3.2.3 耐震壁立体フレーム構造の水平力分担に関する研究(その2)

目 次

- (1) 業務の内容
 - (a) 業務題目
 - (b) 担当者
 - (c) 業務の目的
 - (d) 3 ヵ年の年次実施計画
 - (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) 振動台実験に用いられる試験体に対する擬似動的実験方法の検討
 - 2) 静的、動的解析による、擬似動的実験における留意点の明確化
 - 3) 高剛性構造物となる本試験体に対する擬似動的実験の可否の検討
 - (c) 業務の成果
 - 1) 振動台実験に用いられる試験体に対する擬似動的実験方法の検討
 - 2) 静的、動的解析による、擬似動的実験における留意点の明確化
 - 3) 高剛性構造物となる本試験体に対する擬似動的実験の可否の検討
 - (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, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定
- (3) 平成 15 年度業務計画案
 - (a) 耐震壁フレーム構造の擬似動的実験用試験体の作成
 - (b) 耐震壁フレーム構造の擬似動的実験の実施
 - (c) 擬似動的実験から得られた実験データの整理

(1) 業務の内容

(a)業務題目 耐震壁立体フレーム構造の水平力分担に関する研究(その2)

(b) 担当者

| 所属 | 役 職 | 氏名 |
|--------------|-------|---------|
| 独立行政法人 建築研究所 | 上席研究員 | 勅使川原 正臣 |
| | 上席研究員 | 福山 洋 |
| | 上席研究員 | 斉藤大樹 |
| | 主任研究員 | 加藤博人 |
| | 主任研究員 | 楠浩一 |

(c) 業務の目的

耐震壁と柱部材の地震時における応力負担に着目した静的または擬似動的加力実験を行い、振動台実験との比較を行い、擬似動的実験の妥当性と適用性を検討する。

(d) 3 ヵ年の年次実施計画

1) 平成14年度:

振動台実験に用いられる試験体を擬似動的実験においても加力可能なように試験体形状、 加力方法、計測方法の検討を行う。

高剛性構造物となる本試験体に対する擬似動的実験の可否を検討する。

静的、動的解析を行い、擬似動的実験における留意点を明確にする。

2) 平成15年度:

振動台実験との比較用試験体の作成を行う。

擬似動的実験を実施する。

データの整理を行う。

振動台実験と擬似動的実験の比較を行う。

3) 平成16年度:

部分擬似動的試験のモデル化を検討する。 部分擬似動的実験の試験体の検討を行う。 部分擬似動的実験用の試験体の作成を行う。 部分擬似動的実験を行う。 全体のまとめを行う。

(e) 平成14年度業務目的

振動台実験に用いられる試験体を擬似動的実験においても実験が可能なように試験体形 状、加力方法、計測方法の検討を行う。 静的、動的解析を行い、擬似動的実験における留意点を明確にする。 高剛性構造物となる本試験体に対する擬似動的実験の可否を検討する。

(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。

- 1) 耐震壁架構と柱梁架構が混在する構造物の擬似動的実験を実施するため、振動実験 で用いた試験体に対する加力方法、計測方法の検討を行った。
- 2)擬似動的実験に必要となる加力装置の剛性、強度等を決定するため、静的解析および動的解析を行った。解析結果より検討した条件を満足する加力、計測計画を立案した。この計画案基づき加力用の基礎部分の製作を発注した。
- 3) 試験体は、耐震壁架構があるため、水平剛性が高くなり擬似動的実験の実施が危惧 されるが、検討の結果、建築研究所の保有する擬似動的実験のシステムにより実施は 可能であると判断された。
- (b) 業務の実施方法
 - 1) 振動台実験に用いられる試験体に対する擬似動的実験方法の検討
 - a) 試験体

