

### 3.1.2 簡便・高精度な耐震診断技術および耐震補強技術の開発

#### 3.1.2.1 耐震診断・補強方法の検討及び開発

#### 目 次

##### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5カ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 平成18年度業務目的

##### (2) 平成18年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
- (c) 業務の成果
  - 1) 振動台実験を実施した住宅に対する耐震診断法の適用と検証
  - 2) 木造住宅の耐震診断・補強方法のメニュー化
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

## (1) 業務の内容

### (a) 業務題目

耐震診断・補強方法の検討及び開発

### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
独立行政法人建築研究所	構造研究グループ長 (7月まで)	岡田恒	okada@kenken.go.jp
独立行政法人建築研究所	上席研究員	河合直人	kawai@kenken.go.jp
国土技術政策総合研究所	主任研究官	槌本敬大	tsuchimoto-t92ta@nilim.go.jp
信州大学工学部	助教授	五十田博	hisoda@gipwc.shinshu-u.ac.jp

### (c) 業務の目的

地震被災度の高い既存木造建物に対して、耐震安全性を高めるため、耐震診断技術の開発、耐震補強指針の開発、行政ならびに市民が容易に理解でき普及可能性の高い耐震補強技術の開発、耐震補強後の建物についての耐震補強診断技術の高度化をおこなう。

### (d) 5カ年の年次実施計画

#### 1) 平成14年度：

- a) 現行の耐震診断技術の整理      i)耐震性能評価方法、ii)耐震診断の項目、iii)適用範囲、iv)方法間の評点の違いなどを整理した。
- b) 様々な耐震診断法による既存建物の耐震性能評価と構造実験      i)耐震精密診断、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、許容応力度、エネルギー法、限界耐力計算、時刻歴応答計算による診断法のキャリブレーション、ii)典型的な補強方法4種類に対する構造実験、などを実施した。
- c) 耐震補強技術の収集と性能評価方針の作成      ii)現在提案されている耐震補強構法の収集・整理した。

#### 2) 平成15年度：

- a) 耐震補強建物の構造性能評価      制震装置を用いた壁の構造性能評価をするとともに、既存の壁に耐震補強をおこなった壁の耐震補強効果を明確にした。
- b) 耐震補強のケーススタディ      耐震補強をおこなった建物について、耐震補強構法別の工期、コスト、耐震補強前後の振動特性などを比較した。さらに、取り壊し予定の築40年程度を経過した市営の木造住宅10棟に対して、常時微動実験、起振機による振動実験を全棟実施し、引き倒し実験をそのうちの3棟について実施した。住まい方の違いによる経年劣化の違い、振動特性の違いやばらつき加減、設計壁量と荷重-変形関係などを定量的に把握した。本データは今後補強建物の性能を評価する上で、基礎資料として用いられる。

#### 3) 平成16年度：

- a) 様々な耐震補強構法の技術的データの蓄積を図るとともに、耐震補強評価法を検証した。

b) 耐震診断技術の高度化を図った。

4) 平成 17 年度：

16 年度までに開発した耐震診断法及び補強方法の具体例を E-ディフェンスの既存木造住宅試験体及び補強試験体に適用し適用性の検証を行った。なお、これに先立って、予行演習を兼ね、かつ事例を増やして検証を充実させる目的で、別途行われた振動実験の試験体にも同耐震診断法の適用を行った。

これらの結果に基づき、耐震診断・補強方法の高度化のための資料としてとりまとめた。

5) 平成 18 年度：

16 年度までに開発した耐震診断法及び補強方法の具体例を、再度 E-ディフェンスの既存木造住宅再現試験体及び補強試験体に適用し、適用性の検証を行う。また、制度の運用にあたって、最終的な耐震診断、耐震補強の意志決定は、各住宅の個別性による部分が大いことから、住宅の特性や住宅の所有者の特性に応じて適切な選択が可能となるような、耐震診断、補強方法のメニュー化を行う。

(e) 平成 18 年度業務目的

既存木造住宅の耐震性能を高め、木造住宅の地震被害を未然に防止するための事前対策を進めるためには、どのような制度設計を行うにせよ、既存木造住宅及び耐震補強後の住宅の耐震性能に関する精度の高い評価法の存在が必要不可欠である。本業務においては、平成 16 年度までに、既存木造住宅の耐震診断法と補強方法（各種補強方法による補強後の耐震診断法）の検討を行った。その成果は（財）日本建築防災協会から出された「木造住宅の耐震診断と補強方法」に反映されている。

平成 18 年度は、平成 17 年度に引き続き、この耐震診断法と補強方法（補強後の耐震診断）を E-ディフェンスで供試体となった木造住宅に適用し、耐震診断の適用性と妥当性の検証、補強方法の適用性と補強後診断の妥当性の検証を行い、耐震診断・補強方法の高度化のための資料とすることを目的とする。併せて、最終的な耐震診断、耐震補強の意志決定は、各住宅の個別性による部分が大いことから、これまでの業務の成果に基づき、住宅の特性や住宅の所有者の特性に応じて適切な選択が可能となるような、耐震診断、補強方法のメニュー化を行うことを目的とする。

## (2) 平成 18 年度の成果

### (a) 業務の要約

耐震診断技術の検証と高度化を目的にして、以下の 2 つの業務を実施した。

#### 1) 振動台実験を実施した住宅に対する耐震診断法の適用と検証

実在の木造住宅を再現して、1 棟は完全な耐震補強を、1 棟はやや不完全な耐震補強を施して振動台実験を実施した合計 2 棟に対し、耐震診断法を適用した。適用した耐震診断法は「木造住宅の耐震診断と補強方法」(財団法人日本建築防災協会)<sup>1)</sup>による、一般診断法と精密診断法のうち保有耐力診断法、ならびに保有水平耐力計算による方法、の 3 種類である。診断の結果、一般診断の総合評点が高く、精密診断の 2 つはほぼ同じ評点となった。また、振動台実験で得られた層せん断力-層間変位関係と保有水平耐力計算の際に求めたそれとを比較した結果、診断法は安全側の結果を与えることがわかった。

#### 2) 木造住宅の耐震診断・補強方法のメニュー化

各種の耐震改修構法について、その補強効果とともに、実際に適用する場合に住宅側に要求される構造上あるいは施工上の条件について整理を行った。これに基づき、木造住宅の最終的な耐震診断、耐震補強の意志決定において考慮される各住宅の個別性や施主の要望について検討し、これらの条件に適合する耐震改修構法を適切に選択することが可能となるような、耐震診断、補強方法のメニュー化を行った。

### (b) 業務の実施方法

#### 1) 振動台実験を実施した住宅に対する耐震診断法の適用と検証

##### a) 対象住宅の概要

対象住宅は、兵庫県明石市に実在した築 31 年の木造軸組構法 2 階建て住宅である。この建物は、平成 17 年度に移築しそのまま無補強で、E-ディフェンスにおいて振動実験を行ったものである (A 棟)。平成 18 年度には、補強前の A 棟を新築で再現したもの (C 棟) と、さらに無筋コンクリートの基礎等までを再現してやや不完全な補強を施したもの (D 棟) の 2 種類について振動台実験を実施し、診断・補強方法の検証の材料とした。表 1~4 に仕様を図 1 に平面図、図 2 に軸組図、図 3 に立面図を示す。

##### b) 耐震診断と補強計画

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)<sup>1)</sup>に基づき補強の要否を決める一般診断と補強が必要となった際に実施する精密診断を実施した。精密診断は保有耐力診断法と保有水平耐力計算による方法の 2 通りである。C 棟についてはこれらの診断を行い、さらに基礎の無筋コンクリートまで再現した D 棟については、一般診断法をもとに現状診断を行い、精密診断法によりやや不完全な補強を施した補強後の耐震性能を詳細に検討した。

##### c) 妥当性の検証

兵庫県南部地震において、JR 鷹取駅で記録された波形 (以降、JR 鷹取波) を本実験の加振波とし、両試験体同時に 3 次元入力する計画とした (入力の方向は NS 成分を試験体 Y 方向に入力することとした)。JR 鷹取波を入力した結果、C 棟は鷹取波を入力によって、

モルタル外壁が軸組から剥離するなどの損傷を受けたが倒壊にはいたらなかった。D棟はモルタル開口隅からクラックが生じたが、構造躯体の目立った損傷は観察されなかった。その後、余震を想定した地震波を入力した後、再度 JR 鷹取フルスケール加振を実施した。C棟は倒壊に至り、D棟は倒壊しなかった。そこで残った D棟に対し倒壊を目的に JR 鷹取波フルスケール加振を繰り返し入力した。結果として C棟倒壊の後の 2 回目の入力によって倒壊した。なお、試験体の振動特性を把握するため本加振に先立ち、試験体を震動台上に設置した状態で、常時微動測定、人力加振試験、起振機加振試験及びホワイトノイズ加振、スイープ加振、中地震波を入力している。表 5 に加振スケジュールを、図 4 に JR 鷹取波加速度時刻歴波形を、図 5 に JR 鷹取波加速度応答スペクトルを示す。ホワイトノイズ加振の 100%は 60gal を表している。

