棟のうち，層破壊の発生が少なかったプレハブ造および 3 階建て以上の建物を除いた 11,263 棟とした．

図-3.24 に分析結果を併せて示す．偏相関係数を見ると，建築年代，地震動強さ，建築面積，建物種類の順に大きい．また，面積比，屋根種類，階数の順に低い値を示した．範囲をみても建築年代が最も大きく，これより，層破壊発生の最大要因は建築年と位置づけられる．次にカテゴリースコアについて，白黒反転したカテゴリーは＋側に大きな値を示した上位 10 項目を，灰色セルは－側に大きな値を示した 10 項目を示している．＋側には，1960 年以前の建築年代，70cm/s 以上の地震動強さ，120m^2 以上の建築面積，共同住宅，農家住宅が挙げられた．－側には，1972 年以降の建築年代，70cm/s 未満の地震動強さ，30 m^2 以上 60 m^2 未満の建築面積，長屋住宅，1.2 以上 1.4 未満の面積比，1 階建，瓦屋根以外の屋根種類となっている．これより，カテゴリースコアは被害の程度の大きさを意味していると考えられ，＋側ほど大きな被害を受ける可能性が高いと判断できる．ここで，階数と屋根種類について，両者ともに偏相関係数は低

いものの、カテゴリースコアでは、1階建建物および瓦屋根以外の屋根種類が－側に大きな値を示している．したがって，これらは層破壊の発生率を小さくする要因と考えられるが，反対に2階建て建物や瓦屋根であっても層破壊を免れた建物が多数あり，然るべき対策を講じておけば層破壊は防止できるものと考える．

外的基準は「層破壊被害：590棟」，「層破壊以外の被害：10673棟」

アイテム	カテゴリー	度数	カテゴリースコア	範囲	偏相関係数
地震動強さ（最大地動速度）V [cm/s]	1： V<50	252	-0.483	1.638	0.155
	2：50≦V<60	1605	-0.757		
	3：60≦V<70	2497	-0.416		
	4：70≦V<80	1977	0.347		
	5：80≦V<90	2023	0.238		
	6：90≦V<100	2391	0.315		
	7：100≦V	518	0.881		
建物種類	1：一戸建住宅	10029	-0.066	1.502	0.080
	2：共同住宅	782	0.856		
	3：長屋建住宅	179	-0.646		
	4：農家住宅	78	0.768		
	5：商工業住宅	91	0.160		
	6：その他（寺社など）	104	0.316		
建築年代 Y [年]	1：Y≦1945	1304	1.765	2.396	0.216
	2：1946≦Y≦1955	601	0.519		
	3：1956≦Y≦1960	908	0.451		
	4：1961≦Y≦1964	1169	0.214		
	5：1965≦Y≦1971	2234	-0.177		
	6：1972≦Y≦1981	3417	-0.541		
	7：1982≦Y≦1994	1630	-0.631		
建築面積 A [cm2]	1： A<30	663	-0.225	1.079	0.090
	2： 30≦A<60	4787	-0.235		
	3： 60≦A<90	2599	0.038		
	4： 90≦A<120	1347	0.051		
	5：120≦A<150	706	0.378		
	6：150≦A<180	407	0.489		
	7：180≦A	754	0.844		
面積比（延床面積/建築面積）R [比率]	1：R<1.2	978	-0.172	0.528	0.037
	2：1.2≦R<1.4	844	-0.311		
	3：1.4≦R<1.6	1680	-0.014		
	4：1.6≦R<1.8	2135	-0.002		
	5：1.8≦R<2.0	3842	0.031		
	6：2.0≦R<2.2	1597	0.216		
	7：2.2≦R	187	-0.023		
階数	1：1階建て	938	-0.815	0.889	0.074
	2：2階建て	10325	0.074		
屋根種類	1：瓦屋根	9562	0.050	0.331	0.040
	2：瓦屋根以外	1701	-0.281		

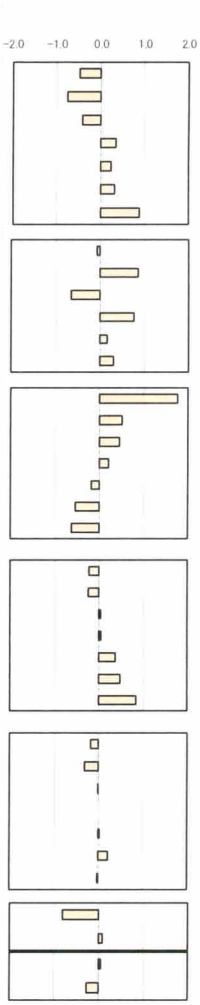


図-3.24　数量化Ⅱ類による影響度評価におけるアイテム・カテゴリーデータと分析結果

建築面積については，村上ら[3.19]は1階床面積と強軸方向，弱軸方向の補正壁率との検討を行っており，それによると建築面積の大きな建物は強軸方向の壁率が小さくなる傾向があり，そのため今回の分析において，層破壊の発生に寄与したものと思われる．また，建物種類の中で，共同住宅と農家住宅のカテゴリースコアが＋側に大きく，長屋建住宅は－側に大きくなっている．この要因として，3.3.1 節で述べたように，農家住宅は建築面積が大きく，古い建物が多いため層破壊の発生率が高くなり，共同住宅は総 2 階に近い建物が多く，また各階の各戸に出入り口や窓を設けるなど，特に間口側の壁量が少なくなることにより＋側に働いたものと考える．一方，長屋建住宅は平屋建てや，1 階に比較して 2 階が小さい形状が多く，その影響と考える．

3.4　木造建物の損傷度を反映する被害関数の構築

本節では，1) 建物の属性を考慮した層破壊被害関数を構築し，また，2) 層破壊以外の被害についても，建物の損傷度を反映した損傷度別被害関数を構築する．さらに他の被害調査結果に基づいて作成された被害関数と比較することにより，3) 構築された被害関数の妥当性の検証を行う．

3.4.1　層破壊被害関数の構築

(1)　構築方法

被害関数は，ある地震動強さ に対して被害率 R 以上が発生する確率 は，標準正規分布の累積確率分布関数 を用いて，対数正規分布で表せると仮定し，式（3.1）を用いて構築した．

$$P_R(x) = \Phi\{(\ln(x) - \lambda)/\zeta\} \tag{3.1}$$

ここで，λ，ζ は の平均値および標準偏差であり，確率紙を用いた最小二乗法により求めた．また，地震動強さは，3.2 節において層破壊の発生率と PGA，PGV，および SI との相関を比較した結果，相関が高く，SI に比較して簡便に求めることができる指標として PGV を採用した．被害関数を構築するにあたり，まず，最大地表速度の大きさに応じて建物を並べ替え，一定の単位に統合した．また，各階級に含まれる建物棟数は原則として等しくなるようにした．各階級を代表する PGV の値は，階級に含まれる建物の平均値である．層破壊率は各階級に属する層破壊建物数を建物総数で除して算定している．図-3.25 にλ，ζの算定例として，木造建物全体について PGV と層破壊率の関係から得られた回帰式を示す．ここで，3.3 節の表-3.8 をみるとプレハブ造の建物には層破壊の発生が確認されていない．そのため，以降では被害関数を構築するにあたり，木造建物とはプレハブ造を除いた建物を対象とすることにする．

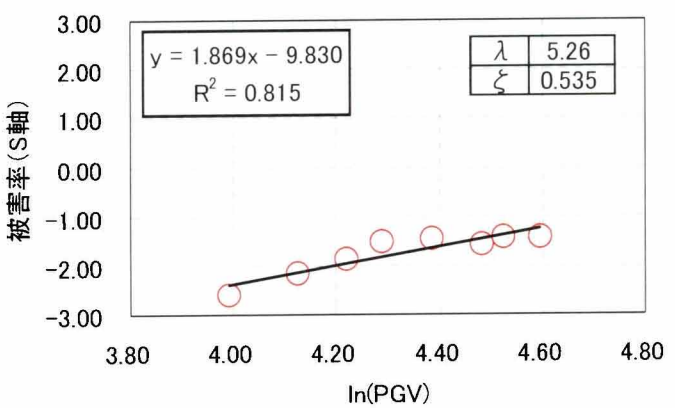


図-3.25　PGV と層破壊被害率の関係（確率紙表示）

(2) 建築年代別層破壊被害関数

3.3 節における数量化Ⅱ類による層破壊発生要因の影響度に関する検討の結果，建築年代が最も層破壊の発生に寄与していた．そこで，建築年代は建物の老朽化による性能低下や，時代の変遷に伴う新構法や新材料の開発・普及，建築基準や法規などの法制度の改正，あるいは住まい方に対するニーズの変化など，耐震性能に直接あるいは間接的に影響を与えるものであり，耐震性を表す総合的な指標として用いることができると考え，木造建物の建築年代別の層破壊被害関数を構築した．

建築年代の設定は 3.3 節における検討結果をもとに，先に示した表-3.9 の通り 7 区分とした．表-3.10 に各年代の回帰係数の一覧を示す．1965 年以降の比較的新しい年代における決定係数 R^2 が低くなっているが，これは新しい建物の層破壊の発生が少なかったことによるものである．

表-3. 10　建物の属性を考慮した層破壊被害関数の回帰係数

構造	用途	階数	屋根種	建築年代	データ数	PGV (cm/s)		
						λ	ζ	R^2
木造	全体	全体	全体	全体	11866	5.26	0.535	0.815
				-1945	1306	4.72	0.380	0.879
				1946-1955	604	4.97	0.420	0.668
				1956-1960	913	4.94	0.402	0.747
				1961-1964	1167	5.07	0.454	0.681
				1965-1971	2233	5.31	0.551	0.607
				1972-1981	3623	5.97	0.735	0.618
				1982-1994	2020	7.36	1.135	0.634
			瓦	全体	9782	5.21	0.527	0.829
				-1945	1259	4.69	0.392	0.880
				1946-1955	545	4.83	0.374	0.785
				1956-1960	859	4.93	0.408	0.743
				1961-1964	990	5.03	0.451	0.678
				1965-1971	1776	5.24	0.537	0.620
				1972-1981	3228	5.62	0.545	0.673
				1982-1994	1125	6.52	0.814	0.797
		2階建	全体	全体	10325	5.23	0.520	0.784
			瓦	全体	8744	5.18	0.511	0.802
	一戸建住宅	全体	全体	全体	10455	5.30	0.533	0.790
	共同住宅	全体	全体	全体	789	4.91	0.508	0.745
非木造	全体				3608	6.12	0.685	0.580

図-3.26 に構築した建築年代区分毎の被害関数を示す．図をみると，ほぼ建築年が古くなるに従い，層破壊の発生率が高くなる傾向が見られるが，戦後復興期と高度成長期前期の関係が逆転している．これは，3.3 節で指摘したように，建物属性の影響により戦後復興期の建物は見かけ上の耐震性が向上したためと考える．各被害曲線の立ち上がりを見ると，層破壊発生時の PGV の大きさは，戦前・戦中期の建物は約 40cm/s，戦後復興期から高度成長期に建設された建物は約 50cm/s，低成長期の建物は，60cm/s 程度である．

また，参考として，同じ対象地域において，同様の手法により構築した非木造建物の回帰係数と被害曲線をそれぞれ表-3.10 および図-3.26 に併せて示す．ただし，対象地域内の非木造建物の層破壊は，被害写真により 28 棟が確認できただけであり，その少ないデータを用いて作成し

ている点に留意が必要である．木造建物全体と比較すると発生率は小さいが，1982 年～1994 年の木造建物よりも発生率が高くなっている．

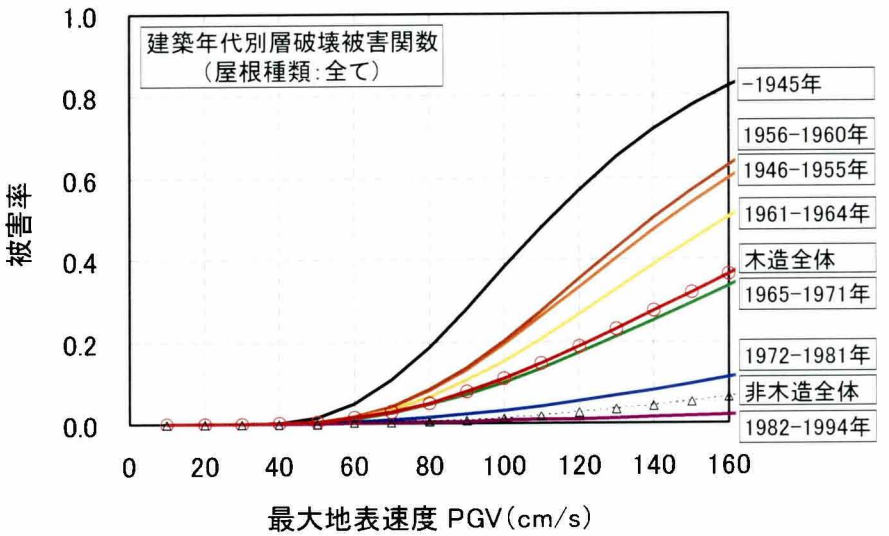


図-3. 26　建築年代別層破壊被害関数

(3)　階数，屋根種別層破壊被害関数

図-3.26 に示したように，戦後復興期と高度成長期前期の関係が逆転していたが，この要因として考えられる建物階数および屋根の種類を考慮した被害関数を構築した．図-3.27 に階数，屋根種類別の被害関数を，前掲の表-3.11 に回帰係数の一覧を併せて示す．ただし，1 階建て建物および瓦屋根以外の建物は層破壊発生棟数が少ないため，被害関数を構築することができなかった．木造全体と瓦屋根建物を比較すると瓦屋根建物の方が層破壊発生率が高くなっている．また，木造全体と 2 階建て建物を比較すると，2 階建て建物の層破壊発生率が高い．

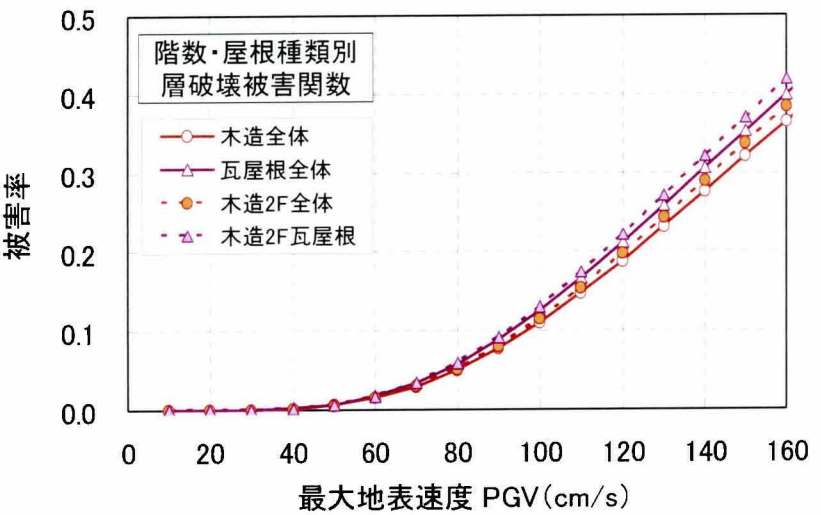


図-3. 27　階数，屋根種類別層破壊被害関数

十分なデータが得られた瓦屋根の住宅について，建築年代別の被害関数を図-3.28 に，回帰係数の一覧を前掲の表-3.11 に示す．図-3.26 と比較すると，どの建築年代においても瓦屋根の方が全屋根種類を用いて構築した被害関数よりも被害発生率が高くなっている．また，戦後復興期と高度成長期前期の関係は年代順になっており，これより戦後復興期の瓦屋根使用率の減少がこの時期全体の層破壊発生率の低下に寄与したものとみることができる．

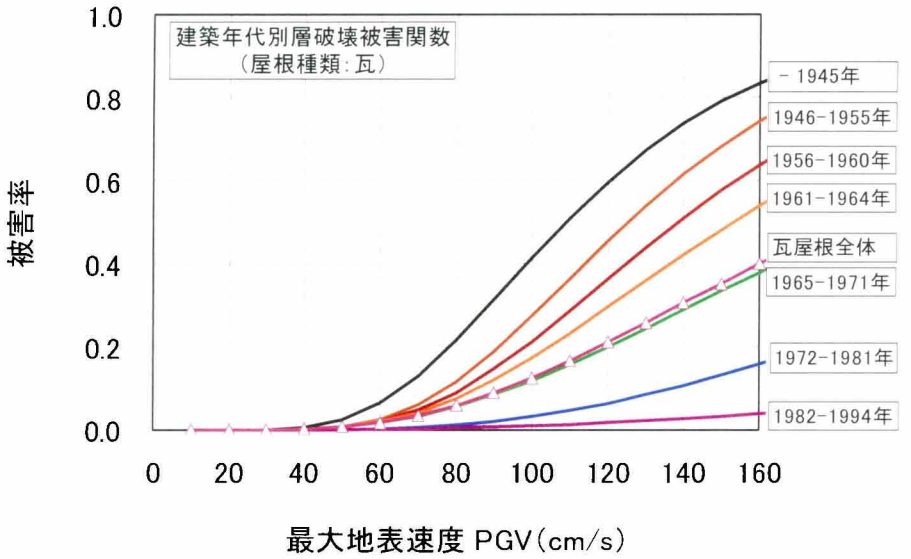


図-3.28　建築年代別層破壊被害関数（瓦屋根）

わが国の典型的な住宅は，1 階にパブリックスペースを配し，2 階にプライベートスペースを計画した 2 階建ての建物が多い．そのように計画すると 1 階に比較的大きな空間が必要なため，耐震的に十分な壁量を確保することが難しくなると思われる．一方，2 階は小部屋が多くなるため，1 階と同程度の壁量，もしくは 1 階よりも壁量が多くなる場合がある．その結果，2 階の剛性が高くなり，1 階に変形が集中する一つの要因となっていると推察する．また，2 階の重量や屋根重量は，1 階へ入力される層せん断力の大きさに関係するため，耐震性の観点からは重量が軽い方が望ましいが，2 階建て瓦屋根の住宅であっても，大地震動に耐えた建物は多く存在していることも事実であり，今後，層破壊発生機構を解明する上で，層破壊に到らなかった建物に関する検討が必要と考える．

(4)　建物用途別層破壊被害関数

建物の用途が層破壊発生に及ぼす影響を検討するため，図-3.29 に示すように用途別の被害関数を構築した．ただし，一戸建住宅，共同住宅以外の建物は被害関数の構築に足る十分な資料が得られなかったため作成できなかった．前掲の表-3.11 に回帰係数の一覧を示す．一戸建住宅と木造共同住宅を比較すると共同住宅の方が層破壊発生率が高いことが分かる．既に 3.3 節で述べたように共同住宅の特徴として，総 2 階に近い建物形状が多く，2 階のボリュームが大きいことが挙げられる．また，共同住宅の場合，各階の各戸に出入り口や窓を設けるなど，特に間口側の壁量が少なくなると考えられ，これらの相乗効果により層破壊の発生が高くなったものと推察される．構築した被害関数は，このような耐震性に直接寄与する壁量の影響などは考慮されていないが，より精度の高い評価を行う場合には，検討が必須な項目であると考える．

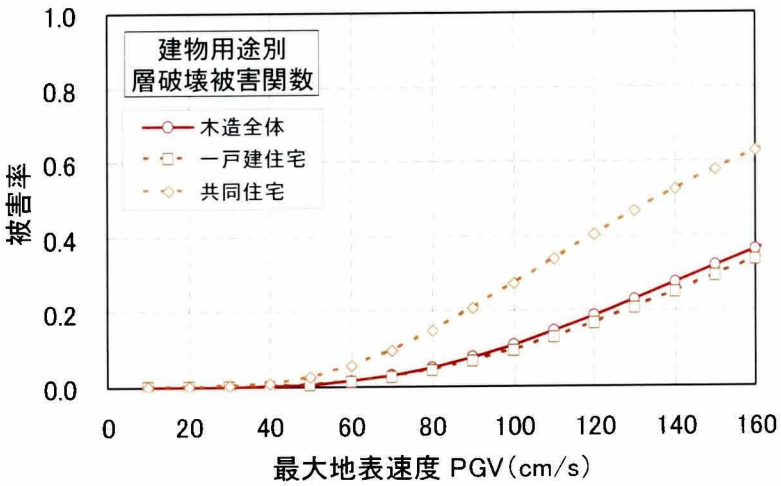


図-3.29　建物用途別層破壊被害関数

3.4.2　損傷度別被害関数の構築

層破壊以外の損傷度別被害関数を作成するため，層破壊以外の破壊状態と判定された建物について，被害写真と被害パターンチャートを用いて，被害パターン分類を行い，その結果をダメージグレード D0～D6 に整理した．図-3.30 に分類結果を示す．その結果を用いて，層破壊被害関数を構築するときと同様の手法により被害関数を求めた．表-3.12 に損傷度別の被害関数の回帰係数一覧を，図-3.31 に構築した被害関数を示す．図-3.31 の各曲線の立ちあがりをみると，被害率 1％を超える PGV のおおよその値は，D6 で 70 cm/s，D5 で 55 cm/s，D4 で 45 cm/s，D3 で 40 cm/s，D2 で 35 cm/s，D1 で 30 cm/s である．表-3.13 に層破壊以外の建物損傷度について，建築年，階数，屋根種類，および建物用途別被害関数の回帰係数一覧を示す．

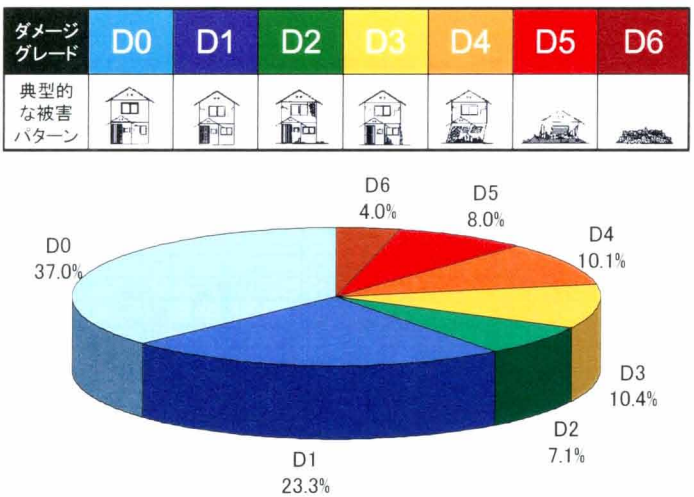


図-3.30　被害写真と被害パターンチャートを用いた建物損傷度の分類結果

表-3.12　木造建物の損傷度を反映した被害関数の回帰係数

損傷度（ダメージグレード）		PGV (cm/s)		
		λ	ζ	R^2
D6	層破壊	5.93	0.731	0.838
D5以上		5.26	0.535	0.815
D4以上	層破壊以外	4.77	0.422	0.805
D3以上		4.65	0.442	0.764
D2以上		4.58	0.474	0.772
D1以上		4.25	0.381	0.857

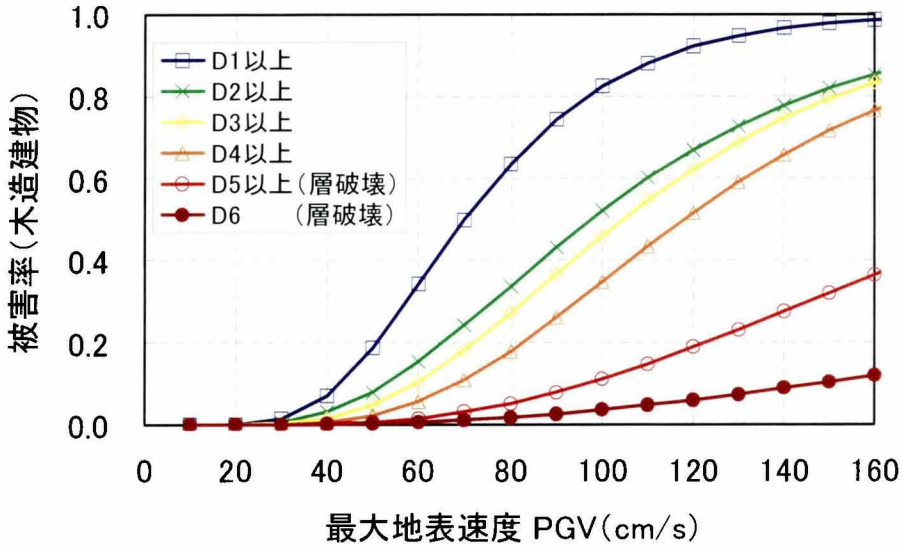


図-3.31　木造建物の損傷度別被害関数

表-3.13　建物の属性を考慮した損傷度別被害関数の回帰係数（層破壊以外）

構造	用途	階数	屋根種	建築年代	PGV (cm/s)											
					D4以上			D3以上			D2以上			D1以上		
					λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2	λ	ζ	R^2
木造	全体	全体	全体	全体	4.77	0.42	0.805	4.65	0.44	0.764	4.58	0.47	0.772	4.25	0.38	0.857
				-1945	4.36	0.30	0.906	4.23	0.31	0.903	4.10	0.35	0.901	3.88	0.31	0.901
				1946-1955	4.59	0.35	0.708	4.47	0.31	0.759	4.38	0.29	0.877	4.10	0.35	0.936
				1956-1960	4.52	0.38	0.814	4.40	0.36	0.809	4.35	0.34	0.807	4.09	0.30	0.901
				1961-1964	4.63	0.37	0.723	4.42	0.32	0.786	4.36	0.33	0.755	4.11	0.29	0.844
				1965-1971	4.72	0.35	0.693	4.58	0.37	0.641	4.51	0.38	0.663	4.18	0.31	0.852
				1972-1981	4.98	0.41	0.712	4.85	0.41	0.794	4.71	0.35	0.834	4.35	0.28	0.861
				1982-1994	6.23	0.90	0.875	5.96	0.88	0.608	5.23	0.54	0.804	4.63	0.37	0.811
			瓦	全体	4.72	0.41	0.820	4.59	0.42	0.772	4.52	0.45	0.771	4.19	0.35	0.863
				-1945	4.35	0.30	0.902	4.23	0.31	0.903	4.09	0.35	0.892	3.86	0.32	0.833
				1946-1955	4.58	0.35	0.682	4.39	0.31	0.788	4.24	0.29	0.811	4.08	0.23	0.878
				1956-1960	4.52	0.37	0.785	4.40	0.33	0.795	4.34	0.35	0.771	4.06	0.31	0.865
				1961-1964	4.64	0.37	0.787	4.44	0.31	0.779	4.37	0.32	0.771	4.09	0.27	0.845
				1965-1971	4.69	0.34	0.722	4.54	0.33	0.662	4.47	0.35	0.678	4.13	0.24	0.902
				1972-1981	5.03	0.45	0.663	4.85	0.42	0.772	4.70	0.36	0.813	4.33	0.28	0.844
				1982-1994	5.73	0.67	0.882	5.52	0.65	0.590	5.30	0.63	0.703	4.50	0.32	0.916
		2階建	全体	全体	4.77	0.43	0.794	4.65	0.45	0.739	4.57	0.47	0.740	4.25	0.37	0.837
			瓦	全体	4.73	0.43	0.801	4.60	0.44	0.750	4.52	0.46	0.746	4.20	0.34	0.855
	一戸建住宅	全体	全体	全体	4.80	0.43	0.787	4.68	0.44	0.742	4.61	0.47	0.752	4.27	0.36	0.856
	共同住宅	全体	全体	全体	4.50	0.31	0.764	4.36	0.32	0.769	4.29	0.33	0.801	4.07	0.32	0.859

3.4.3　既存の被害関数との比較

(1)　ダメージグレード別被害関数との比較

構築した被害関数は被害写真から損傷度を同定して作成したものであり，その構築手法が妥当かどうかを確認する必要がある．そこで，他の被害調査結果に基づいて作成された被害関数と比較することで検証を行った．岡田，高井[3.7]は，東京都防災会議の震度階解説表をもとに木造建物のダメージグレード別被害関数を構築している．表-3.14 に比較に用いた岡田，高井によるダメージグレード別の被害関数の回帰係数を示す．図-3.32 に示す比較図をみると，損傷度の高い D4 以上は，岡田，高井による被害関数の方が本研究より被害率が低く，反対に損傷度の低

いD2以下は岡田，高井による被害関数の方が高くなっている．このような差がみられた理由として，構築に使用した被害データや地震動データ，および構築対象建物の構造特性の相違を挙げることができる．具体的には，岡田，高井が使用した被害データは，東京都防災会議の震度階解説表の被害記載内容から震度と被害率の関係を読みとり，気象庁震度階が 6 以上については兵庫県南部地震の建物被害調査資料により補正したものであり，実被害データのみを用いたものではない．また，地震動データはアンケート震度を基にし，気象庁震度を Muramatu[3.23)]による提案式を用いて最大地表速度に換算したものを使用している．構造特性については，使用データの中に淡路島北淡町の建物データが含まれており，本研究の西宮市とは異なる可能性がある．したがって，構築した被害関数の妥当性を検証するためには，被害関数の構築条件が考慮される必要がある．

表-3.14　比較検証用の被害関数の回帰係数

比較に用いた被害関数	被害レベル	PGV (cm/s)		
		λ	ξ	R^2
ダメージグレード別被害関数（岡田，高井による）	D5	5.07	0.582	-
	D4以上	4.55	0.565	-
	D3以上	4.12	0.600	-
	D2以上	3.66	0.621	-
	D1以上	2.74	0.574	-
西宮市による罹災調査に基づく被害関数（山口，山崎による）	全壊	4.60	0.538	0.984
	半壊以上	4.22	0.546	0.985
西宮市における二学会合同調査に基づく被害関数（西宮BEDBを用いて構築）	大破または全壊	4.72	0.344	0.754
	中程度の損傷以上	4.54	0.350	0.826
	軽微な損傷以上	4.23	0.304	0.895

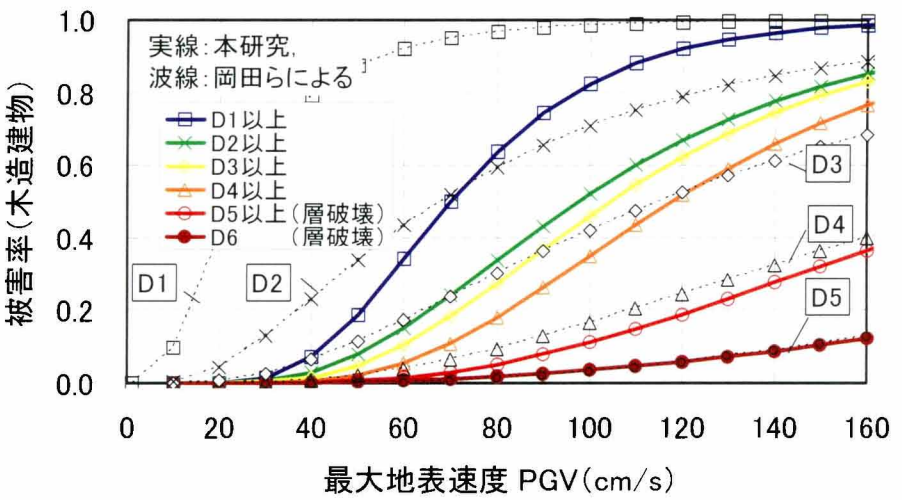


図-3.32　ダメージグレード別被害関数との比較

(2) 西宮市における調査結果に基づく被害関数との比較

被害関数の構築条件を揃えるため，兵庫県南部地震において，西宮市の建物を対象として実際に行われた被害調査結果に基づいて構築された被害関数との比較を行った．比較に用いた被害関数は，a)自治体による罹災調査結果に基づく被害関数，および，b)学術的な目的で行われた調査結果に基づく被害関数である．しかし，これらの被害調査は層破壊に着目して行われていないため，ダメージグレード D1 から D4 について比較を行った．

自治体の調査結果に基づく被害関数は，西宮市が罹災証明書を発行するための調査結果をもとに，山口，山崎 [3.21)]により構築されたものである．前掲の表-3.14 に山口，山崎による被害関数の回帰係数を，図-3.33 に比較図を示す．図より，西宮市による全壊は，立ち上がり部分はほぼ D2 に等しく，PGV が増大すると D3 に対応している．また，西宮市の全半壊はおおよそ D1 に対応していると読みとることができる．

一方，学術的な調査との対応について，日本都市計画学会関西支部と日本建築学会近畿支部による調査 [3.2)]（以下，二学会合同調査）は，被害を外観目視で評価した結果であり，その結果と構築した被害関数との比較を行った．ここで，西宮 BEDB には二学会合同による調査結果が備わっており，このデータを用いて，西宮市の本研究対象地域における被害関数を新たに構築した．その被害関数は西宮 BEDB により木造建物を抽出し，その建物に二学会合同の調査結果をリンクさせることにより作成している．表-3.14 に被害関数の回帰係数を併せて示す．図-3.34 の比較図より，各曲線の立ち上がり部分については，二学会合同調査の「大破または全壊」が D4 に，中程度の損傷以上が D3 に，「軽微な損傷」が D1 に対応している．