振動台実験に用いられた試験体を基に検討を行った。

b) 加力方法

振動台実験に用いられた試験体を基に、静的アクチュエータの取り付け方法の検討 を行った。

c) 計測方法

振動台実験に用いられた試験体に対する計測計画を基に検討を行った。

2) 静的、動的解析による、擬似動的実験における留意点の明確化

モデル化された試験体に対する一方向漸増載荷解析を行い、試験体の耐力・変形性状 を明らかにするとともに、地震入力に対する動的解析を行い、その破壊性状を検討した。

3) 高剛性構造物となる本試験体に対する擬似動的実験の可否の検討

実際の擬似動的実験で予想される加力・計測誤差を考慮し、モデル化された試験体に対して 計算機上にて擬似動的実験を模擬する。

(c) 業務の成果

1) 振動台実験に用いられる試験体に対する擬似動的実験方法の検討

大ひずみを受ける主筋の溶接方法について、鉄板の厚さ、溶接長さ、ザグリの形状、半自動 溶接の導入など改良を行った。試験体の基礎部分は、基礎固定試験体と、基礎浮き上がり試験 体でそれぞれの特徴を考慮し、基礎固定試験体では直交基礎梁を省略、基礎浮き上がり試験体 ではフレーム部分の基礎を完全固定、耐力壁下を振動台実験と合わせた。実験フロアー上の試

験体据付位置(基礎概要)を図1に示す。



図1 試験体据付位置

水平加力は、各階の床位置に設置された錘にトーナメント方式でアクチュエータにより行う。 ねじれを制御するために最上階では2台のアクチュエータにより水平力を加える。また、アク チュエータの重さはカウンターウエートにより相殺する。加力方法を図2~図4に示す。



図2 アクチュエータ設置計画(立面)



図3 各階のアクチュエータ取付け計画

計測計画は加速度計およびレーザー変位計を除き基本的には振動台実験と同じとする。特に 変更を加えた点はない。なお、ひずみゲージについては、せん断補強筋の拘束効果を見るため に振動台実験の試験体より密に貼付されている。



図4 せん断補強筋のゲージ位置

- 2) 静的、動的解析による、擬似動的実験における留意点の明確化 擬似動的実験の加力・計測計画を立てるために、試験体の予備解析を行う。
- a) 解析ソフトウェアの概要

解析には、建築研究所において開発中のソフトウェア「STERA-3D(Version 1.0)」を使用した。このソフトは、"柱、梁、耐震壁を有する鉄筋コンクリート造建物"の

弾性振動モード解析

1方向静的漸増載荷解析(逆三角形分布、等分布)

弹塑性地震応答解析

の機能を有している。建物データの入力から解析結果の表示まで、直感的な操作で使え るように工夫されている。

b) 解析の基本仮定

解析の主な基本仮定は以下のとおりである。

床は面内変形に対して剛とし、面外方向のみ変形する(剛床仮定)。

部材は線材に置換する。梁の線材モデルは、両材端に弾塑性曲げばねおよび部 材中央に弾塑性せん断ばねを有する部材モデルとする。

柱の線材モデルは、軸力と曲げの非線形相互作用が考慮できる MS モデル(両材端の断面内に弾塑性軸ばねを配置し、部材中央に水平2方向の弾塑性せん断ばねを有するモデル)を使用する。

壁の線材モデルは、軸力と曲げの非線形相互作用が考慮できる MS モデル(両材端の断面内に弾塑性軸ばねを配置し、壁パネルおよび側柱のそれぞれに弾塑性せん断ばねを有するモデル)を使用する。

