



非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした 平均的な木造建物群モデルの構築

境有紀¹⁾、飯塚裕暁²⁾

- 1) 正会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科、准教授 工博
e-mail : sakai@kz.tsukuba.ac.jp
- 2) 学生会員 筑波大学大学院システム情報工学研究科、大学院生
e-mail : e0201231@edu.esys.tsukuba.ac.jp

要 約

非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした日本の中で平均的な耐震性能をもつ木造建物群モデルの構築を行った。具体的には、建物の耐震性能の中で地震応答に大きな影響を与える建物の周期と耐力について、建物群の周期分布を実在建物の微動計測結果と建築年を基に作成し、周期と耐力の関係式から耐力分布を求めて建物群を構築した。この方法を用いれば、微動計測結果から建物耐力を推定することができ、数多くの建物耐力データを得ることができる。構築した建物群の妥当性を検証するために、建物群中の個々の建物を一自由度系にモデル化し、建物群モデルに既往の強震記録を入力して非線形地震応答解析を行って、地震応答解析で得られた被害率と、強震記録が得られた観測点周辺の実際の被害率を比較した。その結果、提案した木造建物群モデルは、被害率の誤差が平均2～3%程度という精度で実際の全壊率を推定できることを確認した。提案した木造建物群モデルは、大地震が発生して強震記録が得られたとき、あるいは、強震動シミュレーションにより予測波形が得られたとき、非線形地震応答解析を行うことにより、その波形が日本の中で平均的な耐震性能をもつ木造建物群にどの程度の被害を及ぼすものであるかを定量的に全壊率という形で推定することができる有効なツールとなる。

キーワード： 木造建物群モデル、耐力分布、地震応答解析、修正Takeda-Slipモデル、一自由度系

1. はじめに

地震防災上重要な役割を果たす面的な地震被害推定、被害想定を行うには、震度などの地震動強さ指標と被害関数により面的被害分布を求めることがよく行われている。その一方で、近年の強震観測網の整備、強震動シミュレーション技術の向上、計算機の発達により、非線形地震応答解析を行って波形データから個別建物の被害を直接求めることも可能になってきた。非線形地震応答解析を行うには、個別建物の周期や耐力などの耐震性能が必要となり、集合体としての建物群の被害率を推定するには、建物の周期や耐力などの耐震性能のばらつきを考慮に入れ、これを分布させた建物群モデルを構築する必要がある。

木造建物群モデルの構築に関する研究には、例えば、既に長戸¹⁾のものがあるが、1995年兵庫県南部地震の東灘区、灘区の被害データとシミュレーション波形を基に構築されたものであり、実際に観測さ

れた強震記録、更には、多くの地震による様々な特性をもった地震動と実際の被害データを用いて検証されたものはない。また、耐力分布などの建物の構造性能を非線形地震応答解析と被害データから決めると、得られる結果は、過去に発生した被害地震という限られた対象によるものになってしまう。

そこで本研究では、建物群の周期分布を実在建物の微動計測結果と建築年データを基に作成し、周期と耐力の関係式を導いて耐力分布を求める方法を提案する。この方法を用いれば、被害データがなくても、あるいは、引き倒し実験などを行わずに微動計測結果から建物耐力を推定することができ、数多くの建物耐力データを得ることが可能になる。この方法を用いて日本の中で平均的な耐震性能をもつ木造建物群の周期、耐力分布を求め、木造建物群モデルを構築する。そして、強震記録とその周辺の建物被害データが得られた過去の様々な被害地震のデータセットを用いて、構築した建物群モデルに既往の強震記録を入力して非線形地震応答解析を行う。建物群中の個々の建物は、木造建物の挙動を再現できるようにTakeda-Slipモデル²⁾に修正を加えた復元力特性モデル³⁾を用いた一自由度系にモデル化する。そして、解析で得られた被害率と、強震記録周辺の実際の被害率を比較して、建物群モデルの精度を検証する。

2. 建物群モデルの表現方法と周期とベースシア係数の関係

建物群モデルは、構成する個別建物を一自由度系にモデル化し、その耐震性能を変化させて表現する。具体的には、微動計測結果から得られる建物周期分布を統計的にモデル化し、建物耐力をベースシア係数 C_y で表し、建物周期とベースシア係数の物理的関係式から導いて、ベースシア係数分布を周期分布から求める。

そこでまず、建物周期分布からベースシア係数を求めるための、建物周期とベースシア係数の関係式を導く。建物周期 T は式(1)で与えられる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (1)$$

ここで、 T ：建物周期(s)、 m ：質量(kg)、 k ：剛性(N/m)である。

せん断力-変位関係をトリリニアでモデル化すると（図1）、初期剛性 k は、降伏点の座標(d_y, Q_y)と降伏点剛性低下率 α_y を用いて式(2)で表せる。

$$k = \frac{1}{\alpha_y} \cdot \frac{Q_y}{d_y} \quad (2)$$

ここで、 d_y ：降伏変形(m)、 Q_y ：降伏耐力(N)である。

ベースシア係数 C_y は、降伏耐力 Q_y を質量 m と重力加速度 g で除した値であり、降伏層間変形角を R_y とすると、式(1)は式(3)へと変形でき、建物周期とベースシア係数の関係式が導かれる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h \cdot \alpha_y \cdot R_y}{g \cdot C_y}} \quad (3)$$

ここで、 h ：モデルの高さ(m)であり、これを2階建て建物を一自由度系で表す際の等価高さ $h=4.5\text{m}$ （1次モードが逆三角形、各階の質量を同じ、階高を2.7(m)とした場合に対応）とし、建築基準法による地震層せん断力係数による地震力で許容される層間変形角1/120を降伏層間変形角としてモデル化されることが多い^(例えば4-6)ことから R_y を1/120とすると、建物周期とベースシア係数の関係は、 α_y をパラメタとして図2のようになる。

この関係を用いることで、周期分布からベースシア係数分布を求めることができる。降伏層間変形角

を1/120としているため、降伏点剛性低下率 α_y が大きいほどベースシア係数 C_y が大きくなり、 α_y を変化させることにより、同じ周期分布に対してベースシア係数分布を変化させることができることになる。

