

木造建物群の建築年代別被害予測モデルの構築と破壊力指標の提案

CONSTRUCTION OF DYNAMIC MODELS OF JAPANESE WOODEN HOUSES FOR EVALUATING EARTHQUAKE DAMAGE BY CONSIDERING BUILDING AGE AND PROPOSAL OF THE DESTRUCTIVE POWER INDEX

吉田研史
Kenji YOSHIDA

In this paper, The author estimated the actual yield strengths of Japanese wooden houses by whom building age is considered based on the damage statistics in Kobe surveyed after the Hyogo-ken Nanbu earthquake of 1995 and nonlinear response analyses for synthetic waveforms simulated by Matsushima et al.(2000). Next, we established vulnerability functions by using constructed building models with observed ground motions as input waves. Then, a variety of destructive power indices were examined, and it proposes the best index.

Keywords : *Wooden houses, Building strength, Vulnerability function, Destructive Power index, Damage evaluation*
木造建物群、建物耐力、被害率関数、破壊力指標、被害推定

1. はじめに

予想された強震動に基づいて建物群が受ける被害をいかに精度良く推定するかは都市防災において重要な課題であり、近年、地震被害想定が盛んに行われている。その際に用いられている建物の被害率関数はおもに、これまでの地震の際に得られた被害統計データに基づく経験則であり、建物の構造特性を介した関係が把握されるわけではない。また、その多くは1995年兵庫県南部地震の被害統計と推定地震動強さを用いており、様々な地震動特性を考慮したものであるとは言えない。建物被害は建物の構造特性に影響を受けることを考えると、宮腰¹⁾や山口・山崎²⁾などによって行われているような、入力地震動や建物モデルを仮定し、応答スペクトルや地震応答解析などによって建物の応答変形を計算し、そこから被害率関数を構築する方法で検討することが必要である。また、建物群の被害程度を的確に把握するためには、地震動の強さを表現する指標(以下、破壊力指標)が建物群の被害程度と相関をもつ必要があるが、2000年鳥取県西部地震や2001年芸予地震において震度6弱あるいは6強を記録したにも関わらず、被害はさほどでもなかった。境³⁾は被害調査結果と観測地震動記録から破壊力指標と建物被害の相関性を検討し、弾性応答スペクトルの等価周期(塑性化による周期の伸びを考慮した周期)での平均値を提案している。長戸・川瀬⁴⁾は、兵庫県南部地震の建物被害データと再現波に基づく地震応答解析の結果から、木造、RC造、S造についての耐力分布を推定し、被害予測用数値解析建物群モデルを構築している。しかし、木造建物群については建物被害統計の制約から建築年代は考慮されていない。増田・川瀬⁵⁾は上述のRC造の建物群モデルに観測地震動を入力し、その解析結果から被害率関数を構築している。そこで本研究では、より詳細な被害予測を可能とするために、建築年代を考慮した木造建物群の耐力を推定し、様々な観測地震動を入力とした地震応答解析結果から被害率関数の構築を試みる。その際、被害率関数を既往

の研究における破壊力指標以外についても構築し、木造建物群の被害と対応の良い破壊力指標の提案を試みる。

2. 建築年代別木造建物群モデルの構築

まず初めに、現在の設計基準と同等の耐力を有すモデルを設定し、これを標準建物モデルと呼ぶ。続いて、このモデルの耐力に適当なばらつきを与え、これを標準建物群モデルとする。さらに、建物群の実耐力を推定するために、標準建物群モデルの耐力分布を変動させ、観測された被害率を説明する耐力分布を推定する。また、建物被害データから算定した被害率を観測被害率、地震応答解析による被害率を解析被害率とする。

