

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

VULNERABILITY FUNCTION BASED ON EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS
WITH DISPERSION OF STRUCTURAL STRENGTH AND DUCTILITY CAPACITY

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***

*Jun'ichi MIYAKOSHI, Hiroshi KAMBARA, Daigo ISHII, Kazuo TAMURA,
Makoto YAMAGUCHI, Akiko NATORI and Masahiro YOSHIMURA*

We propose a method to evaluate vulnerability functions based on earthquake response analysis in consideration of not only dispersions of structural strength but also dispersions of ductility capacity. Vulnerability functions, which show the relationship between the ratio of damaged buildings and the peak ground velocity, calculated using this method indicate good correspondence with vulnerability functions obtained from the data of damaged buildings during the 1995 Hyogo-Ken-Nambu earthquake. The data of wooden buildings and reinforced concrete buildings are focused in this paper. This method is practically useful for examining the building damage ratio considering the characteristics of building structure performance, ductility capacity, and seismic ground motion.

Keywords: *Vulnerability function, Structural strength, Ductility capacity, Earthquake response analysis, The 1995 Hyogo-Ken-Nambu earthquake*
被害関数, 建物耐力, 変形性能, 地震応答解析, 兵庫県南部地震

1. はじめに

地震動の強度指標と建物被害率との関係については、従来から多様な研究が行われている。その多くは、実際の地震被害データを基にまとめたものであり、各地域の被害建物の比率とその地域における地震動強度指標値との関係を整理して得られている。しかしながら、これらの広域な地域において地震動が実際に観測されている場合は稀であり、あるいは観測されているとしてもそれがその地域の代表値として適切であるとは限らず、何らかの方法で推定した地震動強度指標を用いざるを得ないことが多い。

被害関数は地震被害想定に用いられるが^{例え}ば^り、従来は過去に発生した特定の地震被害データから得られた被害率曲線をそのまま用いているのが一般的である。この方法の場合には、過去に被害が発生した建物パラメータに限られること、地震動特性や建物特性の地域性を考慮できないことなどの問題がある。

これらの地域性を考慮するためには、地震動特性や建物特性を比較的容易に考慮できる地震応答解析に基づく被害関数作成手法が有効である。この方法では、建物構造の復元力特性モデルを仮定して、構造特性指標（例えば耐力レベルなど）の分布形を設定し、層

間変形などの応答値の分布を基に被害率を算出する。増田・他(2002)²⁾は1995年兵庫県南部地震の実被害率に適合する耐力分布を求め、被害想定に活用する手法を提案している。また、宮腰・他(1998)³⁾は建物耐力分布を仮定し、変形クライテリアを適切に設定することで被害関数を求めている。しかし、これらの手法では被害を生じる変形レベルを一律に与えており、それによるばらつきや地震動・地盤・復元力特性・構造要素の配置などに起因するばらつき要因を全て建物耐力に押し付けているため、必ずしも実際の挙動を反映したものにはなっていないと考えられる。このような地震動と建物被害の関係に関する建物の実挙動を把握するためには、実建物群のデータや、地震観測、実験、およびそれらの分析が必要であるが、現時点ではこれらが充分には行われていない。

そこで、本論文では、現在獲得できるデータを活用したより合理的な手法として、様々なばらつき要因のうち、建物の耐力のばらつきだけでなく、これまで考慮していなかった被害を生じる変形クライテリア(レベル)のばらつきも考慮した被害関数作成手法を提案する。即ち、同一変形における被害発生有無の程度を考慮する手法である。本提案手法により、地震動や建物耐力特性分布に応じた

* 清水建設株式会社 技術研究所 博士(工学)

** 清水建設株式会社 技術研究所 工修

*** 損害保険料率算出機構

Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

Institute of Technology, Shimizu Corporation, M. Eng.

Non-Life Insurance Rating Organization of Japan

建物被害率をより適切に評価することが可能になる。

2. 地震応答解析に基づく被害関数の作成手法

地震動の強度指標と建物被害率との関係を表す被害関数を、地震応答解析に基づいて作成する手法を図1に示す。この手法では、まず、①特定の建物モデルと入力地震動を用いて地震応答解析を行い建物耐力と応答変形との関係を求める。このとき、建物耐力と入力地震動のレベルを変えて解析することによって、耐力別および地震動レベル別の応答変形が得られる。つぎに、②建物の耐力分布を適切に仮定し、①で求めた耐力と応答変形の関係から、地震動レベル別の応答変形分布を求める。③被災度に対応させた変形クライテリアを仮定し、②で求めた応答変形分布から、変形クライテリアを超過する確率を地震動レベル毎に求め、それが被害率であるとする。被災度に対応させる変形クライテリアは、ある応答変形以上の全ての建物に対応する被災度となるのではなく、そのばらつきも考慮する。具体的には、図2に示すように、ある応答変形の範囲で、特定の被災度になる被害率として0から1の間の値を与えることによって変形性能のばらつきを考慮する。最後に、④対象とする地震動レベルで被害率を計算することにより、特定の建物モデルに対する被害関数が求められる。

