

学位論文

兵庫県南部地震における地震被害データを用いた  
建物の地震リスク評価法に関する研究

諏訪 仁

## 【目次】

1 章 序論	1
1.1 既往研究の概要と本研究の位置付け	1
1.2 本研究の構成と概要	9
1 章参考文献	11
2 章 兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線に基づいた損傷クライテリアの 評価	16
2.1 序	16
2.2 兵庫県南部地震における建物の被害率曲線	18
2.2.1 林・宮腰による建物の被害率曲線	18
2.2.2 村尾・山崎による建物の被害率曲線	19
2.3 RC 造建物の被害率曲線の比較	20
2.3.1 異なる評価法による被害率曲線の比較	20
2.3.2 異なる被災度による被害率曲線の比較	22
2.4 RC 造建物の被害率曲線の補正	25
2.5 RC 造建物の被害率曲線に基づく限界層間変形角の設定	32
2.5.1 地震応答解析に用いる地震動	32
2.5.2 RC 造建物群モデルの設定	33
2.5.3 応答層間変形角の分布	36
2.5.4 最大速度と応答層間変形角の関係	39
2.5.5 限界層間変形角の評価法	41
2.5.6 限界層間変形角の評価結果	43
2.6 まとめ	45
2 章参考文献	47
3 章 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線の評価法	49
3.1 序	49
3.2 建築設備の地震被害状況	51
3.2.1 建築設備の地震被害データ	51
3.2.2 建築設備の被害と構造的被災度の関係	54
3.3 建築設備の被害率曲線の評価法	57
3.3.1 兵庫県南部地震における地表面最大速度の推定	57
3.3.2 二項分布を用いた最尤法による被害率曲線の評価法	59
3.4 地震被害データを用いた建築設備の耐震性能	63

3.4.1	建築設備の被害率曲線	63
3.4.2	RC 造建物の被害率曲線との比較	64
3.4.3	建築年, 構造形式, 建物階数による比較	65
3.4.4	応答指標を用いた建築設備の被害率曲線	66
3.5	まとめ	72
3	章参考文献	74
4	章 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建物の補修費用の評価法	75
4.1	序	75
4.2	個別建物の補修費用に関する検討	76
4.2.1	補修費用データ	76
4.2.2	補修費用の構成比に関する検討	77
4.3	補修費用の統計的評価	80
4.3.1	延べ床面積と単位面積当りの補修費用の関係	80
4.3.2	補修費用の平均値と変動係数	82
4.3.3	工事別の補修費用の構成比	83
4.3.4	構造形式や建物用途による工事別の補修費用の構成比	84
4.4	確率分布を用いた補修費用の分布の回帰	86
4.4.1	補修費用の分布の回帰法	86
4.4.2	確率分布による回帰結果	86
4.5	まとめ	91
4	章参考文献	92
5	章 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建物の補修期間の評価法	93
5.1	序	93
5.2	建物の補修期間データ	94
5.3	各指標と建物の補修期間の関係	96
5.3.1	建物階数と補修期間の関係	96
5.3.2	延べ床面積と補修期間の関係	96
5.3.3	構造形式と補修期間の関係	97
5.3.4	建物用途と補修期間の関係	98
5.3.5	地表面最大速度と補修期間の関係	99
5.4	異なる地震被害調査による建物の補修期間との比較	101
5.5	建物の補修期間の予測式の検討	103
5.6	新築期間に対する建物の補修期間の関係	106
5.7	まとめ	109

5章参考文献	111
6章 建物の地震リスク評価法	112
6.1 序	112
6.2 建設地の地震ハザード評価法	115
6.2.1 震源および地震活動度のモデル化	115
6.2.2 地表面最大速度の評価法	116
6.2.3 地表面における地震動の作成	118
6.3 建物の地震リスク評価法	121
6.4 地震リスクの評価例	125
6.4.1 解析条件	125
6.4.2 評価結果	128
6.5 まとめ	135
6章参考文献	136
7章 ポートフォリオを対象に効用関数を用いた地震保険料の検討	138
7.1 序	138
7.2 ポートフォリオの地震リスク評価法	141
7.2.1 建物間における損失発生の特関性	141
7.2.2 ポートフォリオの損失分布	143
7.3 効用関数を用いた地震保険料の評価法	148
7.4 地震保険料の検討	151
7.4.1 解析条件	151
7.4.2 離間距離による特関性の影響	153
7.4.3 地震リスク曲線の比較	161
7.4.4 地震保険料の検討結果	166
7.5 まとめ	170
7章参考文献	171
8章 結論	173
発表論文リスト	178
謝辞	180



## 1 章 序論

### 1.1 既往研究の概要と本研究の位置付け

日本は、世界的に見ても地震の多発地域に位置しており、建物のみならず都市が持続的な発展をするためには、建物の耐震安全性が重要となる。建物の耐震安全性は、建設地周辺で将来発生する地震の規模、震源特性、伝播特性、地盤特性を反映した地震動強さ、ならびに地震入力に対する建物応答と耐力の関係から求められる地震損傷度などの情報に基づき評価される。しかし、現状ではこれらの要素を全て確定的に評価することは難しく、確率論的評価法が必要となる。一方、建物の供用期間中に地震被害が生じると補修費用が必要となるので、建物の耐震安全性は地震リスクと密接に関係している。建物の地震リスクは、建設地の地震ハザードと建物の地震損失の両者に基づき評価されるが、地震ハザード評価法は既にさまざまな形<sup>1)~4)</sup>などで提案されている。しかし、建物の地震損失評価法では、地震損傷度曲線を作成する際の損傷クライテリアの設定、建物の補修費用や補修期間の設定、などが検討課題として残されている。このため、本論文では、とくに建物の地震損失評価法を対象に研究を行う。

建物の地震リスクを評価するには、まず、地震動強さに対する建物の地震損傷度を定量化する必要がある。建物の地震損傷度は、地震動強さを条件とした建物の損傷確率を用いて評価され、損傷確率は建物の応答分布と耐力分布の関係より計算される。建物の地震損傷度曲線は、地震動強さを逐次変化させて損傷確率を計算することにより求められる。既往研究において、建物の地震損傷度曲線は、大別して統計的手法や解析的手法より評価される。統計的手法は、過去の地震被害データより建物群を対象に作成された被害率曲線を用いて、評価建物の建築年や構造形式などの条件に適合する被害率曲線を選択して損傷確率を計算する手法<sup>例えば5)</sup>である。従って、被害率曲線は、建物群としての実被害結果を反映しているものの、建物の物理的な損傷指標（例えば層間変形角など）との関連性が不明確であり、被害率曲線を作成した地震以外への適用性を検証する必要がある。一方、解析的手法は、被災度ごとに損傷クライテリアを設定し、限界耐力計算法や地震応答解析により建物応答を計算し、両者の関係から地震損傷度曲線を作成する手法<sup>例えば6)</sup>である。このため、解析的手法では、損傷クライテリアの設定が重要になり、例えば、RC部材の実験結果に基づき、ひび割れ幅を用いて部材角を被災度ごとに推定する手法<sup>7)</sup>が提案されている。しかし、部材の信頼性と建物全体の信頼性の関係は、架構形式、規模、構造要素間の相関などに依存し、必ずしも一義的に定義できないのが現状である<sup>8)</sup>。従って、建物の地震損傷度曲線を評価するとき、統計的手法あるいは解析的手法を単独で用いるのではなく、両者の手法を組み合わせる相互に補完を行い、建物被害をより説明できる地震損傷度曲線を構築する必要がある。1995年1月の兵庫県南部地震は、多くの建物に甚大な被害を与え

たので、地震動強さと建物被害率の関係を利用して、いくつかの被害率曲線が提案されている。被害率曲線の地震動指標としては、最大加速度や最大速度が採用されており、最大加速度では神田の手法<sup>9)</sup>、最大速度では林・宮腰の手法<sup>10)~15)</sup>や村尾・山崎の手法<sup>16)~18)</sup>がある。しかし、これらの被害率曲線は、兵庫県南部地震の地震動特性や建物被害率を算定する際の建物構成などを反映したものであり、この結果をそのまま地震リスク評価用の地震損傷度曲線として一般化することはできない。ただし、建物構成による影響を低減することは難しいが、兵庫県南部地震の地震動特性による影響は建物群に対する地震応答解析を組み合わせることにより低減することが可能となる。宮腰ら<sup>19)</sup>は、兵庫県南部地震における被害率曲線と、入力地震動レベルと建物の構造特性を関連付けた上で、地震応答解析により被害関数を解析的に求めて両者の関係について考察している。さらに、宮腰ら<sup>20)</sup>は、解析的アプローチにより兵庫県南部地震の被害率曲線を再現するとき、建物耐力のバラツキだけでなく、被害が生じる変形クライテリアのバラツキも考慮して被害関数の作成手法を提案している。しかし、建物耐力のバラツキによる応答層間変形角の分布が考慮されていないなど、今後の検討課題も残されている。

建物の地震損失を評価するときは、建物（躯体）被害のみならず、非構造部材や建築設備の被害などに対しても検討する必要がある。最近の地震被害を見ても、建物被害のみならず、天井の落下、窓ガラスの破損、エレベータの停止など、非構造部材や建築設備の被害事例が報告されている。例えば、2003年9月の十勝沖地震では、空港ロビーの吊り天井が脱落して空港が機能停止状態に陥り、2004年10月の新潟県中越地震でも、体育館や公共ホールにおける非構造材の被害は深刻であった<sup>21)</sup>。2005年8月の宮城県沖を震源とする地震でも、プールの天井が落下し負傷者が発生している。2005年3月の福岡県西方沖地震では、建物の窓ガラスに大きな被害が発生し、営業を再開しながら改修工事が行われた<sup>22)</sup>。また、2005年7月の千葉県北西部を震源とする地震では、多数のエレベータが停止し、エレベータの閉じ込めも発生し救出までに最大3時間程度かかったとの報告もある。このため、地震後の建物としての機能性を維持するためには、建物の耐震安全性に加えて、非構造部材や建築設備の耐震安全性が重要となる。

建物の被害分析と同様に、地震被害データを用いて非構造部材や建築設備の耐震性能を統計的に検討することは、これらの被害率曲線を作成するためにも必要である。金子ら<sup>23)</sup>は、兵庫県南部地震の建物被害調査記録をもとに、非構造部材の被害の大きさと被害程度の間関係を整理し、非構造部材の被害を被災度1～3の3段階に分類することを提案している。神原ら<sup>24)</sup>は、2000年の鳥取県西部地震と2001年の芸予地震における建物被害と地震動強さの関係を調査し、非構造部材や建築設備に関して検討している。その結果、内外壁、窓ガラス、天井、床、扉や室内の被害は比較的多く発生

したが、空調設備、防災設備、屋上機器の被害は少ないことを示している。しかし、これらの結果は、計測震度6以下の地域における地震被害であり、計測震度が6を超えるような地震動強さと建物被害の関係については検討されていない。金子ら<sup>25)</sup>は、さまざまな非構造部材について文献調査を行い、既往の耐震実験結果を整理している。つぎに、耐震性能に基づいて非構造部材を4種類に分類し、被災度と層間変形角との関係を示している。出口ら<sup>26)</sup>は、建築設備の中から、地震直後に機能維持が要求される自家発電設備に着目し、兵庫県南部地震の被害調査と最大速度の関係を用いて自家発電設備の被害関数を作成している。このように、既往研究では、非構造部材や一部の建築設備を対象に地震被害データを用いて耐震性が評価されているが、全般的な建築設備の被害率曲線としては提案されていない。

地震時における建物の期待損失額は、被災度ごとに求められる建物の損傷確率に補修費用を乗じることにより評価されるので、小破、中破などの被災度に対する補修費用の設定が地震損失を評価するうえで重要となる。建物の地震損失評価法として、イベントツリー解析<sup>27), 28)</sup>などを用いて多数の損傷モードの発生確率を解析的に求めて各々の損傷モードに対して補修費用を設定するケースと、過去の地震被害データに基づき補修費用を経験的に設定するケースがある。前者の手法では、多数の損傷モードに対する補修費用から建物の損失分布が評価されるが、地震被害との整合性を検証しておく必要がある。一方、後者の手法では、構造形式などに応じた建物の補修費用を、過去の地震被害データを用いて容易に決定できるが、地震被害データは限定的であり、対象建物の特性を反映させた補修費用を設定するには工夫を要する。従って、いずれの手法を用いるにしても、地震被害データより求められる建物の補修費用を、できる限り詳細に分析しておく必要がある。神田ら<sup>29), 30)</sup>は、兵庫県南部地震で被災した210棟の建物を対象に、補修時の建築工事費および総工事費、あるいは躯体工事費および総工事費が既知のデータから、建築工事費および躯体工事費の総工事費に対する比率を評価している。HAZUS<sup>6)</sup>では、新築費用に対する建物の補修費用の比率を、小破2%, 中破10%, 大破50%で与えているが、個別建物の補修費用は評価者が建物状況などを判断して設定することになっている。このように、現状では、工事別の補修費用は詳細に検討されていないが、躯体工事費だけでなく仕上げ工事費や設備工事費などの補修費用の構成比が評価されると、何の補修工事に費用を要するかがわかり費用対効果の高い地震対策を実施できる。

地震時に建物被害が生じると、建物や什器などの直接被害に加えて、代替施設の確保ができない限り、建物の補修期間中において事業中断による間接被害が生じる。建物用途によっては、直接被害よりも間接被害の方が大きくなる可能性もあり、建物の補修費用のみならず補修期間も地震リスクを評価するうえで重要となる。最近では、大地震が発生したときでも、企業などに対して事業の継続性が求められており、予め

特定された重要業務については、事業継続計画を策定する際に目標復旧時間および目標復旧レベルの設定が必要になっている<sup>31) ~34)</sup>。重要業務の目標復旧時間を決定するには、建物の補修期間が必要となる。建物の補修期間は、被災度レベル、建物規模、構造形式、建物用途、建物の重要度などに加えて、建設地周辺におけるインフラ施設の復旧、建設会社の対応能力など、さまざまな要因により影響を受けると考えられる。従って、建物の補修期間を被災度などの条件を用いて解析的に予測することは難しく、むしろ地震被害データを利用して建物の補修期間を予測する手法が有効となる。文献<sup>35)</sup>では、兵庫県南部地震で大破した公共建物を対象に、層崩壊した層の解体工事および補修工事の内容、補修工事の期間を調査している。飯場ら<sup>36)</sup>は、2004年10月の新潟県中越地震で被災した病院を対象に、機能回復までの時間および建物の完全復旧までの時間について、地震発生後の経過日数と累積人工の関係などを詳細に調査している。HAZUS<sup>6)</sup>では、28種類の建物用途に対して被災度別に、建物の物理的な補修期間、資金調達や設計を含んだ建物の復旧期間ならびにビジネス中断期間の係数が設定されているが、建物規模や構造形式などの指標と建物の補修期間の関係などについては言及されていない。このように、個別の事例については地震後の補修期間が検討されているが、建物の補修期間の予測法は一般化されていない。

建物の地震リスクは、建設地の地震ハザード評価と建物の地震損失評価の両者に基づき計算されるが、地震ハザード評価法は既にさまざまな形<sup>1) ~4)</sup>などで提案されている。地震に対する建設地の地震動特性は、震源特性、伝播特性、地盤特性の重ね合わせにより決定される。地震ハザード解析を行うとき、建設地の地震動強さは、距離減衰式を用いて計算されることが多く、最大加速度や最大速度などの地震動指標と年超過確率の関係が出力される。しかし、建物の地震損傷度曲線を評価するには、地震動に対する建物応答が必要となり、最大加速度や最大速度などの地震動指標の情報だけでは建物応答を評価することはできない。このため、石田ら<sup>37)</sup>は、地震環境や地盤増幅を考慮して地表における応答スペクトルを確率論的に評価する手法を示し、地表の一樣ハザードスペクトルを入力として等価線形化法に基づいた応答スペクトル法により建物の地震リスク評価法を提案している。高橋<sup>38)</sup>は、時刻歴解析を伴わない簡易なシュミレーションモデルによる地震リスク評価法を提案し、その適用例を示している。一例として、国土数値情報に基づき表層地盤の影響を考慮できる距離減衰式を用いて、応答スペクトルを作成している。また、高橋ら<sup>39)</sup>は、地震リスクを評価する際の地震動として、震源パラメータや断層破壊面のサイズを与えて地震基盤面における地震動を統計的グリーン関数法により生成し、表層地盤モデルに入力して地表面の地震動を作成している。神田ら<sup>40)</sup>は、あらかじめ指定した超過確率に対応する波を断層モデルによる予測地震動から選択し、これらの地震動を震源域やマグニチュードで分類して共通の特性を有しているかどうかの分析を行い、各分類ごとに共通の特性を有する模擬地震動を作成する方法を提案している。このように、既往研究では、応答スペ

クトルや一様ハザードスペクトルを用いて建物応答を評価する手法や、断層モデルを用いて超過確率に対応する地震動を作成する手法などが提案されている。応答スペクトルを用いる手法では、多質点系の特定層への変形集中が十分に表現できず、層崩壊が起きるケースでは地震損失の評価精度が低下するなどの問題点がある。一方、断層モデルを用いる手法では、現状では断層パラメータを特定できる地震は限定されていることや、断層パラメータの推定幅などが検討課題となっている。

建物の損傷クライテリアならびに補修費用の設定は、地震リスクを評価するうえで重要な要素となる。高橋<sup>38)</sup>は、応答スペクトルを用いて限界耐力計算法により建物の地震応答予測を行い、応答値を fragility 曲線および機能復旧曲線に適用して地震リスクを評価している。高橋ら<sup>39)</sup>は、統計的グリーン関数法から作成された地震動に対して建物の応答値を求め、構造部材、変形依存型非構造部材（仕上げなど）、加速度依存型非構造部材（設備など）に対して、HAZUS<sup>6)</sup>の損傷クライテリアを参考に地震損傷度曲線を作成している。このように、建物の損傷クライテリアや補修費用の設定では HAZUS<sup>6)</sup>の手法が参考にされるケースが多いが、その設定根拠などについては十分に検討されていないのが現状である。

建物の地震リスクの指標として、年損失期待値、地震予想最大損失率(PML)、地震ライフサイクルコストなどが用いられている。不動産証券化に伴うデュー・デリジェンス<sup>41)</sup>では、地震リスクの指標として、PML(Probable Maximum Loss)が用いられている。篠塚ら<sup>42)</sup>は、損失の年超過確率関数を用いて評価期間N年間の極値分布を定式化し、地震予想最大損失率(PML)を極値分布の平均値で与えることを提案している。村地ら<sup>43)</sup>は、地震リスクの指標としてPMLを設定し、PMLの算出に必要な地震活動情報、距離減衰式、地盤情報、建物被害モデルなどの入力データに関して最新の情報を与え、PML分析プログラムを作成している。坪田ら<sup>44)</sup>は、高橋による地震ライフサイクルコストの簡易分析手法<sup>38)</sup>に基づき、その実用化プログラムの開発を行っている。従って、地震リスク評価に基づき地震リスクマネジメントを実施する際には、その使用目的に応じて、適切な地震リスクの指標を選択する必要がある。

地震リスク評価の主な目的は、複数ある代替案の中から、最も効果的な地震リスク対策案を選択するための判断材料を提示することである。地震リスク対策は、リスク低減とリスク転嫁に大別される。リスク低減は、新築建物では耐震性能を向上させるため制震構造や免震構造を選択したり、既存建物では耐震補強などを実施することである。一方、リスク転嫁は地震保険に代表されるように、保有リスクを第三者に移転することである。

リスク低減では、耐震性能を高めるための初期投資が必要となるので、対策費用に供用期間中の損失額を加えた地震ライフサイクルコストを定義し、対策案の費用対効果をライフサイクルコストの観点から評価する研究が行われている。小波ら<sup>45)</sup>は、建物内の地震被害として、①構造部材の被害、②外壁面・各種仕上材の損傷、設備機器

の故障、非構造部材の被害、③家具、備品の転倒による内容物の被害、④修繕期間中の業務障害による経済被害を対象に総被害コストを試算している。しかし、検討で用いた被害コスト率の設定に関しては、今後さらに精度向上が必要であるとしている。塚田ら<sup>46)</sup>は、耐震建物と免震建物の地震ライフサイクルコスト（＝新築費用＋地震時の期待損失額）を比較し、建設費に比べて設備費の比重が高い建物や、家具・什器など守るべき価値が大きい建物ほど免震建物が有利であることを示している。佐藤ら<sup>47)</sup>は、従来の歴史地震データに基づく確率モデルに活断層データによる確率モデルを組み合わせた地震危険度解析を開発し、さらに地盤増幅係数、損失費用モデルを考慮して総費用最小化による最適信頼性を算定するまでの一連の設計荷重算定フローを提案している。神田ら<sup>48)</sup>は、新築費用に地震時における期待損失費用を加えて総費用を定義し、限界状態設計の枠組のなかで総費用最小化原則を用いた最適信頼性指標を定式化している。この中で、安全性を高めるための新築費用の増加は比較的容易に定量化され、地震危険度の低い地域では、その上昇率も低くなることが示されている。手塚ら<sup>49)</sup>は、構造形式による建設工事費と地震損傷により発生する修復費用の合計を総耐震コストと定義し、総耐震コストを最小化する構造形式を具体的な建物（耐震構造、制震構造、免震構造）で比較し、長寿命建物に適する構造形式について考察している。

リスク転嫁では、地震保険の引き受け能力に限界があるため、最近では、リスクの証券化やリスクスワップなど代替的リスク移転（ART）手法に関する研究も行われている。福島ら<sup>50)</sup>は、地震保険はその引受能力の減少および引受条件の厳しさによりリスク移転の手法としては限界があるため、地震リスクの資本市場移転手法として新たに証券化を取り上げ、証券化に必要な項目の定量的な評価手法を提案し、リスク移転の効果をリスクヘッジ側とリスクテイク側の両者の観点から評価できることを示している。矢代ら<sup>51)</sup>は、代替的リスク移転手法としてリスクスワップを取り上げ、自治体における地震災害復旧費用の調達、事業体の地震災害復旧資金、運転資金調達を目的として、リスクスワップの役割および成立条件を整理している。その結果、地震リスクスワップが成立する条件は、地震危険度の差に影響され、地震危険度の差が大きいほど条件設定の範囲が狭くなることなどが示されている。高橋<sup>52)</sup>は、地震対策の普及促進を目的とする一手法として、地震対策を実施しても地震が発生しなかった場合、費用の一部あるいは全部を補填するデリバティブを提案している。デリバティブ手法として、スワップ取引とオプション取引の2種類を設定して検討を行い、スワップでもオプションでも地震の発生確率が高いほど、没収金額やオプション料が安くなるという好ましい性質があることを示している。西川ら<sup>53)</sup>は、地震リスクの証券化などでは、支払い基準として地震の発生位置と地震規模など客観的な値（パラメトリックトリガー）が採用されているが、この指標を用いると実際の損失額と補填額との乖離によるベシスリスクが存在することを指摘している。このため、損失に基づいたトリ

ガーとパラメトリックトリガーの両者の特徴を有するリスクファイナンス手法を構築してベシスリスクを低減し、過度の補填を避けることによりリスクテイク側のリスクを大幅に低減できることなどを示している。

さらに、地震ライフサイクルコストを評価するとき、従来からのリスク低減のみならず、リスク移転も考慮した検討も行われている。福島ら<sup>54)</sup>は、ライフサイクルコストを最小化することを条件とした期待総費用最小化に基づき、耐震性能レベルを向上させるリスク低減のみならずリスク移転（地震保険と地震リスクの証券化の2種類を設定）も考慮して、25棟の建物からなるポートフォリオを例に検討を行っている。その結果、リスク低減とリスク移転を組み合わせることで、これらを単独で適用するよりもライフサイクルコストが低減でき、また供用年数により採用すべきリスクマネジメント手法が異なり、供用年数が長いほどリスク低減が有利になり、逆に供用年数が短いほどリスク移転が有利になることが示されている。諏訪ら<sup>55)</sup>は、地震リスクマネジメントの手段として、耐震建物、免震建物、耐震建物に住宅向けの地震保険を付保した3ケースを設定して、建物の地震ライフサイクルコストを比較検討している。その結果、地震ライフサイクルコストは、耐震建物に地震保険を付保しても耐震建物とほぼ同等か高くなり、供用期間が長くなるに従い、新築費用は耐震建物よりも高いが免震建物が最も地震ライフサイクルコストを安くできることを示している。

地震保険を考慮した地震ライフサイクルコストを評価するには、受け取る保険金に対して支払う保険料の設定が重要になる。日本の地震保険は、住宅向けと企業向けに大別される。住宅向けの地震保険は、保険会社の再保険を国が負担する形になっているが、企業向けの地震保険は保険会社がさらに再保険会社に依頼することが多い。従って、現状の企業向けの地震保険では、給付反給付の原則<sup>56)</sup>は成立せず、支払う保険料が受け取る保険金よりも割高になる傾向がある。この原因として、地震被害の発生確率や支払い件数にバラツキが大きく、保険会社のリスク回避の指向が強いと考えられる。現状、リスク回避の手法として、地震保険料を年損失期待値の係数倍で設定する方法<sup>54)</sup>もあるが、係数倍することによるリスク回避の程度については定量的に検討されていない。

地震リスクのバラツキを減少させる一手法として、ポートフォリオ（複数建物）を対象とした地震リスク評価法が提案されている。中村ら<sup>5)</sup>は、ポートフォリオ地震リスクの特長として、多数の建物を対象にすることにより大数の法則により不確実性の低下を期待できること、および地震被害は広域的な相関を持つため、同時に被害を受けないだけの距離を置いた建物を対象とする、いわゆるリスク分散による効果があることを指摘している。石川ら<sup>57)</sup>は、ポートフォリオ地震リスクを解析するとき、地震動強さの不確定性と建物損失の不確定性を分離した形で評価し、リスク低減効果としては、建物が互いに離れていることによる効果が、建物の独立性に起因する効果より

も相対的に大きいことを示している。諏訪ら<sup>58), 59)</sup>は、確率論的地震ハザード評価で用いられているものとほぼ同等な地震データセット<sup>3), 4)</sup>の中から、建設地周辺における多数の地震を抽出し、それぞれの地震に対して複数建物の損失分布を計算して、対象とした全ての地震に対する損失分布を集積してポートフォリオ地震リスクを評価している。