以上の結果は，ダメージグレードと兵庫県南部地震で実施された被害調査結果との対応に関する分析 [3.24)]の中で，西宮市の全壊には D2 レベルのものが含まれていることを指摘しており，また，二学会合同調査との関係についても，その分析結果と整合している．したがって，他の被害調査に基づいて作成された被害関数と比較を行った結果，被害写真に基づいて構築された損傷度別被害関数は妥当なものであり，同様の手法を用いて構築した層破壊被害関数も問題なく構築されていると考える．

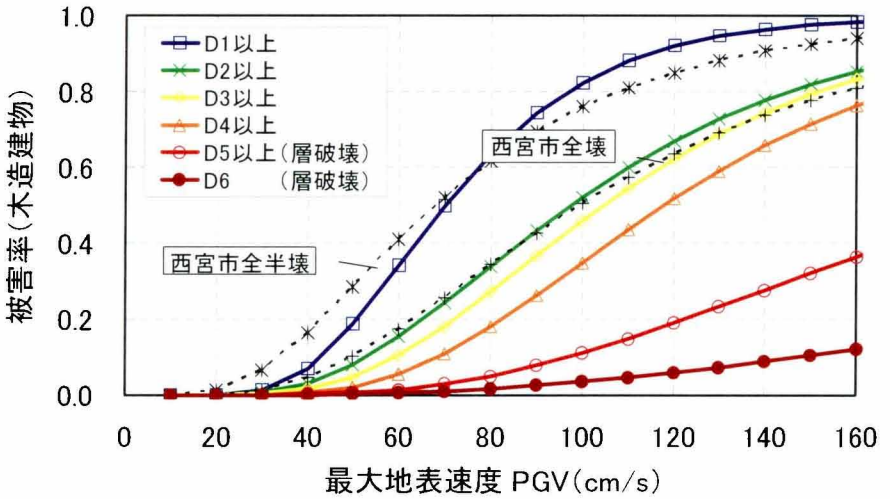


図-3.33　罹災調査結果に基づく被害関数との比較

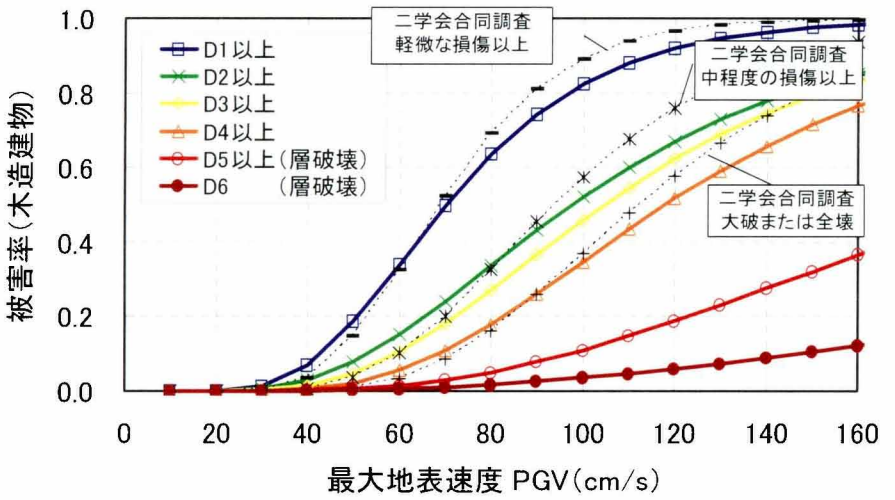


図-3.34　学術的な調査結果に基づく被害関数との比較

3.5 まとめ

本章では兵庫県西宮市を対象として，兵庫県南部地震時の被害写真に撮影された建物について，被害パターンチャートを用いて被害パターン分類，航空写真による判定，および住民への聞き取り調査を行い，層破壊建物を同定した．その結果として得られた　層破壊建物データを用いて，表層地盤震動特性との関係について検討を行った．また，層破壊がどのような条件下で発生したのかを明らかにするために，自治体が保有する建物属性情報と層破壊の関係を検討し，層破壊の発生に寄与した建物属性と地震動強さの影響度について分析を行った．以上の結果から，木造建物の損傷度を反映する被害関数を構築した．本章において得られた知見を以下に示す．

1) 西宮市の層破壊被害パターンは, 2 階建ての 1 階が層破壊するパターン(Gd5)が最も多く，次に全層の層破壊パターン(Cd6)が多いことが明らかになった．
2) 二学会合同調査による建物の全壊率が高い地域に層破壊建物が多く分布する傾向がみられた．
3) 層破壊建物は, 木造建物の方が非木造建物より広範囲に分布していたことが明らかとなった．
4) 代表的な地震動強さ指標である PGA, PGV, SI と層破壊被害の発生率の関係について検討した結果，PGV および SI との相関が比較的高いことが示された．
5) 層破壊率と周期帯を考慮したスペクトル強度との検討から, 周期帯 1.0～2.5 秒との相関が高くなる結果が得られた．
6) 建築年が古いほど層破壊率が高くなる傾向がみられた．
7) 屋根に瓦を使用している方が瓦以外を使用している場合よりも層破壊率が高くなる傾向がみられた．
8) 2 階建て建物の方が 1 階建てより層破壊率が高くなる傾向がみられた．
9) 建築面積が大きくなると層破壊率が高くなる傾向がみられた．
10) 共同住宅, 農家住宅の層破壊率が一戸建住宅, 長屋建住宅, 商工業施設, その他の住宅（寺社，付属屋，倉庫など）に比較して高いことが明らかとなった．
11) 建物の形状が層破壊発生の一因となっていることを明らかにした．
12) 2 階建て一戸建住宅について，建物の規模と形状が 1 階層破壊型，2 階層破壊型，全体破壊型のように，層破壊の被害形態に影響を与えている．
13) 住宅の変容と社会動向を考慮して，被害関数構築のための建築年代区分を提案した．
14) 木造建物の層破壊発生要因の影響度について，数量化Ⅱ類を用いて検討した結果，建築年代が最も寄与しており，次いで地震動強さの大きさであることが明らかとなった．
15) 住宅の変容と社会変動を考慮して設定した建築年代区分に対応した木造建物の建築年代別層破壊被害関数を構築した．

16) 建物階数，屋根種類，住宅用途を考慮した層破壊被害関数を構築した.

17) 被害パターンチャートを用いて層破壊以外の木造建物の損傷度の評価を行い，その損傷度を反映した被害関数を構築した.

18) 兵庫県南部地震で実施された被害調査結果に基づいて作成された他の被害関数と比較した結果，被害写真を用いて構築した被害関数は他の結果と整合しており，作成した被害関数は妥当なものであることを確認した.

次章では構築した被害関数の適用性について検討を行う.

第３章の参考文献

3.1) 堀江啓，田中聡，牧紀男，東田光裕，林春男：災害における Built Environment データベースの構築と防災への活用，情報処理学会・人文科学とコンピュータシンポジウム論文集，pp.275-282，2001.

3.2) 震災復興都市づくり特別委員会：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，1995.

3.3) 兵庫県：阪神・淡路大震災，http://web.pref.hyogo.jp/syoubou/Daishinsai/jyokyo.html.（参照年月：2004.2.）

3.4) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：震災時における木造建物の被害調査手法の開発－調査目的と調査項目－，地域安全学会論文集，No.2，pp.139-144，2000.

3.5) Horie, K., Maki, N., Hayashi, H, Kohiyama, M., Shigekawa, K., and Tanaka, S.: Framework for Damage Assessment Training System, Proceedings of 8th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2001.(CD-ROM)

3.6) Horie, K., Maki, N., Kohiyama, M., Hengjian, L., Tanaka, S, Hashitera, S., Shigekawa, K., and Hayashi, H.: Process of Housing Damage Assessment –The 1995 Hanshin-Awaji Earthquake Disaster Case–, Journal of Natural Hazards, 29, pp.341-370, 2003. (CD-ROM)

3.7) 岡田成幸，高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文集，No.524，pp.65-72，1999.

3.8) 高井伸雄，岡田成幸：地震被害調査のための鉄筋コンクリート造建物の破壊パターン分類，日本建築学会構造系論文集，No.549，pp.67-74，2001.

3.9) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：液状化を誘因とする木造戸建住宅の被害に関する調査手法の開発－鳥取県西部地震における被害形態と補修費用－，地域安全学会論文集，No.3，pp.73-80，2001. 11.

3.10) 内閣府：災害に係わる住家の被害認定基準運用指針，108p.，2001.

3.11) 兵庫県：阪神・淡路大震災，http://web.pref.hyogo.jp/syoubou/Daishinsai/jyokyo.html.（参照年月：2004.2.）

3.12) 建築研究所：平成７年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，303p.，1996.

3.13) Kohiyama, M., Lu, H., Tanaka, S, Hashitera, S., Shigekawa, K., and Hayashi, H.: Expansion of Nishinomiya Built Environment Database, Journal of the International Society for the Prevention and Mitigation of Natural Hazards, Volume 29, Issue 3, pp. 501-522, 2003.

3.14) 佐藤忠信，北勝利，前田知就：兵庫県南部地震で発生した強震域での加速度応答スペクトルの推定，土木学会論文集，No.563/Ⅰ-39，pp.149-159，1997.

3.15) Sekiguchi, H., Irikura, K., Iwata, T., Kakehi, Y., and Hoshiba, M.: Minute locating of faulting beneath Kobe and the waveform inversion of the source process during the 1995 Hyogo-ken Nanbu, Japan, earthquake using strong ground motion, J. Physics of the Earth, Vol. 44, pp. 473-487, 1996.

3.16) 阪神地域活断層調査委員会：阪神・淡路地域活断層調査報告，兵庫県，225p.，1996.

3.17) 境有紀，纐纈一起，神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，No.555， pp.85-91，2002.

3.18) 村上雅英，藤田宣紀，三澤文子，田原　賢：東灘西部と中心とした被害調査とその考察，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.49-68，1995.

3.19) 村上雅英，鈴木祥之，田原　賢：阪神淡路大震災における木造住宅の倒壊原因に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.95-101，1999.

3.20) 牧紀男，林春男：建築基準法の被害抑止効果－すまいの災害対応－，地域安全学会論文集，No.2，pp.243-250，2000.

3.21) 山口直也，山崎文雄：詳細な建物情報を含む被災調査結果に基づく西宮市の地震動分布の再推定，土木学会論文集，No.640/Ⅰ-50，pp.203-214，2000.

3.22) 鈴木成文：住まいを読む－現代日本住居論，建築資料研究社，183p.，1999.

3.23) Muramatu I.：Expectation of maximum of earthquake motion within 50 years throughout Japan, Sci. Rep. Gifu Univ., 3, pp.470-481, 1966.

3.24) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：外観目視による建物被災度評価手法の検討－建物被災度判定トレーニングシステムの構築，地域安全学会論文集，No.4，pp.167-174，2002.

第4章　被害関数を用いた地震被災危険度評価手法の適用性に関する考察

前章における数量化Ⅱ類による層破壊発生要因の影響度に関する検討結果では，建築年代が最も層破壊の発生に寄与していた．そこで，本章では，前章で構築した建築年代を考慮した被害関数を用いて，兵庫県南部地震による層破壊建物の面的な空間分布および建物1棟単位の発生分布の推定を行う．この推定結果と実際の層破壊発生状況と比較することにより，構築した被害関数の適用性を検討する．

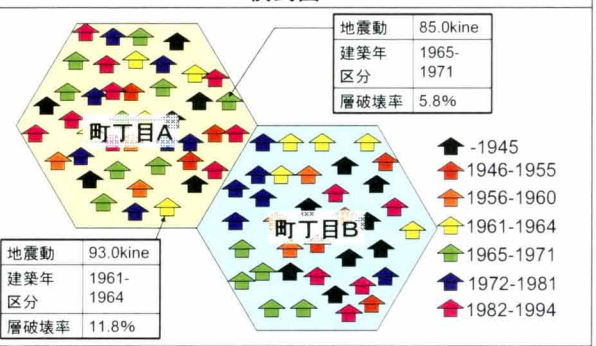
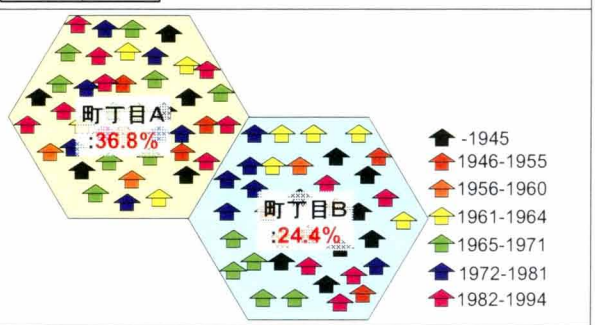
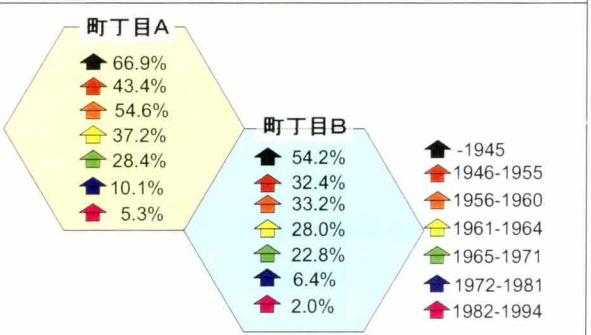
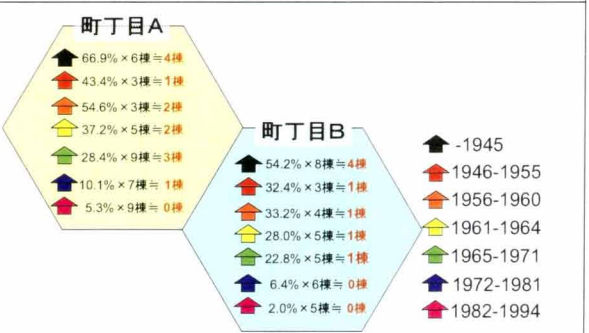
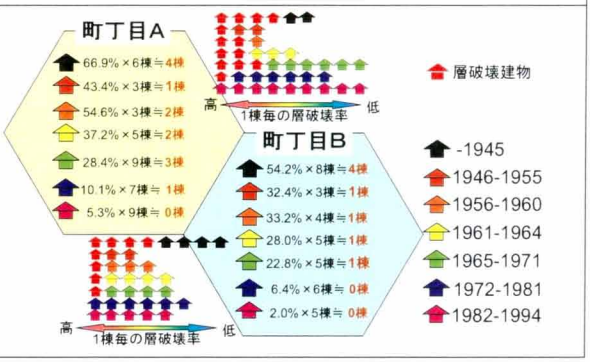
4.1　兵庫県西宮市への適用

まず，被害関数を構築した西宮市に適用し，被害関数の妥当性の確認を行う．対象エリアは被害関数を構築したエリアと同じであり，前章の図-3.12に示すエリアである．対象建物は建物属性および地震動データがリンクされた木造建物32,825棟のうち，プレハブ造を除いた32,266棟である．

4.1.1　層破壊建物の推定方法

推定は表-4.1に示す手順により行った．手順1から手順2により，面的な空間分布として町丁目単位での層破壊発生率が求められる．また，手順3から手順5は建物1棟単位での層破壊発生の有無を推定するものである．

表-4.1　被害関数を用いた層破壊建物の推定手順

手順		内容	模式図
面的（町丁目単位）な層破壊発生建物の推定	1	1棟単位に入力されたPGVからそれぞれの建物について建築年代区分に対応した被害関数を用いて1棟毎に層破壊発生確率を算定する.	
	2	（手順1）で求めた層破壊発生確率の平均値を町丁目単位で算出する.	
建物一棟単位の層破壊発生建物の推定	3	町丁目単位で建築年代区分毎の層破壊発生確率を集計する.	
	4	建築年代区分毎の層破壊発生確率にその町丁目に含まれる建築年代区分毎の建物棟数を乗じて，その町丁目における建築年代区分毎の層破壊発生棟数を推定する.	
	5	建物1棟毎に算定された層破壊発生確率の高い建物が，その町丁目内の建築年代区分の中で相対的に層破壊発生の危険性が高い建物と仮定し，その上位から（手順4）で求められた棟数までを層破壊が発生するものとして推定する.	

4.1.2　層破壊発生率の面的な空間分布

図-4.1 に被害写真などから実際に層破壊の発生を同定した建物分布を示す．また，図-4.2 に算定した町丁目単位の木造建物の層破壊発生率の分布を示す．使用した被害関数は，建築年のみを考慮した図-3.26 の建築年代別層破壊被害関数である．図-4.1 と図-4.2 を比較すると町丁目単位の層破壊発生率が高い地域に多くの層破壊が実際に発生している．また，層破壊の空間的な拡がりについて，実際の層破壊発生範囲を精度良く推定している．

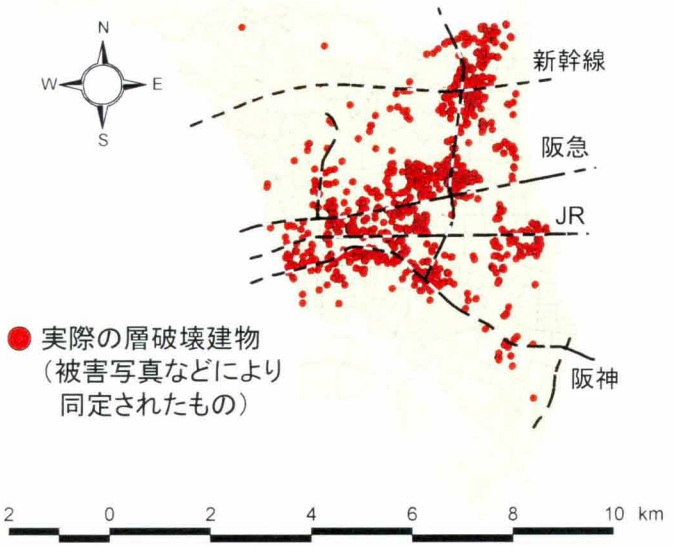


図-4.1　実際の層破壊建物の分布（西宮市）

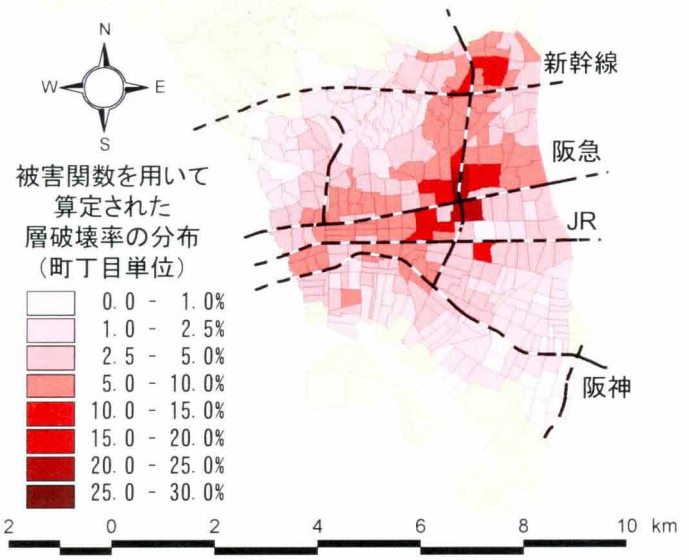


図-4.2　被害関数を用いた層破壊発生率の分布の推定（西宮市，町丁目単位）

4.1.3　層破壊発生棟数の推定

次に西宮市南部地域における層破壊発生棟数の推定を行った．ここで，データベースの建物全てについて構造種別に関する情報が備わっているわけではないため，木造建物総数をまず求める必要がある．西宮市南部地域における建物総数は，GIS のポリゴン数（家枠）によると 83,258 棟である．また，建物情報が備わっている建物について木造建物の構成比を求めると，西宮市南部地域では，79.1％が木造建物である．この関係を用いて，町丁目毎に木造建物棟数を推定し，その棟数に層破壊発生率を乗じて，建物情報が備わっていない建物を含めて西宮市南部地域での層破壊発生棟数を算定した．その結果，総層破壊棟数は 2,748 棟と推定された．

この結果の妥当性を検証するために，西宮市南部地域において，兵庫県南部地震時に日本都市計画学会と日本建築学会が合同で実施した調査[4.1)]（以下，二学会合同調査）に基づく町丁目単位の全壊率と被害パターン分類によって同定した結果を用いた層破壊率との関係から，この地域における層破壊棟数の推定を行った．なお，推定に際して，二学会合同調査の低層建物が木造建物に対応するものとした．図-4.3 に推定の流れを示す．まず，西宮 BEDB を用いて被害写真データと二学会合同調査を GIS 化した建築研究所データ[4.2)]の木造建物データのリンクを行い，18,554 棟のデータにより町丁目単位の全壊率と層破壊率を算定した．

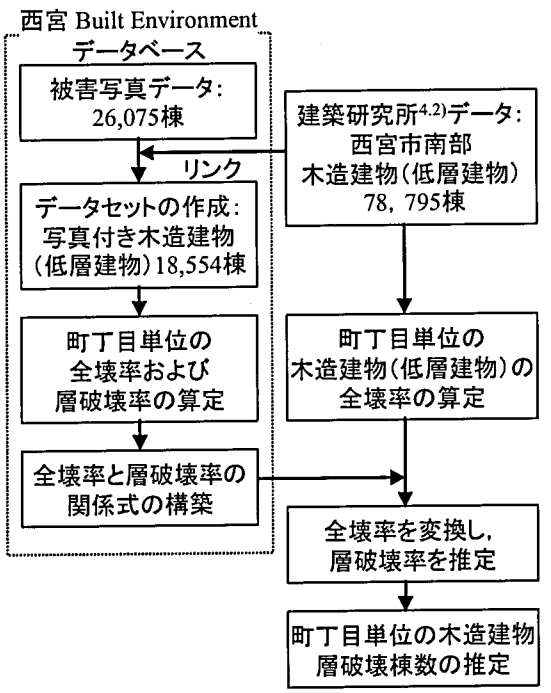
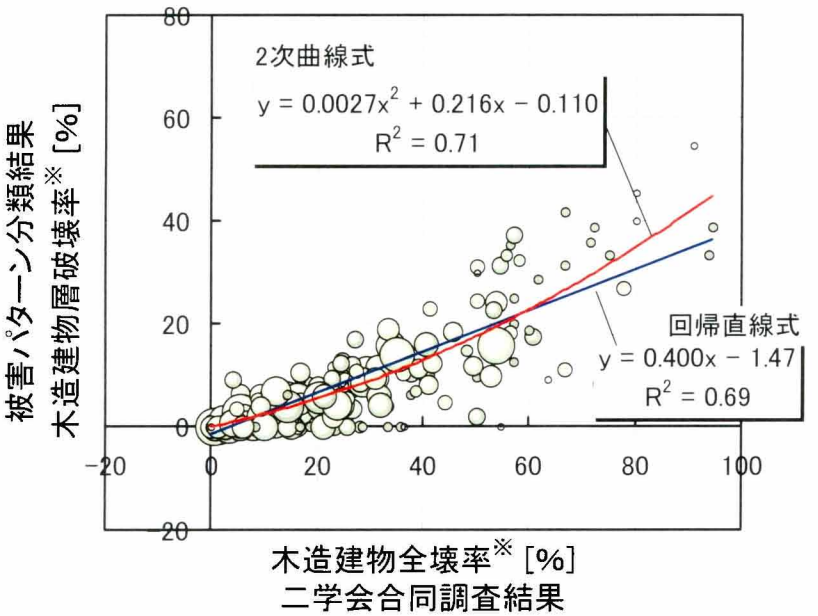


図-4.3　層破壊棟数の推定方法

図-4.4 に全壊率と層破壊率の関係を示す．ただし，町丁目内の建物棟数が 10 未満のデータは除いている．相関係数は 0.83 で，1%水準で有意な関係にあった．図-4.4 に最小 2 乗法により求めた回帰直線を併せて示す．回帰直線の傾きは 0.40 であり，西宮市では二学会合同調査の全壊の約 4 割が層破壊していたと推察できる．ただし，全体的に全壊率の高い範囲で十分なデータが得られていないため，この範囲での推定精度は低いと思われる．全壊率と層破壊率の関係は，全壊率が大きくなると層破壊率の増分が大きくなる傾向が見られることを考慮して，2 次曲線による近似式を求めた．図-4.4 に重ねて示す．これらの関係式を用いて建築研究所データによる木造建物全壊率を層破壊率に変換して層破壊棟数を推定した．その結果，西宮市南部地域の木造建物の層破壊棟数は，直線回帰式では 2,932 棟，2 次曲線式では 2,635 棟となった．また，各町丁目で両式により求められた層破壊棟数の最大値を累計すると 3,018 棟となった．以上より，二学会合同調査による全壊被害との対応から求めた西宮市南部地域における層破壊発生建物棟数は 2,635 棟～3,018 棟と推定され，被害関数から求めた結果と整合している．



$$(※)全壊率 = \frac{(町丁目内の全壊棟数)}{(町丁目内の建物棟数)-(火災被害棟数)-(未処理，不明棟数)}$$

$$層破壊率 = \frac{(町丁目内の層破壊棟数)}{(町丁目内の建物棟数)-(火災被害棟数)-(不明棟数)}$$

町丁目内の建物棟数および火災被害棟数は両式とも同じ。
不明棟数はそれぞれの調査データを使用した。

図-4. 4　町丁目単位の木造建物の全壊率と層破壊率

4.1.4　1棟単位の層破壊建物分布の推定

被害関数を用いた面的な空間分布および総被害量としての層破壊建物棟数の推定は以上の検討結果から妥当であることを確認した．ここでは，建物 1 棟単位での推定精度について検討する．図-4.5 に推定結果を示す．図-4.1 と比較すると，実際に多くの層破壊が確認された地域において，推定結果も多く分布しており，また，地震動が比較的小さい地域においても層破壊の発生を精度良く推定している．しかし，詳細にみると，建物 1 棟 1 棟の発生位置が異なる場合がある．この要因として，用いた層破壊被害関数は建築年代のみを考慮したものであり，実際には建築年が古くても十分な耐震性能を保有し被害が発生していない建物が多く存在していたことによるものである．

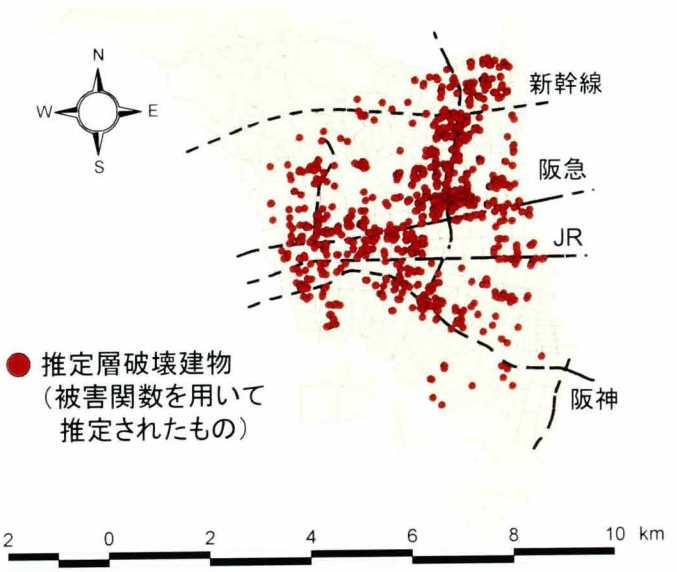


図-4.5　被害関数を用いた層破壊発生建物の推定（西宮市，建物 1 棟単位）

4.2　兵庫県神戸市東灘区への適用

前節では，西宮市で構築した層破壊被害関数を西宮市に適用し，その妥当性の確認を行ったが，他地域においても適用可能かどうか検討する必要がある．そこで，この被害関数を用いて神戸市街地における木造建物の層破壊被害の推定を試みた．まず，その推定にあたり，構築した被害関数が神戸市において適用可能かどうか検討を行った．ここで，冒頭で述べたように層破壊に着目した被害調査は少ないが，村上ら[4.3)]は図-4.6 に示す神戸市東灘区西部地区を対象として倒壊建物の被害調査を実施しており，このエリアを検討対象地域とした．

村上らによる倒壊建物の定義は「1 階部分の層崩壊，2 階部分の層崩壊，全階層崩壊（瓦礫状態）」としている．この村上らによる「倒壊」と本研究で定義する「層破壊」との対応について，検討対象地域で撮影された被害写真を元に確認した．被害写真は東灘区全域で撮影され，西宮 BEDB の構築と同様の方法により GIS データベース化された 5,530 枚の写真を用いた．これらの写真と村上らよる調査結果の集計図から判読した木造倒壊建物 1,187 棟を GIS 上で重ね合わせたところ，損傷度を確認することができた 240 棟の内，183 棟（76.3%）はダメージグレード D5 レベル以上であったが，他は大きな傾斜を生じているものの完全には潰れていなかったため，D4 レベルと判定した．これより，本研究では村上らによる倒壊数に 0.763 を乗じた 906 棟を検討地域の総層破壊数とみなした．

被害関数を用いて被害推定を行うためには，建物情報と地震動(PGV)が必要となる．建物情報は神戸市の保有データを用いた．このデータは，2003 年 12 月に神戸市から提供されたデータであり，罹災証明書発行のための調査結果に基づくものである．神戸市北区，西区を除いた 7 区について，全 153,171 件(木造 119,452 件)のデータが備わっており，建物 1 棟単位で建築年，用途，合計床面積，被災度に関する情報が付属している．

地震動は次の 3 種類の推定手法により求められた結果を使用した．

a) 林ら[4.4)]による推定：地盤モデルに基づく FEM 解析による地震動シミュレーションを行って，最大速度と建物被害との関係を導き，建物被害から逆算して被災地の広域な最大地動速度分布の推定を行ったもの．
b) 阪神・淡路大震災記念協会[4.5)]による推定：断層の破壊過程を想定して基盤地震動を求め，それを工学的基盤面および地表面まで 1 次元増幅により地表面の地震動を求めたもの．
c) 沖村ら[4.6)]による推定：松島，川瀬[4.7)]が震源モデルおよび三次元盆地構造モデルを組み合わせて計算した大阪層群上面における地震動を，浅層地盤の増幅特性を考慮するため，地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」[4.8)]に収録されているボーリングデータをもとに作成した浅層モデルに入力して，1 次元等価線形解析により地表面の地震動を求めたもの．

図-4.6 に 沖村らにより計算された PGV の分布図を併せて示す．

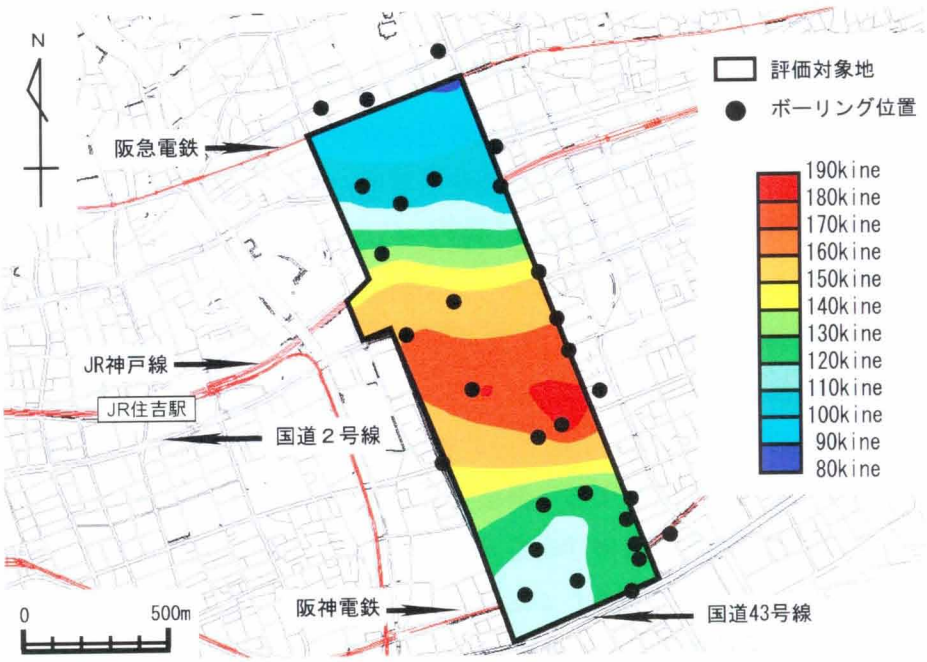
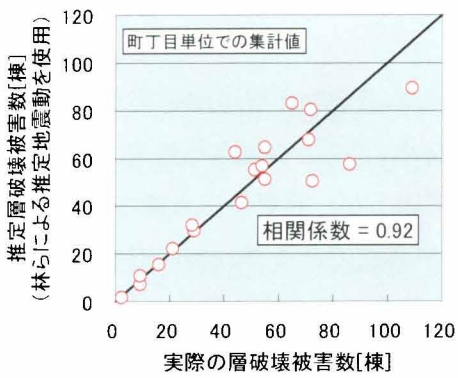