2.1 入力地震動

松島⁶⁾は六甲山地から大阪湾までの、震災の帯を含む42km×18kmの領域で3次元有限差分法を用いた強震動シミュレーションを行っている。再現波は80mメッシュで42km×18kmの領域すべての点で得られているが、本研究では、x軸方向160m、y軸方向80mピッチで、東灘区の領域を網羅する1444メッシュの再現波(N57°W、S33°E)を入力地震動として用いる。

2.2 標準建物群モデル

解析モデルは二階建て木造住宅を想定した2質点系せん断モデルとし、解析はNewmarkの法により行い、 $\gamma = 1/4$ 、時間間隔 $\Delta t = 0.005\text{sec}$ とする。減衰は瞬間剛性比例型で減衰定数を5%とした。せん断バネの非線形特性は鈴木⁷⁾の木造軸組構造実大振動実験を追跡できるように、Slip型とTri-linear型を組み合わせ、各パラメータを同定した。木造建物の耐力は基準法により必要壁量として定義されており、この壁量は $1/120\text{rad}$ 変形時のベースシア係数0.2とされている。そこで本研究では、 $1/120\text{rad}$ 変形時のベースシア係数0.2を降伏耐力とし、標準建物モデルの第一層の降伏耐力を0.2、Ai分布から第二層の降伏耐力は0.28とした。以上のようにして決定した第一層のせん断バネの非線形特性を図1に示す。また、木造建物

31 棟の詳細調査⁸⁾の平均から、モデルの重量は第 1 層 15.88tf、第 2 層 11.52tf、階高は第 1 層、第 2 層ともに 290cm とした。このときの 1 次固有周期は 0.41sec となる。耐力分布に関しては上述の文献⁸⁾における壁量充足率（有効壁量/必要壁量）及び壁量充足率比（2 階と 1 階の壁量充足率の比）に基づき設定する。壁量充足率については対数正規分布の確率密度関数を求め、これを 8 個の代表値に対して離散化した値とし、壁量充足率比は度数分布により 3 個の代表値として、この両者を組み合わせると計 24 個のモデルとした。設定した壁量充足率の分布を図 2 に示す。

2.3 解析に用いる建物被害データ

本研究では建築年代別に木造建物群の耐力を推定するために、2 種の建物被害統計を用いる。一つは、震災復興都市づくり特別委員会及び兵庫県都市住宅部計画化が行った建物被災度調査結果、ならびに独立行政法人建築研究所が行った火災調査の結果を、建築研究所がデータ化⁹⁾したもののうち東灘区の部分である（以後、建研データ）。二つ目は、神戸市による罹災証明のための調査⁹⁾のうち東灘区の部分（以後、罹災データ）から得ている。建研データと罹災データを比較するため、東灘区の 168 丁目の観測被害率を図 3 に示す。被災度を表す名称は、地震動による建物被害を対象とするために、「一部損壊以下」に「一部損壊」、「無被害」、「全壊」を全て含めて、「全壊」、「半壊」、「一部損壊以下」に置き換えた。また、町丁目ごとの全壊率を比較したものを図 4 に示す。罹災データは建研データに比べて、全壊率が大きく明らかに被害判定基準が異なっており、村尾・山崎¹⁰⁾が指摘しているように税の減免等を考慮していることから、罹災データの方が建研データよりも全壊率が 2 倍程度大きいことが確認できる。建研データは学術的貢献を目的としており、被害判定の信頼性が高いが、木造建物の建設年代別でのデータが存在しない。一方、罹災データは構造的な被災度としては被害判定基準が緩いが、東灘区全域での建築年代別の被害棟数が得られる。そこで本研究では、先ず建研データの観測被害率を用いて、建築年代区分無しでの耐力を同定し、続いて、この耐力を用いて罹災データの建築年代区分無しでの観測被害率を説明する破壊クライテリアを設定する。さらに、この破壊クライテリアを用いて、罹災データの各建築年代別の観測被害率から各建築年代別の耐力を推定する。

