

3.4.4 木造建物中規模三次元振動台実験

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 ヶ年の年次実施計画
- (e) 平成 14 年度業務目的

(2) 平成 14 年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 木造建物中規模三次元振動台倒壊実験の加振・計測方法について
 - 2) 既存住宅構造面実験
 - 3) E - ディフェンス実験のための会議開催
- (c) 業務の成果
 - 1) 木造建物中規模三次元振動台倒壊実験の加振・計測方法について
 - 2) 既存住宅構面実験
 - 3) E - ディフェンス実験のための会議開催
- (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

(3) 平成 15 年度業務計画案

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 木造建物中規模三次元振動台実験

(b) 担当者

| 所 属 | 役 職 | 氏 名 |
|------------------|-------|-------|
| 独立行政法人 防災科学技術研究所 | 客員研究員 | 坂本 功 |
| | 流動研究員 | 箕輪 親宏 |
| | 特別研究員 | 西山 誕生 |

(c) 業務の目的

本研究では、木造建物の実大および要素試験体を用いた三次元振動台実験を実施して e-ディフェンスに於いて、将来、実施予定の木造建物の三次元震動破壊実験の参考データを取得解析し、e-ディフェンス実験に役立てると共に、木造建物の耐震診断、耐震補強に関するデータを取得し、木造建物の地震時挙動の把握と耐震性能の評価を行い、耐震設計法および耐震補強法の開発と併せて木造建物の耐震性向上を図る

(d) 5カ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

中規模三次元振動台による劣化木造建物の大変位入力に対する破壊特性についての検討

E-ディフェンスでの木造建物実験のため調査検討を行う。

2) 平成15年度：

地盤基礎上の木造建物等を想定した中規模三次元振動台実験を行い、大加振時の木造建物の破壊応答特性とE-ディフェンスの実験に関する資料を得る。

E-ディフェンスの木造建物実験法について検討する。

3) 平成16年度：

木造建物補強を想定した中規模三次元振動台実験を行い、大加振時の補強木造建物の地震応答特性とE-ディフェンスの実験に関する資料を得る。

E-ディフェンスの木造建物試験体、実験法に付いて検討する。

4) 平成17年度：

E-ディフェンスに於いて木造建物等の実験を行い、木造建物耐震性向上の資料を得る。

5) 平成16年度：

E-ディフェンスに於いて木造建物等の実験を行い、木造建物耐震性向上の資料を得る。全体のまとめを行う。

(e) 平成14年度業務目的

劣化した小型木造建物の中規模三次元振動台実験を行い、崩壊に至るまでの挙動を計測し、その荷重 - 変形特性を調べ、E-ディフェンス実験の参考とする。(また、小型木造建物の、水平1方向破壊実験、水平2方向破壊実験、3方向破壊実験を実施し、多方向震動の破壊に及ぼす影響を検討する。

E-ディフェンスでは地盤基礎を考慮した実物木造建物の移築実験を計画している。ここではE-ディフェンスで如何なる木造建物を試験体として用いるか、如何なる振動台実験を行うか、計画立案の準備を行う。

(2) 平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は次の各項目を実施した。

木造建物倒壊振動台実験の際の加振精度を検討した。試験体の条件(重量,剛性,耐力),加振軸(X軸,Y軸)や加振方法(1,2,3次元加振)による加振精度の違いはほとんど見られなかった。なお倒壊時のロッキング回転は多方向試験体では6/10000程度であり、既存住宅構面試験体では13/10000程度であった。

ビデオ変位計測に付いてはモーションキャプチャー技術を応用した画像計測手法を用いた実大木造建物の倒壊実験に関する計測結果について示した。結果より、画像計測手法が倒壊過程のような大変形量を生じる動的三次元挙動を十分実用可能な精度で計測可能であり、従来の接触型変位計では困難であった計測を可能とすることを明らかにした。

既存木造住宅の構面を抽出、運搬し、振動台に設置して振動台実験を行うことができた。本実験の実施過程及び成果はE-ディフェンスでの実施を計画している移築試験体の振動台実験に非常に参考になるものである。既存建物全体を振動台に設置することは非常に困難であることから、本実験では構面のみの抽出を試みた訳であるが、今後予定しているE-ディフェンスでの移築実験ではどの程度の部位をどのようにして取り出すのかを再検討する必要がある。また、本実験の結果から箱型試験体の柱脚の引き抜きが実際以上の拘束を受けていたことが考えられるので、実際に近い柱脚固定の程度を再現する柱脚接合及び直交壁の仕様を再検討する必要があるものと考えられる。

E-ディフェンス実験の会議を開催し、E-ディフェンスの建設状況を視察する共に、実験法について討議し、基礎・地盤付き実験についてある程度の合意を得た。

(b) 業務の実施方法

1) 木造建物中規模三次元振動台倒壊実験の加振・計測方法について

x, y, xy, xyz 方向の 4 種の加振に付いて、リンク方式の三次元振動台の加振精度を検討する。

三次元の木造建物倒壊実験に対し従来の計測法の適用性、並びにビデオカメラによる変位計測法について検討する。

2) 既存住宅構面実験

試験場から約 40km 離れた場所に建っていた昭和 54 年築の既存木造住宅を対象に、現場での常時微動測定、劣化調査、構面の静的加力実験、構面を組み合わせた箱型試験体に対する振動台実験を行った。

3) E - ディフェンス実験のための会議開催

木造建物実験関係者による木造振動台実験に関する会議を開き従来の振動台実験と E - ディフェンスの実験について討議する。

(c) 業務の成果

1) 木造建物中規模三次元振動台倒壊実験の加振・計測方法について

a) 実験目的

これまで、数多くの木造住宅の振動台実験が行われてきたが、これらの実験は、比較的健全に建てられた建物または新築の建物を対象としたものが多い。また、実験で建物を完全に倒壊させた例は少ない。大災害時の安全性を考える場合には、新築だけでなく既存の木造建物の倒壊現象を把握しておく必要がある。

既存木造住宅と新築木造住宅で大きく異なる点は、その構法と経年変化である。新築の建物は、現行の法規に従って建築されており、その性能は、数々の実験によって検証されている。しかし、既存住宅は、その建築当時の法規に従ってその当時の構法で建てられている。また、法規自体が、地震被害、実験結果などを反映する形で改良されているため、必ずしも現行の法規の性能と一致しているとは限らない。また、ある程度年月を経過した木造住宅は、場合によっては経年劣化した部材、部位等を含むことがあり、これが原因で耐震性能が低下する可能性もある。しかし、劣化の程度と耐震性能の低下率は定量的に明らかにされていないため、耐震診断等においても劣化の程度を断片的に把握して、全体に係数を与えるに留まっている。そこで、本研究では、旧仕様の木造住宅の耐震性能、倒壊現象、経年変化の影響等について実大振動台実験を通じて明らかにすることを目的とする。

b) 実験概要

目的を達成するために、X, Y 方向からの入力、2 次元、3次元同時入力の影響を調べる試験体（以下、多方向試験体）と既存住宅の移築方法と経年変化の影響を調べる試験体（以下、既存住宅構面試験体）を用いて振動台実験を行った。

多方向試験体実験は、築30～40年の木造住宅の基本性能を把握するために、1981年耐震基準改正以前の仕様の木造住宅を想定し、同一仕様の試験体4体に対して、それぞれX方向、Y方向、XY方向、XYZ方向に地震動を入力し、その倒壊現象を観察・測定した。

既存住宅構面試験体実験は、既存建物試験体の移築方法と経年変化の影響を把握するために、実際に建っていた建物の一部を、部分的に振動台上に移築して加振し、その被害、倒壊現象を観察・測定した。この実験結果と、今後行われる同一仕様の新築試験体との比較によって、経年変化の影響を評価することになる。

c) 試験体概要

多方向試験体は、幅3640mm、奥行5450mmの平面をもつ、階高1階2940mm、2階2880mm、高さ5820mmの2層の建物である。建物は、1980年耐震基準改正以前の仕様とし、1979年公庫木造住宅工事共通仕様書に準ずるようなものとした。多方向試験体については同じものを4回の実験x(No.1)、y(No.2)、xy(No.3)、xyz(No.4)方向実験のため、4体製作した。試験体に載せた質量を表1に、加振波形方向と試験体方向の対応を表2に示す。

既存住宅構面試験体は、試験場から約40km離れた場所に建っていた昭和54年築の木造建物を用いた。この建物の壁構面の一部を切り出し箱型試験体として加振した。

表1 多方向試験体重量

| | 自重 (kgf) | 錘重量 (kgf) | Wi (kgf) | Σ Wi (kgf) | 単位重量 (kgf/m ²) |
|----|-------------|--------------|-------------|---------------|-------------------------------|
| 屋根 | 782 | 1500 | 2282 | 2282 | 115 |
| 2階 | 1138 | 2000 | 3138 | 5420 | 160 |

表2 加振波形と多方向試験体設置方向の対応

| 試験体名 | JR 鷹取波入力方向 | | | |
|------|------------|----|----|----------|
| | X | Y | Z | |
| No.1 | ○R | | | R成分1次元 |
| No.2 | | ○T | | T成分1次元 |
| No.3 | ○R | ○T | | RT成分2次元 |
| No.4 | ○R | ○T | ○U | RTU成分3次元 |

d) 加振方法および加振精度

ここでは、実大振動台実験で採用した加振波の概要と加振を行った試験体の加振精度について述べる。

() 加振波形概要

1995年兵庫県南部地震においてJR鷹取駅で記録された波形1)(以下JR鷹取波)を本実験の加振波として採用した。図1はJR鷹取波の加速度記録を数値積分して変位を算出し水平成分の変位軌跡を示したものである。図に示した通り、実際に観測された

地震波の NS 成分，EW 成分を北から西へ（反時計回りに）40 度回転した軸（R 軸，T 軸）に射影し、これらを R 成分および T 成分とし振動台の目標波（加速度波形）とした。R 成分および T 成分の最大加速度はそれぞれ 741cm/sec²，624cm/sec²，振動台で再現される最大速度は R 成分で約 135cm/sec，T 成分で約 55cm/sec，最大変位は約 50cm，約 18cm である。なお，鉛直成分（U 成分）は記録された波形をそのまま目標波とした。

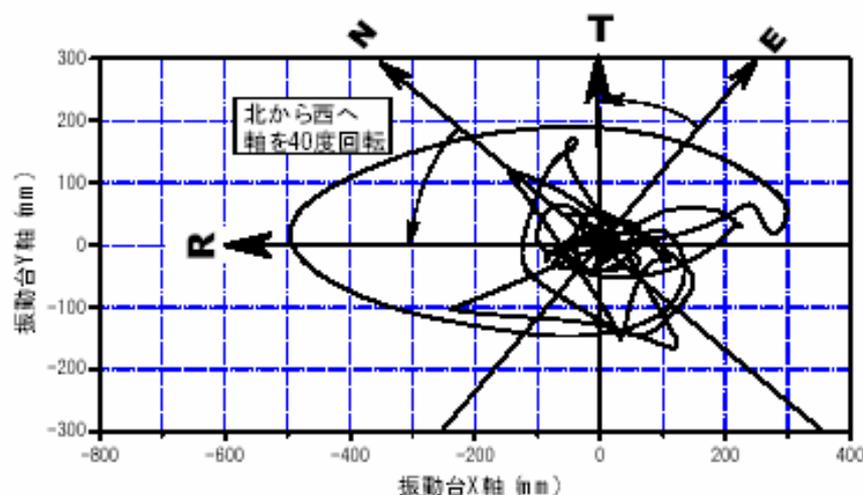


図 1 JR 鷹取波の水平方向変位軌跡

表 3 3次元6自由度振動台の基本性能

| | | | |
|--------------------------|--|------------|-----------|
| Size | 4m x 4m | | |
| Rated Test Weight | 30 tons | | |
| Driving Type | servo-controlled electro-hydraulic actuators | | |
| Shaking Direction | X-Horiz | Y-Horiz | Z-Vert |
| Max Acc(at max. loading) | ± 1G | ± 1G | ± 1.8G |
| Maximum Velocity | ± 150 cm/s | ± 100 cm/s | ± 99 cm/s |
| Maximum Displacement | ± 50cm | ± 20cm | ± 10cm |
| Exiting Frequency | DC~30Hz | DC~50Hz | DC~50Hz |
| Rotational Movement | ±2.8deg | ±2.8deg | ±4.0deg |

() 振動台の基本性能

実験で使用した振動台は電気油圧式の 3 次元 6 自由度振動台で、表 3 にその基本性能を示す。振動台の寸法は 4m x 4m であるが、試験体を載せるために振動台の上に約 6.6m x 6.0m の取り付け架台を設置した。最大ストロークは X 軸方向で 50cm，Y 軸方向で 20cm でありちょうど JR 鷹取波の R，T 成分を再現することができる。なお、30ton 搭載時の最大速度は X，Y，Z 軸それぞれの方向で 150cm/s，100cm/s，99cm/s まで、最大加速度は 1G，1G，1.8G まで加振する事ができる。