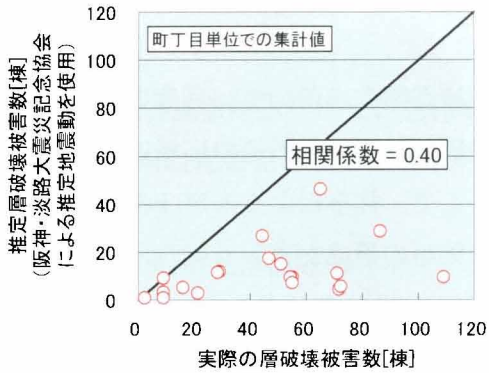
図-4.6　神戸市東灘区における検討対象地域と沖村ら[4.6]による地震動分布解析結果

以上のデータを用いて，前章の図-3.26 の建築年のみを考慮した層破壊被害関数により，対象地域の層破壊数を推定した．図-4.7(a)～(c)に各地震動推定手法により計算された町丁目単位の推定層破壊数と実際の被害数との比較を示す．

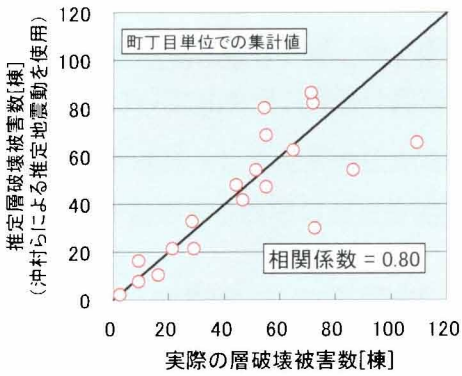
図-4.7(a)の林らによる地震動を用いた場合，層破壊被害数は 885 棟と計算され，精度良い結果が得られた．町丁目単位での対応についても，被害数が多くなるとばらつく傾向がみられるが，相関係数は 0.92 であり，比較的良く推定できているものと考える．ここで，林らによる地震動推定は建物被害に基づくものであり，将来の地震被害予測を行う場合には，地震動シミュレーション結果に基づく被害推定を行う必要がある．シミュレーションにより推定された阪神・淡路大震災記念協会による結果を用いた図-4.7(b)を見ると，推定層破壊被害数は 234 棟と少なく，相関も低い結果となった．この要因として，地震動を推定する際に地盤構造を水平成層と仮定しているため，深部地盤の不整形構造は考慮されておらず，それが対象地域における地震動の推定結果に影響を与えていた可能性が挙げられる．一方，図-4.7(c)に示すように沖村らによる推定地震動を用いた場合の被害推定数は 846 棟となり，震源過程と地盤構造の複合作用および地盤増幅特性を考慮した理論的地震動シミュレーション結果を用いて良好な推定結果を得ることができたことを確認した．図-4.8 に沖村らによる推定地震動を用いた場合について，前章と同様の手法により 1 棟単位で推定した層破壊建物の分布を示す．



(a) 林ら[4.4]による推定地震動



(b) 阪神・淡路大震災記念協会[4.5]による推定地震動



(c) 沖村ら[4.6]による推定地震動

図-4.7　東灘区検討対象地域における木造建物の層破壊推定結果と実際の被害の比較

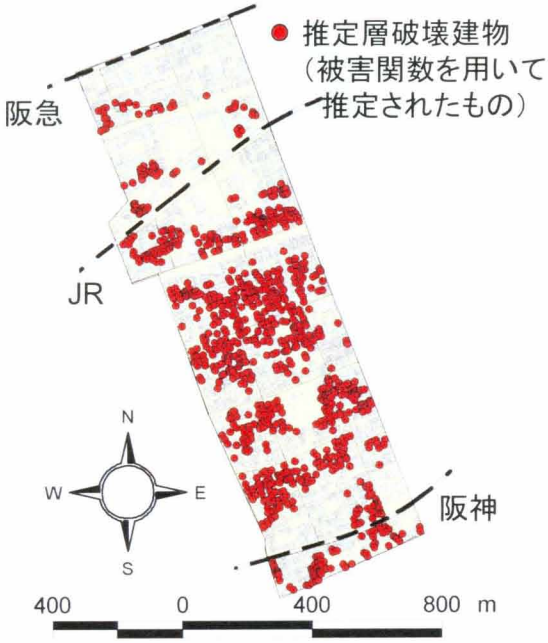


図-4.8　東灘区検討対象地域における被害関数を用いた推定結果（沖村ら[4.6]による推定地震動を用いた場合）

4.3　神戸市街地における木造建物の層破壊被害分布の推定

被害関数を用いて，兵庫県南部地震による神戸市街地の木造建物の層破壊被害を推定した．地震動は神戸市街地の広域に渡って推定が行われている林ら[4.4)]による最大地動速度を用いた．ここで，林らによる推定 PGV は，建物用途は考慮されているが，建築年は考慮されておらず，建築年の構成が著しく異なるような地域へ適用には留意が必要であるが，神戸市全域に渡り広域な PGV 分布が求められおり，本研究では層破壊分布の全体像を把握する目的で推定を行った．図-4.9 に推定結果を示す．推定総層破壊被害数は 20,602 棟となった．河田[4.9)]は，兵庫県南部地震における全倒壊数は全壊家屋の 30%に相当するとして，約 3 万棟と推定している．この河田による推定方法を神戸市に適用すると，神戸市[4.10)]の全壊家屋数 67,421 棟の 3 割に相当する 20,226 棟が倒壊したと求められ，これは木造以外の建物を含めた概算値ではあるが，今回の推定結果と良く一致していると考える．図-4.10 の空間分布をみると，東灘区，灘区，兵庫区，長田区，須磨区で特に多くの層破壊が帯状に発生していたと推定された．

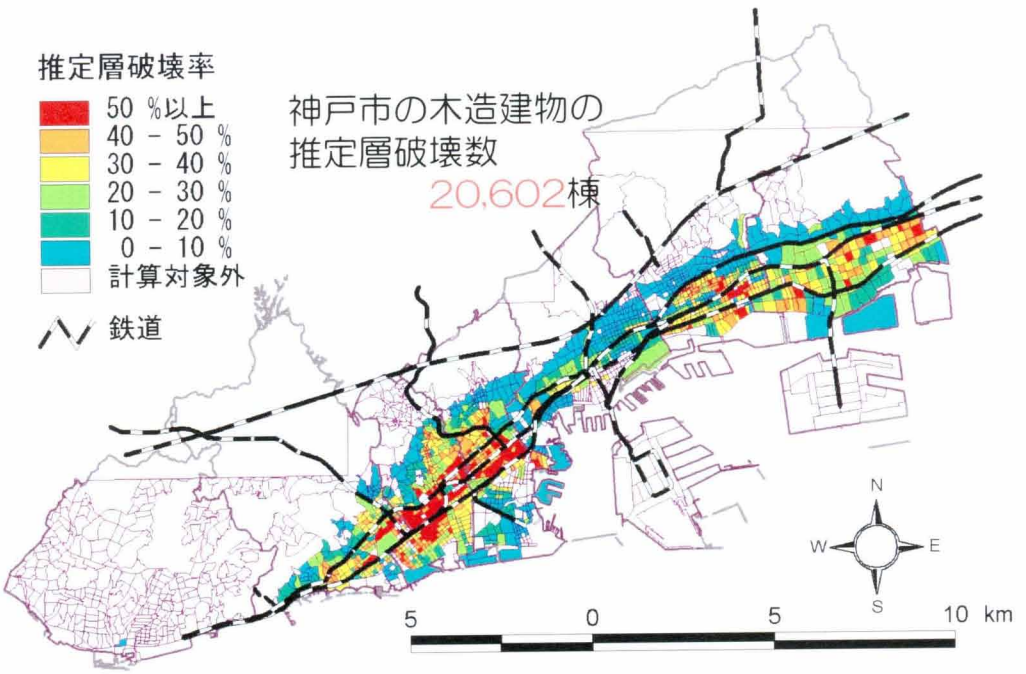


図-4.10　木造建物の推定層破壊建物分布（林ら[4.4)]による地震動推定結果を用いた場合）

4.4 まとめ

本章では，木造建物を対象として構築した建築年代別層破壊被害関数を，兵庫県西宮市および神戸市東灘区へ適用し，その妥当性について検討を行った．得られた知見を以下に示す．

1) 被害関数を構築した西宮市に適用した結果，町丁目単位での面的な空間分布の推定，および総被害量の算定は，実被害と精度良く対応していることを確認した．
2) 木造建物について，町丁目単位の層破壊率と日本都市計画学会と日本建築学会による調査結果に基づく全壊率の関係から西宮市南部の層破壊被害棟数を推定した．
3) 西宮市南部地域における木造建物の層破壊被害総数は，建築年代別層破壊害関数を用いた場合，2,748 棟と推定された．
4) 西宮市における 1 棟単位の層破壊建物の推定に関して，発生地域や密集度はよく表現しており，良好な結果が得られた．
5) しかし，厳密な 1 棟単位での層破壊発生建物位置の推定を行うためには，構築した被害関数には限界があり，建物の耐力や変形特性などの耐震性能を直接的に評価可能な手法の開発やより詳細な情報が必要となる．
6) 被害関数を構築した地域とは異なる神戸市東灘区へ適用し，実被害を精度良く推定した．ただし，層破壊の推定精度は地震動評価結果に依存することを併せて確認した．
7) 震源過程と地盤構造の複合作用および地盤増幅特性を考慮した理論的地震動シミュレーション結果を用いて良好な推定結果を得ることができることを確認した．
8) 被害関数を用いて，兵庫県南部地震による神戸市街地の木造建物の層破壊被害分布を再現した．その結果，推定層破壊被害数は 20,602 棟となった．

上記のように今回の検討範囲では被害関数の適用性に関して良好な結果が得られることを確認したが，課題として，この被害関数は兵庫県南部地震における西宮市の被害状況を元に統計的手法を用いて構築したものであるため，例えば長周期で継続時間が長いような地震動の場合における適用や，多雪地域の建物などへの適用については，さらに地震特性や建物の耐震性の地域性を考慮していく必要がある．そこで，次章以降では，これまでの検討結果を踏まえて，力学モデルに基づいた被災危険度評価手法構築に向けた検討を行う．

第４章の参考文献

4.1) 震災復興都市づくり特別委員会：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，1995.

4.2) 建設省建築研究所：平成７年兵庫県南部地震被害調査最終報告書，303p.，1996.

4.3) 村上雅英, 鈴木祥之, 田原賢：阪神淡路大震災における木造住宅の倒壊原因に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.95-101，1999.

4.4) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫：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, No.502, pp.61-59, 1997.

4.5) 財団法人阪神・淡路大震災記念協会：地盤情報を活用した被災分布の究明，兵庫県南部地震の震源波を考慮に入れた地盤動的応答解析, 沖村委員研究会調査研究報告書, p.41, 2001.

4.6) 沖村孝, 鳥居宣之, 藤井紀之：神戸市域における木造構造物地震危険度評価に関する研究，第 37 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.2147-2148，2002.

4.7) 松島信一，川瀬博：1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション日本建築学会構造系論文集，第 534 号，pp.33-40，2000.

4.8) 神戸市役所，建設工学研究所：神戸市地盤調査報告書，第７章，神戸地盤の地層構成，pp.7(1)-7(26)，1998.

4.9) 河田恵昭：大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学，Vol.16-1，pp3-13，1997.

4.10) 神戸市震災復興本部総括局復興推進部企画課：神戸復興誌，123p.，2000.

第5章　耐震診断と常時微動に基づく木造建物の耐震性能評価

本章では，阪神地域における木造建物の耐震性能を把握するために，兵庫県神戸市域を中心として，耐震診断を受診した戸建木造住宅を対象とした常時微動計測を行い，住宅の振動特性に関する分析を行う．

5.1　神戸市域を対象とした木造住宅の常時微動計測体制

常時微動の計測は神戸市および社団法人兵庫県建築士事務所協会神戸支部耐震診断委員会（以下，兵庫県建築士事務所協会）の協力を得て実施している．計測体制を図-5.1 に示す．神戸市[5.1)]では，耐震診断，耐震改修の普及を図るために，「神戸市耐震簡易診断事業」を推進している．この事業では戸建住宅，共同住宅，長屋住宅を対象として，一定の条件を満たしていれば神戸市より診断費用の助成を受けることができる．

診断の流れについて，まず受診希望者は受付窓口である「すまいるネット（神戸市すまいの安心支援センター）」に申し込みを行う．その後，神戸市より診断業務を委託された兵庫県建築士事務所協会が，すまいるネットからの連絡を受けて，同協会に認定された診断員を派遣し耐震簡易診断を実施する．すまいるネット[5.2)]の報告によると，戸建木造住宅について，平成16 年度は 213 戸の診断を実施している．常時微動の計測は神戸市の協力を得て，原則としてこれらの耐震診断を受けた住宅やこれから診断を予定している住宅を対象として実施している．常時微動の測定は，耐震簡易診断の希望者がすまいるネットへ申し込む際に常時微動の測定希望が伝えられると，すまいるネットから神戸大学へ連絡が入り，測定希望者と日程を調整して実施する．計測結果は「神戸の地盤研究会[5.3)]」を引き継いで平成 16 年度に発足した「神戸の地盤・減災研究会（事務局：神戸大学）」において，民間研究機関や耐震補強業務に関わる実務者と連携した研究活動を行っている．

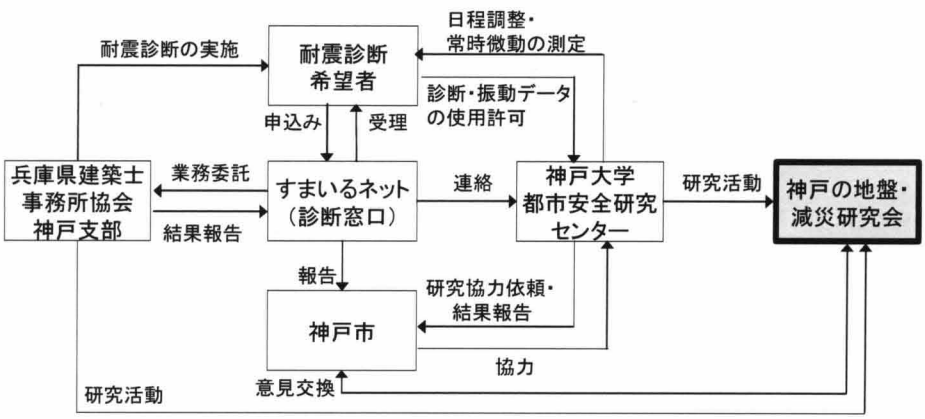


図-5.1　計測体制

5.2　計測概要

5.2.1　計測方法

常時微動計測は図-5.2 に示すような計測装置を用いて実施した．計測は動コイル式で測定周波数が 0.5～18Hz の 3 成分（水平方向 2 成分，上下方向 1 成分）の速度センサーを用い，図-5.3 に示すように，地盤に 1 台，1 階床上に 1 台，2 階床上に 2 台を設置して，計 4 箇所を同時に測定した．各センサーの設置にあたり，原則として以下の点に留意した．

1) 地盤：住宅本体の振動による相互作用の影響を考慮し，住宅から約 2m 程度の距離をおいて設置した．
2) 1 階床：平面図や現地で住宅の間取りを確認して剛心を推定し，畳や絨毯上を避けて，その剛心に近接する板床上に設置した．この時に床振動が含まれないように，床端部の柱や耐力壁に近い位置で計測を行った．また，冷蔵庫などの振動源から離して設置した．
3) 2 階床：1 階床上に設定したセンサーのほぼ真上に 1 台を設置し，振動のねじれモードを検出するため住宅端部に残りの 1 台を設置した．その他は 1 階床と同様の配慮をした．

計測はサンプリング周波数 200Hz で約 10 分間（131,072 点）連続して行い，データは 50Hz のローパスフィルタをかけ，分解能 24bit で AD 変換し記録した．計測中は，住民に住宅内から退出してもらい，住宅の状況確認のために，1)建築年，2)図面の有無，3)増築の有無，4)蟻害・腐朽の有無，5)水漏れなどの不具合の有無，6)修繕履歴，7)兵庫県南部地震の被害状況，8)補修方法，9)その他の災害での被災状況，10)地震保険などへの加入状況，11)診断申し込みの動機，12)今後の修繕予定についてヒアリングを行った．計測に要した時間は，準備および撤収時間を含めると 1 回の計測あたり約 1 時間程度であった．

図-5.2　計測装置

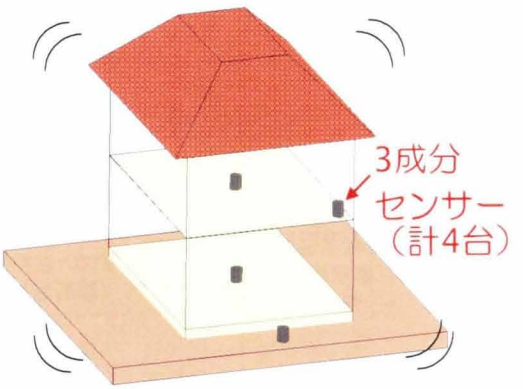


図-5.3　計測位置

5.2.2　計測事例と波形処理方法

(1)　住宅概要

計測対象とした建物は神戸市東灘区魚崎西町に位置する 2 階建ての木造住宅（ISH 邸）である．計測は平成 16 年 9 月 29 日に実施した．ISH 邸の外観を写真-5.1 に示す．以下に住宅の主な仕様を記す．

- 建築年：1977 年
- 屋根：瓦，外壁：モルタル壁，内壁：ボード壁，基礎：無筋コンクリート布基礎
- 兵庫県南部地震により基礎と壁に無数のクラックが発生．日本都市計画学会と日本建築学会の合同調査結果[5.4)]では一部損壊．
- 補修は居住者自身がほとんど行い，壁はモルタルを注入．基礎は業者に依頼し，剥落部分を鉄筋で補強後，コンクリートを打ち込む．
- 耐震簡易診断結果は 0.76 で「やや危険」と判定．

居住者は耐震性に不安を抱き，建物外周部にチェーンを巻き付けて補強しようとしたが，人では困難だったため，通常の補強を実施している．補強は基本的には 1 階部分に壁を増設し，併せて屋根，壁の軽量化を行った．

写真-5.1　ISH 邸の外観（兵庫県南部地震時に壁面に発生したクラック跡が確認できる）

(2)　測定箇所

図-5.4 に ISH 邸のセンサー設置位置（4 台）と測定状況を示す．センサーは水平方向成分のうち X 軸がほぼ北向きに正方向となるように統一して設置した．

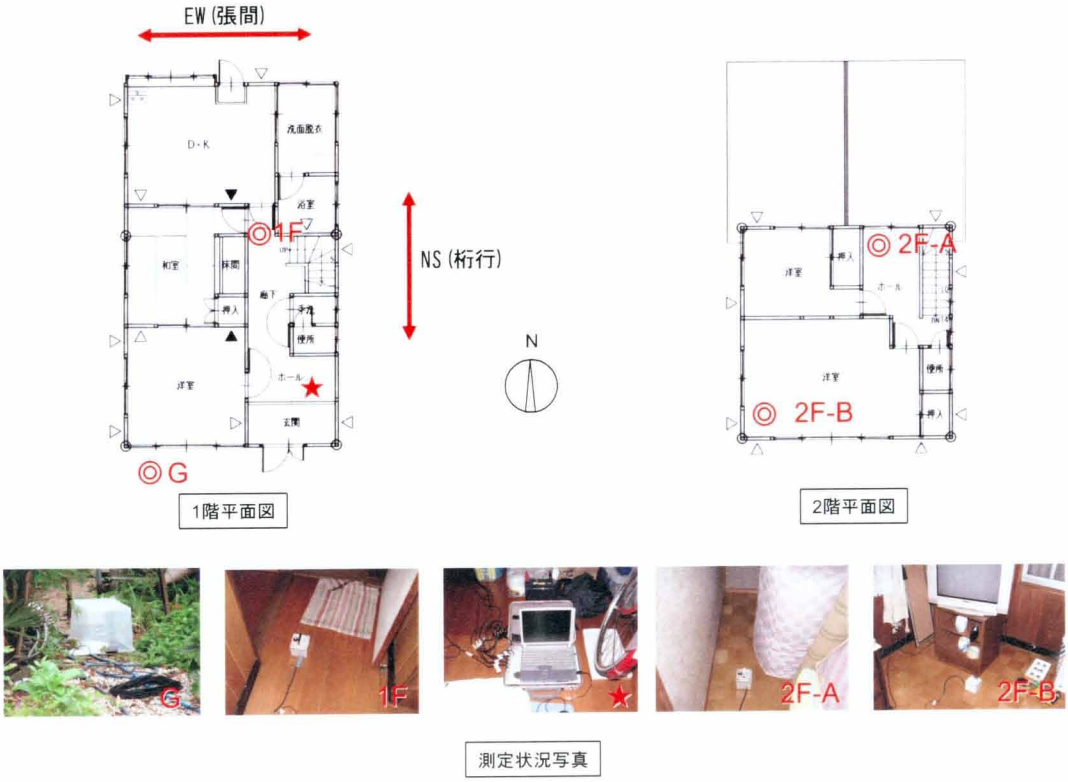


図-5. 4　ISH 邸の常時微動測定位置と測定状況

(3)　波形処理方法

図-5.5 に波形処理プロセスを示す．波形処理はまず，常時微動計測結果から得られた約 10 分間（131,072 点）の連続波形データから安定している 10.24 秒間（2,048 点）の波形データを 10 区間切り出してゼロ基線補正を行った．その切り出した 10 波の各波形ごとにフーリエ速度振幅スペクトルを計算し，Blackman Window により平滑化処理を施した後に，10 波を平均化した．EW 方向の平均化したフーリエ速度振幅スペクトルを図-5.6 に示す．

住宅の固有周期は平均化したフーリエ速度振幅スペクトルについて地盤に対する 2 階床のスペクトル比を計算し，最も卓越する周期を固有周期と定義した．また，この時の最大振幅比を地盤に対する 2 階の増幅率(伝達関数)とした．図-5.7 に住宅のほぼ中央においたセンサー(2F-A)位置における EW 方向の 2 階床と地盤とのスペクトル比から求めた固有周期および増幅率を示す．また，減衰定数は地盤に対する 2 階床のスペクトル比からハーフパワー法（$1/\sqrt{2}$ 法）により算定をおこなった．図-5.8 にハーフパワー法による減衰定数の求め方を示す．

地盤の卓越周期は 3 成分それぞれの平均フーリエ振幅速度スペクトルから，X 方向(NS)と Y 方向(EW)の水平成分の 2 乗和平方（H）と，Z 方向(UD)の鉛直成分（V）から H/V スペクトル比を計算し，最も振幅比が大きい周期を地盤の卓越周期と定義した．

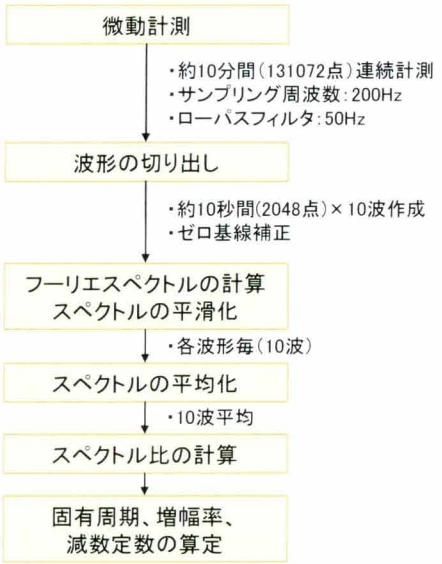


図-5.5　波形処理プロセス

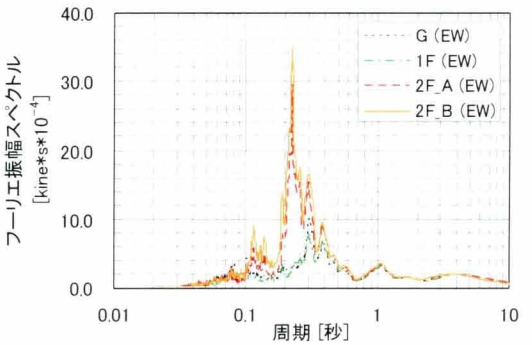


図-5.6　各計測位置における平均化処理後のフーリエ速度振幅スペクトル

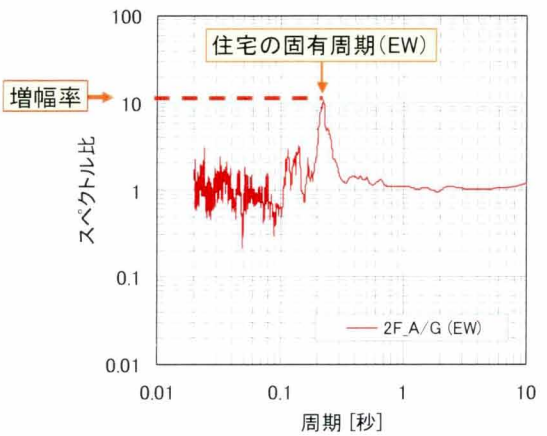


図-5.7　地盤(G)に対する2階床（2F-A）のスペクトル比(ISH邸EW方向)

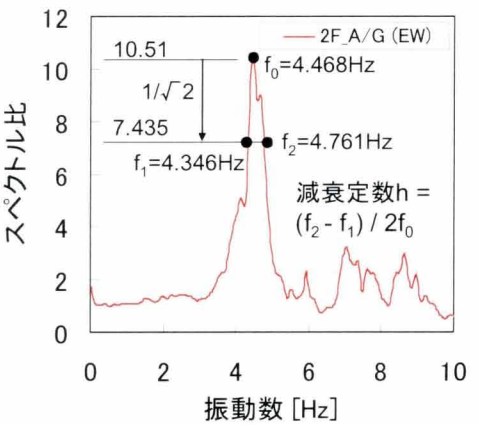


図-5.8　ハーフパワー法による減衰定数の算定方法(ISH邸EW方向)

5.3　常時微動計測結果

5.3.1　常時微動計測の実施住宅の概要

これまでに計測を実施した36棟の住宅の分布を図-5.9に示す．また，測定地域の内訳を図-5.10に示すように，測定は神戸市内33棟，市外3棟を対象に実施した．神戸市内の測定地域は灘区，垂水区，北区，西区が多い．市外3棟は，直接，神戸大学に計測の申し込みがあった住宅である．図-5.11に計測建物の兵庫県南部地震による被災度の内訳を示す．被災度は住民への被害内容の聞き取りと神戸市によるり災調査の結果を参考にして，岡田・高井[5.5)]により提案されている被害パターチャートのダメージグレードに従って分類した．神戸市内の住宅は，兵庫県南部地震により何らかの被害を受けている建物が多く，軽微な壁面へのクラックなどが発生するなどの被害程度であるダメージグレードD1が最も多い．次に建築年の内訳を図-5.12に示すように，範囲は1936年から1983年までで，1970年代の建物が比較的多い．

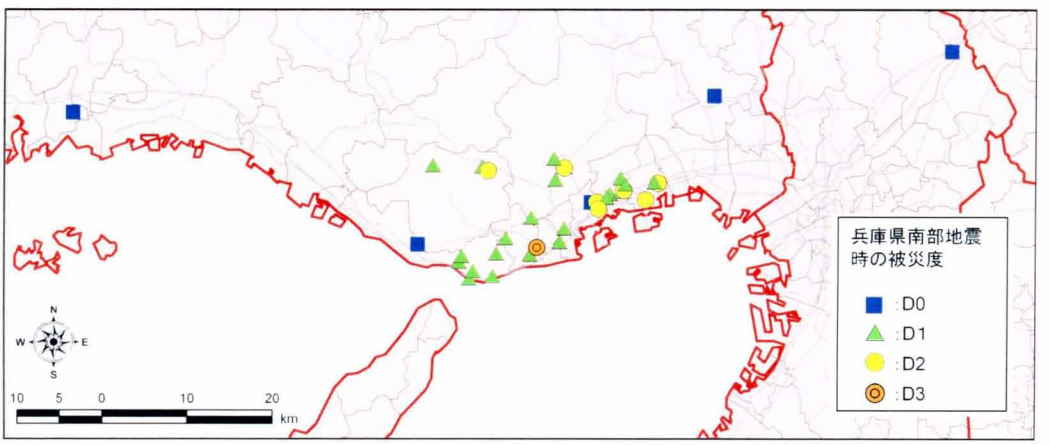


図-5.9　常時微動測定住宅の分布と兵庫県南部地震による被災度

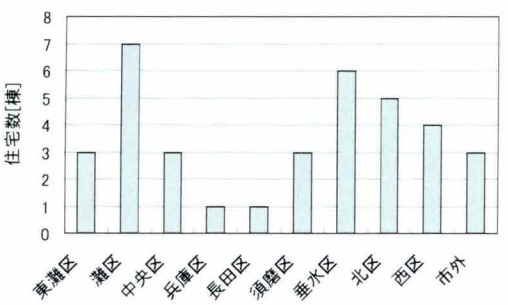


図-5.10　常時微動測定地域の内訳

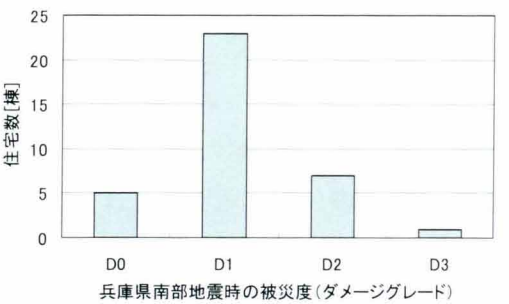


図-5.11　兵庫県南部地震よる被災度の内訳

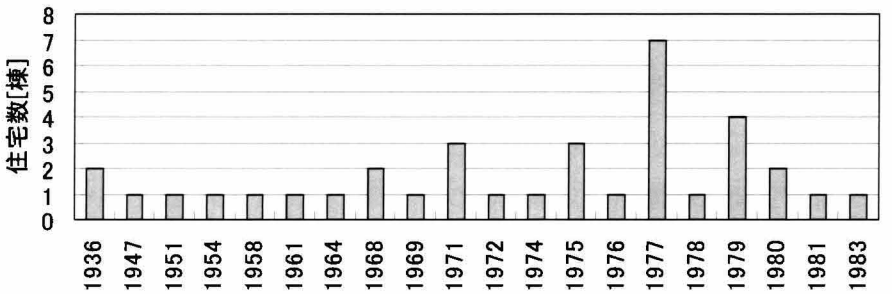


図-5.12　常時微動測定建物の建築年次の内訳

5.3.2　木造住宅の振動特性

(1)　固有周期

常時微動測定結果から算定した固有周期を図-5.13 に示す．なお，長い固有周期が測定された方向を弱軸方向，短い方向を強軸方向と設定した．固有周期の範囲は弱軸方向で，0.14～0.36 秒で，強軸方向は 0.10～0.33 秒であった．また，固有周期は 2 階床上に設置した 2 台のセンサーからそれぞれ求めることができ，図-5.13 には原則として住宅のほぼ中央に設置した A 点と，住宅端部に設置した B 点から算定した結果の比較を併せて示している．A 点と B 点を比較すると，決定係数 R^2 は弱軸方向で 0.99，強軸方向は 0.98 であるように，両点の差異は小さい．これより，固有周期は測定位置による影響をほとんど受けないことが明らかとなった．

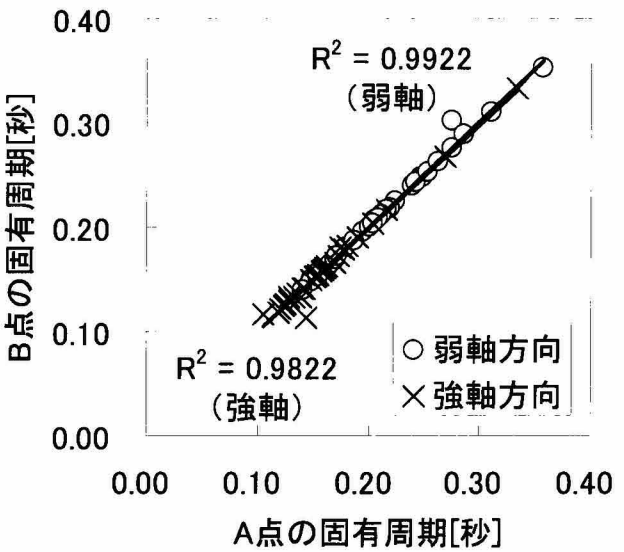


図-5.13　常時微動計測住宅の固有周期

(2) 減衰定数

図-5.14 に常時微動計測結果から得られた減衰定数を示す．減衰定数の範囲は，弱軸方向は 0.015～0.114 で，平均は 0.039 であった．強軸方向の範囲は 0.094～0.119 で平均は 0.035 であった．また，図-5.14 において，2 階床上の A 点と B 点のそれぞれのセンサーから求めた減衰定数を比較すると，弱軸方向は両点ともにほぼ同様な値が算定されている．これより，弱軸方向は測定位置による影響は小さいが，強軸方向については大きくばらついており，測定位置により異なる値となった．