弾塑性曲げばねの復元力特性は、修正武田モデルとする。

弾塑性せん断ばねの復元力特性は、ポリリニア型モデルとする。

MS モデルの弾塑性軸ばねの復元力特性は、鉄筋ばねにバイリニア型モデルを、 コンクリートばねに引張耐力がゼロのバイリニア型モデルを用いる。

接合部は剛と仮定し、柱・梁の線材モデルの端部に剛域を設ける。

地震応答解析では、剛性比例型の減衰とし、減衰定数を0.05 と仮定する。 浮き上がり試験体については、壁脚に鉛直方向の非線形外部ばねを付けて、浮 き上がり特性を模擬した。外部ばねは、圧縮方向にはゴム基礎の剛性を有し、 引張方向(浮き上がり)には剛性ゼロとする。

c) 建物のモデル化

試験体の建物諸元と部材諸元を表1、表2にまとめる。なお、鉄筋は SD390、コンク リートは FC21 とした。

| | 1F | 2F | 3F | 4F | 5F | 6F |
|-----------|------|------|------|------|------|------|
| 階高(mm) | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| 階重量(tonf) | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |

表1 建物諸元

表 2 部材諸元

| 部材種別 | 種別番号 | 断面寸法(mm) | 主筋 | | せん断補強筋 |
|-------|-------|-----------|-------|-------|-----------------|
| 柱 | 1C1 | 20 × 20 | 12- | D13 | 2-D6@100 |
| 梁 | | | 上端筋 | 下端筋 | |
| 1F-6F | G1-G3 | 150 × 250 | 3-D10 | 3-D10 | 2-D6@100 |
| 基礎梁 | FG1 | 200 × 500 | 4-D10 | 4-D10 | 2-D6@100 |
| | FG2 | 200 × 450 | 4-D10 | 4-D10 | 2-D6@50 |
| | FG3 | 650 × 500 | 6-D22 | 6-D22 | 4-D10@100 |
| 壁 | | 壁厚 | | | |
| | W1 | 80 | | | 2-D6@100 double |

d) 弾性振動モード

図5と図6に、試験体Aと試験体Bの弾性振動モードをそれぞれ示す。また、表3に 各モードの固有周期をまとめる。なお、試験体Bは浮き上がり前の状態での固有周期で ある。

| | 1 次 | 2 次 | 3 次 |
|------|-------|-------|-------|
| 試験体A | 0.253 | 0.251 | 0.140 |
| 試験体B | 0.253 | 0.251 | 0.231 |

表3 試験体の固有周期(sec)

図5および図6のモード形を見ると、1次モードはねじれを含み、2次モードはX方 向、3次モードがY方向の振動であることがわかる。加力方向であるY方向(3次)の 固有周期は、試験体Aが0.14秒と短い。そのため、剛性が高いことにより疑似動的実験 の変位制御誤差の影響を受けることが懸念されるが、これについては、別に検討する。



図5 試験体A(基礎固定)の弾性振動モード

-93-



図6 試験体B(浮き上がり)の弾性振動モード

-94-

e) 静的解析

試験体の各層の重心位置に水平力を加えて、1方向に漸増載荷したときの、変形、部 材の塑性率、各層の層せん断力と層間変形の関係を調べた。ここで、水平力の高さ方向 の分布は逆三角形分布とした。

図7は、建物頂部の変形が変形角で1/50(12cm)に達するまで漸増載荷したときの結果である。部材の塑性化の様子が示されており、黄色は塑性率が1.0~5.0、赤色は塑性率が5.0以上の場合である。これを見ると、試験体A、Bとも梁がすべて塑性化しており、加力方向の梁のほうが直交方向の梁よりも塑性化の程度が大きいことがわかる。また、試験体Aは壁脚が塑性化(曲げ破壊)しているが、試験体Bは基礎梁が塑性化している。

また、層せん断力と層間変形の関係を見ると、試験体Aは、壁の曲げ変形により、上 の階にいくほど層間変形角の値が大きくなるが、試験体Bは、壁脚が浮き上がるため、 壁自体はあまり変形せず、各層の層間変形角がほぼ同じ値になっている。さらに、層せ ん断力係数の値は、試験体Aの方が試験体Bよりも2倍程度大きな値になっている。 表4に、1階層せん断力の値を、変形状態ごとに示す。

| E | | |) |
|-------|-------------|-------------|-------------|
| 頂部変形角 | 1/200 | 1/100 | 1/50 |
| 試験体A | 53.8 (0.9) | 59.8 (1.0) | 65.2 (1.09) |
| 試験体 B | 20.0 (0.33) | 26.7 (0.45) | 28.9 (0.48) |