表 1 建物概要

(1) 建物名称	C 棟 D 棟
(2) 元の所在地	兵庫県明石市
(3) 階数・用途・構造	2 階・住宅・在来軸組構法
(4) 混構造の有無	なし
(5) 建築年（西暦）	1971 年 築 31 年 増改築、ベランダ部分
(6) 面積	延床面積 72.30m <sup>2</sup> 1 階面積 37.73m <sup>2</sup> 2 階面積 34.57m <sup>2</sup>
(7) グリッド幅	定まったグリッドはなし 910～1070mm
(8) 階高	1 階 2.76m 2 階 2.65m
(9) 外壁	ラスモルタル、木ずり下地
(10) 内壁	じゅらく塗り仕上げ、土塗り下地
(11) 天井	化粧石膏ボード、プリント合板（和室）
(12) 床	畳・フローリング、火打ち+荒板
(13) 浴室	タイル（D 棟）、ユニットバス（C 棟）

表 2 各部の構造（外壁・軸組（筋かい等）を除く）

(1) 屋根材料	土葺き瓦屋根(非常に重い建物)	
(2) 屋根勾配	4.4 寸勾配	
(3) 基礎の形式	無筋コンクリート造（C 棟は震動台では鉄骨架台）	基礎形式 I
(4) 筋かい接合部の仕様	釘打ち程度	
(5) 柱頭柱脚の仕様	ほぞさし、釘打ち	3kN 未満
(6) 床下地の仕様	なし	床倍率 0.24
(7) 屋根下地の仕様	幅 180 杉板 12mm 以上、根太@500 以下半欠きまたは転ばし	床倍率 0.20
(8) 桁はり構面の仕様	木製火打ち梁 90×90、負担面積 5.0 m <sup>2</sup> 以下	床倍率 0.24

表 3 地盤・構造計画

(1) 地盤の状況	普通
(2) 基礎の亀裂・破損等	通気口からわずかなクラック⇒震動台上ではなし
(3) 水平構面の状態	吹き抜けなし
(4) 独立柱の有無	台所下屋部分にあり⇒震動台上ではなし
(5) 横架材接合部の仕様	羽子板ボルト留め
(6) 屋根葺材の仕様	

表 4 各種の係数

(1) 地域係数 (Z)	1.0
(2) 地盤種別 (法令)	2 種
(3) 積雪区分	一般地域

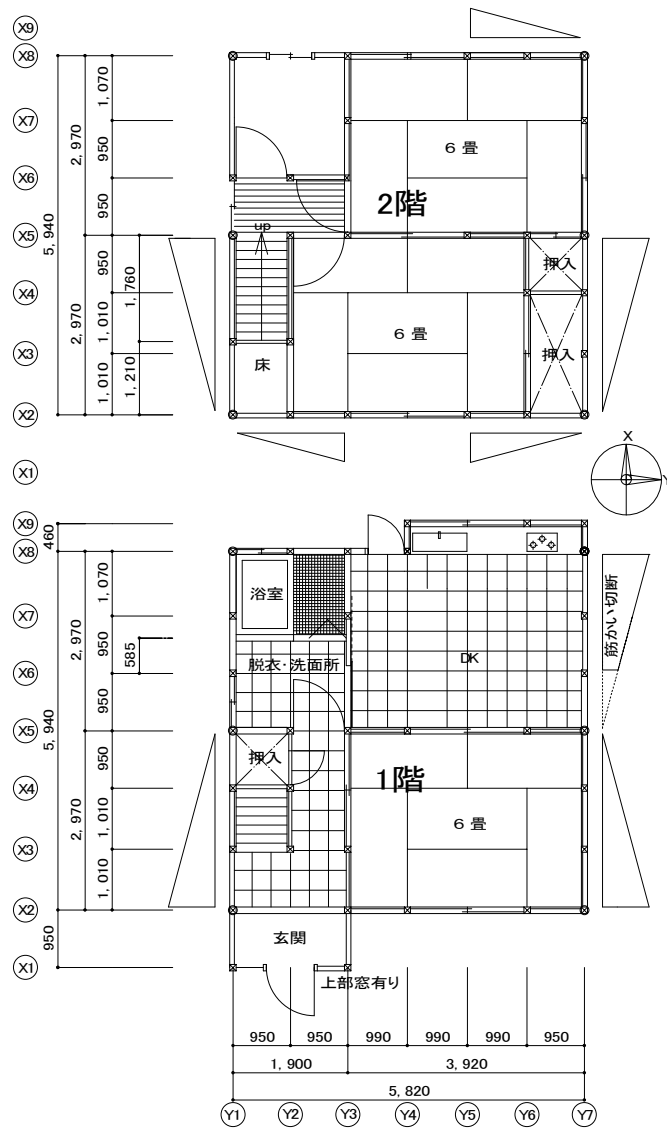


図 1 平面図



写真 1 試験体全景 (C棟、D棟)

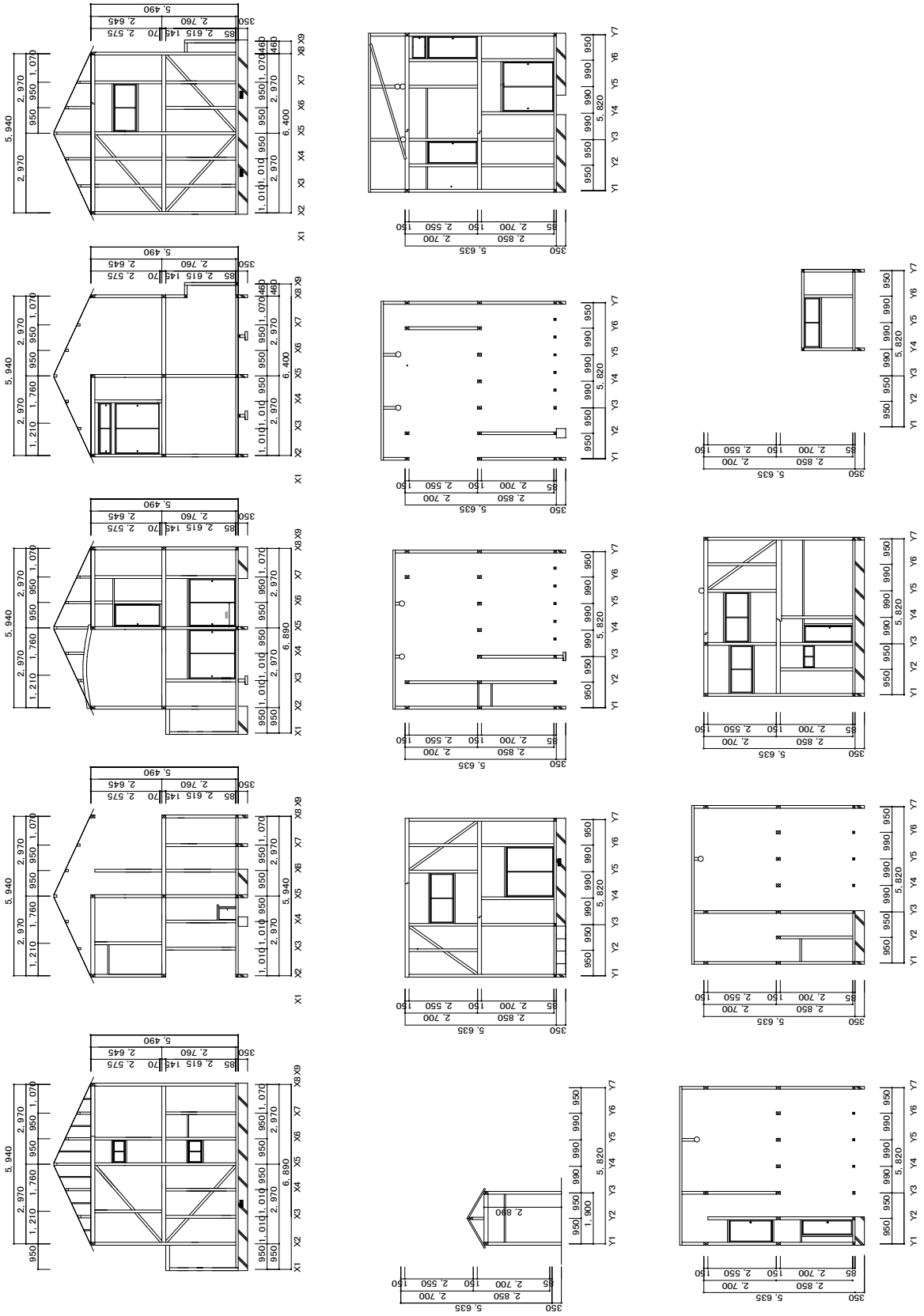


图 2 轴组图





图 3 立面图

表 5 加振スケジュール

加振日	加振波	レベル	備考	加振日	加振波	レベル	備考
2月20日	常時微動測定			2月28日	ホワイトノイズ1	300%	
	起振機加振試験				スイープX	66%	
2月21日	ホワイトノイズ1	200%			スイープY	66%	
	スイープX	66%			ホワイトノイズ2	750%	
	スイープY	66%			JR鷹取波	100%	
	JR鷹取波	5%			JR鷹取波	60%	
	ホワイトノイズ2	350%			JR鷹取波	100%	C棟 倒壊
	ホワイトノイズ3	500%			常時微動測定		
	ホワイトノイズ4	750%			起振機加振試験		
	常時微動測定				3月5日	ホワイトノイズ1	200%
			ホワイトノイズ2	750%			
			JR鷹取波	100%			
			JR鷹取波	100%		D棟 倒壊	