ポートフォリオを対象とした地震リスクを評価するとき、建物間における損失発生 の相関性が重要になる。一般的に、ポートフォリオの地震リスクを評価するときは、損失発生 の相関性を独立と仮定するケースが多いが、伝播特性のバラツキなど、完全に独立と仮定できない場合も存在する。このため、諏訪ら<sup>60)</sup>は、ポートフォリオ地震 リスクを評価するときには、個々の建物における損失発生 の相関性が重要であることを指摘し、損失発生が完全相関と独立の2種類を設定して、損失発生 の相関性がポ ートフォリオ地震リスク曲線に与える影響を定量的に評価している。西嶋ら<sup>61)</sup>は、従来 の期待総費用最小化原則を発展させて、複数建物の最適設計を行う場合に互いに隣接 する建物間の荷重相関を考慮して、建築物ポートフォリオの最適設計原理としての許 容限界超過確率最小化原理を提案している。林ら<sup>62)</sup>は、ポートフォリオ地震リスクを 評価するとき、建物の配置状況のほかに地震動強度の空間的な相関性があることを指 摘し、距離減衰式から計算した地震動強さの不確定性を、地震間のバラツキと地震内 のバラツキに分離し、地震内のバラツキは離間距離に応じた相関を与えて、ポ ートフ ォリオ地震リスクの検討を行っている。平岩ら<sup>63)</sup>は、2棟の建物を対象に、応答と耐 力が対数正規分布に従う場合の同時破壊確率を計算し、建物ごとに算出した破壊確率 との比較検討を行っている。このように、ポートフォリオを対象とした地震リスク評 価は実施されているが、地震動評価に伴う不確定要因を分離した上で、不確定要因に よる相関性を考慮した検討は行われていない。

以上、既往研究を整理し、現状における課題点を指摘した。

このような背景を踏まえ、本論文では、限定的ではあるが現実の建物被害を反映し ている、1995 年 1 月 17 日の兵庫県南部地震における地震被害データに着目し、以下 の項目に対して建物の地震損失評価法を構築する。

- ・兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線に基づいた損傷クライテリアの評 価
- ・兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線の評価
- ・兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建物の補修費用の評価
- ・兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建物の補修期間の評価

これらの成果に基づき、建物の地震リスク評価法を構築する。さらに、建物間の離 間距離による相関性を考慮したポートフォリオの地震リスク評価法を構築し、効用関 数を用いた地震保険料を評価する。



## 1.2 本研究の構成と概要

本論文の全体構成を、図 1.1 に示す。

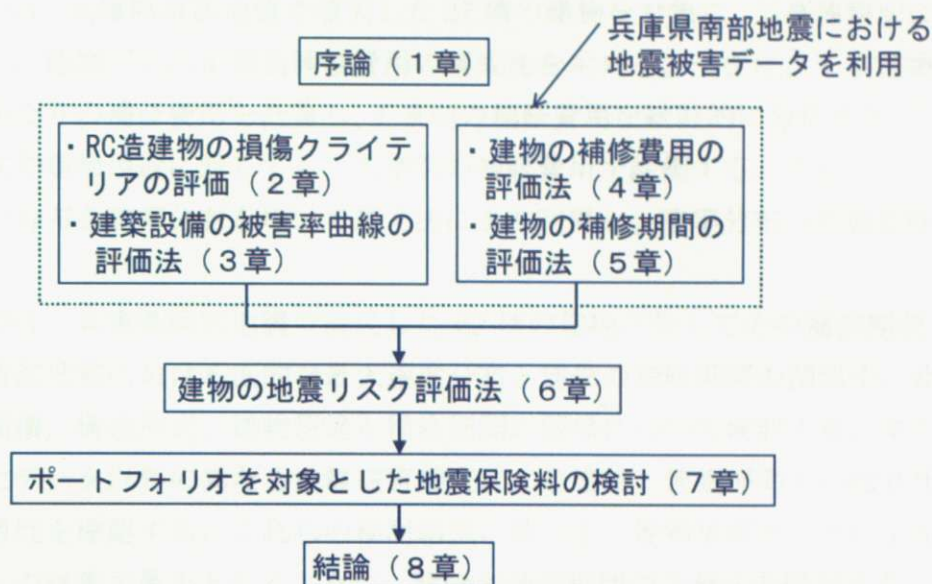


図 1.1 論文の全体構成

2章では、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線に、RC 造建物群モデルに対する地震応答計算を組み合わせ、被害率曲線を再現できるように RC 造建物の損傷クライテリアを評価する。まず、既往の兵庫県南部地震における被害率曲線を整理し、異なる評価手法（林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法）や異なる被災度（自治体の調査方法、建研の調査方法、構造的被災度）による影響について検討し、被害率の逆転現象が生じないように被害率曲線の対数標準偏差を全ての被災度に対して固定し、被害率曲線の中央値を補正する。つぎに、兵庫県南部地震で観測された地震動に対して RC 造建物群モデルを対象に地震応答解析を行い、RC 造建物群モデルの応答層間変形角の中央値と対数標準偏差を計算する。そして、RC 造建物の被害率曲線を再現できるように、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差を信頼性理論に基づき評価する。

3章では、建物の機能性に着目し、兵庫県南部地震で被災した 156 棟の建物に対する建築設備の地震被害データを用いて、建築設備の耐震性能を被害率曲線に基づき評価する。建築設備は、空調設備、衛生設備、電気設備、防災設備および輸送設備に区分されるが、本研究では、空調設備、衛生設備、電気設備および防災設備の一部（スプリンクラー）に対して検討する。まず、兵庫県南部地震における地表面最大速度の面的推定を行い、地表面最大速度と建築設備の被害結果の関係を利用して、二項分布を用いた最尤法により、地表面最大速度を地震動指標とした建築設備の被害率曲線を作成する。つぎに、建物の建築年、構造形式、建物階数の相違による被害率曲線の中央

値への影響や、RC 造建物の被害率曲線と建築設備の被害率曲線との相互比較を行う。さらに、地表面最大速度と建物の応答加速度や応答層間変形角の関係をj用いて建築設備の被害率曲線を再評価し、建築設備の限界加速度や限界層間変形角を評価する。

4 章では、兵庫県南部地震で被災した 27 棟の建物を対象に、工事種類別に補修費用を調査し、建物ごとに工事別補修費用の構成比を求める。つぎに、工事種類ごとに単位面積あたりの補修費用を計算し、工事別の補修費用を統計的に分析する。このとき、構造形式や建物用途に対しても、工事別の補修費用を評価する。さらに、工事別の補修費用の分布を確率分布を用いて最尤法により回帰し、確率分布への適合性を検討する。

5 章では、兵庫県南部地震で被災した 62 棟の建物に対してその補修期間を調査し、兵庫県南部地震における面的な最大速度分布と建物の補修期間の関係や、建物階数、延べ床面積、構造形式、建物用途と補修期間の関係について検討する。また、本研究で用いたデータ以外の異なる地震被害調査による建物の補修期間との相互比較を行い、その適用性を確認する。これらの検討結果に基づき、地震被害データによる建物の補修期間との残差が最小となるように、建物の補修期間の予測法を提案する。

6 章では、兵庫県南部地震における地震被害データを用いて 2 章～5 章で得られた成果に基づき、建物の地震リスク評価法を構築する。まず、2 章で求められた RC 造建物を対象とした損傷クライテリアに基づき、各層の地震損傷度曲線を作成する。4 章で求められた建物の補修費用を用いて、地震損傷度曲線から計算される損傷確率に補修費用を乗じて建物の地震損失曲線进行评估する。さらに、5 章で求められた建物の補修期間を設定し、建物の地震補修期間曲線を提案する。これらの結果に基づき、建物の地震リスク曲線ならびに建物の地震補修期間リスク曲線进行评估する。そして、RC 造 10 階の建物を設定して地震リスクの評価例を示す。

7 章では、地震リスクのバラツキを低減させる一手法として、ポートフォリオを対象とした地震リスクに着目し、相関性を考慮したポートフォリオの地震リスク評価法を構築する。まず、地表面最大速度の推定に伴う不確定要因を、震源特性、伝播特性、地盤特性に分離し、2 地点間における地表面最大速度の相関性を、震源特性を完全相関、伝播特性を 2 地点間における離間距離による相関係数、地盤特性を独立にモデル化して、地震に対するポートフォリオの損失分布进行评估する。つぎに、地震リスク対策としてリスク転嫁に着目し、保険会社のリスク回避の傾向を効用関数を用いてモデル化し、効用関数に基づいた地震保険料の評価法を構築して、個別建物とポートフォリオを対象に地震保険料を計算する。さらに、地震リスク曲線を用いて効用関数と年超過確率の関係を求め、両者の関係についても評価する。

8 章では、2 章～7 章の研究成果をまとめ、今後の検討課題を示す。

## 1 章の参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：全国を対象とした確率論的地震動予測地図作成手法の検討，2005
- 2) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，2004
- 3) Yoshida, Imazuka and Mizutani：Seismic Risk Assessment Procedure for a System consisting of Distributed Facilities -Part two- Seismic Hazard Modeling, ICOSAR, 2001
- 4) 吉田 伸一，今塚 善勝，水谷 守：広域に存在する施設群に対する地震リスク評価（その2：地震ハザード評価），日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp. 41-42, 2001
- 5) 中村孝明，中村敏治：ポートフォリオ地震予想最大損失額(PML)評価，日本リスク研究学会誌12(2)，pp. 69-76, 2000
- 6) Federal Emergency Management Agency(FEMA)：HAZUS99 Technical Manual, 1999
- 7) 文野 正裕，前田 匡樹，長田 正至：部材の残存耐震性能に基づいた震災RC造建物の被災度評価法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 3, pp. 1447-1452, 2000
- 8) 日本建築学会：建築物の限界状態設計指針，2002
- 9) J. Kanda: Building Damages Due to the 1995 Hyogo Ken Nanbu Earthquake, University of Tokyo, 1997
- 10) 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率に基づく最大地動速度の推定，日本建築学会構造系論文集，第494号，pp. 59-66, 1997
- 11) 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，第502号，pp. 61-68, 1997
- 12) 宮腰 淳一，林 康裕，渡辺 宏一，田村 和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価，構造工学論文集，Vol. 43B, pp. 269-276, 1997
- 13) J. Miyakoshi, Y. Hayashi, K. Tamura and N. Fukuwa: Damage Ratio Functions of Buildings using damage data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSAR), pp. 349-354, 1998
- 14) 林 康裕，宮腰 淳一：兵庫県南部地震における被害率曲線，日本建築学会災害委員会，pp. 15-20, 1998
- 15) 林 康裕，宮腰 淳一，田才 晃，大野 義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能，日本建築学会構造系論文集，第528号，pp. 135-142, 2000

- 16) 村尾 修, 山崎 文雄: 構造・建築年を考慮した建物被害データに基づく灘区の地震動分布の再推定, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp. 141-148, 1999
- 17) 村尾 修, 山崎 文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第527号, pp. 189-196, 2000
- 18) 村尾 修, 山崎 文雄: 震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, pp. 185-192, 2002
- 19) 宮腰 淳一, 林 康裕, 田村 和夫: 被害データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 327-332, 1998
- 20) 宮腰 淳一, 神原 浩, 石井 大吾, 田村 和夫, 山口 亮, 名取 晶子, 吉村 昌宏: 建物耐力と変形性能のばらつきを考慮した被害関数の作成手法, 構造工学論文集, Vol. 51B, pp. 105-110, 2005
- 21) 川口 健一: 公共ホールの地震被害と内部空間の安全性, 日本建築学会大会 構造部門 (シェル・空間構造) パネルディスカッション資料, pp. 11-17, 2005
- 22) 井上 朝雄: 福岡西方沖地震における窓ガラスを中心とした被害と対策, BELCA NEWS, pp. 24-28, 建築・設備維持保全推進協会, 2006
- 23) 金子 美香, 神原 浩, 田村 和夫: 1995年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価, 日本建築学会技術報告集, 第17号, pp. 563-566, 2003
- 24) 神原 浩, 林 康裕, 田村 和夫: アンケート調査に基づく建物の非構造部材被害と地震動強さとの関係, 日本建築学会構造系論文集, 第578号, pp. 155-161, 2004
- 25) 金子 美香, 神原 浩, 田村 和夫: 非構造部材の耐震実験結果に基づく耐震性能の整理, 日本建築学会技術報告集, 第21号, pp. 39-44, 2005
- 26) 出口 嘉一, 辻本 誠, 河野 守: 建築設備機器の被害関数, 構造工学論文集 Vol. 47B, pp. 647-652, 2001
- 27) 水谷 守ほか: 地震リスクマネジメント (SRM) 手法による地震対策の定量評価 (その1) ~ (その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp. 99-104, 1996
- 28) M. Mizutani: Basic Methodology of Seismic Risk Management (SRM) Procedure, International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), pp. 1581-1588, 1998
- 29) 平川 倫生, 神田 順: 終局限界状態以前に発生する破壊時費用の評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 69-70, 1997
- 30) 神田 順 (代表): 損失費用モデルを用いた最適信頼性に基づく設計用地震荷重, 東京大学建築学専攻神田研究室, 1998
- 31) 内閣府 (防災担当): 事業継続ガイドライン 第一版, 2005
- 32) SEMI 日本地区BCM研究会: 事業継続マネジメント入門ー自然災害や事故に備える製

造業のためのリスクマネジメントー, 共立出版, 2005

- 33) 川合 廣樹: 企業の事業継続性と地震リスク, 震災予防, No. 201, 2005
- 34) 小林 誠 監修: 事業継続マネジメント(BCM)構築の実際, 日本規格協会, 2006
- 35) 日経アーキテクチュア: 現場報告・神戸市本庁舎2号館(崩壊した中間層より上を撤去、既存建物にS造を1層重ねる), pp. 156-161, 1996
- 36) 飯場 正紀, 福山 洋, 斎藤 大樹, 向井 智久, 鶏田 隆, 溜 正俊, 太田 俊也, 福島 順一, 小山 実, 長島 一郎: 平成16年新潟県中越地震における小千谷総合病院の地震応答に関する調査報告書, 建築研究資料No. 105, 独立行政法人 建築研究所, 2007
- 37) 石田 寛, 源栄 正人: 地盤増幅を考慮した一様ハザードスペクトルに基づく建築構造物の地震リスク評価手法, 日本建築学会構造系論文集, 第583号, pp. 23-30, 2004
- 38) 高橋 雄司: 簡易シュミレーションによる建築物の地震リスク分析, 構造工学論文集, Vol. 50B, pp. 453-463, 2004
- 39) 高橋 雄司, 正木 信男, 穴原 一範, 五十田 博: 地震危険度の高い地域の建物を対象とした地震リスク・マネジメント, 日本建築学会構造系論文集, 第591号, pp. 25-33, 2005
- 40) 神田 順ほか: シナリオ地震の生起確率を考慮した基準地震動策定に関する研究(その7) ~ (その10), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp. 29-36, 2006
- 41) 建築・設備維持保全推進協会(BELCA): デュー・デリジェンスとエンジニアリングレポート, pp. 97-104, 2004
- 42) 篠塚 正宣, 中村 孝明, 望月 智也: 極値統計理論を用いた地震時最大予想損失額の評価手法の提案, JCOSSAR論文集, pp. 25-32, 2000
- 43) 村地 由子, 坪田 正紀, 高橋 雄司, 浅野 美次, 安野 郷, 泉田 伸二, 谷垣 正治, 竹内 貞光: 建築物の地震予想最大損失(PML)分析プログラムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第22号, pp. 487-490, 2005
- 44) 坪田 正紀, 村地 由子, 高橋 雄司ほか: 限界耐力計算法を活用した簡易地震LCC分析プログラムの開発, 日本建築学会技術報告集, 第24号, pp. 67-72, 2006
- 45) 小波 佐和子, 岩田 衛, 田村 和夫, 和田 章: 建築物が寿命中に受ける総地震被害に注目した耐震設計に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第502号, pp. 165-171, 1997
- 46) 塚田 康夫, 木村 雄一, 河村 壮一: SRMによる免震建物のライフサイクルコスト評価, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 241-246, 1998
- 47) 佐藤一郎, 平川 倫生, 神田 順: 活断層を考慮した地震危険度解析と最適信頼性への応用, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp. 145-150, 1998
- 48) 神田 順, 平川 倫生: 限界状態設計における設計荷重のための最適目標信頼性指標,

- 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp. 39-46, 1999
- 49) 手塚 武仁, 平島 新一: 長寿命構造の総耐震コスト評価, 日本建築学会技術報告集, 第10号, pp. 67-70, 2000
- 50) 福島 誠一郎, 矢代 晴実: 地震リスクの証券化における条件設定に関する解析, 日本建築学会計画系論文集, 第555号, pp. 295-302, 2002
- 51) 矢代 晴実, 福島 誠一郎, 都築 充雄: 地震リスクスワップの成立性と条件設定に関する研究, 日本建築学会環境系論文集, 第586号, pp. 107-114, 2004
- 52) 高橋 雄司: 地震対策の普及促進を目的とする金融技術—地震が起きなければ対策費用を返還するデリバティブの提案—, 日本建築学会構造系論文集, 第602号, pp. 95-102, 2006
- 53) 西川 智, 福島 誠一郎, 矢代 晴実: 事業継続のためのリスクファイナンス手法の提案, 日本建築学会環境系論文集, 第607号, pp. 101-108, 2006
- 54) 福島 誠一郎, 矢代 晴実: リスク移転を考慮した耐震性能レベル設定の考え方, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, pp. 197-204, 2003
- 55) H. Suwa and M. Seki : A Comparison of seismic life cycle costs on earthquake resistant Building versus base isolated building, World Sustainable Building Conference (SB05), pp. 189, 2005
- 56) 多々納 裕一, 高木 朗義 編著: 防災の経済分析 リスクマネジメントの施策と評価, 剋草書房, 2005
- 57) 石川 裕, 奥村 俊彦, 武田 正紀: 複数建物の集積地震リスク評価, JCOSAR論文集, pp. 205-208, 2000
- 58) 諏訪 仁, 野畑 有秀, 関 松太郎: 複数建物の地震リスク特性に関する検討, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp. 434, 2002
- 59) H. Suwa, S. Yoshida, A. Nobata and M. Seki : Portfolio Seismic Risk Assessment for Buildings, International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), pp. 224-225, 2002
- 60) H. Suwa, A. Nobata and M. Seki : Evaluation of Portfolio Seismic Risk due to Different Allocations of Multiple Buildings, First International Conference of Urban Earthquake Engineering, Center for Urban Earthquake Engineering (CUEE), pp. 393-400, 2004
- 61) 西嶋 一欽, 神田 順: 建築物ポートフォリオのための最適設計手法, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp. 125-132, 2004
- 62) 林 孝幸, 福島 誠一郎, 矢代 晴実: 地震動強度の空間的な相関がポートフォリオの地震リスクに与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第600号, pp. 203-210, 2006

- 63) 平岩 良之, 高田 毅士: 2つの建物の同時破壊確率における相関性の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp. 5-6, 2006



## 2章 兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線に基づいた損傷クライテリアの評価

### 2.1 序

建物の地震リスクを評価するには、地震動強さに対する建物の地震損傷度を定量化する必要がある。建物の地震損傷度は、地震動強さを条件とした建物の損傷確率を用いて評価され、損傷確率は建物の応答分布と耐力分布の関係より計算される。建物の地震損傷度曲線は、地震動強さを逐次変化させて損傷確率を計算することにより求められる。既往研究において、建物の地震損傷度曲線は、大別して統計的手法や解析的手法より評価される。統計的手法は、過去の地震被害データより建物群を対象に作成された被害率曲線を用いて、評価建物の建築年や構造形式などの条件に適合する被害率曲線を選択して損傷確率を計算する手法<sup>(例えば1)</sup>である。被害率曲線は、建物群としての実被害結果を反映しているものの、建物の物理的な損傷指標（例えば層間変形角など）との関連性が不明確であり、被害率曲線を作成した地震以外への適用性を検証する必要がある。一方、解析的手法は、被災度ごとに損傷クライテリアを設定し、限界耐力計算法や地震応答解析により建物応答を計算し、両者の関係から地震損傷度曲線を作成する手法<sup>(例えば2)</sup>である。このため、解析的手法では、損傷クライテリアの設定が重要になり、例えば RC 部材の実験結果に基づき、ひび割れ幅を用いて部材角を被災度ごとに推定する手法<sup>3)</sup>が提案されている。しかし、部材の信頼性と建物全体の信頼性の関係は、架構形式、規模、構造要素間の相関などに依存し、必ずしも一義的に定義できないのが現状である<sup>4)</sup>。従って、建物の地震損傷度曲線进行评估するとき、統計的手法あるいは解析的手法を単独で用いるのではなく、両者の手法を組み合わせることで相互に補完を行い、地震被害をより表現できる地震損傷度曲線を構築する必要がある。

1995 年の兵庫県南部地震は、多くの建物に甚大な被害を与えたため、膨大な建物を対象に地震被害データが作成されている。このため、地震動強さと建物被害率の関係に基づき、いくつかの被害率曲線が既に提案されている。被害率曲線の地震動指標としては、最大加速度や最大速度が採用されており、最大加速度では神田の手法<sup>5)</sup>、最大速度では林・宮腰の手法<sup>6)~12)</sup>村尾・山崎の手法<sup>13)~15)</sup>がある。しかし、これらの被害率曲線は、兵庫県南部地震の地震動特性や建物被害率を算定する際の建物構成などを反映したものであり、この結果をそのまま地震リスク評価用の地震損傷度曲線として一般化することはできない。この中で、建物構成による影響を低減することは難しいが、兵庫県南部地震の地震動特性による影響は、建物群に対する地震応答解析を組み合わせることにより低減できる。宮腰ら<sup>16)</sup>は、兵庫県南部地震における被害率曲線と、入力地震動レベルと建物の構造特性を関連付けた上で、地震応答解析により被害関数を解析的に求めて両者の関係について考察している。このとき、解析パラメータとして、建物の被災度を



表現するため限界層間変形角と降伏ベースシア係数を用いている。その結果、地震被害データに基づいた半壊以上の被害率曲線を再現するためには、RC 造建物では、降伏ベースシア係数は 1.6~1.8 程度、限界層間変形角は 1/150~1/90 程度あることを示している。さらに、宮腰ら<sup>17)</sup>は、解析的アプローチにより兵庫県南部地震の被害率曲線を再現するとき、建物耐力のバラツキだけでなく、被害が生じる変形クライテリアのバラツキも考慮して被害関数の作成手法を提案している。その結果、変形性能のバラツキを考慮することにより、被害関数が緩やかに増加するようになり、既往の被害率曲線との対応が良いことを示されている。しかし、建物耐力のバラツキによる応答層間変形角の分布が考慮されていないなど、今後の検討課題も残されている。

2 章では、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線<sup>12)</sup>に基づき、RC 造建物群モデルに対する地震応答計算を組み合わせ、被害率曲線を再現できるように RC 造建物の損傷クライテリアを評価する。まず、既往の兵庫県南部地震における被害率曲線を整理し、異なる評価手法（林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法）や異なる被災度（自治体の調査方法、建研の調査方法、構造的被災度）による影響について検討し、被害率の逆転現象が生じないように被害率曲線の対数標準偏差を全ての被災度に対して固定し、被害率曲線の中央値を補正する。つぎに、兵庫県南部地震で観測された地震動に対して RC 造建物群モデルを対象に地震応答解析を行い、RC 造建物群モデルの応答層間変形角の中央値と対数標準偏差を計算する。最後に、RC 造建物の被害率曲線を再現できるように、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差を信頼性理論に基づき評価する。

## 2.2 兵庫県南部地震における建物の被害率曲線

兵庫県南部地震における建物の被害率曲線として、神田の手法、林・宮腰の手法、村尾・山崎の手法などが提案されている。被害率曲線を作成する際の地震動指標として、神田の手法は最大加速度を、林・宮腰と村尾・山崎の手法は最大速度を採用している。被害率曲線の地震動指標は、建物被害との相関性が高いことが必要となる。大井らは<sup>18)</sup>、被害率曲線を作成する際の地震動指標として、最大加速度、最大速度、平均加速度応答の3ケースを設定してRC造建物の被害率曲線を作成し、地震被害データから得られた被害率と被害率曲線から計算された被害率との誤差分析を行っている。この結果、地震動指標として、最大速度または平均加速度応答の地震動指標を用いると、全般的に建物の被害率との二乗誤差を小さくできることが示されている。このため、本研究では、地震被害結果との相関性が高い最大速度を指標とした、林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法による被害率曲線を対象に検討する。

ところで、被害率曲線を作成するには面的な最大速度分布が必要になるが、林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法では最大速度の推定方法が異なる。まず、両手法における被害率曲線の作成法を要約すると、以下のようになる。

### 2.2.1 林・宮腰による建物の被害率曲線

林・宮腰による建物の被害率曲線の評価フローを、図2.1に示す。  
まず、兵庫県南部地震における地震動を評価するため、神戸海洋気象台を含む六甲断層系とほぼ直交する断面で二次元地盤モデルを作成し、神戸海洋気象台での観測記録から基盤入射波を逆算している。そして、三宮地区を含む南北断面の大阪層群上面までの地盤モデルを作成し、逆算基盤波に対する応答を求めている<sup>6)</sup>。つぎに、三宮地区における再現地震動と低層建物の被害調査結果を用いて、最大速度と低層家屋被害との関係

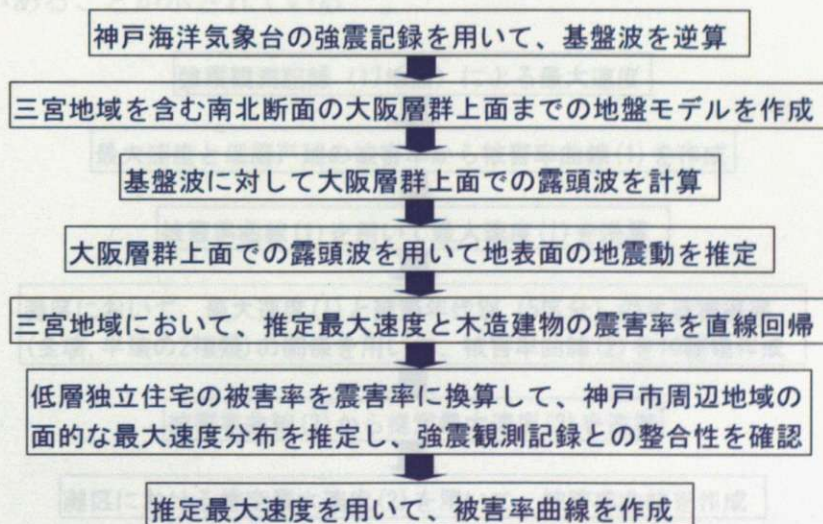


図2.1 林・宮腰による被害率曲線の評価法



式を構築している<sup>7)</sup>。この関係式と低層独立住宅の被害率を用いて神戸市周辺地域の最大速度を推定している。このとき、低層独立住宅以外の建物被害も含めて最大速度を再評価した結果、低層独立住宅のみを用いて推定された最大速度とほぼ対応していることを確認している<sup>8)</sup>。これらの検討結果に基づき、最大速度と建物用途、高さ別に調査された被害調査結果をもとに、建研の調査方法による建物の被害率曲線を構築している<sup>9)</sup>。さらに、建物の被災度定義が自治体の場合<sup>10)</sup>や、構造的被災度の場合<sup>11)</sup>の被害率曲線も作成されている。

