耐震診断データを用いた木造建物被害関数の等価線形モデルによる拡張

VULNERABILITY FUNCTIONS USING SEISMIC DIAGNOSIS DATA EXTENDED BY EQUIVALENT LINEAR MODELS

塩見政士 — * 1

小檜山雅之 — * 2

キーワード:

被害関数, 耐震診断, 加速応答スペクトル, 木造建物

Keywords:

Vulnerability function, Seismic diagnosis, Acceleration response spectrum, Wooden building

Masashi SHIOMI — * 1

Masayuki KOHIYAMA — * 2

It is important to establish an accurate vulnerability function to estimate seismic damage. The purpose of this study is to expand vulnerability functions of wooden buildings using seismic diagnosis data based on equivalent linear models. The vulnerability functions consider characteristics of the region such as ground and building characteristics. The paper describes a method to calculate ratio of building damage in a region. The accuracy of the method is verified using the damage data of the Great Hanshin-Awaji Earthquake Disaster.

1. 背景と目的

既往の建物被害関数の多くは, 被害統計と地震観測記録をもとに被害率と最大速度や震度といった地震動指標を関係づけた経験的被害関数として構築されている^{例えは1)~5)}。しかし, 構築に用いたデータと異なる地域へ適用する際は, 注意が必要である。小檜山・山崎⁶⁾は, 木造建物の耐震性能分布が地域によって顕著に異なることを耐震診断データから明らかにしており, 東北地方で比較的壁量が多い傾向などが確認されている。このことより, 建物群の固有周期の分布も異なってくるため, 地震動の周期特性によって地域の建物被害の発生確率が変わりうると考えられる。よって, 経験的被害関数を, それを構築する際に用いたデータの建物特性, 地震動の周期特性, あるいは地震動に影響する地盤特性が異なる地域で用いると, 推定結果の被害率の誤差が大きくなる可能性がある。

この問題を克服するため, 小檜山・山崎⁸⁾は, 耐震診断データを用いて地域的な耐震性の違いを考慮した木造建物の建物被害関数を提案している。被害関数に代入する地震動は加速度応答スペクトルを用いており, 地震動の周期特性が考慮可能となっている。しかし, 提案された被害関数は損傷が小さい応答範囲を想定した線形応答を仮定しており, 大きな被害レベルでは剛性が著しく低下することから, 評価可能な被害率は一部損壊以上率 (= (一部損壊棟数+半壊棟数+全壊棟数)/全棟数) に限られている。

そこで本研究では, 損傷による固有周期の伸びを等価線形モデルで考慮し, 全半壊率や全壊率といったより大きな損壊レベルの評価にも対応した木造建物の被害関数を構築し, その被害推定精度について検証を行う。

2. 被害関数の定式化

建築基準法で規定される建物の耐力と地震力との関係に着目し, 耐震診断の評点を用い被害関数の構築を行う。以下の定式化は 1985 年に刊行された耐震診断法^{9), 10)} (以下, 精密診断法) に基づくが, 2004 年に改定された耐震診断法¹¹⁾における一般診断法でも容易に応用することが可能である。精密診断法では, 2 階建ての場合, 被害が比較的発生しやすい 1 階部分に注目し診断評点を評価している。本研究では, これまでの診断データの蓄積を考慮し, また, 簡単のため, 1 階部分のみに注目して被害率の評価を行う。

建築基準法施行令において, 一般的な木造建築物は, 地震層せん断力係数 $C_i = Z R_t A_i C_o = 0.2$ の地震力に対し, 層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ までが許容される。ここで, C_o : 標準せん断力係数 (ここでは 0.2 とする), Z : 地震地域係数 (ここでは 1 とする), R_t : 振動特性係数 (一般的な木造建築物で 1), A_i : i 階における地震層せん断力係数の高さ方向の分布を表わす係数 (1 階の場合は 1)。したがって, $C_i = 0.2$ の地震による水平力 Q_{r0} で, 建物の 1 階において層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ を生じる建築基準法の規定最低限の水平抵抗力を Q_{d0} とおくと,

$$Q_{d0} = Q_{r0} = C_i M g = Z R_t A_i C_o M g \quad (1)$$

となる (ここで, M : 上部構造の質量, g : 重力加速度)。一方, 壁量などにより規定最低限の水平抵抗力に対し R_w 倍の水平抵抗力をもつ建物の層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ の 1 階の水平抵抗力 Q_d は

$$Q_d = R_w Q_{d0} \quad (2)$$

とおける。精密診断法における水平抵抗力の評点 ($D \times E$): I_{DE} は基準法が要求する最低限度の水平耐力に対する倍率を表している。ここで,

