

3.2.2 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1）

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) 耐震壁単体の実験結果の検討
 - 2) 1自由度系地震応答解析と振動台実験結果の比較
- (c) 業務の成果
 - 1) 耐震壁単体の実験結果の検討
 - 2) 1自由度系地震応答解析と振動台実験結果の比較
- (d) 結論ならびに今後の課題
 - 1) 耐震壁単体の実験結果の検討
 - 2) 1自由度系地震応答解析と振動台実験結果の比較
- (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 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1）

(b) 担当者

| 所 属 | 役 職 | 氏 名 |
|--|-------------|--------------|
| 豊橋技術科学大学 工学教育国際協力研究センター 大学大学院工学研究科 | 助教授 大学院生 | 倉本 洋 秋田知芳 |

(c) 業務の目的

耐震壁を含む立体フレーム構造における耐震壁とフレームの水平分担率を解析的に検討することを目的とする。

(d) 3ヵ年の年次実施計画

1) 平成14年度：

- ① 耐震壁フレーム構造における耐震壁とフレームの水平力分担率について解析的な検討を行う。
- ② 連層耐震壁試験体の振動台実験における耐震壁の復元力履歴特性の検討を行う。
- ③ 既往の復元力特性モデルによる地震応答解析結果を振動台実験結果と比較する。

2) 平成15年度：

（業務題目を「鉄筋コンクリート造連層耐震壁の動的挙動と静的挙動の比較に関する研究」とする。）

- ① 連層耐震壁試験体2体の静的加力実験を実施する。
- ② 平成14年度に実施した振動台実験結果と静的実験結果を比較する。
- ③ 静的実験結果より耐震壁の復元力特性モデルを構築する。
- ④ 動的挙動に及ぼす静的復元力特性の影響因子を検討する。

3) 平成16年度：

- ① 基礎浮き上がり耐震壁に対する復元力特性モデル構築のための静的加力実験（2体）を実施する。
- ② 静的実験結果より基礎浮き上がり耐震壁の復元力特性モデルを構築する。
- ③ 平成14年度に実施した耐震壁フレーム構造の振動台実験における耐震壁部分の復元力特性との比較により、モデルの検証を行う。
- ④ 平成15年度に構築した基礎固定耐震壁に対するモデルと平成16年度構築の基礎浮き上がり耐震壁に対するモデルに基づいて、連層耐震壁の動的復元力特性に関する一般化モデルを構築する。

(e) 平成14年度業務目的

耐震壁を含む立体フレーム構造における耐震壁とフレームの水平分担率を解析的に検討するために、連層耐震壁試験体の振動台実験結果をもとに、解析に用いる耐震壁の復元力特性の妥当性を検証することを目的とする。

(2) 平成14年度の成果

(a) 業務の要約

平成14年度は、まず、連層耐震壁試験体の振動台実験における耐震壁の復元力履歴特性の検討を行った。次に、解析に用いる耐震壁の復元力特性の妥当性を検証することを目的として、鉄筋コンクリート造耐震壁単体の実験結果と解析結果を比較検討した。

解析では耐震壁試験体を等価1自由度系モデルに置換し、復元力特性を TAKEDA-SLIP モデルとした。なお、入力地震波は振動台実験で使用したものと同一物を用い、実験と同じ順序で入力して地震時応答を求めた。

今年度の研究より、せん断スパン比が小さい試験体よりも、せん断スパン比が大きい試験体の方が履歴曲線、応答変位のいずれにおいても実験結果と解析結果の対応は良好であることが確認できた。

(b) 業務の実施方法

1) 耐震壁単体の実験結果の検討

ここでは、独立行政法人防災科学技術研究所が中心となって実施した「鉄筋コンクリート造耐震壁の振動台実験」の概要を簡単に述べる。

a) 試験体

実験で用いた試験体は6層建物の下部2層の耐震壁を想定したものである。試験体の形状を図1に示す。耐震壁は壁内法高さ800mm、内法長さ1600mm、壁厚80mmである。側柱は200mm角で、1層の梁は幅150mm、梁せい200mmである。2層の梁は上部スタブと一体となっている。2層の梁の幅を200mmにしたのは、上部スタブを安定させるためである。また、基礎スタブおよび上部スタブは、どちらも高さ500mm、幅2800mm、奥行き2200mmである。

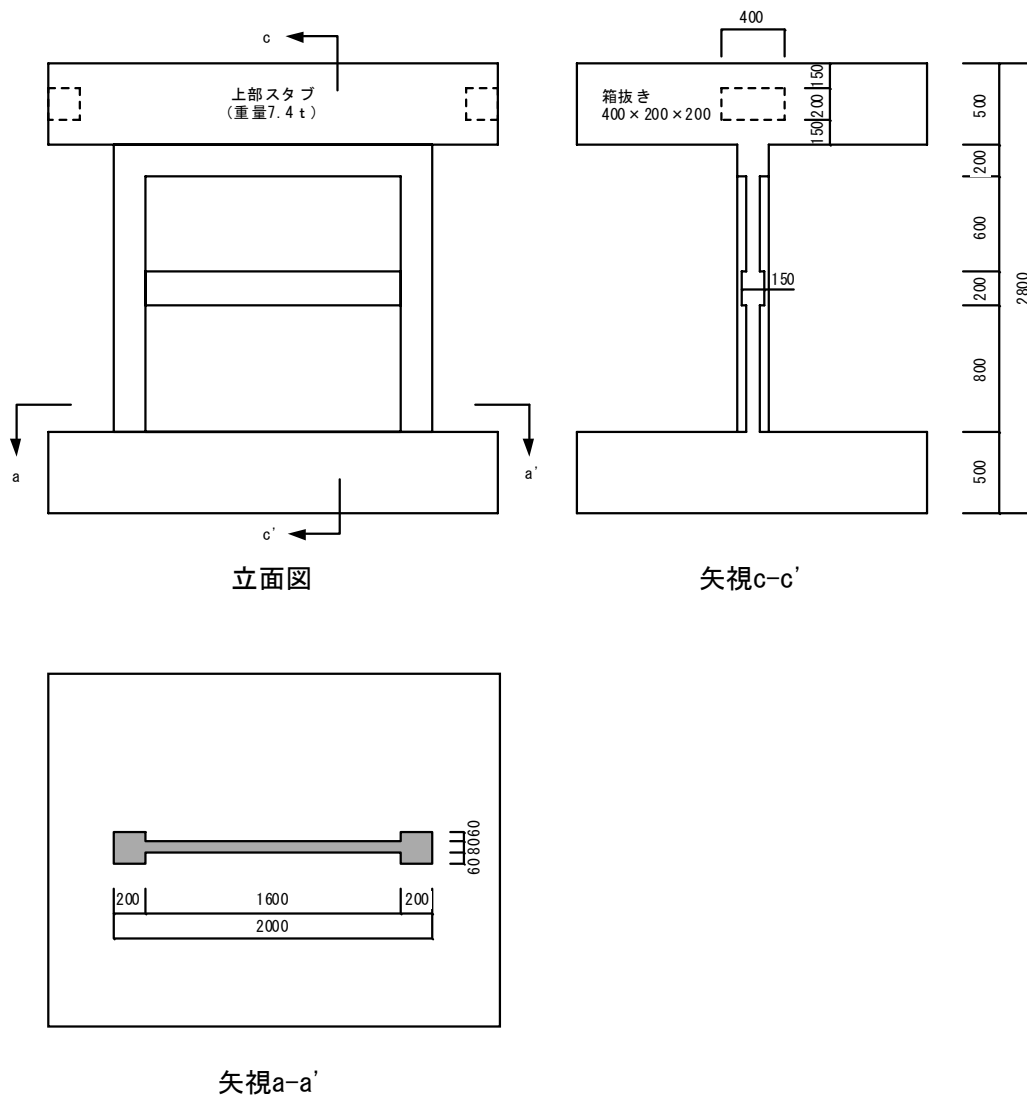


図1 試験体形状

b) 入力計画

入力地震動には、TOH (1978年、宮城県沖地震、東北大学の記録、NS成分)、ELC (1940年、Imperial Valley地震、El Centroの記録、NS成分)、JMA (1995年、兵庫県南部地震、神戸海洋気象台の記録、NS成分)、CHI (Chile地震、1985年)、TAK (1995年、兵庫県南部地震、JR鷹取駅の記録、NS成分)の5種類を用いた。入力レベルは表1に示す目標速度を設定して加震を行った。また、損傷による試験体の固有振動数の変化を測定する目的で各地震動の入力前後に20galレベルのホワイトノイズを入力した。

表 1 入力地震波

| 目標最大 入力速度 (kine) | 地震波 | 原波形に対 する倍率 | 原波形 最大加速度 (gal) | 原波形 最大速度 (kine) | 試験体入力 最大加速度 (gal) | 試験体入力 最大速度 (kine) |
|------------------------|-----|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| 25 | TOH | 0.6 | 258.2 | 40.9 | 154.9 | 14.4 |
| 37 | ELC | 1.1 | 341.7 | 34.8 | 375.9 | 21.4 |
| 50 | JMA | 0.6 | 820.6 | 85.4 | 492.4 | 28.9 |
| 75 | JMA | 0.9 | 820.6 | 85.4 | 738.5 | 43.3 |
| 60 | CHI | 0.9 | 884.4 | 70.6 | 796.0 | 34.6 |
| 100 | JMA | 1.2 | 820.6 | 85.4 | 984.7 | 57.7 |
| 50 | CHI | 0.7 | 884.4 | 70.6 | 619.1 | 28.9 |
| 125 | TAK | 1.0 | 605.5 | 124.2 | 605.5 | 72.2 |
| 70 | CHI | 1.0 | 884.4 | 70.6 | 884.4 | 40.4 |