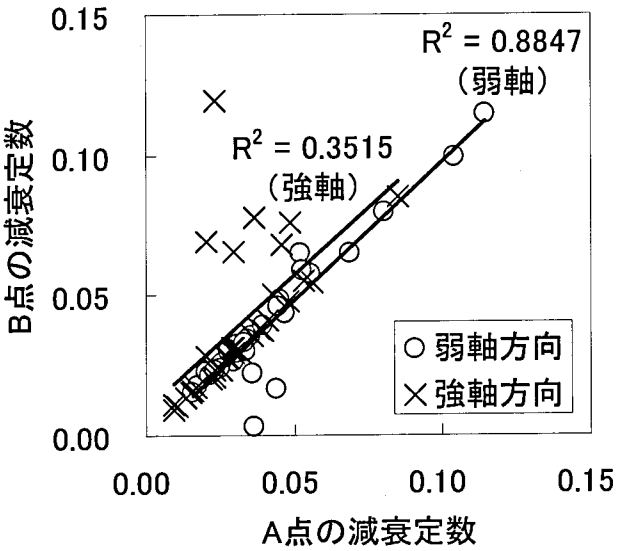


図-5. 14　常時微動計測住宅の固有周期

(3) 増幅率

図-5.15 に 2 階床上の A 点と B 点のセンサー位置における増幅率を示す．増幅率の範囲は，弱軸方向は 5.56～32.6 倍で，強軸方向は 4.78～31.2 倍であった．また，A 点と B 点位置における増幅率を比較すると，弱軸および強軸方向ともにばらつきが大きく，測定位置による影響が大きいことが明らかとなった．固有周期に比較して減衰定数や増幅率が測定位置による影響を受けた要因として，減衰定数や増幅率を求める場合，波形処理過程において求められたスペクトル比の形状への依存性が高く，1)周波数領域における算定方法では，スペクトルの分解能や平滑化手法によりスペクトル形状が影響を受ける可能性があること，2)波形の切り出し処理を行っているため，切り出し方によってスペクトル形状が影響を受けたこと，3)振動時の挙動について，並進モードだけではなく回転モードが発生しており，測定位置によりその影響を受けたことなどが考えられる．

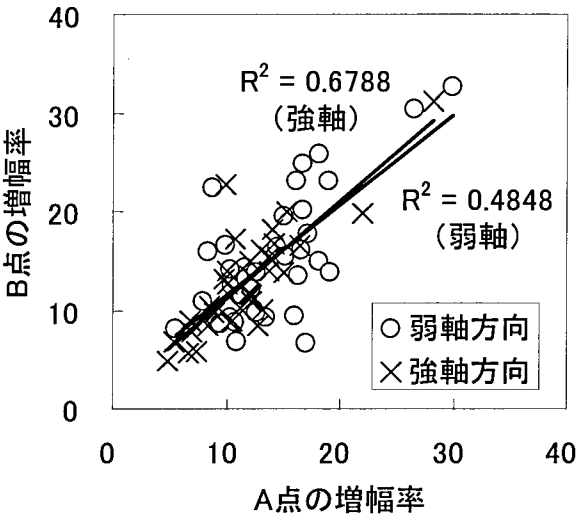


図-5. 15　常時微動計測住宅の固有周期

5.4　木造住宅の固有周期と耐震性能の関係

前節では住宅の固有周期は測定位置によらず安定して求めることができることが明らかとなった．そこで，その固有周期に着目して住宅の耐震性能の観点から建築年や耐震簡易診断結果との関係について検討を行った．

5.4.1　固有周期と建築年の関係

第 3 章において検討したように，建築年は建物の老朽化による性能低下や，時代の変遷に伴う新構法や新材料の開発・普及，建築基準や法規などの法制度の改正など，耐震性能に直接あるいは間接的に影響を与えるものであり，耐震性を表す総合的な指標の一つと捉えることができる．そこで常時微動から求められた固有周期が耐震性能とどのような関係にあるのかを検討するために，まず建築年との比較を行った．図-5.16 に建築年と固有周期の関係を示す．図-5.16 より建築年が古いほど固有周期が長くなる傾向がみられ，とくに弱軸方向はその傾向が顕著となった．固有周期は住宅重量と剛性の関係を反映したものであり，住宅重量が重いほど，または剛性が小さくなるほど固有周期は長くなることから，固有周期が長いほど耐震性は低くなると考えられる．

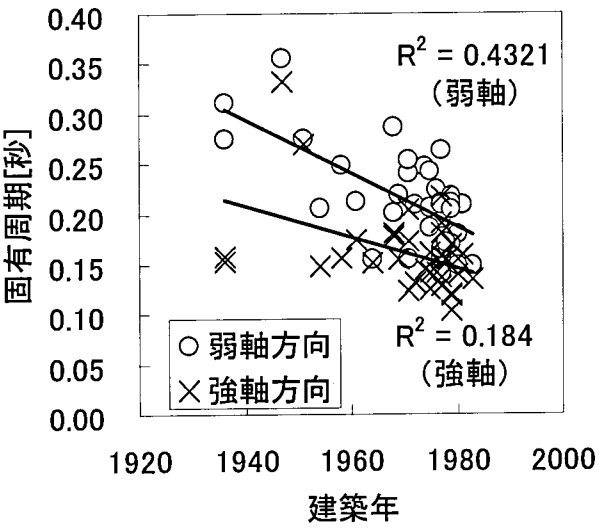


図-5.16　常時微動計測に基づく固有周期と建築年の関係

5.4.2　固有周期と耐震簡易診断結果の関係

図-5.17 に耐震簡易診断[5.6]による総合評価結果と弱軸方向の固有周期の関係を示す．同図から固有周期が長いほど診断値が小さくなる傾向がみられる．とくに固有周期が 0.27 秒以上の住宅の診断値は全て 0.7 以下であり，「倒壊または大破壊の危険がある」と判定されていた．これより，建築年との比較・検討結果と同様に固有周期は耐震性を表す重要な指標として捉えることができると考える．一方，図-5.17 の関係はばらつきが大きく，固有周期のみから精度良く簡易診断による総合評点を評価することは難しいと判断される．

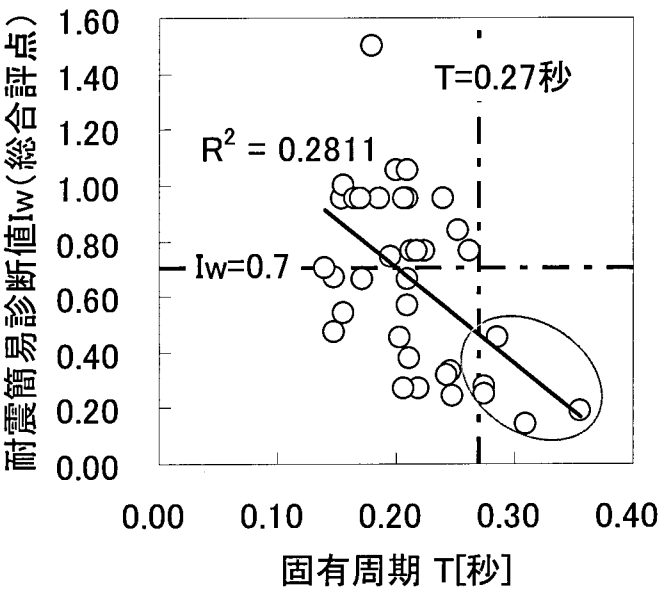


図-5.17　常時微動計測に基づく固有周期と耐震簡易診断結果の関係

このばらつきが大きい要因を究明するために，固有周期と耐震簡易診断における６評点との相関分析を行った．図-5.18～図-5.21 は，A 評点（地盤・基礎の評価），B×C 評点（偏心の評価），D×E 評点（水平抵抗力の評価），F 評点（老朽度の評価）と固有周期の関係を示している．これより，D×E 評点と固有周期の相関が他の評点に比較してやや高いことがわかる．

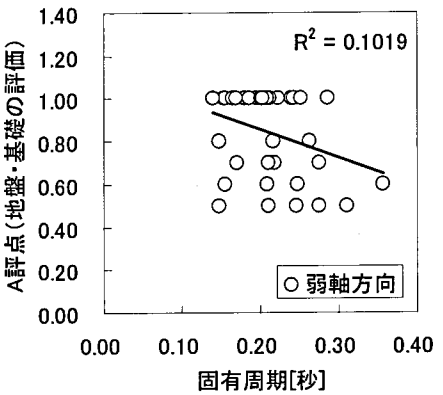


図-5.18　A 評点と固有周期の関係

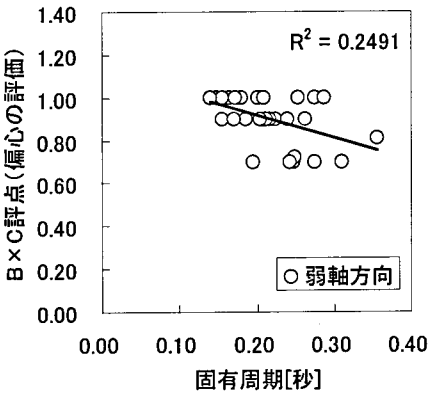


図-5.19　B×C 評点と固有周期の関係

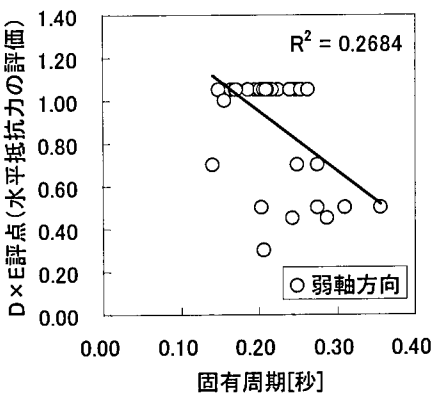


図-5.20　D×E 評点と固有周期の関係

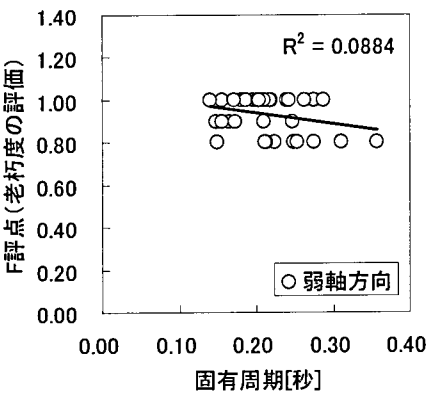


図-5.21　F 評点と固有周期の関係

しかし，ここで E 評点は総合評点の算定を容易にするため，単位面積あたりの壁の長さを必要壁長さで除して求めた壁の割合を，最終的に取り扱い易い値となるように換算を行っており，実際の水平抵抗力を評価する場合には不具合が発生する．そこで，より厳密な評価を行うために，換算前の壁の割合を求めた．この場合に筋かいが確認できた際には D 評点を反映するため，壁の割合を 1.5 倍とした．算定した壁の割合と固有周期の関係について，図-5.22 に弱軸方向と強軸方向を併せて示す．最も適合する累乗式で近似した場合の決定係数 R^2 は 0.523 である．また壁の割合は，剛性に比例する壁長さおよび建物重量が考慮された必要壁長さから算定されることから，固有振動数 f の 2 乗と相関があると考えられる．そこで，図-5.23 に常時微動から求められた f の 2 乗と壁の割合を示すが，R^2 は 0.483 であり，理論的な関係と矛盾しない結果が確認された．これよりばらつきは見られるが，簡便性を求めるのであれば，今回の検討範囲では

耐震簡易診断における D×E評点は常時微動に基づく固有周期から算定可能と考える.ただし，今回検討に用いた壁の割合は略算式から求められたものであり，壁の実長は評価されているが，壁の仕様による剛性や強度の相違は考慮されていないため，より精密な耐震診断における検討が必要となる.

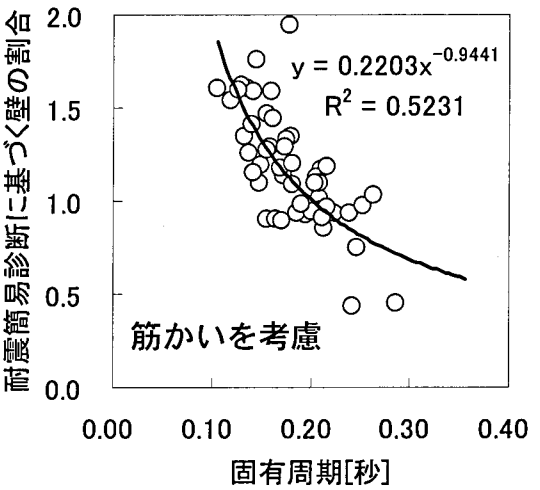


図-5.22　固有周期と壁の割合の関係

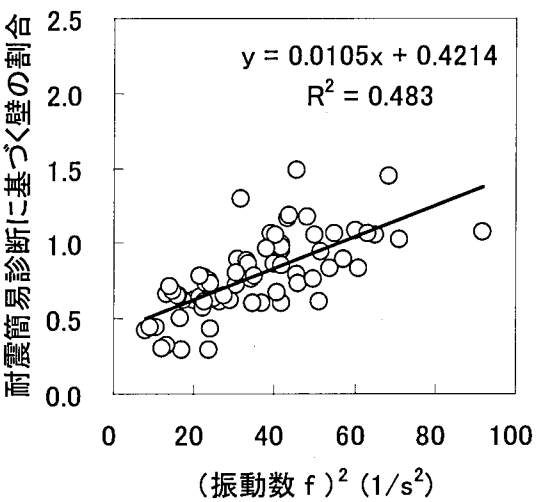


図-5.23　振動数と壁の割合の関係

」

5.4.3 耐震一般診断結果との比較

(1) 一般診断法の概要

前項では，耐震簡易診断に基づく壁の割合と固有周期の関係を検討した．ここではでは，より信頼性が高い評価法である一般診断[5.7)]と比較を行う．なお，神戸市では，2005年9月より耐震診断法が簡易診断法から一般診断法に切り替わっている．ここでは，まず，一般診断法の概要を説明する．一般診断法では，a)地盤・基礎およびb)上部構造について評価を行う．

a)地盤・基礎の評価では診断対象住宅の立地条件として地盤と地形の調査と基礎形式の調査を行う．評価の結果は注意事項が記述されるが，評点では与えられない．ただし，地盤が著しく軟弱と思われる地域にある建物については，後述する必要耐力の割り増しを行う．

b)上部構造の評価について，診断はその住宅が保有すべき必要耐力 Q_r と実際に保有している耐力 P_d を比較することにより上部構造評点(P_d/Q_r)を求める．まず，必要耐力 Q_r は各階ごとに建物階数と屋根仕様から決定される床面積あたりの必要耐力Qと各階の床面積Aから下式を用いて算定する．

$$Q_r = Q \cdot A \tag{5.1}$$

Q_r を求める際には，算定条件により軟弱地盤割り増し係数や形状割り増し係数，積雪荷重による追加必要耐力の加算，異種構造混合時の耐力の割り増しが考慮される．

次に保有する耐力 P_d は強さPと耐力要素の配置などによる低減係数E，および劣化度による低減係数Dから次式により算定する．

$$P_d = P \cdot D \cdot E \tag{5.2}$$

強さPは壁の耐力 P_w とその他の耐震要素の耐力 P_e に基づいて，次式を用いてX方向，Y方向のそれぞれについて求める．

$$P = P_w + P_e \tag{5.3}$$

$$P_w = \sum (C \cdot l \cdot f) \tag{5.4}$$

$$P_e = 0.25 \cdot Q_r \tag{5.5}$$

ここに，Cは壁強さ倍率，lは壁長さ，およびfは柱接合部による低減係数である．fは壁強さ倍率Cと基礎仕様および接合部仕様に応じて決定する．

耐力要素の配置などによる低減係数Eは，建物の両端1/4内における壁量充足率と床仕様によって求める．また，劣化度による低減係数Dは，建物の劣化状況を調査し，劣化事象が認められた場合は，劣化事象に応じて定められている劣化点数を求め，建物に存在する部位から得られる存在点数との比から算出する．

(2) 一般診断結果

一般診断は前節 5.3 において常時微動計測を行った 36 棟の建物のうち，1972 年～81 年に建設された神戸市内の木造在来軸組構法による住宅 18 棟を対象に実施した．表-5.1 に診断対象建物の概要と診断結果の一覧を示す．表-5.1 には簡易診断結果および常時微動計測に基づく固有周期を併せて示している．

表-5. 1　一般診断の対象建物の概要と診断結果一覧

No.	建築年	住宅重量 W(kN)		耐震診断結果						常時微動計測結果に基づく固有周期 T(秒)	
				簡易診断値	一般診断値 ※1	一般診断に基づく強さ P(kN)					
						弱軸方向		強軸方向		弱軸方向	強軸方向
		1階	2階			1階	2階	1階	2階		
1	1976	163.5	81.2	0.76	0.83	58.4	43.1	92.2	44.6	0.224	0.142
2	1974	92.2	62.5	0.33	0.74	30.8	22.5	44.2	34.3	0.247	0.144
3	1972	119.3	79.5	0.95	0.76	40.3	32.0	55.8	40.2	0.209	0.132
4	1975	123.0	86.1	0.32	0.58	32.5	34.5	69.2	42.1	0.242	0.141
5	1979	123.7	87.8	0.76	0.65	61.0	44.1	78.7	75.3	0.217	0.119
6	1979	120.6	84.5	0.66	0.80	65.9	40.7	78.8	73.0	0.210	0.104
7	1975	120.3	89.4	0.95	1.11	47.0	31.9	60.0	43.8	0.206	0.126
8	1977	161.2	53.0	0.95	1.54	64.0	35.6	83.5	30.8	0.155	0.137
9	1981	202.7	145.7	0.57	0.79	67.2	72.3	101.7	73.4	0.209	0.160
10	1975	123.6	72.6	0.95	1.19	49.5	41.9	70.2	34.0	0.186	0.162
11	1977	176.4	58.0	0.95	1.33	66.3	25.7	87.0	41.0	0.164	0.129
12	1979	186.2	101.0	0.95	1.35	77.3	57.5	78.6	43.6	0.170	0.169
13	1977	181.1	66.2	0.76	0.63	61.7	26.9	62.0	42.9	0.263	0.217
14	1978	172.7	66.2	0.66	1.30	78.7	36.1	84.0	36.1	0.171	0.155
15	1977	166.9	45.5	0.70	1.57	65.1	28.6	85.8	30.1	0.140	0.128
16	1977	265.2	102.2	0.38	0.50	112.8	32.1	125.1	34.4	0.211	0.191
17	1977	167.6	53.0	1.05	1.53	66.2	35.4	79.8	27.5	0.209	0.181
18	1979	109.1	79.0	0.45	0.68	34.4	31.7	65.9	47.0	0.204	0.121

※1)　一般診断結果からは各階のそれぞれの方向の上部構造評点が求められるが，表中には簡易診断値と比較するために1階において評点が低い方向の値を載せている．

簡易診断結果と一般診断結果に基づく評点の比較を図-5.24 に示す．全般的に簡易診断値と一般診断値には相関があるが，決定係数 R^2 は 0.431 であり，両者にばらつきが見られる．また一般診断に基づく評点が簡易診断より大きくなる傾向がある．

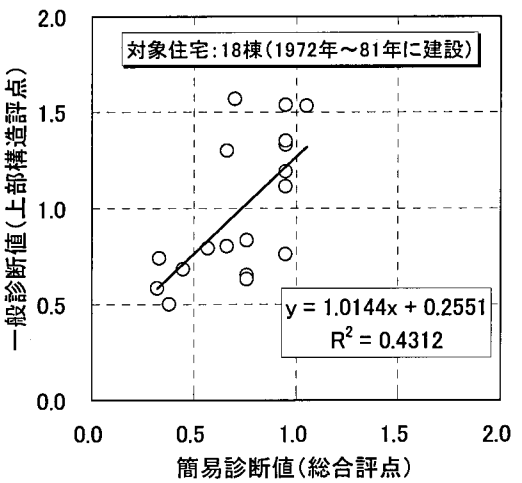


図-5. 24　簡易診断と一般診断に基づく評点の比較

(3) 一般診断結果と固有周期の関係

次に一般診断結果と常時微動に基づく固有周期との関係について比較を行った．一般診断による上部構造評点は前述したように，保有すべき必要耐力 Q_r と実際に保有している耐力 P_d の比として求められる．したがって，前項の耐震簡易診断結果との比較結果と同様に固有振動数 f の 2 乗に関係すると考えられる．図-5.25 に一般診断結果と f^2 との関係を示す．決定係数 R^2 は 0.648 であり，耐震簡易診断結果に比較して高い相関が得られた．これは，一般診断の上部構造評点には，固有周期と相関が低かった簡易診断の A 評点（地盤・基礎の評価）に相当する評価項目には評点が与えられていないため，相対的に壁量に基づく評点の影響度が診断値に大きく反映された結果と捉えることができる．また，図-5.25 には予測誤差が正規分布に従うと仮定した場合の標準偏差 σ を併せて示している．同図より，上部構造評点が 1.0 以上となる振動数 f を求めると，平均では 5.2Hz 以上となり，−3σ のばらつきを考慮すると 7.0Hz 以上となる．したがって今回の検討範囲では，常時微動測定の結果，0.14 秒以下の固有周期が得られた場合には，一般診断における「一応倒壊しないレベル」に相当すると判断できるように，常時微動に基づく固有周期は簡易に耐震安全性を評価する指標になり得ると考える．

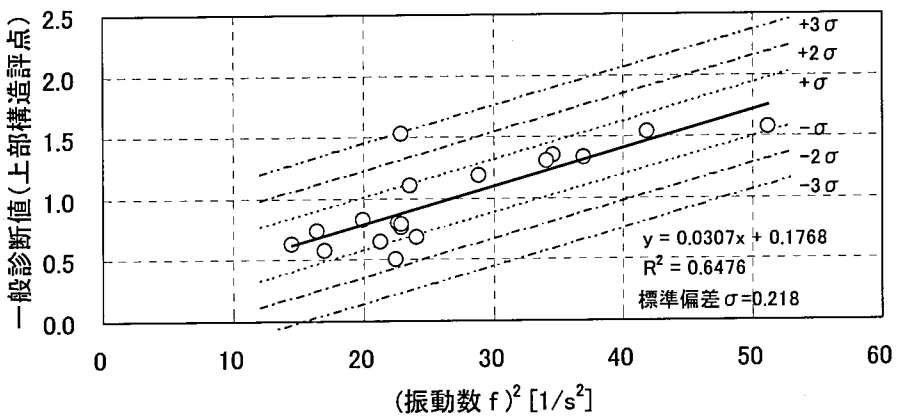


図-5. 25　常時微動計測に基づく固有振動数 f と一般診断値の関係

(4) 常時微動に基づく固有周期と層せん断力係数の関係

一般診断結果と常時微動に基づく固有周期の関係には比較的高い相関が見られたが，ここでは重要な耐震性能評価指標であり，固有周期との関係性がより高いと考えられる層せん断力係数との比較を行った．層せん断力係数は木造住宅の荷重－変形関係における復元力特性が層間変形角 R=1/120rad で降伏すると仮定して，一般診断結果に基づく木造住宅の i 層における降伏時の層せん断力係数 ${}_DC_{yi}$ を次式により算定した．

$$ {}_DC_{yi} = \frac{P_{yi(R=1/120rad)}}{M_i g} \tag{5.6} $$

ここで，P_{yi} は i 層の降伏時耐力，M_i は i 層が支持する質量，g は重力加速度である．降伏時の

耐力 P_{yi} は，一般診断による強さ P が R=1/120rad 時の耐力に相当することから，強さ P を用いた．なお，耐力要素の配置などによる低減係数 E および劣化度による低減係数 D は考慮していない．(5.6) 式に示したように耐力と重量の比で表される層せん断力係数 ${}_DC_y$ は常時微動計測による固有振動数 f の 2 乗に比例すると考えられる．図-5.26 に一般診断結果から求められた 1 階の降伏時の層せん断力（ベースシア）係数 ${}_DC_{y1}$ と f^2 の関係を示す．

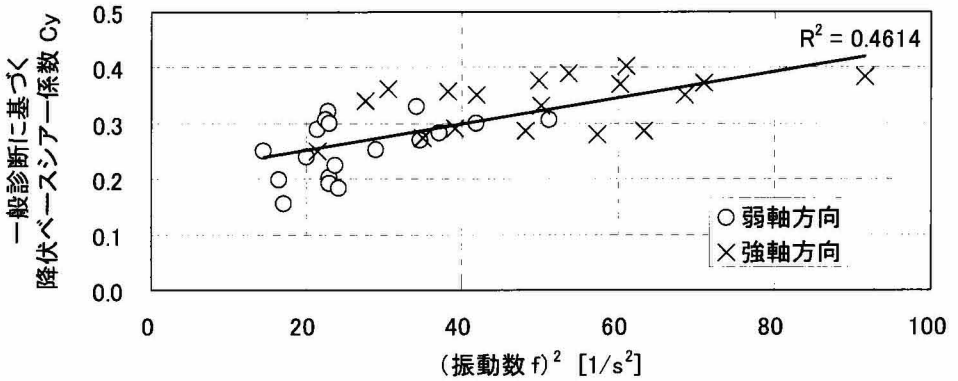


図-5.26　一般診断に基づく 1 階の降伏ベースシア係数 ${}_DCy$ と振動数の関係

図-5.26 において両者を比較した結果，決定係数 R^2 は 0.461 であり，必ずしも高い相関は得られなかった．この要因として，一般診断結果から求められた ${}_DC_{y1}$ は，1 階の壁長さと壁倍率に基づいて降伏時の耐力から算定されるが，2 階建て木造住宅の場合，固有振動数 f は 1 階と 2 階における質量比や剛性比の影響を受けるため，1 階の耐力や剛性が同じ建物であっても，2 階の剛性が異なると振動数は変化する．そこで，1 階と 2 階における質量比や剛性比の影響を考慮するため，2 層の建物モデルを設定して，常時微動に基づく固有周期から降伏時の層せん断力係数を求める関係式の定式化を行う．

まず，図-5.27 に示すような 2 層モデルを設定する．

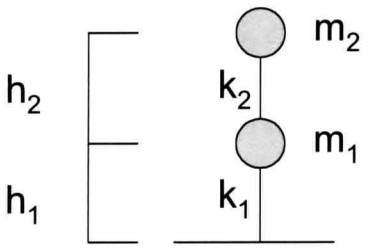


図-5.27　木造住宅の 2 層モデル

各層の階高を hi，各層の質量を m_i，各層の剛性を k_i とする．ここで，この 2 層モデルの固有円振動数を ω とすると，減衰の影響は非常に小さいとして無視した場合の振動数方程式は次式で表される．

$$(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2{}^2 = 0 \tag{5.7}$$

各層の質量 m_i は，一般診断法のように各層の床面積から略算することができる．また，固有円振動数 ω は常時微動計測結果から求められた固有周期 T を用いる．ここで，常時微動に基づく固有周期について，1 次周期，2 次周期を同定できると，各層の剛性 k_i を (5.7) 式より逆算することが可能であるが，本研究で用いた常時微動波形の処理手法では 2 次の固有周期を明確に求めることはできなかった．したがって，一般診断結果から得られる各層の強さ P の比から 1 階と 2 階の剛性比 α を求めることにより，各層の剛性 k_i を推定した．剛性比 α は一般診断による 1 階の強さを P_1，2 階の強さを P_2 とおくと次式より求められる．

$$\alpha = \frac{k_2}{k_1} = \frac{h_1 \cdot P_2}{h_2 \cdot P_1} \tag{5.8}$$

(5.8)式を(5.7)式に代入すると各層の剛性 ki を求めることができる．次に常時微動に基づく降伏時の層せん断力係数 ${}_M C_y$ を求める．図-5.28 に初期剛性と降伏時の層せん断力係数 C_y によって決定される弾完全塑性型に近似した復元力特性を示す．

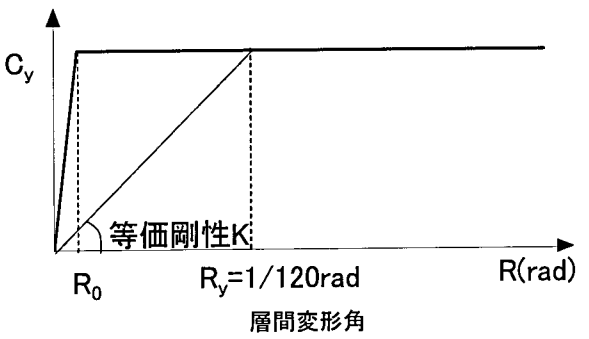


図-5. 28　完全弾塑性型復元力特性

図-5.28 より，ある層における層間変形角 R と等価剛性 K の関係は層の高さを H，ある層が支持する質量を M とおくと次式で与えられる．

$$K = \frac{C_y \cdot Mg}{H \cdot R} \tag{5.9}$$

したがって，常時微動計測に基づく i 層の降伏時の層せん断力係数 ${}_M C_{yi}$ は，折れ点の層間変形角を R_0 とおくと，次式で表される．

$$k_i = \frac{{}_M C_{yi} \cdot M_i g}{hi \cdot R_0} \quad , \quad (i = 1,2) \tag{5.10}$$

$$\therefore {}_M C_{yi} = \frac{k_i \cdot h_i \cdot R_0}{M_i g} \quad , \quad (i = 1,2) \tag{5.11}$$

降伏時の層間変形角 R_0 について，林ら[5.8)]は伝統軸組構法による木造住宅を 1 質点系置換した時の等価高さ H_e と等価質量を M_e とし，最大応答変形角 R に対する等価固有振動数 f と降伏時ベースシア係数 C_y の関係を定式化して，常時微動から計測された固有振動数 f_0 を用いて C_y の算定を行っている．この時に降伏時の層間変形角 R_0 を 1/1,000rad に設定し，限界耐力計算に基づく C_y と比較した結果，良い対応が得られたことを示している．そこで，本研究では降伏時の層間変形角 R_0 は 1/1,000rad に設定した．

以上の(5.7), (5.8), (5.11)式により，常時微動に基づく固有周期 T から降伏時の層せん断力係数 ${}_M C_y$ を算定することができる．ただし，算定にあたり 1 階と 2 階の高さをそれぞれ標準的な高さとして h_1=3m と h_2=2.7m に設定した．図-5.29 に各階について，常時微動に基づく降伏時の層せん断力係数 ${}_M C_y$ と一般診断に基づく層せん断力係数 ${}_D C_y$ の関係を示す．1 階，2 階ともに常時微動結果から求めた ${}_M C_y$ の方が大きく，${}_M C_y$ の増大量に比較して ${}_D C_y$ の増大量は小さい．

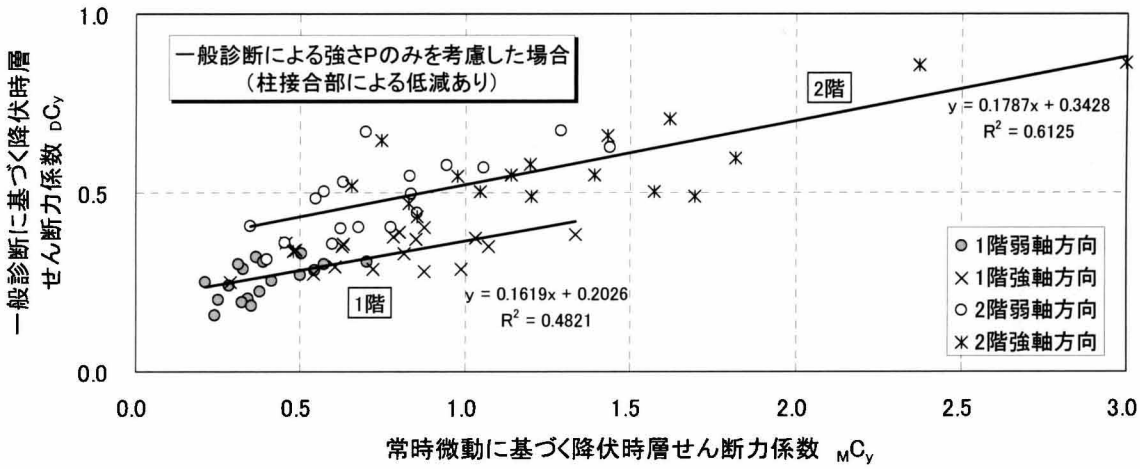
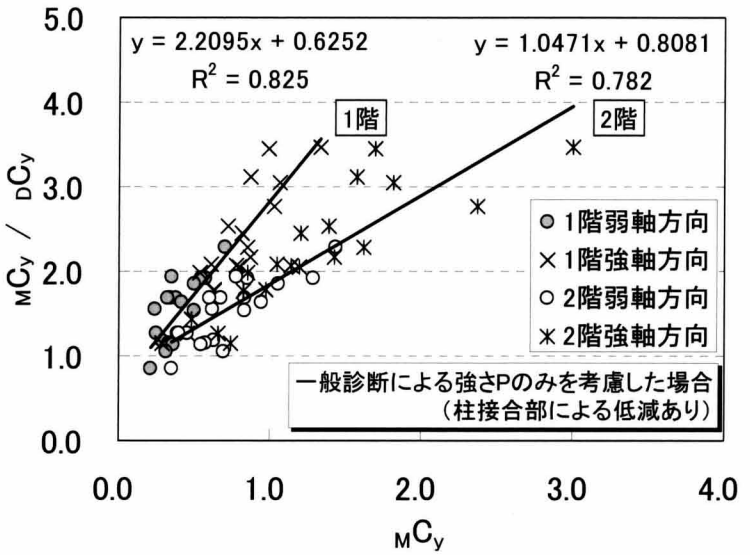