*1 慶應義塾大学大学院理工学研究科 大学院生
(〒223-8522 横浜市港北区日吉3-14-1)

*2 慶應義塾大学理工学部 専任講師・博士 (情報学)

*1 Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Keio University

*2 Assoc. Prof., Faculty of Science and Technology, Keio Univ., Dr. Informatics

剛性は耐力に比例すると仮定する。実際の建物には、直交壁や非耐力壁などにより、 I_{DE} に含まれる垂壁、腰壁などのラーメン効果以上に剛性・耐力の増大があることから、これらの効果による剛性・耐力の割増係数を α_{DE} とすると、 $Rw = \alpha_{DE} I_{DE}$ とみなしうる。

加速度応答が Sa で、偏心などの形状特性により形状係数 Fes の割増があったときの地震力 Qr は、式(1)より

$$Qr = Sa Fes M = Sa Fes Qr_0 / (Ci g) \quad (3)$$

となる。ここで、精密診断法の偏心の評点($B \times C$): $I_{BC} (\leq 1)$ は $1/Fes$ に相当する。

精密診断法の基礎・地盤の評点(A)は、基礎形式・ひび割れの状況に基づく被害の発生しやすさと、軟弱地盤による地震動の増幅と地盤変状に起因する被害の発生しやすさが組み合わされている。一方、建替促進建築物・延焼等危険建築物を判定するための木造建築物の耐震診断基準^{(2), (3)} (以下、この診断法を密集診断法と略す)では、地盤が軟弱な場合の地震力の割増係数 Rg と基礎形式係数 Rb を別々に与えている。軟弱地盤による地震動の増幅は Sa に反映されていることから、精密診断法の基礎・地盤の評点(A)の代わりに、密集診断法で提案される Rb を与えたものを I_A とし表1に示す。

次に、水平抵抗力が、基礎形式の影響で Rb 倍($Rb \leq 1$)、老朽化の影響で Rd 倍($Rd \leq 1$)に、それぞれ独立に低下すると仮定する。精密診断法の老朽度の評点(F): I_F は Rd に相当する。ここで文献8)の手法では、被害が発生する層間変形角が低下すると仮定していたが、本論では、水平抵抗力が低下するモデルとしている。本論では、より大きな損壊レベルの被害推定に対応するために、層間変形角の増大により水平抵抗力が $1/120$ rad のときの水平抵抗力に比べて κ 倍になると仮定する。地震力が水平抵抗力を上回ったとき損壊するとすると、損壊が発生する条件式は、

$$\kappa Rb Rd Qd / Qr < 1 \quad (4)$$

と表わされる。なお、水平抵抗力比 κ は建物によりばらつきがあると考えられるが、実大建物の水平加力実験^{(14), (15), (16)}を参考に、本論ではこれを図1で単純にモデル化する。文献17)を参考に一部損壊以上、全半壊、全壊の判定閾値をそれぞれ $1/60, 1/30, 1/15$ rad とすると、 κ は図1から、それぞれ $7/6, 1.5, 1.5$ となる。なお、実際の建物では、変形性能の違いによる影響が考えられる。厳密には損壊発生条件を考える際、変形性能による差も考慮すべきであるが、耐震診断データからはこれを把握することが困難であるため、本研究では建物群の平均的なモデルとして上述の一定の層間変形角の判定閾値を用いる。

式(4)に式(1), (2), (3)を代入し、耐震診断評点 I_A, I_{BC}, I_{DE}, I_F を用いて表すと、損壊が発生する条件式は次式で与えられる。

$$\frac{\kappa Rb Rd Qd}{Qr} = \frac{\kappa Rb Rd Rw Qd_0}{Sa Fes Qr_0 / (Ci g)} = \kappa \cdot Rb \cdot \frac{1}{Fes} \cdot Rw \cdot Rd \cdot \frac{Ci g}{Sa} = \frac{\kappa I_A I_{BC} \alpha_{DE} I_{DE} I_F Ci g}{Sa} < 1 \quad (5)$$

$$\Leftrightarrow I_A I_{BC} I_{DE} I_F < \frac{Sa}{\kappa \alpha_{DE} Ci g} \quad (6)$$