2.4 建築年代別の耐力推定

建物群の耐力の推定にあたっては、同定耐力の標準建物耐力との比を α と定義し、 α を標準建物群モデルのベースシア係数に乘じ、その耐力を用い、解析被害率が観測被害率に漸近するまで解析を繰り返す。なお α は 0.05 刻みとする。また設定した破壊クライテリア以上となったモデルを全壊以上の被害を受けたものとし、そのモデルの存在比率の合計を解析被害率とする。先ず、建研データに対しては破壊クライテリアとして最大層間変形角が 1/10rad. に設定して解析を繰り返した結果、耐力比 $\alpha = 1.85$ の値において、解析被害率が観測被害率に良くフィットした。続いて、罹災データについては、前述のように被害判定基準が異なっていると予想されるため、先ず建研データによって同定された耐力比は変更せずに、破壊クライテリアを変動させ解析を繰り返したところ、1/30rad. で罹災データの建築年代区分無しでの観測被害率に一致した。続いて、この破壊クライテリアが罹災データの被害判定基準に対応すると仮定して、算定した破壊クライテリア 1/30 rad を用いて、耐力比 α を変動させ、建築

年代別での耐力を推定する。結果、図 5 に示す α の値を用いると、図 6 に示すように各モデルの被害率が良く一致した。ここで推定した α はすべてのモデルで 1.0 よりも大きく、既存木造建物は設計基準で考慮されているよりも大きな耐力を持つものと推定される。特に建築年が 1982 年以降のモデルは 1981 年以前に建築されたモデルに比べ、平均的に 2 倍程耐力が高いと推定される。以後、建築年代別の耐力には罹災データから推定した耐力比を採用する。ここで、罹災データから推定した建築年代別の耐力は、破壊クライテリアを 1/30rad. に設定して推定しているが、この破壊クライテリアを 1/10Rad. として耐力を同定できる事を、東灘区西部地区について村上らが纏めたデータ¹¹⁾から算定した町丁目毎の観測被害率を説明できる事で確認している。

2.5 木造建物群モデルの応答特性

構築した木造建物群モデルは 1 階の壁量充足率、2 階の壁量充足率比に基づき 24 の代表値からなる耐力分布を有しているが、その中から A-D の 4 種類のモデルに 1995 年兵庫県南部地震による神戸海洋気象台での観測記録(PGA 818gal)を入力した時の層間変形角応答時刻歴を図 7 に示す。モデル A と B の壁量充足率は 0.82 であり、モデル C と D は 2.77 である。また、壁量充足率比はモデル A と C が 1.0、B と D は 2.0 である。図中に壁量充足率と壁量充足率比及び固有周期を示した。モデル A は 1 階で破壊クライテリアである最大層間変形角 1/10rad. を超えており、大破以上の被害が生じていることが示されている。しかし、モデル A は 1/10rad. に至っていないことから、2 階の壁量充足率比が大きいモデルは 1 階の応答が増大していることがわかる。また、最初の 2、3 波に耐えたあと変形が増大しており、観測事実に対応していると思われる。モデル C とモデル D