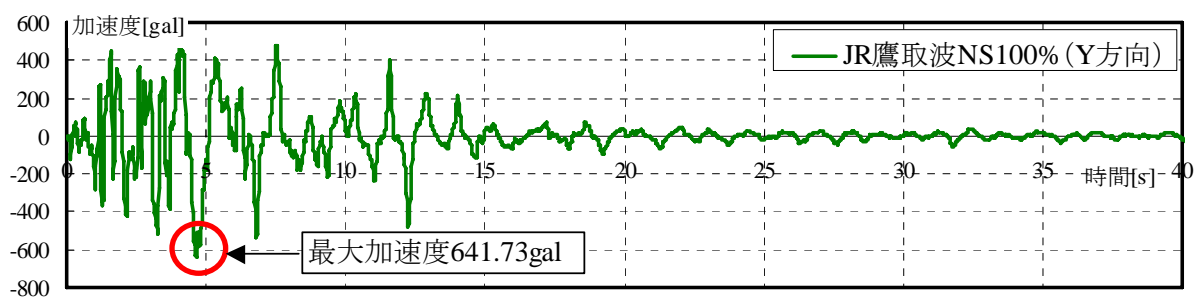


図 4 JR 鷹取波加速度時刻歴波形 (Y 方向)

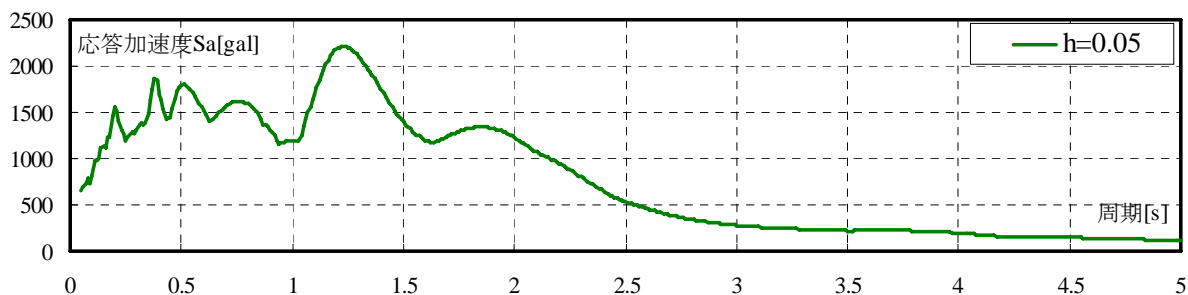


図 5 JR 鷹取波加速度応答スペクトル (Y 方向)

## 2) 木造住宅の耐震診断・耐震補強方法のメニュー化

### a) 各種耐震診断・補強方法の情報整理

各種の耐震改修構法について、その補強効果とともに、実際に適用する場合に住宅側に要求される構造上あるいは施工上の条件について整理を行う。取り上げた耐震改修構法は以下のものである。

基礎補強、壁増設、接合部補強、水平構面補強などの既存技術、4種類

近年開発された耐震改修用の耐力壁、フレーム等、13種類

近年開発された耐震改修用のダンパー類、6種類

近年開発された耐震補強用の接合金物類、10種類

近年開発された基礎の補強構法、4種類

屋根替え等による荷重低減その他、3種類

これらについて、カタログや既存評価等から耐震改修構法としての構造性能、コスト、本構法を評価しうる耐震診断ルート等の情報を整理した。

### b) 住宅特性への適用性

上記の各種耐震補強構法について、種々の住宅特性との関係を整理した。住宅特性として扱う項目は、耐震改修において、住宅側あるいは施主の要望に関する情報として必要な、次の項目である。

- ・建物の規模・形状（階数、延べ床面積の区分、狭小間口か否かなど）
- ・基礎や耐力壁等の構法仕様（伝統的構法か現代的構法かの分類を含む）
- ・現状での耐震診断評点（各階、各方向）
- ・プラン変更（特に開口部をつぶす）の可否
- ・外観の変化の可否
- ・周辺敷地の余裕
- ・工事に当たっての重機使用の可否
- ・耐震改修の予算
- ・補強後の性能（希望する補強後の耐震診断評点）
- ・居ながら補強の必要性

### c) 住宅特性と補強構法、診断法の関係の整理

上記の情報に基づき、各種住宅特性と補強構法との関係を整理し、併せて必要な耐震診断ルートについて整理した。

(c) 業務の成果

1) 振動台実験を実施した住宅に対する耐震診断法の適用と検証

a) 耐震診断

「木造住宅の耐震診断と補強方法」に基づき、C棟については一般診断及び精密診断のうち保有耐力診断法、及び保有水平耐力計算、D棟の補強後については精密診断のうち保有耐力診断法による診断を行った。表6、表7に診断に用いた地震力算定用重量算出結果を、表8に必要耐力算出結果を示す。診断にはこれらの結果に基づき、地震力算定用重量1階134.72kN、2階84.53kNを用いている。表9～11にC棟の一般診断、精密診断（保有耐力診断法）、精密診断（保有水平耐力計算）の結果を示す。C棟の1階Y方向の上部構造評点（以下、評点）は、一般診断で0.62、精密診断（保有耐力診断法）で0.48、保有水平耐力計算で0.48となり大地震の際、『倒壊する可能性が高い』という診断結果となった。

表6 重量表

	屋根荷重 (kN)	外壁荷重 (kN)	内壁荷重 (kN)	内外壁 荷重(kN)	床・積載 荷重(kN)	床荷重 (kN)	積載荷重 (kN)
2階	42.18	57.04	27.66	84.70	41.48	20.74	20.74
1階	4.67	62.25	30.18	92.44	-	-	-

表7 支持重量（地震力算定重量）の計算

	床面積 (m <sup>2</sup> )	上階内外 壁荷重 (kN)	下階内外壁 荷重(kN)	床・積載 荷重(kN)	屋根荷重 (kN)	各層重量 (kN)	支持重量 (kN)
2層目	-	-	42.35	0.00	42.18	84.53	<b>84.53</b>
1層目	<b>34.57</b>	42.35	46.22	41.48	4.67	134.72	<b>219.25</b>
1階床L	<b>37.73</b>	46.22	0.00	-	-	-	-

表8 必要耐力の算定

	地域係数 (z)	振動特性 係数 (Rt)	Ai (Ai)	支持重量 (Wi)kN	層せん断 力係数 Ci 0.20	軟弱地盤 割り増し 1.00	必要耐力 (地震力) <b>Qr(Pi)kN</b>
2階	1.00	1.00	1.27	84.53	0.25	1.00	<b>21.13</b>
1階	1.00	1.00	1.00	219.25	0.20	1.00	<b>43.85</b>

表 9 C棟一般診断結果

方向	階	強さ P(kN)	配置などによる 低減係数 E	劣化度 D	建物保有耐力 Pd=P×E×D	必要耐力 Qr(kN)	充足率 Qd/Qr
X	2	28.11	1.00	1.00	28.11	18.32	1.57
	1	56.67	1.00	1.00	56.67	39.98	1.41
Y	2	21.99	1.00	1.00	21.99	18.32	1.20
	1	24.85	1.00	1.00	24.85	39.98	0.62

表 10 C棟精密診断結果（保有耐力診断法）

方向	階	必要耐力 Qr(kN)	保有する耐力 (修正前) (kN)	剛性率 低減 Fs	偏心低減 Fep	床仕様 低減 Fef	保有する 耐力 Qd(kN)	充足率 Qd/Qr
X	2	21.13	27.27	1.00	1.00	1.00	27.27	1.29
	1	43.85	50.82	1.00	1.00	1.00	50.82	1.16
Y	2	21.13	20.18	1.00	0.97	1.00	20.18	0.96
	1	43.85	21.17	1.00	1.00	1.00	21.17	0.48