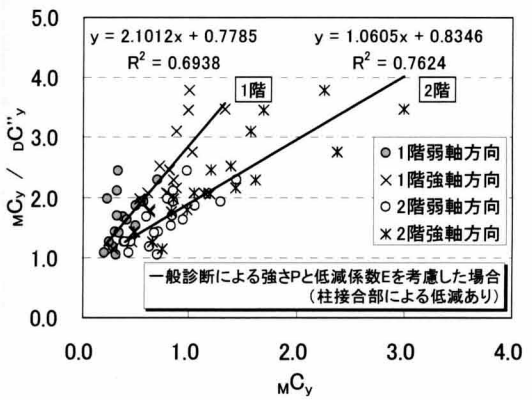
図-5.29　常時微動に基づく降伏時層せん断力係数 ${}_M C_y$ と一般診断に基づく層せん断力係数 ${}_D C_y$ の関係

そこで次に，${}_{M}C_y$の${}_{D}C_y$に対する倍率に着目した検討を行った．図-5.30(a)～(c)に${}_{M}C_y$と${}_{M}C_y/{}_{D}C_y$の関係を示す．図-5.30(a)は一般診断において通常に求められる強さ P を基に${}_{D}C_y$を算定している．図-5.30(a)をみると${}_{M}C_y$が大きくなると${}_{M}C_y/{}_{D}C_y$が大きくなっている．${}_{D}C_y$は一般診断における壁長さと壁倍率から強さ P を求めたものであり，壁倍率は 1/120rad 変形時の耐力に基づいている．しかし，既往の実験などによると，1/120rad 時の耐力は壁倍率から求められる耐力よりも大きいとされている．鈴木ら[5.9)]は在来構法木造住宅を対象とした静的水平力載荷実験を実施し，1/120rad 時の耐力を非耐力壁である小壁や腰壁の存在を考慮した壁倍率から算定し，実験結果と比較を行った結果，壁率から算定した耐力よりも実験結果の耐力の方が 2～3 倍大きくなるとしている．綿引ら[5.10)]は木造住宅の実大実験の結果から層間変形角 1/120rad 時の耐力が雑壁などの効果により，建築基準法に基づき壁量から計算される耐力に対し 200%の余力を持っているとしている．地震動応答解析による評価では，山田[5.11)]は木造住宅の雑壁量と固有周期，地震時最大層間変位を比較検討し，雑壁量が固有周期や応答変位に影響を与えていることを示している．したがって，全体の剛性評価，耐力評価を行う上で耐力壁以外の雑壁などの住宅構成要素の影響が考慮される必要があると考える．常時微動計測に基づく固有周期には，このような雑壁などの耐力壁以外の剛性，耐力が含まれていると考えられ，その結果，降伏時層せん断力係数が壁倍率から求められた場合に比べて大きく評価されたと推察できる．${}_{M}C_y$の${}_{D}C_y$に対する倍率は，${}_{M}C_y$が 1.0 程度までは 1.0～2.5 倍程度であり，${}_{M}C_y$が 1.0 を超えた範囲では 2.5 倍～3.5 倍程度である．${}_{M}C_y$と${}_{M}C_y/{}_{D}C_y$との相関は非常に高く，決定係数 R^2は 1 階は 0.825，2 階は 0.782 であった．この関係を利用して，常時微動に基づく${}_{M}C_y$から一般診断における${}_{D}C_y$を簡易に推定したり，一般診断で求めた強さ P が妥当かどうかを客観的に確認したりするような常時微動の利用可能性を挙げることができる．

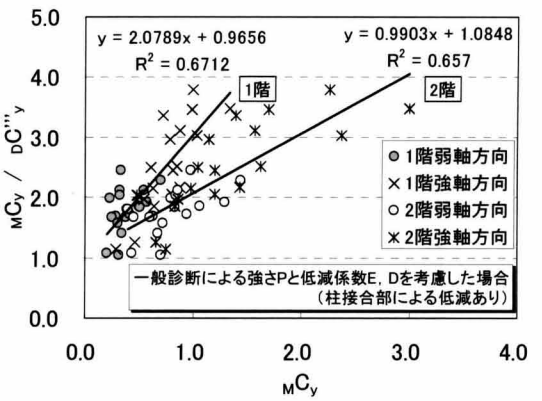
図-5.30(b)はさらに耐力要素の配置などによる低減係数 E を考慮して求めた強さ P'から${}_{D}C_y'$を算定して比較した結果を示している．また，図-5.30(c)は低減係数 E と劣化度による低減係数 D を考慮した強さ P" から${}_{D}C_y''$を算定して比較した結果を示している．低減係数 E や D を考慮すると相関は低くなっている．これより，壁の剛性や耐力評価を行う上で，常時微動に基づく固有周期は重要な耐震性能指標となり得るが，前項 5.4.2 における耐震簡易診断との比較結果と同様に，耐力要素の配置の影響や劣化度は固有周期に反映されにくい耐震性能の評価要素と考える必要がある．



(a) $_{D}C_{y}$の算定時に強さ P のみを考慮（柱接合部による低減あり）



(c) $_{D}C_{y}$算定時に強さ P と低減係数 E を考慮（柱接合部による低減あり）



(d) $_{D}C_{y}$算定時に強さ P と低減係数 E, D を考慮（接合部による低減なし）

図-5.30　降伏時層せん断力係数 $_{M}C_{y}$ と $_{D}C_{y}$ の比

5.5　常時微動による補強効果の測定

5.2 節の計測事例の中で説明した ISH 邸は，既に耐震改修工事を終了している．そこで，耐震補強前後でどのように振動特性が変化したかを把握するため，耐震補強工事後に常時微動計測を実施した．補強は図-5.31 に示す部分に壁を増設し，特に弱軸である 1 階の EW（東西）方向に壁を増設することにより，剛性および強度を確保し，併せて屋根の軽量化を行っている．その結果，一般診断による上部構造評点は，EW 方向は 0.83 から 1.47 に，NS（南北）方向は 1.32 から 2.10 に向上している．図-5.32 に補強前後の EW 方向の固有周期の変化を示す．固有周期は NS，EW 方向ともに短くなっている．ここで，前節の図-5.25 の関係式を用いて振動数 f の 2 乗から上部構造評点を簡易推定すると，EW 方向は補強前の 0.81 に対して，補強後は 1.74 となった．本研究における分析結果に基づくと，補強後の固有周期 0.14 秒は推定の誤差を考慮しても一応倒壊しないレベルと判断できる．

このように常時微動計測に基づく評価は補強効果を客観的に示すことができる利点を有している．このような評価の実施は，住宅の耐震化を促進する上で重要な要件であり，耐震補強工事の品質確保や工事に対する住民の信頼を高めることなどが期待できる．

図-5.31　ISH の補強箇所（増設壁位置）

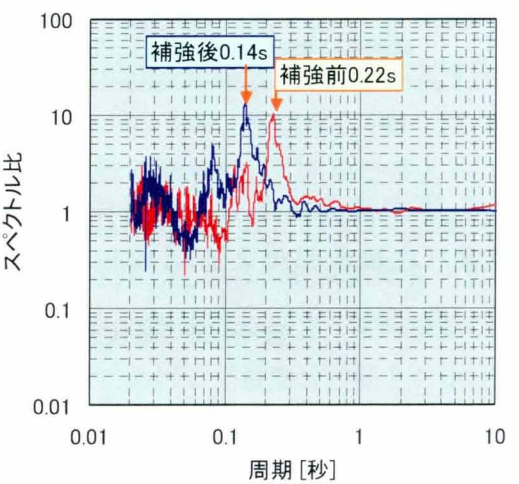


図-5.32　補強前後の固有周期の変化（EW 方向）

5.6 まとめ

本章では，兵庫県神戸市内を中心に静的な耐震性能評価手法である耐震診断が実施された住宅を対象として，常時微動結果から得られた住宅の振動特性について検討を行い，耐震簡易診断結果，一般診断結果との比較を行った．その結果，以下の知見が得られた．

1) 常時微動計測結果から住宅の振動特性として固有周期，減衰定数，増幅率を算定し，データを集積するとともに，それらの算定に察して常時微動の測定位置が与える影響について分析を行った．その結果，固有周期は測定位置の影響をほとんど受けることなく求めることができるが，減衰定数と増幅率は測定位置により異なる値をとる場合があることが明らかとなった．
2) 建築年と固有周期の関係から，建築年が古いほど固有周期が長くなる傾向が見られた．
3) 耐震簡易診断結果と固有周期の関係から，固有周期が長くなると診断結果の総合評点が小さくなる傾向が見られた．
4) 耐震簡易診断における 6 評点と固有周期の関係を分析した結果，D×E 評点（水平抵抗力の評価）と固有周期の相関が他の評点に比較して高くなった．
5) 耐震簡易診断において算定される壁の割合と固有周期の相関は高く，固有周期から簡便に壁の割合を推定することが可能であることを示した．
6) 耐震簡易診断が実施された住宅のうち，1972 年から 1981 年に建設された 18 棟の住宅を対象として，より精密な診断手法である一般診断を実施し，耐震簡易診断結果と比較した結果，両者にはばらつきがみられ，全般的には一般診断値による評価点の方が高くなる傾向があった．
7) 一般診断による上部構造評点と常時微動に基づく固有振動数 f の 2 乗との相関は高く，f^2 から上部構造評点を簡易に推定可能であることを示した．
8) 固有振動数 f の 2 乗と地震応答解析の主要なパラメータとなる降伏時の層せん断力係数について比較検討を行った．その結果，1 階と 2 階の質量比や剛性比を考慮して，常時微動に基づく固有周期から降伏時の層せん断力係数を求める関係式の定式化を行った．
9) 住宅重量の軽量化を図り，耐震壁を増設補強した住宅を対象に補強前後で常時微動計測を実施した結果，補強後の固有周期が短くなっていることが確認され，常時微動計測は補強効果を客観的に示すことができる利点を有していることを示した．

本章の検討結果を踏まえて第 7 章では常時微動計測により得られる固有周期 T と地震応答解析の主要なパラメータとなる降伏時の層せん断力係数 ${}_{M}C_{y}$ の関係，および耐震診断に基づく住宅の構造特性を反映した建物の振動モデルを作成し，地震応答解析による被災危険度評価手法の構築に関する検討を行う．

第５章の参考文献

5.1) 神戸市都市計画総局住宅部住宅政策課：すまいの耐震化促進のための建築士・生産関係者向け基礎マニュアル，104p.，2004.

5.2) すまいるネット：耐震診断事業（kekka-1703.pdf），http://www.smilenet.kobe-jk.or.jp/hojyo/taisin/index.htm，2005.

5.3) 神戸の地盤研究会：平成 14，15 年度神戸の地盤研究会成果報告書，2004.

5.4) 震災復興都市づくり特別委員会：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，1995.

5.5) 岡田成幸，高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン，日本建築学会構造系論文集, No.524，pp.65-72，1999.

5.6) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震精密診断と補強方法，建設省住宅局監修，94p.，1985.

5.7) 日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法，木造住宅の耐震精密診断と補強方法（改訂版），国土交通省住宅局建築指導課監修，364p.，2004.

5.8) 林康裕，新居藍子，森井雄史：木造軸組構法住宅の振動計測の活用に関する研究，日本地震工学会大会－2005 梗概集，pp.114-115，2005.

5.9) 鈴木祥之，中治弘行，岩井哲，北原明男：在来構法木造住宅の実大水平力載荷実験，日本建築学会構造系論文集，No.499. pp.69-76，1997.

5.10) 綿引誠，大橋好光，高間氏幹弥，中野一郎，石山央樹，佐藤栄児：実大実験に基づく木造軸組構法住宅の耐震性に関する研究，その３　各部の応答挙動と筋かいの負担力，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），Vol. C-1，pp.173-174，2000.

5.11) 山田耕司：軸組木造住宅の雑壁量と固有周期・最大地震応答変位の関係，日本建築学会構造系論文集，No.536, pp.109-114，2000.

第6章　地盤のサイト特性を考慮した建物への入力地震動評価

6.1　震源特性および伝播経路特性を考慮した広帯域地震基盤波の作成

地震動による個々の建物の動的な挙動を評価する場合，個々の建物に入力される建設地点近傍の表層地震動が適切に評価される必要がある．そこで，本節では，地震動の 1)震源特性，2)波動伝播特性，3)地盤増幅特性と，木造建物の振動周期領域が考慮されたハイブリッド法による兵庫県南部地震時の強震動評価を行った．

ハイブリッド法は理論的に長周期の波動場を求めた結果に，主として統計的グリーン関数法によって求められた短周期成分を付加する方法である．本研究では，1)工学的基盤面までの地震動を松島・川瀬[6.1)]による 3 次元有限差分法によって推定された地震動に，短周期は兵庫県南部地震の震源パラメータやスペクトル特性を反映させた統計的予測モデル[6.2)]（EMPR モデル：Earthquake Motion Prediction Ⅱ Revised Model）による推定結果を加え，2)工学的基盤から地表までの地震動の増幅については地震応答解析プログラム DYNES[6.3)](DYNamic response analysis of level ground by Effective Stress-nonlinear method)を用いて地震動推定を行った．

6.1.1　ハイブリッド合成法による工学的基盤面上の地震動推定手法の概要

これまでに「神戸の地盤研究会[6.4)]」では，4 種類の手法を用いて任意の地点における地震動推定を行い，各手法の特徴の比較を行っている．その結果，工学的基盤上は松島・川瀬による 3 次元有限差分法によって推定された地震動を用い，工学的基盤面から地表までの地震動の増幅は等価線形化手法を用いた地表面における地震動の推定結果が木造建物被害を良く説明できることを明らかにしている．松島・川瀬[6.1)]は，神戸海洋気象台の観測記録の断層直交成分(N33W)の速度波形からフォワードインバージョンにより周期 1 秒の速度パルスを含む観測波を再現できる 4 つのアスペリティからなる震源モデルを推定し，反射法地震探査結果を元に構築した三次元盆地構造モデルを用いて，有限差分法により大阪層群上面における地震動を算定している．その結果，最大速度分布について，100cm/s 以上の大振幅領域は震度 7 の分布と良く対応することを示した．三次元盆地構造モデルは，134.957°Ｅ，34.645°Ｎを原点として反時計回りに 33°傾いており，長さ 42km，幅 18km，深さ 22.8km である．また，メッシュ間隔は 80mで，Ｘ軸は右向き正，Ｙ軸は下向き正の右手系座標系である．このため，応答地震動は格子点間隔 80m毎に算出されている．ここで，有限差分法は解析対象領域内の離散化されたメッシュ交点毎に独立して物性値を入力できるため，不均質性が強い場の問題を解く場合に適しているが，適用できる周波数帯はメッシュ間隔から決定される周波数よりも低周波数側に限定される制約があり，松島・川瀬により推定された大阪層群上面における推定地震動においても周期 1 秒以下の解析精度の信頼性は低くなっている．一方，木造住宅の崩壊機構への影響を考えると，表

層地盤への入力波は木造住宅の弾性周期帯である1秒以下の短周期領域を考慮する必要がある．

ハイブリッド波形合成法は，地盤の不均質性の影響を受けにくく波動モデルで説明可能な長周期帯域の地震動を理論的に計算し，不均質性の影響を受けやすく理論的な計算が難しい場合に短周期帯域の地震動を統計的に計算する手法である．そこで，松島・川瀬[6.1]による推定地震動をベースとして，短周期帯域は杉戸ら[6.2]強震動の統計的予測モデル（EMPR モデル）を用いて波形合成を行った．この方法は，工学的基盤での強震動データからマグニチュードと距離の関数として非定常スペクトルの経験式を作り，断層をマグニチュード6相当の小領域に分割した上で，破壊伝播速度などを考慮して時間軸上で小領域からの寄与を足し合わせるものである．その結果，実際の波形を用いて小断層破壊の重ね合わせ倍率を決定することにより，スペクトル特性まで含めて兵庫県南部地震による地震動を精度良く再現できたとしている．

6.1.2　検討位置と波形合成方法

検討対象位置を図-6.1に示す．神戸市域は，表層地質の違いや兵庫県南部地震による被害の程度から，東部・中部・西部の 3 地区に大別することができる．そこで，本研究の検討対象位置は図-6.1に示すような3測線を設定した．東部地区，および中部地区における測線位置は，兵庫県によって実施された反射法地震探査測線の位置を元に設定し，西部地区については，既往の文献[6.5]を参考にした．各測線ともに測線の山側を起点としてそれぞれ 100m 毎に地震動推定点を設定した．

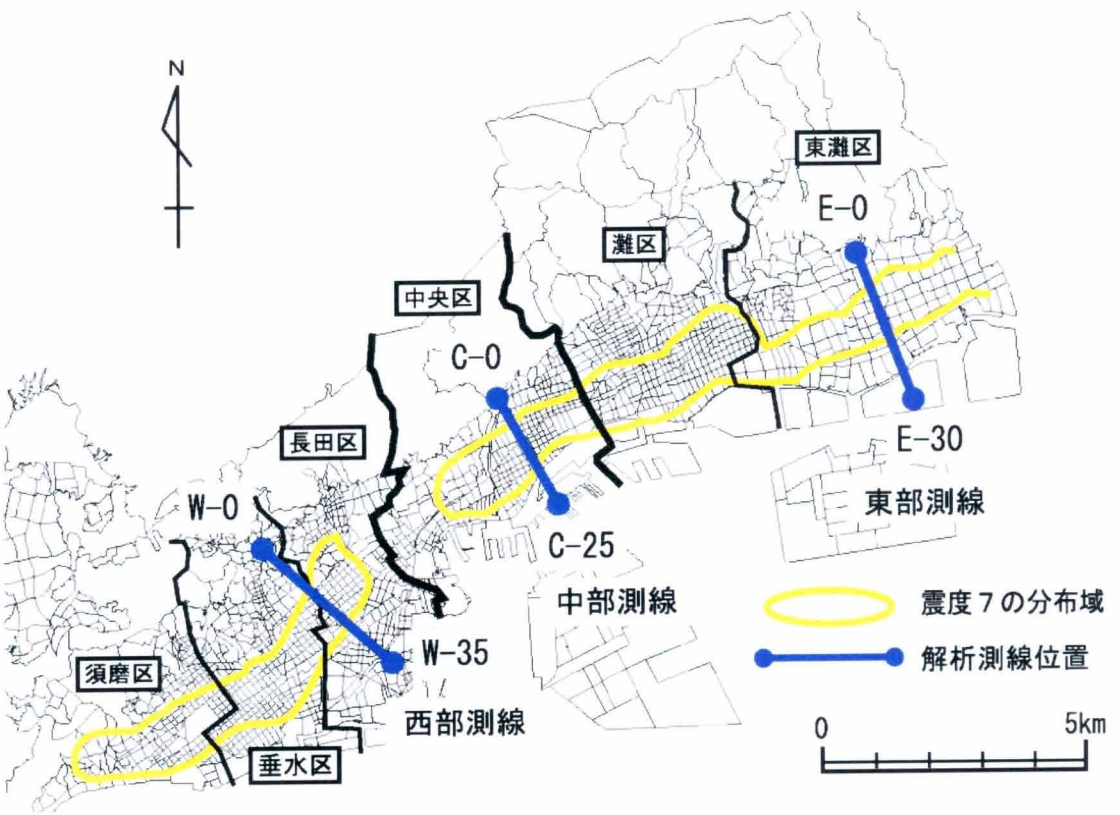
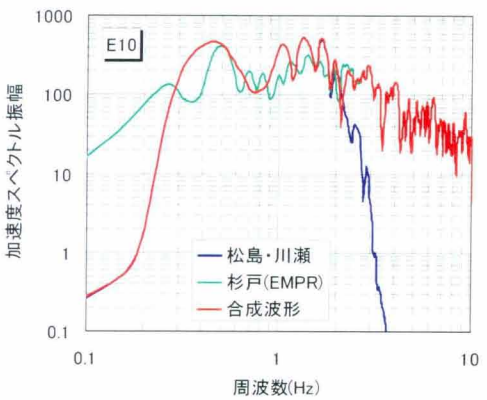
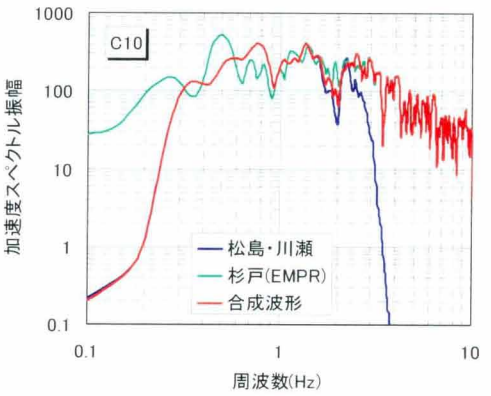


図-6.1　解析測線位置

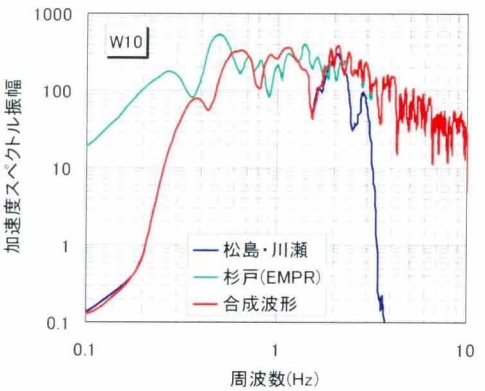
波形合成にあたっては，松島・川瀬モデルによる理論波形をベースとし，松島・川瀬モデルによる理論波形と EMPR モデルによる理論波形をスペクトル領域でスムーズに接続させることとした．そこで，まず松島・川瀬モデルによるサンプリング時間 0.05 秒の理論速度波形を，サンプリング時間 0.01 秒の加速度波形に内挿変換し，松島・川瀬モデルについてはフィルタ処理を行わず，杉戸らの EMPR モデルについては 2Hz ハイパスフィルタ処理を行い，時刻歴領域で両者を重ね合わせた．各測線の代表測点における地震動の原波形と合成波形の加速度フーリエスペクトル振幅を図-6.2(a)～(c)に示す．



(a)　測点 E-10（東部測線）



(b)　測点 C-10（中部測線）



(a)　測点 W-10（西部測線）

図-6.2　原波形と合成波形の加速度フーリエスペクトル振幅

6.2　表層地盤の増幅特性を考慮した地震動シミュレーション

前節で得られた工学的基盤上におけるハイブリッド合成波形を入力地震動として，浅層地盤(沖積層・段丘相当層)を対象に逐次積分法による非線形解析手法により地震応答解析を行った．解析プログラムは DYNES を用いた．この手法は微小時間ごとに逐次地盤の変形を解析しながら計算する手法であり，一般的には等価線形化手法に比較して大きな歪レベルまで精度良く計算できる特徴がある．

(1)　解析モデルの概要

浅層地盤モデルは，既往文献[6.6)]の地盤モデルを用いた．この地盤モデルは測線下の２次元的な浅層地盤状況を把握するため，地盤情報データベース「神戸 JIBANKUN」[6.7)]に収録されているボーリングデータ及び既往の文献[6.8)]を参考として作成された浅層地盤断面図から構築されている．浅層地盤の地層は，沖積砂層(As)，沖積礫層(Ag)，沖積粘土層(Ac)，沖積海成粘土(Ma13)，段丘砂層(Ds)，段丘礫層(Dg)，段丘粘土層(Dc)，段丘海成粘土層(Ma13)，盛土・埋立土(F)，大阪層群砂層(Os)，大阪層群礫層(Og)，大阪層群粘土層(Oc)の 12 層に分類されている．なお，既往文献[6.6)]では洪積層としているものを，ここでは段丘相当層として読みかえている．浅層地盤断面図を図-6.3(a)～(c)に示す．各測線の特徴は以下のとおりである．

東部測線については，沖積層は地表面地形傾斜の変換点付近(E13)から断面右側（以下，海側とする）にかけて砂層が厚く堆積する．この砂層は，この地域に特徴的な海浜性の砂層であり，青木砂層と呼ばれているものである．沖積粘土層は，E2～E14 の陸域に薄く分布している．一方，E23 付近から海側には海成の沖積粘土(Ma13)が層厚 10m 前後で分布する．沖積層の下位には段丘相当層が分布する．上位より段丘礫層，段丘砂層が分布し，E8 付近より海側においては，さらに下位に Ma12 が分布する．

中部測線については，沖積層は C3 より断面左側（以下，山側とする）及び C15 より海側では砂層が分布する．これらの堆積物は生田川によって形成された河川性堆積物と氾濫堆積物であると考えられる．沖積粘土層は C11 付近で地表に現れている以外は，ほとんど確認できない．段丘相当層は，沖積層と同様に C15 付近より山側では礫層が，C15 付近より海側では砂層が主体となっている．Ma12 は C15 より海側に行くに従い厚く分布する．

西部測線については，山側では断層の影響により大阪層群が隆起しており，急角度に傾斜している．W10 付近より山側では沖積層の厚さは 2m 程度である．W15 付近より海側では，沖積層が層厚 15～20m で分布し，海側に行くに従い厚くなる．W10～W22 では砂層が主体であり，W22 より海側では表層 10m 付近に礫層が分布する．この礫層は長田礫層と呼ばれ，この地域に特徴的なものとなっている．Ma13 は W33 付近より海側に層厚 5～10m で分布する．段丘相当層については，砂層と礫層が混在して分布する．Ma12 は W23 付近より海側に行くに従い厚く分布する．

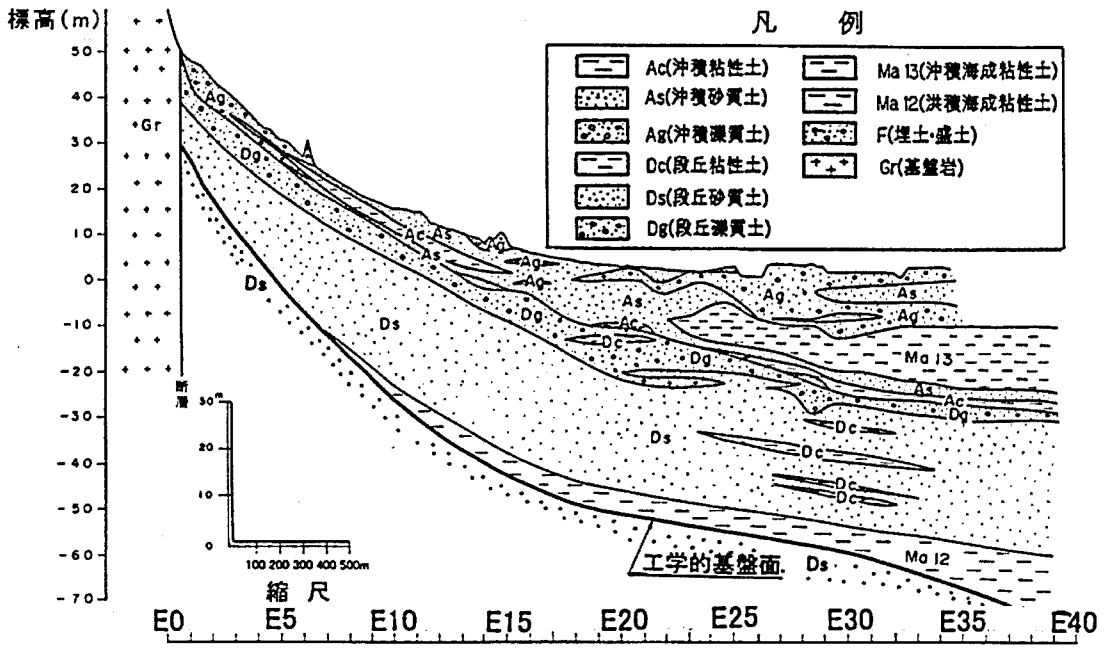


図-6.3(a)　浅層地盤断面図（東部測線）

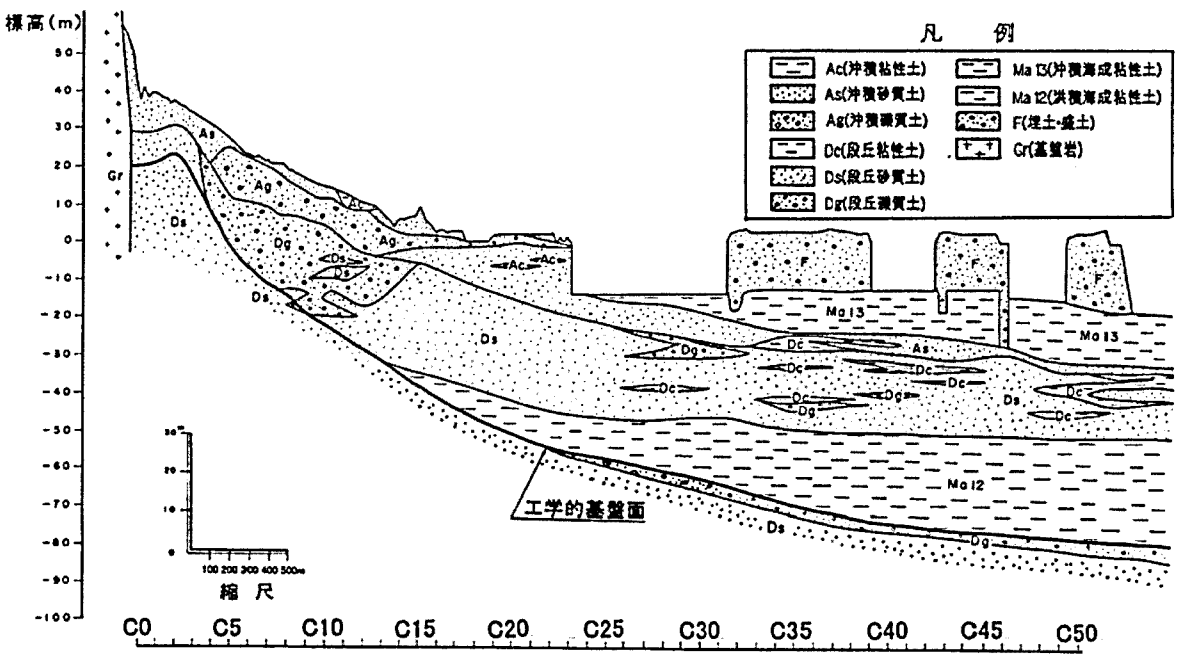


図-6.3(b)　浅層地盤断面図（中部測線）

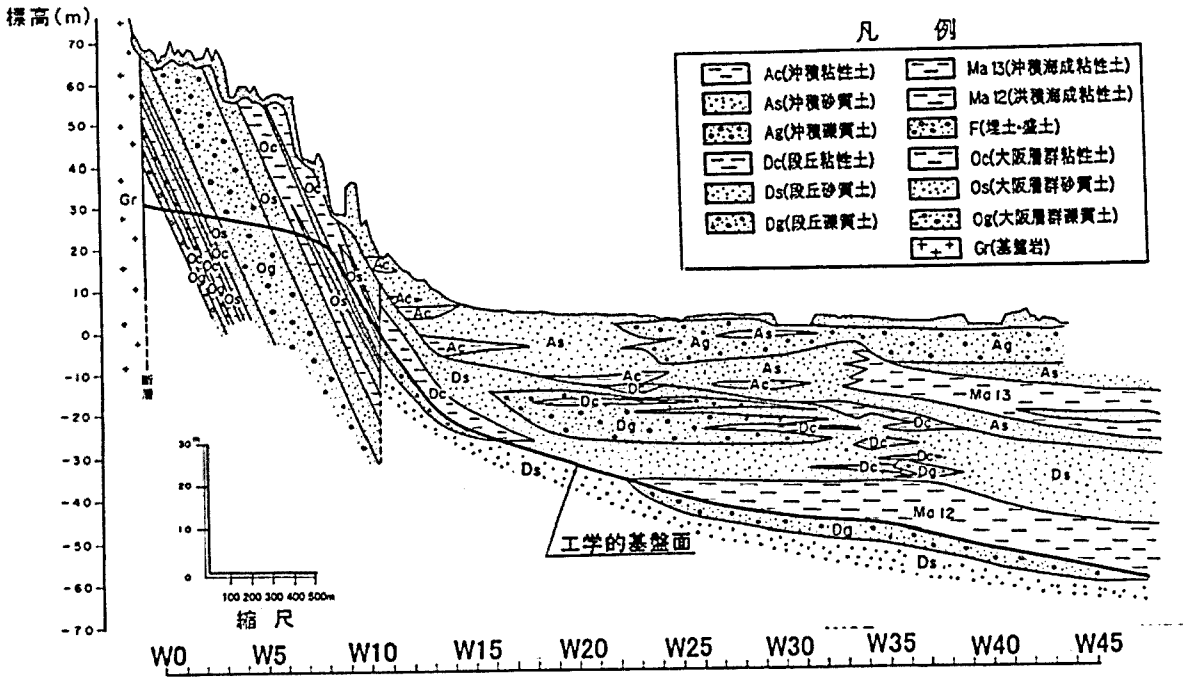


図-6. 3 (c)　浅層地盤断面図（西部測線）

(2)　物性値の設定

既往文献[6.6)]に基づき工学的基盤を設定した．工学的基盤は，Ma12 が分布する範囲では Ma12 の直下に，Ma12 が分布しない範囲では N 値 60 以上に設定している．

