

簡易耐震補強された木造住宅の地震応答解析

日大生産工(院) ○茂木 大佑

日大生産工 神田 亮

1. 序論

1995年に発生した阪神大震災で5000名以上の命が犠牲となり、その内の9割が木造住宅の倒壊によるものであった¹⁾。倒壊した住宅の中でも、1981年(昭和56年)の耐震基準改正以前に建てられた耐震強度が不足している「既存不適格」の住宅に被害が集中した。従って現在既存不適格を含めた木造住宅の耐震補強は急務となっている。

住宅の上部構造の耐力の診断を行う方法として上部構造評点を評価する方法がある。(1)式に上部構造評点の算出式を示す。上部構造評点は建物の保有耐力を必要耐力で除した値であり、値が大きいほど耐震性能が高いことを示す。日本建築防災協会が定める上部構造評点と被害の判定の関係²⁾を表1に示す。

$$\text{上部構造評点} = \frac{\text{保有耐力}}{\text{必要耐力}} \quad (1)$$

表1 上部構造評点と被害判定

上部構造評点	判定
1.5以上	倒壊しない
1.0以上1.5未満	一応倒壊しない
0.7以上1.0未満	倒壊する可能性がある
0.7未満	倒壊する可能性が高い

上部構造評点を1.5以上確保すれば、強震(震度6強)下でも住宅の倒壊はもちろん、大きな被害は受けず地震後も安全に使用することができるとされている。

地方自治体では補助金制度を導入し、上部構造評点を1.5以上とするべく耐震補強の促進を図ろうとした。しかし、この制度は上部構造評点を1.0とすることを義務付けたため、補助金制度を用いても依頼者の負担が高価となり、補助金を用いた補強の促進の妨げとなっている。この問題を解決し、木造住宅の耐震補強を促進するためには、安価に補強を行える工法が必要である。しかし安価であるからといって、補強効果が脆弱で強震下において住宅が倒壊することがあってはならない。そこで補強効果の目標を人命の保護が保証される、すなわち住宅は倒壊せず、しかも費用が安価で行えるものとする必要がある。

具体的には補強費用が安価で上部構造評点が0.7程度となる簡易な補強を目標とする。すなわち強震時(震度6強)で住宅に損傷は生じるものの倒壊は免れるということである。安価で最低限の補強をした住宅でも、人命保護のための耐震性が確認できれば、耐震補強が促進されるであろう。

既往の論文では上部構造評点と倒壊の関係が必ずしも一致しないとされている³⁾。上部構造評点が0.7以上でも倒壊の危険性があるとされ、倒壊の判定が明確ではない。0.7程度の住宅でも倒壊しない場合や、1.0程度の住宅でも倒壊する可能性が考えられる。本研究では上部構造評点を目安として行う簡易な耐震補強方法で補強された建築物の詳細な耐震性について、地震応答解析によって倒壊の判定を確認することを目的とする。詳細な検討項目を以下に示す。

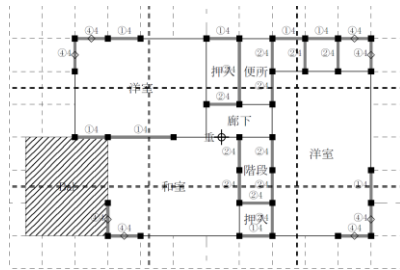
- ①繰り返しによる復元力特性、特に壁部材の厳密な再現。
- ②静的外力に対する住宅の耐力を単純に評価するのではなく、地震動との共振性を含む動特性を評価する。
- ③同一な入力レベル(震度6強)における入力地震動の違いによる、住宅の挙動の違い。

2. 解析対象住宅

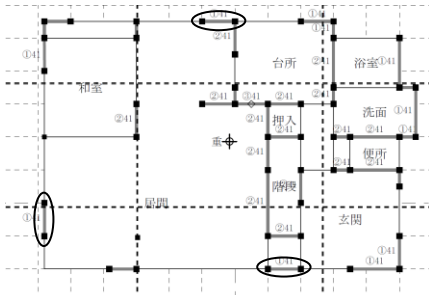
表2に解析の対象とした住宅の詳細、図1に平面図を示す。住宅の補強は、木造住宅の簡易診断と補強方法²⁾の発行に伴い開発された耐震Check IIを用いて、上部構造評点が0.7以上となるように行った。補強材は筋交い30×90以上のたすき掛け(端部金物あり)である。図1の1階平面図に補強した箇所を丸印で示す。なお対象とした住宅には築年数による部材の劣化が見られるが、本論文では解析に考慮しないものとする。耐震Check IIの結果には方角は記載されていないため、図1右下のように独自に方角を定めた。解析では幅910mm(図1中の1マス分)の壁を1枚と考えているため、導入した補強材を片筋交い2個分であると考えて、EW方向に片筋交い4個、NS方向に片筋交い2個加えた。また表3に補強前と補強後の上部構造評点を示す。