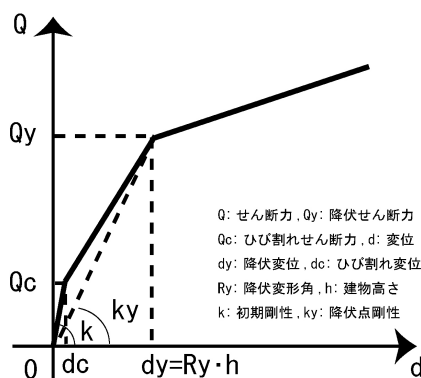


図1 一自由度系のスケルトンカーブ

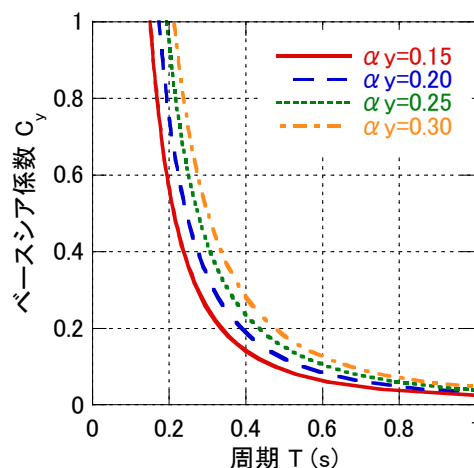


図2 周期とベースシア係数の関係

ここで、式(3)の妥当性を検証するため、文献3)で使用した実大振動実験の試験体のうち、2階建の4棟と引き倒し実験が行われた⁷⁾⁸⁾同じく2階建の4棟について、実際のベースシア係数と式(3)によって微動計測結果から求めたベースシア係数を比較して図3に示す。実際のベースシア係数は、層間変形角1/120となる層せん断力を等価質量（簡単のため1次モードが逆三角形、各階の質量は同じとした）で割った値とし、式(3)における α_y は、微動周期から決まる弾性剛性に対する層間変形角1/120となる降伏点剛性の比、 R_y は1/120、 h は4.5mとした。両者は、概ね対応しており、式(3)の妥当性が確認される。

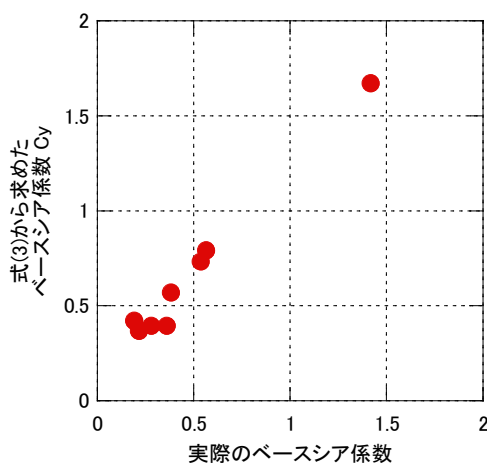


図3 式(3)によるベースシア係数と実際の値との対応

3. 実在する建物データを基にした周期分布

3.1 実在木造建物の周期データ

まず、ベースシア係数分布を求めるのにも必要となる、実在する木造建物の周期分布を求める。建物の耐震性能としては、建物耐力、即ち、ベースシア係数が最も重要な指標と考えられるが、建物のベースシア係数を直接調べるためには、引き倒し実験を行ったり、建物を構成する部材や材料などから算定したりすることが必要となり、数多くのデータを得るのは困難である。しかし、周期であれば、微動計測により比較的容易にデータを収集することができ、式(3)を利用することで、微動計測結果から建物のベースシア係数を得られる。

周期分布を構築するために参考としたのは文献8)から15)の既存の一般住宅を対象とした微動計測結

果である。周期は2方向得られるが、ベースシア係数の小さい方向で被害が生じることから、式(3)より2方向のうち周期が長い方をベースシア係数の小さい方向と考えて長い方の値を用いた。収集したデータの内訳は、兵庫県や大阪府を中心とした近畿地方のもの(24棟)、青森県や北海道を中心とした寒冷地のもの(43棟)、中国地方(広島県)のもの(17棟)、九州地方(福岡県)のもの(32棟)である。近畿、寒冷地、中国、九州地方それぞれの微動計測結果による周期分布を図3に、これらの建物の築後年(建物が建設されて経った年数)分布を図4に示す。

図3を見ると、対数正規分布のような傾向が見られるが、図4を見ると、築30年以上の建物が少なく、データに偏りがあることがわかる。一般的に、建築年が古いほど周期は長くなるため、これらのデータをそのまま用いても、実際の建物群の周期分布は推定できない。そこで、実際の木造建物の築後年分布を調べた。

3.2 建築年を考慮した周期分布と耐力分布

実際の木造建物の築後年分布を、1995年兵庫県南部地震の際に行われた被害調査の報告¹⁶⁾¹⁷⁾を参考にして推定する。これらの調査は兵庫県内という限定された地域のものであるが、大規模に行われ、データ数が豊富であることから、年代分布の偏りは少ないと考えられる。

被害調査結果から建物の建築年が報告されているものを抜き出し、築後年分布を作成した。用いたデータは、神戸市灘区(22,057棟)、西宮市(67,698棟)、宝塚市(34,787棟)、芦屋市(10,514棟)の4地域のものである。各地域の築後年分布を図5から図8の(a)に示す。築20~30年程度にピークをもち、それより新しい建物よりは古い建物の方に裾野が広がる形状をしている。そこで、そのような形をした対数正規分布に近似したものを図5から図8の(b)に示す。また、対数正規分布から各年代の棟数を求めたものを図5から図8の(a)に重ねて示している。図5から図8の(a)で、棒グラフの実データと対数正規分布から求めた折れ線はよく対応している。よって、これら4地域の分布(図5から図8の(b))をひとつにまとめて実際の建物群の築後年分布とした(図9)。なお、(a)の調査結果のグラフの右の築後年が大きいところで値が大きくなっているものがあるのは、古いものをまとめて合計している(例えば、図5(a)なら一番右は築44年以上の累計)ためである。