本論文で示した被害関数の作成手法の特徴は、被害率が建物耐力のばらつきだけでなく、変形性能のばらつきによっても影響する考え、それを考慮している点にある。個々の特定建物では、耐力も被災度に対する変形クライテリアも固有のものと考えられるが、耐震性能に大きな差のない建物の集合を一つの建物モデルで表し、それに対する被害率を求めるためには、厳密な精度よりもある意味で大局的に捉えることが重要と考えられる。

また、本論文で示した手法で被害関数を作成するためには、建物モデル、入力地震動、耐力分布、被災度に対応する変形クライテリアの4つのパラメータを予め設定しなければならない。このうち、建物モデルは耐震設計や解析でよく用いられているような質点系モデルを、入力地震動は想定する地震の地震動の特徴をよく表した観測波形や模擬地震波を、耐力分布は近年盛んに行われている耐震診断結果を用いることが可能であると考えられる。これに比べて、被災度に対応する変形クライテリアを設定することは現時点では非常に困難であり、これまでの同様の検討でも数少ない実験結果などから経験的に与えているのが実情である。そこで、以降では、兵庫県南部地震の実被害データを用いて得られた被害率曲線が、地震動強さと建物被害率の関係を十分に表現していると考え、それと整合するような変形クライテリアを用いることにより、本論文で示した地震応答解析に基づく被害関数の作成手法の有効性を検討する。

3. 地震応答解析に基づく被害関数の作成

3.1 設定条件

3.1.1 兵庫県南部地震の実被害データに基づく被害率曲線

実被害データに基づいて地震動強さと建物被害率を関係付ける被害率曲線は、兵庫県南部地震の罹災証明の全壊および全半壊に対する木造とRC造の年代別被害率曲線とした。既に構築されているこれらの被害率曲線のうち、本研究では、林・宮腰(1998)⁴⁾、村尾・山崎(2000)⁵⁾、山口・山崎(2000)⁶⁾の3つを対象とした。対象とした

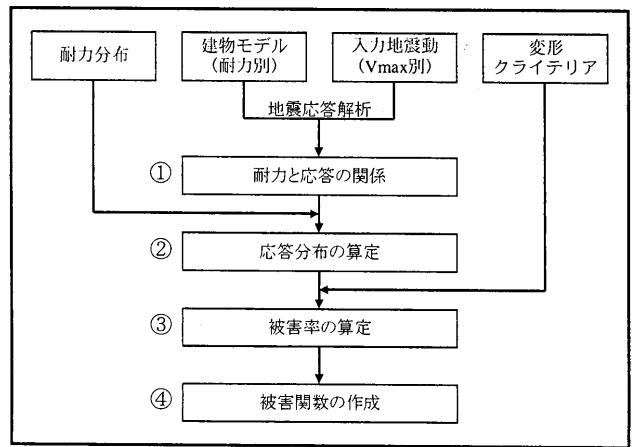


図1 地震応答解析に基づく被害関数の作成手法

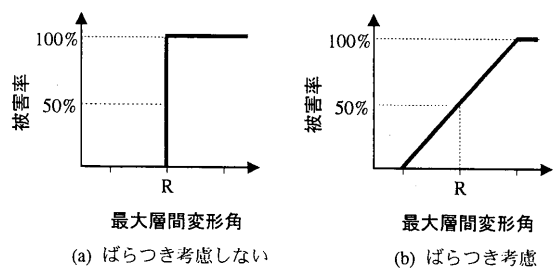


図2 変形性能のばらつきのモデル化の例

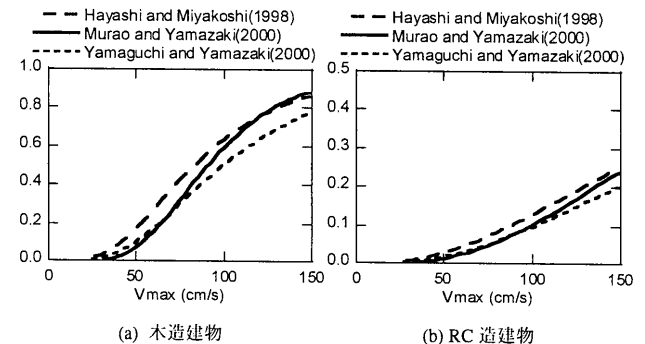


図3 兵庫県南部地震の実被害データに基づく被害率曲線 (全年代、全壊率)