表 2 解析対象住宅の詳細

竣工年	昭和 48 年(西暦 1973 年)	
築年数	32 年	
構造	2 階建て木造在来軸組工法	
屋根材料	瓦葺き(重い屋根)	
外壁材	ラスモルタル	
主な壁仕様	モルタル塗り壁、石膏ボード張化粧合板、筋交い(片掛け)	
補強材	筋交い 30×90 以上のたすき掛け(端部金物あり)	
床面積[m ²]	2 階	41.31
	1 階	64.60



(a) 2 階



(b) 1 階

図 1 平面図

表 3 補強前後の上部構造評点

階	方向	上部構造評点	
		補強なし	補強あり
2 階	EW	0.70	0.70
1 階	EW	0.52	0.79

表 4 に補強材を加えた各階の壁仕様と壁数を示す。

表 4 解析対象住宅の壁仕様と壁数

壁仕様	EW 方向	
	2 階	1 階
モルタル塗り壁	21	21
石膏ボード	13	12
化粧合板	4	1
筋交い(片掛)	4	1
筋交い(補強材)	0	4

3. 解析の対象とした住宅のモデル化

木造住宅の耐震要素は壁である。モルタル塗り壁、石膏ボード、化粧合板、筋交いなどの軸組や壁は、種類によって異なる復元力特性を持っている。モデル化するに当たり、壁ごとの剛性をバネ、減衰をダッシュポットとして表現し、これらを並列に足し合わせることにした。図 2 に解析の対象とした住宅の力学的モデルを示す。

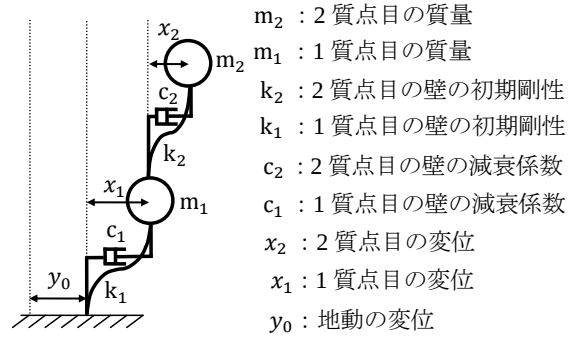


図 2 力学的モデルの設定

図 2 のようにモデル化した場合の振動方程式を、(2),(3)式に示す。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [R] = -[M]\{\ddot{y}_0\} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_2 + m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_2 & 0 \\ 0 & c_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_2 \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 & 0 \\ 0 & k_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_2 \\ x_1 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_2 & 0 \\ 0 & m_2 + m_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここでRは復元力である。(2)式を用いて衝撃加速度法で地震応答解析を行った。加振方向は EW 方向とした。

質点の質量を求めるには、住宅を構成している部材の質量を算出する必要がある。建築基準法施行令第 84 条の固定荷重より、住宅を構成している壁の単位面積重量を調べた。これに壁 1 枚の基本となる面積(910mm×3055mm)を乗じることにより、壁 1 枚の質量を求めた。壁以外の部材についても同様に、建築基準法施行令第 84 条の固定荷重を参考にして質量を求めた。

一般的な木造住宅の復元力特性の特徴として接合部での木材のめり込みによるすべり現象や接合部物の補強金物、せん断すべりが卓越すると履歴面積が小さくなるピンチング現象などが挙げられる。木材のめり込みによるすべり現象を再現するには、スリップ型復元力特性が用いられ、鋼材の特徴を再現するにはバイリニア型復元力特性が用いられる。またピンチング現象を再現するにはバイリニア型とスリップ型を足し合わせた複合型を用いて再現する。そこで本研究では木造住宅の 3 つの現象や特徴を同時に再現するため、複合型を用いて壁の復元力特性をモデル化する。図 3 に復元力特性の模式図を示す。