2) 1自由度系地震応答解析と振動台実験結果の比較

a) 解析目的

本研究では、実験で得られた鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性履歴特性との比較を行うことを主な目的として弾塑性地震応答解析を行った。応答計算の際にはいくつかのパラメータを用いて、実験結果と比較的よく合うパラメータの組み合わせを試行錯誤的に定めた。

b) 解析概要

解析には1自由度系モデルを使用した。1次モードが卓越すると仮定し、全重量がひとつの質点として加力点位置にあると仮定した。試験体Aと試験体Bの相違、すなわち加力点高さの違いは、復元力特性の相違によって表現される。

復元力特性には Trilinear 型を用い、履歴特性をあらわすモデルには TAKEDA-SLIP モデルを用いた。解析時におけるパラメータは、復元力特性を定義するために用いる初期剛性 K_c 、第2剛性 K_y 、第3剛性 K_u 、ひび割れ変位 D_c 、および降伏変位 D_y と TAKEDA-SLIP モデルの履歴特性を定義するために用いる除荷剛性低下係数 α および α' 、スリップ剛性低下係数 β 、スリップ剛性硬化係数 γ である。

なお、解析には実験で入力した地震動と同じものを使用し、実験と同じ順序で地震動を入力して各地震動入力時の応答を求めた。ただし、実験時には震動台の停止位置を中立位置にするために地震動の補正が行われている。

c) 履歴モデル

TAKEDA-SLIP モデル [1] は、図 2 に示すように、ひび割れ点と降伏点で剛性が変化する Trilinear 復元力特性を有し、降伏後の除荷剛性 K_r および K_r' は TAKEDA モデルと同様に最大変形とともに劣化し、除荷の後に加力方向が変わると低い剛性 K_s でスリップ性状を示し、その後に再び硬化した剛性 K_p で載荷方向の最大応答点に向かう。

ここに、 X_0 : 最大変位点 D_u から除荷して復元力がゼロとなり、スリップが始まる点

の変位、 α および α' : 除荷剛性低下係数、 β : スリップ剛性低下係数、 γ : スリップ剛性硬化係数と呼ぶ。通常の鉄筋コンクリート造構造物では、指数 α の値は 0.0~0.6、指数 α' は 0.7~1.0、指数 β は 0.0~1.0、指数 γ は 0.9~2.0 程度の値をとるものと思われる。

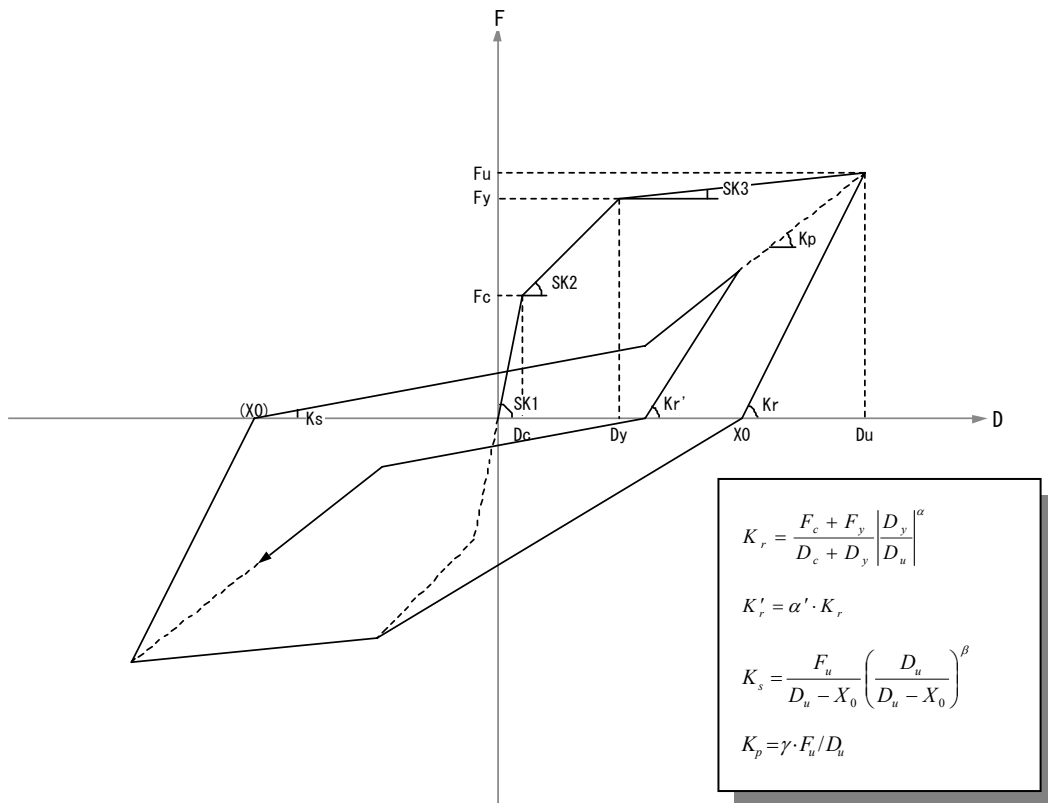


図2 TAKEDA-SLIPモデルの履歴特性

d) 応答解析法

地震応答解析は1自由度系モデルを用いて行った。運動方程式の数値積分には、Newmark β 法 ($\beta=1/4$) の増分法を用い、各積分時刻において反復法により運動方程式と履歴特性を同時に満足させた。積分時間刻みは、入力地震動の加速度データの時間刻み (0.02 秒) の 1/10 とし、0.002 秒を用いた。減衰係数は履歴モデルの瞬間剛性に比例するものと仮定し、弾性時の減衰定数を 0.02 として求めた。各地震動を連続的に入力する必要があるため、初期剛性の低下を考慮し、最大応答点と原点を結んだ直線の傾きを初期剛性として応答計算を行った。

(c) 業務の成果

1) 耐震壁単体の実験結果の検討

a) 履歴曲線

試験体のせん断力と上部スタブの水平変位の関係を図3(a), (b)に示す。試験体Aは

TOH25、ELC37、JMA50 でほぼ弾性範囲内であり、JMA75 で剛性低下が見られる。一方、試験体 B は TOH25、ELC37 でほぼ弾性範囲内であり、JMA50 で剛性低下がみられた。両試験体とも最大耐力に達するまではエネルギー吸収能力が少なく、残留変位が少ない S 字形の履歴を示した。試験体 A は JMA100 において最大耐力に達した。以降、剛性低下および耐力低下が見られ、逆 S 字形の安定した履歴を示した。その後、CHI70 において崩壊した。試験体 B は JMA75 において最大耐力に達した。続いた CHI60 では逆 S 字形の安定した履歴を示し、JMA100 において崩壊した。

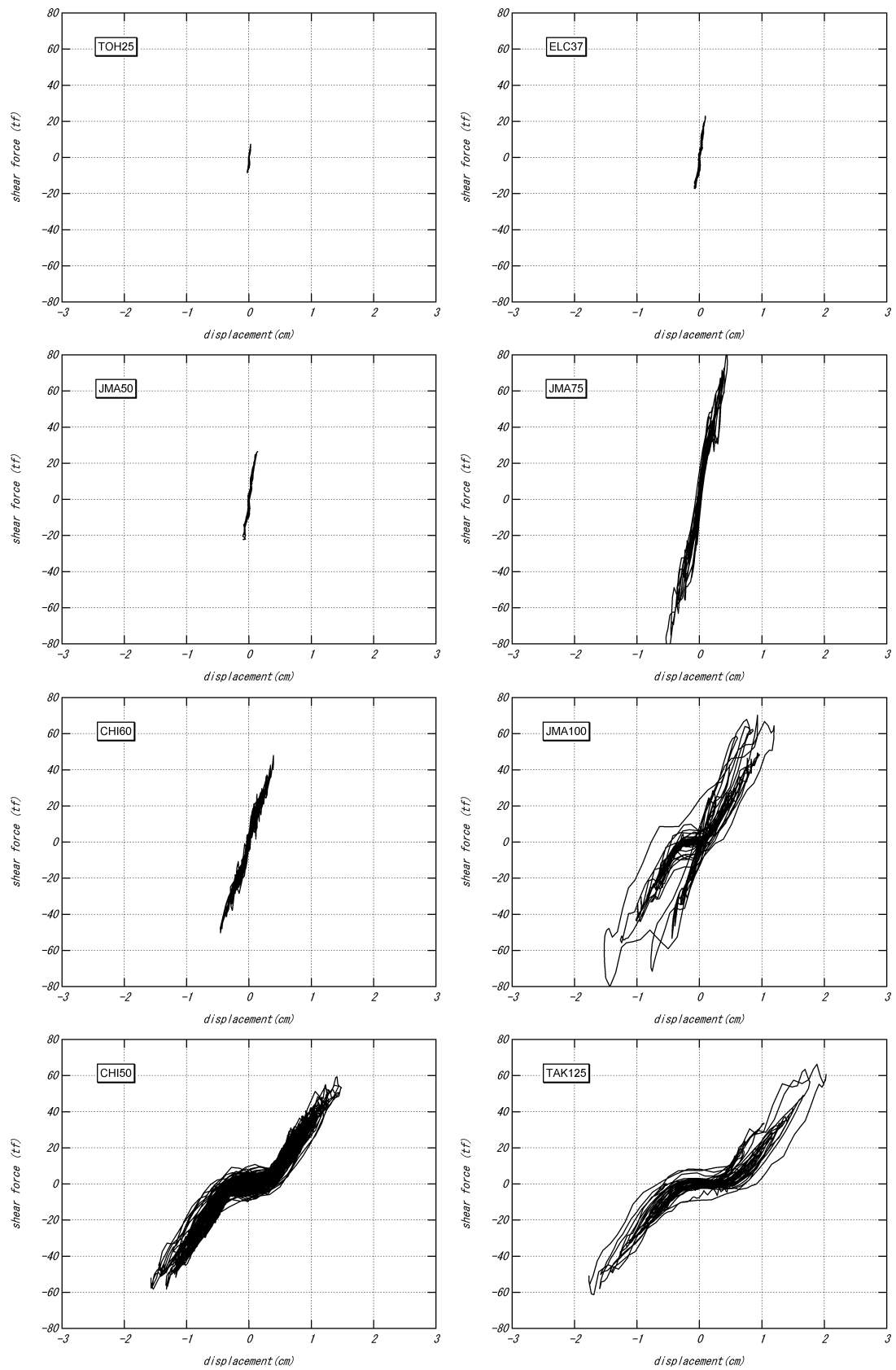


図 3 (a) 履歴曲線 (試験体 A)