() 振動台加速度の再現性

実験に使用した振動台は与えられた加速度の目標波に対して振動台に設置されている加速度計による値（以下、振動台加速度）が一致するように制御されている。したがって、ここでは実験時の振動台加速度が目標波に対してどの程度の再現性を示しているかを検討することにする。図2は、R成分を入力したNo1, No3, No4, No5試験体の振動台加速度と目標波の時系列波形を比較した図である。どの加振もR成分波は振動台のX軸に割り当てて加振している。この波形は5.6秒付近で最大加速度が発生するが、振動台加速度はその直後の値が目標波とややずれを生じているものの、いずれの試験体においてもR成分の加速度は非常に高い精度で再現されていることがわかる。このことは、目標波に対する振動台で再現された最大加速度振幅の比も99.4%~101.6%の範囲であることからわかる。なお、No.1試験体は15.6秒付近で倒壊しその影響が振動台加速度の波形の乱れとして現れている。No.3試験体も、倒壊時間である11.7秒付近にわずかではあるが振動台加速度に倒壊の影響が見られる。

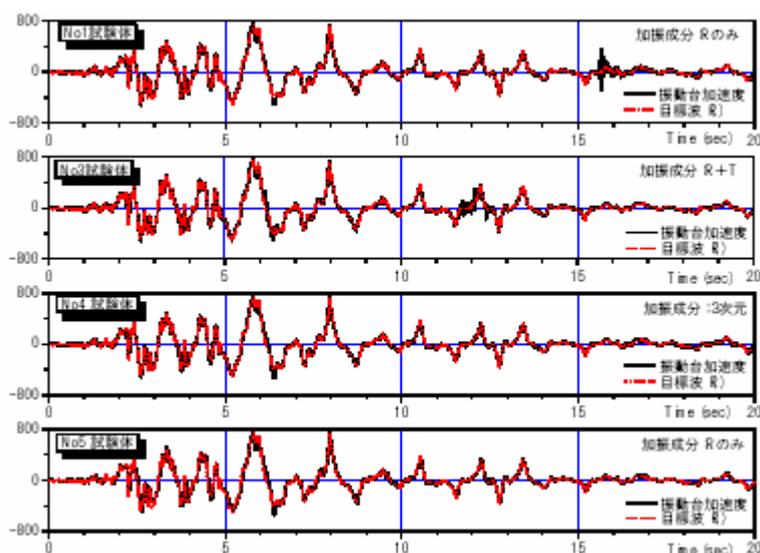


図2 R成分加速度の再現性

図3はT成分を入力したNo.2, No.3, No.4試験体の振動台加速度と目標波の時系列波形を重ね書きした図である。T成分はNo.2試験体では振動台のX軸に割り当てて加振し、No.3およびNo.4試験体では振動台のY軸に割り当てて加振した。R成分波と同様、振動台で計測された加速度波形は高い再現性を示しており、目標波に対する振動台最大加速度振幅の比は99.7%~100.4%の範囲であった。なお、加振軸の違いによる加速度波形の再現性の違いは見られなかった。

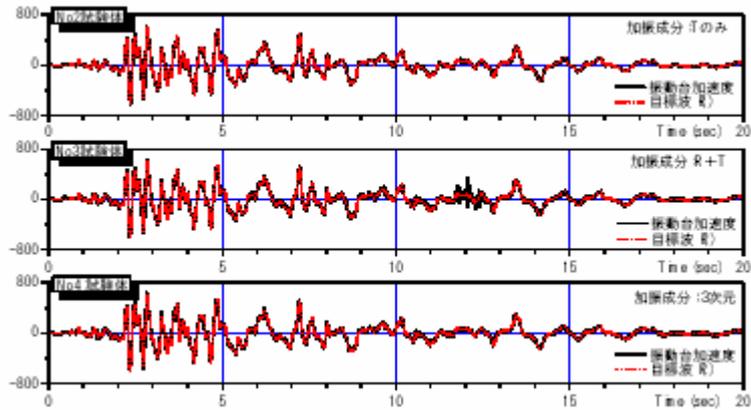


図3 T成分加速度の再現性

() 振動台変位の再現性

図4に振動台で再現された変位時刻歴波形を示す。上段がNo.1, No.3, No.4, No.5試験体の4つのR成分振動台変位を, 下段がNo.2, No.3, No.4試験体の3つのT成分振動台変位を重ね書きしてある。変位の時系列波形からは試験体ごとの加振によるばらつきはほとんど見られなかった。

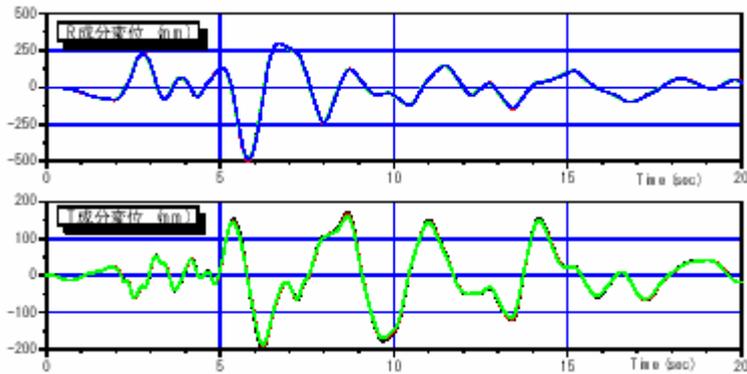


図4 変位波形の再現性

() 加振軸周りの回転動

実験に使用した振動台は6自由度(並進3成分とその軸周りの回転3成分)の動きを再現することができるようになっていたため、機構上、並進成分のみの加振波を与えても軸周りの回転動が生じてしまう。図5はR成分波を振動台のX軸に入力したときのY軸廻りの回転角を示している。No.1~No.4試験体はほぼ同じような回転角の推移を示しており、倒壊の影響と考えられる部分を除くと最大回転角は約 $0.50 \times 10^{-3} \text{rad.}$ ~ $0.65 \times 10^{-3} \text{rad.}$, No.5試験体は重量や剛性、耐力が他の試験体よりも大きく、そのためやや大きな回転角となっており、最大回転角は約 $1.38 \times 10^{-3} \text{rad.}$ であった。図6はNo.5試験体頂部および振動台のX方向加速度とY軸廻りの回転角を比較した図である。試験体頂部加速度と振動台回転角が非常によく対応しており、振動台の回転動は試験体の転倒モーメントの影響を受けやすいことがわかった。

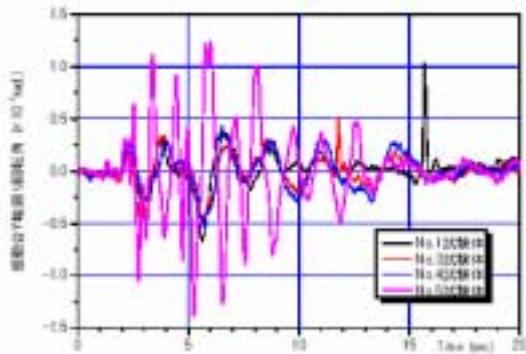


図5 Y軸廻りの振動台回転角

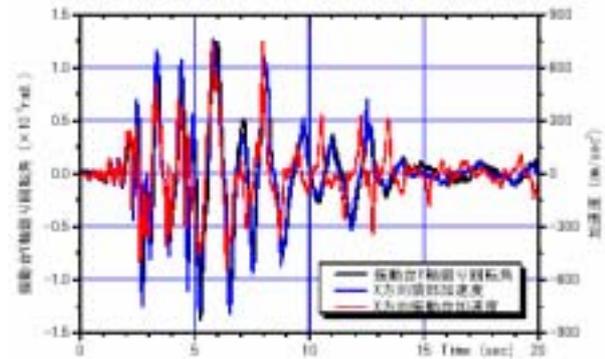


図6 No.5 試験体の振動台回転角と加速度

e) 従来方法による計測

木造建物の倒壊実験では、試験体倒壊時の変位挙動の計測が不可欠である。本振動台実験では、通常の変位計を用いた計測に加えて画像処理技術を利用した計測方法を採用した。本報では、実大振動台実験における計測概要と変位計測方法について報告する。

() 多方向試験体の計測

〔加速度〕

図7のように、ひずみゲージ式加速度計を用い、R階と2階では、ねじれ動の抽出を考慮して各辺中央位置の水平方向加速度を計測した。また、ロッキング動の抽出を考慮して四隅で上下方向加速度を計測した。1階は床中央位置で水平・上下3成分の加速度を計測した。

〔変位〕

図8, 9のように1階と2階の層間変位、1階通し柱の柱脚の抜け出し、土台のずれを計測した。層間変位は、長辺方向を2箇所とし、短辺方向は床構面の面内曲げ変形を抽出することを考慮して3箇所計測した。

〔ひずみ〕

図9に示す通り、1階柱および全ての筋交の軸方向ひずみを計測した。また、通し柱1階の柱頭・柱脚の曲げひずみを計測した。

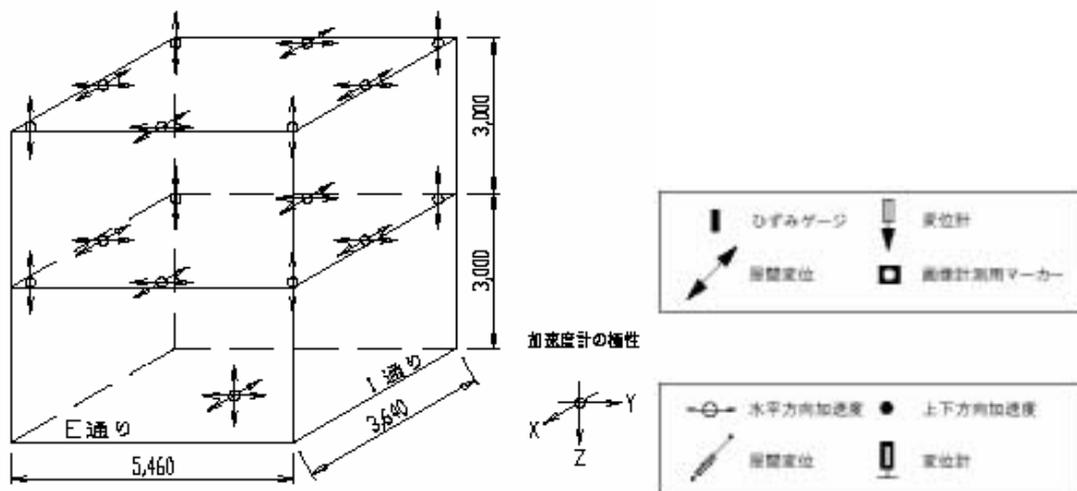


図7 計測位置模式図(多方向試験体:加速度)

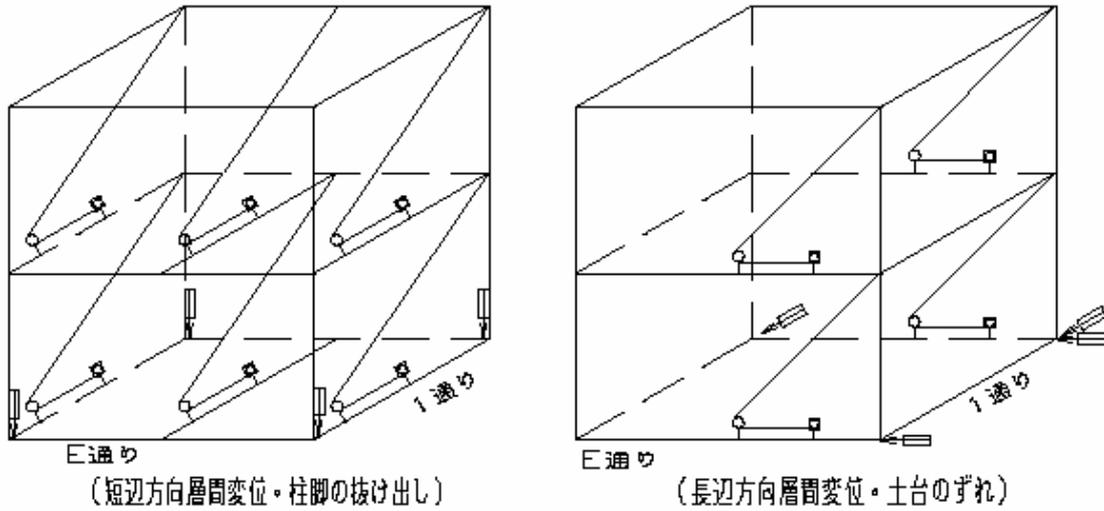


図 8 計測位置模式図 (多方向試験体：変位)