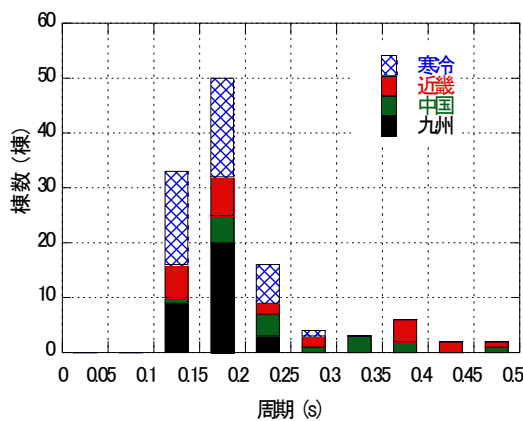


図3 微動計測結果

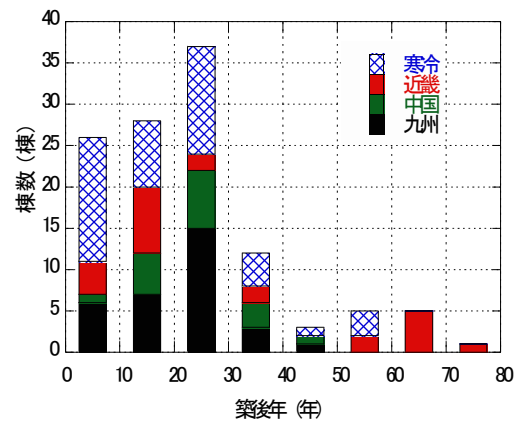
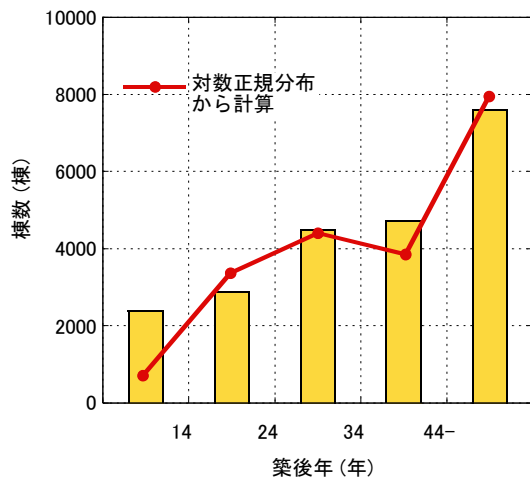
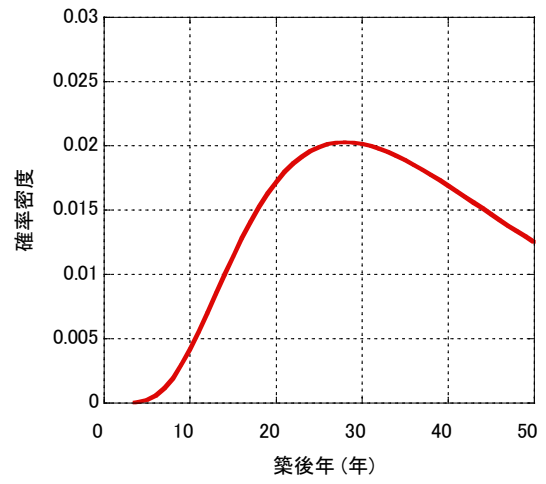


図4 築後年の分布

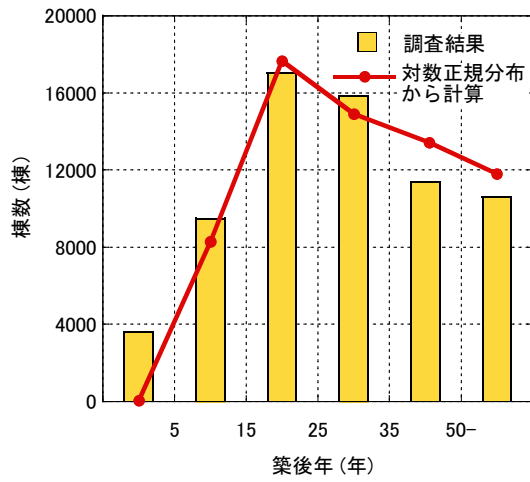


(a) 調査結果

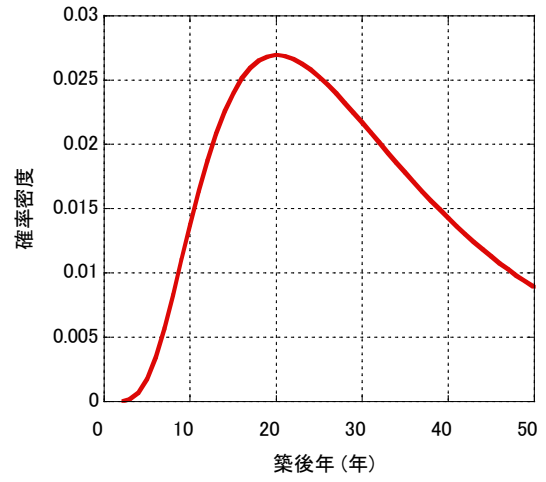


(b) 対数正規分布に近似

図5 築後年の分布 (神戸市灘区)

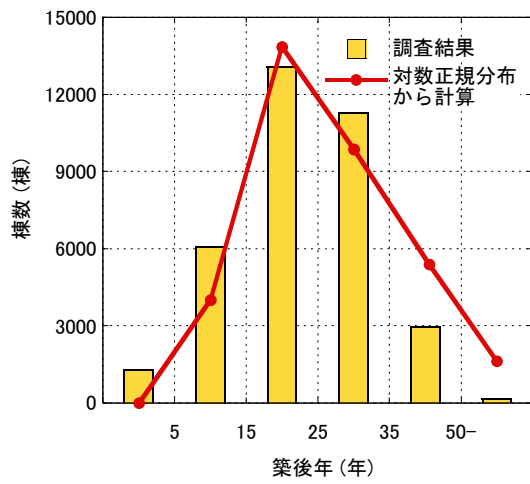


(a) 調査結果

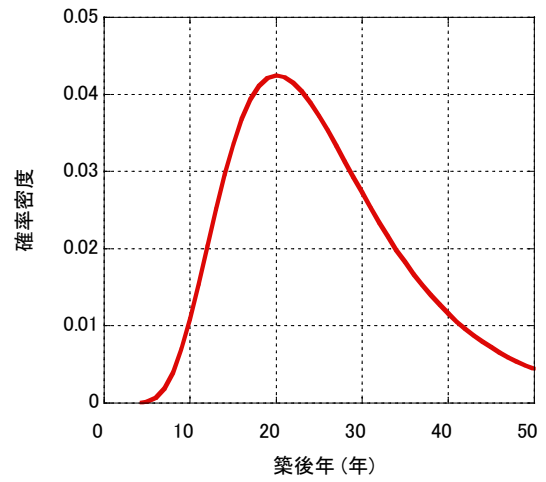


(b) 対数正規分布に近似

図6 築後年の分布 (西宮市)