## 2.2.2 村尾・山崎による建物の被害率曲線

村尾・山崎による建物の被害率曲線の評価フローを、図 2.2 に示す。

被害率曲線を作成するときの地震動強さとして、兵庫県南部地震における 17 地点の強震観測記録を用いている。まず、17 地点において、最大速度と強震記録が得られた周辺の低層独立住宅の被害率の関係を利用して、被害率曲線(1)を作成している。つぎに、被害率曲線(1)に基づき、低層独立住宅の被害率に対する最大速度(1)を逆算して、兵庫県南部地震における面的な地震動推定を行っている。神戸市灘区において、最大速度(1)と木造建物の被害率の関係を用いて、建築年代別(5 区分)および被災度別(全壊と半壊の 2 種類)の被害率曲線(2)を 10 種類作成し、被害率曲線(2)を用いて最終的な推定最大速度(2)を評価している<sup>13)</sup>。以上の検討結果より、灘区において、推定最大速度(2)と建物の被害率の関係を用いて、建物の被災度定義が自治体の場合の被害率曲線を作成している<sup>14)</sup>。また、建研の調査方法による被害率曲線も作成し、自治体の調査方法と建研の調査方法には、ほぼ、

- ・全壊率(自治体の調査方法)⇔中程度の損傷(建研の調査方法)
- ・半壊率(自治体の調査方法)⇔軽微な損傷(建研の調査方法)

の対応関係があることが示されている<sup>15)</sup>。

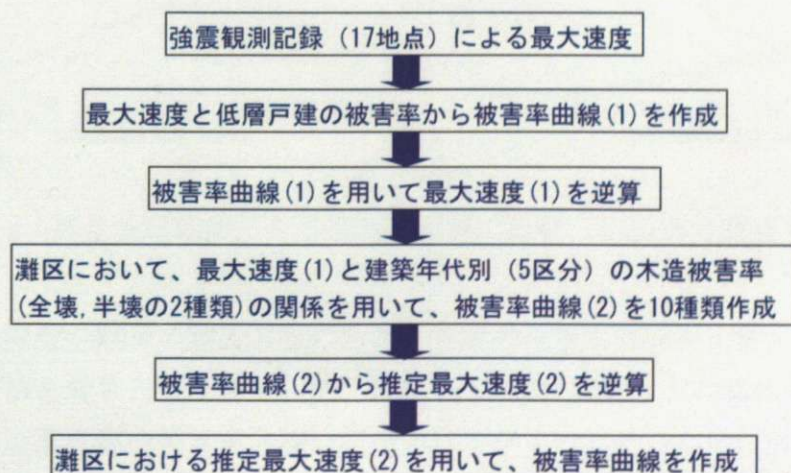


図 2.2 村尾・山崎による被害率曲線の評価法

## 2.3 RC 造建物の被害率曲線の比較

本研究の目的は、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線を再現できるように、建物の損傷クライテリアを評価することである。RC 造建物の被害率曲線は、2.2 節で述べたように、異なる評価者により提案されているのみならず、地震被害の調査目的により、以下に示すように異なる被災度が用いられている。

- ・自治体の調査方法：一部損壊，半壊，全壊
- ・建研の調査方法<sup>19)</sup>：軽微な損傷，中程度の損傷，全壊または大破
- ・構造的被災度<sup>20)</sup>：小破，中破，大破

このため、RC 造建物の被害率曲線を利用して損傷クライテリアを評価する前に、さまざまな被害率曲線の相互関係について検討する。

### 2.3.1 異なる評価法による被害率曲線の比較

林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法は、2.2 節で述べたように、兵庫県南部地震における地震動の面的推定方法および被害率曲線を作成する際に用いた建物被害データが異なるため、両者の被害率曲線が異なることが懸念される。このため、建物の被災度が、自治体の調査方法と建研の調査方法に対して検討する。

まず、被災度定義が自治体のとき、RC 造建物の被害率曲線を建築年代別に比較すると図 2.3 となる。図中において、手法 1 が林・宮腰の手法を、手法 2 が村尾・山崎の手法による被害率曲線を示している。半壊の被害率曲線では、両者に多少の違いが見られるケースもあるが、被害率曲線の中央値はほぼ一致しており、異なる評価法による被害率曲線の差異は小さいことがわかる。



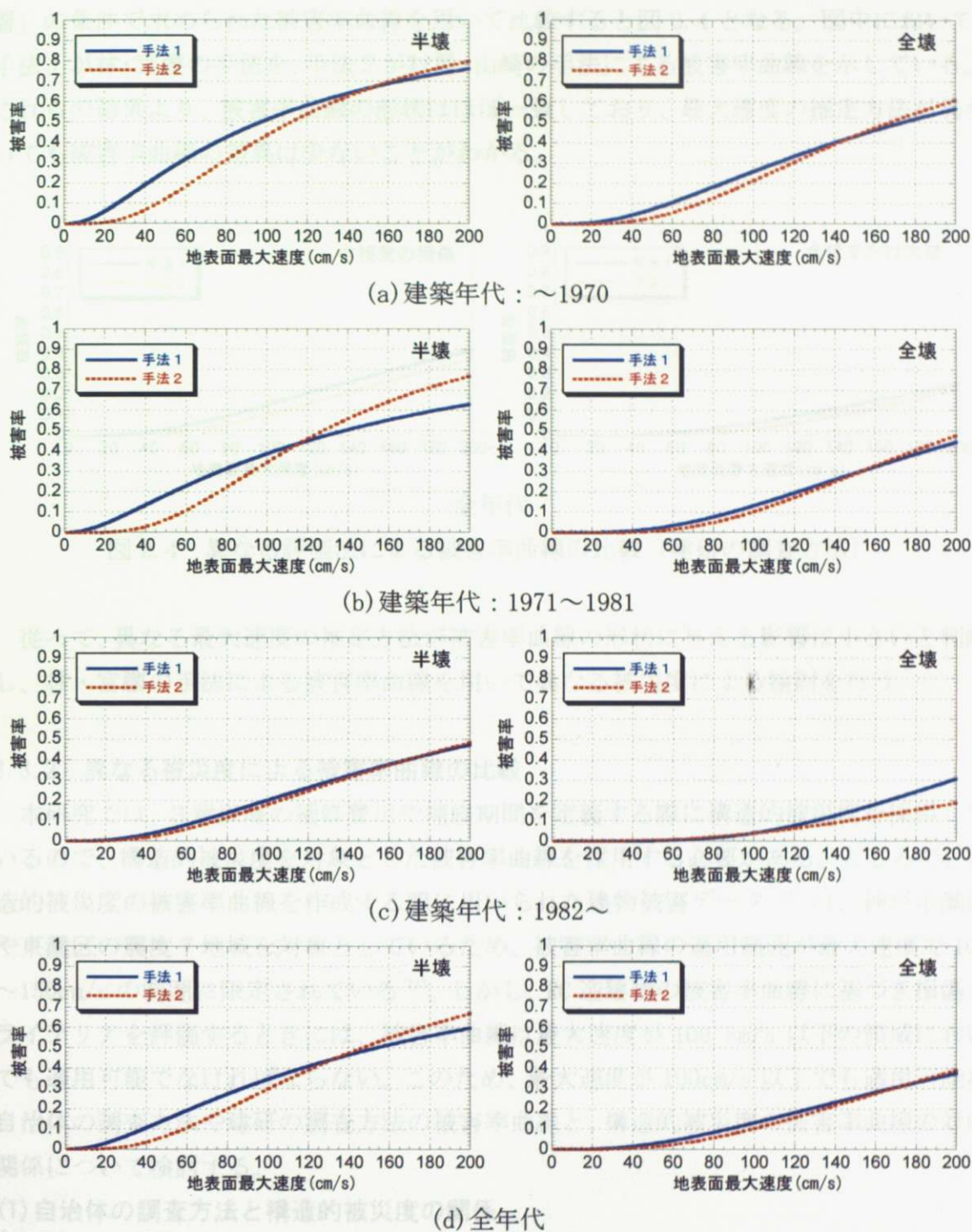


図 2.3 異なる評価法による被害率曲線の比較（自治体の調査方法）

つぎに、被災度が建研の調査方法のとき、両者の被害率曲線を比較する。このとき、建研の調査方法を対象とした林・宮腰の手法では、建物用途および建物高さ別に整理されており、構造形式別の被害率曲線は評価されていない。このため、RC 造建物に相当する建研の調査方法の被害率曲線として、建物用途が「集合住宅」で建物高さが「中高

層」の条件で求められた被害率曲線を用いて比較すると図 2.4 となる。図中において、手法 1 が林・宮腰の手法を、手法 2 が村尾・山崎の手法による被害率曲線を示している。これらの結果より、被害率曲線の形状はほぼ一致しており、最大速度の推定方法が異なっても被害率曲線の差異は少ないことがわかる。

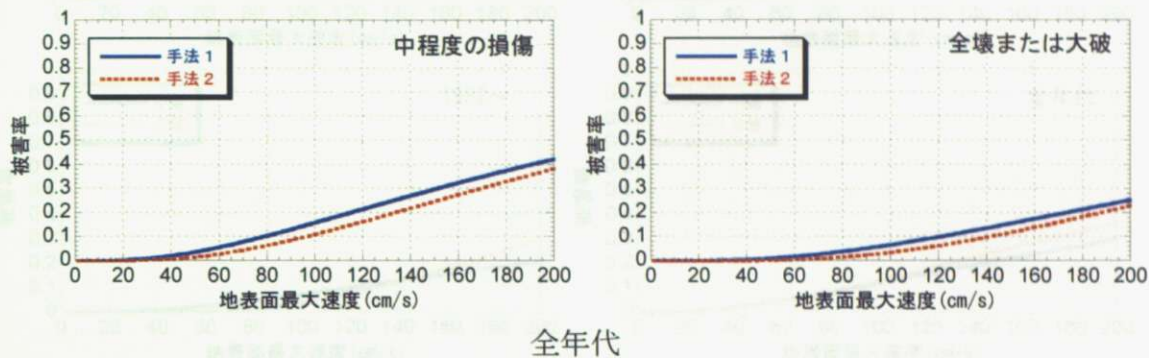


図 2.4 異なる評価法による被害率曲線の比較（建研の調査方法）

従って、異なる最大速度の推定方法が被害率曲線の形状に与える影響は小さいと判断し、林・宮腰の手法による被害率曲線を用いて異なる被災度による検討を行う。

### 2.3.2 異なる被災度による被害率曲線の比較

本研究では、3 章以降の補修費用や補修期間を定義する際に構造的被災度を採用しているため、構造的被災度を対象とした被害率曲線を採用する必要がある。ところで、構造的被災度の被害率曲線を作成する際に用いられた建物被害データ<sup>21)</sup>は、神戸市灘区や東灘区の震度 7 地域を対象としているため、被害率曲線の適用範囲が最大速度で 100～150cm/s の範囲に限定されている<sup>11)</sup>。しかし、RC 造建物の被害率曲線に基づき損傷クライテリアを評価するときには、被害率曲線は最大速度が 100 cm/s 以下の領域においても適用可能でなければならない。このため、最大速度が 100cm/s 以下でも適用可能な自治体の調査方法や建研の調査方法の被害率曲線と、構造的被災度の被害率曲線の対応関係について検討する。

#### (1) 自治体の調査方法と構造的被災度の関係

自治体の被災度と構造的被災度の被害率曲線を関係付けるため、両者の被害率曲線が概ね一致するような被災度レベルについて検討した。この結果、図 2.5 に示すように、

- ・全壊（自治体の調査方法）⇔小破（構造的被災度）

のとき、最大速度が 100～150cm/s の範囲外でも両者の被害率曲線は概ね一致していることがわかる。

RC 造建物の被害率曲線では、その適用範囲が震度 7 地域で 100～150cm/s の範囲に限定されているが、最大速度が 100cm/s 以下でも適用可能な自治体の調査方法および建研の



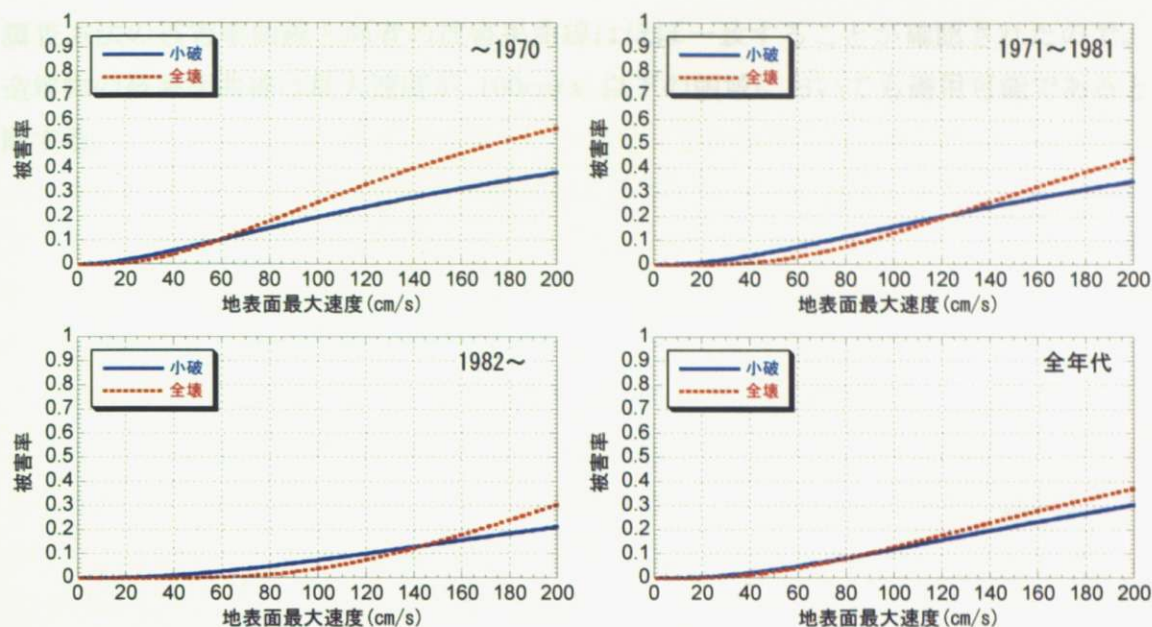


図 2.5 自治体の調査方法と構造的被災度の比較

## (2) 建研の調査方法と構造的被災度の関係

(1)と同様に、建研の調査方法による被災度と構造的被災度の被害率曲線を関係付けるため、両者の被害率曲線が概ね一致するような被災度レベルについて検討した。ただし、建研の調査方法の被害率曲線は、建物用途および階数高さ別に求められており、構造形式別には整理されていない。このため、RC 造建物に相当する建研の調査方法の被害率曲線として、建物用途が「集合住宅」で建物高さが「中高層」の条件で求められた被害率曲線を用いる。この結果、図 2.6 に示すように、

- ・ 中程度の損傷（建研の調査方法）⇔小破（構造的被災度）
- ・ 全壊または大破（建研の調査方法）⇔中破（構造的被災度）

のとき、両者の被害率曲線は概ね一致しており、林らの検討結果<sup>22)</sup>とも整合している。

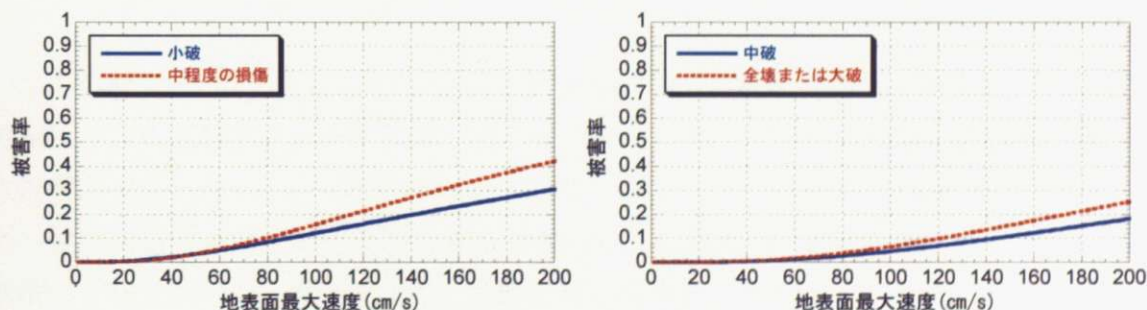


図 2.6 建研の調査方法と構造的被災度の関係

RC 造建物の被害率曲線では、その適用範囲が最大速度で 100~150cm/s の範囲に限定されているが、最大速度が 100cm/s 以下でも適用可能な自治体の調査方法および建研の

調査方法の被害率曲線と両者の被害率曲線はほぼ一致することが確認されたので、RC造建物の被害率曲線は最大速度が 100cm/s 以下の領域においても適用可能であると判断する。



## 2.4 RC 造建物の被害率曲線の補正

林・宮腰の手法による RC 造建物の被害率曲線は、建築年かつ建物階数が同一でも、被災度レベルが異なると被害率曲線のバラツキ（対数標準偏差）が異なっている。これは、建物被害データを建築年や建物階数別に分類すると、建物数が減少して被害率を算定する際の統計的不確定性が増加したことなどが考えられる。しかし、被害率曲線の対数標準偏差が異なると、最大速度の値によっては被害率の逆転現象が生じる可能性があり、地震損傷度を評価するときに不都合が生じる。このため、対象建物のデータ数が多くて統計的不確定性の小さい低層独立住宅を対象とした被害率曲線の対数標準偏差<sup>11)</sup>、<sup>18)</sup>や、RC 造建物の被害率曲線を目標に構造耐震指標を用いた地震損傷度曲線を作成する際の値<sup>22)</sup>を参考に、被害率曲線の対数標準偏差を建築年、建物階数、被災度に関係なく 0.6 に設定した。林・宮腰の手法による被害率曲線を  $F_h(V)$  としたとき、補正される被害率曲線  $F_m(V)$  の中央値を評価する。

$$F_h(V) = \Phi \left[ \frac{\ln V - \lambda_h}{\zeta_h} \right] \quad (2.1)$$

$$F_m(V) = \Phi \left[ \frac{\ln V - \lambda_m}{\zeta_m} \right] \quad (2.2)$$

ここに、 $\lambda_h$ ：林・宮腰の手法による被害率曲線の対数平均値

$\zeta_h$ ：林・宮腰の手法による被害率曲線の対数標準偏差

$\lambda_m$ ：補正される被害率曲線の対数平均値

$\zeta_m$ ：補正される被害率曲線の対数標準偏差

このとき、 $F_h(V)$  と  $F_m(V)$  を等値し、 $\zeta_m = 0.6$  に設定して補正される被害率曲線の対数平均値  $\lambda_m$  を求める。

$$\lambda_m = \ln V - \frac{\zeta_m}{\zeta_h} \times (\ln V - \lambda_h) \quad (2.3)$$

林らの研究<sup>12)</sup>によると、RC 造建物の被害率曲線は、神戸市灘区・東灘区内の震度 7 地域における地震被害データに基づき作成されているので、その適用範囲は、地表面最大速度が 100～150cm/s の範囲である。このため、対数平均値  $\lambda_m$  を求めるとき、(2.3) 式の地表面最大速度は、安全側を見て  $V=100\text{cm/s}$  に固定して評価した。ところで、建物階数および建築年で分類したとき、対象となる建物数が少ないと被害率曲線が評価されていない。この場合は、建物階数および建築年ごとに既に評価されている中央値の比率を用いて、被災度ごとの中央値を推定する。

補正された RC 造建物の被害率曲線の中央値を表 2.1 に、被害率曲線を図 2.7、図 2.8 に示す。表 2.1 において、

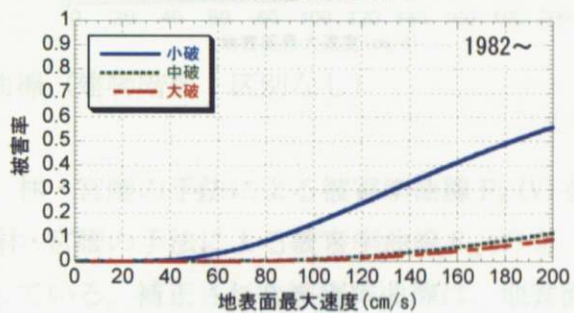
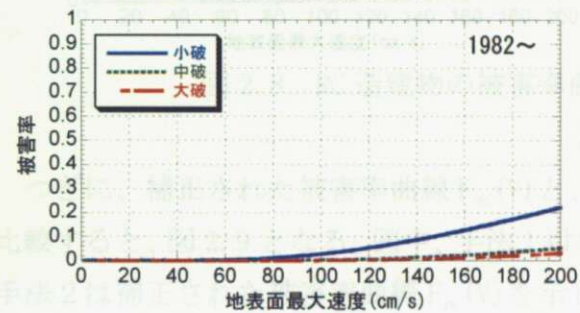
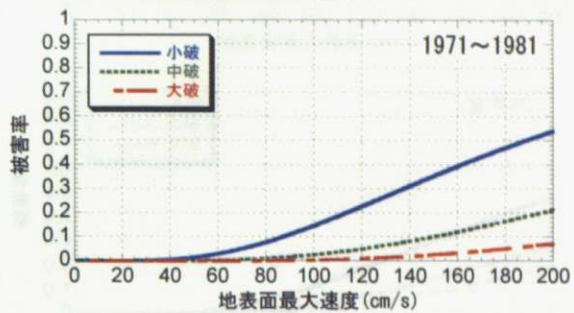
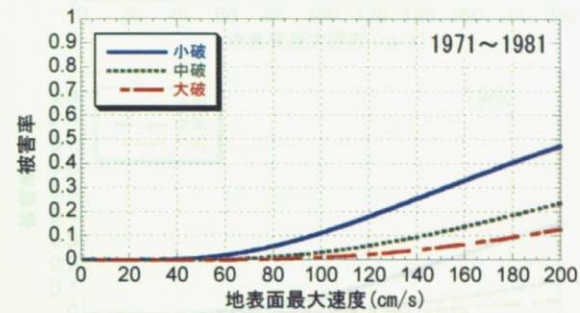
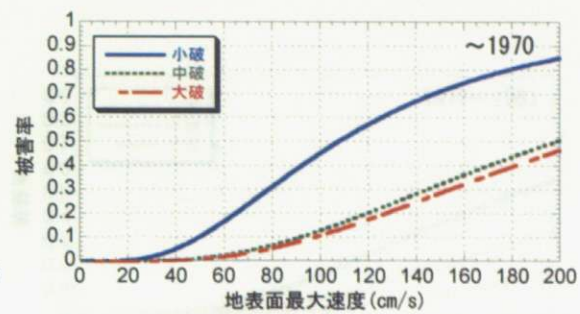
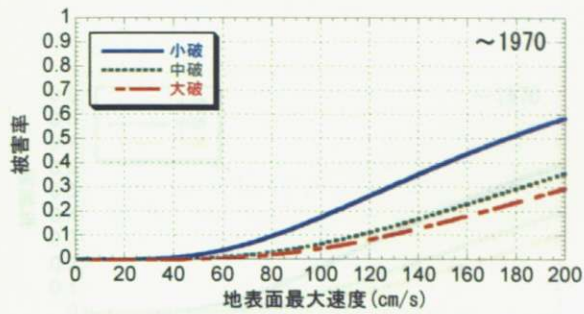
- ・建物階数：6～7階，建築年：～1970
- ・建物階数：8～12階，建築年：～1970
- ・建物階数：8～12階，建築年：1971～1981

の中央値は、建物階数が2～5階の中央値を用いて建築年による中央値の比率を求め、その比率を建築年が1982年以降の中央値に乗じて、建築年ごとの中央値を推定した。

建築年代別に被害率曲線を見ると、1982年以降のRC造建物の被害率は、他の建築年代よりも小さく地震被害調査結果<sup>21)</sup>と整合している。また、階数別に見ると、兵庫県南部地震の地震動特性により、建物階数が高いほど被害率が大きくなる傾向があり、8～12階の建物では建築年代が1982年以降の場合でも被害率が高いことがわかる。

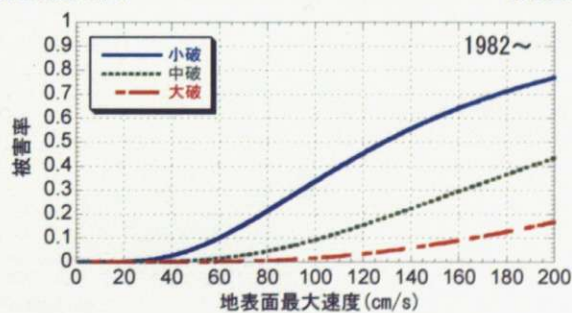
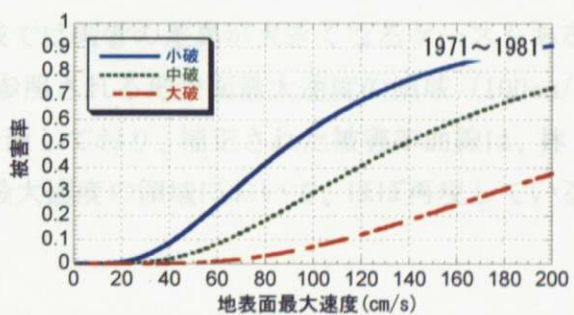
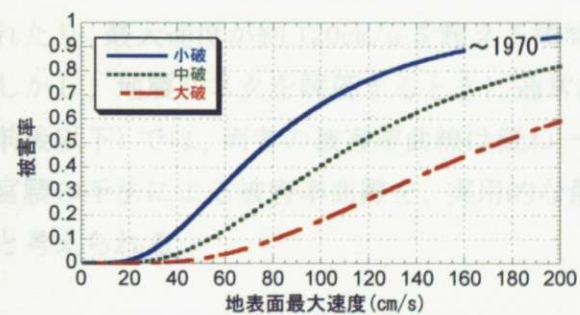
表 2.1 補正された被害率曲線の中央値 (cm/s)