被害率曲線を図3に示す。これらの被害率曲線の構築で用いられた地震動レベルから、地震動レベルの検討範囲を50~150cm/sとした。

3.1.2 建物モデル

解析モデルは基礎固定の多質点せん断型モデルとし、木造とRC造のそれぞれに対して、以下のように設定した。

木造モデルは在来木造建物を対象とした2質点モデルとし、1階重量と2階重量の比を3:2、階高は1、2階とも2.8mとした。各階の層せん断力係数は、1階と2階の比を1:1.5とした。各層の復元力特性は、鈴木・他(1997)⁷⁾を参考に、図4に示すようなトリリニア型とバイリニア+スリップ型を合わせた複合型とし、降伏時の層間変形角における層せん断力は、トリリニア型の降伏層せん断力 Q_{yT} とバイリニア型の降伏層せん断力 Q_{yS} の和で表し、その比率を $Q_{yT} : Q_{yS} = 6 : 4$ とした(北原・藤原, 1990)⁸⁾。第二折点は、降伏時の層間変形角を各層とも1/120とし、第三剛性は、層せん断力係

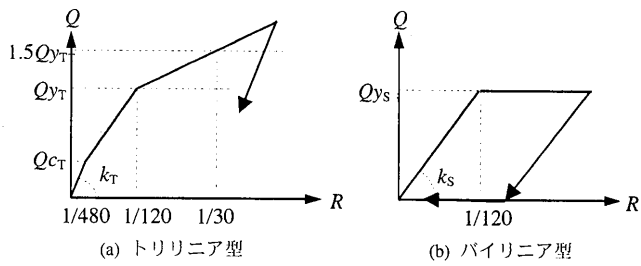


図4 木造建物の復元力モデル

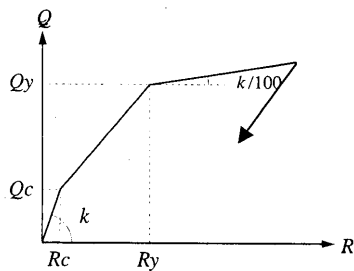


図5 RC造建物の復元力モデル

数を降伏層せん断力係数の1.5倍（日本建築学会，1990）⁹⁾と層間変形角1/30を通るように定めた。減衰は，初期剛性に基づく1次モードの減衰定数が5%となる粘性減衰で与え，瞬間剛性比例型とした。

一方，RC造建物モデルは3質点モデルとし，各階とも等重量，階高は各階とも3.5mとした。剛性の高さ方向の分布は，1階に対する最上階の比が1/3となる台形分布とし，各階の降伏層せん断力係数分布はAi分布（日本建築センター，1988）¹⁰⁾と同じとした。各層の復元力特性は，図5に示すようにスケルトンをトリリニア型，履歴特性を武田モデルとし，除荷時の剛性低下指数は0.4とした。降伏時の層間変形角は各層とも1/150とし，第一折点の層せん断力は降伏層せん断力の1/3とした。減衰は，初期剛性に基づく1次モードの減衰定数が2%となる粘性減衰で与え，瞬間剛性比例型とした。なお，3質点モデルとしたのは，既往のRC造建物の被害率曲線を構築したデータが，階数別には3階建てが最も多く，それを中心とした低層建物が大部分を占めていたこと（村尾，1999）¹¹⁾を考慮したためである。

3.1.3 入力地震動

地震応答解析に用いる入力地震動は，兵庫県南部地震の震度VII地域またはその周辺で観測された葦合Y成分，JR鷹取駅EW成分，JR宝塚駅EW成分の3つとした。兵庫県南部地震における数地点では周期1秒付近の成分が卓越した観測記録が得られているが，観測地点の地盤条件によっては観測地震波のスペクトル特性も異なると考えられる。本論文では，地震応答解析による応答変形としてこの地域の平均的な値に着目するため，複数の入力地震動を選定した。選定した入力地震動の加速度波形を図6(a)に，加速度応答スペクトルを図6(b)にそれぞれ示す。