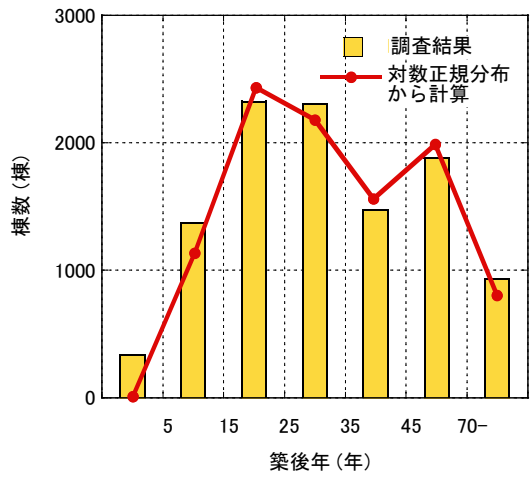


(a) 調査結果

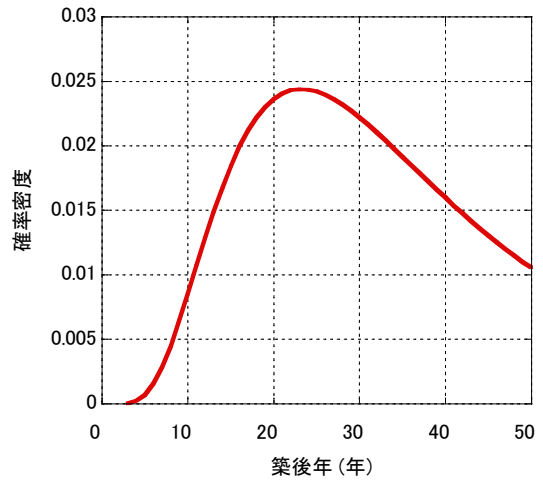


(b) 対数正規分布に近似

図7 築後年の分布 (宝塚市)

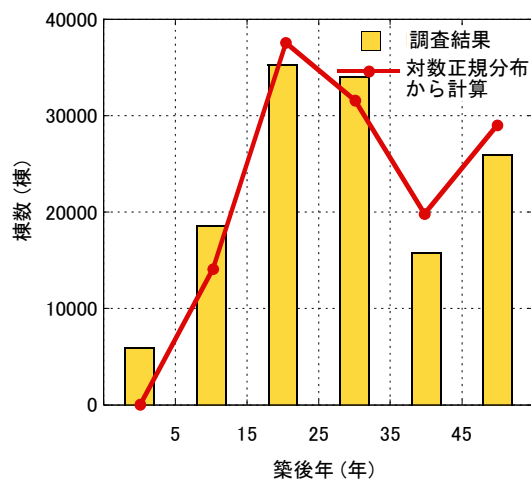


(a) 調査結果

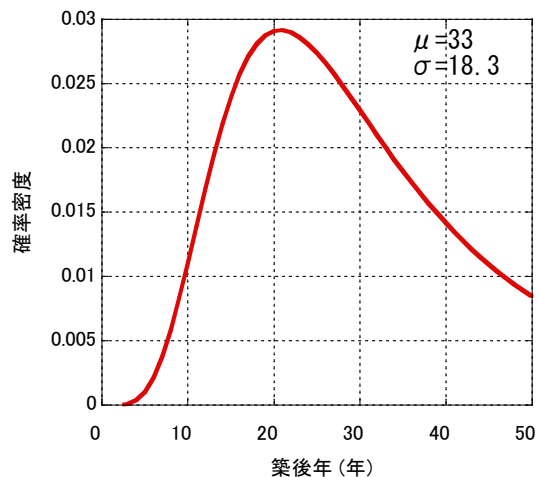


(b) 対数正規分布に近似

図8 築後年の分布 (芦屋市)



(a) 調査結果



(b) 対数正規分布に近似

図9 提案する建物群の築後年分布

次に、築後年分布から周期分布を求めるために、建物の築後年と周期の関係式を構築した。収集した微動計測結果のデータ（図3,4）から各建物の周期と築後年をプロットした（図10）。古い建物になるほど周期が長くなる傾向が見られると同時にばらつきも大きくなり、地域によっても違いが見られる。そこで、日本全国の平均的な建物群とするため、まず、各地域ごとのデータをそれぞれの地方（近畿は近畿地方、寒冷地は東北・北海道地方、中国は中国・四国地方、九州は九州地方）の人口で重み付けし（具体的には、近畿を2.5倍、東北・北海道を1倍、中国・四国を2倍、九州を1.2倍）、各築後年の周期を正規分布に近似してその平均と分散を式(4)(5)で表現し、周期－築後年関係をばらつきをもった統計量という形で表現した。

$$\mu_T = -0.0046Y + 0.113 \quad (4)$$

$$\sigma_T = 0.0016Y + 0.0145 \quad (5)$$

ここで、 μ_T ：築Y年の建物の周期の平均(s)、 σ_T ：築Y年の建物の周期の標準偏差(s)、Y：築後年(年)である。図9の築後年分布と式(4)(5)の周期－築後年関係を用いると、提案する建物群モデルの周期分布が図11のように求まる。

耐力（ベースシア係数）分布は、図11の周期分布と式(3)により定まる。降伏点剛性低下率 α_y は、既存木造建物の引き倒し実験結果⁷⁾⁸⁾と実大振動実験結果³⁾を基に、微動周期から決まる弾性剛性に対する層間変形角1/120となる降伏点剛性の比を計算すると0.2～0.3程度であるため、0.2、0.25、0.3と3通り設定した。