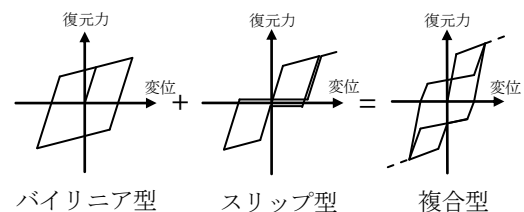


図 3 復元力特性の足し合わせ

木造住宅全体の復元力特性を再現するために、まず木造住宅を構成している各種壁の復元力特性を数値モデルに置換する。既往の論文^{4),5)}では様々な仕様の壁の実大振動実験が報告されている。その実験結果を参考にして初期剛性、第二剛性、減衰係数などのパラメータを定めた。壁の振動実験を1質点1自由度系のモデルに置換して、各振動パラメータを設定し解析を行った。振動実験の復元力特性とほぼ同じ履歴形状をした復元力特性が得られたため、これらを解析に用いることとした。これらの壁の復元力特性を、木造住宅を構成している壁の枚数分足し合わせて弾塑性応答解析を行うことで、木造住宅全体の復元力特性を再現する。表5に振動実験を基にした解析から得られた壁1枚当たりの減衰係数を示す。

表5 壁1枚当たりの減衰係数

壁仕様	減衰係数[kN・s/cm]
モルタル塗り壁	0.024
石膏ボード	0.009
化粧合板	0.028
筋交い	0.254

1階および2階ごとに、減衰係数に壁枚数を乗じて各階を構成している要素分を加算することでその階の減衰係数とする。表6にモデルの振動パラメータを示す。

表6 モデルの振動パラメータ(EW方向)

	補強なし		補強あり	
	1質点目	2質点目	1質点目	2質点目
質量[ton]	13.80	13.91	13.93	13.91
初期剛性[kN/cm]	165.76	178.35	172.05	178.35
減衰係数[kN・s/cm]	0.89	1.75	1.91	1.75

表7にモードごとの固有値、固有振動数、固有周期、固有ベクトルを示す。

表7 モードごとの振動パラメータ(EW方向)

モード	補強なし		補強あり	
	1次	2次	1次	2次
固有値[rad/sec]	21.57	57.53	21.84	57.63
固有振動数[Hz]	3.43	9.16	3.48	9.17
固有周期[sec]	0.29	0.11	0.29	0.11
固有ベクトル	1.76	-0.61	1.69	-0.61
	1.00	1.00	1.00	1.00

4. 入力地震波

入力地震波の詳細を表8に示す。加振方向と同じEW方向成分を用いた。①と③の地震波は、解析対象住宅が立地している千葉県船橋市近傍の強震観測網 K-NET より取得した千葉県市川北の地震波を、気象庁が示す震度補正法を用いて震度6強としたものである。②④⑤は原波形を用いた。また表中に観測場所における揺れの強さを数値化して震度階級に換算するための値である計測震度を示す。

表8 入力地震波の詳細

	観測日時	観測場所	計測震度
①	2005年2月16日 4時46分	千葉県市川北	6.41
②	1995年1月17日 5時46分	兵庫県JR鷹取駅	6.40
③	2011年3月11日 14時47分	千葉県市川北	6.49
④	2011年3月11日 14時46分	宮城県仙台市	6.38
⑤	2003年9月26日 4時50分	北海道苫小牧	5.60

図4に3方向対数表示スペクトルを示す。減衰定数は一般的な建物の減衰定数である $h=0.05$ とした。

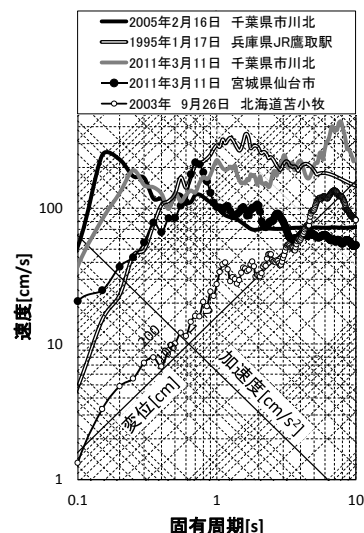


図4 3方向対数表示スペクトル

5. 解析結果

図5~14に地震波ごとの履歴挙動を示す。木造住宅の安全限界である変位角 $1/20[\text{rad}]$ を倒壊の目安とした。図中右下に倒壊判定として、 $1/20[\text{rad}]$ を超えた場合は○、超えない場合は×を記す。図15~24に時刻歴応答変位波形を示す。