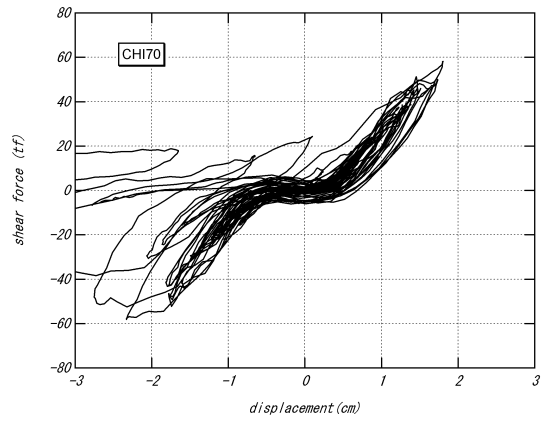


図 3 (a) 履歴曲線 (試験体 A)

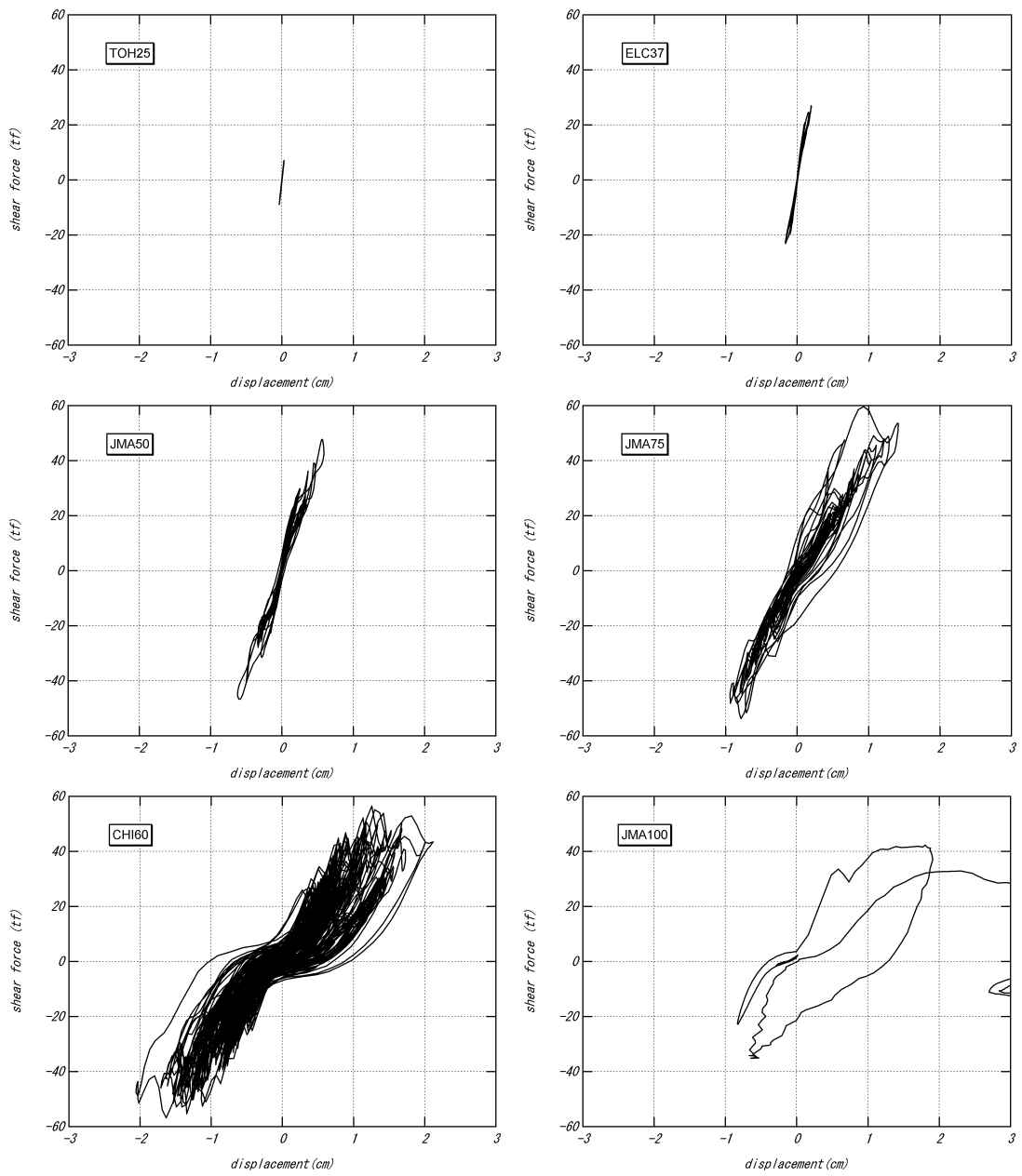


図 3 (b) 履歴曲線 (試験体 B)

2) 1自由度系地震応答解析と振動台実験結果の比較

a) パラメーター

表2に、解析に用いた各パラメーターの値を示す。当初は TAKEDA-SLIP モデルのパラメーターは両試験体とも同じものを用いる予定であったが、試験体Bで設定したパラメーターの値では、試験体Aのスリップの状態をうまく表現できなかったため、スリップ剛性硬化係数 γ を0.9から1.3へ変更することとした。

表2 パラメーターの値

| | Kc | Ky | Ku | Dc | Dy | α | α' | β | γ |
|-------|-----|----|-----|------|------|----------|-----------|---------|----------|
| 試験体 A | 280 | 60 | 0.3 | 0.09 | 0.88 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.3 |
| 試験体 B | 240 | 36 | 0.3 | 0.08 | 0.88 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 0.9 |

Kc：初期剛性

Ky：第2剛性

Ku：第3剛性

Dc：ひび割れ変位

Dy：降伏変位

α および α' ：除荷剛性低下係数

β ：スリップ剛性低下係数

γ ：スリップ剛性硬化係数

単位：剛性 (tf/cm)、変位 (cm)

b) 履歴曲線

図4(a), (b)に解析により得られたせん断力と水平変位の関係を実験結果と併せて示す。

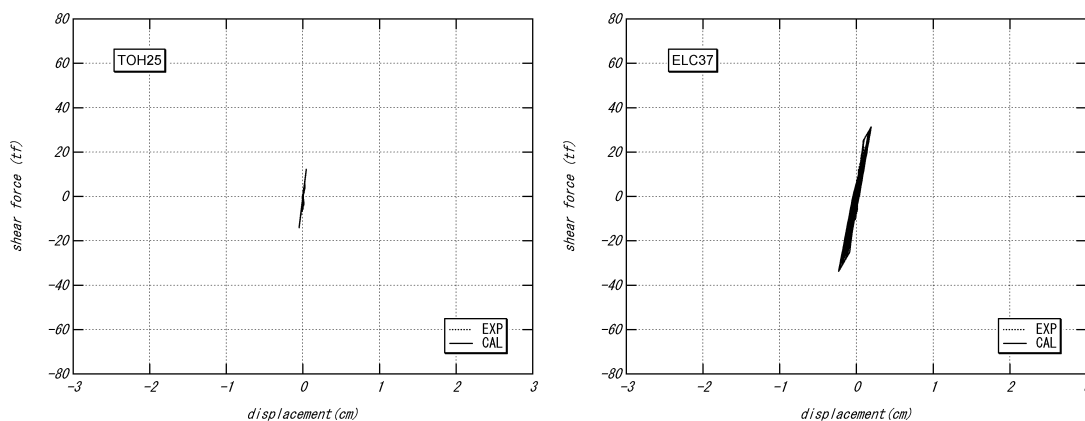


図4(a) 履歴曲線 (試験体A)