表 11 C棟精密診断結果（保有水平耐力計算）

方向	階	構造特性係数 Ds	形状特性係数 Fes	地震力によって 各階に生じる力 Psi (kN)	必要保有 水平耐力 Qun (kN)	保有水平耐力 Qu (kN)	充足率 Qu/Qun
X	2	1.00	1.00	21.13	21.13	26.12	1.24
	1	1.00	1.00	22.72	43.85	51.57	1.18
Y	2	1.00	1.10	21.13	21.13	19.70	0.93
	1	1.00	1.00	22.72	43.85	21.21	0.48

b) 補強計画、補強後診断

D棟の補強は、上部構造については接合部を除き、平成17年度のB棟と同様である。また、基礎の破壊が実際の建物と同様に生じるよう、模擬地盤としてエスレンブロックを敷き、基礎の形式については、中央X5通りを無筋コンクリート布基礎（フーチングなし）、Y7通りを無筋コンクリート+鉄筋コンクリート増し打ち、外周部（Y7通りを除く）を鉄筋コンクリート布基礎（フーチング有り）とし、柱脚の金物仕様を現実の補強としている。図6にD棟の補強箇所、表12に柱脚の接合部仕様を示す。

表13、14にD棟の精密診断（保有耐力診断法）及び精密診断（保有水平耐力計算）の結果を示す。補強後のD棟1階Y方向の評点は、精密診断（保有耐力診断法）で1.57、保有水平耐力計算で1.56となり大地震に対して『倒壊しない』という評価となった。なお、保有耐力診断法のD棟2階Y方向は偏心による低減がかかり、評点1.51と1階に比べてやや小さな評点になるという結果であった。

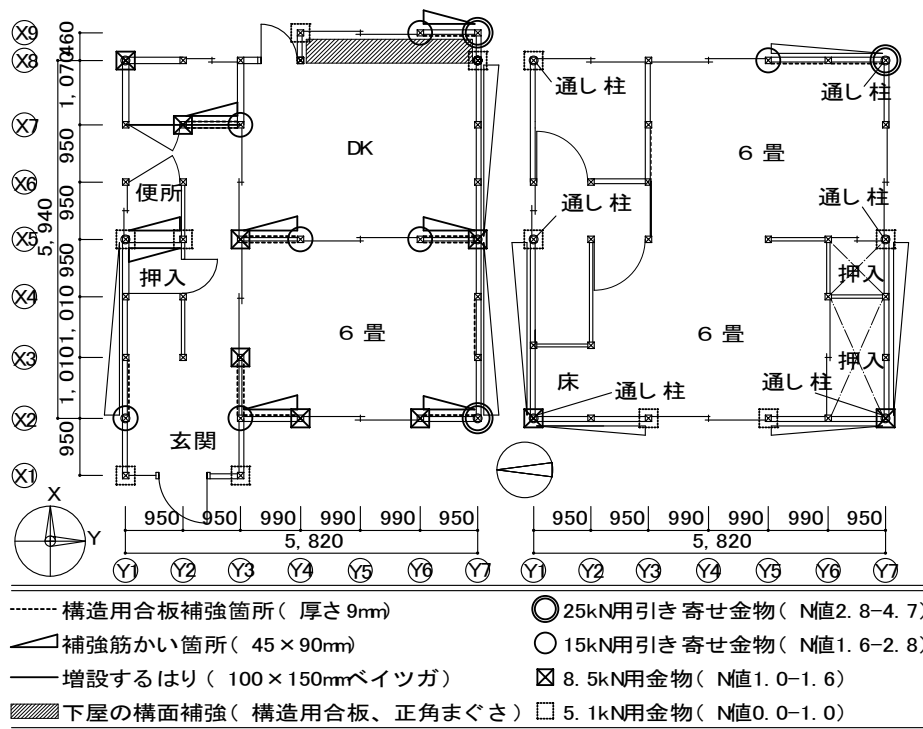


図6 D棟の補強箇所

表 12 D棟の柱脚金物仕様

その1:1階

X9				フリーダム コーナー	CP-L	CP-L	S-HD15
X8	CP-L		CP-L				フリーダム コーナー
X7		フリーダム コーナー	S-HD15				
X6							
X5	CP-L		はしらどめ イチロー	はしらどめ イチロー		はしらどめ イチロー	フリーダム コーナー
X4							
X3			はしらどめ イチロー				
X2	S-HD15		はしらどめ イチロー	CP-L		CP-L	S-HD25
X1	フリーダム コーナー		CP-L				
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7

その2:2階

X9							
X8			はしらどめ イチロー		フリーダム コーナー		
X7							CP-L
X6	CP-L		CP-L				
X5							
X4							
X3							
X2			はしらどめ イチロー		はしらどめ イチロー		
X1							
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7

表 13 D 棟精密診断結果（保有耐力診断法）

方向	階	必要耐力 Qr(kN)	保有する耐力 (修正前) (kN)	剛性率 低減 Fs	偏心低減 Fep	床仕様 低減 Fef	保有する 耐力 Qd(kN)	充足率 Qd/Qr
X	2	21.13	41.22	1.00	1.00	1.00	41.22	1.95
	1	43.85	77.68	1.00	1.00	1.00	77.68	1.77
Y	2	21.13	36.18	1.00	0.88	1.00	31.94	1.51
	1	43.85	68.98	1.00	1.00	1.00	68.98	1.57

表 14 D 棟精密診断結果（保有水平耐力計算）

方向	階	構造特性係数 Ds	形状特性係数 Fes	地震力によって 各階に生じる力 Psi (kN)	必要保有 水平耐力 Qun (kN)	保有水平耐力 Qu (Kn)	充足率 Qu/Qun
X	2	1.00	1.00	21.13	21.13	41.39	1.96
	1	1.00	1.00	22.72	43.85	79.57	1.81
Y	2	1.00	1.00	21.13	21.13	37.82	1.79
	1	1.00	1.00	22.72	43.85	68.62	1.56



### c) 震動台実験経過

写真2～6に実験風景を、図7～図10に加振1回目のC棟及びD棟のY方向加速度時刻歴波形、層間変形時刻歴波形を示す。また図11～図14に加振2回目（JR鷹取60%加振及び100%加振）のD棟のY方向加速度時刻歴波形、層間変形時刻歴波形を示す。C棟は鷹取波を入力によって、モルタル外壁が軸組から剥離するなどの損傷を受けたが倒壊にはいたらなかった。D棟はモルタル開口隅からクラックが生じたが、構造躯体の目立った損傷は観察されなかった。その後、余震を想定した地震波を入力した後、再度JR鷹取フルスケール加振を実施した。C棟は倒壊に至り、D棟は倒壊しなかった。そこで残ったD棟に対し倒壊を目的にJR鷹取波フルスケール加振を繰り返し入力した。結果としてC棟倒壊の後の2回目の入力によって倒壊した。なお、試験体の振動特性を把握するため本加振に先立ち、試験体を震動台上に設置した状態で、常時微動測定、人力加振試験、起振機加振試験及びホワイトノイズ加振、スイープ加振、中地震波を入力している。表5に加振スケジュールを、図4にJR鷹取波加速度時刻歴波形を図5にJR鷹取波加速度応答スペクトルを示す。