3.1.4 耐力分布

耐力分布は，木造建物もRC造建物も対数正規分布関数で表せると考え，建設年代別に設定した。このとき，耐力分布のパラメータは，平均値と標準偏差である。

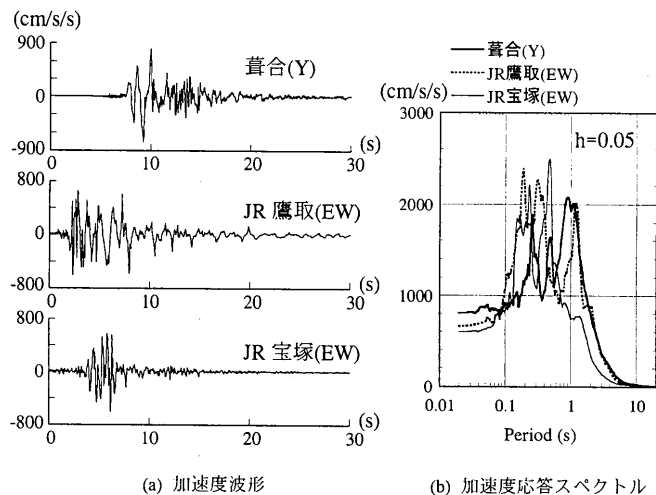


図6 解析に用いた入力地震動

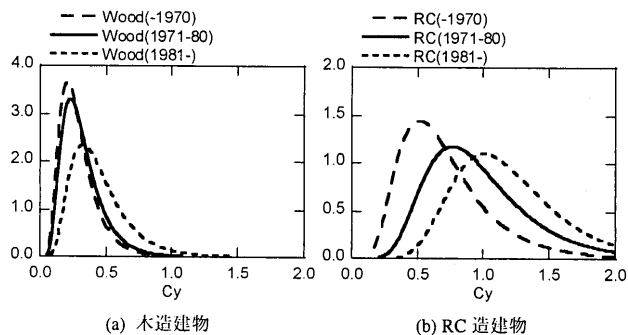


図7 解析に用いた耐力分布

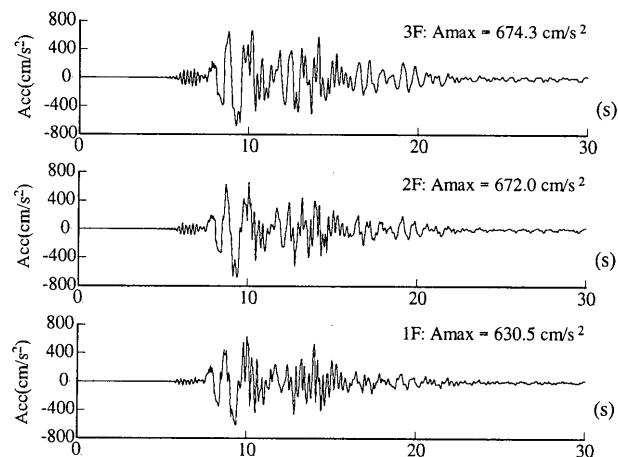


図8 応答加速度波形 (RC造, $C_y=0.5$, 葦合 Y 100cm/s 入力)

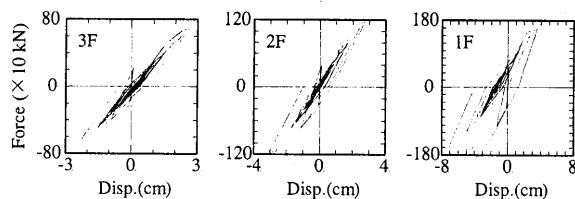


図9 荷重-変形関係 (RC造, $C_y=0.5$, 葦合 Y 100cm/s 入力)

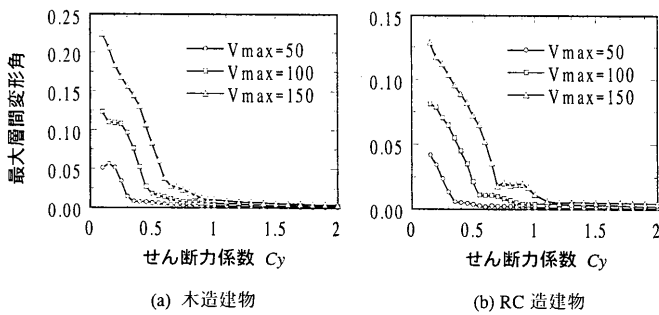


図 10 Cy と最大層間変形角の関係 (入力地震動: 葺合 Y)