表4 各変形状態での1階層せん断力(tonf)

()内は層せん断力係数

図8は、頂部変形で1/200と1/100の、それぞれに達するまで載荷したときの建物の 破壊状況(塑性ヒンジの発生状況)である。これを見ると、試験体A、Bともに、頂部 変形1/100で崩壊メカニズムが形成されていることがわかる。



図7 1方向漸増載荷解析(頂部変形角1/50での変形)



注)変形を拡大して表示しています。



f) 地震応答解析

使用した入力地震動は、以下の5波である。

Chile波 Kobe NS波

Takatori 波

Tohoku NS 波

EI Centro NS 波

それぞれの最大加速度と最大速度の値を表5に示す。

| | なう 八月地長到り入 | • 1 ⁻ |
|----------------|------------------------|------------------|
| 地震波 | 最大加速度 | 最大速度(cm/sec) |
| | (cm/sec ²) | |
| Chile 波 | 796.0 | 70 |
| Kobe NS 波 | 574.4 | 85 |
| Takatori 波 | 605.5 | 85 |
| Tohoku NS 波 | 155.4 | 41 |
| EI Centro NS 波 | 375.9 | 35 |

表5 入力地震動リスト

() 試験体A(基礎固定)の解析結果

表 6 に、試験体 A (基礎固定)の最大応答値を示す。地震波は Chile 波, Kobe 波, Takatori 波の 3 波を、それぞれ 1.5 倍と 2.0 倍に増幅して入力した。なお、Tohoku 波と El Centro 波は、2.0 倍に増幅しても部材が降伏しなかったため、表から除いている。

| 入力 | 倍率 | 1 階変位(cm) | 6 階変位(cm) | 1 階壁脚 曲げ塑性 率 |
|-----------|-----|-----------|-----------|-----------------|
| Chile 波 | 1.5 | 0.18 | 2.3 | 1.7 |
| | 2.0 | 0.45 | 4.3 | 4.7 |
| Kobe 波 | 1.5 | 0.17 | 2.9 | 1.6 |
| | 2.0 | 0.29 | 4.1 | 2.8 |
| Takatori波 | 1.5 | 0.15 | 2.8 | 1.4 |
| | 2.0 | 0.26 | 3.9 | 2.4 |

表6 試験体Aの最大応答値

図9に、部材の破壊状況(塑性ヒンジの分布)を示す。1.5 倍のときには、どの地震 波とも、1階壁脚に加え、部分的に上部の柱・梁が降伏している。2.0 倍のときには、 Chile波の場合に、ほぼ全体崩壊形が形成され、梁が大きく塑性化している。また、Kobe 波とTakatori波では、建物の上階の柱・梁が塑性化している。



図9 地震入力による破壊状況(試験体A)

-99-

() 試験体 B (浮き上がり)の解析結果

表 7 に、試験体 B (浮き上がり)の最大応答値を示す。地震波は Chile 波, Kobe 波, Takatori 波の 3 波を 0.5 倍と 1.0 倍に、Tohoku 波は 1.5 倍と 2.0 倍に、El Centro 波は 1.0 倍と 1.5 倍に、それぞれ増幅して入力した。

| 入力 | 倍率 | 1 階変位 (cm) | 6 階変位(cm) | 基礎梁 曲げ塑性率 |
|-------------|-----|---------------|-----------|-----------|
| Chile 波 | 0.5 | 0.53 | 3.6 | 5.29 |
| | 1.0 | 1.4 | 8.5 | 13.0 |
| Kobe 波 | 0.5 | 0.34 | 2.3 | 2.1 |
| | 1.0 | 0.98 | 6.4 | 6.7 |
| Takatori 波 | 0.5 | 0.56 | 3.7 | 3.1 |
| | 1.0 | 1.4 | 8.9 | 10.7 |
| Tohoku 波 | 1.5 | 0.37 | 2.5 | 2.0 |
| | 2.0 | 0.55 | 3.7 | 3.3 |
| El Centro 波 | 1.0 | 0.48 | 3.3 | 2.4 |
| | 1.5 | 0.70 | 4.7 | 4.0 |