写真2 JR鷹取フルスケール 1回目加振後（左：C棟、右：D棟）



写真3 JR鷹取60% 余震想定加振後（左：C棟、右：D棟）



写真4 JR 鷹取フルスケール 2回目加振後 C棟倒壊（上段：C棟、下段：D棟）



写真5 JR 鷹取フルスケール 3回目加振後、 4回目加振後（D棟倒壊）

【C棟 JR 鷹取波フルスケール加振 1回目】

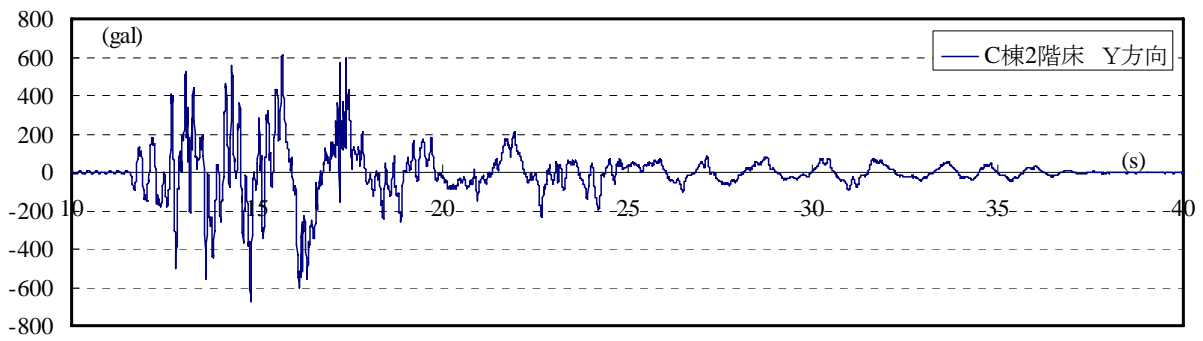


図 7 Y 方向加速度時刻歴波形

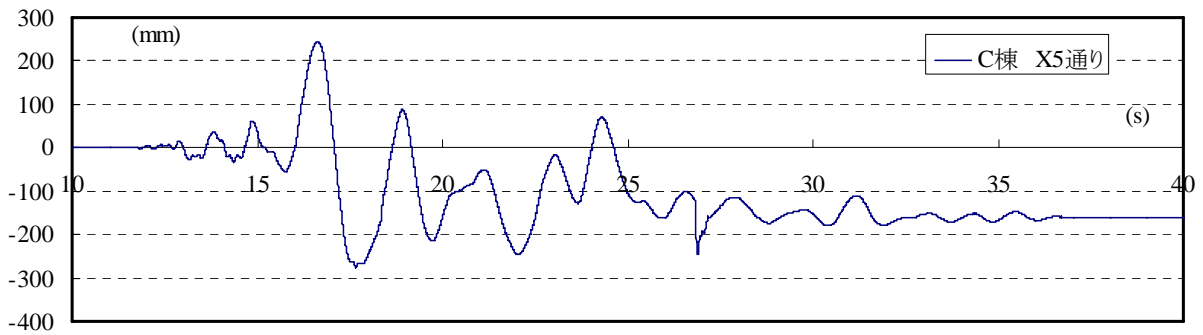


図 8 Y 方向層間変位時刻歴波形

【D棟 JR 鷹取波フルスケール加振 1回目】

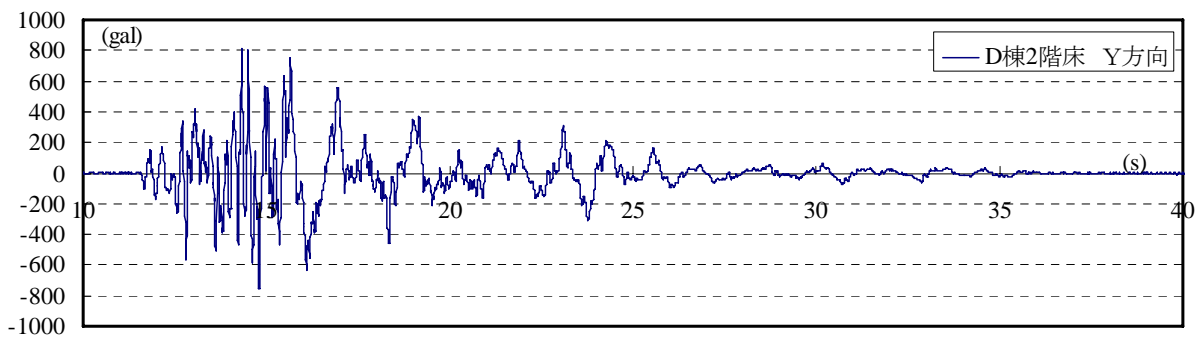


図 9 Y 方向加速度時刻歴波形

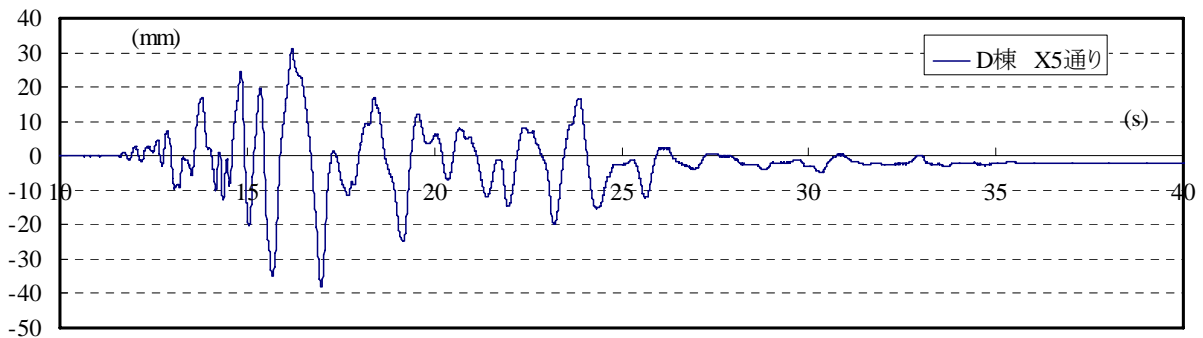


図 10 Y 方向層間変位時刻歴波形

【D棟 JR 鷹取波 60%加振】

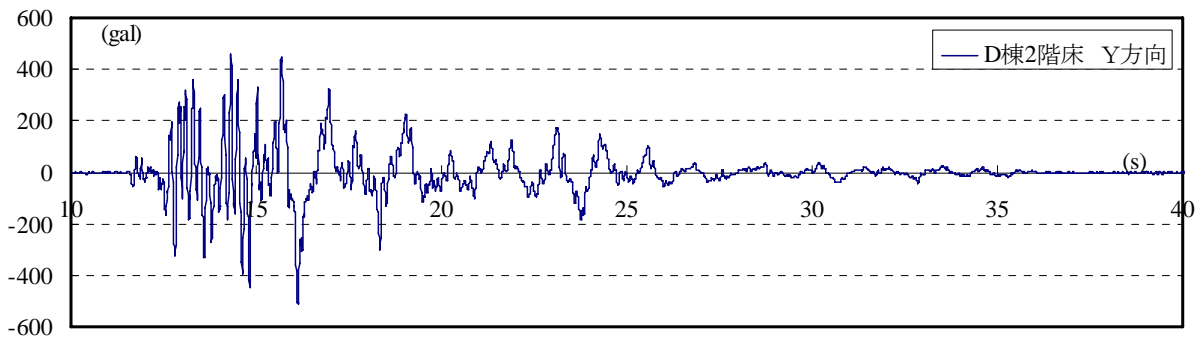


図 11 Y 方向加速度時刻歴波形

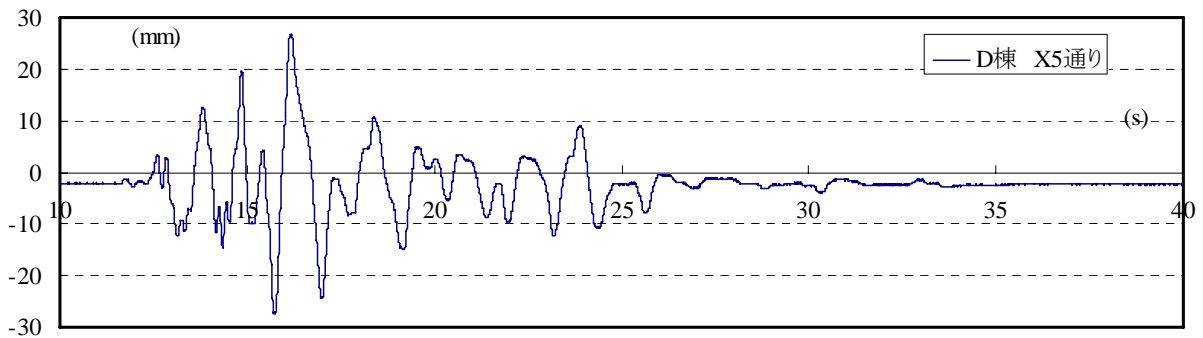


図 12 Y 方向層間変位時刻歴波形

【D棟 JR 鷹取波フルスケール加振 2回目】

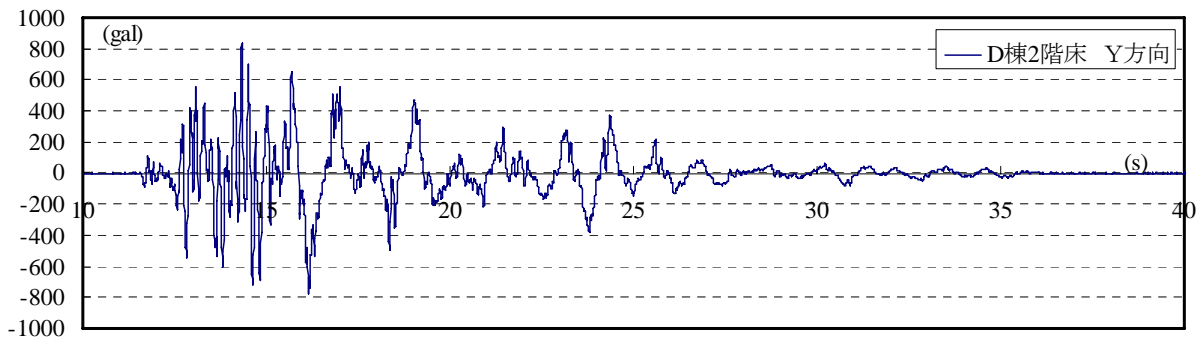


図 13 Y 方向加速度時刻歴波形

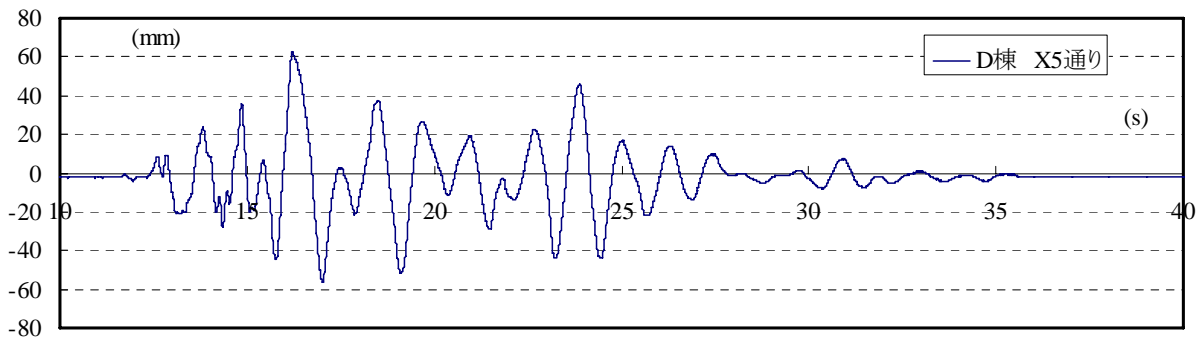


図 14 Y 方向層間変位時刻歴波形

d) 診断で求めた荷重-変位関係と実験値の比較

精密診断のうち保有水平耐力計算による方法で、劣化や耐力壁の浮き上がりを考慮した各壁ごとの荷重変形関係を求め、その累加を層の荷重変形関係とし、各階各方向の試験体の荷重変形関係を算出した。図 15、16 に各階各方向における層せん断力と層間変形の関係を示す。ここで、層せん断力算出には実績荷重（1階 119kN、2階 91kN）に応答加速度を乗じて算出している。いずれの棟、階、方向とも耐震診断で求めた荷重変形関係は実験に比べて安全側の評価となっていることがわかる。