木造建物の耐力係数の平均値は、1981 年以降で 0.45 とした。これは、新耐震設計法で定める壁率を最低限満足している建物の耐力が、ベースシア係数で 0.2 相当と考え、実建物では壁率の充足度が 1.0~2.0 程度以上に分布すること (山田, 2000)¹²⁾や、実大実験から求めた耐力と壁率から計算した耐力には 2~3 倍程度の差があること (鈴木・他, 1997)⁷⁾による。建設年代による耐力の平均値の違いは、設計基準の必要倍率の違いと耐震診断における老朽度を示す指標から、1981 年以降に対して、1971~80 年が 0.71 倍 ($0.45 \times 0.71 = 0.32$), 1970 年以前が 0.64 倍 ($0.45 \times 0.64 = 0.29$) とした。ばらつきは、壁率の統計値のばらつき (鈴木・後藤, 1995)¹²⁾や固有周期のばらつき (岩井・一反田, 1999)¹⁴⁾を参考にして、変動係数で 0.5 とし、建設年代によらず同じ値とした。

RC 造建物の耐力の平均値と標準偏差は、建物特性に応じてそれらの値が整理されている埼玉県(1998)¹⁵⁾の値を用いた。これは、中埜(1988)¹⁶⁾によって整理された静岡県 of 公共 RC 造建物の 2 次診断の I_s 値分布に基づいており、その他、宮城県沖地震、釧路沖地震、兵庫県南部地震の被災建物の調査から求められた壁終局時ベースシア係数 (小野瀬, 1982¹⁷⁾; 久野・他, 1994¹⁸⁾; 日本建築学会近畿支部, 1996¹⁹⁾)も参考にした。なお、2 次診断の I_s 値が必ずしも建物の保有耐力係数に対応しているわけではないが、 I_s 値が耐力指標と靱性指標の積で表され、既往の耐震診断結果から靱性指標がおおよそ 1 に近いことを考慮して、ここでは、 I_s 値が耐力指標すなわち建物の保有耐力とおおよそ対応するものと考えた。

本論文で設定した耐力分布を図 7 に示す。

3.2 地震応答解析に基づく被害関数

地震応答解析は、降伏ベースシア係数 C_y を 0.1~1.0 までは 0.05 刻みで、1.0~2.0 までは 0.1 刻みとした合計 29 個の建物モデルに対して、兵庫県南部地震の観測記録を最大速度で規準化して 10~200cm/s まで 10cm/s 刻みの合計 20 個の地震動レベルの地震動を入力して計算した。すなわち、観測記録 3×最大速度レベル 20×構造種別 2×降伏ベースシア係数 29 の合計 3,480 ケースについて計算した。計算結果の例として、降伏ベースシア係数 $C_y=0.5$ の RC 造 3 階建て建物に、葺合 Y 成分の観測記録を最大速度 100cm/s に規準化した地震波を入力した場合の、各層の応答加速度波形を図 8 に、層せん断力と応答変位の関係を図 9 にそれぞれ示す。図より、応答加速度は 1 階よりも 3 階が大きく、逆に層せん断力は 1 階の方が大きくなっていることがわかる。つぎに、地震動レベルを変化させた場合の、降伏ベースシア係数 C_y と最大応答変形角の関係を図 10 に示す。図より、 C_y が大きくなると最大層間変形角が小さくなる

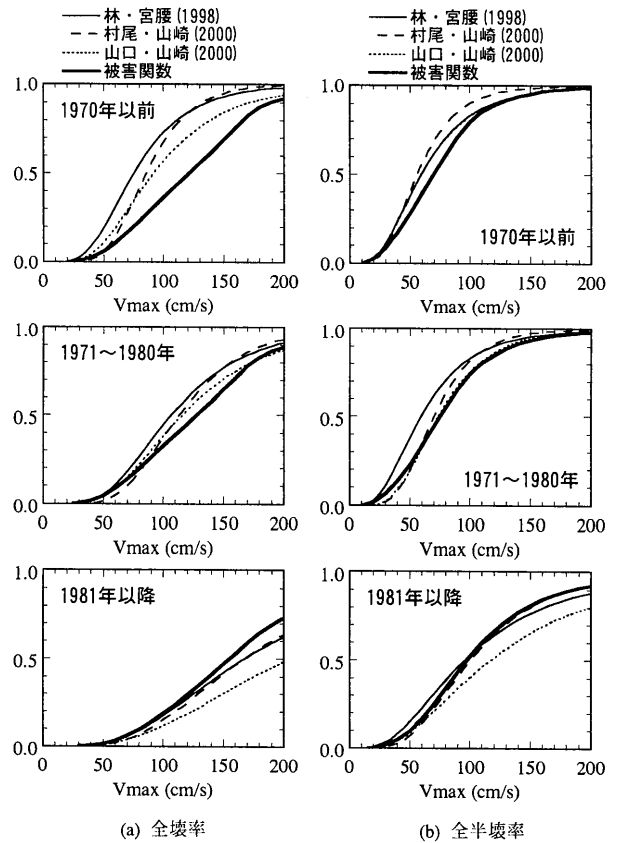


図 11 作成した被害関数と既往の被害率曲線との比較 (木造)