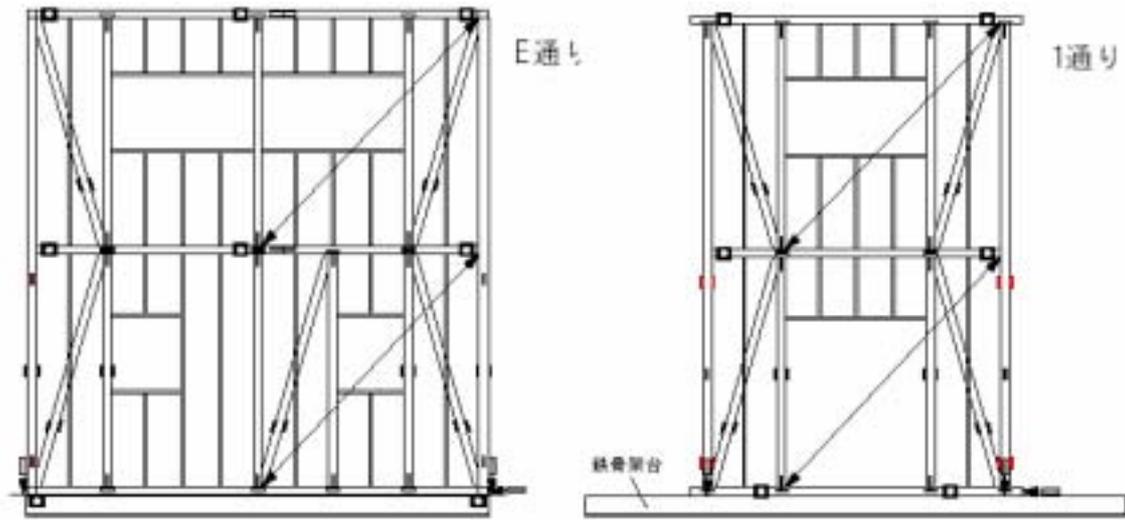


図 9 計測位置図 (多方向試験体：変位，ひずみ，画像計測)

() 移築壁試験体

〔加速度〕

図 10 のように R 階で各辺中央位置の水平方向加速度および四隅の上下方向加速度を計測した。また、R 階と 1 階で床中央位置の水平・上下 3 成分の加速度を計測した。

〔変位〕

図 11 のように壁の面内のせん断変形を計測するため、柱間の層間変位を計測した。また、各柱の柱頭・柱脚の梁・土台からの抜け出し、土台・付け土台のずれ、梁と付け梁のずれを計測した。

〔ひずみ〕

移築壁と直交方向に取付けた壁パネルのせん断ひずみとブレースの軸方向ひずみを計測した。

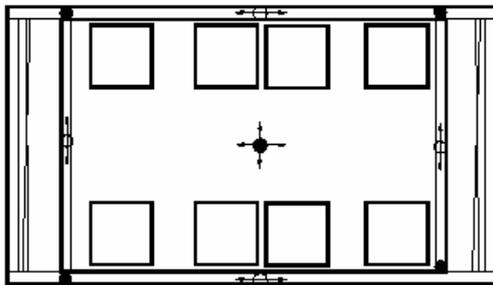
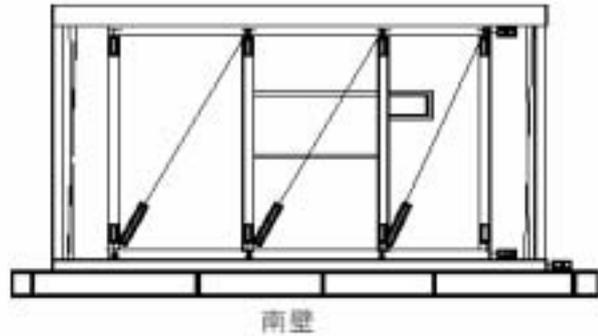
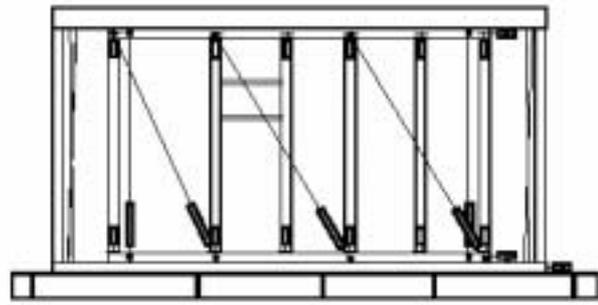


図 10 計測位置図
(移築壁試験体：加速度)



南壁



北壁

図 11 計測位置図
(移築壁試験体：変位)

() 変位計測方法

本実験では倒壊を目的としたことから、変形レベルに対応した変位計の選定が必要である。層間変位については加振レベルに応じた計測方法を採用した。

微小加振レベル)

変形レベルの小さい加振(層間変位で数 mm 程度)に対しては摺動型変位計を用いた。層間変位は図 2 に示すようにワイヤーを用いて計測するため、3 種類のワイヤーに対して静的試験によりその特性を調べた。図 6 は変位計を斜めに設置して直接ワイヤーを取付けた場合であるが、細より線(ステンレス鋼線, 0.27mm)の場合、伸びの影響が大きく、太より線(同, 0.50mm)でも僅かにその影響が見られる。また、変位計を床面と水平に設置して滑車を介した場合、変位計測特性は改善されなかった。従って、本実験では変位計を斜めに設置し、直接ピアノ線により取付けた。なお、変位計の設置角度は 45° とした。

大振幅加振レベル)

変形レベルの大きい加振に対しては、計測範囲が数十 cm のオーダーとなることから巻取型変位計を用い、細より線を用いて滑車を介して取付けた。また、通常の接触型/非接触型の変位計では、試験体倒壊時の挙動を追跡することができないため、本実験では、倒壊に至るまでの大变位挙動を計測するため、画像処理技術を応用した計測方法(以下、画像計測)を併用した。画像計測では、変位を追跡する任意の位置に

超高輝度 LED を用いたマーカーを設置し、複数台の CCD カメラによりその動きを撮影する。得られた画像データを解析して対象物の三次元の動きを計測する方法である。マーカー設置位置は、多方向試験体では図 9 に示す位置（試験体 4 側面）とし、層間変位計測位置と一致させた。また、各試験体に共通して振動台に固定した鉄骨架台に設置した。移築壁試験体では、柱頭・柱脚位置および開口部に対応する外側モルタル面と、モルタル壁の剥落を考慮して付け梁の側面に設置した（写真 1）。画像計測方法の詳細は同題その 8 で報告する。図 1 3 に巻取型変位計と画像計測の結果を比較して示す。図は試験体 No.2（T 成分 100%，1 方向加振）における試験体長辺方向（加振方向）1 階の層間変位波形である。また、振幅の大きい区間を取出して両者の関係をプロットした。巻取型変位計と画像計測による変位計測結果は良く対応していることがわかる。



写真 1 移築壁試験体
(北壁：画像計測用マーカー位置)

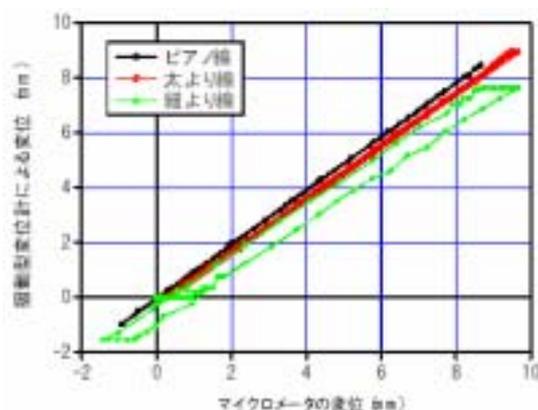


図 1 2 摺動型変位計による変位計測特性

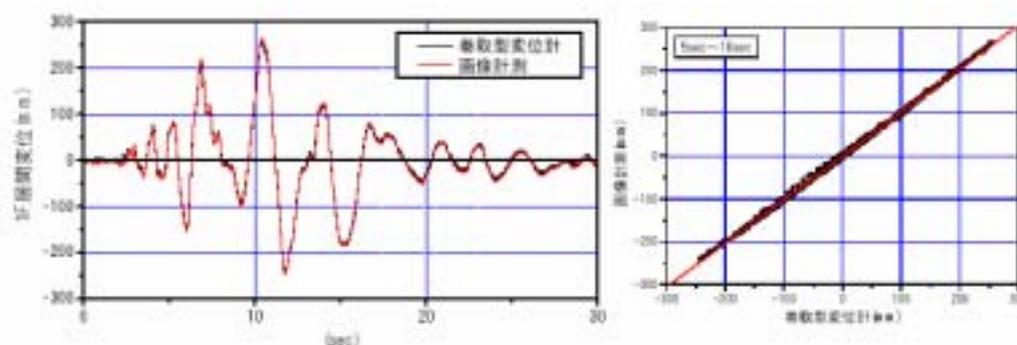


図 1 3 巻取型変位計と画像計測による層間変位の比較（試験体 No.2）

f) ビデオカメラによる変位計測

近年、実規模建造物の振動破壊実験が期待されている。このような実験では、これまでの接触型変位計では、その動的変形量を計測することが困難な場合が多く、非接触で大変位を計測可能な手法が必要となる。ここでは、モーションキャプチャー技術を応用した画像計測手法を用いた木造戸建て住宅の倒壊実験の計測結果について報告する。

() 画像計測手法の概要

画像計測システムの研究開発指針は、

大規模構造物での振動変位計測

三次元計測

非接触計測

c mオーダーの計測精度

特殊な実験環境が不要

200Hz 程度のサンプリングで 60 秒以上の計測

である。本手法は、計測対象の実験モデルに複数のマーカ（特徴点）を設置し、2 台以上のカメラで計測する。得られたカメラ画像データより、特徴点を画像処理により認識し、変位計測を行うものである。本手法は、計測対象にマーカを設置するだけという非常に簡便なものであるにも関わらず計測対象の複雑な振動挙動を三次元的かつ高精度に計測可能なシステムである。

() 画像計測原理

本手法は、特徴点のカメラ画像上で得られる 2 次元位置情報を座標変換行列（カメラパラメータ）により 3 次元振動変位に算出する。カメラパラメータはカメラの位置、姿勢、画角などのカメラに関するすべての情報が含まれたパラメータで、物体座標系とカメラ画像系を関連付けるものである。また、カメラ画面上での特徴点は、特徴点が画面上で有する輝度値を重さと仮定し、重心法より画面上での 2 次元位置を求める。この画面上より得られた特徴点の 2 次元座標位置座標を前述のカメラパラメータを用いて物体座標へと変換することで計測対象物の三次元動的変形量を求めることができる。

() 画像計測システム

計測用 CCD カメラ)

図 1 4 は、実験に用いた計測用 CCD カメラである。本カメラは、毎秒 100, 200 フレーム、ハーフサイズで毎秒 400 フレームの高速度撮影が可能である。分解能は、504（水平）×241（鉛直）である。また、小形軽量サイズのため、どのような場所にも容易に設置可能である。

計測用マーカ)

実験で使用したマーカを図 1 5 に示す。本マーカは、図のように本体上部に赤色 LED を 17 個配置し、内蔵した 6 [V] リチウム電池を電源として 90 分程度の連続発光が可能である。構造的にコードレスとなるため、任意の位置に配線を考慮することなく設置することが可能であり、大型の試験対象が大変形するような場合には極めて有効である。また、周囲の LED を傾けた配置にすることで、実験中に計測対象がある程度傾きを持った場合でも画像上でのマーカ認識が可能になるよう設計されている。

() 振動計測実験

計測方法)

図 1 6 に計測対象へのマーカの設置状況を示す。図が示すように試験体長辺側に 8 点，短辺側に 6 点，合計 2 8 点設置した。図 1 7 は，実験時の計測対象と計測用カメラの位置関係を示したものである。図が示すように，振動台実験施設 1 階に 7 台，2 階に 2 台を配置し，基本的に 1 面に対してカメラ 2 台で計測する配置とした。カメラは，1 階に約 1.4 [m]，2 階に 6[m]の高さで設置され，物体座標原点からの直線距離は，6 [m]～ 1 7 [m]程度である。なお，計測時には，照明および自然光の影響を低減させることを目的として，カメラレンズに赤外線フィルターを設置した。また，画像計測結果の精度検証として，振動台テーブル情報から得られる振動台テーブル変位，試験体の各層間に設置した巻取型変位計から得られる各層間変形量を用いた。

計測結果)

図 1 8 は，振動計測結果の一例として J R 鷹取波水平 2 軸加振の際の振動台テーブルを計測した結果である。結果は，左列が振動台テーブル情報より得た変位計測結果，中列が画像計測結果，右列がその差分を示した計測誤差である。また，上段が X 方向，下段が Y 方向である。さらに，表 4 に当該加振時の主な計測誤差をまとめる。時刻歴波形が示すように，画像計測により得られた結果は，振動台テーブル情報から得られた変位波形と良好な一致が示されている。結果として，今回の計測では，計測対象より直線距離で 6 [m]～ 1 7 [m]程度離れた場所から，X，Y，Z 方向に対して，約 14 × 14 × 6.5[m]の計測空間を計測した。カメラ分解能との関係から X 方向 28.3[mm/pixel]，Y 方向 35.1[mm/pixel]，Z 方向 27.3[mm/pixel]程度となるが，表 4 が示すように，サブピクセルオーダの計測が可能となっていることが分かる。特に，当該加振実験時では，画像計測として不利な計測カメラからマーカが奥行き方向に変位する際にも良好な計測が可能であることが明らかとなっている。図 1 9 は，同実験時の木造戸建て住宅の動的挙動を計測した結果である。左列より，X，Y，Z 方向，上段に 2 層部層間変位，下段に 1 層部層間変位を示す。さらに，下段には，巻取型変位計から得られた結果も併記した。当該実験では，最終的に試験対象の戸建て住宅は倒壊に至ったが，本計測手法により，従来の接触型変位計では計測が困難である倒壊過程時に生じる大変形量を十分実用に供し得る精度で計測できることを明らかにした。