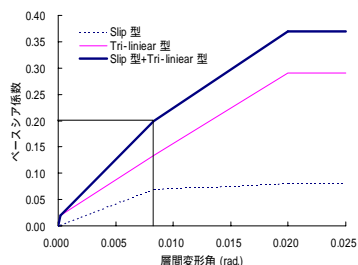


図 1 標準建物モデルの非線形特性

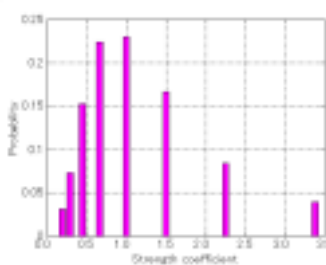


図 2 設定した壁量充足率分布

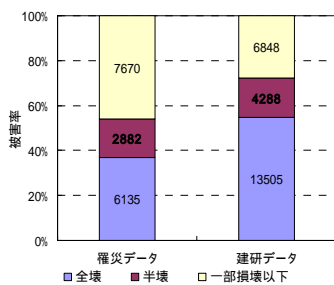


図 3 被害率の比較

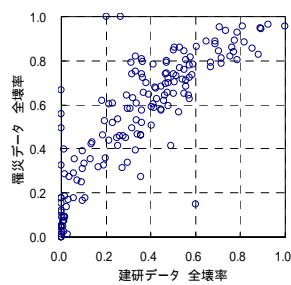


図 4 町丁目毎の全壊率の比較

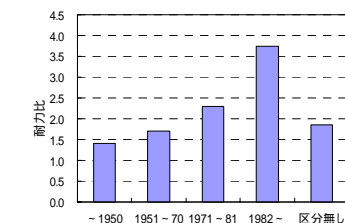


図 5 同定された耐力比

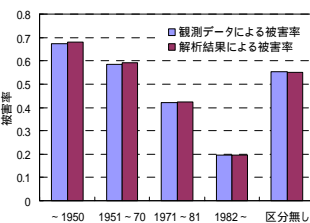


図 6 被害率の比較

は最大層間変形角が0.02程度にとどまっております、1階と2階の耐力のバランスが悪くても、十分な耐力を有していれば軽微な被害にとどまることがわかる。

2.6 木造建物群モデルの検証

2004年新潟県中越地震における川口町の気象庁震度計の地震記録(PGA, NS:1142gal, EW:1676gal)を構築した木造建物群モデルに入力して解析被害率を算定し、観測点の半径300m以内の観測被害率と比較する。調査は悉皆調査で行われており、被災度判定は岡田・高井¹²⁾の破壊パターンを用いている。建築年代は調査員の目視による判断で、築30年以上、築10~30年、築10年以内と判定されている。調査地域のうち、震度計の半径300m以内の木造建物は109棟(車庫などは除いた)であり、そのうち築30年以上の建物(1974以前)の全壊率は54%、築10~30年(1974年~1994年)では8%、また築10年以内(1994年以降)では全壊以上と判定された木造建物はなかった。図8に解析被害率と観測被害率を示す。解析被害率は過大評価になっており、特に1982年以降のモデルでの差は大きい。この原因として、モデルが表層地盤の影響を考慮していないことや、調査建物の構造形式の違いがあると考えられる。これらの評価については今後検討していきたい。

3 被害率関数の構築と破壊力指標の提案

3.1 地震応答解析と被害率関数構築

地震応答解析に用いた地震動は、K-NET、KIK-NET、PEER Ground Motions および兵庫県南部地震の観測記録のうちNS,EWの一方でPGAが400gal以上となった地点、計214地点である。解析に用いた主な地震の諸元を表1に示す。これらの強震記録の水平2成分を構築した建物群モデルに同時に入力し、被害率を算定する。被害率関数構築に関しては、先ず、既往の破壊力指標(PGA, PGV, PGA×PGV, SI(スペクトル強度), 計測震度)について検討する。強震記録はSIと計測震度以外水平2成分の最大値を選択したものをを用いる。

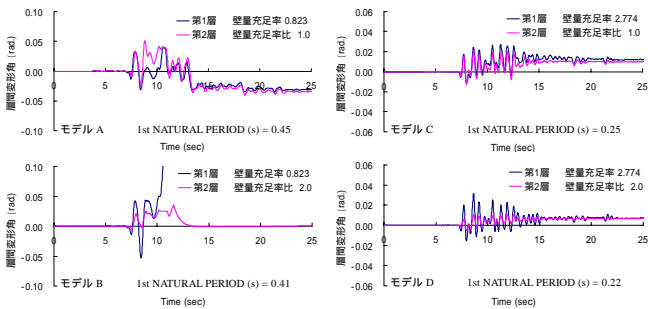


図7 層間変形角応答時刻歴 (JMA Kobe NS)