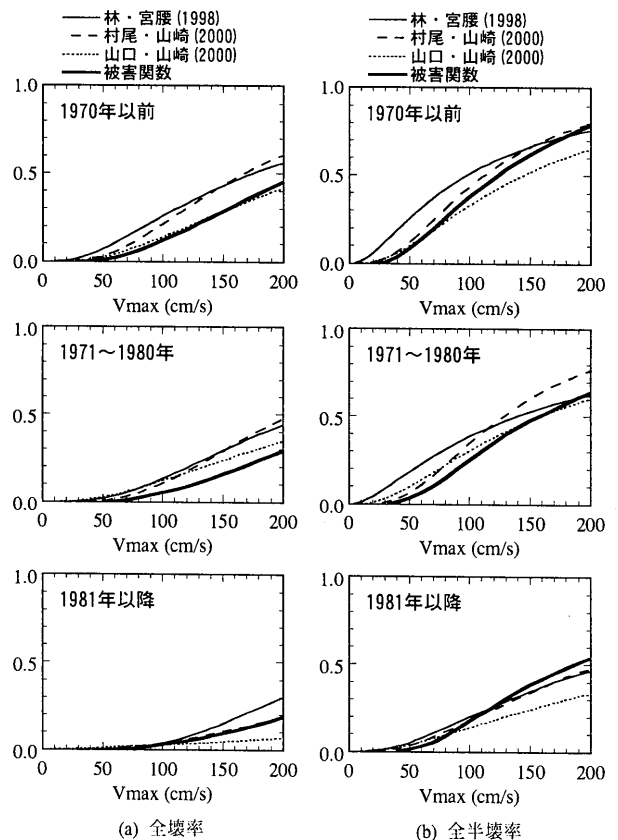


図 12 作成した被害関数と既往の被害率曲線との比較 (RC 造)