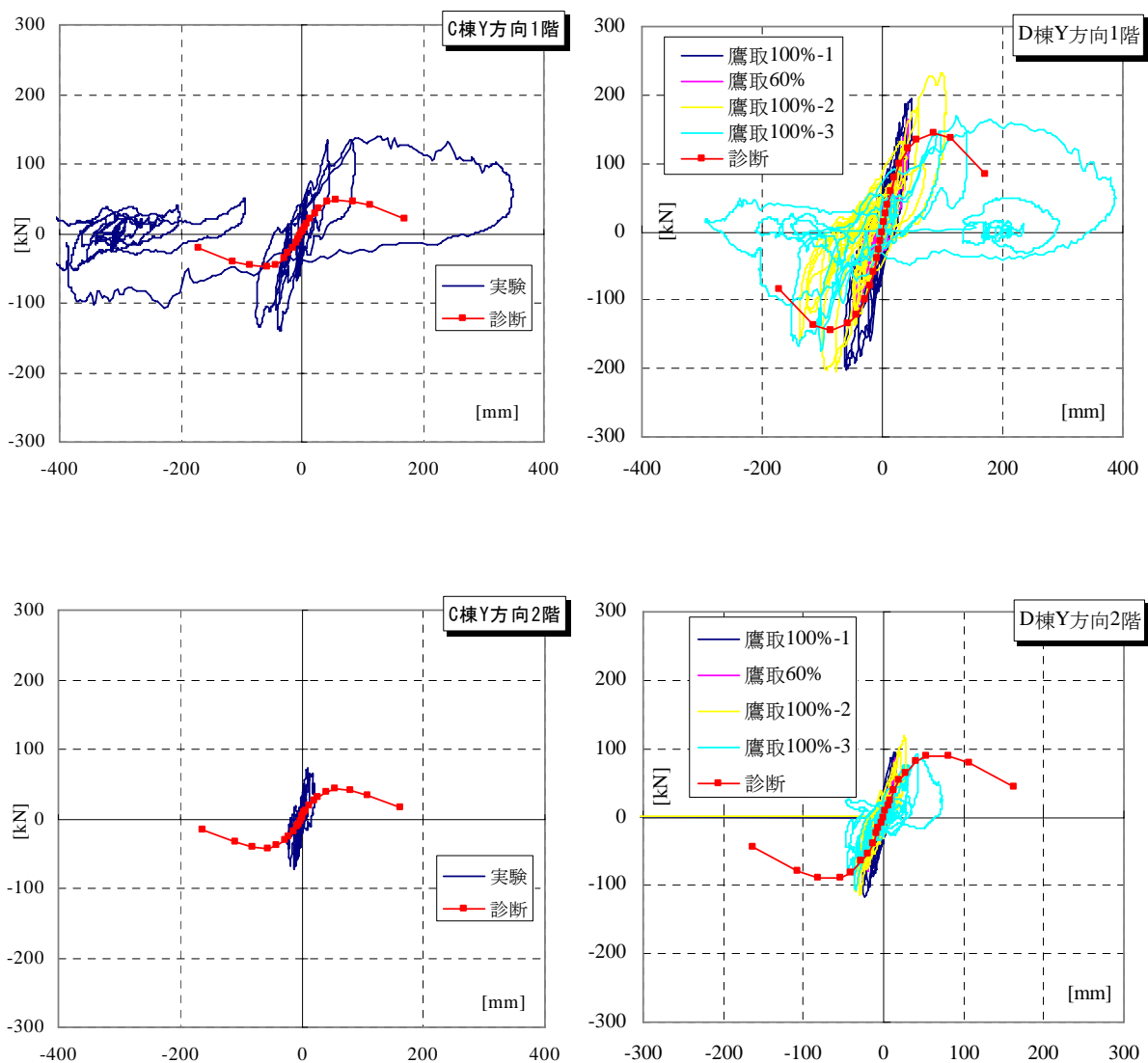


図 15 Y 方向荷重変形関係

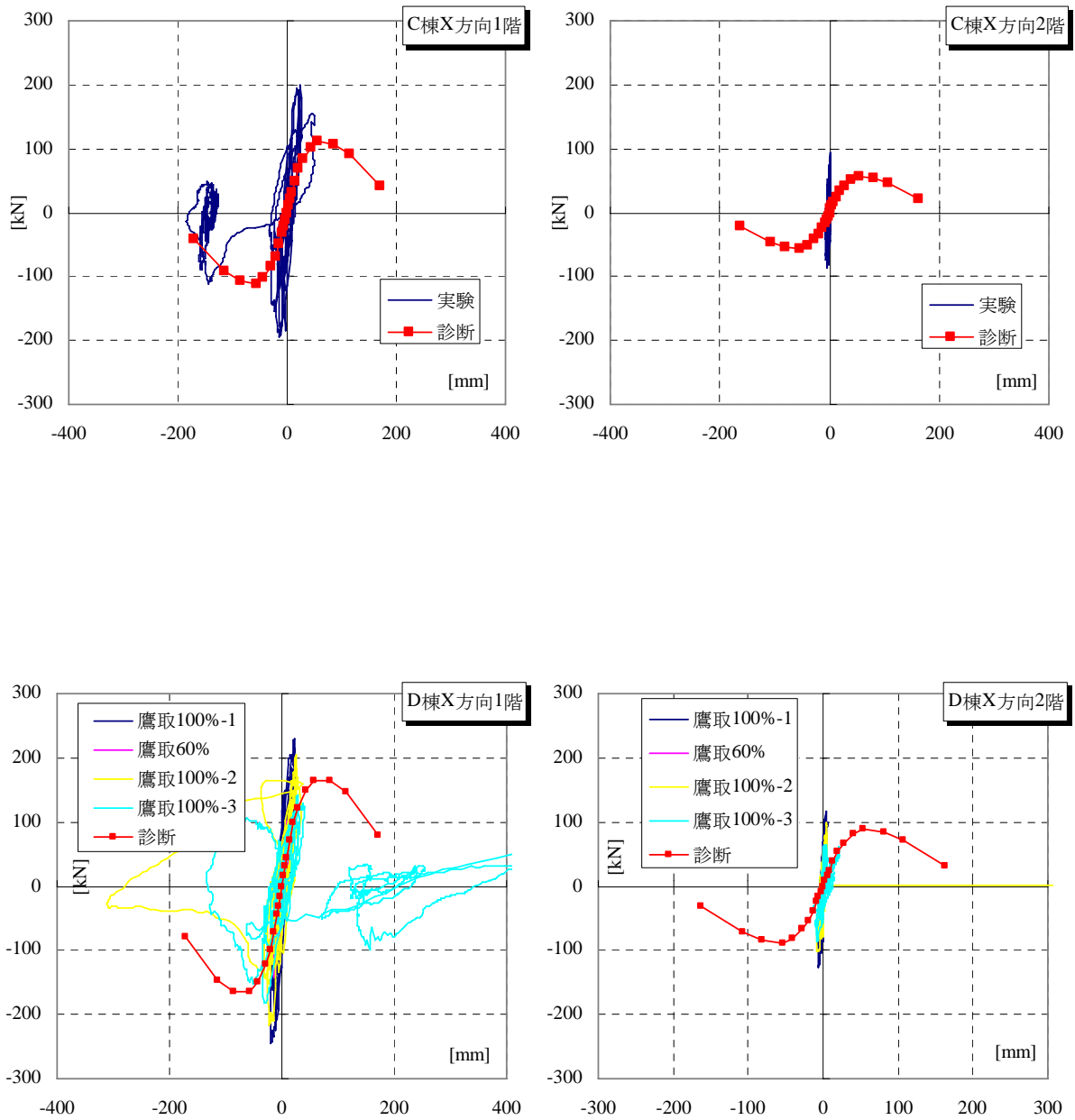


図 16 X 方向荷重変形関係

2) 木造住宅の耐震診断・補強方法のメニュー化

a) 各種の耐震改修構法の補強効果と条件の整理

各種耐震改修構法として表 15 に示す 40 技術を取り上げ、補強効果としての性能値及び施工棟における条件の整理を行った。

表 15 検討に用いた各種耐震補強構法

耐震補強構法の種別	構法の種類	開発者	出典*	
1 基礎補強、壁増設、接合部補強、水平構面補強などの既存技術  (4)	基礎補強（告示仕様の補強）	—	告示	
	耐力壁補強（構造用合板張り付け）	—	告示	
	水平面補強（火打ちばり設置）	—	告示	
	接合部補強（Z マーク金物・同等品）	—	告示	
2 近年開発された耐震改修用の耐力壁、フレーム  (13)	面材系	火山性ガラス質複層板	D 社	建防協
		中質繊維板	E 社	建研
		モルタル外装補強	Z 協同組合	静岡
		乾式土壁パネル	K 社	静岡
	フレーム系	木製開口フレーム	J 社	建研
		アルミニウム合金製フレーム	C 協会	建研
	ブレース系	炭素繊維補強	S 社	静岡
		金属製筋かい	T 社	静岡
		ワイヤー	K 社	静岡
		ステンレスロッド	K 社	静岡
	金物系	接合部補強・筋かい端部兼用	K ネットワーク	静岡
		三角形金物による仕口補強	K 研究会	静岡
		箱形金物による仕口補強	S 社	静岡

(表 15 つづき)

耐震補強構法の種別	構法の種類	開発者	出典
3 近年開発された耐震改修用のダンパー類  (6)	仕口補強ダンパー	J社、N社	建防協
	仕口補強ダンパー	G社、E社	建研
	壁内オイルダンパー	T社、E社	建研
	仕口補強ダンパー	K社	建研
	仕口補強ダンパー	I社	静岡
	制振パネル	I社	静岡
4 近年開発された耐震補強用の接合金物類  (10)	グルードインロッド型	H社	建研
	アラミド繊維シート	J社	静岡
	外付け柱脚金物	E社	静岡
	アラミド繊維ロープ	F社	静岡
	水平構面補強	K研究会	静岡
	外付け柱脚金物	G社	静岡
	補強金物	S社	静岡
	外付け仕口補強金物	S社	静岡
	大引き床束仕口補強	S社	静岡
	外付け柱脚金物	S社	静岡
5 近年開発された基礎の補強構法  (4)	帯鋼+アラミド繊維シート	S社	建防協
	エポキシ樹脂	E社	静岡
	炭素繊維シート	J社	静岡
	エポキシ樹脂	S社	静岡
6 屋根替え等による荷重低減その他  (3)	屋根材の軽量化	—	—
	外付け鋼製柱	S社	建防協
	外付け鋼製フレーム	N社	静岡

出典 建防協：建築防災協会、建研：建築研究所、静岡：静岡県「耐震補強構法ナビ」



耐震改修構法別に、その補強効果の概要と、施工等に対する条件を示すと以下の通りである。

#### ①基礎補強、壁増設・壁補強、接合部補強、水平構面補強などの既存技術

基礎の補強に関しては、耐震改修法の告示で無筋コンクリート基礎に鉄筋コンクリート造の基礎を増し打ちする仕様が示されている。基礎の増し打ちにより、曲げ耐力の向上は期待できるが無筋コンクリート基礎部分に打たれたアンカーボルトの引き抜きに対する耐力上昇は期待できない。基礎まわりの作業空間が必要となる。屋内からの基礎の施工には床の一時撤去が必要となる。