地震応答解析プログラム DYNES に必要な主な物性値は，①層種，②層種別の層厚(m)，③単位体積重量(kN/m^3)，④せん断波速度(m/s)である．以下に，それぞれの決定方法及び値を記す．

①層種

図-6.3(a)～(c)に示す地質断面図から推定した．

②層種別の層厚(m)

図-6.3(a)～(c)に示す地質断面図から推定した．

③γ_t：単位体積重量(kN/m^3)

既往の研究 6.6)を参考に設定した．

④V_S：せん断波速度(m/s)

既往の研究 6.6)では，各測線を中心とした約 2km 幅に分布するボーリングデータの N 値から，表-6.1 に示す換算式を用いて測点ごとに各層のせん断波速度を求め，地盤モデルを作成している．本研究ではこの地盤モデルを用いた．参考のために，各地区，各地層の平均 N 値，平均 Vs，単位体積重量を表-6.2 に示す．参考に深度毎に設定した．

表-6.1　各地層のN値とせん断波速度の関係[6.6)]

$Vs=A\times N^B$		係数A	係数B
Ac	沖積粘土層	87	0.372
As	沖積砂層	106	0.231
Ag	沖積礫層	103	0.205
Dc	段丘粘土層	102	0.362
Ds	段丘砂層	175	0.171
Dg	段丘礫層	241	0.099
Ma13	沖積粘性土層	150	0.157
Ma12	段丘粘性土層	183	0.142
F	盛土・埋立土層	141	0.129

表-6.2　各地層の平均物性値[6.6)]

層種		西部地区		中部地区		東部地区		平均
		平均N値	平均Vs(m/s)	平均N値	平均Vs(m/s)	平均N値	平均Vs(m/s)	γ_t (kN/m³)
Ac	沖積粘土層	11	212	9	197	11	212	16.66
As	沖積砂層	25	223	23	219	23	219	17.64
Ag	沖積礫層	39	218	42	222	33	211	18.13
Dc	段丘粘土層	22	312	23	317	23	317	18.13
Ds	段丘砂層	43	333	42	332	45	336	19.11
Dg	段丘礫層	54	358	50	355	52	356	19.60
Ma13	沖積粘土層	10	215	3	178	3	178	16.17
Ma12	段丘粘土層	18	276	16	271	14	266	16.66
F	盛土・埋立土層	11	192	17	203	11	192	18.13
Oc	大阪層群粘土層	30	349※1)	26	332※1)	41	391※1)	18.13※2)
Os	大阪層群砂層	48	339※1)	51	343※1)	59	351※1)	19.11※2)
Og	大阪層群礫層	52	356※1)	39	346※1)	43	350※1)	19.60※2)

※1：大阪層群のVsについては，段丘層のN値からVsへの換算式を用いた．

※2：大阪層群のγ_tについては，段丘層の値を用いた．

(3)　地震応答解析結果

第 3 章において設定した地震力指標である最大地動速度(以下，PGV と称す)の分布を図-6.4(a)～(c)に示す．各測線における PGV のピーク値は，東部測線で 152kine，中部測線で 148kine，西部測線で 112kine である．東部測線では，「震災の帯」に該当する算定点(E-6～E-17)で PGV は顕著なピークを示しており，また東部測線に比較すると顕著ではないが，中部測線，西部測線においても「震災の帯」に該当する算定点（C-6～C-14，W-7～W-22）の間で PGV は大きな値を示す傾向がある．なお，西部測線付近で観測された地震動の PGV は，JR 鷹取駅で約 127kine[6,9]（EW 方向）であり，本研究で求めた地表面の PGV 分布に近い記録が得られている．

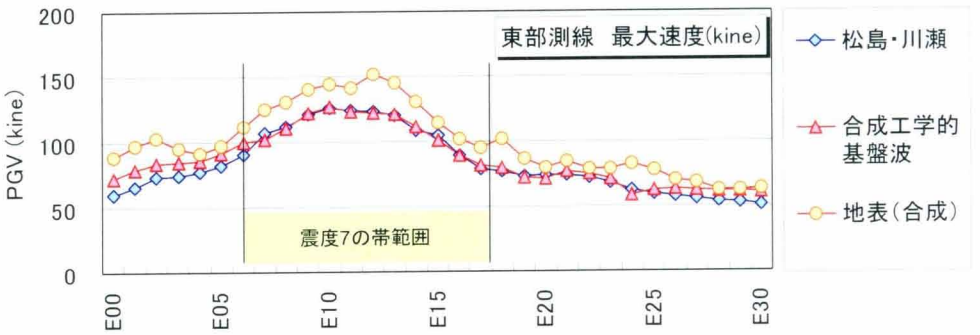


図-6. 4 (a)　推定 PGV の分布（東部測線）

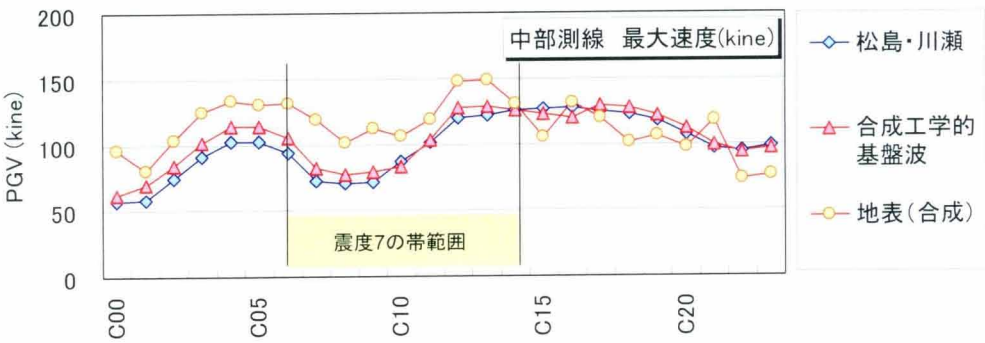


図-6. 4 (b)　推定 PGV の分布（中部測線）

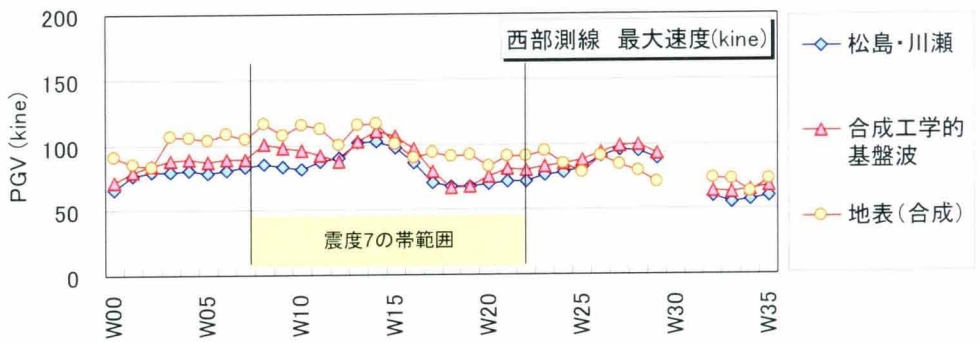


図-6. 4 (c)　推定 PGV の分布（西部測線）

図-6.4(a)～(c)に，工学的基盤面における松島・川瀬[6.1)]による推定 PGV 分布およびハイブリッド合成波形から得られた PGV 分布を併せて示す.

東部測線について，工学的基盤波については，松島・川瀬モデルとハイブリッド合成波形に大きな差異はみられない．中部測線について，工学的基盤波についてはハイブリッド合成波形の方が松島・川瀬モデルより少し大きい．西部測線について，工学的基盤波については中部測線と同様にハイブリッド合成波形の方が松島・川瀬モデルより少し大きい値を示した.

6.3　最大速度に着目した推定地震動の検証

本節では，解析測線上で推定した最大地動速度（PGV）に着目して，建物被害，および人的被害と比較を行うことにより地震動推定の妥当性の検証を行う．

6.3.1　被害関数を用いた建物被害推定に基づく最大速度の検証

本項では，第3章，4章で構築した木造建物の層破壊被害関数を用いて，地震動推定結果から求められたPGVを入力することにより得られた被害分布について考察する．建物情報は神戸市保有データを用いた．地震動推定手法は，第4章で東灘区の実層破壊数を精度良く推定することができた，林ら[6.10]による建物被害から逆算して求められたPGVと本研究におけるPGVを用いた．ここで，被害推定を行うにあたり，次項において死者の発生を推定するため，戸建住宅，共同住宅，長屋住宅のそれぞれの層破壊数を算定して総計した．使用した被害関数は，戸建住宅は第3章3.4節の図-3.26の建築年代を考慮した層破壊被害関数である．共同住宅はデータ数が不足しているため，第3章3.4節の表-3.10の回帰係数を用いて評価し，建築年代は考慮されていない．長屋住宅は西宮市における層破壊発生率が戸建住宅をほぼ等しかったことから戸建住宅の被害関数を準用した．図-6.5(a)～(c)に各測線毎の測点における推定層破壊数を示す．

図-6.5(a)の東部測線について，本研究による層破壊数がやや少ない傾向があるものの，大きな相違は見られず，震災の帯域で大きな被害が発生していたことを精度よく推定できている．

図-6.5(b)の中部測線について，東部測線や西部測線に比較すると層破壊被害数は少ない．これは，木造建物の存在数が少ない影響によるものである．また，本研究による層破壊数がやや多い測点が存在している．

図-6.6(c)の西部測線について，本研究によるPGV分布には明瞭な震災の帯が確認できなかったが，総合的な耐震性能指標と考えられる建築年を考慮することにより，明瞭な帯域が再現できている．ただし，林らによるPGVを入力した場合に比較して層破壊数が少ない傾向が見られた．

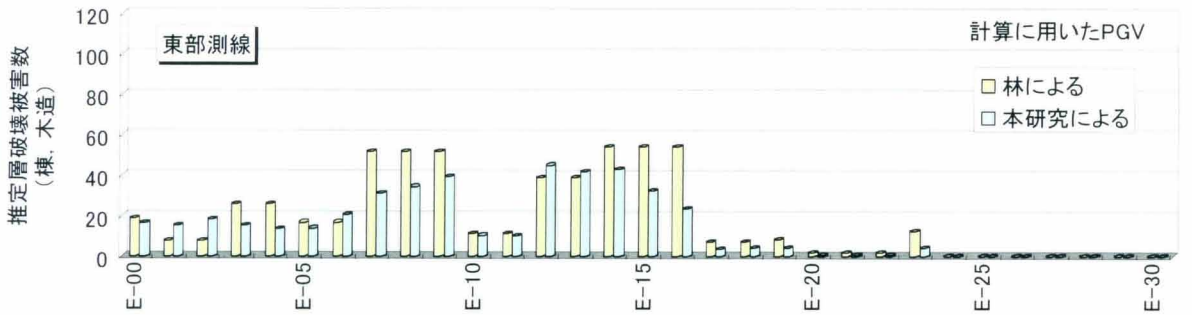


図-6.5(a)　木造建物の推定層破壊数（東部測線）

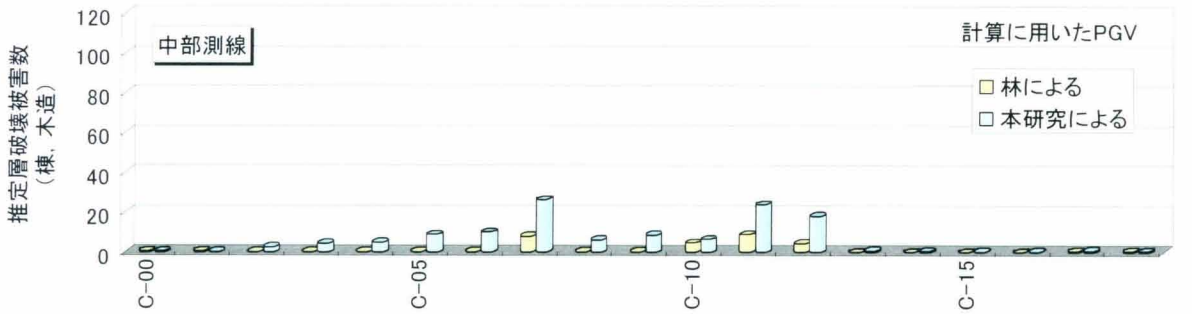


図-6.5(b)　木造建物の推定層破壊数（中部測線）

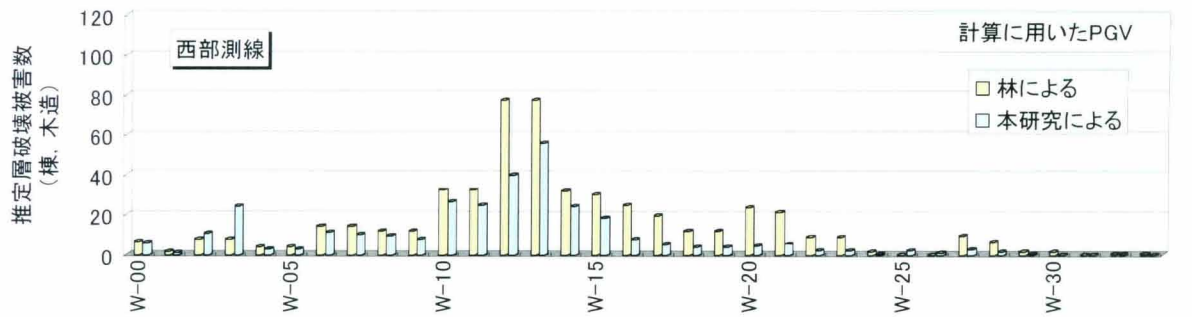


図-6.5(c)　木造建物の推定層破壊数（西部測線）

6.3.2　死者発生数の推定に基づく最大速度の検証

(1) 建物損傷度と死者発生率の関係

前項において層破壊被害数を推定した結果，西部測線において本研究による PGV を用いた場合，推定数が少ない傾向が得られた．しかし，西部測線では層破壊被害に関する調査は実施されていないため，実建物被害との比較は難しい．そこでここでは，建物被害から死者数を求め，実際の死者数との比較を行い，地震動推定から得られた PGV の妥当性を検証する．

まず，西宮市におけるデータベース[6.11)]を用いて，建物損傷度と死者発生率の関係を分析した．表-6.2 および図-6.6 に木造の戸建住宅，長屋建住宅および共同住宅について，分析結果から求められたそれぞれの建物損傷度別死者発生率を示す．死者発生率は次式を用いて算定している．

$$ {}_{(Bt,Dl)}R_f = \frac{N_d}{N_b \times N_f \times N_p} \tag{6.1} $$

ここに，${}_{(Bt,Dl)}R_f$ は建物種別および損傷度ごとの損傷率であり，Bt は建物種別，D_l は損傷度，Nd は損傷度ごとの死者数，Nb は損傷度ごとの建物数，Nf は建物種別毎の世帯数，Np:建物種別毎の世帯人数である．建物種別は建物数が多い一戸建住宅，共同住宅，長屋建住宅の 3 種類を考慮した．

図-6.5 に示すようにどの建物種別においても建物損傷度が大きくなると死者発生率も高くなる傾向が得られ，特に層破壊建物における死者発生率が高いことが明らかとなった．したがって層破壊を考慮することにより，どこにどの程度の死者が発生するのか，その予測精度の高度化が期待できると考える．

表-6.2　西宮市における建物種別および建物損傷度別の死者発生率

建物種別(木造)	損傷度 (ダメージグレード)	D0	D1, D2	D3	D4	D5以上 (層破壊)
一戸建住宅	建物数(棟)	2452	1885	377	566	523
	死者数(人)	0	3	3	6	126
	1棟あたりの世帯数(世帯)	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13
	1世帯あたりの人員数(人)	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
	死者発生率(%)	0.00	0.05	0.27	0.36	8.17
共同住宅	建物数(棟)	133	128	56	76	113
	死者数(人)	3	0	0	4	68
	1棟あたりの世帯数(世帯)	6.26	6.26	6.26	6.26	6.26
	1世帯あたりの人員数(人)	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
	死者発生率(%)	0.14	0.00	0.00	0.32	3.70
長屋建住宅	建物数(棟)	29	28	12	19	8
	死者数(人)	0	0	0	1	1
	1棟あたりの世帯数(世帯)	3.55	3.55	3.55	3.55	3.55
	1世帯あたりの人員数(人)	2.60	2.60	2.60	2.60	2.60
	死者発生率(%)	0.00	0.00	0.00	0.57	1.36

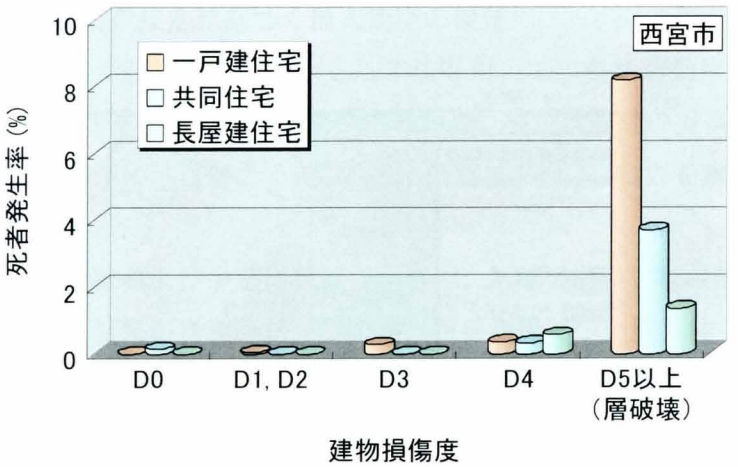


図-6.5　建物種別および建物損傷度別の死者発生率（西宮市）

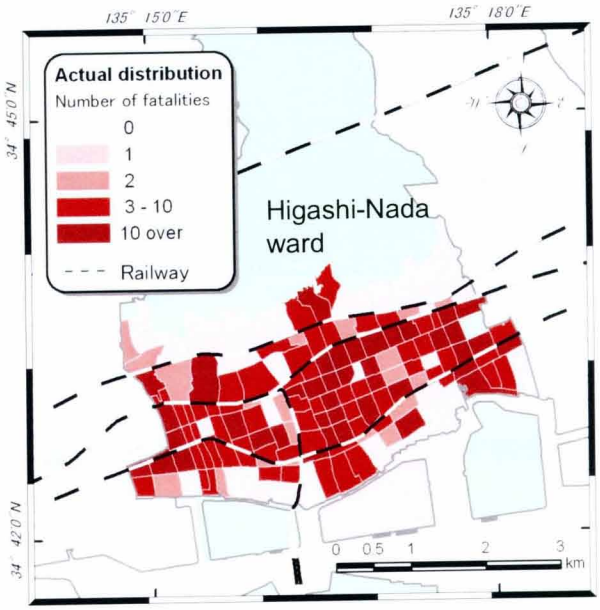
(2) 神戸市東灘区における死者発生分布の推定

上記の検討結果に基づいて，第 4 章の検討で被害関数の適用性が確認されている神戸市東灘区において兵庫県南部地震による死者発生分布の推定を行い，死者発生の推定精度の確認を行った．東灘区では 1,338 人の直接死が報告されているが，推定結果と比較検証を行うために使用した死者データは兵庫県による 1,219 件の検屍データを GIS 上に統合したものを用いた．推定はまず，1)被害関数を用いて建物種類毎の損傷度別被害建物数を求め，2)その建物に居住者数を推定し，3)死者発生への影響度が高い半壊(D3)以上について，建物損傷度別の死者発生率を居住者数に乗じて町丁目単位の死者数を推定した．なお，居住者数は地震発生時刻が早朝だったことを考慮して全ての人が在宅していたと仮定した．表-6.3 に算定条件と結果を示す．PGV は林ら[6.14)]による推定地震動を用いた．東灘区における推定死者数は 1,195 人であり，兵庫県南部地震による木造建物の被害を要因とした死者数の 1,196 人を良く推定できている．また，図-6.6(a)に実際の死者の分布を図-6.6(b)に推定した死者の分布を示すように，死者の発生範囲を精度良く推定した．

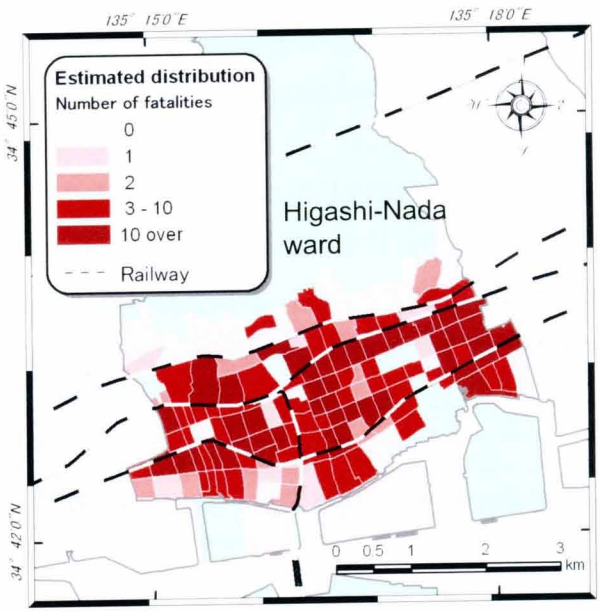
表-6.3　西宮市における建物種別および建物損傷度別の死者発生率

建物種別	被害関数を用いた推定建物被害数（損傷度別，棟）			一棟あたりの世帯数（世帯）	一世帯あたりの人員数（人）	死者発生率（%）			推定死者数		実際の死者数	実際の死者数から推定した木造建物被害による死者数 *
	D3	D4	D5以上			D3	D4	D5以上	建物種別毎	計		
一戸建住宅	1,272	3,892	3,466	1.26	2.32	0.27	0.36	8.17	878	1,195	1,338	1,196
共同住宅	59	311	421	6.26	2.32	0.00	0.32	3.70	241			
長屋建住宅	87	320	548	3.55	2.32	0.00	0.57	1.36	76			

* 糸井川[6.12)]は多くの死者が発生した 2 階以下の低層建物において，89.4%は木造建物で発生したと報告しており，その関係式を用いて推定した．



(a)　実際の死者発生分布



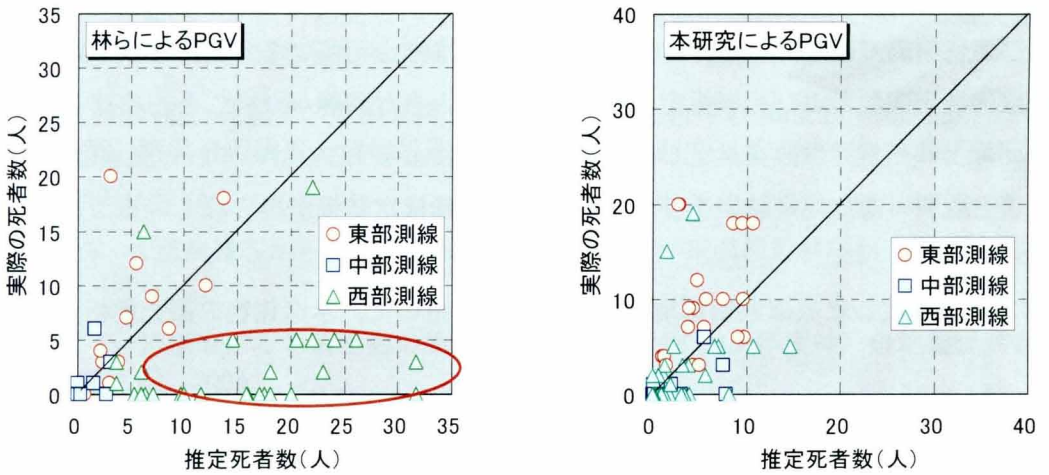
(b) 推定死者発生分布

図-6. 6　神戸市東灘区における死者推定結果

(3) 解析測線における死者数推定に基づく最大速度の検証

東灘区において精度良く死者発生を推定した手法を用いて，各地震動推定手法から求められたPGVを入力することにより得られた死者推定数から．推定地震動の妥当性を確認する．PGVは前節における検討と同様に林らによるPGVと本研究におけるPGVを用いた．各推定結果を図-6.7(a)～(b)に示す．

結果にについて東部測線および中部測線については，3種類のいずれの推定PGVを用いた場合においても良好な推定結果が得られた．しかし，西部測線について，林らによる推定PGVを用いた場合は大きな推定値を与えた．この要因として林らの推定PGVは，建物用途は考慮されているが，建築年は考慮されておらず，建物の耐震性が十分に反映されていないことが考えられる．堀江[6.13]は，神戸市街地の建物特性として神戸市兵庫区や長田区は他の区に比較して1945年以前の戦前・戦中期や1946年～1955年の戦後復興期に建設された古い建物が多く存在し，戦前の建物が兵庫区で約25%，長田区で約30%を占め，戦後復興期の建物は兵庫区で約24%，長田区で約10%を占めていたことを明らかにしている．したがって，建物の耐震性が低いために大きな被害が発生したが，その結果，被害から地震動を逆算する際に大きな地震動を推定した可能性がある．また，本研究によるPGVはいずれの測線においても良好な推定結果を与え，最大速度に着目する限りは，妥当な地震動推定結果が得られている．



(a) 林ら[6.10]によるPGVに基づく死者推定　(b) 本研究によるPGVに基づく死者推定

図-6.7　地震動推定および被害関数を用いた建物被害から推定された死者人数と実被害の比較（測線毎）

6.4 まとめ

本章では，地震動による個々の建物の動的な挙動を評価するために，建設地点において，1)震源特性，2)波動伝播特性，3)地盤増幅特性を考慮し，かつ木造建物の振動周期領域が考慮されたハイブリッド合成法による兵庫県南部地震時の表層地震動の推定を行った．その結果，得られた知見を以下に示す．

1) 工学的基盤面までの地震動を長周期帯は 3 次元有限差分法によって推定された地震動に，短周期帯は兵庫県南部地震の震源パラメータやスペクトル特性を反映させた統計的予測モデルによる推定結果を合成し，工学的基盤から地表までの地震動の増幅については非線形解析手法を用いて設定した解析測線上の地震動推定を行った．
2) 地表面の最大速度(PGV)に着目して， a)被害から逆算された PGV と，b)本研究において推定した PGV と，本研究で構築した被害関数を用いて，設定された 3 つの解析測線上で建物被害分布を推定した結果，建築年という総合的な耐震性能指標を考慮することにより，PGV 分布では確認できなかった建物被害の大きい震度 7 の帯域を精度良く推定可能であることを明らかにした．
3) 西宮市における建物種別および損傷度別の死者発生率を算定した．
4) 西宮市における死者発生率を用いて，東灘区の死者数および死者発生分布を建物種別および建物損傷度に基づいて推定した結果，良好に推定可能であることを示した．
5) 建物被害関数および死者推定手法の適用性に大きな問題がないことを確認した上で，解析測線上の死者発生数を推定した結果，本研究による PGV はいずれの測線においても実被害を説明可能な推定結果を与え，妥当な地震動推定結果が得られていることを確認した．

次章では，推定した兵庫県南部地震の再現波形を用いて，木造建物の振動解析を行う．

第６章の参考文献

6.1) 松島信一，川瀬博：1995 年兵庫県南部地震の複数アスペリティモデルの提案とそれによる強震動シミュレーション日本建築学会構造系論文集，第 534 号，pp.33-40，2000.

6.2) 杉戸真太，古本吉倫，梅原秀鉄：強震動予測モデル(EMPR)による兵庫県南部地震のシミュレーション，第３回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.171-174，1998.

6.3) 吉田望：A computer program for dynamic response analysis of level ground effective stress-nonlinear method，Version 2.41，2003.

6.4) 神戸の地盤研究会：平成 14，15 年度神戸の地盤研究会成果報告書，2004.

6.5) 兵庫県立人と自然の博物館：阪神・淡路大震災と六甲変動，兵庫県南部地震の活断層調査報告，pp.1-9，1997.

6.6) 神戸の地盤研究会：研究成果報告書　中間とりまとめ，2002.

6.7) 沖村孝，田中泰雄，大星直樹，鳥居宣之：地盤情報データベースとＧＩＳの活用による都市災害および都市開発の検討，土と基礎，48 号，pp.27-29，2000.

6.8) 応用地質株式会社：兵庫県南部地震による地震動解析入力データの作成業務委託報告書，197p.，2000.

6.9) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会，日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会：1995 年兵庫県南部地震強震記録資料集，265p.，1996.

6.10) 林康裕，宮腰淳一，田村和夫：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, No.502, pp.61-59, 1997.

6.11) 堀江啓，田中聡，牧紀男，東田光裕，林春男：災害における Built Environment データベースの構築と防災への活用，情報処理学会・人文科学とコンピュータシンポジウム論文集，pp.275-282，2001.

6.12) 糸井川栄一：建物被害からみた人的被害のマクロ分析，東濃地震科学研究所報告, Seq. No.2, pp.1-11, 1997.

6.13) 堀江啓（分担執筆）：木造建物の地震時挙動，平成 14，15 年度神戸の地盤研究会成果報告書，第 3 編，2004.