図 1 4 実験に用いた高速度 C C D カメラ

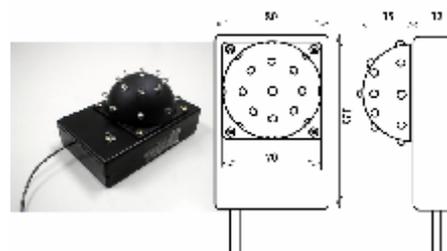
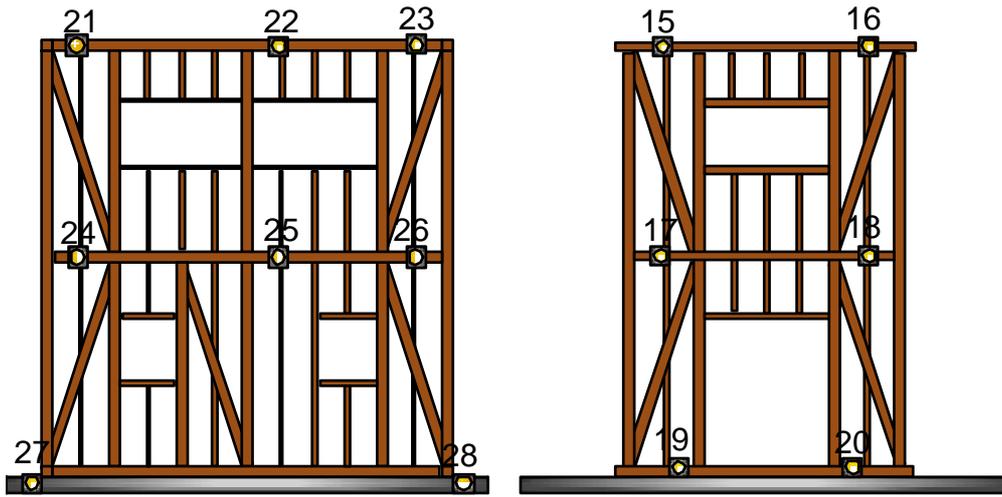
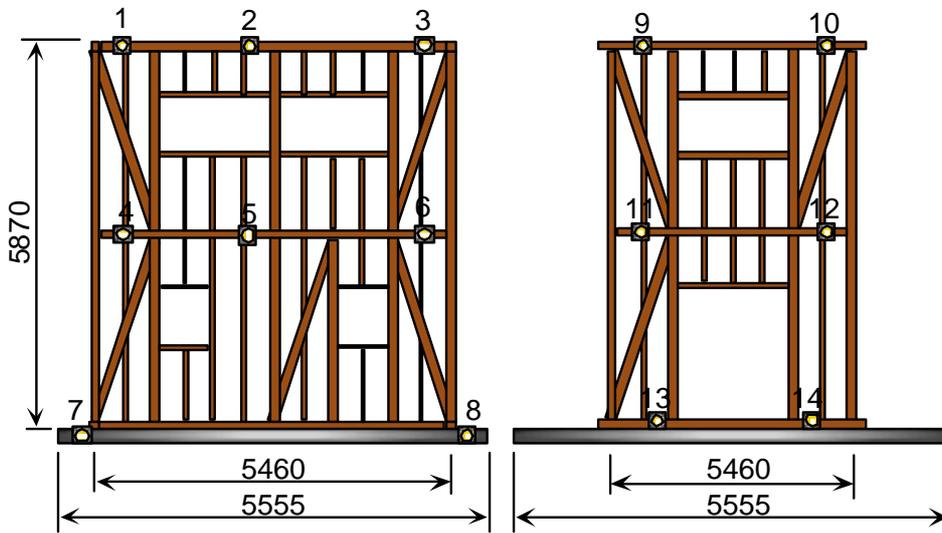


図 1 5 実験に用いたマーカ



(a) 裏面

(b) 右側面



(c) 正面

(d) 左側面

図 1 6 マーカの設置状況

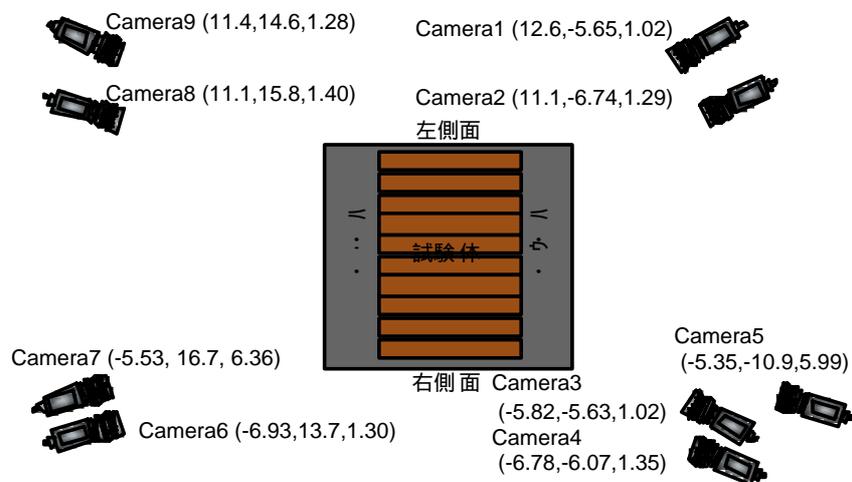
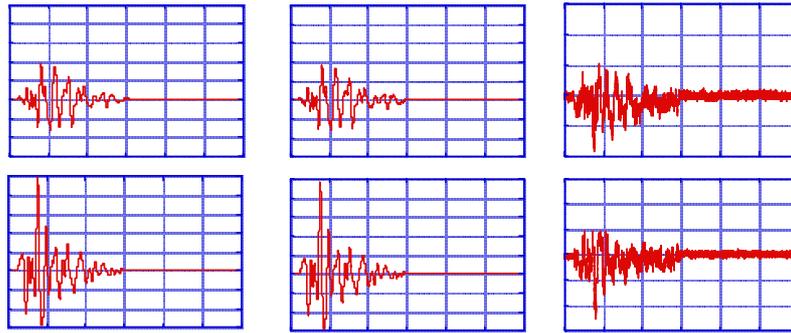


図 1 7 計測用カメラの配置状況

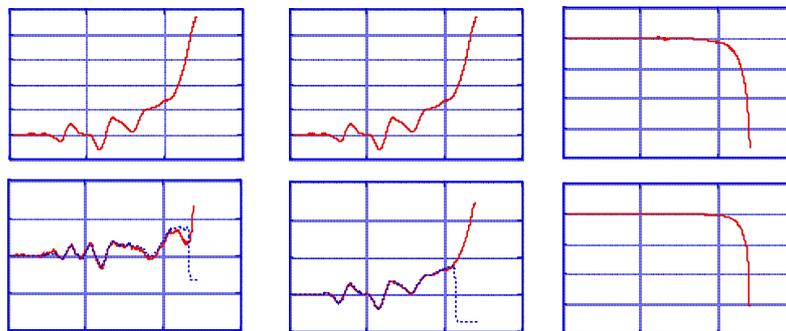


a)振動台情報 (b)画像計測 (c)差分

図 1 8 振動計測結果例 (振動台テーブル)

表 4 振動台計測結果例 [mm]

| | 最大計測誤差 | RMS 誤差 | 最大値計測誤差 |
|------|--------|--------|---------|
| X 方向 | 18.4 | 3.16 | 6.31 |
| Y 方向 | 25.4 | 3.41 | 13.5 |



(a)X 方向 (b)Y 方向 (c)Z 方向

図 1 9 振動計測結果例 (上部構造物)

2) 既存構面試験体の振動台実験

経年変化した既存木造住宅を対象に、現場での常時微動測定、劣化調査、そして、構面試験体の抽出、及び構面の静的加力実験、構面を組み合わせた箱型試験体に対する振動台実験をおこなった。

a) 抽出方法

() 供試住宅の概要

供試住宅は1979年築の総2階建の在来軸組工法住宅で、一部経年途中で改修部分を含んでいる。写真2に供試住宅の外観写真を、図20に平面図を示す。供試住宅の主要構造材料は土台がヒノキ、柱と筋かいがスギ、はりがマツである。筋かいは全て2つ割材で、端部は釘留めである。筋かいの位置、向きを図20中の三角形印で示す。内装は石膏ボード(12.5mm)下地にクロス張り、又はラワン合板(9mm)下地にクロス張りである。外装は全面ラスモルタルである。



写真2 供試住宅の外観写真

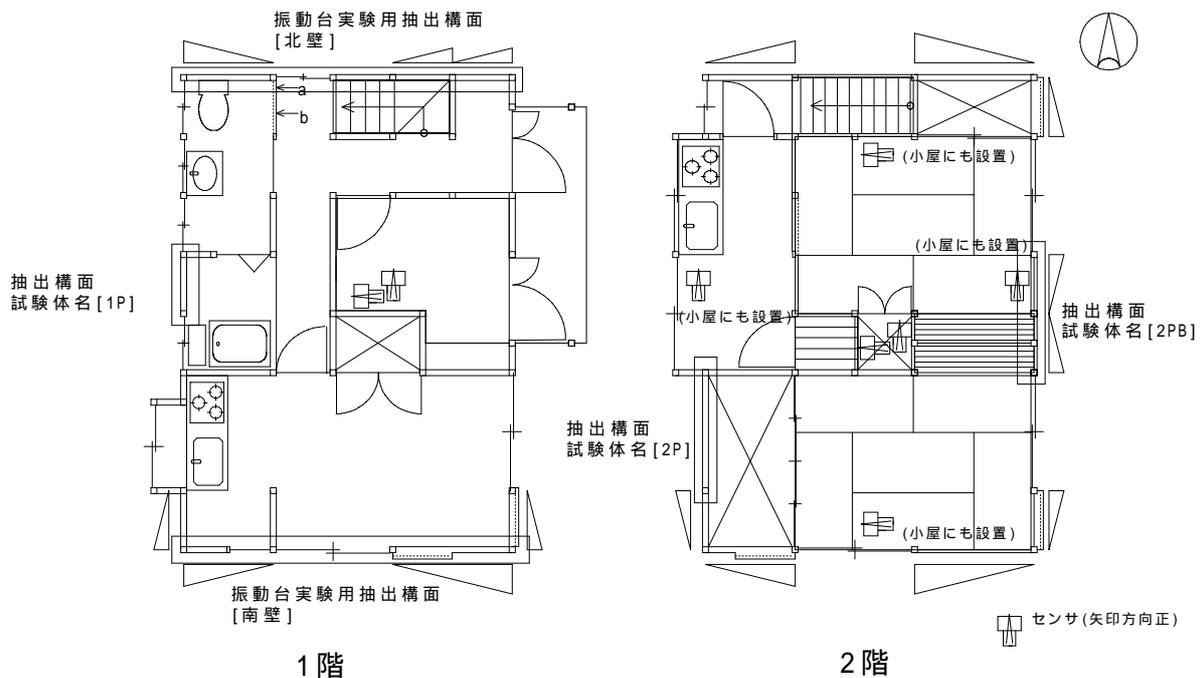


図20 供試住宅の平面図

() 既存時の振動実験

供試住宅の振動特性を把握するため、構面試験体抽出前に常時微動計測と人力による自由振動実験をおこなった。センサの配置は図 3.1 中に示すとおりである。測定の結果として、図 2 1 に NS 方向のスペクトル比(2 階、小屋のスペクトル/1 階スペクトル)を、表 5 に供試住宅の固有振動数、減衰定数を示す。表中の減衰定数は、2 階平面図中央に配置したセンサの値から、人力加振後の自由振動の振幅比より算出した値である。1 次固有振動数は長手方向の NS 方向で若干高く 7.7Hz、EW 方向で 7.4Hz であったが、あまり違いは見られなかった。減衰定数はそれぞれ、5.0%と 6.9%であった。

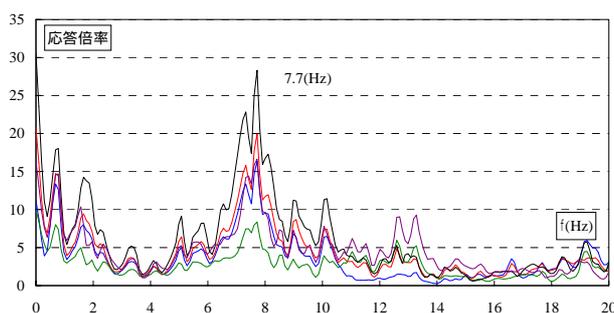


図 2 1 応答加速度スペクトル比(NS 方向)

表 5 供試住宅の振動特性

| | 固有振動数(Hz) | 減衰定数 |
|------|-----------|-------|
| NS方向 | 7.7 | 0.050 |
| EW方向 | 7.4 | 0.069 |

() 劣化調査内容及び、調査結果

供試住宅の経年劣化を調査するため、含水率計を用いて、1 階の土台、大引、火打ちの含水率を測定した。また、腐朽の有無を目視により調査した。トイレ周りの土台の含水率が 20%以上と高い値を示した。また、図 2 0 中の A で腐朽が認められたが、すでに乾燥していた。A ならびに、同一の部材で健全部 B に対して、ピン打ち込み深さ(ピロディン)を測定した。その結果、A では 17mm、B では 8mm であり、腐朽を裏付ける結果であった。