6. まとめ

- ①図5,9,11より2005年2月16日千葉県市川北と2011年3月11日宮城県仙台市、2003年9月26日北海道では、補強をしなくても倒壊しなかった。また補強をすると応答変位角が減少した。
- ②図9,10より2011年3月11日千葉県市川北では、補強をすると変位角が $0.05[\text{rad}]$ から $0.047[\text{rad}]$ に減少し、補強効果が確認された。また図19,20より補強前は $130[\text{s}]$ で倒壊したが、補強後は $250[\text{s}]$ の間倒壊しなかった。
- ③図7,8より1995年1月17日兵庫県JR鷹取駅では補強をしても倒壊した。これは住宅が振動して塑性変形すると住宅の固有周期が3~4倍になり、地震の卓越周期と一致して共振したためと考えられる。
- ④1件のみの検討だが、振動解析の手法を確立と補強効果の確認はできた。今後は数十件の住宅の振動解析を実施して、簡易耐震補強の評価を更に詳しく実施する予定である。

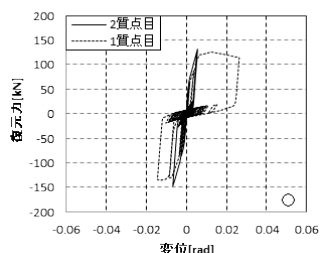


図 5 2005 年千葉県(補強なし)

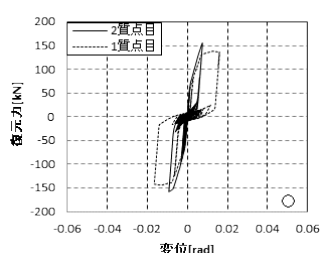


図 6 2005 年千葉県(補強あり)

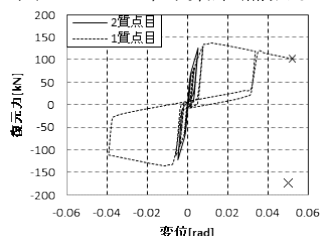


図 7 1995 年兵庫県(補強なし)

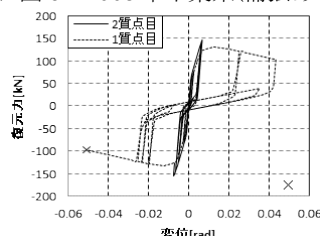


図 8 1995 年兵庫県(補強あり)

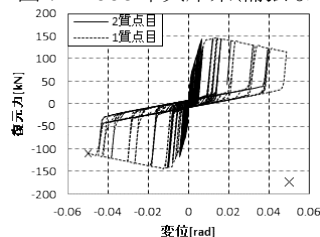


図 9 2011 年千葉県(補強なし)

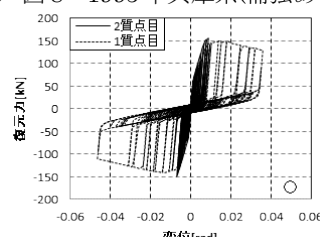


図 10 2011 年千葉県(補強あり)

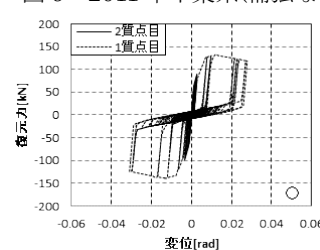


図 11 2011 年宮城県(補強なし)

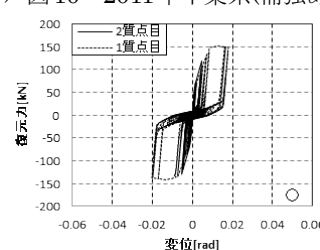


図 12 2011 年宮城県(補強あり)

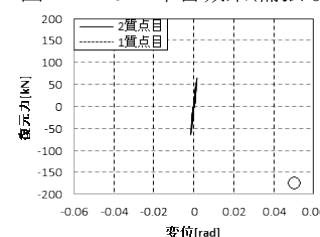


図 13 2003 年北海道(補強なし)