第7章　応答解析に基づく木造建物の地震被災危険度評価

本章では，応答解析に基づく木造建物の地震被災危険度評価手法を確立するために，1）木造建物群の推定を行い，木造建物群の構造特性および振動特性を考慮した振動解析モデルを構築して，2）地震応答解析により最大応答変形角と建物損傷度の関係について検討を行う．

7.1　応答解析に基づく地震被災危険度評価手法

はじめに地震被災危険度評価手法の概要を説明する．図-7.1 に評価の流れを示す．まず，第 5 章から得られた常時微動計測に基づく固有周期を用いて木造住宅群のモデル化を行う．木造建物群のモデル化は，在来軸組構法による 2 階建ての住宅を対象として，1）常時微動から得られた固有周期の分布を考慮したモデル，および2）固有周期の分布を考慮したモデルに耐震診断結果から得られた木造住宅の構造特性の分布を考慮したモデル，の 2 種類を構築する．構築した木造住宅群について，建物 1 棟毎に与えられた固有周期から第 5 章 5.4 節の(5.7), (5.8), および(5.11)式を用いて地震応答解析の主要なパラメータとなる降伏時の層せん断力係数を推定する．その層せん断力係数をパラメータとした復元力特性を設定し，2 質点せん断型の振動解析モデルを構築する．構築した解析モデルを用いて木造建物群の建物 1 棟毎に，第 6 章の結果から得られた地盤のサイト特性を考慮した地震動を入力して地震応答解析を行い，最大応答変形角を求める．求められた最大応答変形角について，最大応答層間変形角と建物損傷度の関係を設定して被害発生の有無を判定し，被害の棟数比によって被害率を算定する．この被害率と第 3 章および第 4 章において構築した損傷度別被害関数を用いて，最大応答変形角と建物損傷度との関係を考察する．

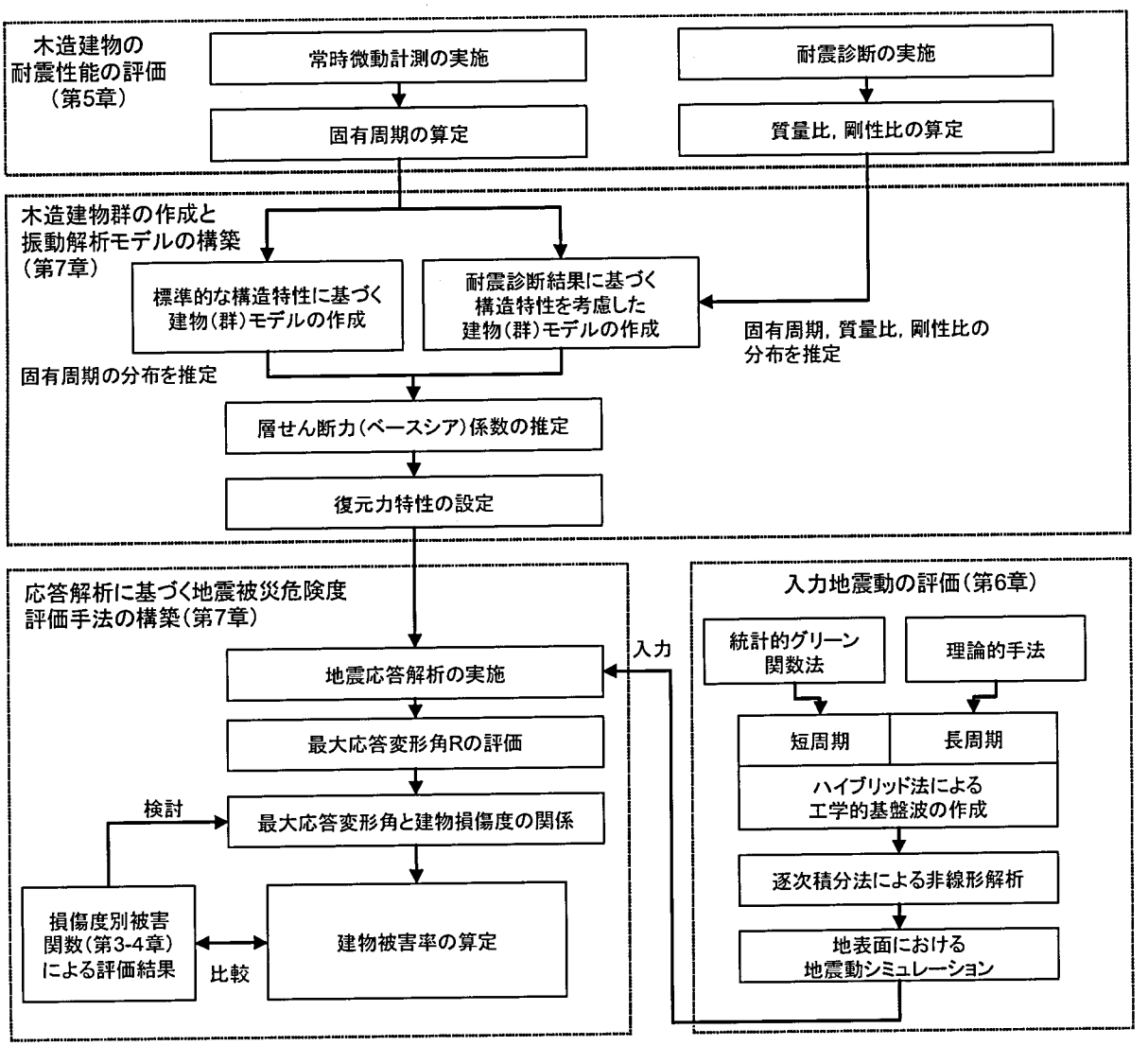


図-7.1　応答解析に基づく地震被災危険度評価の流れ

7.2　耐震性能を考慮した木造建物の振動解析モデルの設定

本節では第 5 章において動的な振動特性として得られた常時微動に基づく固有周期を利用して，1）固有周期から推定される降伏時の層せん断力係数のみを考慮した簡易的な振動解析モデルと，2）耐震診断から得られた構造特性情報を考慮したモデルを設定する．

7.2.1　標準的な構造特性に基づく解析モデルの構築

まず，常時微動計測による固有周期を基に振動解析モデルを構築する．すなわち，木造建物群モデルは固有周期の分布のみを考慮して構築し，その他の解析パラメータである階高，2 層の質量比，剛性比は統計データなどを参考に，標準的な 2 階建てを想定して固定値として設定する．本研究では兵庫県南部地震を対象として建物応答に関する解析が行われた既往の研究[例えば 7.1), 7.2), 7.3)]を参考にして，図-7.2 のような 2 質点型の振動解析モデルを設定した．1 階，2 階の高さは 3m と 2.7mとし，質量比は 4：3，2 層部の剛性は 1 層部の 0.75 倍である．

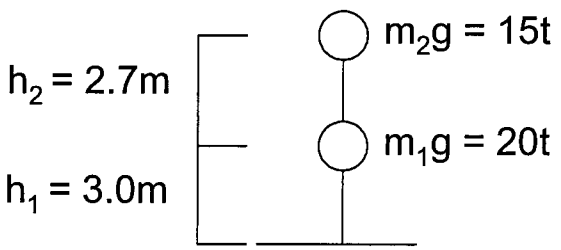


図-7.2　2 質点せん断型モデル

木造建物群のモデルを設定するための固有周期の分布は，比較的多くの常時微動データが得られた 1972 年～1981 年の建物を対象とし，第 5 章において表-5.1 に示した住宅 18 棟をランダムサンプルとして扱い，対数正規分布を仮定して固有周期の平均値λと標準偏差ζを求め推定した．建物群の建物総数を 200 棟として対数正規乱数を発生させ，得られた固有周期の分布を図-7.3 に示す．また，図-7.3 には強軸方向と弱軸方向についてλとζの値を示している．結果として，固有周期について，弱軸方向は 0.124 秒～0.287 秒，強軸方向は 0.077～0.239 秒に分布する建物群を作成した．この建物群をモデル A と設定する．

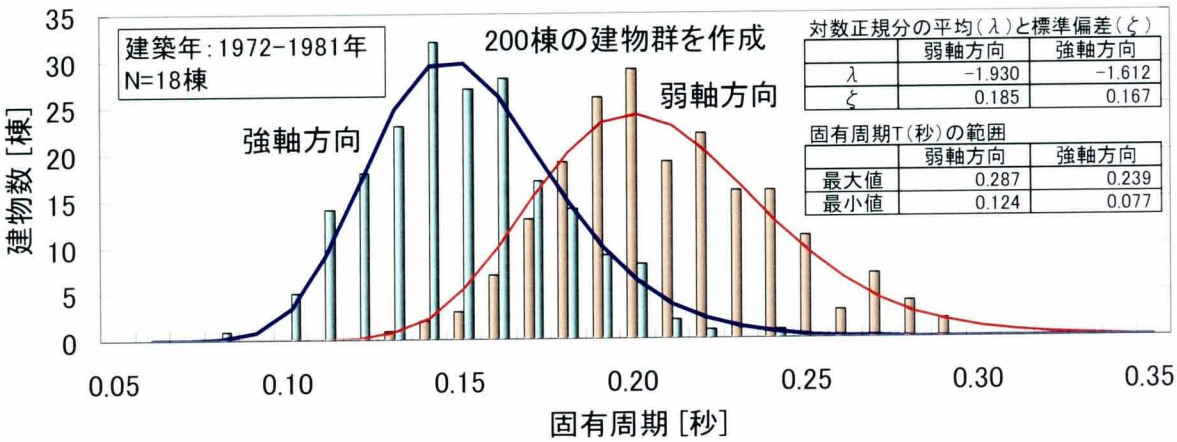


図-7. 3　木造建物群の固有周期の分布の推定

復元力特性は図-7.4 に示すように設定した．この復元力特性は層間変形角 1/120rad 時の降伏耐力 P_y を 1.0 とした規準化復元力に対し，鈴木ら [7.1)] による実在の木造住宅を対象に実施した静的水平力載荷実験を参考にして，トリリニア型履歴特性とスリップ型履歴特性の複合型とした．トリリニア型の第 1 折点は層間変形角 1/120rad 時とし，負担比率は 0.4 とした．第 2 折点は 1/30rad に設定して，耐力は 1/120rad 時の 1.5 倍と設定した．スリップ型の第 1 折点は 1/120rad としている．ここで，降伏耐力 P_y は建物重量 Mg と降伏時の層せん断力係数 C_y の積で求められる．

層せん断力係数 C_y は構築した建物群モデルの固有周期を基に第 5 章 5.4 節の(5.7)，(5.8)および(5.10)式を用いて，1 棟毎に算定した．この算定において，常時微動に基づく降伏時の層間変形角 R_0 は 5 章と同様に 1/1,000rad とした．推定の結果，設定したモデル群において，弱軸方向の 1 層の C_y は 0.19～1.05 となった．この値と，5 章の図-5.30(a)に示した関係を用いて，一般診断に基づく 1 層のベースシア係数に対する倍率を推定すると 1.05～2.94 となる．この値がいわゆる雑壁効果に相当することになる．既往の実験結果 [7.4), 7.5)] からは，この雑壁効果は 2 倍～3 倍程度と報告されている．弱軸方向に関して推定結果は概ね妥当な数値を与えており，この値を用いて解析を行う．一方，強軸方向も同様に求めると，1 層のベースシア係数は 0.28～2.71，一

般診断に基づくベースシア係数に対する推定倍率は 1.24～6.61 となった．強軸方向の最大倍率は約 6 倍と大きい値となったが，雑壁効果に関してとくに強軸方向は十分な知見が得られておらず，本解析ではこの値に補正などは行わず，そのまま用いて解析を行うこととした．

減衰は剛性比例型とし，5 章における常時微動計測結果の平均が約 4%であったことを考慮して，1 次モードの臨海減衰比を 5%とした．

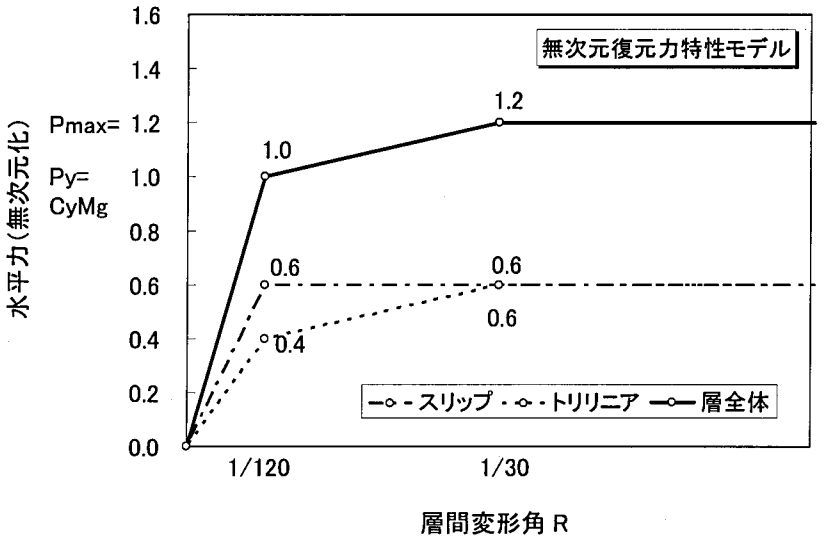


図-7. 4　規準化復元力特性モデル

7.2.2　耐震診断結果に基づく構造特性を考慮した解析モデルの構築

木造住宅の動的な挙動を正確に予測するためには，建物の構造的な特性を把握する必要がある．本項では，耐震診断結果から得られた質量比 R_m と剛性比 α を建物モデルに組み込み解析を行う．なお，階高については十分なデータが得られなかったため，図-7.2 のモデルと同じ高さを用いることとした．

R_m と α の分布は表-5.1 に示した住宅 18 棟から確率密度分布を設定して推定する，ここで R_m と α について相関分析を行うと相関係数は弱軸方向が 0.825，強軸方向は 0.842 と高いため，2 変量対数正規分布を仮定した．$\ln(R_m)$ と $\ln(\alpha)$ の平均値を λ_{Rm}，$\lambda\alpha$，標準偏差を ζ_{Rm}，$\zeta\alpha$，2 変数の相関係数を ρ とおくと，2 変量正規確率密度関数 $P(\ln(Rm), \ln(\alpha))$ は次式[7.6)]で表される．

$$P(\ln R_m, \ln\alpha) = \frac{1}{2\pi \cdot \xi_{R_m} \cdot \xi_\alpha \sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{1}{2}Q(\ln R_m, \ln\alpha)} \tag{5.8}$$

$$Q(\ln R_m, \ln\alpha) = \left\{ \frac{1}{(1-\rho^2)} \times \left[\left(\frac{\ln R_m - \lambda_{Rm}}{\xi_{R_m}} \right)^2 - \frac{2\cdot\rho}{\xi_{R_m} \cdot \xi_\alpha} (\ln R_m - \lambda_{Rm})(\ln\alpha - \lambda_\alpha) + \left(\frac{\ln\alpha - \lambda\alpha}{\xi_\alpha} \right)^2 \right] \right\} \tag{5.9}$$

上式により求められた弱軸方向に関する R_m と α の分布を図-7.5 に示す，

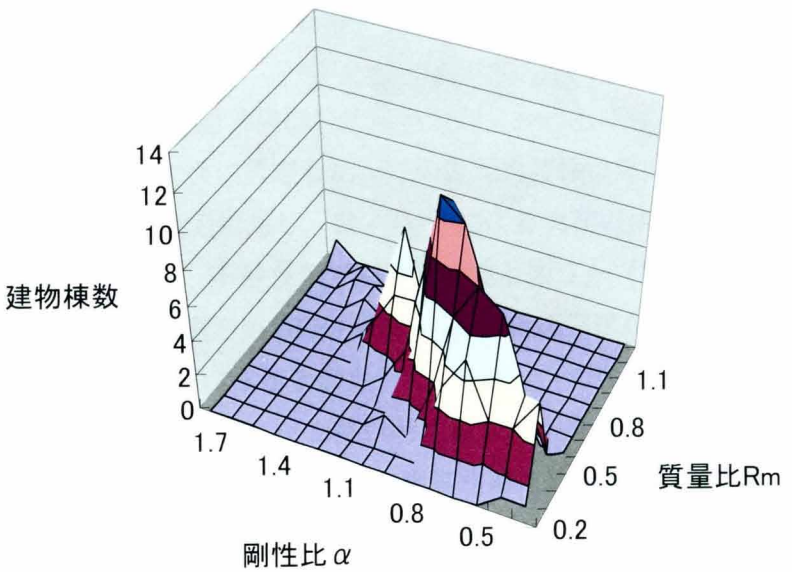


図-7.5　質量比と剛性比の確率密度分布（弱軸方向）

上記の確率分布密度分布に従う建物群に，前項で設定した分布に従う固有周期をランダムに与えた．この建物群をモデル B と設定する．その結果，設定したモデル群において，弱軸方向の 1 層の C_y を計算すると 0.15～1.08, 一般診断に基づくベースシア係数に対する推定倍率は 0.96～3.01 となった. 前項の構造特性を考慮しないモデルに比較して C_y の分布範囲が拡大している. この要因として質量比と剛性比の組み合わせによっては，より耐震的に有利な建物と不利な建物が発生したためと考える. 言い換えると，常時微動により同じ固有周期が得られたとしても，質量比，剛性比の影響により振動特性は異なることがあることを示している．強軸方向は 1 層の C_y は 0.26～2.53, 一般診断に基づくベースシア係数に対する推定倍率は 1.20～6.21 となった.

7. 3　地震応答解析に基づく木造建物群の被害推定

前節で設定した振動解析モデルを用いて木造建物群の被害推定を行う．検討対象とした地域は 6 章で設定した東部測線上とした. 解析ケースを表-7.1 に示す. 解析ケースは 3 種類で, Case_A は，固有周期の分布のみを考慮して設定したモデル，Case_B-1 は構造特性を考慮した弱軸方向に関するモデル，Case_B-2 は同じく強軸方向に関するモデルである．Case_B-3 は同じく構造特性を考慮したモデルだが，50％の建物に対しては地震動を弱軸方向に入力し，残りを強軸方向に入力した場合について検討を行った.

表-1　解析ケース一覧

解析ケース	建物モデル群名	地震動入力方向	備　考
A	A	弱軸	固有周期の分布のみを考慮
B-1	B	弱軸	固有周期と1階，2階の質量比および剛性比を考慮
B-2	B	強軸	上と同じ
B-3	B	弱軸50%＋強軸50%	上と同じ

7.3.1　応答解析結果

(1)　Case_A の地震応答解析結果

モデル A の建物群 200 棟に対して実施した解析結果から得られた各測点毎の最大応答変形角の分布を図-7.6 に示す．最大応答値の分布を見ると，大きな地震動が推定されたエリア(E-6～E-17)での応答が大きく，最も大きな最大応答変形角 R は E-13 において 1/5.5rad となった．しかし，このエリアの全ての建物の応答が大きいわけではなく，R=1/52rad 程度の建物もあり，とくに E-13 地点では応答量の範囲が広い特徴がある．一方，海側に向かうにつれて，E-16 地点から応答量が小さいことが分かる．また，山側については，E-00～E-04 地点まで少しずつ最大応答量は小さくなっているが，例えば E-02 地点のようにある特定の建物の応答が大きくなる場合がある．この山側の地震動周期成分にはハイブリッド合成法による地震動推定で短周期が多く含まれる地域であったため，周期の短い建物の応答が大きくなってこのような現象があらわれたと考える．したがって，高精度な被害予測を行うためにはこのような周期特性の影響を考慮する必要がある．

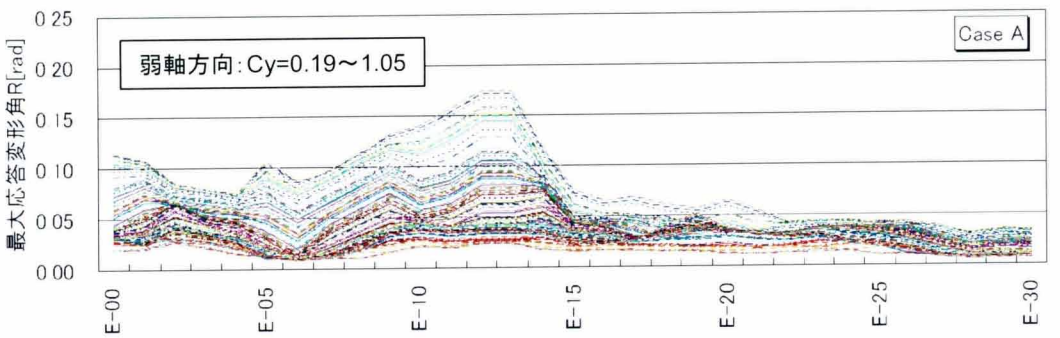


図-7.6　Case_A における最大応答変形角の分布

次に既往の研究における最大応答変形角 R と建物損傷度の関係から，建物損傷度の分布について検討を行った．ここで，最大応答層間変形角と建物損傷度の関係について，吉田・大井[7.7)]は兵庫県南部地震による木造建物の被害に対応した木造建物の耐震性の検討を行っており，モンテカルロシミュレーションによる応答解析を行った結果，一部損壊では1/60rad，半壊は1/40rad，全壊は 1/30rad で被害と対応することを示している．そこで，一部損壊に相当するダメージグレードの D1 は 1/60rad 以上，半壊に相当する D3 は 1/40rad 以上，全壊に対応する D4 は 1/30rad 以上で発生すると仮定した．D2 は半壊と一部損壊の間に位置するとして，1/50rad に設定した．層破壊の D5 は，村上ら[7.2)]による検討を参考に 1/10rad とした．図-7.7 に推定した被害率の分布を示す．ほとんどの地点で D1 以上の被害率が 100％となり，D4 以上の被害率は 80%となった．層破壊についても発生が認められ，D5 以上の被害率は最大で 20%程度となった．

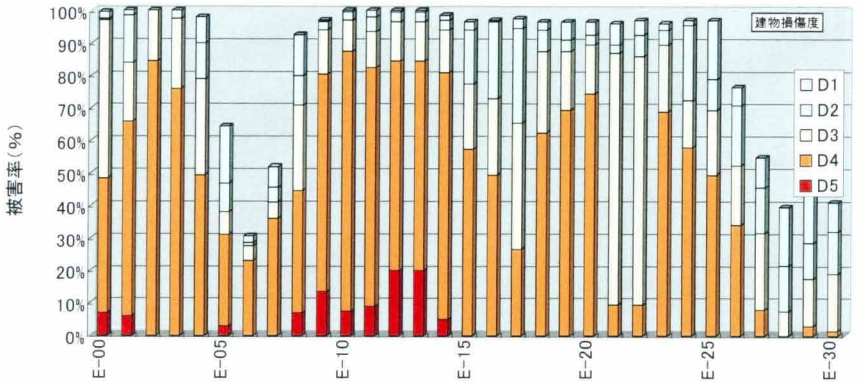


図-7.7　推定被害率の分布（Case_A）

(2)　Case_B の地震応答解析結果

Case_B-1 の弱軸方向に入力した解析結果から得られた各測点毎の最大応答変形角の分布を図-7.8 に示す．最大応答値の分布を見ると，最も大きな最大応答変形角 R は E-13 地点において 1/4.2rad となり，Case_A と比較するとやや大きな応答値が得られた．これは，前述したように建物の構造特性として質量比と剛性比を考慮することにより，場合によってはより耐震的に有利となる建物と不利となる建物が存在したためと考えられる．次に，最大応答変形角と建物被害の関係を Case_A と同様に設定して，図-7.9 に示すように被害率の分布を推定した．図-7.9 は図-7.7 の Case_A の場合とほぼ同じ分布をしており大きな違いは見られない．

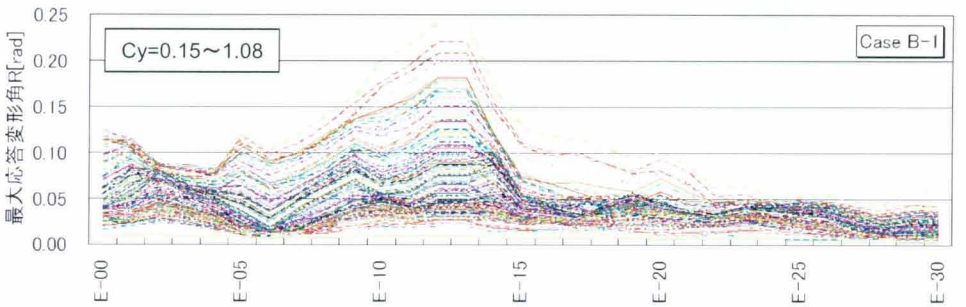


図-7.8　Case_B-1 における最大応答変形角の分布

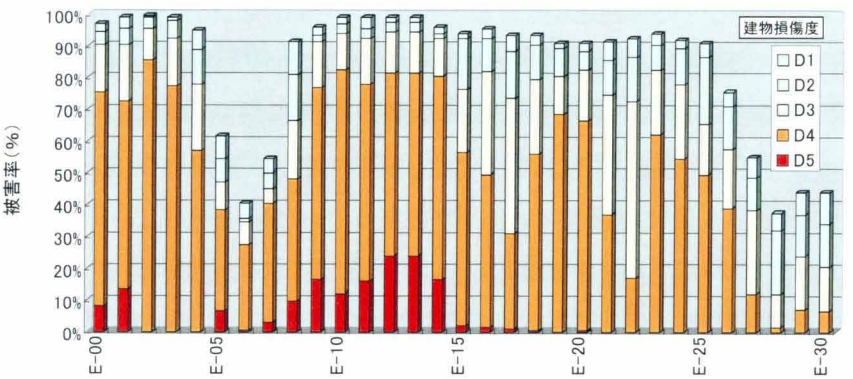


図-7.9　推定被害率の分布（Case_B-1）

次に Case_B-2 の強軸方向へ入力した結果として，最大応答変形角の分布を図-7.10 に被害率の分布を図-7.11 に示す．強軸方向に入力した場合，解析地点毎の差は少なく，ほとんどの建物の応答値は 1/20rad 以内となっている．図-7.11 の被害率は小さくなり，D4 率（全壊率）は最大で 20％程度となった．また，層破壊はほとんど発生していない．

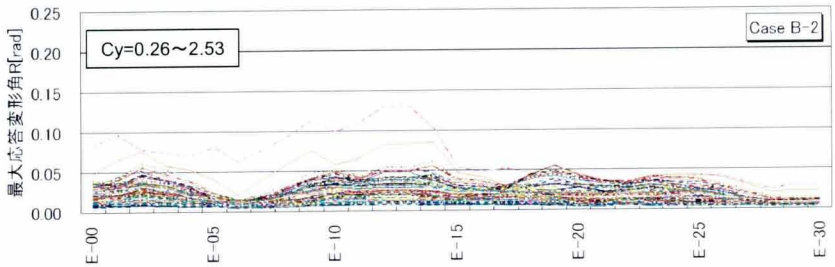


図-7.10　Case_B-2 における最大応答変形角の分布

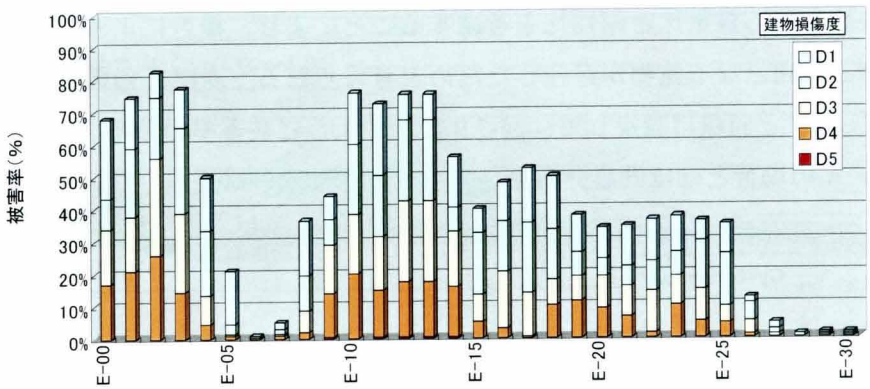


図-7.11　推定被害率の分布（Case_B-2）

最後に地震動の方向性を考慮した解析を行った．建物の 50％には弱軸方向に，残りの 50％には強軸方向に入力したケース（Case_B-3）の結果として，推定被害率の分布を図-7.12 に示す．地震動が大きい地点や山側の地点の被害率が高くなり，海側が小さくなるという被害分布が得られた．全壊率は最大で 50％，層破壊率は最大 10％程度となった．

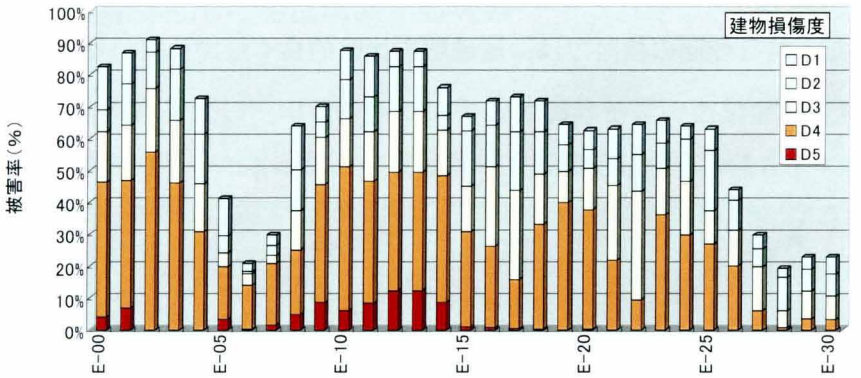


図-7.12　推定被害率の分布（Case_B-3）

7.3.2　最大応答変形角と建物損傷度の関係

前項の応答解析結果から得られた被害率と，第 3 章および第 4 章において構築した損傷度別被害関数を用いて推定した被害率と比較を行い，最大応答変形角と建物損傷度との関係を考察する．応答解析の対象とした 1972 年～81 年の建築年を考慮した損傷度別被害関数を用いて算定した東部測線における損傷度別被害の分布を図-7.13 に示す．

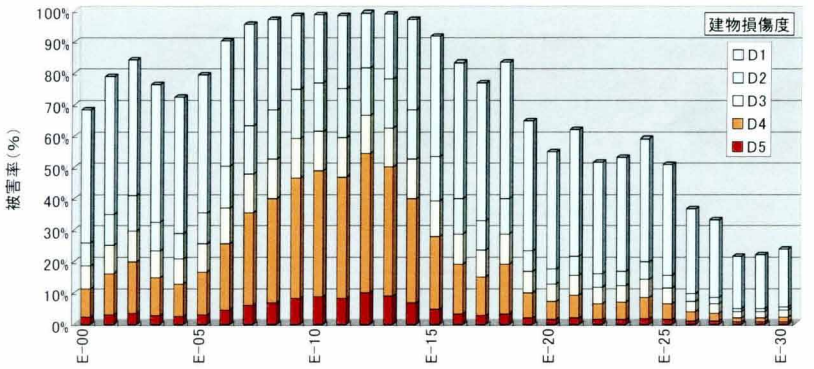


図-7.13　損傷度別被害関数を用いて推定された東部測線における木造建物の被害率

図-7.12 と図-7.13 を比較すると E-6～E-17 において，地震動の大きい地域では非常に良い対応を示している．特に応答解析による結果は全壊や層破壊の分布を良く再現している．一方，山側や海側では両者に違いが現れている．この要因として建物被害の評価尺度の違いにより，最大応答変形角と建物損傷度の関係の設定に問題がある可能性がある．そこで，反対に応答解析の結果が，第 3 章，第 4 の損傷度別被害関数による推定結果に最も適合するような最大応答変形角を求めた．適合方法は各測点における被害率の差の 2 乗和が最も小さくなるように建物損傷度のクライテリアを求めた．その結果，層破壊の D5 は R=1/10rad, D4 は 1/25rad, D3 は 1/26rad, D2 は 1/32rad，D1 は 1/84rad となった．D4, D3, D2 間の差は小さい結果となった．D5 については，村上ら [7.2)] は倒壊限界変形角を 1/10～1/7.5 rad と指摘しており，今回の結果はその値と整合している．最大応答変形角のクライテリアを最も被害関数に適合するように設定した時の被害

率の分布を図-7.14 に示す．適合するように調整したものではあるが，図-7.13 と比較すると良い対応が得られた．特に今回の検討では，層破壊を比較的良く推定していると考える．

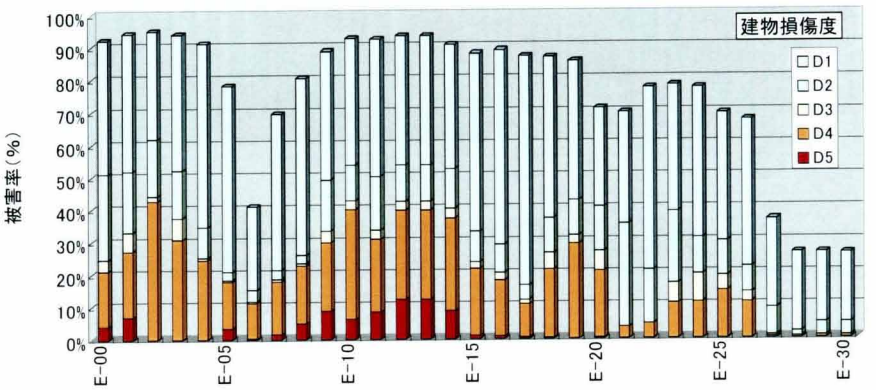


図-7.14　推定被害率の分布（Case_B-3）

7.4　常時微動計測の利用可能性に関する考察

これまでの検討結果を基にした現行診断システムにおける常時微動計測の利用可能性を図-7.15にまとめる．単独で用いた場合は，一般診断の上部構造評点や，強さPの簡易推定のように耐震診断の簡便性を高めることができる．そのような耐震診断の目安だけではなく，本研究で提案した解析手法のように常時微動計測結果から簡易に耐力（層せん断力係数）に換算し，動的な挙動や被害予測の結果を早い段階で住民に示すことができる利点がある．しかし，実際に耐震補強までを考えた場合には，通常の一般診断や精密診断と併用することにより，例えば一般診断による壁量や壁仕様の目視判断における診断エラーを低減したり，常時微動の簡易推定結果と併せて，住民に診断結果を提示したりすることにより，診断の信頼性，客観性の向上が期待できる．また，補強前後における常時微動の計測により補強効果を住民に対して明示できる利点を有していることを挙げることができる．今後，本研究成果を踏まえて木造住宅の耐震化促進に向けた展開を図っていく予定である．

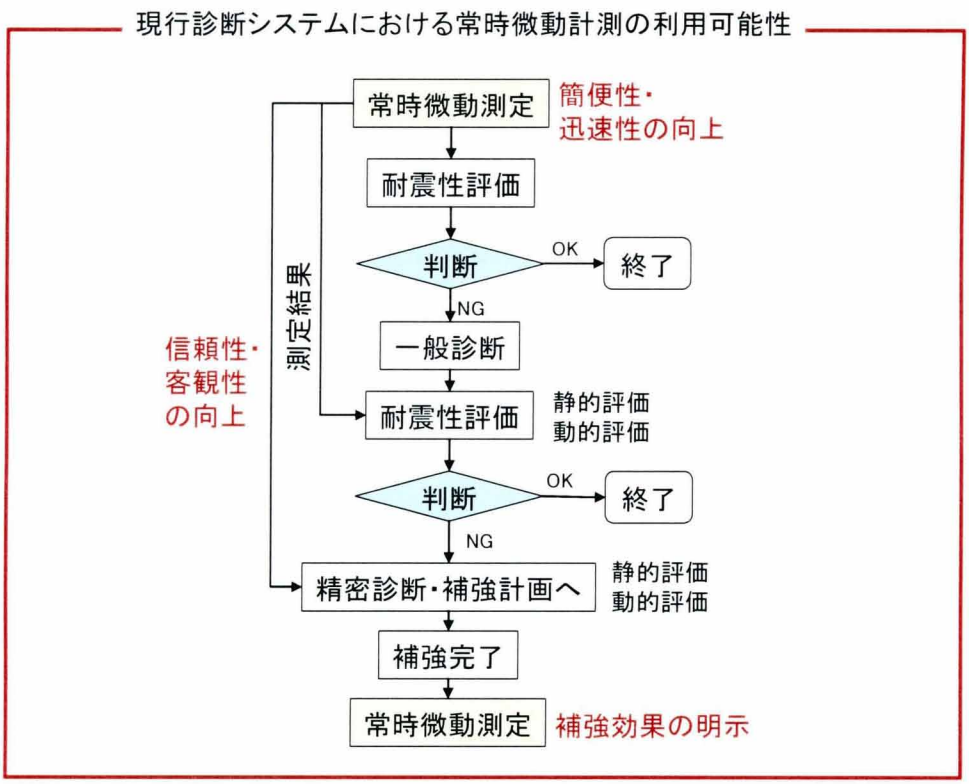


図-7.15　現行診断システムにおける常時微動計測の利用可能性

7.5 まとめ

応答解析に基づく木造建物の地震被災危険度評価手法を構築するために，第 5 章から得られた常時微動計測による固有周期を用いて木造建物群のモデル化を行った．木造建物群のモデル化は，在来軸組構法による 2 階建ての住宅を対象として，1)常時微動から得られた固有周期の分布を考慮したモデル，および 2)固有周期の分布を考慮したモデルに耐震診断結果から得られた木造住宅の構造特性の分布を考慮したモデル，の 2 種類を構築し，木造建物群の建物 1 棟毎に，第 6 章の結果から得られた地盤のサイト特性を考慮した地震動を入力して地震応答解析を行い，最大応答変形角から被害率の算定を行った．この結果，得られた知見を以下に示す．

1) 常時微動計測結果を基に降伏時の層せん断力係数 C_y の分布を求め，C_y 分布を考慮した 2 質点せん断型の振動解析モデルを提案した．また，耐震診断結果から 2 層建物の質量比，剛性比をパラメータにしたモデルを提案した．
2) 構築したモデルに地盤サイト特性を考慮した地震動を入力して地震応答解析を実施し，地震動の周期特性が建物の応答に影響を与えており，被害を精度良く評価するためには周期特性を考慮する必要があることを指摘した．
3) 常時微動に基づくモデルと，構造特性を考慮したモデルを比較した結果，被害率は同程度の評価精度であったが，建物 1 棟単位の挙動に着目すると，構造特性を考慮したモデルの方が耐震的に有利となる場合や不利となる場合になることがあり，その結果，応答値が大きくなる建物が存在することを明らかにした．
4) 既構築の損傷度別被害関数を用いた推定結果と比較を行い、最大応答変形角 R と建物損傷度の関係を求めた結果，建物被害発生のクライテリアは，層破壊 D5 は R=1/10rad，D4 は 1/25rad，D3 は 1/26rad，D2 は 1/32rad，D1 は 1/84rad となった．
5) この最大応答変形角と建物損傷度の関係を用いて，地震動特性と耐震性能を考慮した地震応答解析により、軽微な被害から層破壊のような甚大な被害までを推定可能な手法を提案した．
6) 検討結果から，常時微動の利用可能性について考察し，常時微動を単独で用いた場合は壁量の簡易推定のように診断の簡便性を高め、現行の診断システムと併用した場合は診断員の目視による判断に信頼性や客観性を付加し、住民に対しては想定地震に対して予想される損傷度や補強前後の測定から得られる補強効果を明示できる利点があることを示した．

今後の課題として，今回提案した手法は常時微動から比較的簡易に降伏時の層せん断力係数を求めることができるが，その算定過程において，降伏時の変形角 R_0 を 1/1,000rad と確定的に取り扱った．これは従来の応答解析において雑壁効果のような不確定要素として扱われていたパラメータを定量的に扱う意味において重要なアプローチと考えるが，今後，さらに R_0 の設定方法については検討が必要と考える．また，住宅の平面特性を考慮した標準的な振動モデルを

構築し，腐朽や基礎の状態、ねじれ振動の影響，大変形時の P-Δ効果を考慮するためのより精緻なモデルの構築および層破壊までの大変形を精度良く評価可能な解析手法の確立を行う予定である.