次に加速度応答 Sa について考える。 Sa は建物の固有周期 (剛性) と減衰に依存する。剛性 St は、基準法の規定最低限の1階の剛性を

表1 密集診断法の基礎形式係数 Rb

基礎形式	地盤の分類		
	良い・普通	やや悪い	非常に悪い
鉄筋コンクリート造布基礎	1	1	1
無筋コンクリート造布基礎	1	0.85	0.75
足固めを使用した玉石基礎	1	0.85	0.75
ひび割れのあるコンクリート造布基礎	0.7	0.6	0.5
上記以外の基礎	0.6	0.5	0.5

図1 水平抵抗力比 κ

$\alpha_{DE} St_0$ とすると $St = \alpha_{DE} I_{DE} St_0$ となる。2階建て建物の場合、剛性が St のときの固有周期は、文献8)より2層モデルにおける上層、下層の質量比を3:4、2層の階高がともに290 cmで1次固有振動形が直線となることを仮定すると、次式で与えられる。

$$T \cong \frac{0.834}{\sqrt{\alpha_{DE} I_{DE}}} \quad [s] \quad (7)$$

なお、式(7)の右辺の分子は、1階の剛性が2階よりも小さい場合、1層モデルの場合の値0.698に近づくと考えられるが、ここでは簡単のため式(7)で与える。加速度応答の評価は、損傷に伴う構造物の固有周期の伸びを α_p とし、線形加速度応答 $Sa(\alpha_p T)$ を用いて行う。小檜山⁽¹⁸⁾は文献19)の復元力特性のモデル (ポリリニア型ばねとスリップ型ばねの混合ばねモデル) を用いて、2階建て木造建築物の被害と相関が高い弾性1質点系応答、すなわち等価線形モデルを評価している。減衰定数に関しては、5%、10%、20%を比較し、層間変形角 $1/60, 1/30, 1/15$ rad を閾値とする被害判定では、20%が最も被害との相関が高い傾向があることを確認している。また固有周期については層間変形角 $1/120$ rad の割線剛性の固有周期を基準に被害との相関が高い周期の比 α_p を求めており、被害判定閾値 $1/60, 1/30, 1/15$ rad に対し、 α_p はそれぞれ1.1, 1.5, 1.9と評価している。本研究では減衰定数、 α_p 共に文献18)で提案される値を用いる。ここで α_p は、 α_{DE} によらず被害判定閾値のみにより決まる値である。

剛性・耐力の割増係数 α_{DE} については、文献14)において実際に建物が有する耐力が、現行規定の考え方に従って評価した存在壁量から求めた耐力の2.4~4.1倍である事例が報告されている。また、文献20)では、建築基準法で定められている壁量の想定耐力に対し3倍

表 2 各地区の地表面最大速度

	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
観測点整理番号 ²¹⁾	108	101	210	212	103
最大速度 (cm/s)	28	127	78	50	82

表 3 各地区の自治体データに基づく被害率⁸⁾

対象地区の市区	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
全壊率	0.0%	54.2%	21.2%	4.1%	33.2%
全半壊率	≒0.0%	70.8%	27.3%	35.4%	78.9%
一部損壊以上率	≒0.0%	97.9%	69.7%	61.2%	96.8%

程度、あるいはそれ以上にあたるものが報告されている。そこで、文献 8)では $\alpha_{DE} = 2$ としたが、本論では $\alpha_{DE} = 3$ とする。なお、 α_{DE} は耐震診断結果である評点 I_{DE} から層間変形角 $1/120 \text{ rad}$ の剛性・水平抵抗力を評価するのに用いられる。より大きな層間変形角の剛性（固有周期）・水平抵抗力は $1/120 \text{ rad}$ の値を基準にそれぞれ α_p , κ を用いて与えられる。1/60 rad の水平抵抗力比は文献 8)では $1/120 \text{ rad}$ からの線形性を仮定していることから $\kappa=2$ となり、 $\alpha_{DE}\kappa=2\times 2=4$ となる。一方、本論では $\alpha_{DE}\kappa=3\times 7/6=3.5$ となり、文献 8)よりやや小さな値となる。 α_p は木造建物の復元力特性のモデルの違いにより変わらうため、今後、復元力特性のばらつきの影響の検討も必要と考えられる。