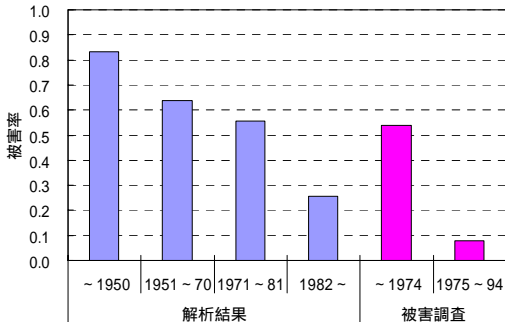


図8 観測被害率と解析被害率 (JMA川口, 水平2成分)

SIは水平2成分のベクトル和から求めた。また、計測震度は3成分から計算するが、他の指標と同様の物理量の次元で表すため計測震度の計算式における加速度 A_0 を用いる。解析被害率と破壊力指標(x)の関係は対数正規分布に従うと仮定すると被害率 $P(x)$ は(1)式で表される。

$$P(x) = \Phi\left\{\frac{\ln X - \lambda}{\zeta}\right\} \quad (1)$$

ここで Φ は標準正規分布関数で λ は $\ln X$ の平均値と標準偏差である。この λ は確率紙¹³⁾での最小二乗法により求めた。各破壊力指標と解析被害率の確率紙上の相関係数を図9に示す。また、構築した被害率関数のうち年代区分無しモデルの場合を図10に示した。SIと計測震度(A_0)が最も高い相関を示していることがわかる。PGAについてはすべてのモデルで相関が低い。各モデルはすべて2階建てを想定しており、周期特性の変化が少ないためモデル間の相関係数の違いは少なくなっている。ここで、破壊力指標をPGVとした時の被害率関数と村尾・山崎¹⁰⁾の被害率関数を図11に示す。村尾らの被害率関数と比べると、被害率が大きくなっているが、これは本研究のモデル構築に使用した再現強震動は表層地盤の増幅を考慮していないものであり、これがモデルの耐力推定に影響を与えていることが一因として考えられるが、村尾らのPGVも被害からの推定値であり、この違いについては今後の吟味が必要である。また、本研究の被害率関数は、様々な地震動特性を含み、比較的大きい被害率まで考慮していることで、図9に示したようにPGVに関しては被害率との相関が低い事も要因として考えられる。

3.3 破壊力指標の提案

建物被害は地震動の性質のみから決まるものではなく、建物の性質にも依存する。よって、建物の性質を反映させ、建物の周期特性

表1 主な地震と地点数

地震発生時刻	震源地	Mw	地点
1995/01/17 05:46	兵庫県淡路島北部	M 6.9	12
2000/10/06 13:30	鳥取県西部	M 6.6	11
2001/03/24 15:28	安芸灘沖	M 6.7	9
2003/05/26 18:24	宮城県沖	M 7.0	20
2003/09/26 04:50	北海道十勝沖	M 8.0	21
2004/10/23 17:56	新潟県中越地方	M 6.6	9
2004/10/23 18:34	新潟県中越地方	M 6.3	6
1979/10/15 23:16	IMPERIAL VALLEY	M 6.5	8
1983/07/22 02:39	COALINGA	M 5.8	5
1994/01/17 12:31	NORTHRIDGE	M 6.7	24
1999/09/20 17:47	CHI-CHI	M 7.5	15
その他の地震 (400 (gal) PGA)			75
計			214