第７章の参考文献

7.1) 鈴木祥之，中治弘行：強震動下における木造建物の地震応答と耐震性能評価、第２回都市直下地震災害総合シンポジウム，pp.211-214，1997.

7.2) 村上雅英，鈴木祥之，田原　賢：阪神淡路大震災における木造住宅の倒壊原因に関する考察，日本建築学会構造系論文集，No.523，pp.95-101，1999.

7.3) 小檜山雅之，山崎文雄：耐震診断データに基づく木造建物の被害関数－加速度応答スペクトルによる一部損壊以上の被害評価－，日本建築学会構造系論文集，No.570，pp.137-144，2003.

7.4) 鈴木祥之，中治弘行，岩井哲，北原明男：在来構法木造住宅の実大水平力載荷実験，日本建築学会構造系論文集，No.499. pp.69-76，1997.

7.5) 綿引誠，大橋好光，高間氏幹弥，中野一郎，石山央樹，佐藤栄児：実大実験に基づく木造軸組構法住宅の耐震性に関する研究，その３　各部の応答挙動と筋かいの負担力，日本建築学会大会学術講演梗概集（東北），Vol. C-1，pp.173-174，2000.

7.6) I. Guttman and S.S. Wilks：工学系のための統計概論，培風館，ISBN4-563-00816-8，p.274，1968.

7.7) 吉田伸一，大井昌弘，水谷守，田内建次，今塚善勝，藤原広行：木造建物群の地震損傷度評価手法に関する検討，（その２）モンテカルロ解析による検討，日本建築学会学術講演会，pp.51-52，2003.

第8章　結論

8.1　本論文のまとめ

本論文では，地震による人的被害発生の主要因として位置づけることができる建物被害の発生に対して，効果的な被害軽減策を展開していく上で必要となる建物の地震被災危険度評価手法の確立とその予測精度の高度化に向けて，１）兵庫県南部地震による木造建物の被災経験に基づき建物損傷度を反映した被害関数を構築するとともに，２）耐震診断による住宅の構造特性に加えて，常時微動による振動特性を評価要素とした地震応答解析による被災危険度評価手法を構築することを目指して，以下の研究を行った．

第３章「1995 年兵庫県南部地震の被災経験に基づく建物被害関数の構築」では，建物被害の発生を予測・評価するための比較的簡便なツールとして建物被害関数に着目し，兵庫県南部地震時に撮影された 11,426 枚の被害写真から損傷度を可視化した被害パターンチャートを用いて建物の損傷度分類を行った．この損傷度分類により，被害統計データとして不足している層破壊被害建物を同定した．その結果，西宮市の層破壊被害パターンは，2 階建ての 1 階が層破壊するパターン(Gd5)が最も多く，次に全層の層破壊パターン(Cd6)が多いことが明らかになった．次に木造建物の層破壊発生要因に着目し，代表的な地震動強さ指標である PGA, PGV, SI と層破壊被害の発生率の関係について検討した結果，PGV および SI との相関が比較的高く，また，層破壊率と周期帯を考慮したスペクトル強度との検討から，周期帯 1.0～2.5 秒との相関が高くなる結果が得られた．その結果から，PGV を被害関数構築のための最適な地震動強さ指標を設定した．また，木造建物の耐震性能評価指標として建物属性に着目して数量化Ⅱ類による分析を行った結果，建築年が被害発生に最も影響を与えていた因子であることが明らかとなり，住宅の変容過程を考慮した建築年代区分を設定した．以上の検討結果から建物属性を考慮した層破壊被害を評価可能な損傷度別被害関数を構築した．その構築した被害関数について，兵庫県南部地震で実施された調査結果に基づいて作成された被害関数と比較することにより妥当性を確認した．

第４章 「被害関数を用いた地震被災危険度評価手法の適用性に関する考察」では，前章で構築した被害関数を兵庫県西宮市および神戸市東灘区に適用し，兵庫県南部地震による木造建物の被害分布を推定した．西宮市に適用した結果からは，町丁目単位での面的な空間分布の推定，および総被害量の算定は，実被害と精度良く対応していることを確認した．木造建物について，町丁目単位の層破壊率と日本都市計画学会と日本建築学会による調査結果に基づく全壊率の関係，および建築年代別層破壊害関数を用いて西宮市南部の層破壊被害棟数を推定した．さらに被害関数を構築した地域とは異なる神戸市東灘区へ適用し，実被害を精度良く推定可能であることを示した．この検討において，建物被害の推定精度は地震動評価結果に依存することを確認すると同時に，震源特性と地盤構造の複合作用および地盤増幅特性を考慮した理論的地震動

シミュレーション結果を用いて良好な推定結果を得ることができることを確認した．以上の結果から，本研究では被害関数を用いて、これまでに明らかにされなかった兵庫県南部地震による神戸市域の木造建物の層破壊被害分布を推定した．しかし，厳密な 1 棟単位での層破壊発生建物位置の推定を行うためには，構築した被害関数には限界があり，建物の耐力や変形特性などの耐震性能を直接的に評価可能な手法の開発やより詳細な情報が必要となることが課題となった．

第 5 章 「耐震診断と常時微動に基づく木造建物の耐震性能評価」では，前章までに構築した統計的手法に基づく建物被害関数は過去に発生した被災事実を記述する点で優れているが，異なる地域や他の地震災害への適用については，さらに建物の耐震性能や地震動特性を考慮し，建物被害の発生メカニズムを解明する必要がある．そこでまず，建物の耐震性能を明らかにするために，一般的な耐震診断による評価と，常時微動を用いた動的な振動特性評価に関する検討を行った．具体的には兵庫県神戸市域を中心として，耐震診断を受診した戸建木造住宅を対象として常時微動計測を行い，振動特性として固有周期は常時微動の測定位置の影響を受けずに安定して測定可能な点に着目し，建築年や耐震診断結果との関係を分析した．その結果，建築年が古いほど固有周期が長くなる傾向や，固有周期が長くなると耐震簡易診断結果の総合評点が小さくなる傾向が見られ，耐震性と無関係ではないことが示唆された．とくに，耐震簡易診断における 6 評点と固有周期の関係を分析した結果，D×E 評点（水平抵抗力の評価）と固有周期の相関が他の評点に比較して高く，固有周期から簡易に壁の割合を推定することが可能であることを示した．そこで，より精密な診断手法である一般診断を実施し，固有振動数 f の 2 乗と地震応答解析の主要なパラメータとなる降伏時の層せん断力係数について比較検討を行った．その結果，常時微動に基づく固有周期から 2 層建物の質量比と剛性比を考慮して降伏時の層せん断力（ベースシア）係数を算定する関係式の定式化を行い、第 7 章で述べる建物の振動解析モデルの構築に適用することを提案した．また，補強過程で常時微動測定を行うことにより，振動特性の変化を捉えることができることを確認した．

第 6 章 「地盤のサイト特性を考慮した建物への入力地震動評価」では地盤のサイト特性を考慮した建物への入力地震動評価を行った．建設地点毎に地震動特性を評価するためには，1)震源特性，2)波動伝播特性，3)地盤増幅特性の 3 要素が考慮される必要がある．そこで，兵庫県南部地震を対象として，1)震源特性および 2)波動伝播特性を考慮するために，工学的基盤面までの地震動を長周期帯は 3 次元有限差分法によって推定された地震動に，短周期帯は兵庫県南部地震の震源パラメータやスペクトル特性を反映させた統計的予測モデルによる推定結果を合成し，工学的基盤から地表までの地震動の増幅については非線形解析手法を用いて設定した解析測線上の地震動推定を行った．また，地表面の最大速度(PGV)に着目した推定地震動の妥当性を検証した．その結果，検討対象地である 3 つの解析測線上で構築した損傷度別被害関数を用いて建物被害分布を推定した結果，建築年という総合的な耐震性能指標を考慮することにより，PGV 分布では確認できなかった建物被害の大きい震度 7 の帯域を精度良く推定可能であることを明らかにした．さらに西宮市における建物種別および損傷度別の死者発生率を算定し，この死者発生率を用いて東灘区における死者数および死者発生分布を建物種別および建物損傷度に基づいて推定した結果，良好に推定可能であることを示した．その上で，各解析測線上の死者発生

数を推定した結果，本研究によるPGVはいずれの測線においても実被害を説明可能な推定結果を与え，妥当な地震動推定結果が得られていることを確認した．

第7章 「地震応答解析に基づく木造建物の地震被災危険度評価」では，在来軸組構法による2層住宅を対象とした解析モデルとして、1) 常時微動による固有周期から求められた降伏時の層せん断力係数の分布を考慮した建物群モデル(A)、および2) モデル(A)に加えて構造特性として耐震診断から得られた2層建物の質量比、剛性比を考慮した建物群モデル(B)を提案した．この木造建物群の建物1棟毎に，第6章で推定した地震動を入力波とした地震応答解析を行い，最大応答変形角について考察した結果，地震動の周期特性が建物の応答に影響を与えており，被害を精度良く評価するためには周期特性を考慮する必要があることを指摘した．また，モデル(B)はモデル(A)に比較して最大応答変形角の範囲が大きくなり、構造特性を考慮することにより建物の挙動の評価精度が向上することを示した．さらに既構築の損傷度別被害関数を用いた推定結果と比較することにより、最大応答変形角と建物損傷度の関係を明らかにし、この関係を用いて地震動特性と耐震性能を考慮した地震応答解析により、軽微な被害から層破壊のような甚大な被害までを推定可能な手法を提案し，被災危険度が高い地域や建物を評価できることを示した．以上の検討結果から，耐震化促進に向けた常時微動の利用可能性について考察し、常時微動を単独で用いた場合は壁量の簡易推定のように診断の簡便性を高め、現行の診断システムと併用した場合は診断員の目視による判断に信頼性や客観性を付加し、住民に対しては想定地震に対して予想される損傷度や補強前後の測定から得られる補強効果を明示できる利点があることを示した．

以上のように本論文の成果として，兵庫県南部地震の被災経験に基づき，人的被害発生の主要因となった木造建物の層破壊被害を定量的に分析し，建物の耐震性能を考慮して統計的手法および地震応答解析手法による被災危険度評価方法を提案した．

8.2　建物被害軽減に向けた今後の課題

本研究では，住宅の耐震化を含めた包括的な建物被害軽減策を展開していくために必要な地震に対する建物の被災危険度評価手法の確立を目的として，兵庫県南部地震の被災事実を究明し，被災経験と力学モデルに基づく評価手法を提案した．今後の課題として，本研究では個々の木造建物の耐震性能を考慮して耐震診断と常時微動測定結果を基に評価手法を構築したが，個々の建物の被害推定精度の向上を図るためには，さらに建物の構造特性や振動特性を踏まえた予測手法を確立していく必要がある．例えば，層破壊に至るような大変形状態を精度良く推定するためには，力学的解析モデルに偏心の影響や，耐力劣化過程，P-Δ効果，地盤と建物の動的相互作用を考慮するなどのモデルの精緻化を進める必要がある．

また，建物被害の軽減を図るためには単に被害推定精度の高度化を目指すだけでは十分ではないと考える．つまり，今後はこのような被害予測結果をどのように具体的な対策に結びつけていくのかが課題となる．図-8.1 に地震による建物被害を軽減するための一連の主な対策をまとめる．図-8.1 は大きく 1)事前対策と 2)事後対応で構成される．さらに事前対策には，a)被害抑止，b)被害軽減があり，事後対応には c)緊急・応急対応，d)復旧・復興がある．

これら一連の防災対策の基本は被害抑止策であり，まず被害発生を最小限にとどめることが重要である．建物被害の抑止には耐震化が中心となることは改めて述べるまでもない．この耐震化では既存不的確建物の耐震診断，耐震補強や建替えの促進が主体となるが，長期戦略としては十分な耐震性を有した質の高い新規建物を供給し続けることが基本となる．つまり，必要最低限の安全基準である建築基準法を満たさないような不良ストックの建設を防止していくことにより，確実に都市の安全性は向上していく．そのためには中間検査，完了検査などを確実に実施し，不良ストックを生み出さないとともに，十分な耐震性を一度確保した建物については，性能劣化を防止するための維持管理策を展開していく必要があると考える．このような維持管理策を講じるためには，今後，性能劣化を評価可能な被害予測手法の構築が必要となる．また，木造密集地域のように建物を耐震化することでは密集地そのものは解決できない場合や，個々の建物の耐震化のみでは解決しない問題である液状化や土砂崩壊など地盤災害を起因として発生する被害への対策としては，土地利用規制の観点から地域的な耐震化を図る必要があると考える．本研究では，地震動による建物被害推定手法を対象としたが，今後はこのような複合的なハザードに対して効果的な対策が求められるであろう．

次に被害軽減策では，被害抑止策では防止できない被害に効果的に備えるために，より高度な被害予測・想定技術の開発を今後も進めていく必要がある．当然ながら具体対策の中には被害抑止策が包括されているように被害抑止策と軽減策は密接な相互関係があり，計画に沿って耐震化などの対策が進むことにより，防災戦略，計画の見直しが行われることになる．

緊急・応急対応では余震などの二次災害による被害拡大の防止策が必要であり，どこに被害が発生しているのか被害実態を早期に把握し，迅速な応急措置をとる必要がある．ここで，我が国では高密度に整備された地震観測網から即時に地震情報を入手することが可能であり，この地震情報を基にした被害予測を精度良く行うことにより，逸早い対応が可能となる．

復旧・復興では，被災建物そのものの被害を軽減することは不可能であるが，早期の再建を果たすことにより被害軽減は可能となる．したがって，単に建物被害を構造物の破壊現象として捉えるのではなく，安全性，修復性，使用性の観点から事前評価可能な予測手法の確立が必

要となる．とくに，兵庫県南部地震では生活基盤となる住宅再建が大きな課題となった．また，次の災害に対してより安全性が確保された都市を再建するための復興都市計画を策定していく際にも，本研究で検討を行った被災危険度評価手法は役立つと考える．

このように一連の建物被害軽減策は連動して機能するものであり，建物被害軽減向けた一貫したリスク評価技術を確立していく事を今後の課題として取り組んでいきたい．

図-8.1　建物被害軽減策

発表論文一覧

全文審査論文

1) Horie, K., Okimura, T., Maki, N., Tanaka, S., Torii, N., and Hayashi, H.: Development of Seismic Vulnerability Functions of Building Collapse without Survival Space for Accurate Human Casualty Estimation, *Proceedings of 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, 2006.4. (in press)

2) 堀江啓，沖村孝，鳥居宣之，田中聡，牧紀男，林春男：木造建物を対象とした層破壊被害関数の適用性に関する考察，土木学会地震工学論文集，CD-ROM，2003. 12.

3) 堀江啓，林春男，田中聡，長谷川浩一，牧紀男，沖村孝：地震による木造建物の破壊状態を反映する被害関数の構築，地域安全学会論文集，No.5，pp.123-132，2003.11.

4) Horie, K., Maki, N., Kohiyama, M., Hengjian, L., Tanaka, S, Hashitera, S., Shigekawa, K., and Hayashi, H.: Process of Housing Damage Assessment –The 1995 Hanshin-Awaji Earthquake Disaster Case–, Journal of Natural Hazards, 29, pp.341-370, 2003. 7.

5) 堀江啓，沖村孝，鳥居宣之，牧紀男，林春男：地震による建築構造物の層破壊発生要因に関する研究，神戸大学大学院自然科学研究科紀要，第 21 号-B, pp.101-110, 2003.3.

6) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：外観目視による建物被災度評価手法の検討－建物被災度判定トレーニングシステムの構築－，地域安全学会論文集，No.4，pp.167-174，2002.11.

7) Horie, K., Maki, N., Hayashi, H, Kohiyama, M., Shigekawa, K., and Tanaka, S.: Framework for Damage Assessment Training System, Proceedings of 8th International Conference on Structural Safety and Reliability, 2001.6. (CD-ROM)

8) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：震災時における木造建物の被害調査手法の開発－調査目的と調査項目－，地域安全学会論文集，No.2, pp.139-144, 2000.11.

梗概審査論文

1) Horie, K., Hayashi, H., Okimura, T., Tanaka, S., Maki, and N., Torii, N.: Development of Seismic Risk Assessment Method Reflecting Building Damage Levels -Fragility Functions for Complete Collapse of Wooden Buildings-, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004. 8. (CD-ROM)

2) Tanaka, S., Mizukoshi, K., Ohmori, T., Horie, K., Maki, N., and Hayashi, H.: Seismic Vulnerability Evaluation for Non-Engineered Housing in Developing Countries, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004. 8. (CD-ROM)

3) Hasegawa, K., Hayashi, H., Topping, K., Maki, N., Tatsuki, S., Banba, M., Horie, K., Tanaka, S., Tamura, K., and Watanabe, M.: Development of Participatory Seismic Risk Assessment Procedure that Reflects Community Needs: A Case Report from Marikina City, Metro Manila, Philippines, Proceedings of 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004.8. (CD-ROM)

4) Horie, K., Maki, N., Kohiyama, M., Lu, H., Tanaka, S., Hashitera, S. and Hayashi, H.: Development of Building Damage Chart for Post Disaster Management, Proceedings of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, 2000.1. (CD-ROM)

報告集・その他

1) 沖村孝，鳥居宣之，堀江啓：常時微動測定結果に基づく戸建木造住宅の動的耐震性能評価に関する研究，神戸大学都市安全研究センター報告書，2004.3.

2) 堀江啓：阪神・淡路大震災における木造建物の層破壊被害，地震ジャーナル，地震予知総合研究振興会，38, PP.30-40, 2004.12.

3) 堀江啓（分担執筆）：木造建物の地震時挙動，平成 14，15 年度神戸の地盤研究会成果報告書，第 3 編，2004.3.

4) 堀江啓，田中聡，牧紀男，東田光裕，林春男：災害における Built Environment データベースの構築と防災への活用，情報処理学会・人文科学とコンピュータシンポジウム論文集，pp.275-282,2001.12.

5) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：震災時における建築物の被害調査手法の開発－公的機関による建物被害調査の課題－，比較防災学ワークショップ，No.1，pp.195-202，2001.1.

6) 牧紀男，小檜山雅之，呂恒倹，堀江啓，田中聡，林春男：西宮 Built Environment データベースの構築，比較防災学ワークショップ，No.1，pp.189-194，2001.1.

梗概集

1) Horie, K., Okimura, T., Torii, N.: Application of Seismic Risk Assessment Method Reflecting Building Damage Levels, Joint Workshop for New Trends in Seismic Vulnerability and Risk Assessment, BRGM-Research Centre for Urban Safety and Security, Kobe University, 2005.12.

2) 堀江啓，林春男，牧紀男，吉富望，重川希志依，田中聡，沖村孝，鳥居宣之：新潟県中越地震による小千谷市の建物被害分布に関する一考察，第 24 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.7-8，2005.11.

3) 堀江啓：2004 年スマトラ島沖地震・津波によるアチェ州北部の建物被害分布，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp.589-590，2005.9.

4) 鈴木三四郎，田中聡，堀江啓，牧紀男，藤澤秀樹，水越薫，大森達弥，林春男：実験データに基づくフィリピン・マリキナ市の Non-Engineered 住宅の復元力特性の定式化とその地震応答特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1 分冊，pp.829-830，2005.9.

5) Horie, K., Shigekawa, K., Hayashi, H., Tanaka, S., and Maki, N.: Development of Efficient

Training Method for Building Damage Assessment by Disaster Responders, Oral, Proceedings of 1st International Conference on Urban Disaster Reduction, 2005. 3. (in printing)

6) 堀江啓，沖村孝，鳥居宣之，牧紀男，林春男：兵庫県南部地震による神戸市域の木造建物を対象とした層破壊発生数の推定，第 23 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.37-38，2004.9.

7) 堀江啓，田中聡，鈴木三四郎，藤澤秀樹，水越薫，大森達弥，高島正典，牧紀男，林春男：フィリピン・マリキナ市における Non-Engineered 住宅の耐震安全性に関する研究　その 2　在来工法住宅の建設方法と構造詳細，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1003-1004，2004. 8.

8) 長谷川浩一，堀江啓，牧紀男，林春男：フィリピン，マリキナ市における建物一棟単位の地震被害想定の実施，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp.1053-1054，2004.8.

9) Hasegawa, K., Hayashi, H., Topping, K., Maki, N. Tatsuki, S., Banba, M., Horie, K., Tanaka, S., Tamura, K., Kondo, T., Karatani, Y., and Fukasawa, Y.: Interactive Seismic Damage Risk Assessment in Marikina City, Philippines, Proceedings of Asia Conference on Earthquake Engineering, Volume 1, pp.499-511, 2004. 3.

10) Tanaka, S., Mizukoshi, K., Ohmori, T., Horie, K., Maki, N., and Hayashi, H.: Loading Experiments of Non-Engineered Houses in Marikina City, Philippines, Proceedings of Asia Conference on Earthquake Engineering, Volume 1, pp.273-282, 2004.3.

11) 沖村孝，鳥居宣之，堀江啓，林春男：兵庫県南部地震における表層地盤震動特性と建築構造物の層破壊被害との関係，第 38 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.2059-2060，2003,8.

12) 沖村孝，鳥居宣之，堀江啓，林春男：兵庫県南部地震による木造建物の破壊形態に及ぼす影響因子，自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.213-214，2003.9.

13) Horie, K., Okimura, T., Torii, N., Maki, N., and Hayashi, H.: Development of Building Risk Assessment Method for Earthquake Disaster Management - Fragility Functions for Completely Collapsed Buildings using Damage Photos in the 1995 Kobe Earthquake-, Proceedings of 21st Tectonomechanics Colloquium, Karl-Franzens University of Graz, Graz, Austria, pp.16-25, 2003.5.

14) Horie, K., Maki, N., Tanaka, S., Shigekawa, K., and Hayashi, H.: Development of Damage Assessment Training System – Building Damage Assessment Method for Disaster Responder -, Proceedings of 7th U.S./Japan Workshop on Urban Earthquake Hazard Reduction, 2003. 3. (CD-ROM)

15) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：阪神・淡路大震災における西宮市の層破壊建物棟数の推定，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp11-12，2002.9.

16) 沖村孝，鳥居宣之，堀江啓，林春男：GIS を用いた地形と地震動強さに関する検討－兵庫県南部地震時の西宮市を事例として－，自然災害学会学術講演会講演概要集，pp.15-16，2002,9.

17) 牧紀男，堀江啓，林春男：建物被害想定を行う場合の年代区分設定－建築基準法施行令改正の有効性－，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp.141-142，2001.9.

18) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：震災時における早期被害把握手法の開発－マグニチュード推定法による建物全壊率の視覚判断－，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp.201-202，2001.9.

19) 堀江啓，牧紀男，重川希志依，田中聡，林春男：建物被害調査における最適な調査項目の設定に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2 分冊，pp.111-112，2000.9.

著書・翻訳

1) 堀江啓（分担執筆）:「12 歳からの被災者学」，メモリアル・コンファレンス・イン神戸編著，日本放送出版協会，ISBN4-14-011207-7，〒150-8081 東京都渋谷区宇田川町 41-1，pp.176-191，2005.1.

謝　辞

本論文は，神戸大学大学院自然科学研究科博士課程前・後期課程の 4 年間において行った木造建物の地震被災危険度評価に関する研究をまとめたものです．また，本研究の一部は平成 16 年度神戸大学都市安全研究センタープロジェクト研究課題「常時微動計測による地震被災地の木造住宅の動特性評価（研究代表者：沖村孝）」における研究の一環として行いました．

本論文をまとめるにあたり，沖村孝先生（神戸大学都市安全研究センター教授）には，修士課程より 4 年間に渡りご指導を賜りました．兵庫県南部地震で多くの死者を発生させ，現在においても大きな課題となっている木造住宅の耐震化をテーマにした本研究の機会を与えていただき，上部構造だけではなく地盤の観点から住宅の耐震性を捉えるといった広い視野から研究に取り組むことの大切さと，常に問題構造を明確にし，成果を一段ずつ積み上げていく研究の姿勢を教えていただきました．ここに深く感謝するとともに心より御礼申し上げます．

田中泰雄先生（神戸大学都市安全研究センター教授），安田丑作先生（神戸大学工学部教授）には，お忙しい中，本論文の副査をご担当いただきました．論文作成にあたり大変有益なご指摘を賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．

鳥居宣之先生（神戸大学都市安全研究センター助手），上西幸司先生（神戸大学都市安全研究センター助手）には，研究を進めるにあたり貴重な御助言とご指摘をいただきました．ここに心より感謝致します．

研究室の皆様には研究に関して貴重なご意見をいただくと同時に，様々な形でご協力を頂きました．大学院での 4 年間を楽しく過ごすことができたのは皆様のおかげです．ここに深く感謝致します．

本研究は，著者が在職中の防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター（EDM）における研究活動の一環として実施したものです．

林春男先生（京都大学防災研究所教授・元 EDM チームリーダー）には，木造住宅の「層破壊」を単に構造物の破壊現象として捉えるのではなく，災害が社会や生活を一変させる現象の一つとして考えることを教えていただきました．EDM において研究の機会を与えてくださり，多くのご指導を賜りましたことを心から感謝申し上げます．

亀田弘行先生（防災科学技術研究所客員研究員，元 EDM センター長）には，研究を進めるにあたり貴重なご指摘を賜りました．東原紘道先生（EDM センター長）には有意義なご助言を賜りました．ここに厚く御礼申し上げます．また，EDM の素晴らしい環境の中で研究を行えたことを深く感謝します．

牧紀男先生（京都大学防災研究所助教授・元 EDM チームリーダー）には，本論文の執筆にあたり，多大なご支援をいただききました．松岡昌志博士（EDM チームリーダー）には，災害情報としての被害関数の活用について多くのご助言をいただきました．新井洋博士（EDM 副チームリーダー）には，常時微動の計測方法や測定機材の選定について教えていただきました．ま

た，波形処理の基本プログラムをご提供していただきました．長谷川浩一博士（EDM 研究員）には，被害関数の構築と被害推定手法について多くのご助言を賜りました．馬場美智子博士（EDM 研究員）には，研究を遂行する上で惜しみないお力添えをいただきました．EDM では，多くの方々に様々な形でご協力を頂きました．ここに心より深く感謝いたします．

重川希志依先生（富士常葉大学教授）には，研究活動における様々な場面で人脈形成の機会を与えていただきました．田中聡先生（富士常葉大学助教授）には，第 3 章の西宮市の層破壊建物の同定方法や被害関数の構築手法について多くのご指導を賜りました．心よりお礼を申し上げます．

第 3 章の西宮市の地震動解析結果に関して小檜山雅之先生（慶応義塾大学講師）には，貴重な御助言をいただきました．ここに深く感謝いたします．

第 4 章および第 6 章の建物被害推定では，林康裕先生（京都大学防災研究所教授）には兵庫県南部地震における地震動推定データをご提供していただきました．ここに心から御礼申し上げます．

第 5 章の常時微動の計測では神戸市から多大なご協力を賜りました．都市計画総局住宅政策課の浅野高史氏，神戸市企画整備局総合計画課の角本直樹氏をはじめとして多くの職員の皆様のお力添えを頂きました．ここに深く感謝を申し上げます．また，神戸市住宅供給公社（すまいるネット）の小林賢一氏には住民との窓口になっていただき，円滑な計測を行うことができました．ここに厚く御礼申し上げます．

兵庫県建築士事務所協会の皆様には耐震診断に関する有益な情報とご助言を賜りました．とくに山田正人氏（株式会社エーアンドディー設計企画）には，常時微動計測の企画の段階から多大なご支援をいただきました．ここに，心より感謝いたします．

常時微動の計測には多くの住民の方々のご協力をいただきました．深く感謝を申し上げると同時に成果を皆様に還元できるよう一層努力していきたいと感じています．

第 6 章の地震動推定では，長谷川信介氏（応用地質株式会社）に多大なお力添えと多くの有益な情報をいただきました．心より感謝いたします．

本論文は「神戸の地盤・減災研究会」における研究活動で得た成果をまとめたものです．

南部光広博士（応用地質株式会社），谷口仁士先生（名古屋工業大学教授），荒木繁幸氏（株式会社ダイヤコンサルタント），庄司正弘氏，倉掛猛氏，金沢富美雄氏（株式会社構造計画研究所），宮西悠司氏（有限会社真野っこ），猪谷善久氏（有限会社健康住宅研究所），笹野英明氏（ササノ耐震調査事務所）をはじめとする「神戸の地盤・減災研究会」の皆様には，多くの情報をご提供いただき，また有益なご指摘を賜りました．ここに深く感謝申し上げます．

最後に，研究活動を暖かく見守り，心の支えでいてくれた家族に感謝の気持ちを伝えたいと思います．

2006 年 1 月

堀 江　啓