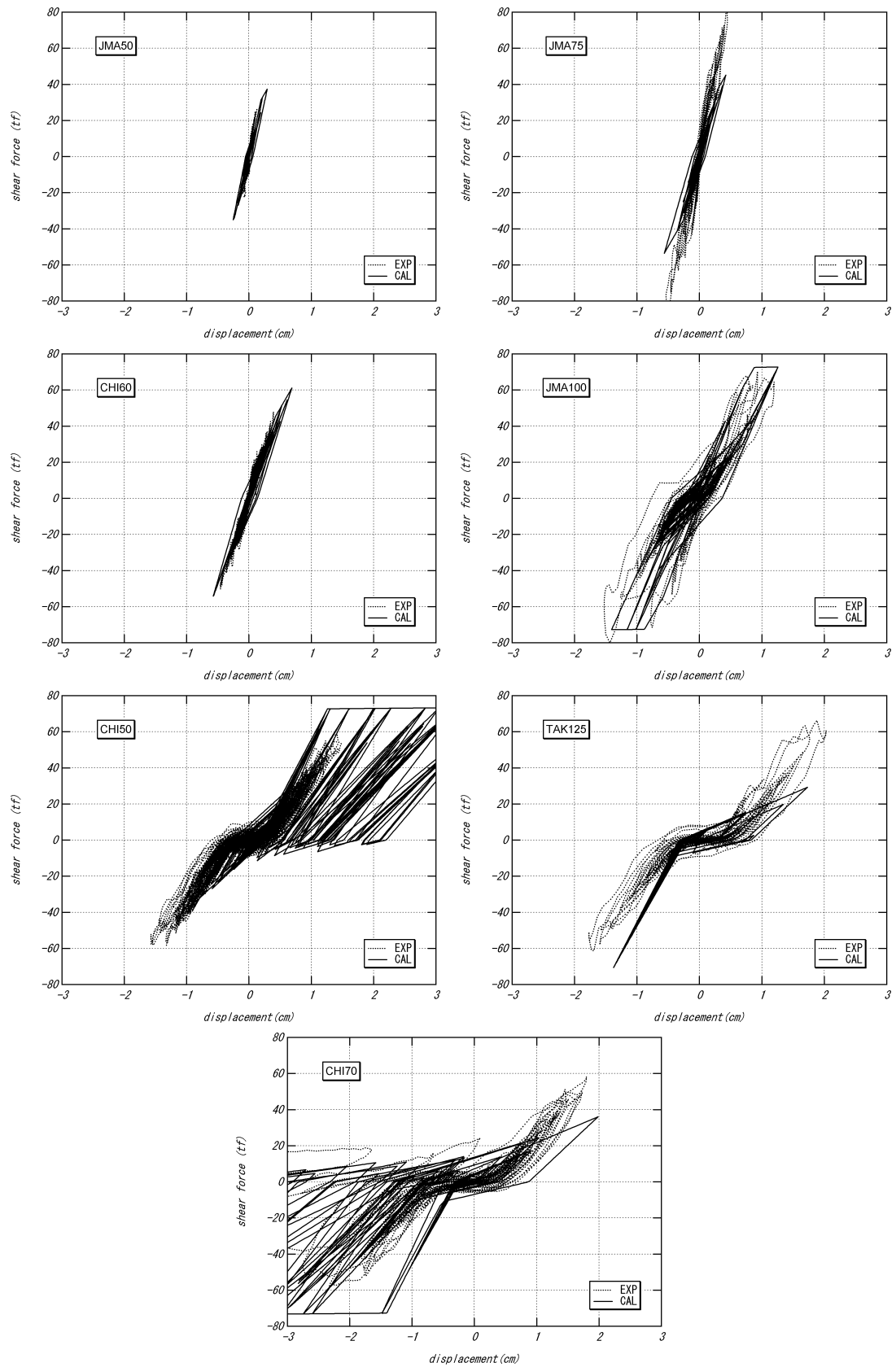


図 4 (a) 履歴曲線 (試験体 A)

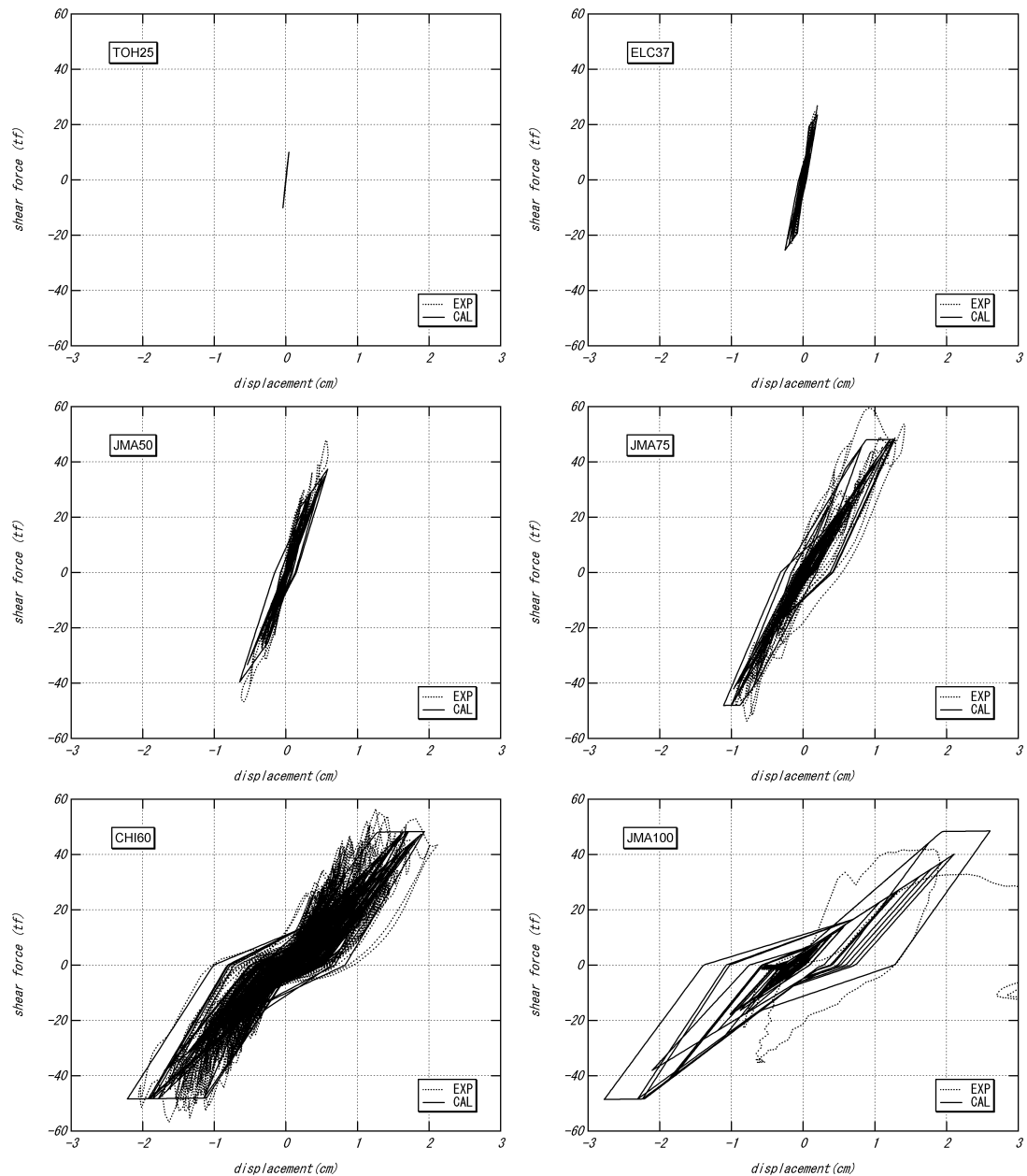


図 4 (b) 履歴曲線 (試験体 B)

b) 応答変位

図 5 (a), (b)に、解析より得られた応答変位の時刻歴を実験結果と併せて示す。解析時における誤差は、後の入力になるほど蓄積されて大きくなるので、試験体が最大耐力に達した時までの地震波 (試験体 A が JMA100 までの 6 波、試験体 B が JMA75 までの 4 波) について、全時刻における応答と、最大応答付近を 5 秒ずつ拡大したグラフを示す。

試験体 B は A に比べると解析結果と実験結果の適合具合が良い。これは、曲げ変形が大きいことで 1 次モードが試験体 A よりも卓越し、1 自由度系モデルとの適合が良かったためである。