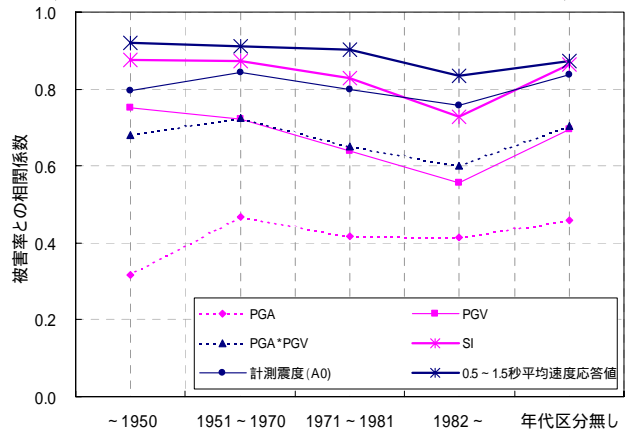


図9 各モデルの相関係数

を考慮するべきである。そこで、本研究では建築年代別モデルそれぞれに対して、最も被害と相関が良くなる周期帯について検討する。地震動の弾性応答スペクトルの周期範囲を限定した平均値（以下、平均応答値）において、周期範囲を様々に変化させて、被害率と平均応答値との相関性について調べた。周期の刻みは0.05秒、減衰定数は5%とした。また、平均応答値は水平2成分のベクトル和とした。表2に各モデルにおいて最も相関が良かった周期範囲とその相関係数を示す。表中の T_S は下限周期、 T_E は上限周期である。 T_S 、 T_E ともに建築年代が新しくなるほど短周期側にシフトしていることが確認できる。ここでは平均速度応答値を示しているが、平均加速度応答値でも同様な結果であった。そこで、少し周期を拡張して、0.5秒から1.5秒の平均速度応答値をとった場合の各モデルの相関係数を図9に加えて示した。すべてのモデルにおいて既往の破壊力指標よりも相関係数が高く、木造建物の被害と対応することがわかる。この指標を用いて構築した被害率関数を図10に示した。

4. まとめ

長戸・川瀬⁴⁾の方法に従い、兵庫県南部地震の建物被害データと再現強震動に基づく地震応答解析の結果を用いて、木造建物の耐力を建築年代別で推定し、被害予測モデルを策定した。さらに、構築したモデルに観測地震動を入力することで被害率関数を構築し、地震動の破壊力指標について検討した。以下に結論を述べる。

- a) 学術的な被害調査結果と自治体調査結果の二つのデータでそれぞれ耐力を同定することで、建物被害調査の判定基準は自治体調査の方が緩いことが確認した。また応答解析の破壊クライテリアを1/30rad.に設定すると自治体調査の全壊率が説明できた。
- b) 既存木造建物は設計基準で考慮されているよりも強い耐力を保持しており、その傾向は建築年代が新しくなるほど強いことを確認した。しかし、推定した建物群の耐力は、地震動特性や地域性等に依存するので検証が必要である。