() 抽出部位の決定及び、抽出方法

供試住宅から、静的試験用壁と、振動台実験用試験体を取り出すわけであるが、運搬の制約がある上に、慣れない作業で、切り出しに試行錯誤が伴うことが予想された。そこで、今回は、隅角部をいれず、構面での抽出することとした。まず、1 階南側と北側の壁面を用いて、振動台上に箱形試験体を製作することを決めた。ついで、静的試験用は、振動台実験用の壁を抽出する際に、近傍の壁が損傷を受けることがあらかじめわかっていたので、その部分を避け、3 枚の壁とした。なお、この 3 枚で筋かい付壁、筋かいのない壁といったバリエーションを確保するよう意図した。(図 2 0 参照)以下に、抽出方法の工程を列挙する。(写真 3 参照)

切断位置の墨だしをする。

隣接する構面の内外装を撤去し、構造躯体を露出させる。モルタル壁はグラインダーで切断する。

抽出構面に隣接する構造躯体のうち、上下方向に繋がっている柱と、水平方向に繋がっているはりを残し、それ以外の木摺、火打ち、間柱等をチェーンソーで切断する。

ワイヤーを土台からかけ、抽出試験体をクレーンで支えた状態で、構造と繋がっている柱、はりを切断し、試験体を切り出し、クレーンでつり出す。

作業中、モルタル壁が躯体から離れないよう構面を正角材で両側からはさみ養生をする。

トラックで養生する倉庫に運搬する。

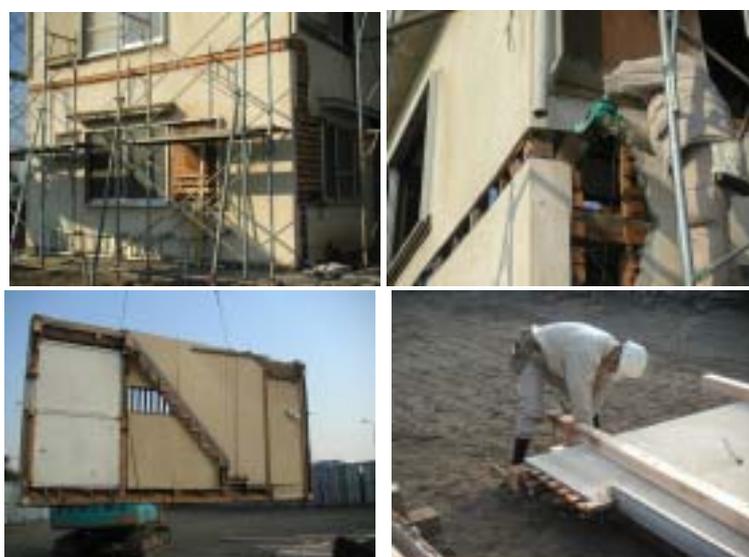


写真3 抽出風景(左から)

b) 静的加力実験

() 実験方法

実験方法は1Pあたり6.68[kN]を鉛直荷重として加える載荷式を基本としたが、破壊が柱の抜き出しであったため、せん断性能を把握する目的で、筋かい付壁2PB-DHではHD取り付け、再加力した。加力サイクルを図2.2に示す。写真4にHD付試験体の最大変形時を示す。1P、2P及び2PB(2PB-HD)の試験体概要を図2.4、図2.5及び図2.6に示す。

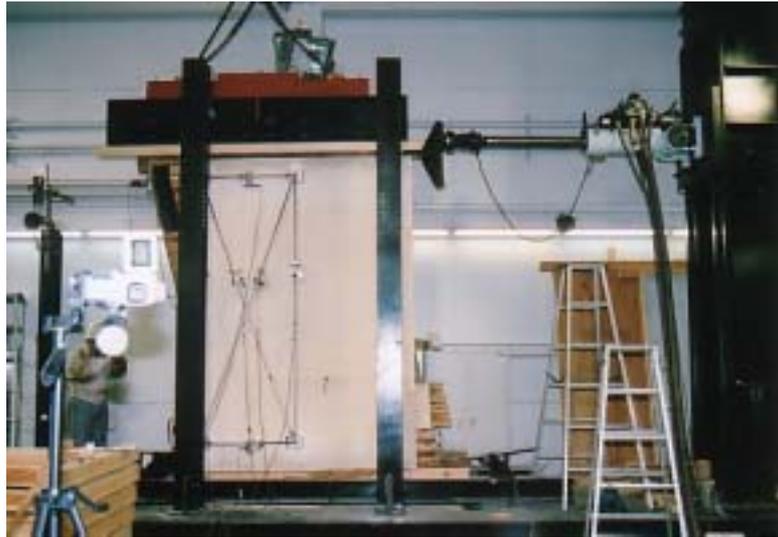


写真 4 載荷後全体(2PB-HD : 押 1/50[rad])

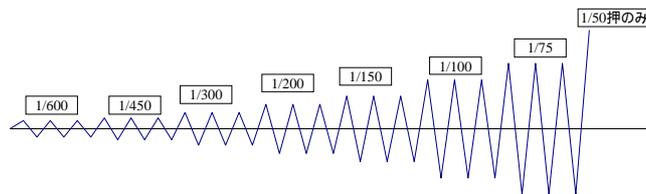


図 2 2 加力サイクル(単位[rad])

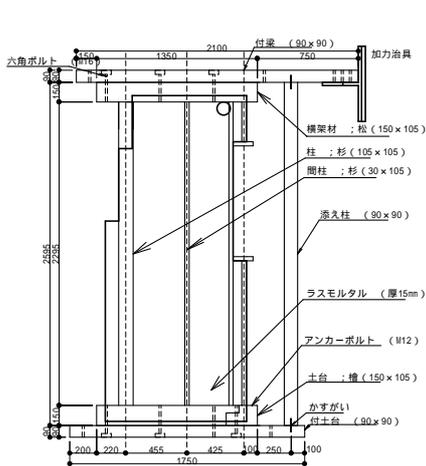


図 2 3 試験体概要 1P

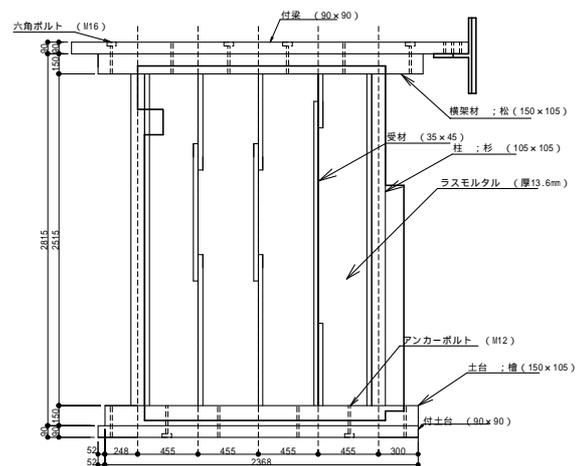


図 2 4 試験体概要 2P

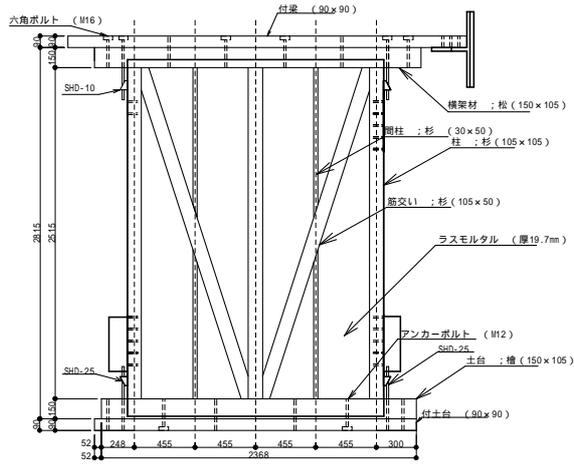


図 2 5 試験体概要 2PB (2PB-HD)

表 6 抽出構面試験体の壁実験結果一覧

| 試験体名 | 壁長 | Pmax(KN) | μ | Ds | 壁倍率 | |
|--------|----|----------|-------|------|------|------|
| 1P | 押 | 1P | 3.23 | 7.56 | 0.27 | 1.14 |
| 2P | 押 | 2P | 7.31 | 9.29 | 0.24 | 1.26 |
| 2PB | 押 | 2P | 7.61 | 6.83 | 0.28 | 1.33 |
| 2PB-HD | 押 | 2P | 23.01 | 6.67 | 0.28 | 4.17 |

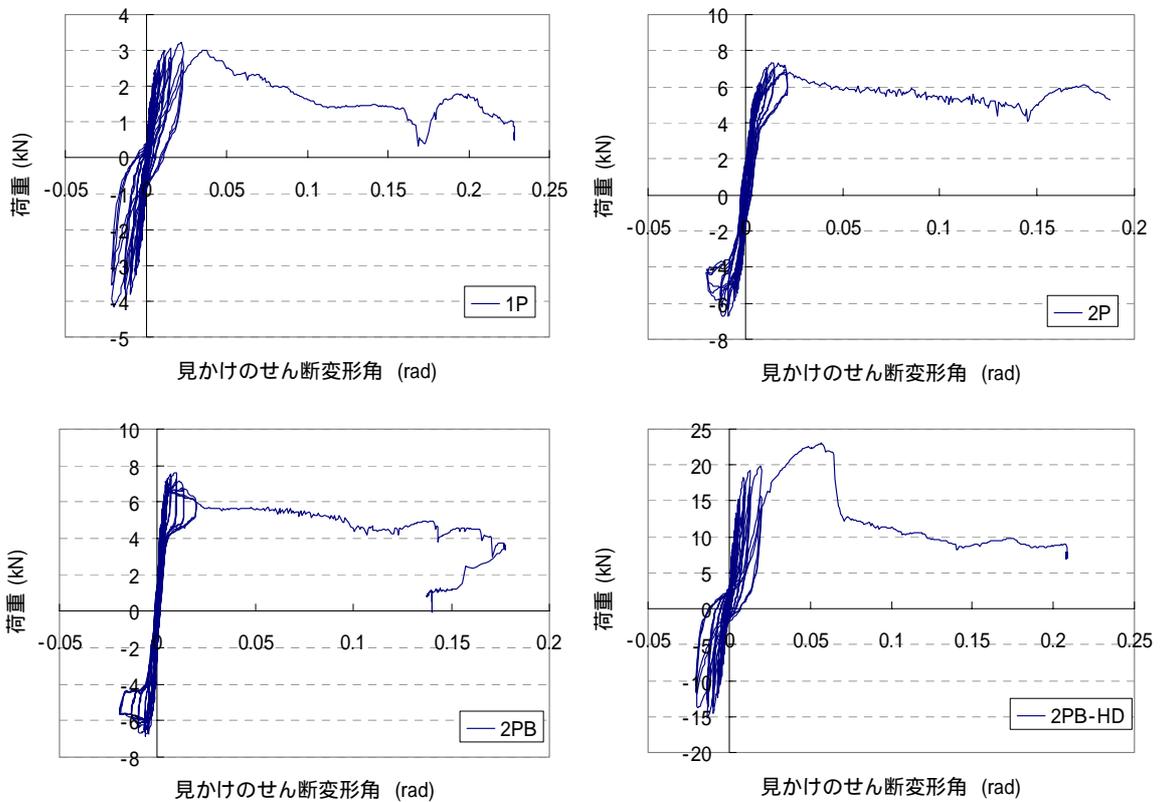


図 2 6 荷重 - 変形角曲線

() 実験結果

図 2 6 に荷重-変形角曲線を示す。表 6 に全抽出試験体の主な試験結果³⁾を示す。筋かいの有無によらず、同程度の構造性能を示すが、HD によって性能が極めて上がっている。

c) 振動台実験

既存木造住宅の動的挙動及び破壊形態を調査するため、既存住宅から抽出した壁構面の振動台実験を行った。予備解析により積載重量及び入力波を検討した。

() 試験体および試験方法

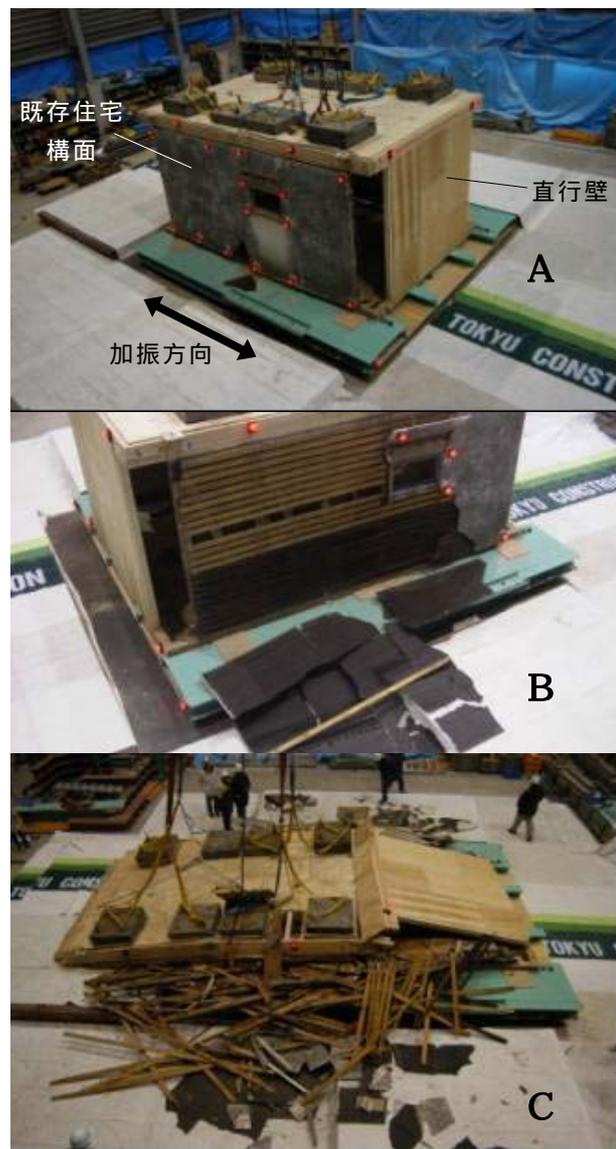
既存木造住宅の南面及び北面の 1 階から抽出した壁構面（以下、既存住宅構面）を、付土台を介し振動台に設置し、付梁を介し床構面で繋ぎ、更に直交壁を配し箱型試験体を作成した。床構面及び直交壁は新規材料により作成した。床構面は針葉樹合板(24mm 厚)張りとし、直交壁には針葉樹合板(9mm 厚)両面張りに更に鋼製プレースを設けた。外壁はラスモルタル仕上げ、内壁は石膏ボード(一部プラスターボード)張りであった。(写真 5 A, 図 2 7)