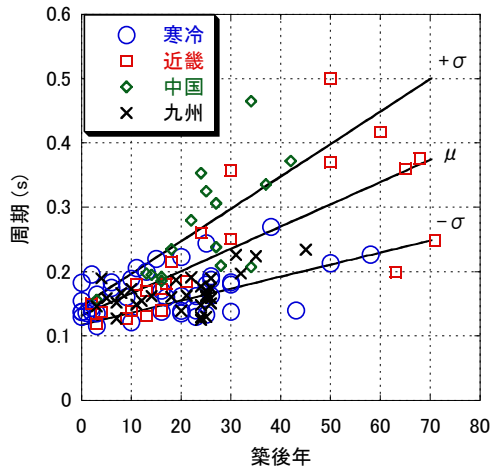


図10 建物の周期と建築年の関係

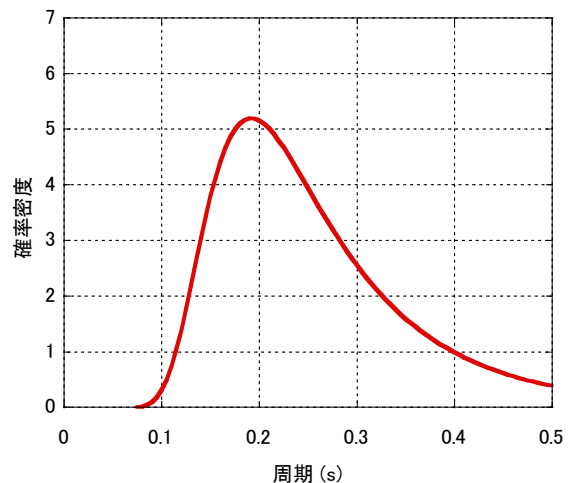


図11 建物群モデルの周期分布

4. 建物群モデルを用いた非線形地震応答解析

4.1 解析の手順

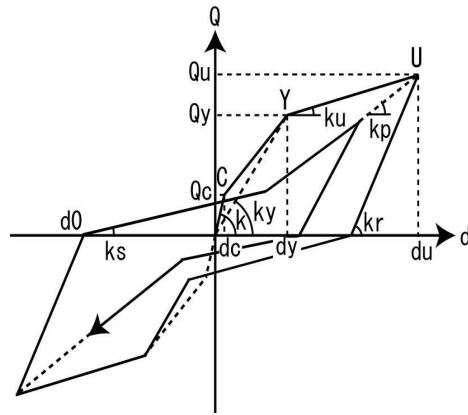
構築された建物群モデルを使って非線形地震応答解析を行い、実際の被害率と比較することによりその妥当性を検証する。解析の手順を以下に示す。

- ① 建物群モデルの各建物に地震動を入力し、非線形地震応答解析を行う。
- ② ①の解析結果を基に、一定の塑性率を超えた建物を全壊と見なし、建物群の被害率（＝全壊率）を計算する。
- ③ ②の地震応答解析による被害率と、被害調査による観測点周辺の実際の被害率を比較して、建物群モデルの妥当性を検証する。

全壊となる塑性率（以下、全壊塑性率 μ_h ）は、自治体調査による全壊ではなく、研究者が構造体の損傷度から全壊と判定するレベル（文献18）におけるD4とした。具体的には、全壊する層間変形角が $1/20^{19}$ 、 $1/15^{20}$ （降伏層間変形角が $1/120$ なので塑性率にしてそれぞれ6、8）、また、建物被害（全壊・大破）と相関をもつ地震動の周期帯の検討によると全壊に対応した塑性率は6程度となる²¹⁾ので、全壊塑性率を6、8と2通り設定した。

4.2 個別建物のモデル化

建物群モデルを構成する個別建物は、一自由度系にモデル化した。復元力特性はTakeda-Slipモデル²⁾を基に木造建物の挙動を再現できるように修正を加えたもの³⁾（以下、修正Takeda-Slipモデル（図12））を用いた。このモデルは、Takeda-Slipモデル同様、耐力低下は考慮されていないが、全壊レベルではまだ耐力低下は、生じていないと考え、本モデルを用いた。修正Takeda-Slipモデルのパラメタである、ひび割れ耐力／降伏耐力、降伏後剛性低下係数 β 、除荷剛性低下指数 α 、スリップ剛性低下指数 γ 、スリップ剛性硬化係数 δ （図12）は、木造建物の実大振動実験を基に決めたもの³⁾の平均的な値として、ひび割れ耐力／降伏耐力=0.3、 $\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.15$ 、 $\gamma=3.0$ 、 $\delta=1.0$ と一定とした。減衰は瞬間剛性比例、減衰定数5%とした。



$$k_y = k \times \alpha_y$$

$$k_u = \beta \times \frac{Q_y}{d_y}$$

$$k_r = \frac{Q_c}{d_c} \left| \frac{d_u}{d_y} \right|^{-\alpha}$$

$$k_s = \frac{Q_u}{d_u - d_0} \left| \frac{d_u}{d_u - d_0} \right|^\gamma$$

$$k_p = \delta \times \frac{Q_u}{d_u}$$

図12 修正Takeda-Slipモデル

4.3 入力地震動

入力地震動は、1995年兵庫県南部地震をはじめとする過去に発生した被害地震において、周辺の建物被害データが得られた54の強震記録²¹⁾²²⁾を用いた（表2）。また、入力地震動は、記録された記録の方向（例えば、NS、EW成分）に偏りがある場合を考慮し、全ての地震動について同等の重みをもたせるためにそれぞれの記録の「平均方向」²³⁾の地震動を作成して用いた。具体的には、各地震動について5度刻み36方向の波形を作成し、減衰定数5%の速度応答スペクトルを求め、木造建物の弾性範囲から塑性化による周期の伸びを考慮に入れた周期帯をカバーする周期0秒から3秒までの応答スペクトルの面積を求め、36方向のスペクトルの面積の平均値を求めて、それに最も近い面積を有する方向を「平均方向」とした。ただし、平均方向は2方向得られるため、それぞれを建物群モデルに入力して得られる被害率の平均値を解析被害率とした。つまり、ここで検証される建物群モデルは、ベースシア係数分布が小さい方向を対象として作成されていることから、建物の弱軸方向が地震動の強さが平均的な方向となっているときのものということになる。

4.4 建物群モデルの検証

建物群モデルを検証する指標として、実際の被害率と非線形地震応答解析による被害率の差の絶対値をとり、54記録の平均値（以下、誤差平均）を求めた。誤差平均が0に近い値であるほど、建物群の精度が高いことを意味する。指標に誤差平均を用いたのは、相関係数を用いた場合、実被害と解析結果の関係が直線上に並ぶ程度が評価されてしまうが、誤差平均では、実被害と解析結果がより近いかの程度を評価することができるためである。また、誤差の割合（（解析被害率－実被害率）／実被害率）の平均ではなく、誤差の絶対値の平均としたのは、誤差の割合を用いると、被害率が小さい観測点の誤差が過大に評価されてしまう（例えば、実被害率が0.1%で解析被害率が0.001%のときの誤差の割合は99%にもなる。）ため、被害率が大きい重要な観測点を重視したことになる（例えば、実被害率60%を30%と推定する場合と2%を1%と推定する場合を比較すると、どちらも割合では倍の差だが、前者は誤差30%、後者は誤差1%となり、前者が30倍重きが置かれることになる）。

なお、表2における木造建物全壊率とは、自治体による調査結果によるものではなく、1995年兵庫県南部地震が文献24)によるもの、それ以外のほとんどが筆者自ら調査収集した研究者によるもの²¹⁾²²⁾で、文献18)-20)にほぼ対応したものとなっている。また、降伏点剛性低下率 α_y は、0.2、0.25、0.3、全壊塑性率 μ_h は6、8と設定したが、確認のため、これらのパラメタの範囲をやや広げて、 α_y を0.15、0.20、0.25、0.30、0.35の5通り、 μ_h を4、6、8、10、12の5通りずつ変化させて計25通りの組み合わせについて非線形地震応答解析を行った。