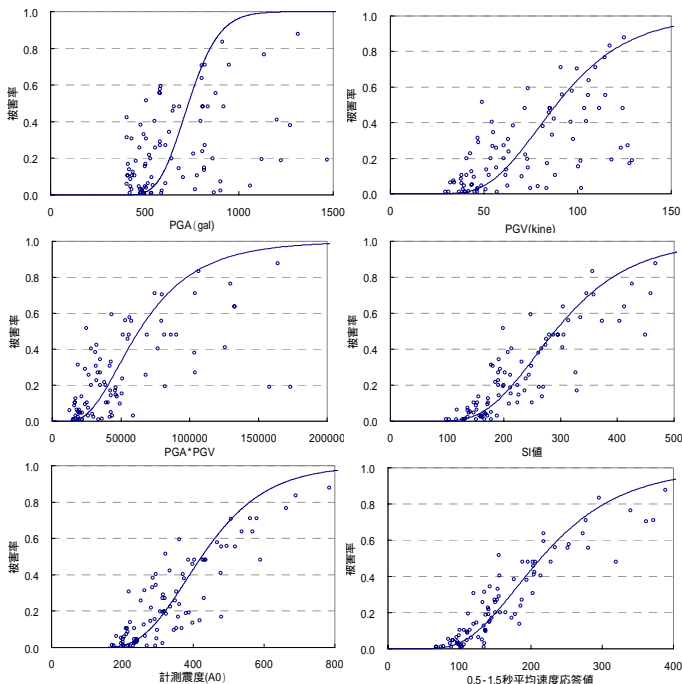


図10 構築した被害率関数（年代区分無しモデルの場合）

- c) 構築したモデルに地震観測記録を入力して解析を行い、その解析結果から各破壊力指標に対する被害率関数を構築することで、被害と相関の良い破壊力指標を検討し、SI値と計測震度が木造建物の被害と相関が良いことを確認した。さらに弾性応答スペクトルの周期軸での平均値と被害率の相関関係を検討し、各モデルと相関の良い周期範囲を求め、周期0.5秒から1.5秒の平均速度応答が木造建物の被害と相関があることが示された。

【謝辞】

本研究は、日本原子力発電株式会社「大加速度入力時の構造物の安全性評価指標に関する研究」の一部として実施しました。また、神戸市の固定資産税家屋課税台帳及び罹災証明書に関する資料を日本建築学会建築経済委員会固定資産評価小委員会WGが纏めたデータを小山高専建築学科高橋純一氏より提供いただきました。また、気象庁の地震観測記録、防災科学研究所のK-NET、KIK-netの地震観測記録を使用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 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,pp327-332,1998年
- 2) 山口直也,山崎文雄:地震応答解析に基づく建物被害関数の構築,生産研究,pp341-344,52巻8号
- 3) 境有紀,藤藤一起,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検討,日本建築学会構造系論文集,第555号,pp85-91,2002年5月
- 4) 長戸健一郎,川瀬博:強震動特性と構造物の被害,月刊地球/号外No.37,pp203-211,2002年
- 5) 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pp101-108,2002年8月
- 6) 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,pp333-40,2000年8月
- 7) 鈴木祥之,中治弘行,北原昭男:実大振動台実験による木造軸組構造の強震応答特性,第4回都市直下地震災害総合シンポジウム,pp219-222,1999年
- 8) 建築省建築研究所:平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書,建設省建築研究所,1996
- 9) 日本建築学会建築経済委員会固定資産評価小委員会WG:1995年阪神・淡路大震災における神戸市東灘区、灘区及び淡路島北淡町の建物被害に関する実態調査,1998年3月
- 10) 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,185-192,2002年5月
- 11) 村上雅英,藤田宣紀,三澤文子,田原賢:東灘西部を中心とした被害調査とその考察,日本建築学会近畿支部,1995年兵庫県南部地震～木造建物の被害～,pp49-72,1995年9月
- 12) 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,第524号,pp65-72,1999年10月
- 13) 伊藤學,亀田弘行:土木・建築のための確率・統計の基礎,丸善株式会社,pp258-281,1997年

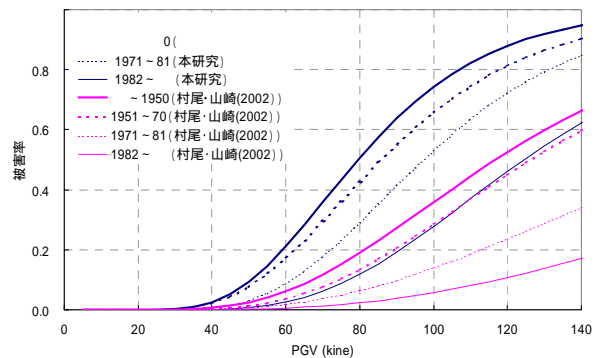


図11 構築した被害率関数と既往の被害率関数の比較

表2 各モデルの最適周期範囲と相関係数

	～1950	1951～1970	1971～1981	1982～	年代区分無し
下限周期(T_S)	0.68	0.67	0.64	0.53	0.65
上限周期(T_E)	1.35	1.31	1.11	1.09	1.32
相関係数	0.924	0.919	0.917	0.882	0.910