箱型試験体について、常時微動測定、人力加振試験及び振動台実験を行った。加振は既存住宅構面に平行方向の一軸とした。

() 予備解析

〔入力波及び錘の決定〕

振動台実験に用いる入力波及び錘を決定する為、1 質点 1 自由度系バネ-ダッシュポットモデルを用いた線形加速度法による時刻歴応答解析を行った。バネの包絡曲線は、静的水平加力試験の結果より推定した。荷重-変位曲線は、柱脚の引き抜きにより終局を迎える場合と壁のせん断により終局を迎える場合の 2 タイプの破壊形態について検討するため



A: 加振前
B: 1 回目の加振後（モルタルの剥離）
C: 2 回目の加振後（倒壊）

写真 5 試験体の損傷過程

に、筋交い有り試験体 2PB 及び H D 金物による柱脚固定式試験体 2PB-HD から 2 種類設定し、それらの荷重を 4 倍した荷重-変位曲線を折れ線で表現した。筋かいの量等から移築構面の水平耐力が静的加力試験体の 4 倍程度であろうと推測した為である。履歴特性については図 2 8 に示す野口らが提案したモデル⁴⁾を用い、ループの形状が概ね一致し且つモデルの履歴減衰が静的水平加力試験による履歴減衰に一致するように各係数を設定した。図 2 9 及び図 3 0 に 2PB 及び 2PB-HD を基に設定し解析に用いた包絡曲線を実験値の比較、履歴減衰の実験値と解析モデルの比較を示す。

質点の重さ(自重+積載)は 5~20ton、粘性減衰は 2% 及び 5%、入力波は JMA 神戸海洋波 NS 成分及び JR 鷹取波 R 成分について検討した(表 7)。

予備解析の結果を図 3 1 及び図 3 2 に示す。2PB では重さが 4~6ton で急激に応答が増加するが、2PB-HD では 12~13ton で急激な増加がみられた。振動台実験に用いる箱型試験体では、H D 金物による柱脚の緊結はないものの直交壁は鋼製ブレースに合板両面張りとなり非常に強固であり、柱脚の引き抜き拘束効果は大きいと推測することができることから、2PB-HD による解析結果を参考にすることとした。

また、神戸海洋波に比べ JR 鷹取波による応答の方が大きく、錘を重くしても神戸海洋波では倒壊させられない可能性があることから、振動台実験における入力波を JR 鷹取波 R 成分、積載荷重を 10ton と設定した。ちなみに、壁構面の 1/2 及び床構面の重量の合計は 2.89ton であった。

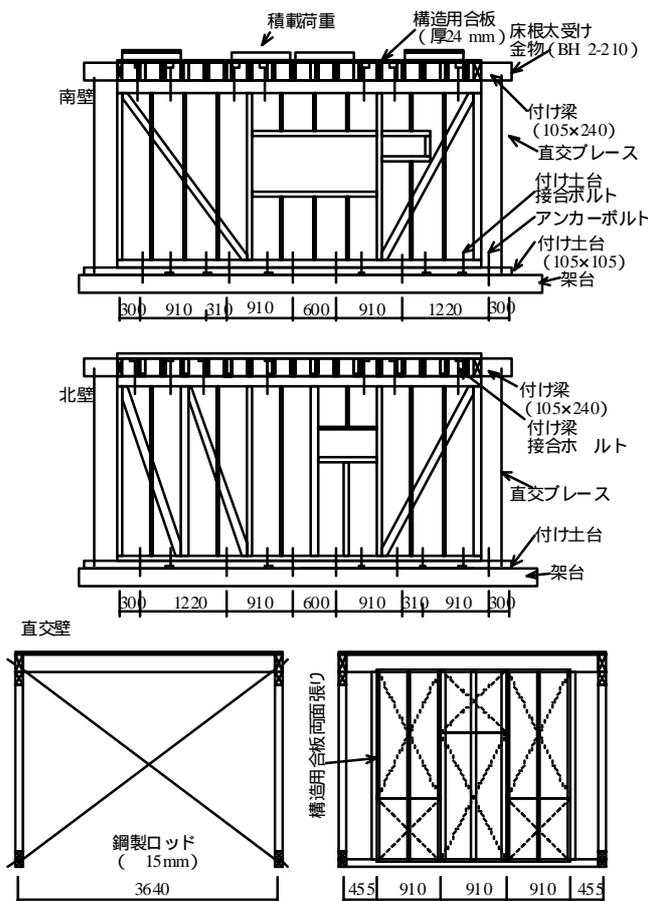


図 2 7 試験体の立面図

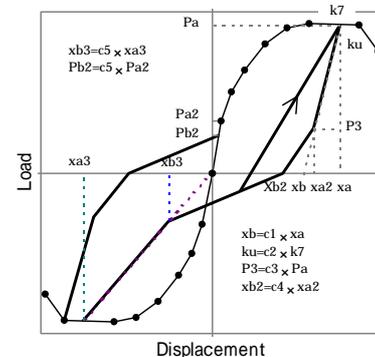


図 2 8 履歴特性のモデル化

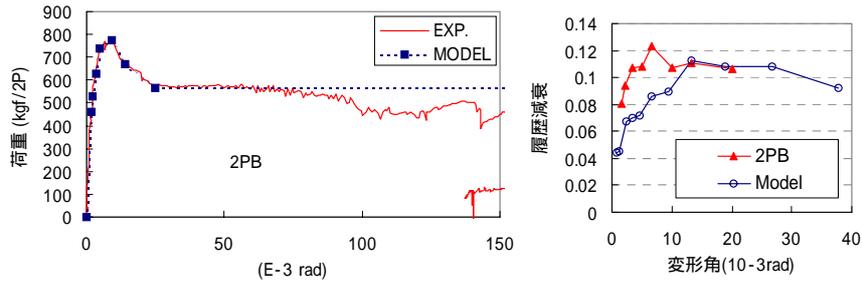


図 2 9 包絡曲線と履歴減衰の実験値と入力値の比較 (2PB)

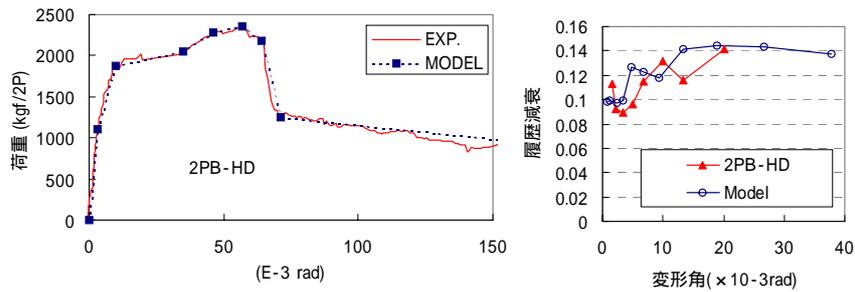


図 3 0 包絡曲線と履歴減衰の実験値と入力値の比較 (2PB-HD)

表 7 解析水準一覧

| 記号 | 入力波 | 粘性減衰 | 荷重 - 変位曲線 |
|----------------|-----------------|------|---------------------------------|
| Taka40ns-0.02h | JMA 神戸海洋波 NS 成分 | 0.02 | 2PB の荷重を 4 倍 2PB-HD の荷重を 4 倍 |
| Taka40ns-0.05h | JMA 神戸海洋波 NS 成分 | 0.05 | |
| Kobens-0.02h | JR 鷹取波 R 成分 | 0.02 | |
| Kobens-0.05h | JR 鷹取波 R 成分 | 0.05 | |

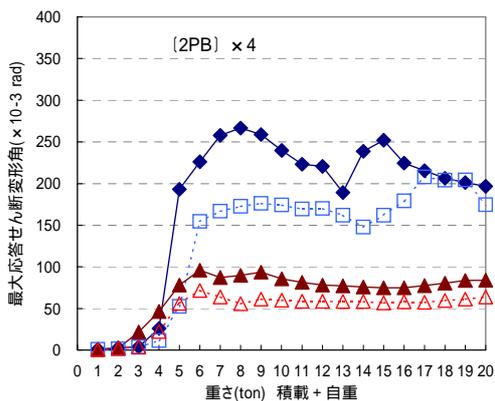


図 3 1 線形加速度法による応答予測 (2PB)

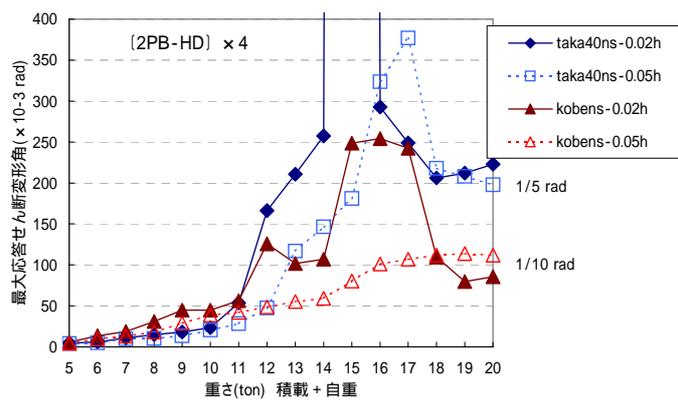


図 3 2 線形加速度法による応答予測 (2PB-HD)

前述の線形加速度法他に、等価線形化法による応答予測を行った。静的水平加力試験結果 2P-HD の荷重を 4 倍とした荷重 - 変位曲線を用い、 S_a - S_d を $h=10\%$ 、 $h=15\%$ として、縦軸の S_a を $\times 12,000$ (試験体重量)/ 980 (重力加速度)とした場合の結果を図

3 3 に示す。Sa-Sd 曲線と荷重 - 変位曲線の交点はないが、積載荷重と自重の合計が 12ton で 60cm 程度の応答になると推測することができる。

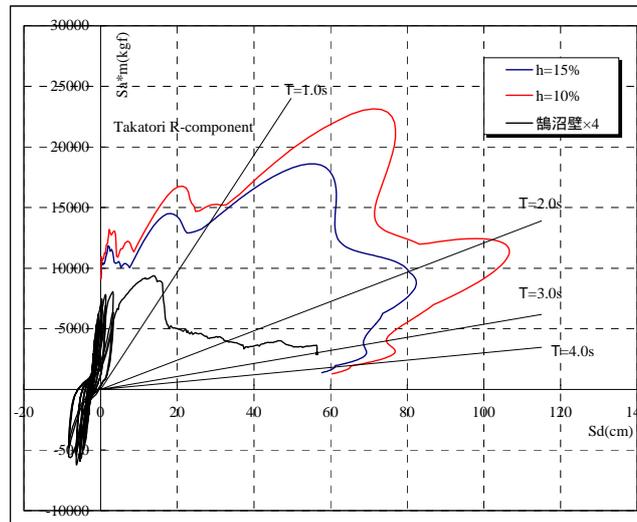


図 3 3 鵺沼壁 2PB-HD と鷹取 R 成分 Sa-Sd との関係

() 錘の設定と許容応力度設計との関係

移築構面に存在する二ッ割筋かい(壁倍率 2 倍, 7P)のみの許容耐力は $2548 = (200 \times 2) \times (7 \times 0.91)$ kgf である。Co=0.2 により短期の水平力に対し設計する場合、設計可能な積載と自重の合計 W は $12.74 (= 2.548 / 0.2)$ ton 以下であるので、本試験での錘の設定は筋かいのみを考慮し Co=0.2 で設計した場合に概ね相当する。

() 結果および考察

【常時微動及び人力加振結果】

固有振動数は既存住宅構面に平行方向 5.4Hz、直行方向 6.3Hz であった。減衰定数は平行方向 4.3%、直行方向 4.2% であった。

【振動台実験結果】

加振 1 回目

移築構面の殆どのラスモルタル及び石膏ボードは躯体から剥離した(写真 5 B)。木摺は躯体に残った。残留変形は層間変位 10cm 程度で、筋かい端部が離れ或いは踏み外したために筋かいの座屈はみられなかった。