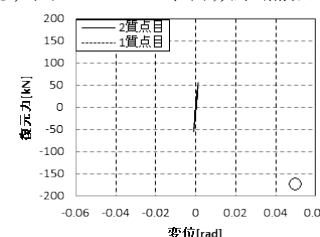


図 14 2003 年北海道(補強あり)

参考文献

- 1) 朝日新聞社：阪神・淡路大震災誌-1995 年兵庫県南部地震、pp145、1995.03
- 2) 一般財団法人日本建築防災協会：2012 年改訂版木造住宅の耐震診断と補強方法、2012.10
- 3) 井戸田秀樹、巖岡慎悟、梅村恒、森保宏：在来軸組木造住宅における一般耐震診断の評点と損傷度の関係、日本建築学会構造系論文集、第 612 号、pp125-132、2007.02
- 4) 綿引誠、町田健一、大橋好光、坂本功：実物大実験に基づく木造軸組工法住宅の静的動的復元力特性に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 603 号、pp99-106、2006.05
- 5) 山田真澄、鈴木祥之、後藤正美、清水秀丸：単位木造フレームを用いた動的・静的実験による木造軸組の耐震性能評価、日本建築学会構造系論文集、第 582 号、pp95-102、2004.08

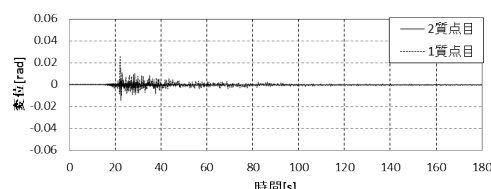


図 15 2005 年千葉県(補強なし)

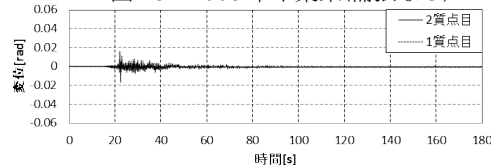


図 16 2005 年千葉県(補強あり)

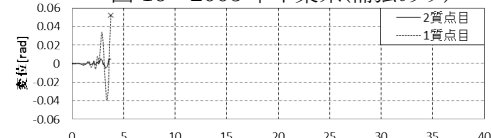


図 17 1995 年兵庫県(補強なし)

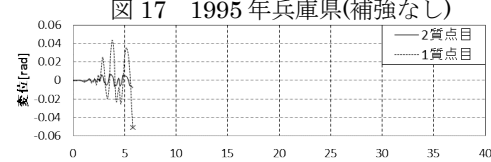


図 18 1995 年兵庫県(補強あり)

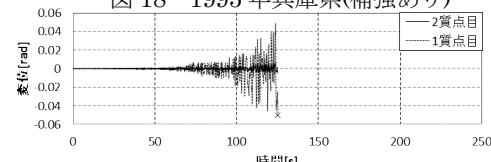


図 19 2011 年千葉県(補強なし)

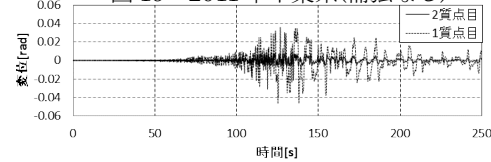


図 20 2011 年千葉県(補強あり)

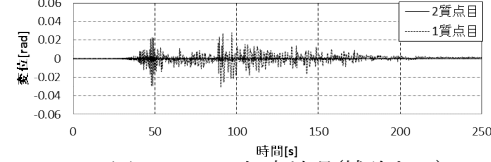


図 21 2011 年宮城県(補強なし)

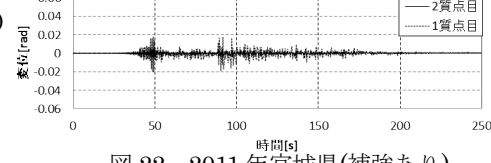


図 22 2011 年宮城県(補強あり)

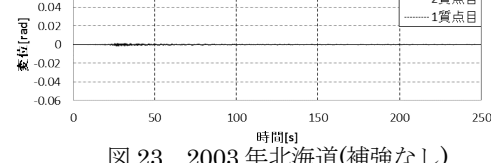


図 23 2003 年北海道(補強なし)

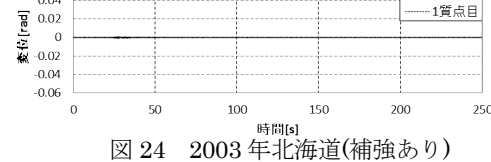


図 24 2003 年北海道(補強あり)