ある地域の建物群の耐震診断評点から求まる I_{DE} と I_{ABCIF} の確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCIF})$ が与えられたとする。加速度応答スペクトル S_a が作用したときの損壊の発生確率 P_p は、式(6), (7)より次のように表すことができる。

$$P_p = \int p_p(I_{DE}, I_{ABCIF}) dI \quad (8)$$

ここで、 $I_p = \{(I_{DE}, I_{ABCIF})\} | I_{DE} \cdot I_{ABCIF} < Sa'(I_{DE}) / (\kappa \alpha_{DE} C_i g)$ (9) ただし、 $Sa'(I_{DE})$ は S_a を I_{DE} の関数として再定義した加速度応答スペクトルで $Sa'(I_{DE}) = Sa(T(I_{DE}), h)$ 、減衰定数 $h=20\%$ である。

まず加速度応答スペクトルの固有周期 T を式(7)により I_{DE} へと変換し、評点空間 (I_{DE}, I_{ABCIF}) に投影する。投影曲線より下側の領域について、式(8), (9)に示す評点分布の確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCIF})$ の積分を数値的に実行し、損壊率を算定する。

損壊率の算定に当たっては、診断評点の確率密度関数 $p_p(I_{DE}, I_{ABCIF})$ の評価を直接行わない以下の手順が挙げられる。

- 1) 対象地域の木造建物についてランダムサンプリングにより耐震診断データを収集。
- 2) 上記データについて、式(6)に基づき 1 棟ごと被害の有無を判定。
- 3) 被害有無の棟数比によって損壊率を算出。

この方法は、対象地域の診断評点の $p_p(I_{DE}, I_{ABCIF})$ に基づきモンテカルロ法を行った場合に、その試行サンプルが上記のランダムサン

表 4 診断データに対する各地区の建築年代別の重み係数⁸⁾

診断データの建築年	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
終戦前	2.57	3.33	3.39	4.31	1.63
終戦時～昭和 35 年	1.61	3.12	5.14	4.61	1.65
昭和 36 年～昭和 45 年	1.19	1.84	2.07	2.55	2.03
昭和 46 年～昭和 55 年	1.02	0.78	0.75	0.68	1.11
昭和 56 年～平成 2 年	0.89	0.74	0.47	0.38	0.57
平成 3 年～平成 6 年	0.44	0.33	0.24	0.24	0.39

プリングにより収集した耐震診断データと等価とみなせることによる。

なお、一般に耐震診断は希望者に対し行われるため、必ずしもランダムサンプリングデータが得られるとは限らない。その際には、サンプル数の調整や重み係数の導入により、建築年や延べ床面積などの構成比を一致させることで近似できると考えられる。

3. 1995 年兵庫県南部地震による精度の検証

本研究で提案する被害関数の有効性を検討するため、文献 8)と同様に 1995 年兵庫県南部地震についてケーススタディを行った。対象地域は加古川市、神戸市須磨区、東灘区、尼崎市、宝塚市内の地震観測点²¹⁾近傍の 5 地区とし、地震記録は鉄道総合技術研究所と関西地震観測研究協議会（東灘区・尼崎市は振り切れ補正波形を使用）のものを用いた。被害推定結果と比較する実被害の統計としては、自治体の固定資産税減免のための被害調査による町丁目単位の集計結果（以下、自治体データ）を用いた。表 2 に各地区の地表面最大速度、表 3 に文献 8) に示される被害統計の集計結果から計算した各地区の実被害率を示す。自治体の被害調査などにおける一部損壊、半壊、全壊といった被害判定結果は、最大層間変形角のみから決定するわけではないが、本論では単純な被害モデルとして、前述の被害判定閾値を上回ったときに評価される損壊率と被害統計の被害率と比較を行う。

耐震診断データは、日本木造住宅耐震補強事業者協同組合が 2000 年 7 月から 2002 年 1 月までの期間に診断した、兵庫県に立地する建築年が平成 6 年以前の建物のデータを用いた。対象地域の一戸建て木造建物のうち平屋が占める割合は高々 11.7%であった。よって簡単のため、2 階建て建物の耐震診断データ 902 棟のみを用いた。

文献 8)と同様に、各市区のランダムサンプリングデータを模擬するため、文献 22)の木造・防火木造建物の年代別構成比を基に、兵庫県に立地する建物の診断データが、各市区の建築年代別構成比に合うよう耐震診断データの建築年代別の重み係数を表 4 のように設定した。