	建物階数	建築年	小破	中破	大破
RC造建物 (ヒ・ロイを除く)	2階～5階	～1970	175.9	249.6	275.9
		1971～1981	208.5	308.0	395.4
		1982～	317.3	528.5	607.9
	6階～7階	～1970	101.5	192.5	202.4
		1971～1981	188.7	323.8	478.2
		1982～	183.1	407.5	445.9
	8階～12階	～1970	71.5	104.6	162.4
		1971～1981	84.8	129.0	232.8
		1982～	129.0	221.4	357.8
RC造建物	階数区別 なし	～1970	167.3	225.9	262.4
		1971～1981	183.1	252.1	343.8
		1982～	239.8	383.8	507.8
		全年代	202.4	278.7	330.3



(a) 建物階数：2～5階

(b) 建物階数：6～7階



(c) 建物階数：8～12階

図 2.7 RC 造建物の被害率曲線 (建物階数別)



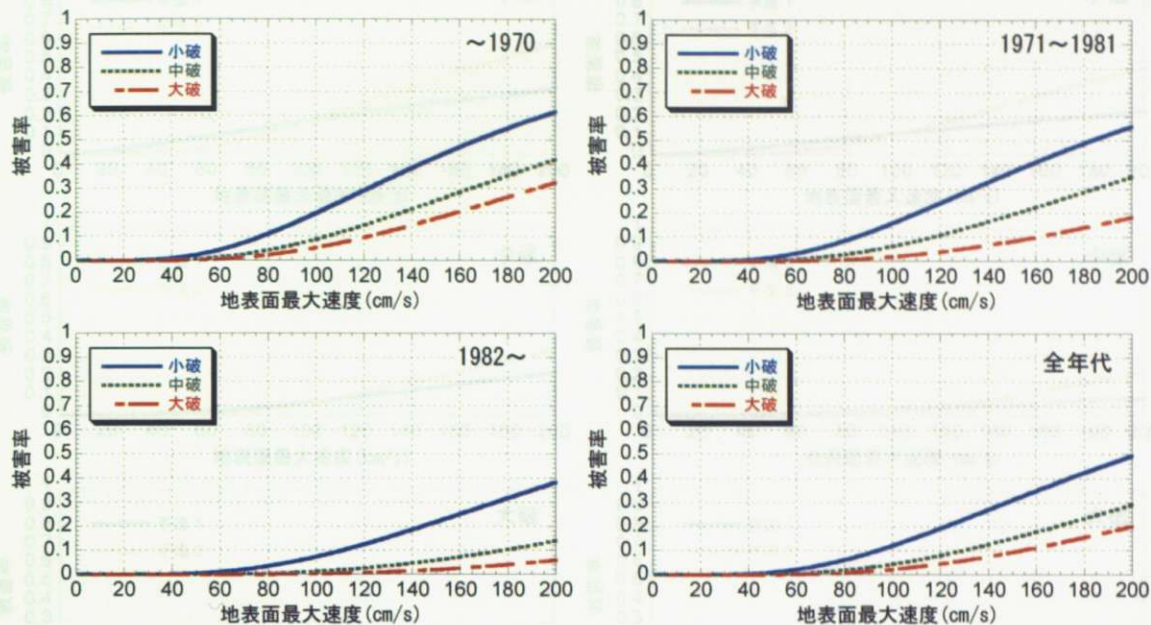
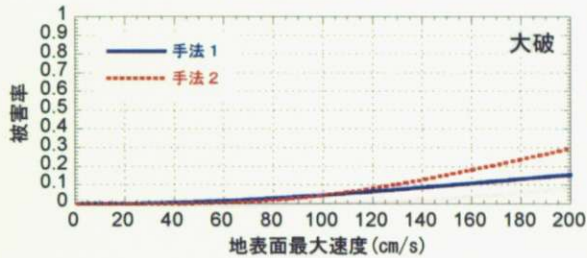
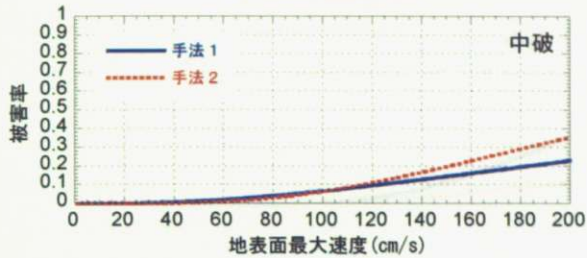
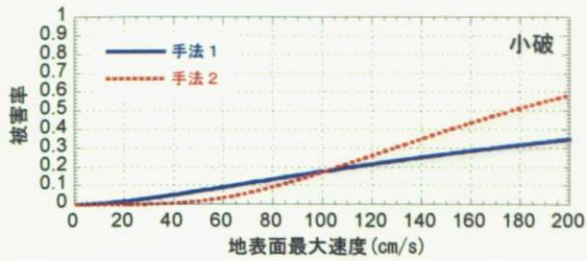


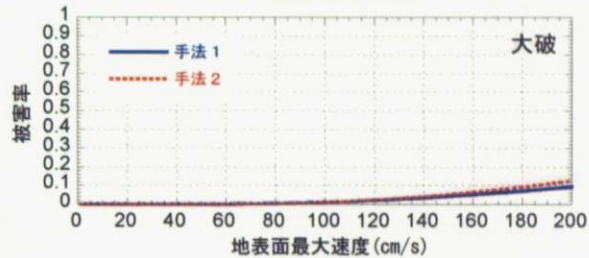
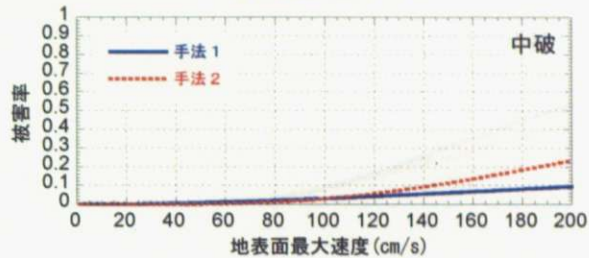
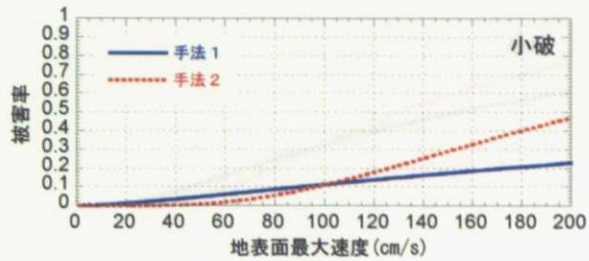
図 2.8 RC 造建物の被害率曲線（建物階数：区別なし）

つぎに、補正された被害率曲線  $F_m(V)$  と、林・宮腰の手法による被害率曲線  $F_h(V)$  を比較すると、図 2.9 となる。図中、手法 1 は林・宮腰の手法による被害率曲線  $F_h(V)$  を、手法 2 は補正された被害率曲線  $F_m(V)$  を示している。補正された被害率曲線は、地表面最大速度が 100cm/s のときに林・宮腰の手法による被害率曲線に一致するように中央値を求めているので、最大速度が 100cm/s 前後で両者の被害率曲線が交差する現象が見られたり、最大速度が約 120cm/s を超える領域では両者の差異が大きくなるケースもある。しかし、地震リスクを評価するときに通常参照される地表面最大速度の領域（100cm/s 前後以下）では、両者の被害率曲線は概ね一致しており、補正された被害率曲線は、林・宮腰の手法による被害率曲線を、実用的な最大速度の領域において、ほぼ再現していると考えられる。

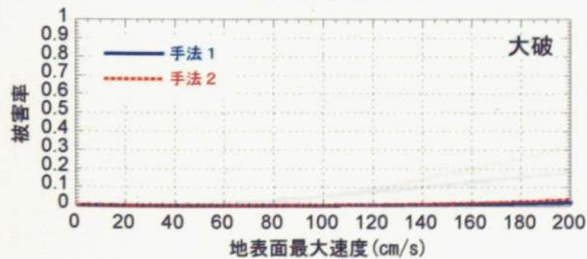
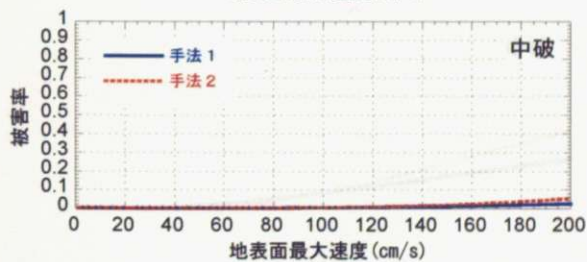
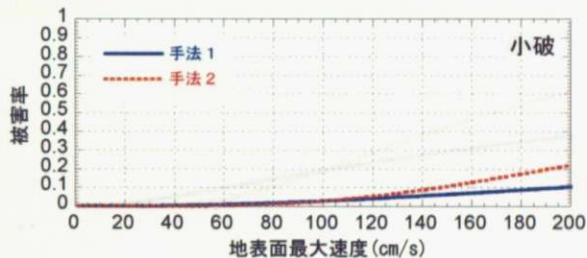




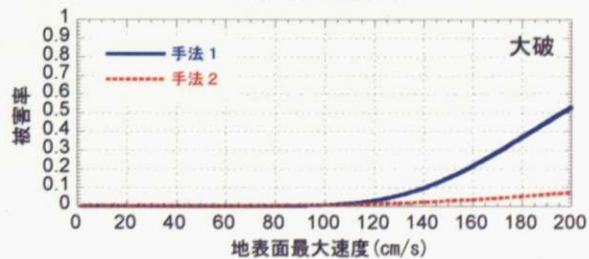
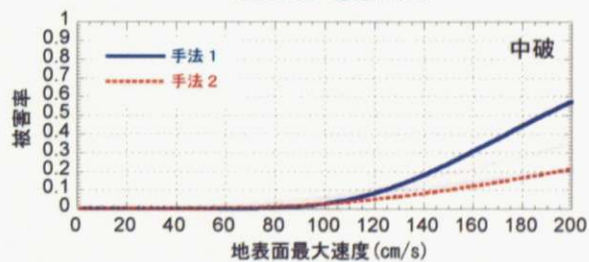
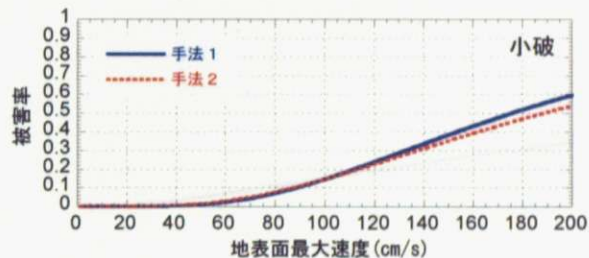
(a) 2~5 階, 1970 年以前



(b) 2~5 階, 1971~1981 年

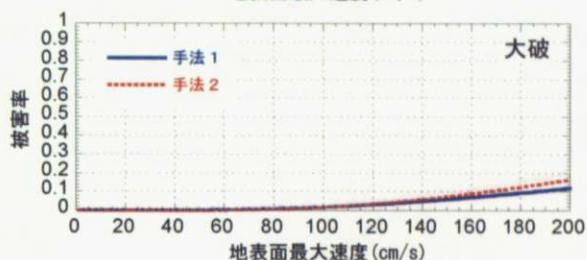
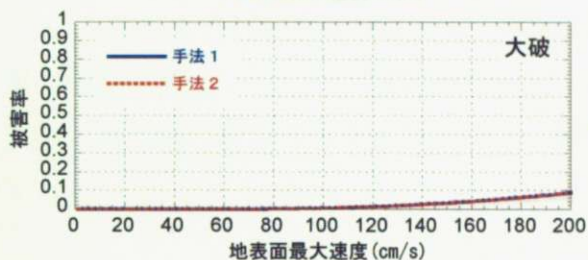
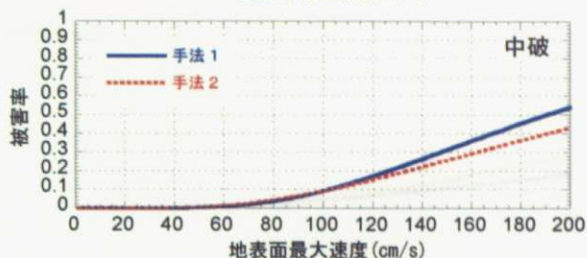
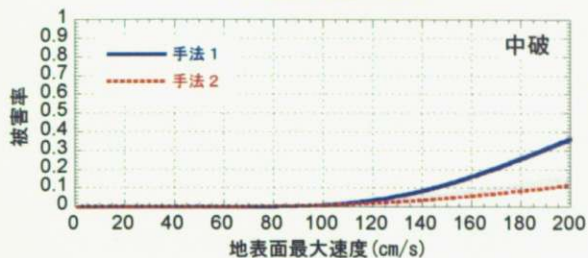
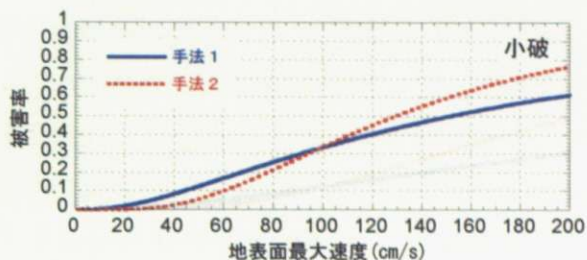
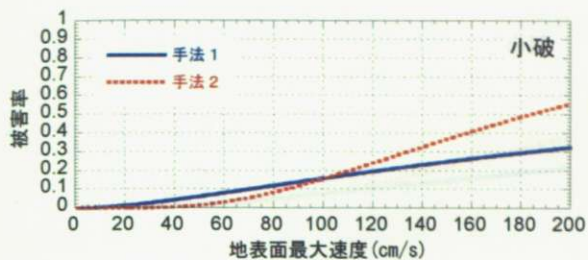


(c) 2~5 階, 1982 年以降



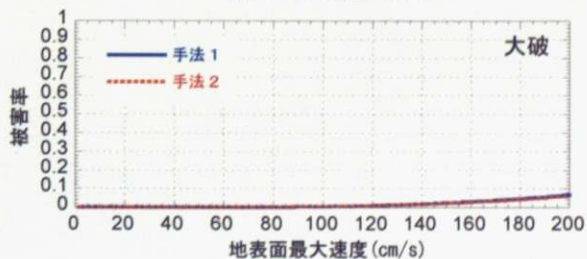
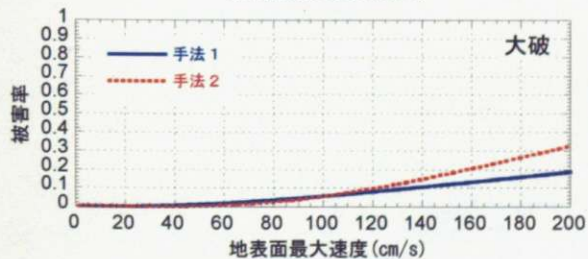
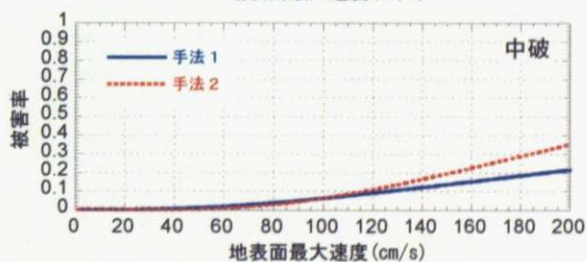
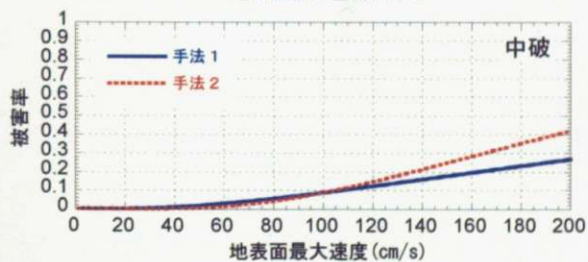
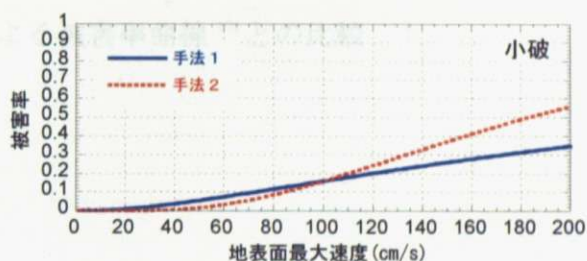
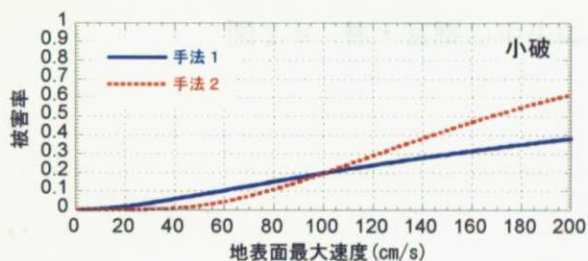
(d) 6~7 階, 1971~1981 年





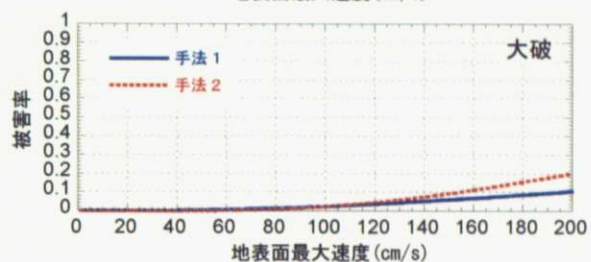
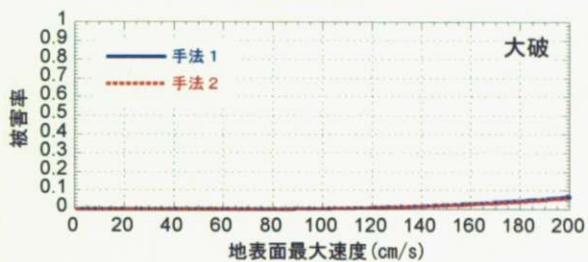
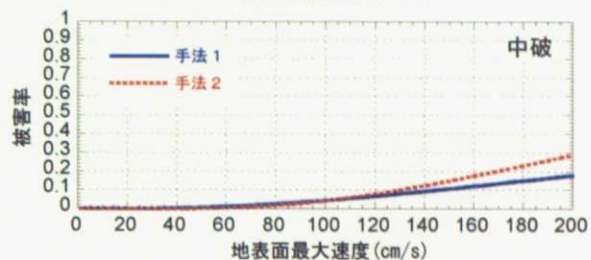
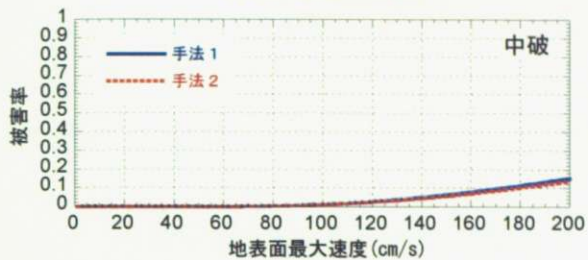
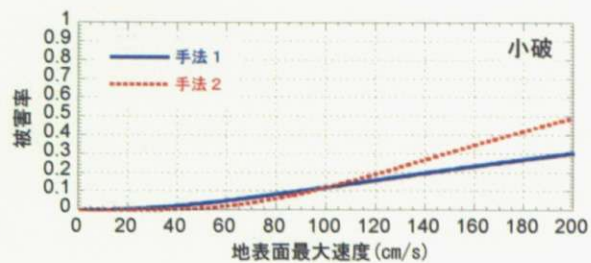
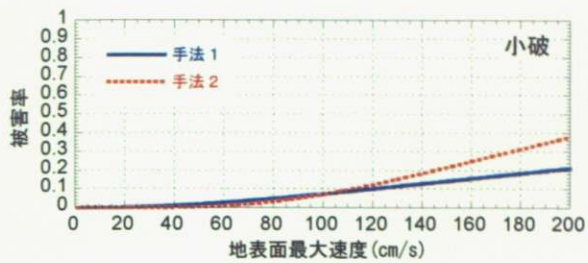
(e) 6~7 階, 1982 年以降

(f) 8~12 階, 1982 年以降



(g) 階数区別なし, 1970 年以前

(h) 階数区別なし, 1971~1981 年



(i) 階数区別なし, 1982 年以降

(j) 全建物

図 2.9 林・宮腰の手法による被害率曲線<sup>12)</sup>との比較



## 2.5 RC 造建物の被害率曲線に基づく限界層間変形角の設定

2.4 節において、林・宮腰の手法による RC 造建物の被害率曲線を用いて、被害率曲線の対数標準偏差を 0.6 に固定したとき、建築年および階数別の中央値を評価した。本節では、補正された被害率曲線のうち、1970 年以前と 1982 年以降の RC 造建物の被害率曲線を対象に、被害率曲線を再現できるような限界層間変形角を、RC 造建物群モデルに対する地震応答解析から求められる応答層間変形角を用いて、信頼性理論に基づき評価する。このとき、建物モデルとして、建築年は 1970 年以前と 1982 年以降の 2 種類、建物階数は 3 階、7 階、10 階（1982 年以降のみ設定）の 3 種類の計 5 種類を用いる。

### 2.5.1 地震応答解析に用いる地震動

RC 造建物群の地震応答解析に用いる地震動は、表 2.2 に示すように、兵庫県南部地震で観測された 12 地点の強震記録 24 波（NS 方向と EW 方向の両方向）を用いる。このとき、地震動の観測地点を図 2.10 に、減衰 5% の加速度応答スペクトルを図 2.11 に示す。

表 2.2 地震動リスト

No	観測地点	最大速度 (cm/s)	
		NS方向	EW方向
1	神戸海洋気象台	91.0	73.2
2	尼崎高架橋	48.7	54.6
3	東神戸大橋	88.7	91.1
4	神戸港工事事務所	103.0	35.1
5	尼崎港	53.2	58.3
6	ポートアイランド	85.2	51.6
7	JR鷹取駅	126.6	127.0
8	JR宝塚駅	71.9	81.5
9	新神戸変電所	75.6	78.0
10	総合技術研究所	37.5	48.3
11	尼崎第三発電所	49.9	58.0
12	葺合供給所	57.4	122.8



図 2.10 地震動の観測地点



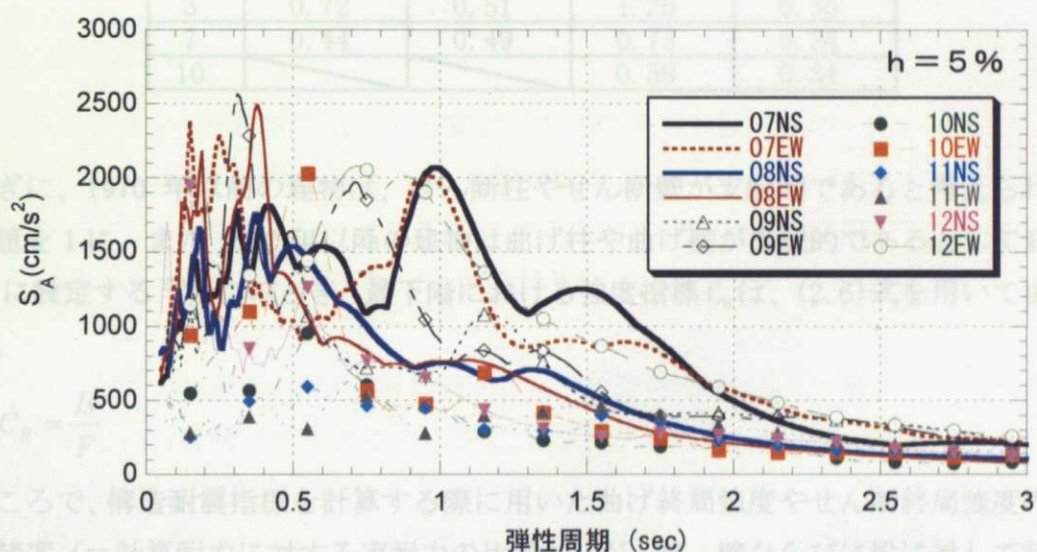
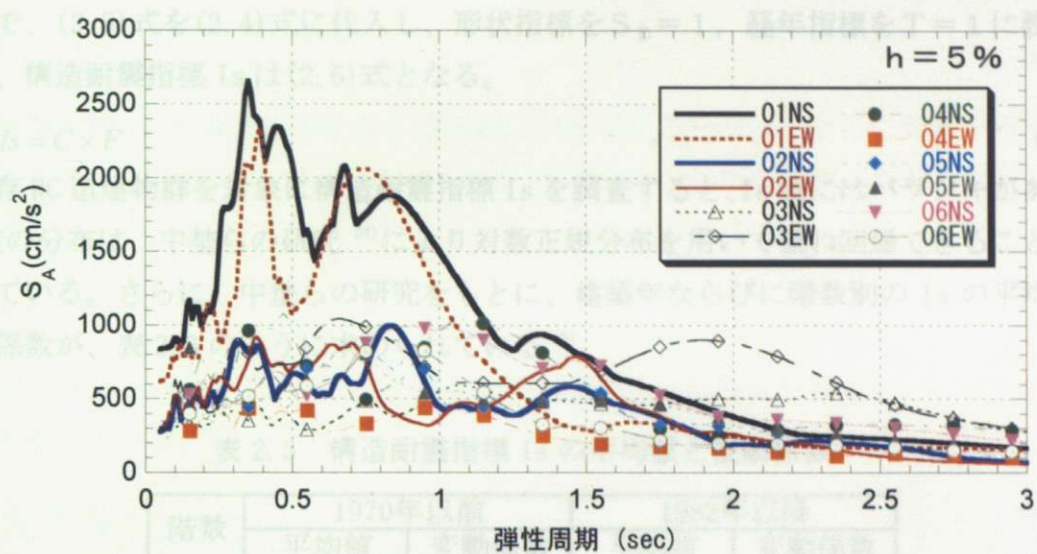


図 2.11 地震動に対する加速度応答スペクトル

### 2.5.2 RC 造建物群モデルの設定

既存RC造建物を対象に耐震診断が広く実施され、構造耐震指標  $I_s$  が評価されている。構造耐震指標  $I_s$  は(2.4)式より計算される<sup>23)</sup>。

$$I_s = E_0 \times S_D \times T \quad (2.4)$$

ここに、 $E_0$ ：保有性能基本指標

$S_D$ ：形状指標

$T$ ：経年指標

また、保有性能基本指標  $E_0$  は(2.5)式より計算される。

$$E_0 = C \times F \quad (2.5)$$

ここに、 $C$ ：強度指標

$F$ ：靱性指標

ここで、(2.5)式を(2.4)式に代入し、形状指標を  $S_D = 1$ ，経年指標を  $T = 1$  に設定すると、構造耐震指標  $I_s$  は(2.6)式となる。

$$I_s = C \times F \quad (2.6)$$

既存 RC 造建物群を対象に構造耐震指標  $I_s$  を調査すると、 $I_s$  値にはバラツキがあり、 $I_s$  値の分布は、中埜らの研究<sup>24)</sup>により対数正規分布を用いて概ね回帰できることが示されている。さらに、中埜らの研究をもとに、建築年ならびに階数別の  $I_s$  の平均値と変動係数が、表 2.3 のように求められている<sup>25)</sup>。