通常、壁増設・壁補強は、告示 1100 号等の仕様による場合、相応の耐力が期待されるが、一般に柱頭柱脚の接合部補強も必要となる。また、筋かいの場合には筋かい端部の接合のため、面材の場合には面材の横架材への釘打ちのため、壁の仕上げ材の撤去が必要となる。品確法の準耐力壁の仕様の場合には、四周を釘打ちした場合に比べて耐力は下がる。評価値は耐震診断に既に盛り込まれている。ただし、横架材に対する釘打ちが不要となるため、床や天井の仕上げの撤去が不要となるか又は最小限に押さえられる。

接合部補強については、Z マーク金物は接合部耐力の性能値は明らかであるが、一般に側面からの釘打ちとなるため、仕上げ材の撤去が必要であり、直交部材との関係で納まらない場合も多い。同等品の認定を受けたもので壁の内側に納まるものであれば、補強設計が容易である。それでも施工の都合上、一般には周辺の仕上げ材の除去が必要となることが多い。

水平構面補強の補強効果は、いわゆる品確法の床倍率と、改訂後の耐震診断における評価法により、明らかに評点に反映され得る。面材による場合と火打ち梁等による場合がある。構造用合板等の面材を釘打ちする方が効果的であるが、天井仕上げ等の一時撤去が必要になることが多い。直接、評点には反映されないこともあるが、下屋の耐力壁の壁増設や壁補強に際しては、一般に、下屋の天井面又は屋根面における水平構面補強が必要である。

これらの既存技術を用いた場合の耐震診断のルートは、一般に精密診断法 1（保有耐力診断法）で可能である。

#### ②近年開発された耐震改修用の耐力壁、フレーム

耐震補強用に開発された面材等を用いる耐力壁の仕様には、床や天井をはがさずに施工可能なものが多い。壁基準耐力 4~8 (kN/m) 程度のものが多い。ただし、高倍率の場合には柱頭柱脚の接合部補強が必要である。また、柱や横架材が劣化している場合には、その部材の交換又は補修が必要となる。

耐力壁による補強は、その壁基準耐力、基準剛性が認定等により明らかにされていれば、一般に精密診断法 1（保有耐力診断法）で評価が可能である。

ブレースによる補強構法も、建物側の条件としては面材を用いた場合と概ね同様である。ただし、ブレース系のものには通風・採光を確保しながら補強可能なものがあり、こうした施主の要望に対応可能である。

フレームについては、既存の柱梁により鉛直荷重を支えるタイプであれば、柱の折損等による鉛直荷重支持能力の喪失がないと考えられるので、耐震壁と同様の評価が可能であ

る。外付けタイプの場合には、敷地周辺に施工空間が必要となり、また通常、フレームのための基礎の新設が必要であり、重量物の場合には重機の使用が必要となるが、屋内側からの施工がわずかで済むため、居ながら補強が可能となる。

フレームによる補強の場合には、既存の柱梁により鉛直荷重を支えるタイプで、耐力壁と同様の評価が成され、壁基準耐力が明らかになったものであれば、一般に精密診断法1（保有耐力診断法）で評価が可能である。ただし、外付けフレームの場合には、さらに地震力を確実にフレームに伝達するための接合部設計が必要である。

### ③近年開発された耐震改修用のダンパー類

ダンパー類には、大別すると柱梁等の接合部に取り付けるものと壁の内部に用いるものとの2種類がある。

接合部に取り付けるダンパーは、一つ一つの減衰効果はそれほど大きくなく、壁強さ倍率換算で1個当たり0.5kN～1.8kN程度であるが、建物内に多数取り付けることにより改修効果を確保することができる。接合部を構成する部材の相対的な回転角が必要なので、伝統的構法には効果的であるが、既に面材系の耐力壁や垂れ壁が用いられている箇所では効果が減じると思われる。また、天井裏など隠れた場所であれば施工が比較的容易なので、居ながら補強にも対応可能である。