表 5 各地区の損壊率の推定結果

損壊率	加古川市	須磨区	東灘区	尼崎市	宝塚市
全壊率	0.9%	69.6%	34.3%	21.0%	37.9%
全半壊率	1.0%	65.7%	53.2%	38.7%	58.3%
一部損壊以上率	9.0%	90.4%	67.5%	65.8%	94.2%

表 6 被害推定結果と被害統計との 2 乗平均平方誤差

被害関数	損壊率		
	全壊率	全半壊率	一部損壊以上率
本研究	12.0%	15.1%	5.8%
灘区木造（全年代） ³⁾	13.3%	22.4%	-
宝塚市木造（全年代） ⁴⁾	3.9%	32.9%	-
西宮市木造（全体） ⁵⁾	8.4%	18.1%	-
文献 8)	-	-	5.4%

耐震診断データと加速度応答スペクトルによる各市区の損壊率の評価例を図 2 に示す。グラフ上にプロットされた丸印が診断データ一棟一棟を表し、各線は東西、南北方向の応答スペクトルの平均を示している。ここで、東西、南北方向の応答スペクトルの平均の値を用いたのは、精密診断法による耐震診断の結果では、偏心(B×C)と水平抵抗力(D×E)の評点は対象建物の弱軸方向の値が用いられるため、応答スペクトルの最大の値を用いると損壊率を過大評価する可能性があるためである。

図 2 をみると、東灘区、須磨区、尼崎市において一部損壊以上に対応する応答スペクトルの投影曲線とそれよりも大きな被害に対応する投影曲線が交差してしまっている箇所がある。一部損壊以上と判定されなかったサンプル点は、被害の進展を考えると、それよりも大きな被害になりにくい可能性があるが、本研究ではこれを考慮せず、それぞれの投影曲線よりも下側にあるものを単純に被害ありとして算定している。判定結果に表 4 の重み係数を乗じ、損壊率を算出した結果を表 5 に示す。

5 地区の被害推定結果について、実被害との 2 乗平均平方根誤差を求めたものを表 6 に示す。比較のため、文献 3), 4), 5) の経験的被害関数による推定結果を示す。表中にはその被害関数の構築に用いたデータの地域を示している、なお、文献 3), 4), 5) では、建築年代別の被害関数が評価されており、各地区の建築年の構成比を考慮すれば誤差が小さくなる可能性があるが、ここでは建築年を考慮しない被害関数と比較している。一部損壊以上率に関しては、さらに文献 8) による推定結果も示している。また、横軸に地表面最大速度をとり、評価結果を比較したものを図 3 に示す。ここで、本研究では地表面

図 2 各市区の損壊率の評価例

図3 既往の被害関数との損壊率評価結果の比較

最大速度ではなく、加速度応答スペクトルを用いて評価しているため、評価を行った地域の地表面最大速度に対して損壊率をプロットしている。表6ならびに図3から、本論で構築した被害関数が自治

体データと比較的良好な対応関係があることがわかる。なお、全壊率に関しては、いずれの地区も過大に評価していることから、被害判定の層間変形角の閾値、水平抵抗力比 κ 、損傷に伴う固有周期の伸び α_p などについて再検討の余地がある。

4. 結論と今後の課題

耐震診断データを用いた被害関数⁸⁾の適用範囲を一部損壊以上率のみから、全半壊率、全壊率の評価にまで拡張するため、等価線形モデルを用いた定式化を行い、1995年兵庫県南部地震を事例として被害推定精度の検証を行った。その結果、自治体の被害調査データに対し、比較的良好な対応関係が確認された。

しかし、直交壁や非耐力壁などの効果による剛性・耐力の割増係数 α_{DE} 、階高、層間変形角と水平抵抗力比 κ の関係のモデル、損傷に伴う構造物の固有周期の伸び α_p などは再検討の余地がある。また、形状係数 F_{es} のうち、上下階の壁量のバランスに関係する剛性率については今回の定式化では考慮されていない。精密診断法⁹⁾の診断データの制約から1階部分にのみ注目しているが、現実の建物は1階の被害が多いことから2階の壁量が多いと考えられ、1次固有振動形を直線と仮定した式(7)については、今後も検討が必要と考えられる。なお、改定された耐震診断法¹⁰⁾においては、2階部分も評価を行うため、今後データが蓄積されれば、上下階の剛性バランスを考慮することで、被害推定精度をより高めることができよう。今後は、他地域・他地震動での検証を通じ、パラメータのさらなる検討を行いたい。