表 2.3 構造耐震指標  $I_s$  の平均値と変動係数

階数	1970年以前		1982年以降	
	平均値	変動係数	平均値	変動係数
3	0.72	0.51	1.20	0.35
7	0.44	0.49	0.73	0.34
10			0.59	0.34

つぎに、1970 年以前の建物は、せん断柱やせん断壁が支配的であると考えられるので  $F$  値を 1 に、また 1982 年以降の建物は曲げ柱や曲げ壁が支配的であるとして  $F$  値を 1.27 に設定する<sup>23)</sup>。このとき、最下階における強度指標  $C_B$  は、(2.6)式を用いて求められる。

$$C_B = \frac{I_s}{F} \quad (2.7)$$

ところで、構造耐震指標を計算する際に用いた曲げ終局強度やせん断終局強度の評価式の精度（＝計算耐力に対する実耐力の比率  $k$ ）が、柱、壁ならびに梁に対して評価されている<sup>26)</sup>。このため、1970 年以前の建物はせん断柱やせん断壁が支配的であり、また 1982 年以降の建物は曲げ柱や曲げ壁が支配的であると仮定し、計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  を、文献 26) を参考に表 2.4 のように設定する。また、計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  の分布を、対数正規分布を用いて仮定する。

表 2.4 計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  の平均値と変動係数

	平均値	変動係数
1970年以前	1.3	0.3
1982年以降	1.1	0.1

RC 造建物群モデルの降伏ベースシア係数  $C_y$  は、(2.7)式の強度指標  $C_B$  に、表 2.4 の計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  を乗じることで求められる。ここで、確率変数  $I_s$  と  $k$  は、互いに独立であると仮定する。

$$C_y = k \times \frac{I_s}{F} \quad (2.8)$$

構造耐震指標  $I_s$  と計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  の分布は、ともに対数正規分布でモデル化されているので、降伏ベースシア係数  $C_y$  の分布は対数正規分布に従うことになる。ここで、(2.8)式の自然対数をとると、(2.9)式となる。

$$\ln C_y = \ln k + \ln I_s - \ln F \quad (2.9)$$

従って、降伏ベースシア係数  $C_y$  の対数平均値  $\lambda_{c_y}$  と対数標準偏差  $\zeta_{c_y}$  が、(2.9)式を用いて求められる。

$$\lambda_{c_y} = \lambda_k + \lambda_{I_s} - \ln F \quad (2.10)$$

$$\zeta_{c_y} = \sqrt{\zeta_k^2 + \zeta_{I_s}^2} \quad (2.11)$$

ここに、 $\lambda_k$  : 計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  の対数平均値

$\lambda_{I_s}$  : 構造耐震指標  $I_s$  の対数平均値

$\zeta_k$  : 計算耐力に対する実耐力の比率  $k$  の対数標準偏差

$\zeta_{I_s}$  : 構造耐震指標  $I_s$  の対数標準偏差

降伏ベースシア係数  $C_y$  の対数平均値  $\lambda_{c_y}$  と対数標準偏差  $\zeta_{c_y}$  は、表 2.3 と表 2.4 の値を(2.10)式と(2.11)式に代入すると、表 2.5 のように求められる。

表 2.5 降伏ベースシア係数  $C_y$  の対数平均値  $\lambda_{c_y}$  と対数標準偏差  $\zeta_{c_y}$

階数	1970年以前		1982年以降	
	対数平均値	対数標準偏差	対数平均値	対数標準偏差
3	-0.22	0.56	-0.027	0.36
7	-0.71	0.55	-0.52	0.34
10			-0.72	0.34

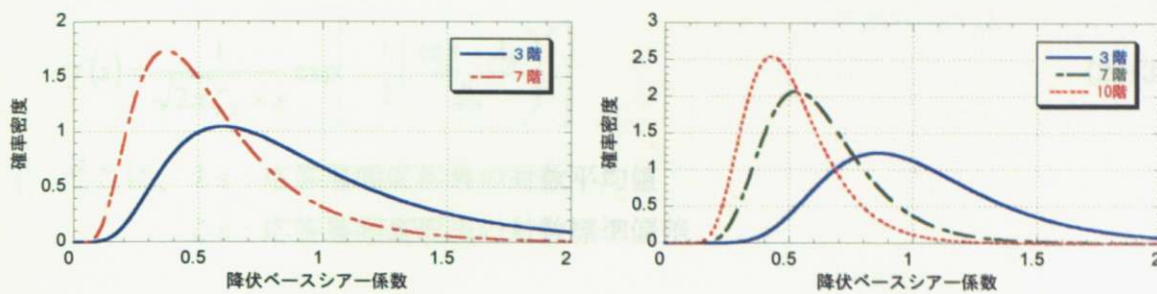
このとき、降伏ベースシア係数  $C_y$  の分布は(2.12)式より求められ、建築年ならびに建物階数に対して降伏ベースシア係数  $C_y$  の分布を計算すると図 2.12 となる。

$$f(c_y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_{c_y} \times c_y} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln c_y - \lambda_{c_y}}{\zeta_{c_y}} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

ここに、 $\lambda_{c_y}$  : 降伏ベースシア係数  $C_y$  の対数平均値 (表 2.5 の値)

$\zeta_{c_y}$  : 降伏ベースシア係数  $C_y$  の対数標準偏差 (表 2.5 の値)



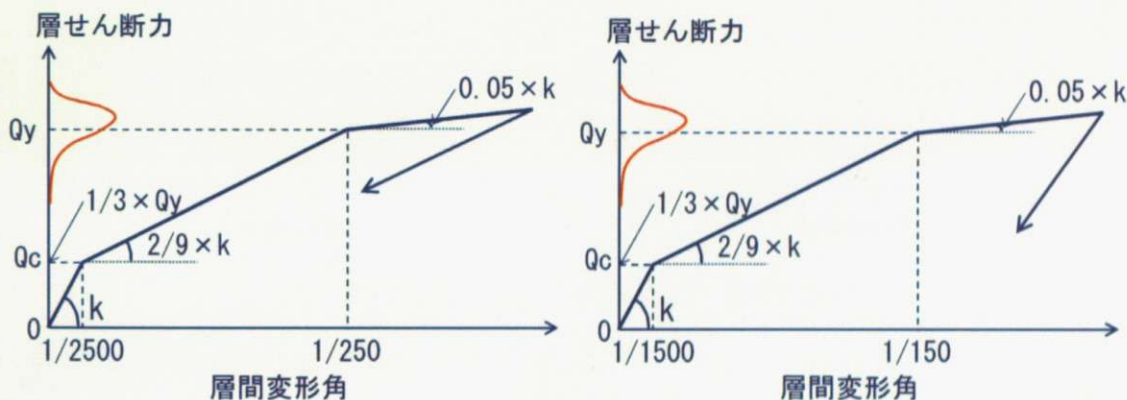


(a) 1970 年以前

(b) 1982 年以降

図 2.12 降伏ベースシア係数の分布

RC 造建物を基礎固定の多質点せん断系にモデル化し、降伏せん断力係数の高さ方向の分布を  $A_i$  分布で与える。各階の復元力特性は、図 2.13 に示すように、1970 年以前の建物は履歴減衰の少ない原点指向型モデルで、1982 年以降の建物は Takeda モデルで与える<sup>27)</sup>。また、建物の減衰は、1 次の減衰定数が 3% の瞬間剛性比例型で与える。



(a) 1970 年以前

(b) 1982 年以降

図 2.13 復元力特性の設定

### 2.5.3 応答層間変形角の分布

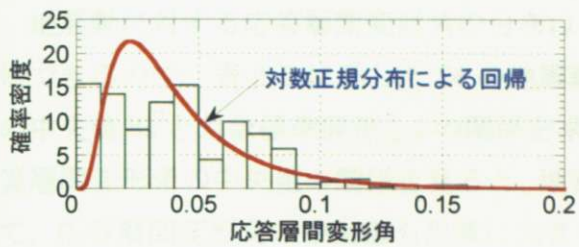
図 2.12 に示した降伏ベースシア係数のサンプル値を、モンテカルロ法により 1000 個抽出して建物モデルを作成し、地震応答解析を行う。このとき、建物としての応答層間変形角は、各階の応答層間変形角の最大値で定義する。一例として、入力地震動が神戸海洋気象台-NS 波と JR 鷹取駅-EW 波のとき、応答層間変形角の頻度分布を図 2.14 に示す。図中には、応答層間変形角の頻度分布  $S$  を、(2.13) 式の対数正規分布を用いて回帰した曲線も示している。

$$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_s \times s} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln s - \lambda_s}{\zeta_s}\right)^2\right] \quad (2.13)$$

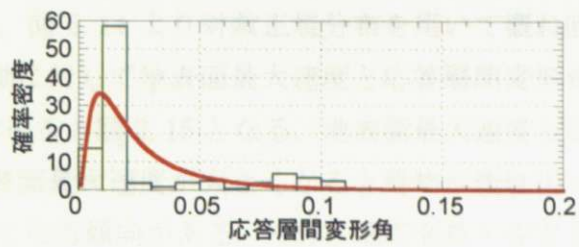
ここに、 $\lambda_s$  : 応答層間変形角の対数平均値  
 $\zeta_s$  : 応答層間変形角の対数標準偏差

図 2.14 より、RC 造建物群に対する応答層間変形角の分布は、対数正規分布を用いて概ね回帰できることがわかる。

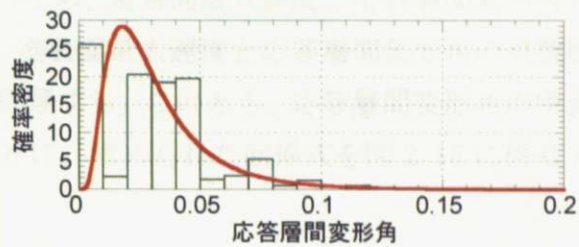
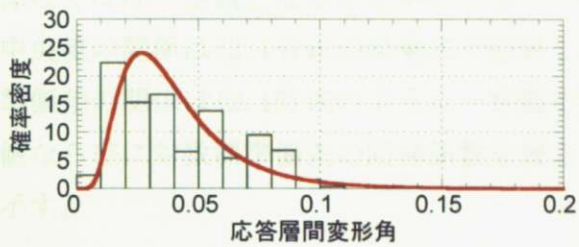
神戸海洋気象台-NS 波



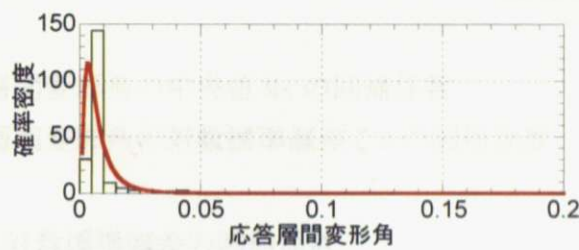
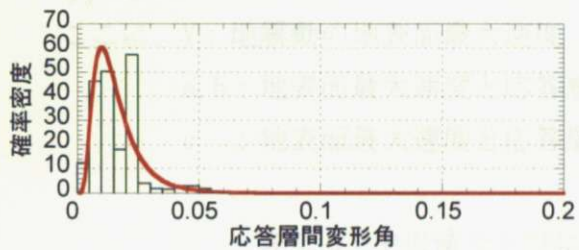
JR 鷹取駅-EW 波



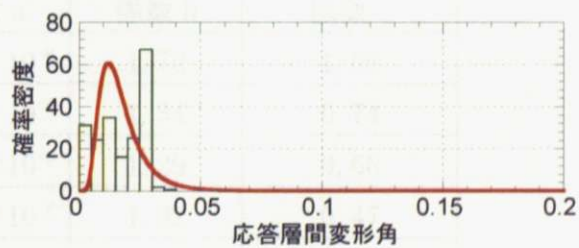
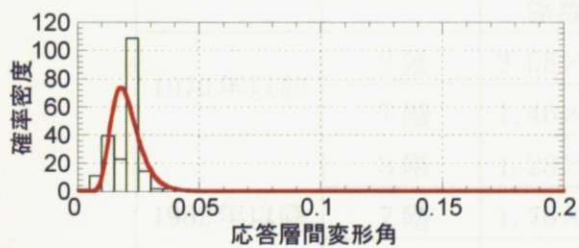
(a) 建物階数：3 階，建築年：1970 年以前



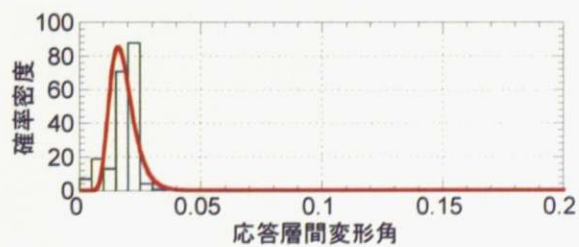
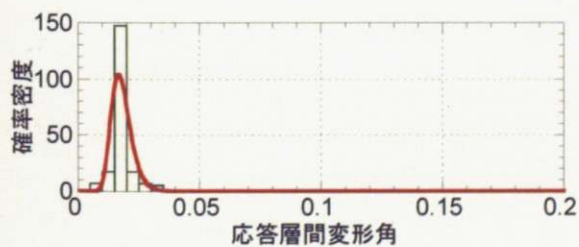
(b) 建物階数：7 階，建築年：1970 年以前



(c) 建物階数：3 階，建築年：1982 年以降



(d) 建物階数：7 階，建築年：1982 年以降



(e) 建物階数：10 階，建築年：1982 年以降

図 2.14 応答層間変形角の分布

#### 2.5.4 最大速度と応答層間変形角の関係

地震動に対する応答層間変形角の分布は、図 2.14 より対数正規分布を用いて概ね回帰できるので、表 2.2 に示した 24 の地震動に対して地表面最大速度と応答層間変形角の中央値  $M_s$  と対数標準偏差  $\zeta_s$  の関係を求めると図 2.15 となる。地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の関係をみると、地表面最大速度が大きくなると建物が塑性化して、応答層間変形角の中央値も急激に大きくなる傾向がある。一方、地表面最大速度と応答層間変形角の対数標準偏差の関係は、バラツキはあるものの、地表面最大速度に関係なくほぼ一定値となることがわかる。このため、地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の関係は(2.14)式の累乗式で回帰し、地表面最大速度と応答層間変形角の対数標準偏差の関係は(2.15)式のように一定値で回帰する。このとき、応答層間変形角の中央値ならびに対数標準偏差の回帰係数を表 2.6 に、求められた回帰式を図 2.15 に併せて示す。

$$M_s = a \times V^b \quad (2.14)$$

$$\zeta_s = c \quad (2.15)$$

ここに、 $V$ ：地震動の地表面最大速度

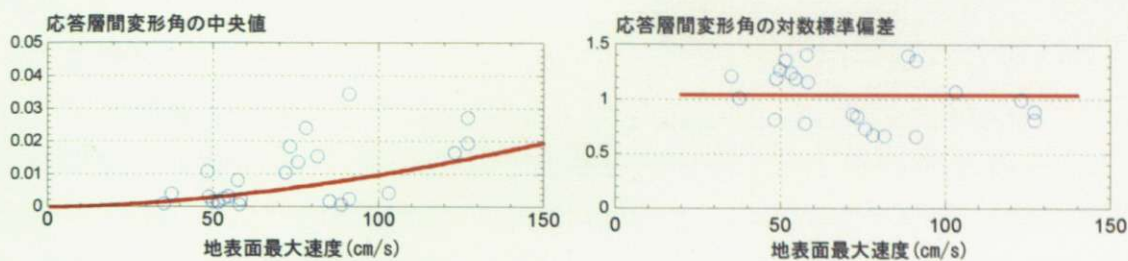
$a, b$ ：地表面最大速度と応答層間変形角の中央値  $M_s$  の回帰係数

$c$ ：地表面最大速度と応答層間変形角の対数標準偏差  $\zeta_s$  の回帰係数

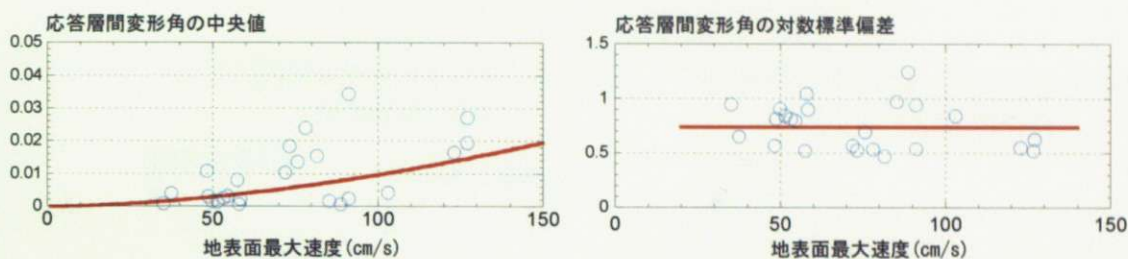
表 2.6 中央値ならびに対数標準偏差の回帰係数

建築年	建物階数	中央値		対数標準偏差
		係数 $a$	係数 $b$	係数 $c$
1970 年以前	3 階	$3.55 \times 10^{-6}$	1.72	1.05
	7 階	$1.46 \times 10^{-5}$	1.54	0.74
1982 年以降	3 階	$1.28 \times 10^{-5}$	1.29	0.68
	7 階	$1.76 \times 10^{-5}$	1.32	0.47
	10 階	$1.63 \times 10^{-5}$	1.45	0.36

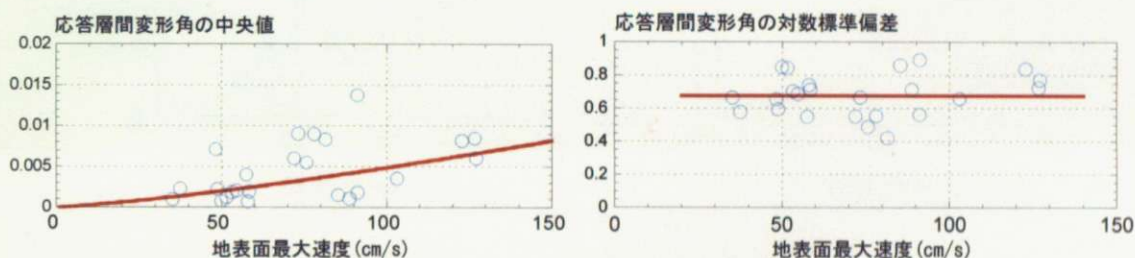




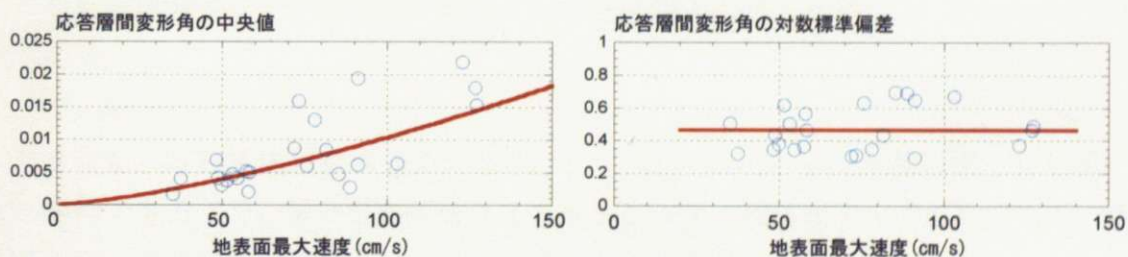
(a) 建物階数：3階，建築年：1970年以前



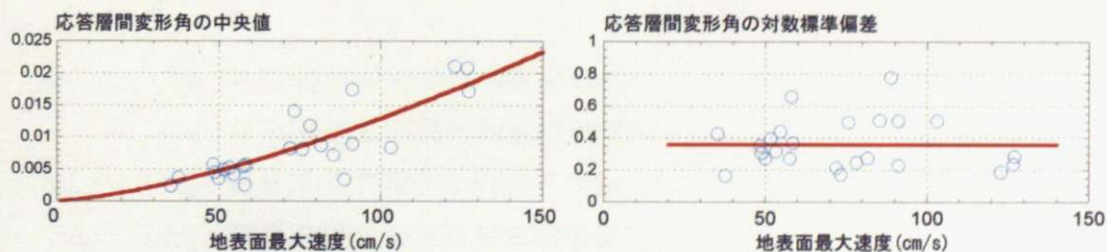
(b) 建物階数：7階，建築年：1970年以前



(c) 建物階数：3階，建築年：1982年以降



(d) 建物階数：7階，建築年：1982年以降



(e) 建物階数：10階，建築年：1982年以降

図 2.15 地表面最大速度と応答層間変形角の中央値ならびに対数標準偏差の関係



### 2.5.5 限界層間変形角の評価法

RC 造建物群モデルを対象とした地震応答解析から応答層間変形角の分布が計算されるので、限界層間変形角の分布を設定して、両者の関係から地表面最大速度  $V$  に対する損傷確率  $P$  を評価する。一方、地表面最大速度  $V$  に対する RC 造建物の被害率  $r$  は、兵庫県南部地震における被害率曲線から求められる。このとき、地表面最大速度  $V$  に対して、解析的に求められた損傷確率  $P$  と被害率  $r$  を等値することにより、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差を評価する。

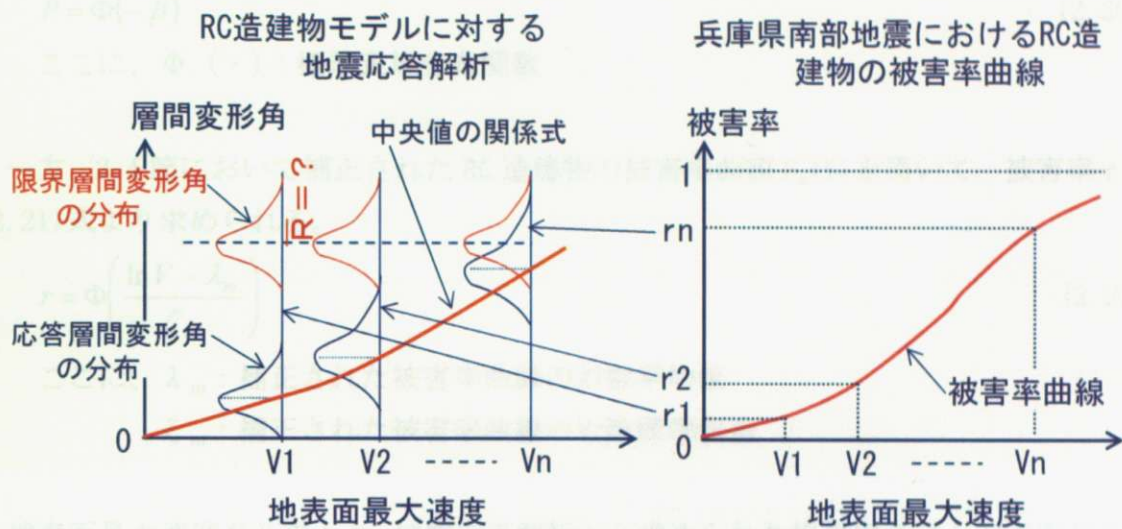


図 2.16 限界層間変形角の評価法

限界状態関数  $Z$  は、応答層間変形角  $S$  と限界層間変形角  $R$  を用いて、(2.16) 式より求められる。

$$Z = R - S \quad (2.16)$$

このとき、応答層間変形角  $S$  の分布は、2.5.3 節の検討より、対数正規分布を用いて概ね回帰できるので、限界層間変形角  $R$  の分布も対数正規分布でモデル化すると、地震応答解析による信頼性指標  $\beta$  は、(2.17) 式から求められる。

$$\beta = \frac{\lambda_R - \lambda_S}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_S^2}} \quad (2.17)$$

ここに、 $\lambda_S$  : 応答層間変形角の対数平均値  
 $\zeta_S$  : 応答層間変形角の対数標準偏差  
 $\lambda_R$  : 限界層間変形角の対数平均値  
 $\zeta_R$  : 限界層間変形角の対数標準偏差

ここで、応答層間変形角の対数平均値と対数標準偏差は、(2.14) 式と (2.15) 式を用いて

計算される。

$$\lambda_s = \ln a + b \ln V \quad (2.18)$$

$$\zeta_s = c \quad (2.19)$$

ここに、 $V$ ：地震動の地表面最大速度

$a, b$ ：地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の回帰係数

$c$ ：地表面最大速度と応答層間変形角の対数標準偏差の回帰係数

従って、地震応答解析による損傷確率  $P$  は、(2.20) 式より求められる。

$$P = \Phi(-\beta) \quad (2.20)$$

ここに、 $\Phi(\cdot)$ ：標準正規分布関数

一方、2.4 節において補正された RC 造建物の被害率曲線  $F_m(V)$  を用いて、被害率  $r$  が (2.21) 式より求められる。

$$r = \Phi\left(\frac{\ln V - \lambda_m}{\zeta_m}\right) \quad (2.21)$$

ここに、 $\lambda_m$ ：補正された被害率曲線の対数平均値

$\zeta_m$ ：補正された被害率曲線の対数標準偏差

地表面最大速度が  $V$  のとき、地震応答解析から求められた損傷確率  $P$  と被害率曲線から得られる被害率  $r$  を等値すると、

$$\Phi\left(-\frac{\lambda_R - \lambda_s}{\sqrt{\zeta_R^2 + \zeta_s^2}}\right) = \Phi\left(\frac{\ln V - \lambda_m}{\zeta_m}\right) \quad (2.22)$$

となる。(2.22) 式に、(2.18) 式と (2.19) 式を代入すると、限界層間変形角の対数平均値  $\lambda_R$  が評価される。

$$\lambda_R = \ln a + b \ln V - \sqrt{c^2 + \zeta_R^2} \times \left(\frac{\ln V - \lambda_m}{\zeta_m}\right) \quad (2.23)$$

ところで、限界層間変形角の対数平均値  $\lambda_R$  は、地表面最大速度  $V$  の値によらず一定値となる必要がある。このため、 $\ln V$  に対して (2.23) 式を整理すると、(2.24) 式となる。

$$\left(b - \frac{1}{\zeta_m} \sqrt{c^2 + \zeta_R^2}\right) \times \ln V + \left(\ln a + \frac{\lambda_m}{\zeta_m} \sqrt{c^2 + \zeta_R^2} - \lambda_R\right) = 0 \quad (2.24)$$