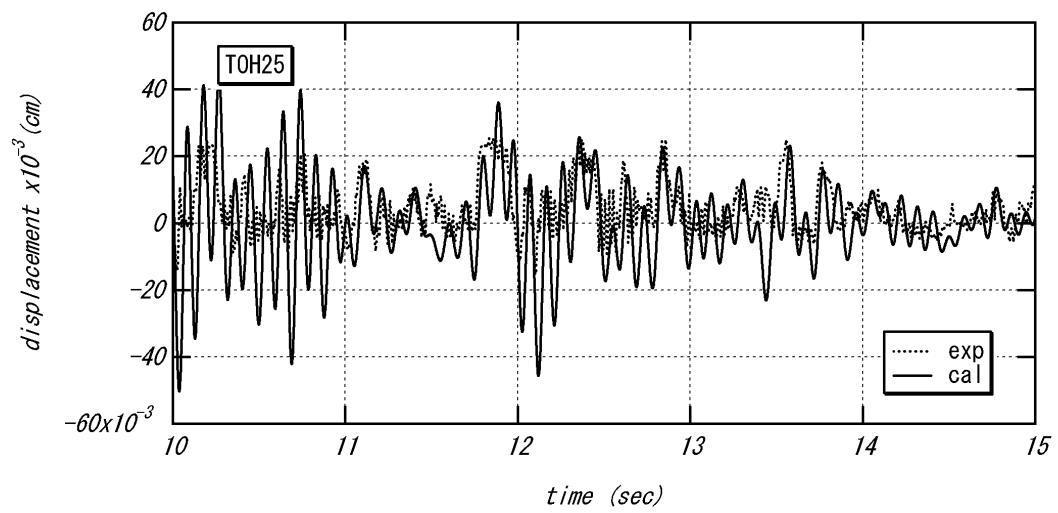
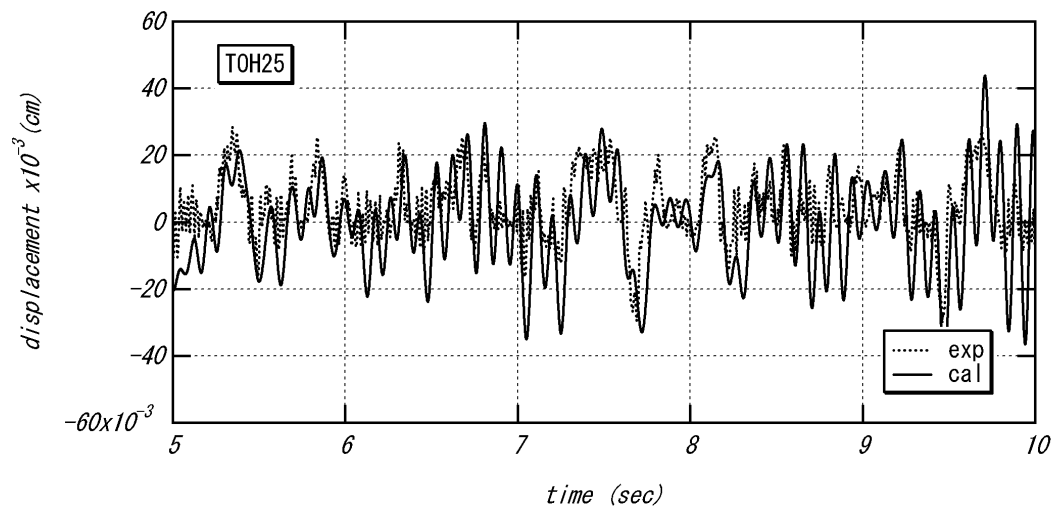
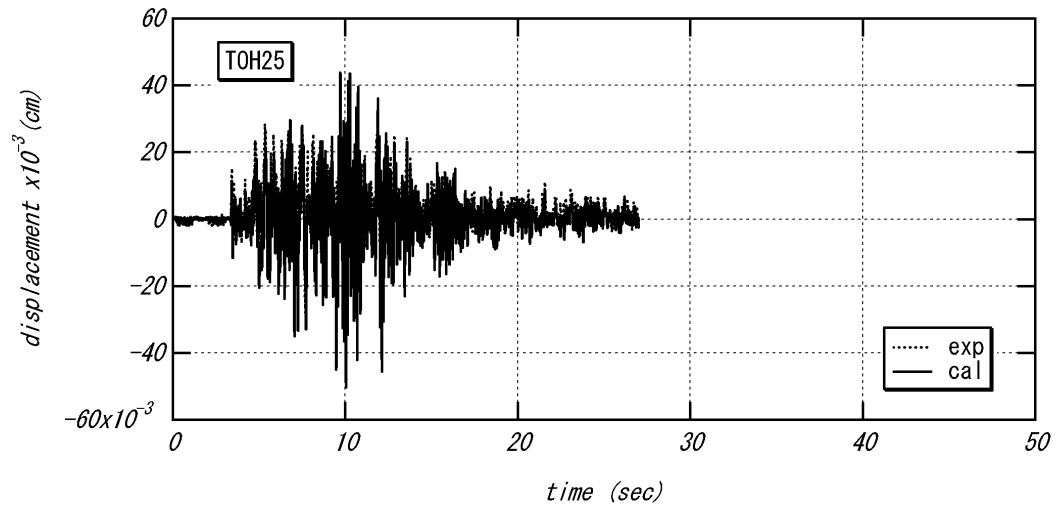


図 5 (a) 応答変位の時刻歴 (試験体 A)

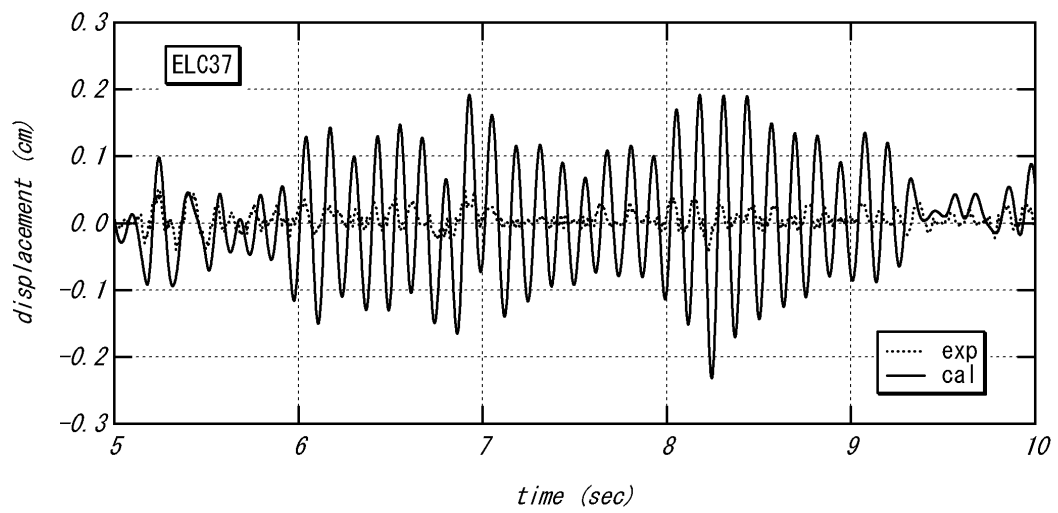
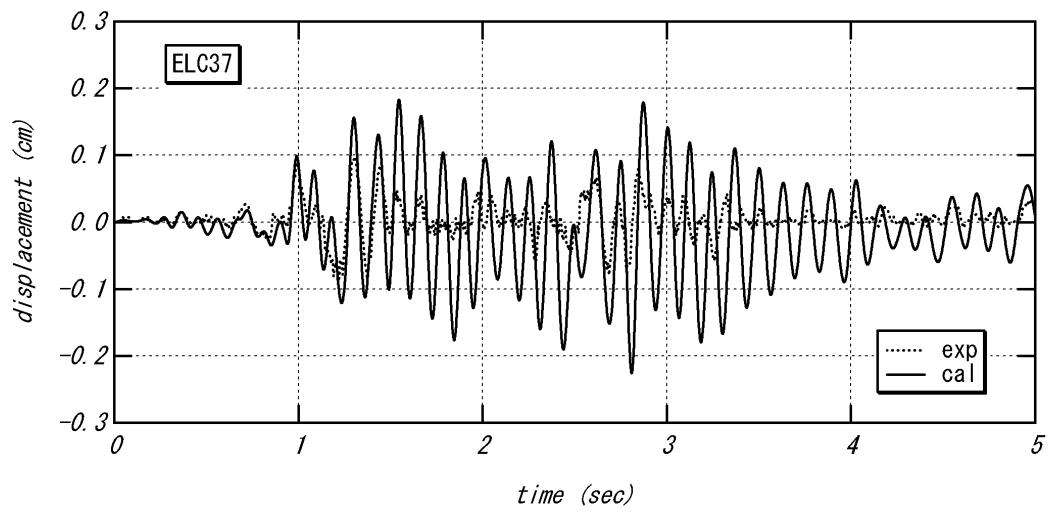
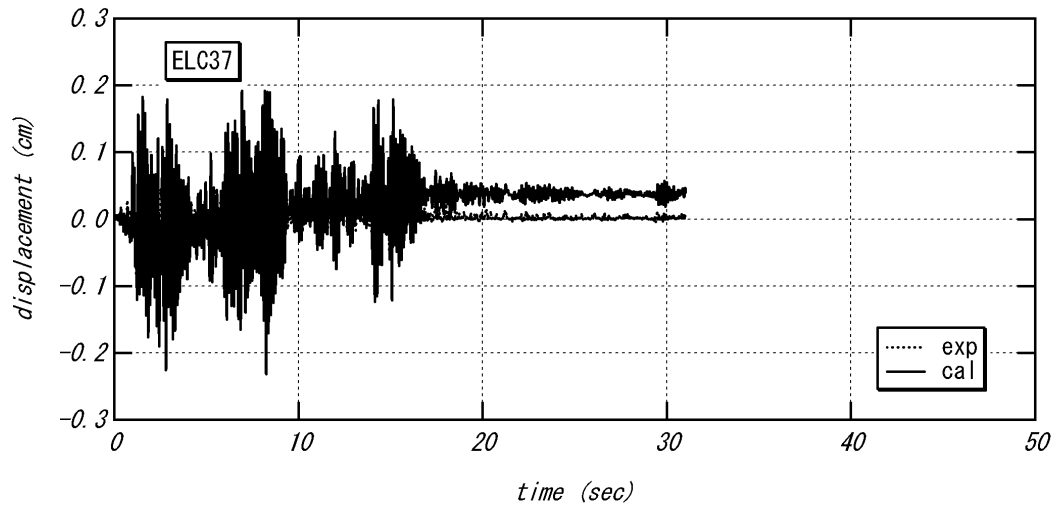


図 5 (a) 応答変位の時刻歴 (試験体 A)