表7 試験体Aの最大応答値

図10に、Chile 波, Kobe 波, Takatori 波の3波について、部材の破壊状況(塑性ヒンジの分布)を示す。これを見ると、Chile 波の0.5 倍のときに、全体崩壊形が形成されている。一方、Kobe 波と Takatori 波の0.5 倍では、基礎梁がすべて降伏するものの、上部は部分的な降伏にとどまっている。また、いずれの地震波についても、1.0 倍の入力では、建物は全体崩壊メカニズムに達し、基礎梁が大きく塑性化していることがわかる。

図11に、Tohoku 波と EI Centro 波について、部材の破壊状況(塑性ヒンジの分布) を示す。Tohoku 波の1.5倍と EI Centro 波の1.0倍では、基礎梁がすべて降伏している ものの、上部は塑性化していない。また、Tohoku 波の2.0倍では、上部の柱・梁が部分 的に降伏しており、EI Centro 波の1.5倍では、ほぼ全体崩壊形が形成されている。



図10 地震入力による破壊状況(試験体B)

-101-



図11 地震入力による破壊状況(試験体B)

3) 高剛性構造物となる本試験体に対する擬似動的実験の可否の検討

基礎固定の試験体は、1次固有周期が0.14 秒と短く、初期剛性が高いため、擬似動 的実験のアクチュエータの変位制御誤差の影響を受けやすいことが懸念される。そこで、 変位制御刻みが1/100mmのときに、応答結果がどのような影響を受けるかを、シミュレ ーション解析により検討した(引用文献1)~7)。

a) 解析モデル

解析は6質点系の串団子モデルとした。各層の復元力特性は、2)の静的解析における 層せん断力 - 層間変形関係から、トリリニア型の復元力特性にモデル化した。図12に 各層の復元力モデルを、表8に復元力モデルのパラメータを、それぞれ示す。



図12 各層の復元力モデル

| 755 | 第1折れ点 | 第1折れ点 | 第2折れ点 | 第 2 折れ点 |
|-----|-----------|---------|-----------|---------|
| PE | Fc (tonf) | Dc (cm) | Fy (tonf) | Dy (cm) |
| 1 | 0.103 | 41.9 | 0.321 | 55.7 |
| 2 | 0.247 | 39.9 | 0.541 | 53 |
| 3 | 0.344 | 36 | 0.675 | 47.7 |
| 4 | 0.397 | 30 | 0.75 | 39.8 |
| 5 | 0.416 | 22 | 0.778 | 29.2 |
| 6 | 0.414 | 12 | 0.774 | 15.9 |
| | | | | |

表8 復元力モデルのパラメータ

b) 入力地震動

使用した入力地震動は、以下の5波である。

Tohoku NS 波 El Centro NS 波 Kobe NS 波 Chile 波 Takatori 波

それぞれの波形を図13~17に示す。なお、スケール効果を考慮して、応答解析では、時間軸を1/3倍している。







図14 EI Centro NS 波











図17 Takatori波

c)アクチュエータの変位制御誤差



1階のアクチュエータの誤差の変化を図18~22に示す。

図18 1階のアクチュエータの誤差(Tohoku波)



図19 1階のアクチュエータの誤差(El Centro波)



図20 1階のアクチュエータの誤差(Kobe 波)



図21 1階のアクチュエータの誤差(Chile波)