壁内に設けるダンパーは、壁の耐力としては相当高いものが多く、壁強さ倍率3.7～5.3kN、8.6kNといったものがある。表に掲げた以外の例で壁基準耐力14といった高倍率のものもある。速度効果により、地震時にはさらに高い耐力を発揮する場合もあるので、これを考慮した周辺の接合部等の設計が必要である。壁仕上げ及び周辺仕上げの撤去が必要である。

### ④近年開発された耐震補強用の接合金物類

外壁仕上げの上から、または仕上げを部分的に除去して、基礎と柱、あるいは1～2階の柱を緊結する金物が開発されている。また、金物の代わりにアラミド繊維を用いるものもある。外壁側からの工事であるため、居ながら補強が可能である。ただし、あと施工アンカーの施工や接着剤を用いた施工には、温度等に配慮した施工監理が必須である。

接合部の引張の許容耐力が明らかであれば、耐震精密診断1（保有耐力診断法）にて評価が可能。

### ⑤近年開発された基礎の補強構法

無筋コンクリート基礎の補強構法としては、鋼材とアラミド繊維、炭素繊維シートの貼り付け等の構法が開発されている。繊維シートを貼り付けた場合には、アンカーの引き抜き耐力の向上も期待できる場合がある。

アンカーの引き抜きも含め、どの基礎工法に対応する補強となるかがわかれば、耐震精密診断1（保有耐力診断法）にて評価が可能。

### ⑥屋根替え等による荷重低減その他

屋根替えは軽い金属板等の屋根材に交換する従来からある手法。瓦屋根等に適用できる。

耐震ポール等の外付け構法については、建物側の条件としてはフレームの場合と同様。

b) 住宅特性と施主の要望に関する検討

補強方法を選択する上で考慮すべき住宅特性、施主の要望としては、以下のようなものが考えられる。

- ・ 建物の規模・形状（階数、延べ床面積の区分、狭小間口か否かなど）
- ・ 基礎や耐力壁等の構法仕様（伝統的構法か現代的構法かの分類を含む）
- ・ 現状での耐震診断評点（各階、各方向）
- ・ プラン変更（特に開口部をつぶす）の可否
- ・ 外観の変化の可否
- ・ 周辺敷地の余裕
- ・ 工事に当たっての重機使用の可否
- ・ 耐震改修の予算
- ・ 補強後の性能（希望する補強後の耐震診断評点）
- ・ 居ながら補強の必要性

c) 耐震診断、補強方法のメニュー化

各種耐震補強構法と住宅特性、施主の要望との関係を大まかに整理した結果を表 16 に示す。厳密には、当該改修構法を単独で用いるか、他の構法と組み合わせて用いるかによっても評価が異なるため、さらに検討を要する。しかしながら、この表をさらに充実していけば、住宅特性や施主の要望の側から見ることにより、どのような改修構法がその住宅に適しているかという、補強構法の選択システムにも発展していく可能性を有している。

また、表 17 には、各種耐震補強構法と補強後の耐震診断法の関係を示した。ダンパー系のように、振動特性を考慮しなければ評価が不可能なものは、本来、限界耐力計算や時刻歴応答計算などの高度な診断法によらなければならないが、ダンパーの減衰による入力低減を等価な壁基準耐力に置き換えるといった評価がなされていれば、耐震精密診断法 1（保有耐力診断法）によって評価することも可能である。

表 16 各種耐震補強構法と住宅特性、施主の要望との関係

耐震補強構法の種別	細分類	建物形状狭小等	基礎仕様悪	現状評点低い	プラン変更なし	意匠変化なし	敷地余裕なし	重機使用不可	予算少額	居ながら補強
1 基礎補強、壁増設、接合部補強、水平構面補強などの既存技術	基礎補強	—	△	—	○	—	×	△	×	—
	耐力壁補強	×	△	—	—	—	○	○	△	△
	水平面補強	—	—	—	—	—	○	○	△	△
	接合部補強	—	—	—	—	—	○	○	△	△
2 近年開発された耐震改修用の耐力壁、フレーム	面材系	△	△	—	—	△	—	○	○	○
	フレーム系	○	—	△	○	△	△	△	△	○
	ブレース系	△	△	—	—	—	○	○	△	△
	金物系	△	△	—	—	—	○	○	△	△
3 近年開発された耐震改修用のダンパー類	仕口部ダンパー	○	○	×	○	△	○	○	○	○
	壁体内ダンパー	△	△	—	—	—	—	○	△	△
4 近年開発された耐震補強用の接合金物類	柱—基礎緊結	○	×	×	○	△	△	○	○	○
	柱—柱緊結	○	—	×	○	△	△	○	○	○
5 近年開発された基礎の補強構法	繊維シート補強	○	○	—	○	—	×	○	△	○
6 屋根替え等による荷重低減	屋根等の軽量化	○	○	—	○	×	—	○	△	○
7 その他	外付け柱	○	—	○	○	×	×	×	△	○

○：対応可能、可能性高、—：どちらとも言えない、△：対応困難、×：対応不可能

表 17 耐震補強構法と耐震診断ルートの関係

耐震補強構法の種別	細分類	一般診断法*	保有耐力診断法	保有水平耐力計算	限界耐力計算	時刻歴応答計算
1 基礎補強、壁増設、接合部補強、水平構面補強などの既存技術	基礎補強	○	○	○	○	○
	耐力壁補強	○	○	○	○	○
	水平面補強	○	○	○	○	○
	接合部補強	○	○	○	○	○
2 近年開発された耐震改修用の耐力壁、フレーム	面材系	△	△1	△2	△2	△2
	フレーム系	△	△1	△2	△2	△2
	ブレース系	△	△1	△2	△2	△2
	金物系	△	△1	△2	△2	△2
3 近年開発された耐震改修用のダンパー類	仕口部ダンパー	△	△1	×	△2	△2
	壁体内ダンパー	△	△1	×	△2	△2
4 近年開発された耐震補強用の接合金物類	柱－基礎緊結	△	△1	△1	△1	△1
	柱－柱緊結	△	△1	△1	△1	△1
5 近年開発された基礎の補強構法	繊維シート補強	△	△1	△1	△1	△1
6 屋根替え等による荷重低減	屋根等の軽量化	○	○	○	○	○
7 その他	外付け柱	×	×	×	△	○

○：適用可能、可能性高、△1：耐力・剛性の評価がなされていれば可能、△2：荷重変形関係（さらに限界耐力計算では減衰、時刻歴応答計算では履歴特性）が与えられていれば可能、×：適用不可能

\*補強後の診断について一般診断法は推奨されていないが、不可能ではない場合に○を付した

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 移築振動台実験を実施した住宅に対する耐震診断法の適用と検証

・振動台実験を実施した既存木造住宅再現試験体について、「木造住宅の耐震診断と補強方法」に基づき、無補強の1棟（C棟）については一般診断及び精密診断のうち保有耐力診断法、及び保有水平耐力計算、他の1棟の補強後（D棟）については精密診断のうち保有耐力診断法による診断を行った。C棟の評点は、一般診断が精密診断と比較して高い値となり、保有耐力診断法と保有水平耐力計算による方法での評点はほぼ同じ値となった。D棟の評点は、保有耐力診断法の評点が、保有水平耐力計算よりやや小さな値となった。

・実験結果と保有水平耐力計算による方法の際に求めた層せん断力-変形関係のループを比較すると、いずれの棟、階、方向とも耐震診断で求めた荷重変形関係は実験に比べて安全側の評価となっていることがわかった。

2) 木造住宅の耐震診断・耐震補強方法のメニュー化

・各種耐震補強方法について、その補強効果とともに、実際に適用する場合に住宅側に要求される構造上あるいは施工上の条件について整理を行うとともに、耐震改修計画時に考慮される種々の住宅特性、施主の要望について検討した。

・上記をまとめて、各種補強構法と住宅特性・施主の要望との関係を整理し、併せて必要な耐震診断ルートについて整理し、耐震診断法及び補強構法のメニューとして取りまとめた。

3) 今後の課題

既存木造住宅の耐震性能を高め、木造住宅の地震被害を未然に防止するための事前対策を進めるためには、耐震診断の精度の向上が不可欠であるが、一方で極めて多様な耐震改修構法が開発されており、最終的な耐震診断、耐震補強の意志決定は、各住宅の個別性による部分が大きいという実情もある。本業務において各種耐震補強構法と住宅特性や耐震診断ルートとの関係を示したが、これをさらに発展させ、個々の住宅特性や施主の要望に応じて適切な構法選択が可能となり、それが耐震改修に携わる実務者やさらには施主にとっても容易に理解できるような、耐震補強方法選択システムの開発が今後の課題であると考えている。

(e) 引用文献

1)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 2001.5

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
坂本功、他	震動台による既存木造住宅の耐震性能検証実験（その16～その26）	日本建築学会大会学術講演梗概集	2007年8月（予定）

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定  
特になし