$\ln V$  が変化しても、限界層間変形角の対数平均値  $\lambda_R$  を一定値にするには、(2.24) 式において  $\ln V$  にかかる項を 0 に設定すればよい。

$$\left(b - \frac{1}{\zeta_m} \sqrt{c^2 + \zeta_R^2}\right) = 0 \quad (2.25)$$

従って、(2.25)式より限界層間変形角の対数標準偏差 $\zeta_R$ が求められる。

$$\zeta_R = \sqrt{(b \times \zeta_m)^2 - c^2} \quad (2.26)$$

このとき、限界層間変形角の対数平均値 $\lambda_R$ は、(2.24)式において $\ln V$ にかかる項が0になったので(2.27)式より求められる。

$$\lambda_R = \ln a + \frac{\lambda_m}{\zeta_m} \sqrt{c^2 + \zeta_R^2} \quad (2.27)$$

(2.27)式に(2.26)式を代入すると、対数平均値 $\lambda_R$ は(2.28)式より求められる。

$$\lambda_R = \ln a + b \times \lambda_m \quad (2.28)$$

## 2.5.6 限界層間変形角の評価結果

限界層間変形角の中央値 $M_R$ と対数標準偏差 $\zeta_R$ が、表2.5の応答層間変形角の回帰係数、表2.1の被害率曲線の中央値ならびに対数標準偏差 $\zeta_m=0.6$ を、(2.26)式と(2.28)式に代入することで評価される。このとき、限界層間変形角の中央値 $M_R$ と対数標準偏差 $\zeta_R$ が、表2.7のように求められる。

表 2.7 限界層間変形角の中央値と対数標準偏差

		中央値 $M_R$			対数標準偏差 $\zeta_R$
		小破	中破	大破	
1970 年以前	3 階	1/41	1/22	1/18	0.18
	7 階	1/51	1/20	1/18	0.55
1982 年以降	3 階	1/46	1/24	1/20	0.38
	7 階	1/41	1/14	1/12	0.70
	10 階	1/53	1/24	1/12	0.79

限界層間変形角の中央値は、建築年代や建物階数により若干異なるが、小破で 1/53～1/41、中破で 1/24～1/14、大破で 1/20～1/12 である。一方、限界層間変形角の対数標準偏差は、建築年代や建物階数により異なり、0.18～0.79 程度であることがわかる。限層層間変形角の対数標準偏差は、応答層間変形角の対数標準偏差に左右され、応答層間変形角の対数標準偏差が大きくなると限層層間変形角の対数標準偏差は小さくなる傾向がある。これは、1970 年以前の建物は、復元力特性を履歴減衰の少ない原点指向型でモデル化しているため、建物が塑性化すると応答が急激に増加する。従って、1970 年以前の建物の応答層間変形角の対数標準偏差は、1982 年以降の建物よりも大きくなる傾向があり、被害率曲線の対数標準偏差を再現するには、限界層間変形角の対数標準偏差が相対的に小さくなるためである。

ところで、文野ら<sup>3)</sup>は、曲げ破壊型に設計され軸拘束変形を受ける梁部材4体を対象に実験を行い、部材角と残留ひびわれ幅の関係を示している。これによると、小破の部材角は約 1/200～1/100，中破の部材角は約 1/100～1/50，大破の部材角は約 1/50 以上となっている。従って、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線を再現するように求められた表 2.6 の限界層間変形角の中央値は、構造実験から得られた値と比較して大きい、すなわち RC 造建物の耐力を過大評価していることがわかる。この原因として、RC 造建物群モデルを対象に地震応答解析を行う際に、建物と地盤の相互作用による入力低減効果<sup>28)</sup>が考慮されていないことや、現実の RC 造建物の耐力には、耐力評価式では十分に考慮されていない余力があることが考えられる。この他にも、RC 造建物の地震応答解析を行うときの各地点における入力地震動の設定法や、RC 造建物の被害率曲線を作成する際に用いた地表面最大速度の推定誤差なども考えられる。しかし、表 2.6 の損傷クライテリアは、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線を再現している点において、限定的ではあるが建物の地震損傷度評価に用いることができる。ただし、これらの損傷クライテリアは、兵庫県南部地震以外の地震被害に対して検証されておらず、他の地震被害への適用可能性は今後の検討課題である。

## 2.6 まとめ

兵庫県南部地震における地震被害データを用いて作成された RC 造建物の被害率曲線ベースに、RC 造建物群モデルを対象とした地震応答解析を組み合わせ、被害率曲線を再現できるように RC 造建物の損傷クライテリアを評価した。

まず、既往の兵庫県南部地震における被害率曲線を整理し、異なる評価手法（林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法）や異なる被災度（自治体の調査方法、建研の調査方法、構造的被災度）による被害率曲線への影響を検討した。自治体の調査方法および建研の調査方法による被害率曲線を対象に、林・宮腰の手法と村尾・山崎の手法を比較し、両者の被害率曲線はほぼ一致していることを確認した。従って、兵庫県南部地震における最大速度の推定方法が異なっているにもかかわらず、この要因が被害率曲線に与える影響は小さい。一方、構造的被災度を基準に他の被災度による被害率曲線を比較すると、被災度レベルを変更しないと被害率曲線の形状がほぼ一致しないことが確認され、評価目的に応じてどの被害率曲線を採用するかが重要となる。ところで、被災度ごとに被害率曲線の対数標準偏差が異なっていると、被害率を計算するときに被災度レベルが高いにもかかわらず被害率が小さくなる、いわゆる逆転現象が生じる可能性がある。このため、全ての RC 造建物の被害率曲線の対数標準偏差を 0.6 に固定し、林・宮腰の被害率曲線をほぼ再現できるように、被害率曲線の中央値を補正した。

つぎに、RC 造建物を基礎固定のせん断質点系にモデル化し、構造耐震指標の統計値を用いて RC 造建物群モデルをモンテカルロ法により作成する。兵庫県南部地震における地震動に対して RC 造建物群モデルを対象に地震応答解析を行い、応答層間変形角の分布が対数正規分布を用いてほぼ回帰できることを示した。RC 造建物の損傷指標として限界層間変形角を採用し、限界層間変形角の分布も対数正規分布でモデル化し、両者の関係から信頼性理論に基づき損傷確率を計算した。このとき、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線から求められる被害率と、解析的に求められた損傷確率を等値することにより、限界層間変形角の中央値と対数標準偏差を評価した。この結果、限界層間変形角の中央値は、建築年代や建物階数により若干異なるが、小破で  $1/53 \sim 1/41$ 、中破で  $1/24 \sim 1/14$ 、大破で  $1/20 \sim 1/12$  であることを示した。一方、限界層間変形角の対数標準偏差は、建築年代や建物階数により異なり、0.18～0.79 程度となる。RC 造建物の被害率曲線を再現するよう求められた限界層間変形角の中央値は、構造実験から得られる値と比較して大きいことがわかる。この原因として、RC 造建物群モデルに対して地震応答解析を行う際に、建物と地盤との相互作用による入力低減効果が考慮されていないことや、RC 造建物の耐力には耐力評価式では十分に考慮されていない余力があること、などが考えられる。しかし、求められた損傷クライテリアは、兵庫県南部地震における RC 造建物の被害率曲線を再現している点において、限定的ではあるが建物の地震損傷度評価に用いることができる。ただし、これらの損傷クライテリアは、兵庫県

南部地震以外の地震被害に対して検証されておらず、他の地震被害への適用可能性は今後の課題である。

地震被害データを用いて作成された被害率曲線は、現実の建物被害を反映しているものの、被害率曲線を作成する際に推定された地震動強さの不確定性や、被害率を計算する際に用いたポリゴン内の建物構成などの要因に依存して、その評価結果が異なるという問題点もある。一方、建物モデルを用いた地震応答解析では、建物と地盤との相互作用の考慮や、建物のモデル化により地震応答結果が異なる。従って、地震時において、地盤の強震観測記録のみならず、建物の強震観測記録をさらに充実させて、応答結果を再現できる建物モデルの構築や、建物被害を模擬できる損傷クライテリアの設定法が今後の課題であると考えられる。

## 2章の参考文献

- 1) 中村孝明, 中村敏治: ポートフォリオ地震予想最大損失額(PML)評価, 日本リスク研究学会誌12(2), pp.69-76, 2000
- 2) Federal Emergency Management Agency(FEMA): HAZUS99 Technical Manual, 1999
- 3) 文野 正裕, 前田 匡樹, 長田 正至: 部材の残存耐震性能に基づいた震災RC造建物の被災度評価法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 3, pp.1447-1452, 2000
- 4) 日本建築学会: 建築物の限界状態設計指針, 2002
- 5) J.Kanda: Building Damages Due to the 1995 Hyogo Ken Nanbu Earthquake, University of Tokyo, 1997
- 6) 林 康裕, 川瀬 博: 1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価, 日本建築学会構造系論文集, 第481号, pp.37-46, 1996
- 7) 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率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第494号, pp.59-66, 1997
- 8) 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, 第502号, pp.61-68, 1997
- 9) 宮腰 淳一, 林 康裕, 渡辺 宏一, 田村 和夫: 1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく建物の耐震性能評価, 構造工学論文集, Vol. 43B, pp.269-276, 1997
- 10) J.Miyakoshi, Y.Hayashi, K.Tamura and N.Fukuwa: Damage Ratio Functions of Buildings using damage data of the 1995 Hyogo-Ken Nanbu earthquake, International Conference on Structural Safety and Reliability (ICOSSAR), pp.349-354, 1998
- 11) 林 康裕, 宮腰 淳一: 兵庫県南部地震における被害率曲線, 日本建築学会災害委員会, pp.15-20, 1998
- 12) 林 康裕, 宮腰 淳一, 田才 晃, 大野 義照: 1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第528号, pp.135-142, 2000
- 13) 村尾 修, 山崎 文雄: 構造・建築年を考慮した建物被害データに基づく灘区の地震動分布の再推定, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.141-148, 1999
- 14) 村尾 修, 山崎 文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第527号, pp.189-196, 2000
- 15) 村尾 修, 山崎 文雄: 震災復興都市づくり特別委員会調査データに構造・建築年を付加した兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第555号, pp.185-192, 2002
- 16) 宮腰 淳一, 林 康裕, 田村 和夫: 被害データと地震応答解析に基づく建物群の耐震性能に関する考察, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.327-332, 1998

- 17) 宮腰 淳一, 神原 浩, 石井 大吾, 田村 和夫, 山口 亮, 名取 晶子, 吉村 昌宏: 建物耐力と変形性能のばらつきを考慮した被害関数の作成手法, 構造工学論文集, Vol. 51B, pp. 105-110, 2005
- 18) 大井 昌弘, 水谷 守, 諏訪 仁, 野畑 有秀, 山田 守, 藤原 広行: 構造物の地震損傷度評価手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 第237号, 2003
- 19) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書 第I編中間報告書以降の調査分析結果, 1996
- 20) 日本建築学会: 1978年宮城県沖地震災害調査報告, 1978
- 21) 日本建築学会近畿支部: 1995年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書, pp. 2 -37, 1996
- 22) 林 康裕: 耐震診断結果を利用した既存RC造建築物の地震リスク表示, 地域安全学会論文集No. 2, pp. 235-242, 2000
- 23) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説, 2001
- 24) 中埜 良昭, 岡田 恒男: 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第406号, pp. 37-43, 1989
- 25) 損害保険料率算定会: 地震被害想定資料集, 1998
- 26) 中埜 良昭: 信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究, 東京大学学位論文, 1989
- 27) 関 松太郎, 杉山 公一, 勝俣 英雄: 阪神・淡路大震災における被災建築物の統計的分析(3)ー鉄筋コンクリート造系建物の弾塑性地震応答解析ー, 大林組技術研究所報 特別号, pp. 71-79, 1996
- 28) 安井 譲: 構造物被害と構造物への入力地震動ー地盤・基礎相互作用, 公開シンポジウム, 兵庫県南部地震ー強震記録と設計用地震動の関係, pp. 67, 1997



### 3章 兵庫県南部地震の地震被害データを用いた建築設備の被害率曲線の評価法

#### 3.1 序

建物の地震損失を評価するときは、建物（躯体）被害のみならず、非構造部材や建築設備の被害も検討する必要がある。最近の地震でも、建物の地震被害のみならず、天井の落下、窓ガラスの破損、エレベータの停止など、非構造部材や建築設備の被害事例が報告されている。例えば、2001年3月の芸予地震では天井や間仕切壁の脱落により負傷者が発生し、2003年7月の宮城県沖地震では体育館の吊り天井パネルのずれが発生して避難所としての機能を果たせなかった<sup>1)</sup>。2003年9月の十勝沖地震では、空港ロビーの吊り天井が脱落して空港が機能停止状態に陥り、2004年10月の新潟県中越地震でも、体育館や公共ホールにおける非構造材の被害は深刻であった<sup>1)</sup>。2005年8月の宮城県沖を震源とする地震でも、プールの天井が落下し負傷者が発生している。2005年3月の福岡県西方沖地震では、建物の窓ガラスに大きな被害が発生し、営業を再開しながら改修工事が行われた<sup>2)</sup>。これは、経年によりガラスと窓枠が硬化性のパテで固定された状態になり、変形や振動を吸収できなかったことが原因とされている。また、2005年7月の千葉県北西部を震源とする地震では、多数のエレベータが停止し、エレベータの閉じ込めも発生し救出までに最大3時間程度かかったとの報告もある。このため、地震後の建物としての機能性を維持するためには、建物の耐震安全性に加えて、非構造部材や建築設備の耐震安全性が重要となる。最近では、大地震後においても、企業などに対して、予め特定された重要業務を継続させることが要求され始めており、非構造部材や建築設備の耐震性能がますます重要になっている。

建物の地震損傷度評価と同様に、地震被害データを用いて非構造部材や建築設備の耐震性能を検討することは、これらの被害率曲線を作成するためにも必要である。金子ら<sup>3)</sup>は、兵庫県南部地震の建物被害調査記録をもとに、非構造部材の被害の大きさと被害程度の間関係を整理し、非構造部材の被害を被災度1～3の3段階に分類することを提案している。神原ら<sup>4)</sup>は、2000年の鳥取県西部地震と2001年の芸予地震における建物被害と地震動強さの間関係を調査し、非構造部材や建築設備に関して検討している。その結果、内外壁、窓ガラス、天井、床、扉や室内の被害は比較的多く発生したが、空調設備、防災設備、屋上機器の被害は少ないことを示している。しかし、これらの結果は、計測震度6以下の地域における地震被害であり、計測震度が6を超えるような地震動強さと建物被害の間関係については得られていない。金子ら<sup>5)</sup>は、さまざまな非構造部材について文献調査を行い、既往の耐震実験結果を整理している。つぎに、耐震性能に基づいて非構造部材を4種類に分類し、被災度と層間変形角との間関係を示している。出口ら<sup>6)</sup>は、建築設備の中から、地震直後に機能維持が要求される自家用発電設備に着目し、兵庫県南部地震の被害調査と最大速度の間関係を用いて自家

用発電設備の被害関数を作成している。さらに、自家用発電設備の被害関数と建物の被害関数を比較し、比較的小さな地震動においても自家用発電設備の被害率が高いことを統計的に示している。このように、既往研究では、非構造部材や一部の建築設備を対象に地震被害データを用いて耐震性が評価されているが、全般的な建築設備の被害率曲線としては検討されていない。

3章では、建物の機能性に着目し、兵庫県南部地震で被災した 156 棟の建物に対する建築設備の地震被害データを用いて、建築設備の耐震性能を被害率曲線に基づき評価する。建築設備は、空調設備、衛生設備、電気設備、防災設備および輸送設備に区分されるが、本研究では、空調設備、衛生設備、電気設備および防災設備の一部（スプリンクラー）に対して検討する。まず、兵庫県南部地震における地表面最大速度の面的推定を行い、地表面最大速度と建築設備の被害結果の関係を利用して、二項分布を用いた最尤法により、地表面最大速度を地震動指標とした建築設備の被害率曲線を作成する。つぎに、建物の建築年、構造形式、建物階数の相違による被害率曲線の中央値への影響や、RC 造建物の被害率曲線と建築設備の被害率曲線との相互比較を行う。さらに、地表面最大速度と建物の応答加速度や応答層間変形角の関係をj用いて建築設備の被害率曲線を再評価し、建築設備の限界加速度や限界層間変形角を評価する。

### 3.2 建築設備の地震被害状況

#### 3.2.1 建築設備の地震被害データ

兵庫県南部地震で被災した 156 棟の建物を対象に、建物の構造的被災度と建築設備の被害状況を調査した。ここで、建物の構造的被災度は、日本建築防災協会の被災度判定基準<sup>18)</sup>に従い、大破は取り壊さずに補修を行い再使用した建物を対象にしている。調査建物の所在地を、図 3.1 に示す。調査地域は、神戸市、宝塚市、芦屋市、西宮市、尼崎市、川西市、伊丹市である。また、調査建物の構成内容を、図 3.2 に示す。なお、建物用途としては、事務所ビルや集合住宅が多く含まれている。



図 3.1 調査建物の所在地

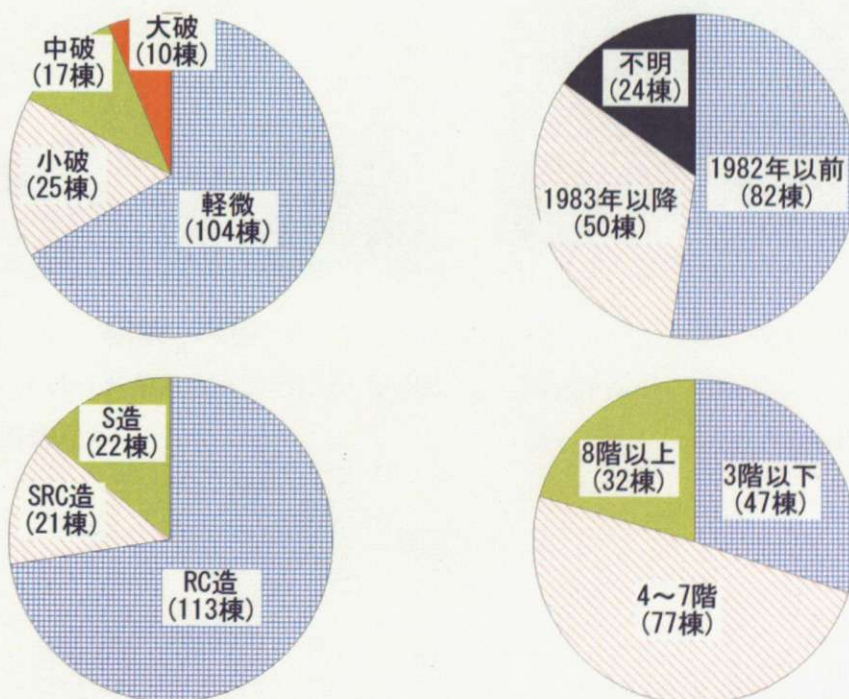


図 3.2 調査建物の構成内容



調査した建築設備の種類は、重量機器、水槽類、天井取付器具、屋内配管の4種類である。重量機器は冷凍機、ボイラー、冷却塔、受変電機器などを、水槽類は高架水槽、受水槽などを、天井取付器具はスプリンクラー、照明器具などを含んでいる。建築設備の被害程度は、表 3.1 に示すように、軽微と重大の2レベルを設定した。このとき、建築設備の被害写真の一例を、被災度ごとに写真 3.1 に示す。ここで、軽微な被害は、点検または簡単な補修で使用可能になったものを、重大な被害は、使用不能になり補修や改修が必要になったものをいう<sup>7)</sup>。また、建物内に複数ある設備機器では、原則として1台でも被害があると、被害有りと判定した<sup>1)</sup>。従って、建築設備の耐震性能を過少評価するものの、1台でも設備機器に被害が生じると、建物の機能性が満足できなくなる可能性があるためである。

表 3.1 建築設備の被害定義

	軽微な被害	重大な被害
重量機器	傾き、ずれ	転倒、移動
水槽類	亀裂、漏れ	大破、破断
天井取付器具	移動	落下、大破
屋内配管	変形、亀裂	切断、抜け



軽微な被害

(ストッパーが曲がっているが、空調機は損傷なし)

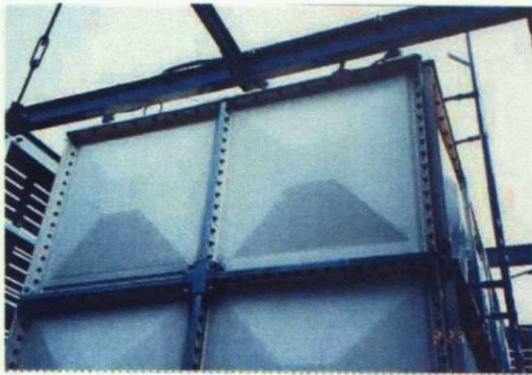


重大な被害

(貯湯槽架台が転倒し、貯湯槽が脱落  
架台上部の曲がった鋼材は固定用の鋼材)

(a) 重量機器





軽微な被害

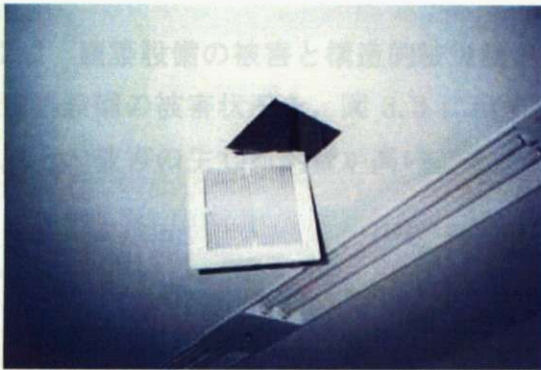
(パネル接合部よりしみ出る程度の漏水)



重大な被害

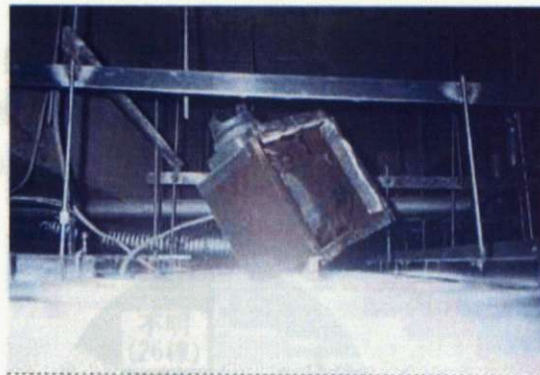
(基礎アンカーの損傷により、高架水槽が転倒)

(b) 水槽類



軽微な被害

(天井扇のフェイス外れ)



重大な被害

(天井扇のボルトやダクトが外れ、フェイスは脱落)

(c) 天井取付器具



軽微な被害

(配管が左に曲がっているが、フレキシブル継手により変位を吸収している)



重大な被害

(塩ビ管のエルボ部分で破断)

(d) 屋内配管

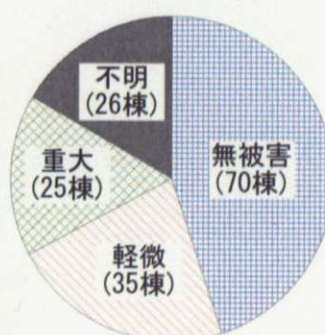
写真 3.1 建築設備の被害写真

### 3.2.2 建築設備の被害と構造的被災度との関係

建築設備の被害状況を、図 3.3 に示す。屋内配管は、他の建築設備と比較して、軽微以上の被害の生じる割合が高いことがわかる。



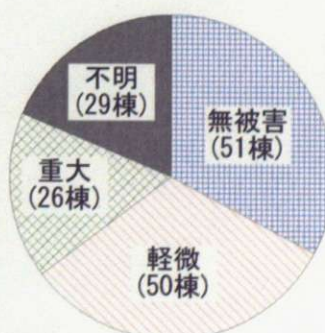
(a) 重量機器



(b) 水槽類



(c) 天井取付器具

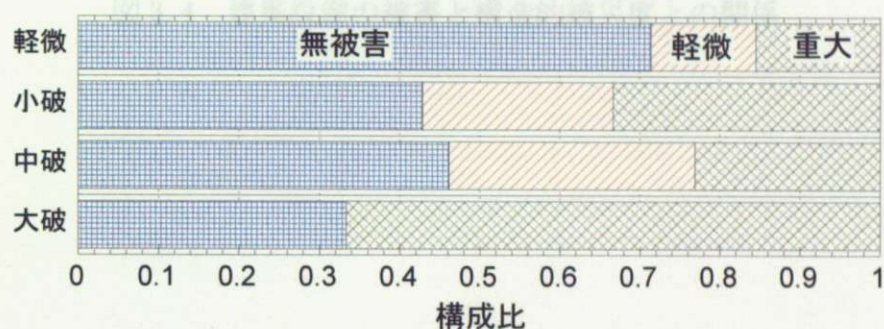


(d) 屋内配管

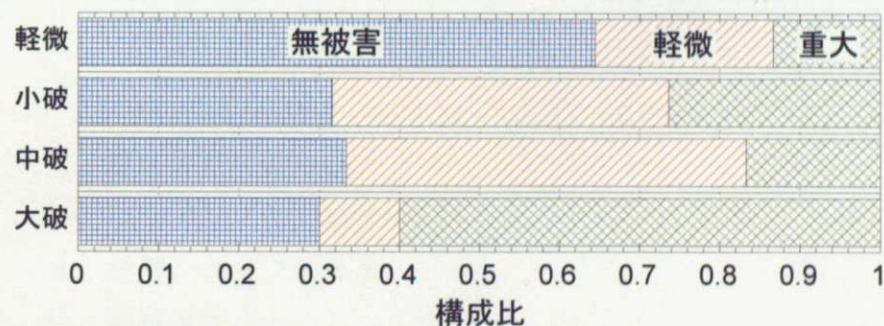
図 3.3 建築設備の被害状況



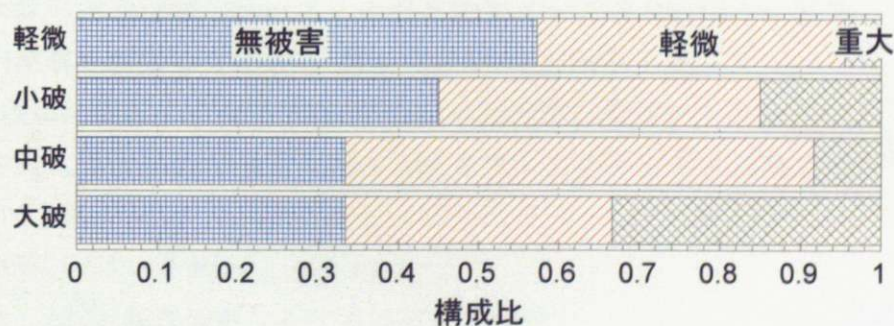
つぎに、建築設備の被害程度と構造的被災度の関係を、図 3.4 に示す。構造的被災度が甚大になるに従い、全体的に建築設備も軽微以上の被害が生じる割合が高くなる。また、構造的被災度が中破や大破になると、建築設備の軽微な被害の割合が減少して、重大な被害の割合が増加していることがわかる。さらに、構造的被災度が軽微の場合でも、建築設備が重大な被害を受ける可能性があり、建物としての被災度が軽微であるにもかかわらず、建物の機能が停止する危険性がある。従って、地震後において建物の機能性を維持するには、建物の耐震安全性に加えて、建築設備の耐震性能が重要であるといえる。