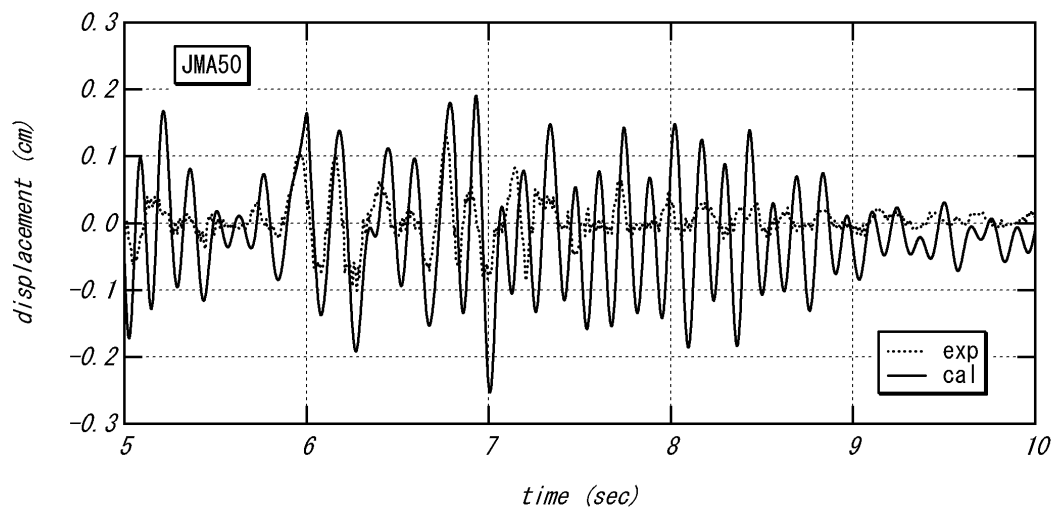
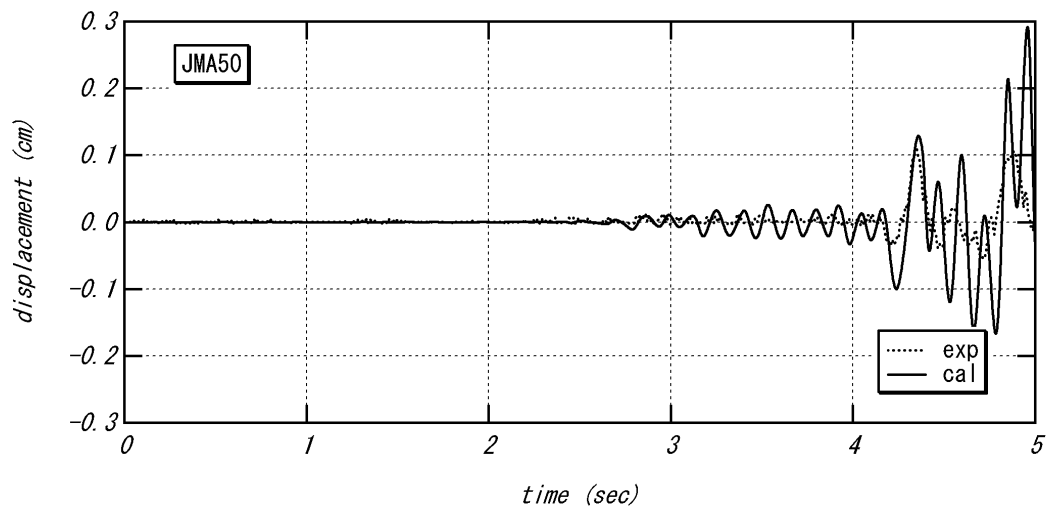
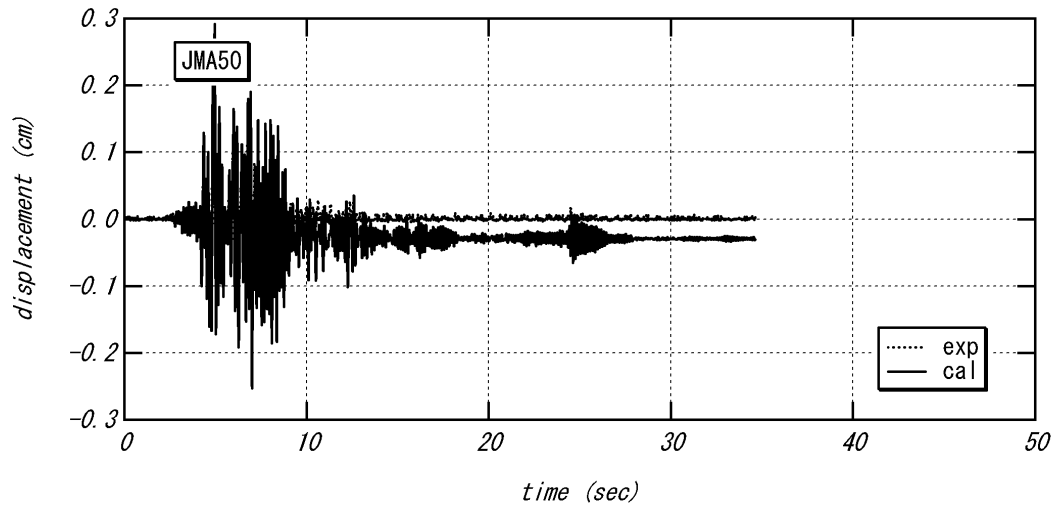


図 5 (a) 応答変位の時刻歴 (試験体 A)

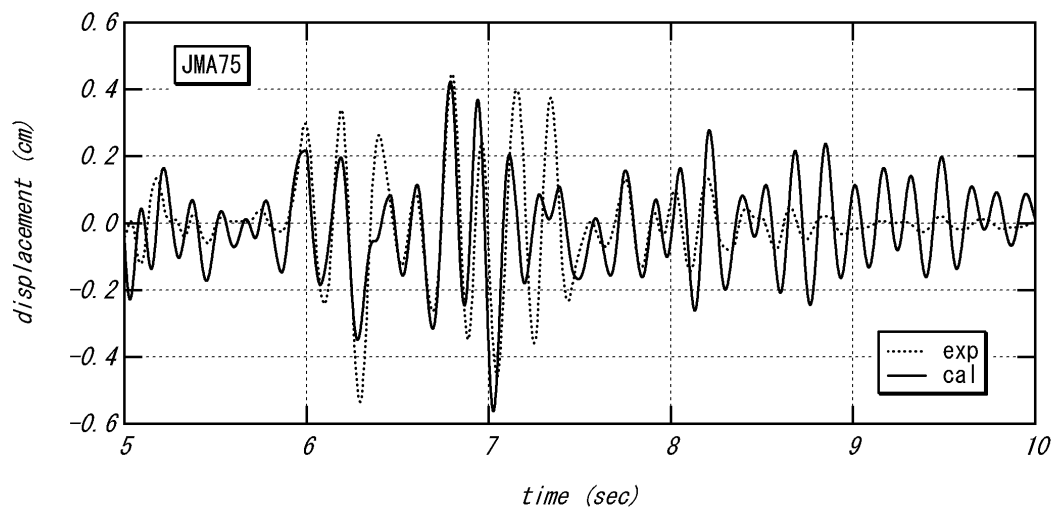
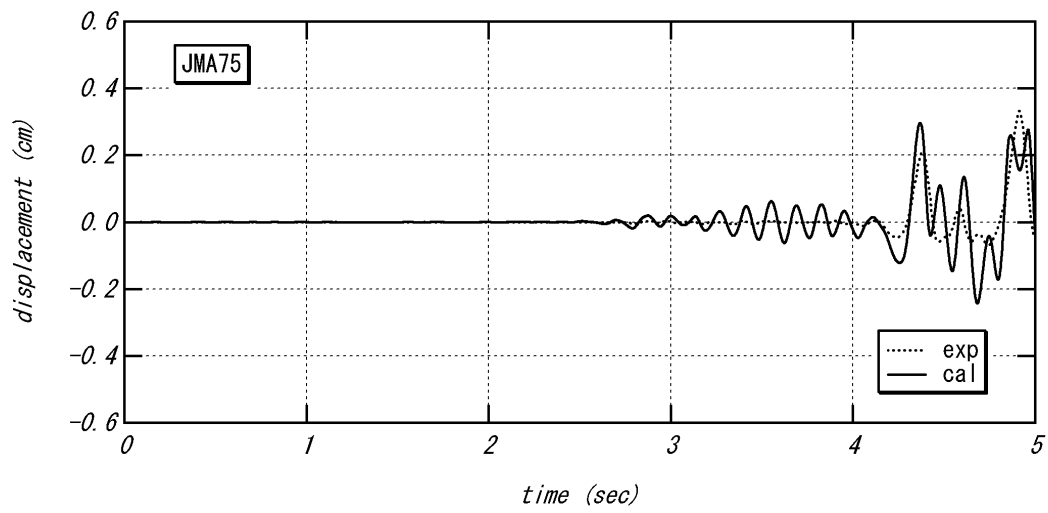
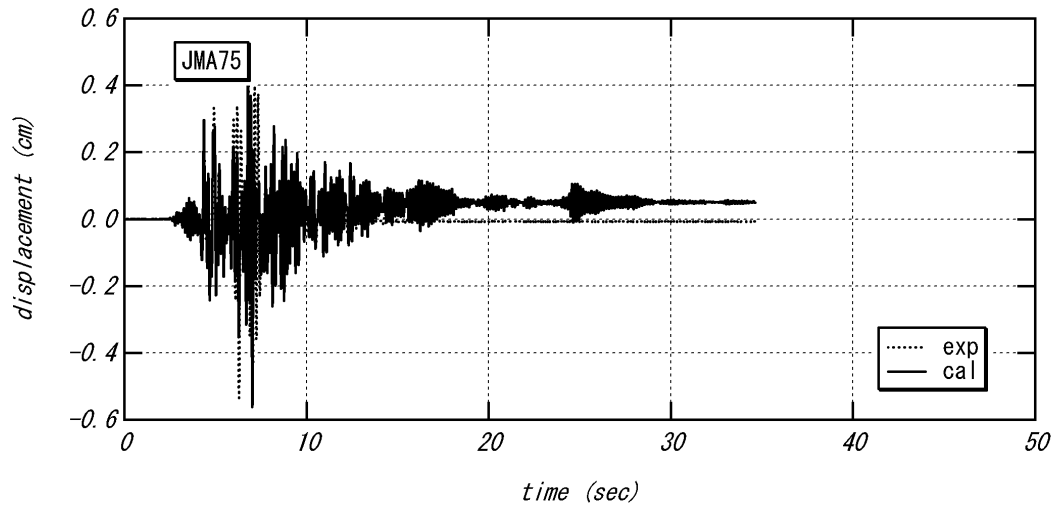