図 3 4 に加振時の振動台の挙動測定結果を示す。2 回目の加振においても振動台の挙動は概ね一致した。

図 3 5 に 2 階床の絶対加速度及び絶対変位を、図 3 6 に 2 階床と振動台の相対加速度及び相対変位を示す。最大層間変位は 23.9cm、2 階床の最大絶対加速度は 873gal であった。1 回目の加振時の状況を写真 7 に示す。



写真6 1回目加振後の筋かい端部の状況（左：踏み外し，右：離れ）

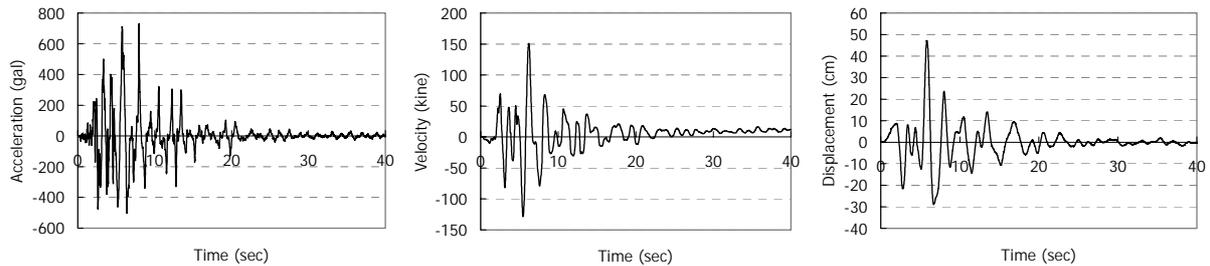


図34 1回目加振時の振動台の加速度、速度及び変位

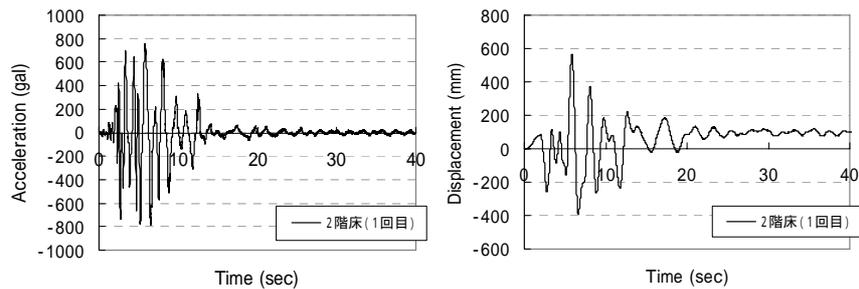


図35 1回目加振時の2階床の加速度及び変位

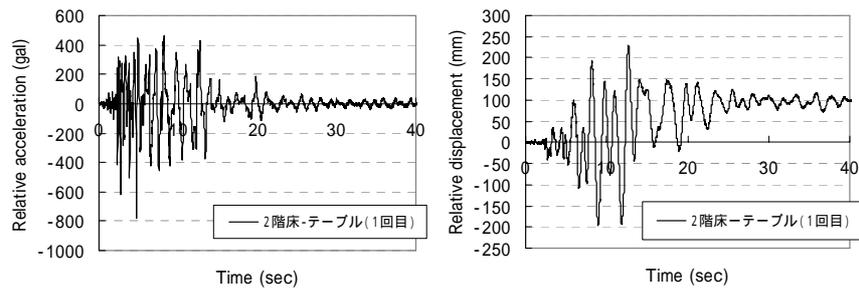


図36 1回目加振時の2階床と振動台の相対加速度及び相対変位

加振2回目

1回目の加振において一部剥離しなかったモルタルを除去し、残留変形をそのままに再度JR鷹取波R成分による加振を行った。加振後約9秒で完全に倒壊した(写真5C)。図37に2階床の絶対加速度及び絶対変位を、図38に2階床と振動台の相対加速度及び相対変位を示す。2回目の加振時における倒壊状況を写真8に示す。

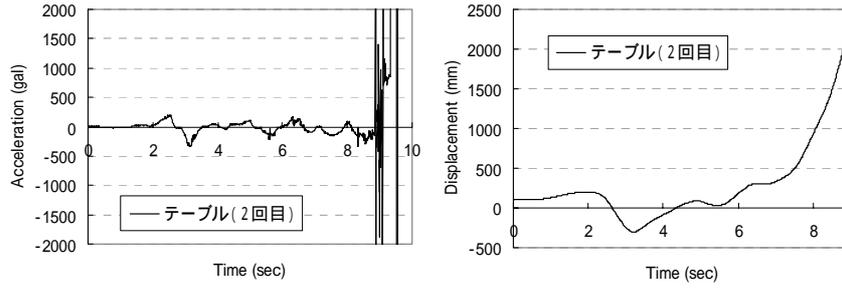


図 3 7 2 回目加振時の 2 階床の加速度及び変位

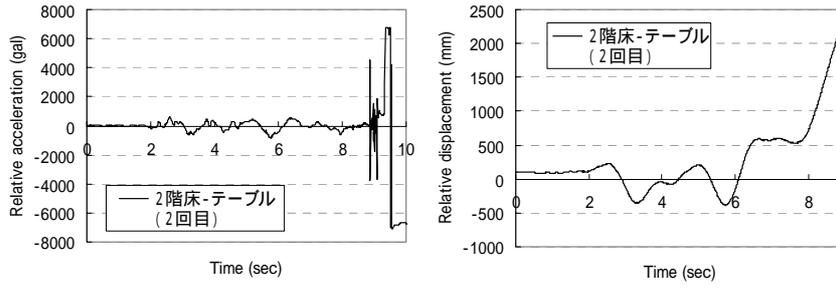
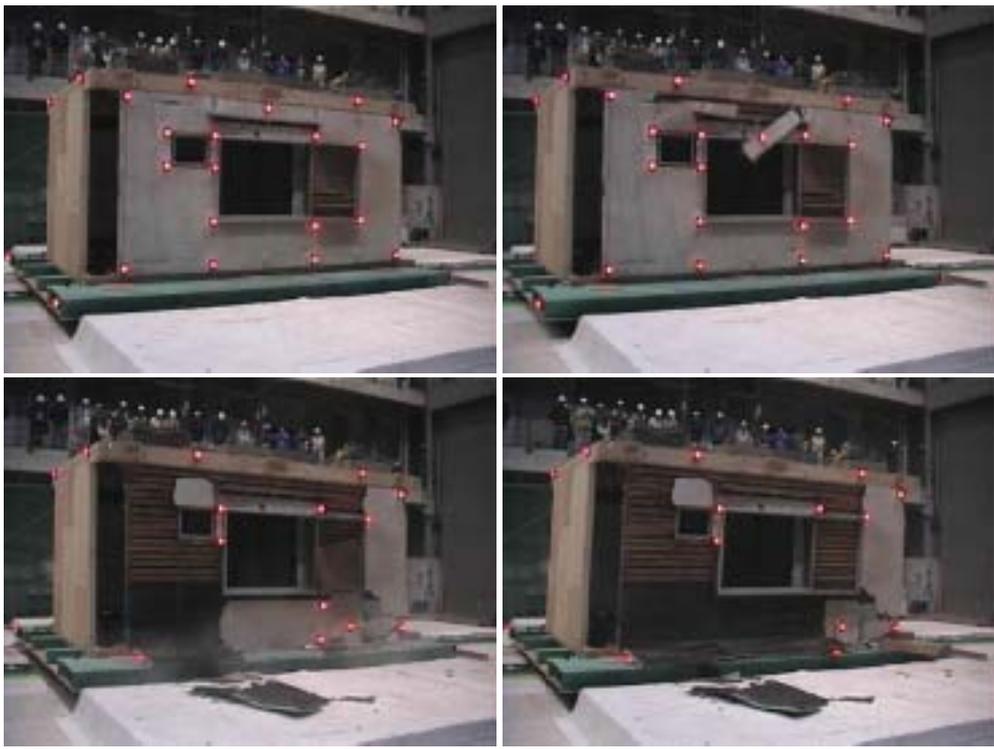
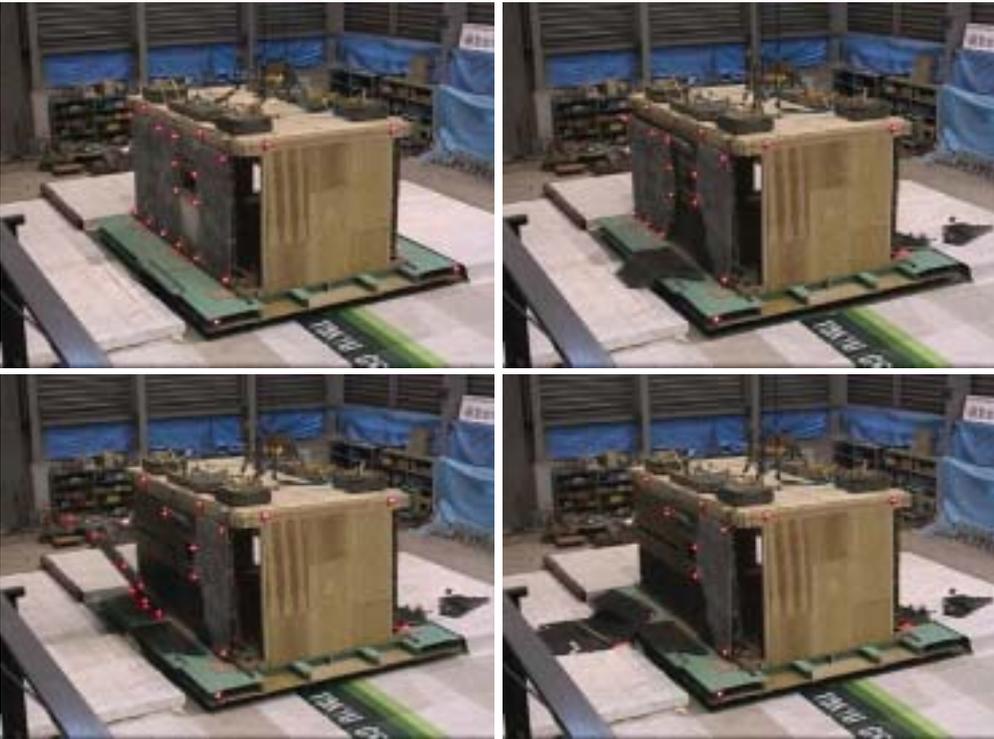


図 3 8 2 回目加振時の 2 階床と振動台の相対加速度及び相対変位



南面

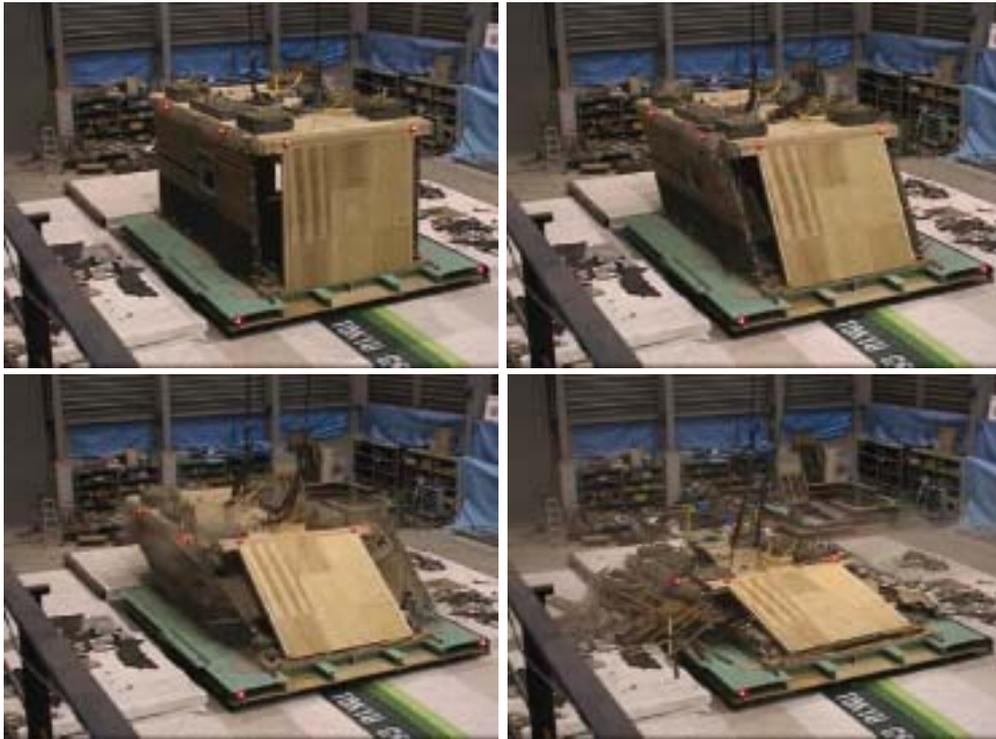


北面

写真6 加振状況(1回目)



南面



北面

写真7 加振による倒壊状況(2回目)