表 2 強震記録と観測点周辺の建物被害率

地震	観測点	PGA	PGV	JMA	dw
1993年釧路沖	釧路地方気象台	752.2	43.1	5.95*	0.0
1994年三陸はるか沖	八戸市庁舎	433.5	50.2	5.82	1.9
1995年兵庫県南部	JR鷹取	741.6	157.2	6.48	59.4
"	大阪ガス葺合供給所	833.5	130.8	6.49*	20.2
"	NTT神戸	331.2	88.5	5.83	16.1
"	JR宝塚	690.7	96.6	6.15	7.2
"	本山第一小	794.0	81.6	6.12	6.5
"	神戸海洋気象台	752.2	105.0	6.43	3.2
"	尼崎高架橋	340.5	56.9	5.69	2.4
"	尼崎竹谷小	367.8	51.1	5.70	1.7
"	尼崎港	472.1	62.2	5.74	0.0
"	関電総合技研	556.2	59.4	5.95	0.8
1997年鹿児島県北西部(3/26)	K-NET宮之城	544.0	36.3	5.52	0.0
"	K-NET阿久根	295.9	43.8	5.68	0.0
1997年鹿児島県北西部(5/13)	K-NET宮之城	976.6	45.5	5.93	0.0
2000年鳥取県西部	境港測候所	762.8	84.9	6.01	1.1
"	K-NET米子	441.4	53.8	5.81	0.0
2001年芸予	K-NET大野	465.7	33.6	5.63	0.0
"	K-NET東予	514.7	33.9	5.59	0.0
2003年三陸南	JMA涌谷	445.6	42.8	5.56	0.0
"	JMA石巻	962.7	27.6	5.56	0.0
"	JMA大船渡	1106.9	34.5	5.84	0.0
2003年宮城県北部	JMA涌谷	594.0	54.2	5.83	0.0
"	鹿島台町震度計	1614.2	43.8	5.85	0.0
2003年十勝沖	K-NET広尾	972.7	48.8	6.06	0.0
"	K-NET標津	583.7	65.2	5.91	1.3
"	K-NET池田	671.0	59.6	5.94	0.0
"	K-NET釧路	410.2	43.6	5.61	0.0
"	KiK-net本別	497.4	34.8	5.49	0.0
2004年新潟県中越	川口町震度計	1667.9	144.7	6.51	19.8
"	JMA小千谷	975.0	93.6	6.33	1.8
"	十日町市震度計	1339.7	58.3	5.92	0.0
"	K-NET長岡	542.7	51.0	5.50	0.0
"	JMA長岡	436.2	38.3	5.49	0.0
"	中里村震度計	768.8	71.9	5.96	0.0
"	KiK-net加茂	412.0	28.8	5.65	0.0
"	栃尾市震度計	1012.3	34.2	5.49	0.0
"	K-NET小出	639.3	39.7	5.54	0.0
2005年福岡県西方沖	福岡舞鶴震度計	342.8	70.3	5.72	-
2005年宮城県沖地震	宮城川崎町震度計	1124.2	44.5	5.59	0.0
2007年能登半島地震	K-NET穴水	896.1	103.7	6.31	18.8
"	JMA輪島	472.2	98.7	6.12	4.7
"	K-NET輪島	546.3	43.9	5.52	2.9
"	JMA能登町	261.1	51.8	5.65	0.0
"	K-NET能都	665.6	25.2	5.55	0.0
"	K-NET七尾	217.9	34.9	5.27	0.0
2007年新潟県中越沖地震	K-NET柏崎	812.0	126.9	6.37	5.3
"	柏崎市中央町震度計	775.1	125.1	6.33	7.4
"	上越市柿崎区震度計	443.1	94.4	5.88	0.0
"	長岡市中之島震度計	347.8	35.6	5.57	0.0
"	長岡市上岩井震度計	354.9	44.9	5.66	0.0
"	柏崎市高柳町震度計	543.5	53.3	5.66	0.0
"	JMA小千谷	401.9	28.3	5.14	0.0
"	K-NET小千谷	524.8	47.6	5.58	0.0

PGA: 地動最大速度(cm/s²), PGV: 地動最大速度(cm/s), いずれも水平2方向ベクトル和, JMA: 計測震度*(水平2方向による値), dw: 木造建物全壊率(%), 黄色の部分はPGAが1000cm/s²以上, PGVが100cm/s以上, 計測震度が6.4以上, 木造建物全壊率が0%より大きい(全壊木造建物が存在した)ことを示している。

4.5 解析結果

実際の被害率と解析による被害率とを比較して図13に示す。1つの図が1つの α_y と μ_h の組み合わせに対応していて、横方向が α_y (0.15、0.20、0.25、0.30、0.35の5通り) の違い、縦方向が μ_h (4、6、8、10、12の5通り) の違いとなっており、それぞれの α_y の値に対応したベースシア係数分布が一番上に表示されている。