図22 1階のアクチュエータの誤差(Takatori波)

d) 応答变形時刻歴

各層の応答変形時刻歴を図23~27に示す。図の太線が誤差あり(W/Error)で、 細線が誤差なし(W/O Error)である。両者は殆ど重なっており、誤差の影響が小さい ことがわかる。











図27 応答変形時刻歴(Takatori波)

- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1)振動台実験に用いられる試験体を擬似動的実験においても加力可能なように試験体形状、 加力方法、計測方法の検討を行い、仕様を決定した。
 - 2)静的、動的解析により、弾性周期は約0.15秒、基礎固定時の保有水平耐力は約600KN、 浮き上がりを許容した場合には約400KNであること、耐震壁の限界変形と考えられる 変形角1/85までの応答を生じさせる地震動は兵庫県南部地震におけるTAKATORI-NS の記録で18m/sec²、神戸海洋気象台の記録で15m/sec²程度であることなど、擬似 動的実験における留意点を明確にした。
 - 3) 試験体は、耐震壁架構があるため、水平剛性が高くなり擬似動的実験の実施が危惧されるが、等価な1自由度系の剛性は約123kN/mmであった。1988年にRM5階建の実物大試験体に対し、最大耐力9000kN、頂部変形70mmを経験した後に擬似動的実験が実施された。等価剛性は約130kN/mmで、今回の試験体とほぼ同じ剛性である。したがって、擬似動的実験の実施は可能であると判断された。実験の精度については今後更に検討が必要である。

- (e) 引用文献
 - 1)石丸辰治、安達洋、白井伸明、中西三和、神田亮:オンラインシステムによる擬似動 的実験の誤差評価に関する研究 その1~5、日本建築学会大会学術講演梗概集、 pp.189-198、1985年10月.
 - 2)加藤博人、中島正愛、上之薗隆志: 仮動的実験手法による地震応答性状 その1~2、 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.952-954、1984年10月.
 - 3)加藤博人・中島正愛・上之薗隆志: 仮動的実験手法による地震応答性状 その3~4、 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.445-115、1985 年 10 月.
 - 4)Nakashima, M. and Kato, H.: Control of Experimental Error Growth in Pseudo Dynamics Testing (Stability and Accuracy Behavior of Pseudo Dynamic Response), Journal of Structural and Construction Engineering (Transaction of AIJ), No.401, pp.129-138, July 1989.
 - 5) 椛山健二: オンライン地震応答実験の精度向上に関する研究、東京大学学位論文、1995 年.
 - 6) 楠浩一、李元虎、李利衡、中埜良昭:可変時間刻み法を用いたサブストラクチャ・オンライン地震応答実験手法、第10回日本地震工学シンポジウム、Vol.2, pp.2211-2216, 1998 年 11 月.
 - 7)Kusunoki, K., Nakano, Y., Yi, W. and Lee, L.: Posterior Timestep Adjustment Technique in Substructuring Pseudodynamic Test, Proc. of 12th World Conf. on Earthquake Engineering, January 2001.

(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 |
|----|----|-----|-------|
| なし | | | |

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 |
|-----|----|-------------|-------|
| なし | | | |

(g) 特許出願, ソフトウエア開発, 仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウエア開発

| 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) 耐震壁フレーム構造の擬似動的実験用試験体の作成
 - 1) 振動台実験と同じ試験体を擬似動的加力が可能なように変更したものを作成する。
 - 2) 振動台実験で見られた試験体製作上の問題点を、振動台実験、擬似動的実験の両者 の結果が比較検討可能な範囲で修正する。
- (b) 耐震壁フレーム構造の擬似動的実験の実施
 - 1) 振動台実験で入力した地震動の中から、試験体の挙動を支配する入力地震動を選定 し、擬似動的実験を行う。
- (c) 擬似動的実験から得られた実験データの整理
 - 1) 耐震壁フレーム構造の擬似動的実験から得られた実験データの整理を行う。