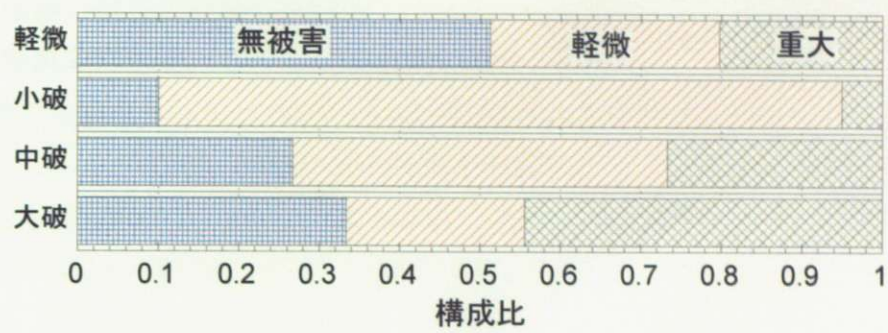
(a) 重量機器



(b) 水槽類



(c) 天井取付器具



(d) 屋内配管

図 3.4 建築設備の被害と構造的被災度との関係



### 3.3 建築設備の被害率曲線の評価法

#### 3.3.1 兵庫県南部地震における地表面最大速度の推定

建築設備の被害率曲線は、建設地の地震動強さと建築設備の被害結果の関係に基づき作成される。このため、建築設備の被害率曲線を作成するには、兵庫県南部地震における面的な地震動強さ分布が必要となる。まず、兵庫県南部地震の断層モデルとして、表 3.2 の Wald の断層モデル<sup>8)</sup>を設定する。

表 3.2 Wald の断層モデル<sup>8)</sup>

	断層 1	断層 2
緯度	34.815	34.475
経度	135.356	134.8432
断層長さ(km)	40	20
断層幅(km)	20	20
走行(度)	230	45
傾斜角(度)	85	80
断層深さ(km)	0	0

被害率曲線の地震動指標として最大速度を採用し、建設地の基準地盤（S 波速度 600m/s 相当）における最大速度  $PGV_0$  を、司・翠川の速度距離減衰式<sup>9)</sup>を用いて計算する。

$$\log_{10} PGV_0 = 0.58M_w + 0.0038D + d - 1.29 - \log_{10} \left( X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w} \right) - 0.002X \quad (3.1)$$

ここに、X：断層最短距離(km)

$M_w$ ：モーメントマグニチュード

d：地震のタイプ別係数

D：震源深さ(km)

ここで、兵庫県南部地震のモーメントマグニチュードは  $M_w=6.9$ 、地震のタイプ別係数は地殻内地震を設定して  $d=0$ 、震源深さ  $D=0$  と設定する。

つぎに、表層地盤による速度増幅率を、微地形分類に基づいた手法<sup>10)</sup>により計算し、基準地盤の最大速度  $PGV_0$  に速度増幅率 ARV を乗じて地表面最大速度を推定した。

$$\log_{10} ARV = 1.83 - 0.66 \log_{10} AVS \pm 0.16 \quad (3.2)$$

ここに、ARV：基準地盤に対する速度の増幅率

AVS：地表から地下 30m までの平均 S 波速度

地表から地下 30m までの平均 S 波速度 AVS は、(3.3)式より推定した。

$$\log_{10} AVS = a + b \log_{10} H + c \log_{10} D \pm \sigma \quad (3.3)$$

ここに、a, b, c : 微地形分類から決まる係数

H : 標高(m)

D : 主要河川からの距離(km)

このとき、基準地盤の最大速度  $PGV_0$  に対する地表面最大速度の増幅率 ARV を、図 3.5 に示す。

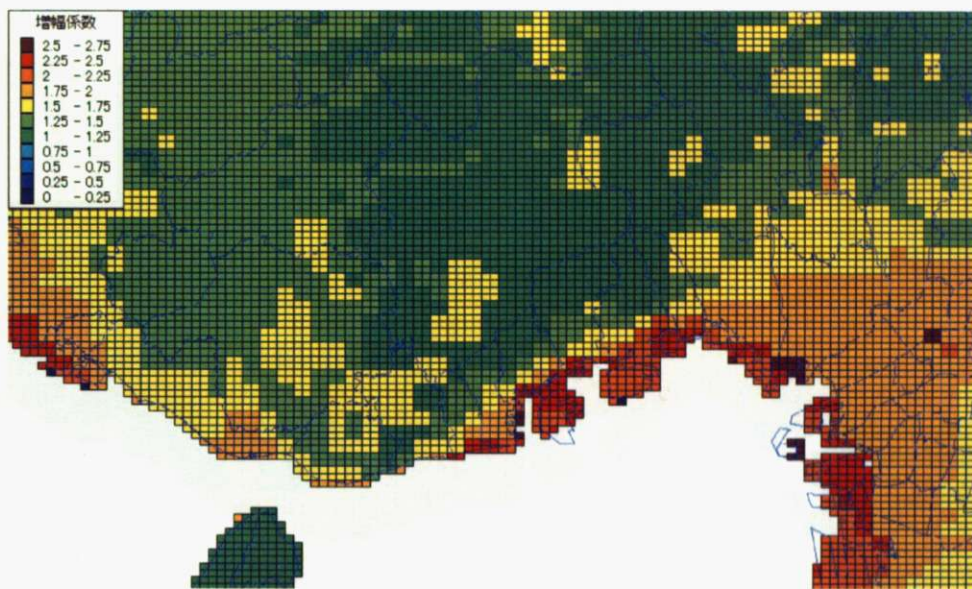


図 3.5 基準地盤に対する最大速度の増幅率

ところで、兵庫県南部地震における地震動特性として、断層近傍における指向性パルス波の発生や、盆地端部で生成された回折波+表面波と下方からの実体波の増幅的干渉<sup>11)</sup>などが指摘されている。このため、推定された地表面最大速度の妥当性を調べるため、推定結果を兵庫県南部地震の観測記録<sup>12)</sup>と比較すると図 3.6 となる。推定された地表面最大速度は、とくに地表面最大速度が大きい領域においてバラツキがあるものの、観測記録と概ね整合していることがわかる。ここで、バイアスを排除するため、両者の関係を原点を通る直線で回帰し、計算された最大速度に 1.039 を乗じて、図 3.7 に示すように地表面最大速度の推定結果とした。

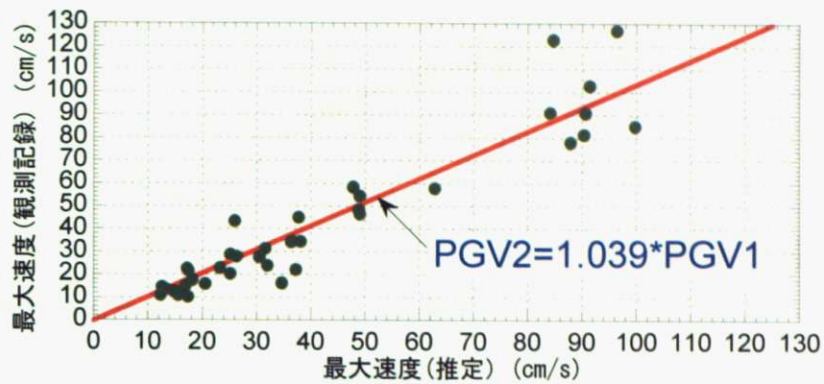


図 3.6 強震観測記録との比較

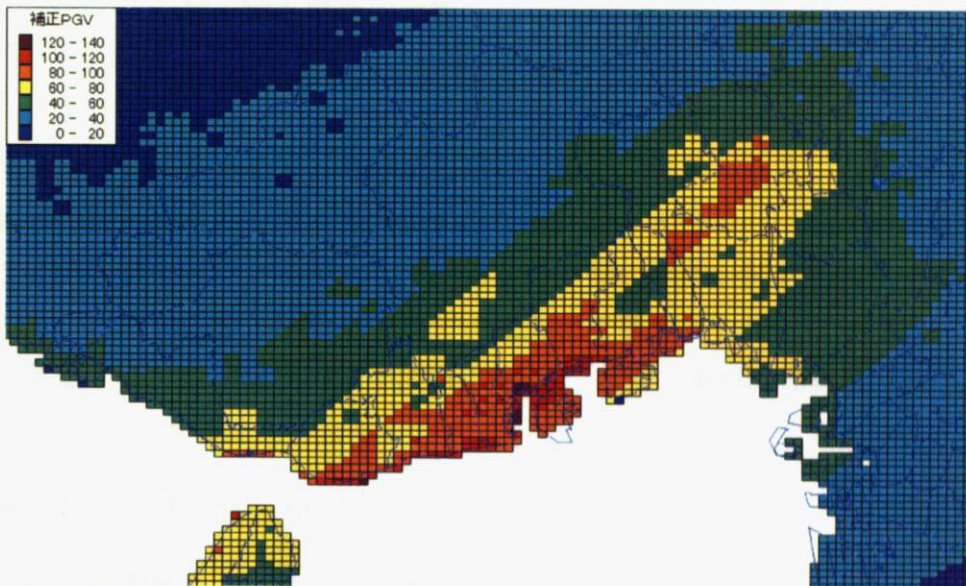


図 3.7 兵庫県南部地震における地表面最大速度の分布

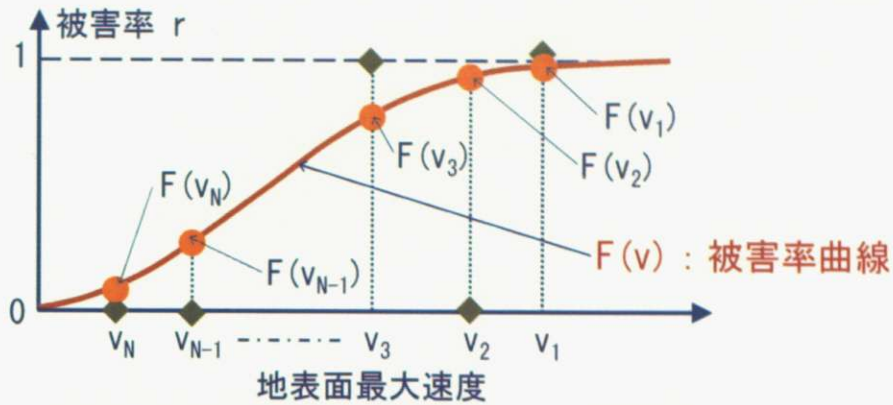
### 3.3.2 二項分布を用いた最尤法による被害率曲線の評価法<sup>13)</sup>

3.3.1 節で求められた地表面最大速度と建築設備の被害結果の関係を、被害率曲線  $F(V)$  を用いて評価する。このとき、地表面最大速度と地震被害の関係を模式的に示すと、図 3.8 となる。ここで、建築設備の被害結果は、建物ごとに、

- ・被害有り：被害率  $r = 1$
- ・被害なし：被害率  $r = 0$

にプロットされる。





ここに、◆：地震被害データから得られた被害結果

●：被害率曲線から計算される被害率

N：調査建物の総数

図 3.8 被害率曲線の作成法

被害率曲線の作成法として、確率紙を用いた最小二乗法がある。しかし、この手法は、被害率の値そのものを用いて回帰するため、図 3.8 のように被害率の値が 0 または 1 では、データのバラツキが大きく回帰を行う際の誤差が懸念される。このため、本研究では、被害発生を二項分布でモデル化し、二項分布を用いた最尤法により被害率曲線を評価する。二項分布の確率関数  $P(m)$  は、求める被害率曲線を  $F(v)$  とすると、(3.4) 式から求められる。

$$P(m_i|v_i) = \{F(v_i)\}^{m_i} \times \{1 - F(v_i)\}^{M_i} \quad (3.4)$$

ここに、被害有り： $m=1$ 、 $M=0$

被害なし： $m=0$ 、 $M=1$

同様に、全ての建物 ( $i=1 \sim N$ ) に対して、(3.4) 式が成り立つ。このとき、被害率曲線  $F(v)$  のパラメータを、地表面最大速度と地震被害の関係が実現する確からしさを最大化する規範に基づき評価する。この規範は、被害率曲線  $F(v)$  から推定された被害の発生確率  $P(m)$  を、全ての建物 ( $i=1 \sim N$ ) まで掛け合わせた値を最大化することと等価になる。(3.4) 式の被害の発生確率  $P(m)$  を、全ての建物 ( $i=1 \sim N$ ) に対して掛け合わせると、尤度関数  $L$  は(3.5) 式となる。

$$\begin{aligned} L &= P(m_1|v_1) \times P(m_2|v_2) \times \cdots \times P(m_N|v_N) \\ &= \left( \{F(v_1)\}^{m_1} \times \{1 - F(v_1)\}^{M_1} \right) \times \left( \{F(v_2)\}^{m_2} \times \{1 - F(v_2)\}^{M_2} \right) \\ &\quad \times \cdots \times \left( \{F(v_N)\}^{m_N} \times \{1 - F(v_N)\}^{M_N} \right) \end{aligned} \quad (3.5)$$



このとき、(3.5)式の尤度関数  $L$  の自然対数をとると、対数尤度関数  $\ln L$  は(3.6)式となる。(3.6)式を用いて、被害率曲線  $F(v)$  のパラメータを評価する。

$$\begin{aligned}\ln L = & (m_1 \times \ln\{F(v_1)\} + M_1 \times \ln\{1 - F(v_1)\}) \\ & + (m_2 \times \ln\{F(v_2)\} + M_2 \times \ln\{1 - F(v_2)\}) \\ & + \cdots \cdots \cdots + (m_N \times \ln\{F(v_N)\} + M_N \times \ln\{1 - F(v_N)\})\end{aligned}\quad (3.6)$$

被害率曲線の分布形として、変数が正の領域にのみ分布し、かつ単調増加関数である条件が求められる。被害率曲線の地震動指標として最大加速度を採用すると、被害率曲線の分布形として対数正規分布が一般的に用いられる。対数正規分布を採用すると、各建物の被害率  $F(v_i)$  は、(3.7)式から計算できる。

$$F(v_i) = \Phi\left(\frac{\ln v_i - \lambda}{\zeta}\right) \quad (i = 1 \sim N) \quad (3.7)$$

ここに、 $\lambda$  : 被害率曲線の対数平均値

$\zeta$  : 被害率曲線の対数標準偏差

$\Phi(\cdot)$  : 標準正規分布関数

以上の条件のもとで、(3.7)式の被害率  $F(v_i)$  を(3.6)式に代入すると、対数尤度関数  $\ln L$  が計算できる。本研究では、対数尤度関数  $\ln L$  を最大化する被害率曲線  $F(V)$  のパラメータ ( $\lambda, \zeta$ ) を、最適化問題の一手法であるシンプレックス法により求める。

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \lambda} = 0 \quad (3.8)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial \zeta} = 0 \quad (3.9)$$

ところで、地震被害データから求められた各建物の被害率は、

- ・被害有り : 被害率  $r = 1$
- ・被害なし : 被害率  $r = 0$

にそれぞれプロットされるので、これらの地震被害結果と推定された被害率曲線との適合性を視覚的に確認することは難しい。このため、一つの区間に含まれる建物の棟数が等しくなるように地震被害データを分割して、分割された区間の地表面最大速度の平均値と被害率の関係を求める。

建物の総数  $N$  を、 $n$  区間 (ただし、 $n < N$ ) に分割し直して、一つの区間に含まれる建物数を、全ての区間に対して等しくする。まず、

①建物ごとに推定された地表面最大速度  $v$  が、

$$v_1 > v_2 > v_3 > \cdots \cdots > v_N$$

となるように、地震被害データを並び替える。

②建物の総数Nをn分割すると、一つの区間に含まれる建物数kは、(3.10)式となる。

$$k = \text{int}\left(\frac{N}{n}\right) + 1 \quad (3.10)$$

③各建物(i=1～N)ごとの地表面最大速度v(i)と被害率r(i)を用いて、分割された区間の地表面最大速度の平均値bと被害率dの関係を、表3.3のように求める。

表 3.3 分割された区間の地表面最大速度の平均値と被害率の関係

区間	地表面最大速度の平均値 b	被害率 d
1	$\frac{\sum_{i=1}^k v(i)}{k}$	$\frac{\sum_{i=1}^k r(i)}{k}$
2	$\frac{\sum_{i=k+1}^{2k} v(i)}{k}$	$\frac{\sum_{i=k+1}^{2k} r(i)}{k}$
⋮	⋮	⋮
n	$\frac{\sum_{i=\{k(n-1)+1\}}^N v(i)}{N - k(n-1)}$	$\frac{\sum_{i=\{k(n-1)+1\}}^N r(i)}{N - k(n-1)}$

### 3.4 地震被害データを用いた建築設備の耐震性能

#### 3.4.1 建築設備の被害率曲線

建築設備の被害率曲線を、図 3.9 に示す。建築設備の被害結果は、被害率曲線まわりでバラツキが見られるものの、地表面最大速度と建築設備の被害関係は対数正規分布を用いて概ね回帰できることがわかる。

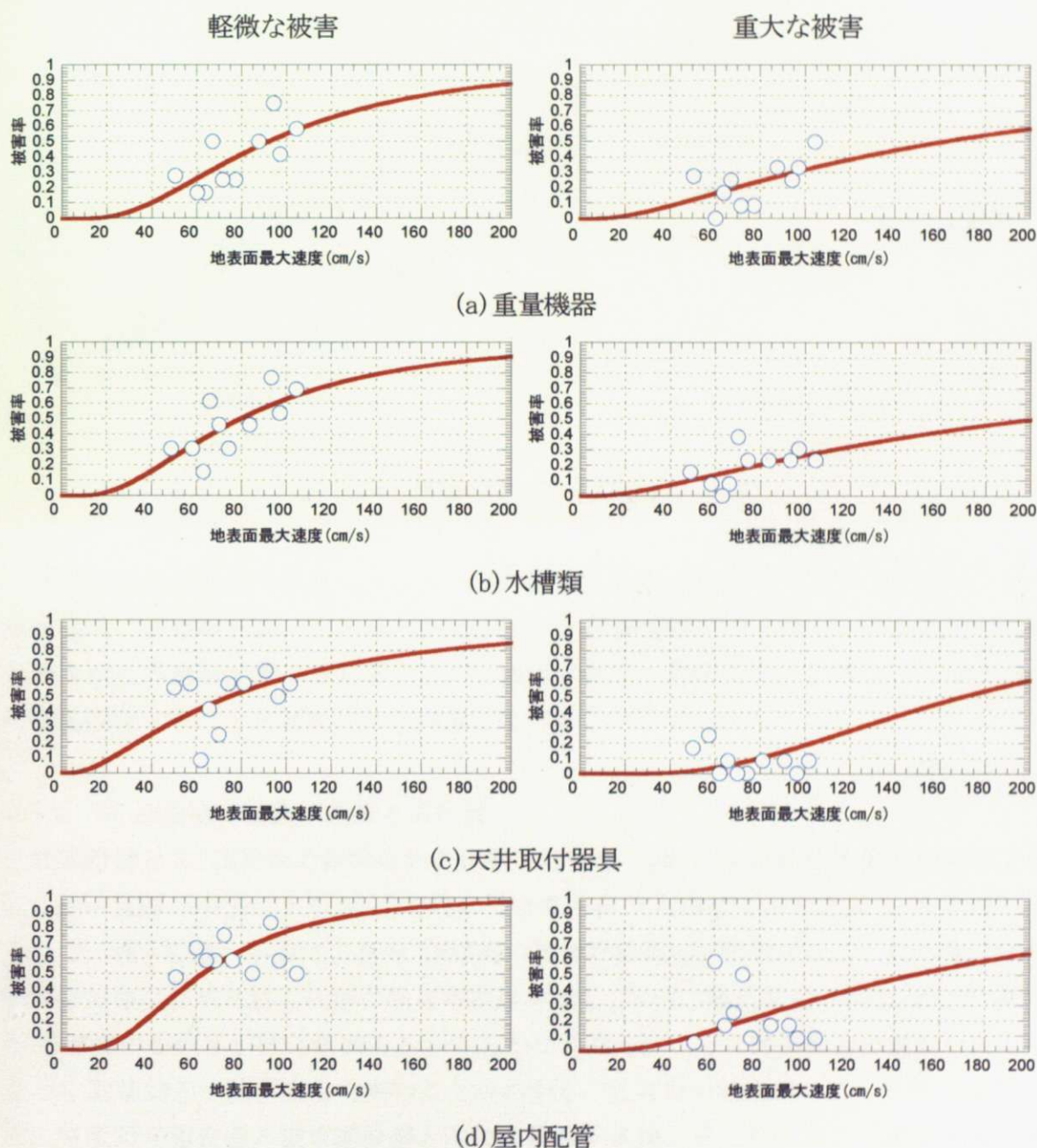


図 3.9 建築設備の被害率曲線

このとき、被害率曲線の中央値と対数標準偏差は表 3.4 となり、建築設備の被害率曲線を相互比較すると図 3.10 となる。



表 3.4 被害率曲線の中央値と対数標準偏差

	軽微な被害		重大な被害	
	中央値(cm/s)	対数標準偏差	中央値(cm/s)	対数標準偏差
重量機器	91.5	0.659	159.5	1.013
水槽類	79.2	0.693	199.6	1.119
天井取付器具	74.5	0.948	169.4	0.596
屋内配管	62.9	0.612	148.1	0.834

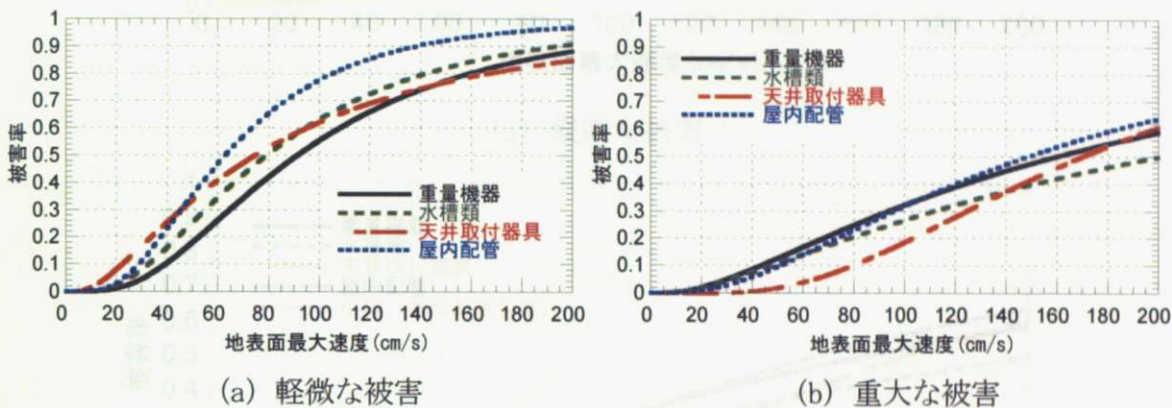


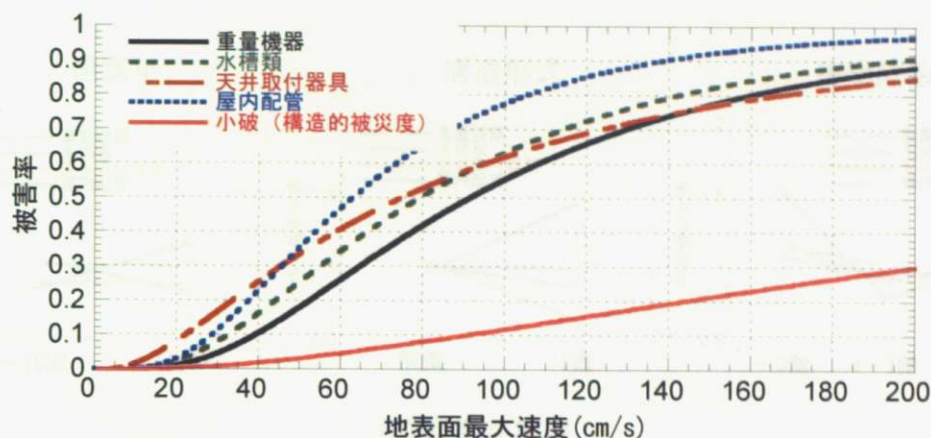
図 3.10 建築設備の被害率曲線の比較

軽微な被害の被害率曲線を見ると、屋内配管の被害率が高く、重大な被害では天井取付器具の被害率が低いことがわかる。また、重量機器では、傾き、ずれなどの軽微な被害が他の建築設備よりも生じにくい傾向があり、重量機器をアンカーボルトで床に耐震固定することが地震被害を軽減させるために必要となる。