図 5 (a) 応答変位の時刻歴 (試験体 A)

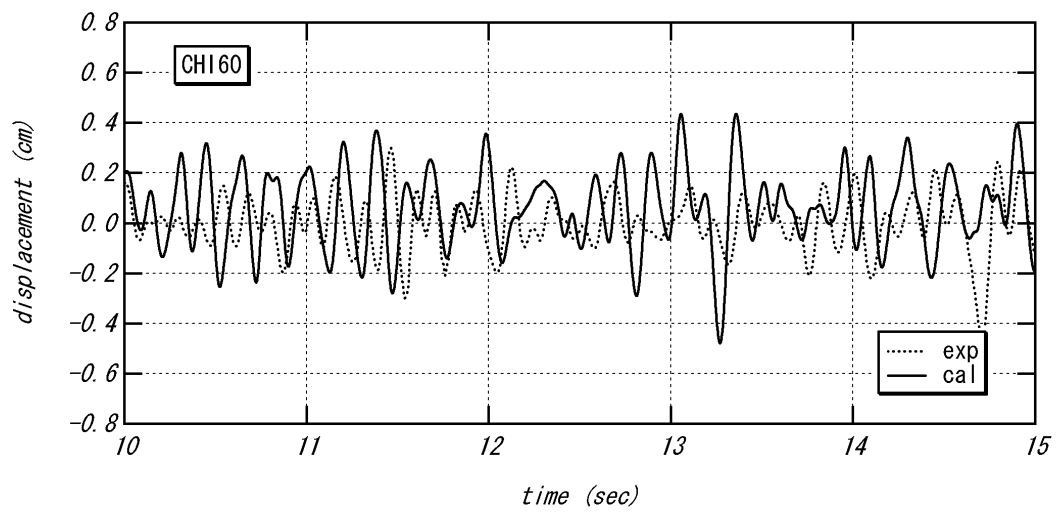
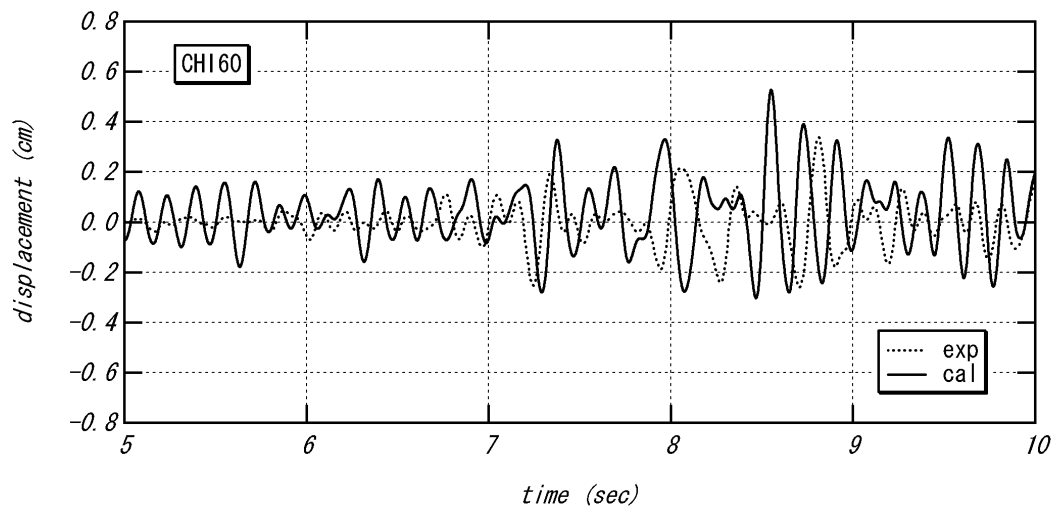
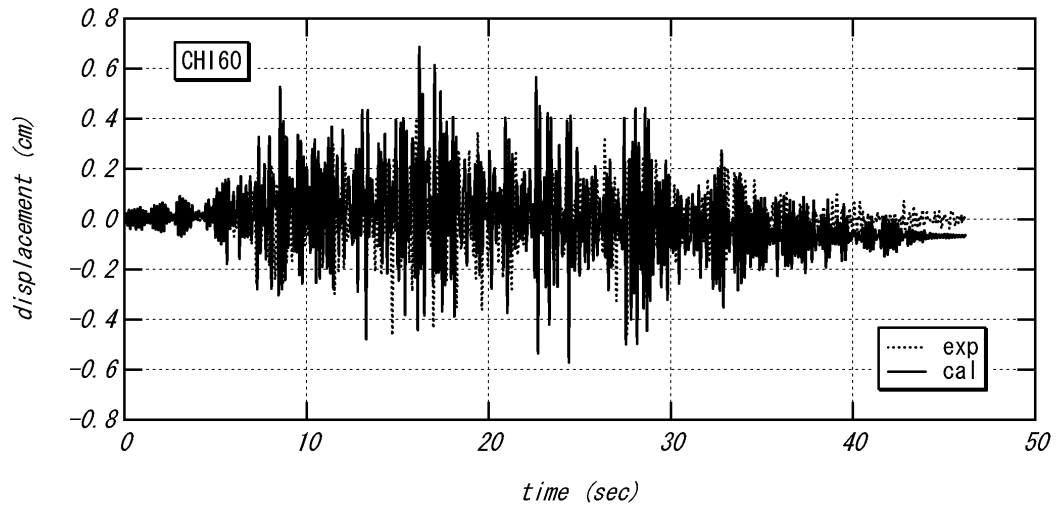


図 5 (a) 応答変位の時刻歴 (試験体 A)

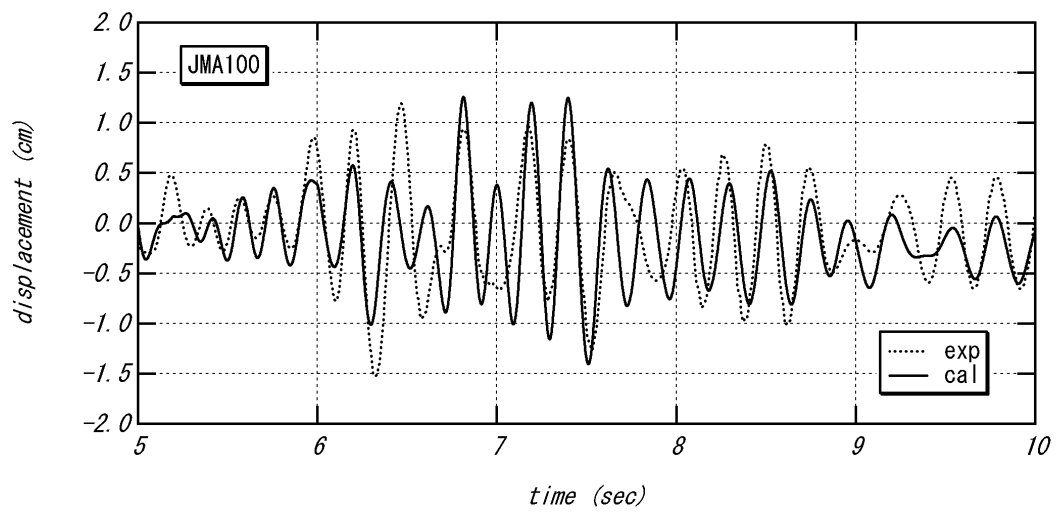
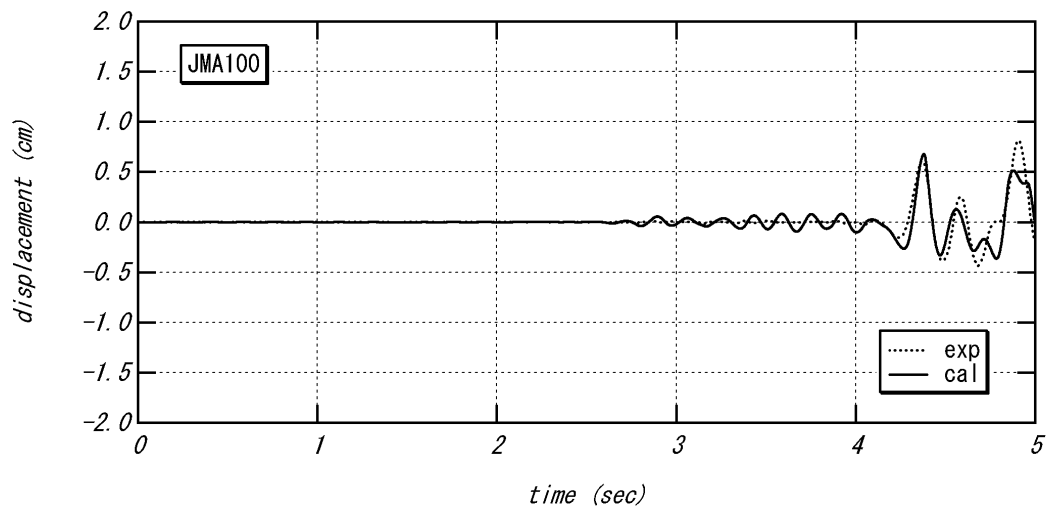
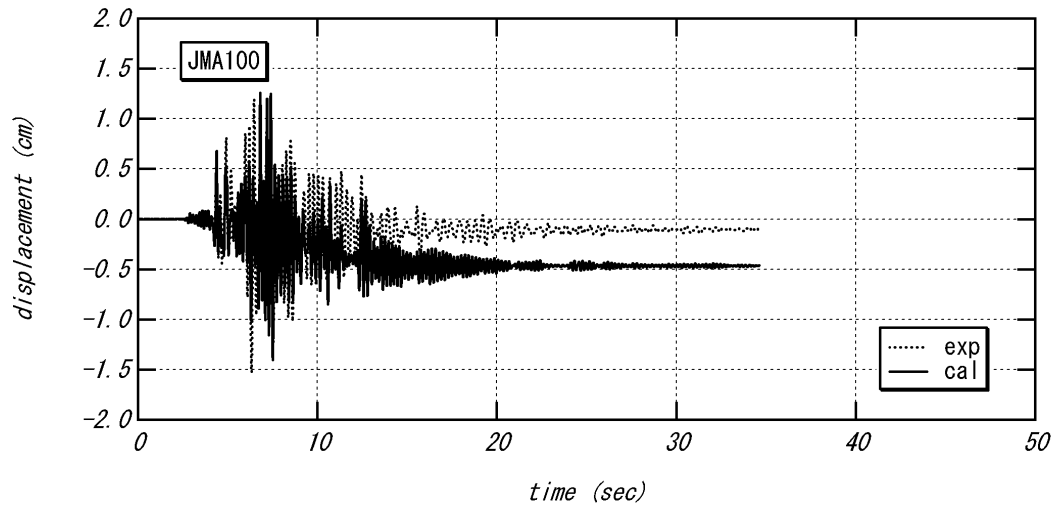