謝辞

本研究の一部は、慶應義塾大学学事振興資金の助成による成果である。検証解析では、各自治体調査による建物被害データを用いた。耐震診断データは日本木造住宅耐震補強事業者協同組合より提供を受けた。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 渡辺宏一: 兵庫県南部地震の建物被害に基づく地震動強さの評価, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム講演集, pp. 89-92, 1996.11
- 2) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測—その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例—, 日本建築学会構造系論文集, No. 505, pp. 53-59, 1998.3
- 3) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, No. 527, pp. 189-196, 2000.1
- 4) 杉浦正美, 山崎文雄: 兵庫県南部地震の宝塚市域データに基づく建物被害関数の構築, 土木学会論文集, No. 647/I-51, pp. 305-315, 2000.4
- 5) 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. 129-138, 2000.11
- 6) 小檜山雅之, 山崎文雄: 全国の耐震診断結果に基づく木造建物耐震性能指標の地域性分析, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp. 2097-2102, 2002.11
- 7) Kohiyama, M. and Yamazaki, F.: Vulnerability Functions for Wooden Houses in Japan Based on Seismic Diagnosis Data, Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper No. 130, 14 pp., Vancouver, British Columbia, Canada, 2004.8
- 8) 小檜山雅之, 山崎文雄: 耐震診断データに基づく木造建物の被

- 害関数—加速度応答スペクトルによる一部損壊以上の被害評価—, 日本建築学会構造系論文集, No. 570, pp. 137-144, 2003.8
- 9) 建設省住宅局監修, (財)日本建築防災協会・(社)日本建築士会連合会編集: 木造住宅の耐震精密診断と補強方法, 1985.11
- 10) 坂本功: 木造住宅の耐震診断基準, 建築防災, No. 208, pp. 8-18, 1995.5
- 11) 国土交通省住宅局建築指導課監修: 木造住宅の耐震診断と補強方法—木造住宅の耐震精密診断と補強方法改訂版, (財)日本建築防災協会, 2004.7
- 12) 建設省住宅局市街地住宅整備監修: 密集市街地における防災街区の整備の促進に関する法律における既存木造建築物の耐震診断基準の解説, (財)日本建築防災協会, 1998.1
- 13) 岡田恒: 密集市街地整備法に関わる既存木造建築物の耐震診断基準, 建築防災, No. 243, pp. 25-30, 1998.4
- 14) 鈴木祥之, 中治弘行, 岩井哲, 北原昭男: 在来構法住宅の実大水平力載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, No. 499, pp. 69-76, 1997.9
- 15) 後藤正美, 鈴木有, 浦憲親: 一方向水平加力実験による実在木造建物の耐震性能の検討, 日本建築学会構造系論文集, No.506, pp. 147-154, 1998.4
- 16) 槌本敬大, 安藤直人, 有馬孝禮, 中島史郎, 岡崎泰男, 中村昇: 木造住宅の倒壊モードの解明と耐震性の評価法の確立, 住宅総合研究財団研究年報, No. 25, pp. 259-270, 1998.
- 17) 損害保険料率算定会: 木造住宅の損壊確被害率に関する研究その2, 地震保険調査研究 22, 1988.1
- 18) 小檜山雅之: 順位相関係数に基づく2階建て木造建物の被害推定に適した地震動指標の分析, 日本建築学会構造系論文集, No. 605, pp. 55-62, 2006.7
- 19) 鈴木祥之, 中治弘行: 強震動下における木造建物の地震応答と耐震性評価, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム, pp. 211-214, 1997.11
- 20) 五十田博, 平野茂, 三宅辰哉, 古屋治, 箕輪親宏: 建築基準法の最低壁量を満足する新築木造住宅の倒壊実験, 日本建築学会構造系論文集, No. 618, pp. 167-173, 2007.8
- 21) 日本建築学会兵庫県南部地震特別研究委員会特定研究課題1-SWG1・日本建築学会近畿支部耐震構造研究部会: 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集, 1996.1
- 22) (財)統計情報研究開発センター: 平成5年住宅統計調査(都道府県編)統計データファイル, 28兵庫県, CD-ROM, 1996.

[2007年4月20日原稿受理 2007年7月26日採用決定]