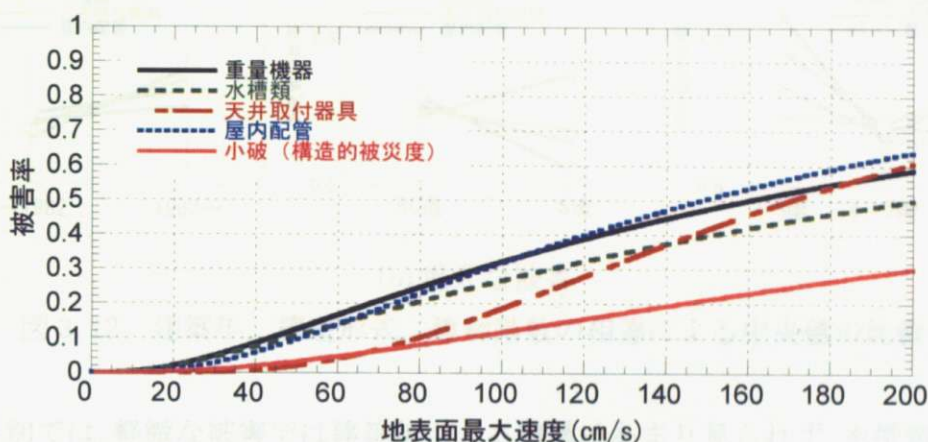
### 3.4.2 RC 造建物の被害率曲線との比較

建築設備と RC 造建物の耐震性能を比較するため、図 3.10 の建築設備の被害率曲線に、林・宮腰の手法による RC 造建物の被害率曲線<sup>14)</sup>を併せて示すと図 3.11 となる。ここで、林・宮腰の手法による RC 造建物の被害率曲線は、階数区別なしかつ全年代の建物を対象に作成された小破の被害率曲線を示している。建築設備の軽微な被害率は、RC 造建物の小破率が低い領域においてもかなり高く、さらに建築設備の重大な被害率は、RC 造建物の小破率よりも高いことがわかる。これらの結果は、出口ら<sup>6)</sup>が検討した、自家用発電設備の被害率曲線と建物の被害率曲線との比較結果とも概ね一致している。従って、建物の被災度が小破でも、建築設備が重大な被害を受けて、建物としての機能が停止する可能性があると考えられる。このため、地震後において建物の機能性を維持するには、建物の耐震安全性に加えて、建築設備の耐震性能が重要であるといえる。





(a) 軽微な被害



(b) 重大な被害

図 3.11 RC 造建物の被害率曲線との比較

### 3.4.3 建築年、構造形式、建物階数による比較

建築設備の耐震規定は、1978 年の宮城県沖地震における設備機器の地震被害を経験して、「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup> が 1982 年に作成されている。このため、建築設備の耐震性能に影響を与える要因として、建築年、構造形式および建物階数を設定し、建築設備の耐震性能の差異について被害率曲線を用いて検討する。ここで、建築年は「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup> が制定された 1982 年以前と 1983 年以降で区分する。構造形式は RC 造と S 造の 2 種類とし、建物階数は 3 階以下、4～7 階、8 階以上の 3 種類とした。各要因別の被害率曲線を作成するとき、データを細分化することによりデータ数が減少して、統計的不確定性が増加することが予想される。従って、各要因別の被害率曲線の対数標準偏差は、全データを用いて求められた表 3.4 の値を全てのケースに対して用いることにした。このとき、各要因別に建築設備の被害率曲線を作成し、全体で評価したときの中央値（表 3.4）に対する各要因別の中央値の比

率を、図 3.12 に示す。

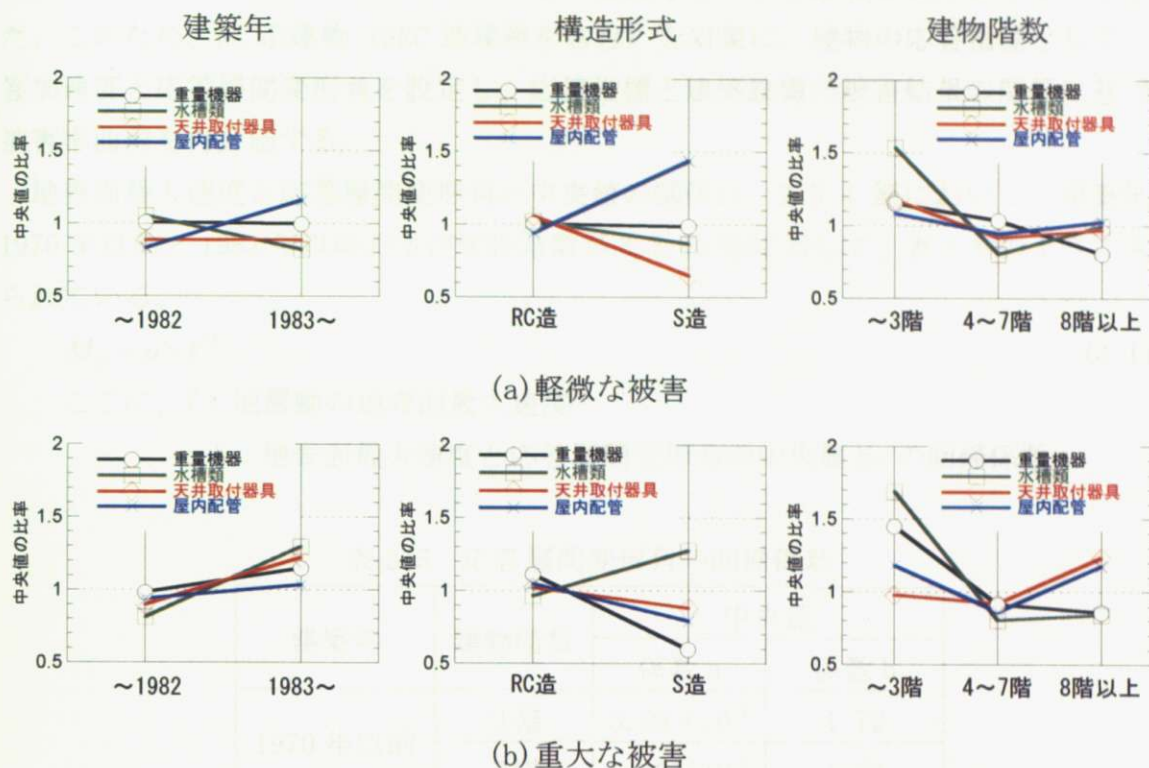


図 3.12 建築年，構造形式，建物階数の相違による中央値の比較

建築年別では、軽微な被害では建築年による差異はあまり見られず、水槽類では1983年以降の中央値が1982年以前のものよりも低くなっている。この原因として、水槽類の被害の特徴として、転倒よりも水槽自体の破損事例が多いことが考えられる<sup>7)</sup>。とくに、FRP製水槽では、天井パネルや一部は側面パネルまで破損している事例も見られた。一方、重大な被害では、全ての建築設備に対して、1983年以降の中央値が1982年以前よりも大きくなっている。従って、「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup>の制定後は、転倒などの重大な被害は減少しているといえる。構造形式別では、RC造建物よりもS造建物の中央値が小さく、S造建物の方が建築設備の被害が発生しやすい傾向が見られる。建物階数別では、全般的に建物階数が高くなるに従い、被害率曲線の中央値が低下する傾向がある。これは、兵庫県南部地震における建物被害では、地震動の卓越周期により、一般的に階数の高い建物ほど被害が大きかったこと<sup>16)</sup>に対応している。また、これらの結果は、「阪神・淡路大震災調査報告（建築設備・建築環境）」<sup>17)</sup>における建築設備の被害分析結果とも概ね対応している。

#### 3.4.4 応答指標を用いた建築設備の被害率曲線

3.4.3 節において、建物階数を3種類に区分して、建築設備の被害率曲線の中央値

を比較すると、中央値は建物階数により異なることがわかった。従って、建築設備の耐震性能は、建物階数すなわち建物各層の地震応答による影響を受けることが示された。このため、RC 造建物（SRC 造建物を含む）を対象に、建物の応答指標として、応答加速度と応答層間変形角を設定し、応答指標と建築設備の被害結果の関係に基づき被害率曲線を再評価する。

地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の関係は、2.5.4 節において、建築年が 1970 年以前と 1982 年以降および建物階数が 3, 7, 10 階に対して、表 3.5 のように求められている。

$$M_s = a \times V^b \quad (3.11)$$

ここに、V：地震動の地表面最大速度

a, b：地表面最大速度と応答層間変形角の中央値  $M_s$  の回帰係数

表 3.5 応答層間変形角の回帰係数

建築年	建物階数	中央値	
		係数 a	係数 b
1970 年以前	3 階	$3.55 \times 10^{-6}$	1.72
	7 階	$1.46 \times 10^{-5}$	1.54
1982 年以降	3 階	$1.28 \times 10^{-5}$	1.29
	7 階	$1.76 \times 10^{-5}$	1.32
	10 階	$1.63 \times 10^{-5}$	1.45

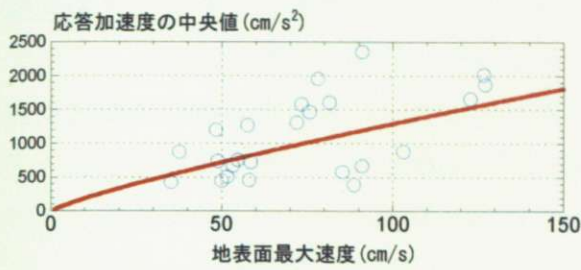
地表面最大速度と応答層間変形角の中央値の関係と同様に、地表面最大速度と応答加速度の中央値  $M_a$  の関係を求めると、図 3.13 となる。このとき、両者の関係を (3.12) 式を用いて回帰したとき、回帰係数を表 3.6 に、求められた回帰式を図 3.13 に併せて示す。ただし、建物の応答加速度は、全ての層における最大値を採用している。

$$M_a = c \times V^d \quad (3.12)$$

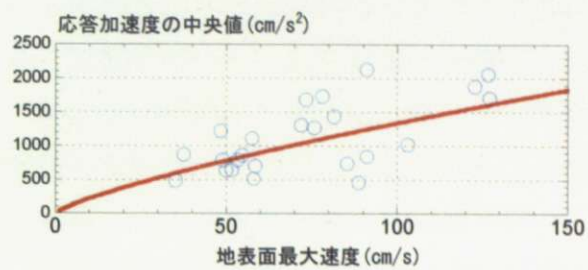
ここに、V：地震動の地表面最大速度

c, d：地表面最大速度と応答加速度の中央値の回帰係数



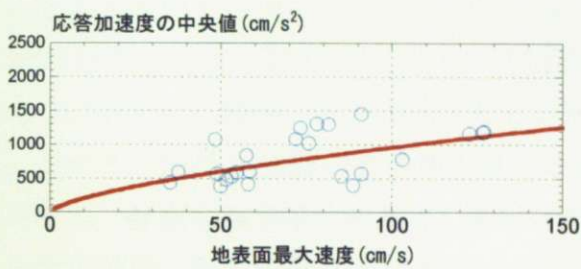


建物階数：3階

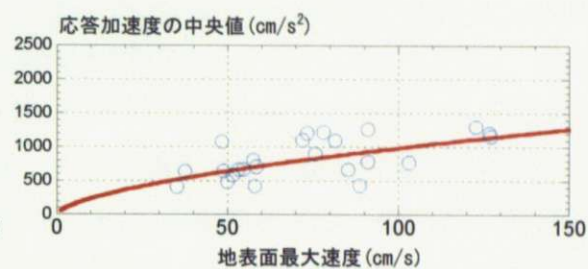


建物階数：7階

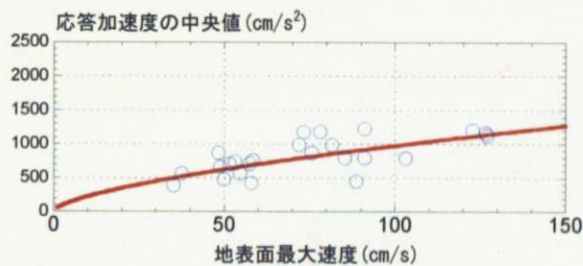
(a) 建築年：1970 年以前



建物階数：3階



建物階数：7階



建物階数：10階

(b) 建築年：1982 年以降

図 3.13 地表面最大速度と応答加速度の中央値の関係

表 3.6 応答加速度の回帰係数

建築年	建物階数	中央値	
		係数 c	係数 d
1970 年以前	3 階	27.71	0.84
	7 階	38.13	0.78
1982 年以降	3 階	44.27	0.67
	7 階	58.63	0.61
	10 階	49.03	0.65



地表面最大速度と応答加速度ならびに応答層間変形角の中央値の関係が求められたので、これらの応答指標と建築設備の被害結果の関係を用いて、3.3.2 節の手法により建築設備の被害率曲線を作成する。ただし、3.4.3 節で述べたように、データを細分化することによりデータ数が減少して、統計的不確定性が増加することが懸念されるので、被害率曲線の対数標準偏差は全データを用いて求められた表 3.4 の値を全てのケースに対して用いることにした。ここで、応答加速度は、全ての種類の建築設備に対してその被害を特徴付ける指標であるとし、一方、応答層間変形角は、天井取付器具と屋内配管に対してのみ適用される指標であると設定した。

応答加速度を指標としたとき、重量機器の被害率曲線を、建築年が 1982 年以前と 1983 以降に対して図 3.14 に示す。「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup>によると、耐震クラス B では、建物応答が大きくなる上層階において、設計用標準震度を 1.0 に設定している。1983 年以降の被害率曲線を対象に、この値に対する重量機器の被害率を求めると、軽微な被害率は約 0.5、重大な被害率は約 0.1 程度となる。従って、「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup>に基づいて耐震設計を行うと、応答加速度で約  $1000\text{cm/s}^2$  の地震動が発生しても、ずれなどの軽微な被害の生じる可能性はあるが、転倒・移動などの重大な被害は生じにくいと考えられる。

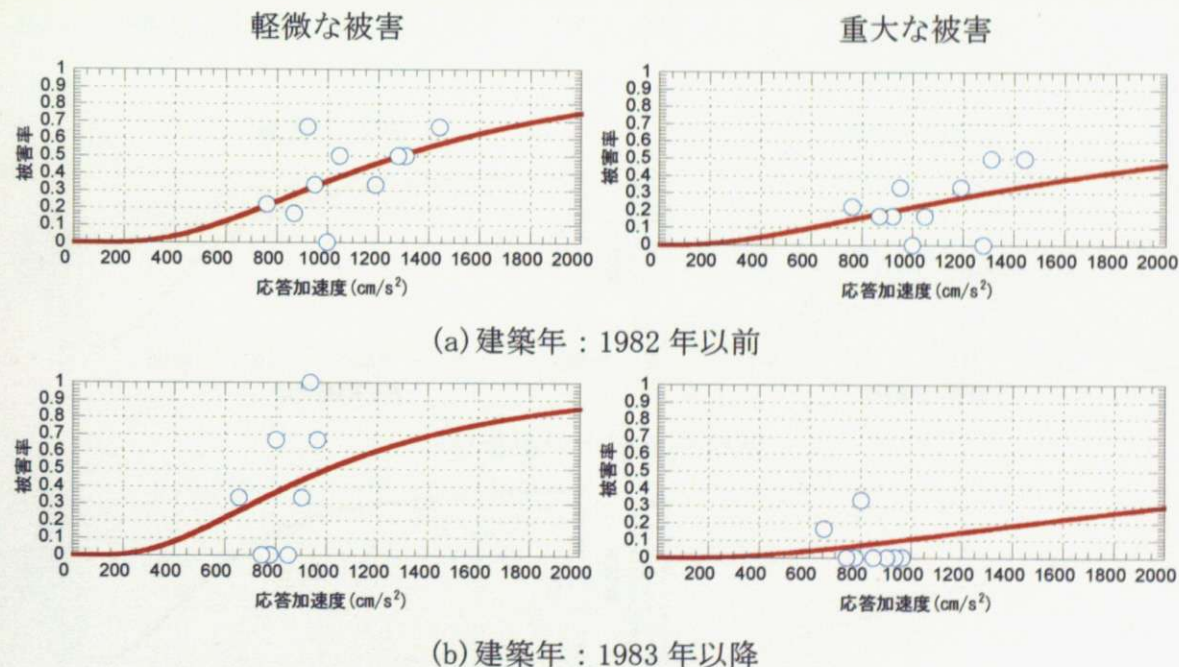


図 3.14 重量機器の被害率曲線（応答加速度を指標）

他の建築設備に対しても、応答加速度を指標として被害率曲線を作成すると、限界加速度の中央値が表 3.7 となる。軽微な被害では、屋内配管を除き、1982 年以前の建築設備の限界加速度が 1983 年以降のそれよりも大きくなっており、1983 年以降の建



築設備の耐震性能は顕著に向上していない。しかし、重大な被害では、天井取付器具を除き、1982 年以前の建築設備の限界加速度が 1983 年以降のそれよりも小さくなっており、1983 年以降の建築設備の耐震性能が全般的に向上していることがわかる。

設備の限界層間変形角が 1983 年以降のそれよりも小さくなっており、1983 年以降の建築設備の耐震性能が向上していることがわかる。

表 3.7 限界加速度 ( $\text{cm/s}^2$ ) の中央値

	1982年以前		1983年以降	
	軽微な被害	重大な被害	軽微な被害	重大な被害
重量機器	1279.1	2169.2	1003.7	3437.1
水槽類	1162.2	2247.4	792.9	3192
天井取付器具	955.9	2137.3	856.2	2001.2
屋内配管	730	1921.7	799.1	1942.1

つぎに、応答層間変形角を指標としたとき、屋内配管の被害率曲線を図 3.15 に示す。「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup>によると、建物のエキスパンションジョイント部を通過する配管は、RC 造建物では原則として 1/200 で設計することになっている。このため、1983 年以降の被害率曲線を対象に、この値に対する屋内配管の被害率を求めると、軽微な被害率は約 0.3、重大な被害率は約 0.1 程度である。従って、応答層間変形角で約 1/200 の地震動が発生しても、変形などの軽微な被害は生じる可能性があるが、切断などの重大な被害は生じにくいと推定される。

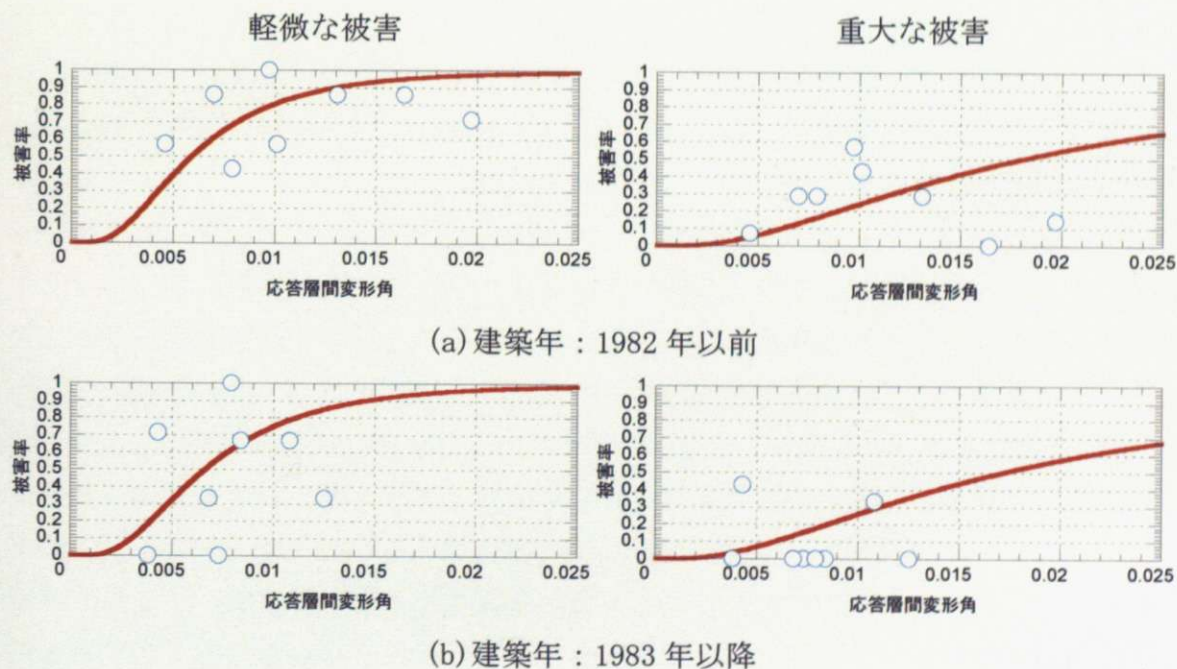


図 3.15 屋内配管の被害率曲線（応答層間変形角を指標）

天井取付器具に対しても、応答層間変形角を指標として被害率曲線を作成すると、

限界層間変形角の中央値が表 3.8 となる。軽微な被害では、1982 年以前の屋内配管の限界層間変形角が 1983 年以降のそれよりも小さくなっているが、逆に天井取付器具では 1982 以前の方が大きくなっている。しかし、重大な被害では、1982 年以前の建築設備の限界層間変形角が 1983 年以降のそれよりも小さくなっており、1983 年以降の建築設備の耐震性能が向上していることがわかる。

表 3.8 限界層間変形角の中央値

	1982年以前		1983年以降	
	軽微な被害	重大な被害	軽微な被害	重大な被害
天井取付器具	1/128	1/50	1/143	1/40
屋内配管	1/169	1/56	1/152	1/58

以上、RC 造建物（SRC 造建物を含む）を対象に、応答加速度と応答層間変形角を用いて建築設備の被害率曲線を作成すると、軽微な被害では建築年による建築設備の耐震性能の向上はあまり見られないが、重大な被害では 1983 年以降の建築設備の耐震性能がそれ以前よりも全般的に向上していることを示した。

### 3.5 まとめ

建物の機能性に着目し、兵庫県南部地震で被災した 156 棟の建物に対する建築設備の地震被害データを用いて、その耐震性能を被害率曲線に基づき検討した。

まず、兵庫県南部地震における地表面最大速度の面的な推定を行い、地表面最大速度と建築設備の被害結果の関係に基づき、建築設備の被害率曲線を二項分布を用いた最尤法により評価した。軽微な被害の被害率曲線では屋内配管の被害率が高く、重大な被害では天井取付器具の被害率が低い傾向があることがわかった。また、重量機器では、傾き、ずれなどの軽微な被害が他の建築設備よりも生じにくく、重量機器をアンカーボルトで床に耐震固定することが必要となる。また、RC 造建物の被害率曲線と建築設備の被害率曲線を比較すると、建築設備の軽微な被害率は、RC 造建物の小破率が低い領域においてもかなり高く、さらに建築設備の重大な被害率は、RC 造建物の小破率よりも高いことを示した。このため、地震後において建物の機能性を維持するには、建物の耐震安全性に加えて、建築設備の耐震性能が重要になる。

つぎに、建築年、構造形式、建物階数の相違が被害率曲線に与える影響について考察した。建築年別では、軽微な被害では建築年による差異はあまり見られず、水槽類では 1983 年以降の中央値が 1982 年以前のものよりも低くなっている。この原因として、水槽類の被害の特徴として、転倒よりも水槽自体の破損事例が多いことが考えられる。しかし、重大な被害では、全ての建築設備に対して、1983 年以降の中央値が 1982 年以前よりも大きくなっており、「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup> の制定後は転倒などの重大な被害は減少しているといえる。構造形式別では、RC 造建物よりも S 造建物の中央値が小さく、S 造建物の方が建築設備の被害が発生しやすい傾向が見られる。建物階数別では、全般的に建物階数が高くなるにつれて、被害率曲線の中央値が減少する傾向がある。これは、兵庫県南部地震における地震動の卓越周期により、一般的に階数の高い建物ほど被害が大きかったことに対応している。

さらに、RC 造建物（SRC 造建物を含む）を対象に、建物の応答指標として応答加速度と応答層間変形角を計算し、応答指標と建築設備の被害結果の関係に基づき被害率曲線を再評価した。重量機器を、「建築設備耐震設計・施工指針」<sup>15)</sup> の耐震クラス B で設計すると、応答加速度で約  $1000\text{cm/s}^2$  の地震動強さが生じたとき、ずれなどの軽微な被害率は約 0.5 となるが、転倒・移動などの重大な被害率は約 0.1 となり、重大な被害は生じにくいことが確認された。他の建築設備に対しても被害率曲線を作成すると、軽微な被害では建築年による建築設備の耐震性能の向上はあまり見られないが、重大な被害では 1983 年以降の建築設備の耐震性能がそれ以前よりも全般的に向上していることがわかった。

建築設備の耐震性能は、地震後において建物の機能性を維持するために重要であり、今後は、構築された建築設備の被害率曲線を、兵庫県南部地震以外の地震被害への適



用性を検討する必要がある。一方、建築設備は、天井や壁などの非構造部材との取り付け部分が多いため、これらの部材を組み合わせた地震損傷度評価法の作成や、建物全体における建築設備システムとしての地震損傷度評価法も必要となる。一方、建築設備の被害率曲線を作成するとき、建築年、構造形式、建物階数別に評価したが、今後は、建築年、構造形式、建物階数の各指標と建築設備の被害率の関係を、順序ロジットモデルを用いて総合的に検討する必要がある。

### 3 章の参考文献

- 1) 川口 健一：公共ホールの地震被害と内部空間の安全性，日本建築学会大会 構造部門（シェル・空間構造）パネルディスカッション資料，pp.11-17，2005
- 2) 井上 朝雄：福岡西方沖地震における窓ガラスを中心とした被害と対策，BELCA NEWS，pp.24-28，建築・設備維持保全推進協会，2006
- 3) 金子 美香，神原 浩，田村 和夫：1995年兵庫県南部地震の被害調査に基づく非構造部材の耐震性評価，日本建築学会技術報告集，第17号，pp.563-566，2003
- 4) 神原 浩，林 康裕，田村 和夫：アンケート調査に基づく建物の非構造部材被害と地震動強さとの関係，日本建築学会構造系論文集，第578号，pp.155-161，2004
- 5) 金子 美香，神原 浩，田村 和夫：非構造部材の耐震実験結果に基づく耐震性能の整理，日本建築学会技術報告集，第21号，pp.39-44，2005
- 6) 出口 嘉一，辻本 誠，河野 守：建築設備機器の被害関数，構造工学論文集 Vol.47B，pp.647-652，2001
- 7) 平山 昌宏，灰谷 義行，伊藤 剛：阪神・淡路大震災における建築設備の被害分析－建築設備の被害分析と今後の耐震対策－，大林組技術研究所報 特別号，pp.111-121，1996
- 8) Wald D. J. : Slip History of the 1995 Kobe, Japan Earthquake Determined from Strong Motion Teleseismic and Geodetic Data, J. Phys. Earth, 1996
- 9) 司 宏俊，翠川 三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，第523号，pp.63-70，1999
- 10) 藤本 一雄，翠川 三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定，日本地震工学会論文集，第3巻，2003
- 11) 林 康裕，川瀬 博：1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価，日本建築学会構造系論文集，第481号，pp.37-46，1996
- 12) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震強震記録資料集，1996
- 13) 諏訪 仁，野畑 有秀，関 松太郎：兵庫県南部地震の被災データベースを用いた既存建築物の地震リスク評価に関する研究，日本建築学会技術報告集、第12号、pp.41-46，2001
- 14) 林 康裕，宮腰 淳一，田才 晃，大野 義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能，日本建築学会構造系論文集，第528号，pp.135-142，2000
- 15) 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針，2005
- 16) 日本建築学会近畿支部：1995年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書，pp.2 -37，1996
- 17) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編－7 建築設備・建築環境，1999
- 18) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針，1991