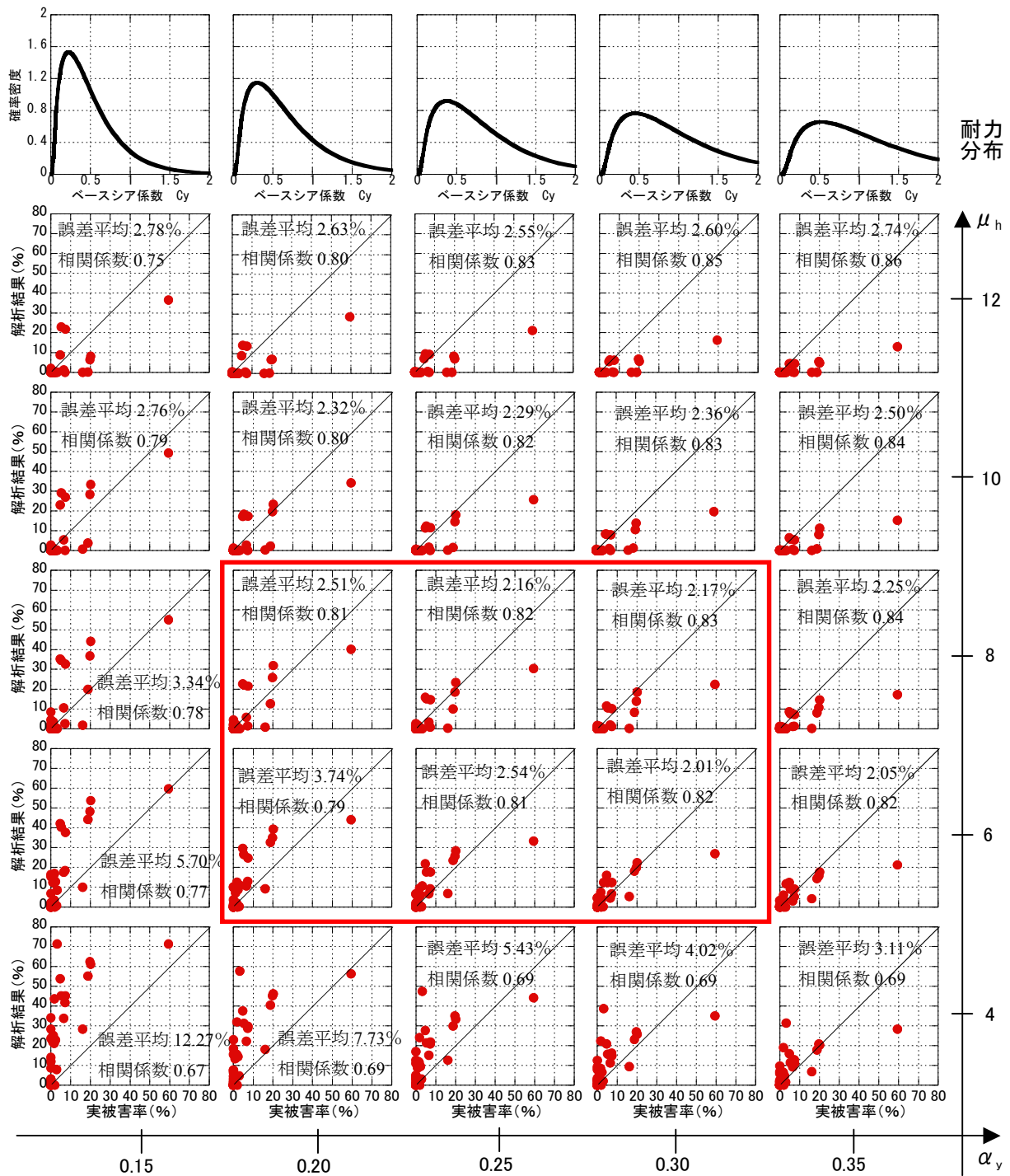


図13 実際の被害と解析結果の比較

これを見ると、設定した α_y が0.2~0.3、 μ_h が6、8のケース（赤い□で囲んだ部分）では、誤差平均2~3%程度という精度で実際の被害率を推定できており、木造建物全壊率を推定するツールとして有効であることがわかる。これに対して、赤い□で囲んだ部分の外の α_y と μ_h の組み合わせの範囲では誤差平均が大きいものが多く、設定した α_y が0.2~0.3、 μ_h が6、8というの妥当性が確認される。なお、参考までに相関係数を記しているが、この指標は、実被害と解析結果の関係が直線上に並ぶ程度が評価され

てしまうため、例えば、 α_y が0.35、 μ_h が12のケースを見ればわかるように、相関係数が高くても実被害と解析結果に大きな隔たりがあり、相関係数では、解析結果と実被害の対応性を評価できないことがわかる。

以上のことから、ここで設定された周期分布、耐力分布をもち、降伏点剛性低下率 α_y が0.2~0.3、全壊塑性率 μ_h が6~8、復元力特性を修正Takeda-slipモデルとした一自由度系モデル群を非線形地震応答解析により被害推定を行うための木造建物群モデルとして提案する。これを用いれば、大地震が発生して強震記録が得られたとき、あるいは、強震動シミュレーションにより予測波形が得られたとき、非線形地震応答解析を行うことにより、その波形が木造建物にどの程度の被害を及ぼすものであるかを定量的に全壊率という形で推定することができる。

なお、ここで構築、提案した木造建物群モデルは、全国各地の微動計測データ、被害データをまとめて用いていること、更には、地震動の入力方向を平均方向としているから、それらをならした「平均的なもの」と言える。即ち、木造建物の地方性、あるいは、下町で老朽化した家屋が多い、新興住宅地で新しい家屋が多いなどの局所的な地域性があるところ、入力地震動に強い方向性がある、たまたま多くの木造建物が入力地震動の強軸、弱軸に沿って建っているような場合では、実際の被害率は違ってくると思われる。図13の中で誤差平均が低く精度が高いものでもある程度のばらつきが生じてしまっているものこのようなことが一因と考えられる（例えば、全壊率が59.4%と最も大きい1995年兵庫県南部地震のJR鷹取駅周辺の解析結果が実被害より小さくなっているのは、古い木造家屋の割合が多かったためではないかと推測される）。従って、被害を正確に推定するものというよりは、地震動の木造建物に対する破壊力の大きさを測る1つの物差しと考えることができる。

より正確な被害推定を行うためには、木造建物の地方性や築後年分布などを考慮に入れた建物群モデルを構築する必要がある。また、ここで提案した木造建物群モデルの基になったデータも微動計測結果は、近畿地方、寒冷地、中国地方、九州地方、築後年分布データは、兵庫県南部地震の被害地域、被害データは被害地震が発生した地域と全く偏りが無いとは言えない。一方では、提案した微動計測結果からベースシア係数を求める方法を用いれば、多くのデータを収集することができ、地方性や築後年分布を考慮に入れた建物群モデルや偏りのないより平均的な建物群モデルの構築も可能になり、更には、未だ不明な点が多い、木造建物の経年劣化に関するデータを得ることができると考えられる。今後は、より精密な地方性や築後年分布を考慮に入れた木造建物群モデル、そして、それらを偏りなく取り入れたより平均的な木造建物群モデルを構築していく。

5. まとめ

非線形地震応答解析による地震被害推定を目的とした日本の中で平均的な耐震性能をもつ木造建物群モデルを周期分布とベースシア係数分布の組合せで表現して構築した。周期分布は、実在する既存建物の微動計測結果と築後年の調査結果を基に、ベースシア係数分布は、周期とベースシア係数の関係性を導いて求めた。