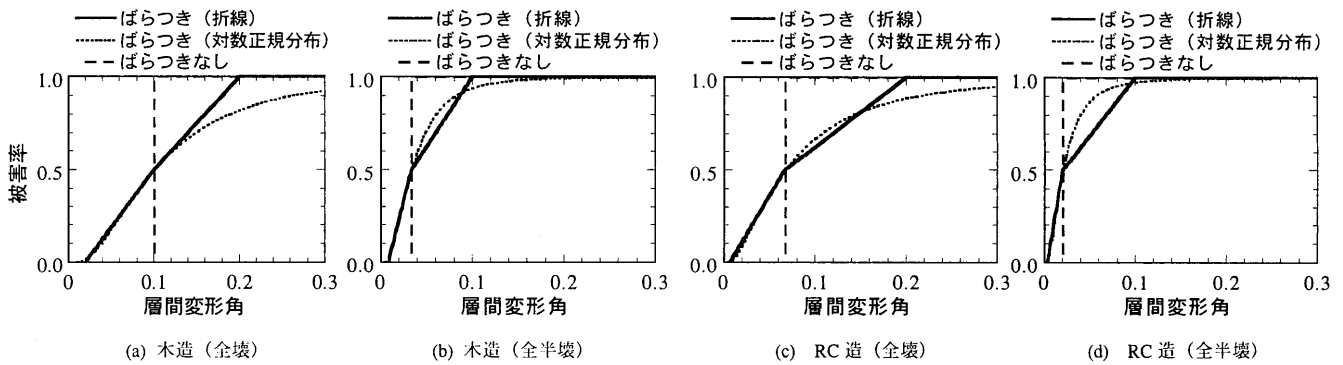


図 13 変形性能のばらつきのモデル化

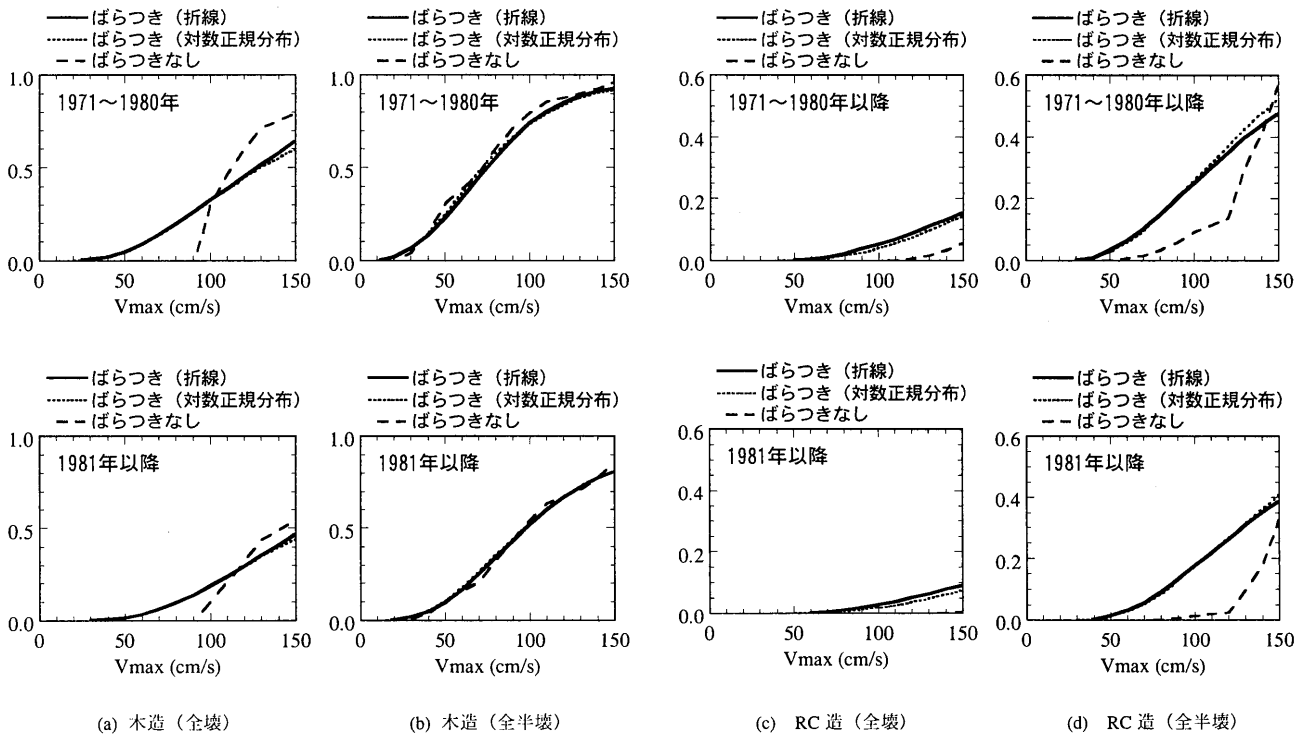


図 14 変形性能のばらつきのモデル化が被害関数に与える影響の比較

こと、最大速度レベルが大きくなると最大層間変形が大きくなることがわかる。

変形性能のばらつきを考慮して作成した被害関数を、木造建物について図 11 に、RC 造建物について図 12 に、それぞれ太実線で示す。このときの変形性能のばらつきは、構造種別により異なるが、建設年代毎に同一のものとして、他の建設年代でも既往の被害率曲線との対応が概ね良くなるように試行錯誤で作成した。具体的には、被害率が 0, 0.5, 1 に対する層間変形角を、木造建物の全壊で 1/50, 1/10, 1/5, 全半壊で 1/120, 1/30, 1/10, RC 造建物の全壊で 1/150, 1/15, 1/5, 全半壊で 1/300, 1/50, 1/10 とし、その間を直線でモデル化した。被害関数は、3 つの入力地震動ごとに作成されるが、ここでは、それらの被害率の平均値を被害関数として示した。また、図には、兵庫県南部地震の建物被害データから得られた 3 つの被害率曲線も細線で重ねて示す。図より、作成した被害関数は、1970

年以前の木造建物でやや差が大きい、その他では既往の被害率曲線を概ね説明できるといえる。なお、1970 年以前の被害関数については、変形クライテリアを全ての年代で同じとせずやや小さくすることで、兵庫県南部地震の建物被害データに基づく被害率曲線とより整合させることが可能であると考えられる。しかし、被災度と変形クライテリアの対応関係における年代別の定量的な違いを示すデータは現時点で不十分であり、今後の実証的なデータの蓄積が望まれる。

4. 変形性能のばらつきのモデル化に関する考察

3 章では、変形性能のばらつきを、被害率が 0, 0.5, 1 の 3 点を直線で結ぶ折線でモデル化した。ここでは、変形性能のばらつきのモデル化の違いが、作成された被害関数に与える影響について検討した。

変形性能のばらつきのモデル化は、(a) ばらつきを考慮しない場合、(b) 3点を直線で結ぶ折線でモデル化した場合、(c) 対数正規分布でモデル化した場合の3ケースを考え、木造建物とRC造建物のそれぞれに対する被害関数を作成した。各ケースの変形性能のばらつきのモデル化を図13に、作成した被害関数を図14にそれぞれ示す。このときの折線のモデル化は、3章で示したものと同一とした。図14より以下のことが指摘できる。