() 予備解析との比較

振動台実験の前に行った人力加振実験での減衰定数が 4.3%であったことから、1 回目の加振について図 3 9 及び図 4 0 に減衰定数 5%と仮定した解析結果と実験値の比較を行う。解析結果は、柱脚固定式の静的加力試験結果 2PB-HD から包絡曲線を設定した結果を示した。相対加速度の実験値と計算値の比較を行った図 3 9 では各水準による違いを確認できないが、層間変位を比較した図 4 0 では各水準の違いが明確で、実験結果が質点の重さ 13ton とした解析結果と質点の重さ 12ton とした解析結果の中間の挙動を示した。試験体の自重 2.89ton 積載重量 10ton であったので、これは妥当な結果と考えることができる。

図 4 1 に荷重と層間変位の関係についての実験値と計算値の比較を示す。実験値の荷重は減衰を考慮し、振動台実験結果から荷重を算出する際の減衰係数の決定には常時微動測定及び人力加振試験から得られた粘性減衰及び剛性を用いた。実験値と計算値は比較的良好な挙動を示した。

以上の結果から振動台実験において、箱形試験体の柱脚の引き抜きは非常に小さく、壁のせん断により終局を迎えたことがわかる。

線形加速度法により 2 回目の加振時挙動の予測を試みた。質点 13ton 減衰 5%の条件に JR 鷹取波 R 成分を 2 サイクル入力した。その結果を図 4 2 に示す。1 回目の加振終了時に計算値の残留変形が実験値に比べ大きかった為に変位量は一致しているとは言えないが、2 回目の加振での倒壊のタイミングは非常によく一致した。本試験体のように殆ど柱脚の浮き上がりが生じず倒壊寸前まで躯体が破断しない建物に対しては、静的加力試験結果から応答を予測することはある程度可能であると考えられる。

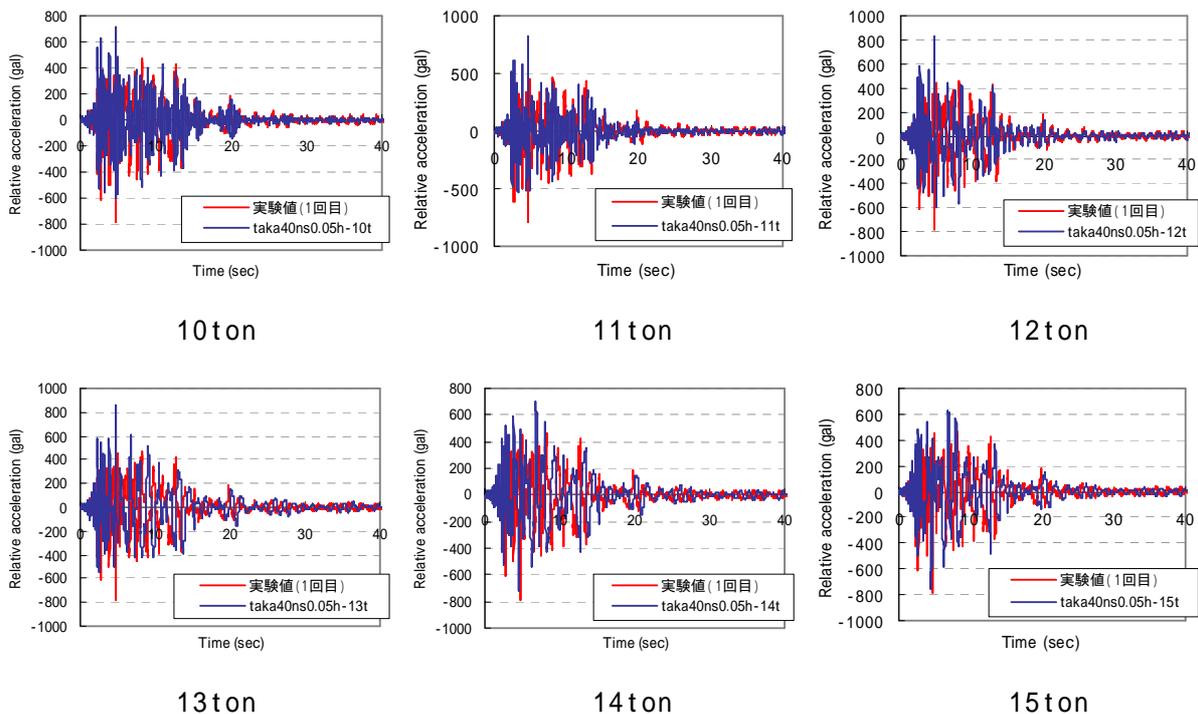


図 3 9 1 回目加振時の解析値と実験値の相対加速度の比較

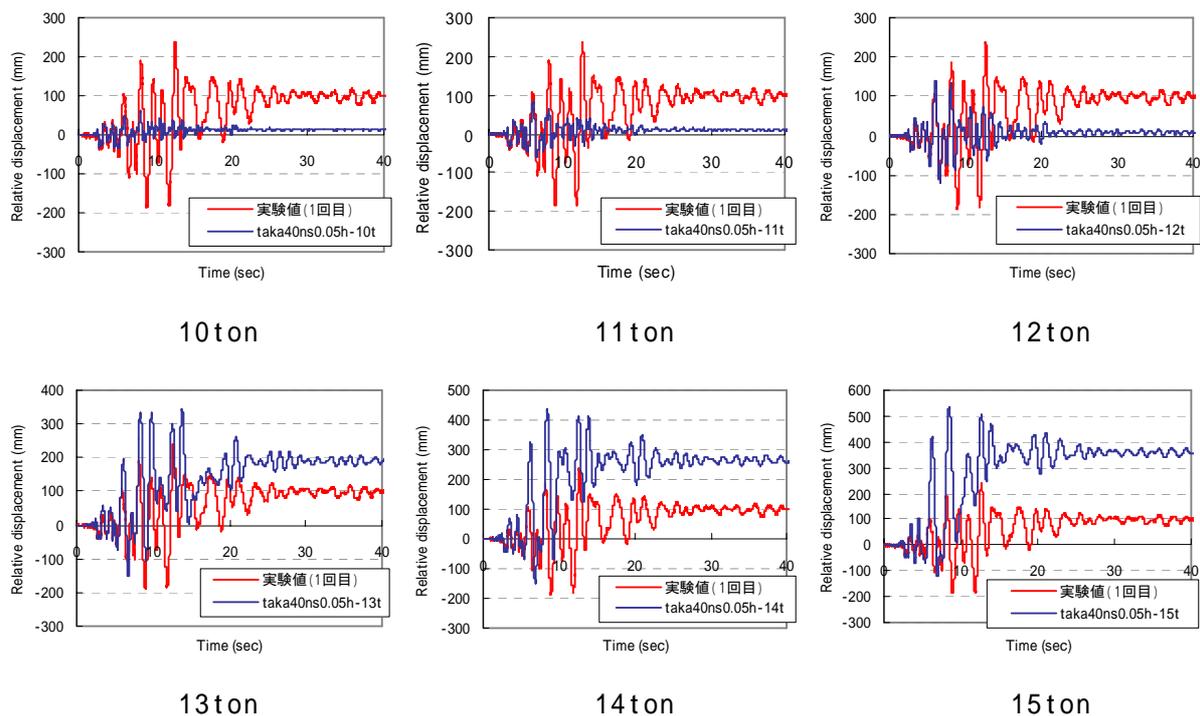


図 4 0 1 回目加振時の解析値と実験値の層間変位の比較

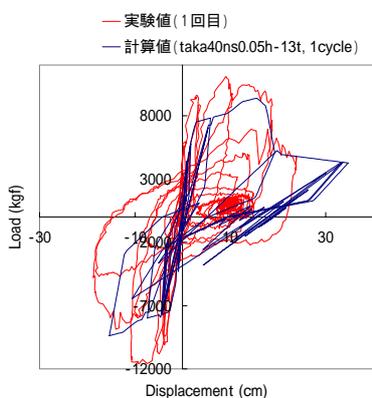


図 4 1 1 回目加振時の解析値と実験値の荷重-変位関係の比較

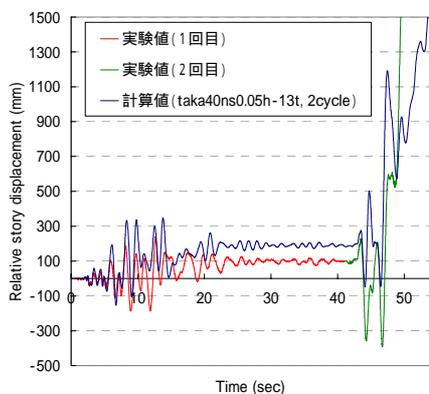


図 4 2 1 ~ 2 回目加振時の解析値と実験値の層間変位の比較

3) E - ディフェンス実験のための会議開催

平成15年3月24～25日に兵庫県において、坂本東京大学教授、鈴木京都大学教授、有馬東京大学教授、森林総研、建築研究所、国総研、文部科学省、大学、産業界、文化財の関係者ら総勢40名の方々にご参加頂き、E - ディフェンスの見学会及び木造建物研究委員会・E - ディフェンス実験実施グループ合同会議を開催した。

合同会議では、大都市大震災軽減化特別プロジェクト、木造建物実験の目的及びE - ディフェンスの性能について説明され、これまでに行われた木造建物の振動台実験及び14年度大大特の成果について報告された。その後、平成17年度及び18年度にE - ディフェンスで行う木造建物の実験計画について、出席者らにより活発な討議が行われた。

合同会議では実験計画について、ベタ基礎と布基礎、無筋コンクリート基礎の実験、文化財建物の振動実験、木造躯体の接合金物の違いによる倒壊モードの検討、狭小間口住宅の問題、移築試験体の移築方法について、など多くの課題が挙げられ、討議の結果、地盤を振動台上に設けて行う木造建物の振動台実験では、地盤の厚さを深くせず、地盤の振動特性については検討しないこととするとの合意を得た。

15年度においても合同会議を行い、実験計画の内容を更に検討する。



写真8 E - ディフェンス見学、実験実施合同会議の様子

(e) 引用文献

- 1) 木造住宅の構造設計(改正基準法と品確法), pp.44-47, 建築技術3月号別冊6
- 2) 野口, 梶川: 構造系論文集 NO.488, pp.117, 1996.10

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 論文発表

| 著者 | 題名 | 発表先 | 発表年月日 |
|----|----------|---|---|
| | 木造建物倒壊実験 | 日刊工業 テレビ東京 5PM News テレビ朝日 9 AM 東京新聞 朝刊 高知新聞 朝刊 読売新聞 朝刊 | 2003年3月4日 2003年3月7日 2003年3月8日 2003年3月8日 2003年3月8日 2003年3月10日 |

2) 口頭発表、その他

| 発表者 | 題名 | 発表先、主催、発表場所 | 発表年月日 |
|------|---|--|-----------------|
| 坂本功 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その1 研究概要 | 2003年度建築学会大会, 主催:日本建築学会,場 所:中部大学 | 平成15年9 月5~7日 |
| 水沼祥一 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その2 既存木造住宅実験(築26年の木造住宅) | 同上 | 同上 |
| 杉本健一 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その3 既存木造住宅実験(築35年の木造住宅) | 同上 | 同上 |
| 加藤英雄 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その4 既存木造住宅の劣化調査と劣化部材の強度評価 | 同上 | 同上 |
| 豊嶋学 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その6 実大振動台実験振動台の加振精度 | 同上 | 同上 |
| 三輪晋也 | 既存木造住宅の耐震性能向上に関する総合的研究 その7 実大振動台実験計測概要 | 同上 | 同上 |
| 藤田聡 | 既存木造住宅の耐震性能向上に関する総合的研究 その8 実大振動台実験における画像計測方法 | 同上 | 同上 |
| 上田一郎 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その12 既存木造住宅構面試験体の抽出方法とその基本的性能 | 同上 | 同上 |
| 西山誕生 | 既存木造住宅の耐震性向上に関する総合的研究 その13 実大振動台実験結果(既存住宅から抽出した構面の振動台実験) | 同上 | 同上 |

(g) 特許出願，ソフトウェア開発，仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

| 名称 | 機能 |
|----|----|
| なし | |

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成 15 年度業務計画案

(a) 業務計画

小型木造建物の中規模三次元振動台実験を平成 14 年度に引き続き実施し、既存不適格の建物の耐震特性に付いて検討する。条件として、平成 14 年度の試験体が金物を柱接合部に用いていたが、平成 15 年度の実験についてはこの点を考慮する。また、地盤と基礎を考慮した実験を E - ディフェンスでは行うので、この点についても考慮することとする。

(b) 実施方法

平成 14 年度同様、中規模三次元振動台を用い、各種加振を行うとともに、倒壊実験を行い、平成 14 年度と条件が異なった試験体の倒壊特性に関する資料を取得し、検討を行う。また地盤と基礎については力学的試験により、住宅基礎と地盤の地震力伝達特性について考察する。

(c) 目標とする成果

既存不適格木造建物の 1 ケースである試験体の動的な荷重変形関係を取得し、コンピュータシミュレーションに提供し、倒壊予測に役立てる。また、地盤基礎の地震力伝達特性の推定から E - ディフェンスの地盤基礎実験に対する方針を立てる材料とする。