そして、建物群中の個々の木造建物を、木造建物の挙動を表現できる修正Takeda-Slipモデルを復元力特性とした一自由度系として、既往の強震記録を入力して非線形地震応答解析を行った。地震応答解析で得られた被害率と、強震記録が得られた観測点周辺の実際の被害率を比較することで、建物群モデルの精度を検証した。その結果、提案した木造建物群モデルは、被害率の誤差が平均2~3%程度という精度で実際の全壊率を推定できることを確認した。提案した木造建物群モデルは、大地震が発生して強震記録が得られたとき、あるいは、強震動シミュレーションにより予測波形が得られたとき、非線形地震応答解析を行うことにより、その波形が木造建物にどの程度の被害を及ぼすものであるかを定量的に全壊率という形で推定することができる有効なツールとなる。

謝辞

強震記録は、防災科学技術研究所、気象庁、震災予防協会、JR 総合技術研究所、大阪ガス、NTT ファシリティーズ、関西地震観測研究協議会、地域地盤環境研究所、建築研究所、東北大学大学院理学系研究科地震・噴火予知研究観測センター海野徳仁先生、岡田知己先生より提供して頂きました。データ解析、地震応答解析、図表の作成などで筑波大学第三学群工学システム学類鈴木達矢氏の大きな協力を得ました。地震被害調査の際には、現地の方々には、被災されているにもかかわらず、快く様々なデータを提供していただきました。調査は、東京大学地震研究所瀧澤一起先生、三宅弘恵先生、坂上実先生、新潟大学工学部中村友紀子先生、千葉工業大学藤井賢志先生、研究室の筑波大学大学院生、学類生諸氏と共同で行ったものです。

参考文献

- 1) 長戸健一郎、川瀬博：観測被害統計と非線形応答解析に基づく木造建物被害予測モデルの構築と観測強震動への適用、第11回日本地震工学シンポジウム、2002.11.
- 2) 江戸宏彰、武田寿一：鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析、日本建築学会学術講演梗概集、構造系、1977年10月、pp.1877-1878.
- 3) 飯塚裕暁、境有紀：木造建物の一自由度系地震応答解析における復元力特性モデルの提案、日本建築学会学術講演梗概集、C-1、2007年8月、pp.265-266.
- 4) 山田明、鈴木三四郎、浅野幸一郎：偏心軸組木造平屋住宅モデルの地震応答特性に関する一考察、日本建築学会構造系論文集、No.562、2002年12月、pp.75-82.
- 5) 五十田博、河合直人：木造軸組構法住宅に用いる壁の復元力特性モデル、日本建築学会構造系論文集、No.616、2007年6月、pp.157-163.
- 6) 塩見政士、小檜山雅之：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、日本建築学会技術報告集、第13巻、第26号、2007年12月、pp. 481-486.
- 7) 中治弘行、鈴木祥之、岩井哲、北原昭男：在来構法木造建物の振動計測と水平力載荷実験 その2 振動計測の結果及び荷重～変形関係に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、1996年9月、pp.117-118.
- 8) 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、No.499、1997年9月、pp.69-76.
- 9) 鈴木祥之、中治弘行、平山貴之、秋山真一：常時微動計測による木造住宅の振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、1998年9月、pp.221-222.
- 10) 鈴木祥之、東樋口護、中治弘行、標智仁、北山宏貴：芦屋市における木造建物の微動計測による振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、1995年8月、pp.9-10.
- 11) 尾内俊夫、太田外氣晴、竹原崇夫：兵庫県南部地震における住宅被害と壁配置および常時微動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、1995年8月、pp.11-12.
- 12) 矢澤一樹、毛呂眞：青森県の在来木造住宅の固有周期、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、2002年8月、pp.423-424.
- 13) 鏡味洋史、北川諭：積雪寒冷地の木造建築物の被害想定手法の検討-微動による木造住宅の固有周期の測定-、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、1998年9月、pp.23-24.
- 14) 田中宏明、川瀬博：実測データに基づく木造住宅の三次元非線形動的挙動解析モデルの構築、日本建築学会構造系論文集、No.592、2005、pp.121-128.
- 15) 岩井哲：耐震診断による上部構造評点を用いた木造在来軸組工法住宅の地震時性能評価、広島工業大学紀要研究編、第42巻、2008、pp.191-197.
- 16) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告、建築編4、1998年2月.
- 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、No.527、2000年1月、pp.189-196.
- 18) 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、1999.10、pp.65-72.
- 19) 岡部潤一、鶴田修、千原勝幸、平田俊次、大橋好光、坂本功：木質系住宅の地震損傷状況に関する

実験的研究(その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-1、2003、pp.365-366.

20) 損害保険料率算定会：木造住宅の損壊被害率に関する研究 その2、地震保険調査研究22、1988年.

21) 境有紀、瀧瀬一起、神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案、日本建築学会構造系論文集、第555号、2002、pp.85-91.

22) 境有紀：2007年能登半島地震による構造物被害と地震動の関係、第35回地盤震動シンポジウム 頻発する内陸地殻内地震の地震動とその解釈—新・入力地震動作成手法の使い方と検証(その1)—、2007年11月、pp.31-40.

23) 熊本匠、境有紀、地震動の方向性の定量的な検討とそれに基づいた平均方向の提案、日本地震工学会大会-2008梗概集、2008.11、pp.272-273.

24) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書、1996.3.

(受理：2008年3月31日)

(掲載決定：2008年12月5日)

A Wooden House Cluster Model for Earthquake Damage Estimation by Nonlinear Response Analyses

SAKAI Yuki ¹⁾ and IIZUKA Hiroaki ²⁾

1) Member, Assoc. Professor, Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.

2) Student Member, Graduate Student, Graduate School of Systems and Information Eng., Univ. of Tsukuba

ABSTRACT

We proposed a wooden house cluster model for earthquake damage estimation when we made nonlinear response analyses. We decided period distribution based on the microtremors instrumentation and built year data of wooden houses. We also decided the strength distribution from the period distribution by a derived equation calculating strength from the periods of wooden houses. We made nonlinear earthquake response analyses using the wooden house cluster model with decided period and strength distribution and examined the accuracy of the proposed wooden house cluster model by comparing the calculated damage with actual damage. Single-degree-of-freedom systems with modified Takeda-Slip hysteresis characteristics model were used for each wooden house in the wooden house cluster model. We found that we could estimate the actual damage ratio of wooden houses with sufficient accuracy if we use the proposed wooden house cluster model. When we get strong ground motions such as observation records or simulated waveforms, we can estimate the damage ratio of wooden houses by using this proposed wooden house cluster model.

Key Words: Wooden House Cluster Model, strength distribution, Seismic Response Analysis, Modified Takeda-Slip Model, Single-Degree-of-Freedom System