まず、変形性能のばらつきを考慮しない場合と折線でモデル化した場合を比較すると、木造建物の全半壊では両者がほぼ対応しているが、それ以外では、ばらつきを考慮しない場合の方が、木造建物の全壊では100cm/s程度以下、RC造建物では150cm/s程度以下で被害率が小さく、また、ある最大速度レベルでの被害率の立ち上がり急峻であることがわかる。これより、変形性能のばらつきを考慮することにより、被害関数がやや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も良いといえる。また、ばらつきを考慮しない場合には、変形クライテリアの設定が作成された被害関数に与える影響が非常に大きく、その値の設定が重要であるといえる。

つぎに、変形性能のばらつきを折線でモデル化した場合と対数正規分布でモデル化した場合を比較すると、1971～80年のRC造建物の全半壊率における最大速度の大きな部分で若干の差が見られるが、対象とした最大速度の範囲では両者の差はほとんどなく、より単純な折線モデルでも十分に適用可能であるといえる。

5. まとめ

本論文では、地震応答解析に基づく被害関数作成手法として、建物の耐力のばらつきだけでなく変形性能のばらつきも考慮した手法を提案した。

即ち、地震応答解析に基づく被害関数作成手法において、従来考慮されていなかった変形性能に起因するばらつきを考慮することにより、1995年兵庫県南部地震における木造建物とRC造建物の各年代別の被害率曲線を統一的な手法で表現することができた。

ここでは、建物モデルや入力地震動特性を既往の研究データから推定した上で、各被害レベルに対応する変形クライテリアを1995年兵庫県南部地震の被害率曲線に適合するように設定したが、本手法は、今後、建物構造特性や変形性能および入力地震動特性などに応じた建物被害率を検討する場合に有力な手段になり得るものと考えられる。

一方、本手法による推定精度向上のためには、構造物の特性と被害に関する実証的研究、および建物特性分布や入力地震動特性データの蓄積とこれらの地震被害データとの整合性に関する検討などの継続的な研究蓄積が必要と考えられる。また、本手法では考慮しな

かった、他のばらつき要因についても今後分析する必要があり、それらも考慮した被害関数を作成することで、実建物の挙動をより適切に表現した手法となりうるものと考えられる。

謝辞

本論文で用いた兵庫県南部地震の観測記録は、各機関が観測・収集したものを日本建築学会を通して公開・配布頂いたもの（JRのSerial No.はR031）を使用させていただきました。関係各位に御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 中央防災会議：第8回東海地震対策専門調査会 参考資料，2003。
- 2) 増田有周，長戸健一郎，川瀬 博：RC造建物の地震応答解析に基づく被害関数構築に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第558号，pp.101-108，2002。
- 3) 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論文集，第1分冊，pp.327-332，1998。
- 4) 林 康裕，宮腰淳一：兵庫県南部地震による被害率曲線，日本建築学会大会災害部門パネルディスカッション資料，pp.15-20，1998。
- 5) 村尾 修，山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，第527号，pp.189-195，2000。
- 6) 山口直也，山崎文雄：西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築，地域安全学会論文集，No.2，pp.129-137，2000。
- 7) 鈴木祥之，中治弘行，岩井 哲，北原昭男：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，第499号，pp.69-76，1997。
- 8) 北原昭男，藤原悌三：都市における建築構造物群の地震被害想定に関する研究，第8回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2241-2246，1990。
- 9) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，1990。
- 10) 日本建築センター：構造計算指針・同解説1988年版，pp.93-100，1988。
- 11) 村尾 修：兵庫県南部地震による灘区の建築物被害マクロ分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，F-1，pp.829-830，1999。
- 12) 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，第536号，pp.109-114，2000。
- 13) 鈴木 有，後藤正美：最近の被害地震による主要被災地の木造被害と耐震性能の比較，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.19-20，1995。
- 14) 岩井 哲，一反田康啓：木造建物の動的解析モデル構築のためのデータベース，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.289-290，1999。
- 15) 埼玉県：埼玉県地震被害想定調査 報告書，1998。
- 16) 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，1998。
- 17) 小野瀬順一：鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布，第6回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.2081-2088，1989。
- 18) 久野雅祥，鈴木 有：釧路市内のRC造建物・木造建物の耐震性と被害に関する検討，1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム，pp.103-112，1994。
- 19) 日本建築学会近畿支部：神戸市灘区および東灘区RC造建物全数調査，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。