図 5 (a) 応答変位の時刻歴 (試験体 A)

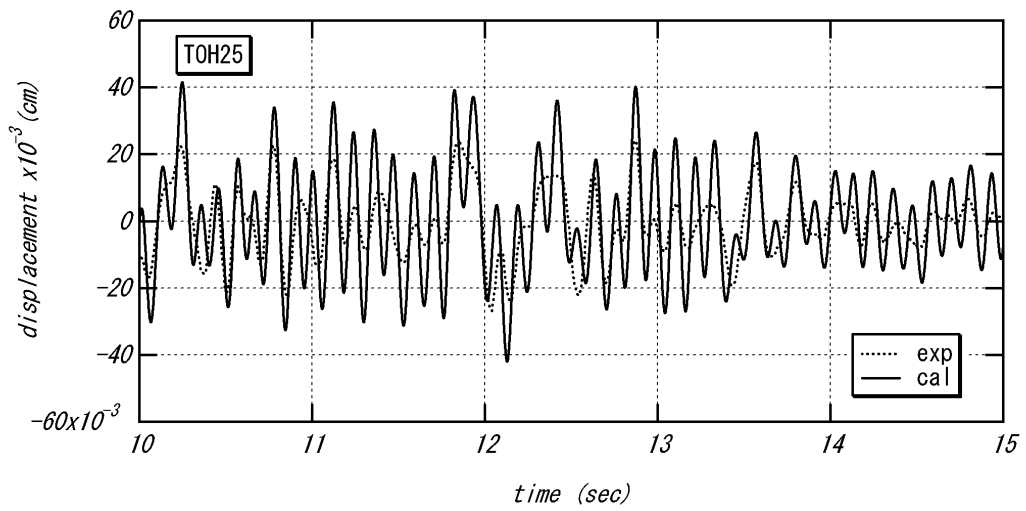
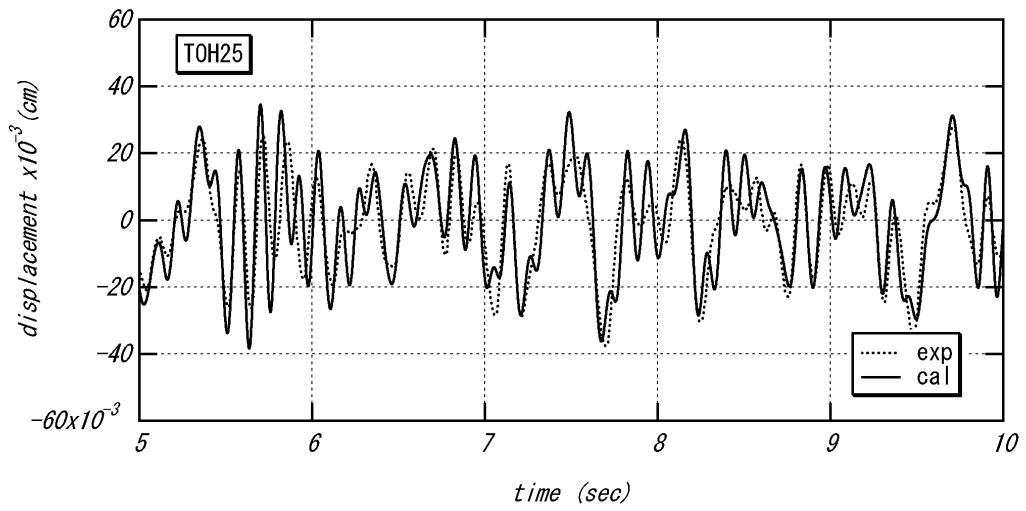
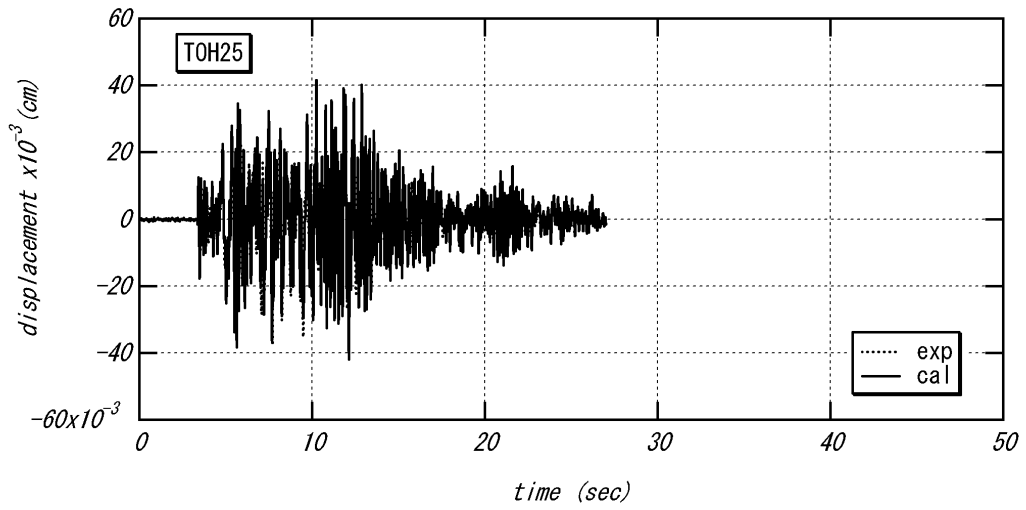


図 5 (b) 応答変位の時刻歴 (試験体 B)

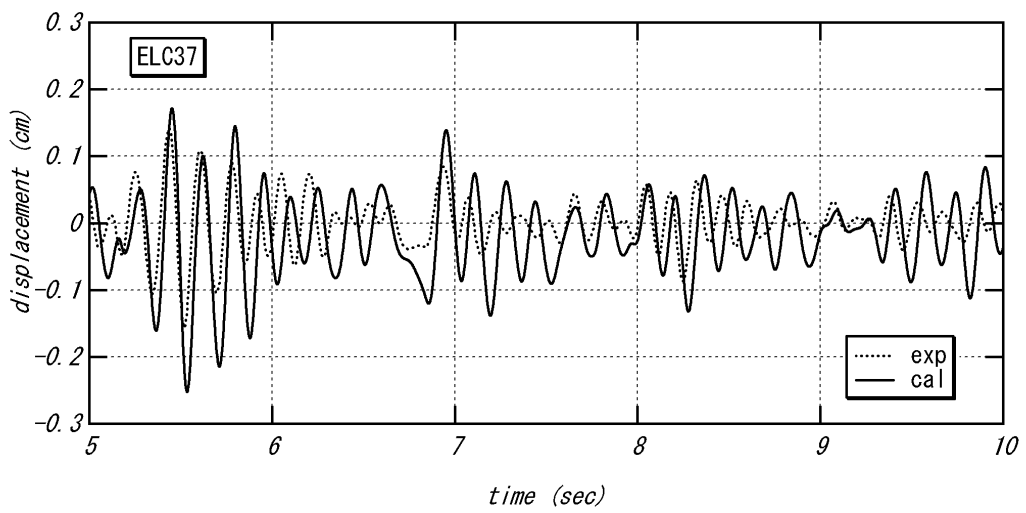
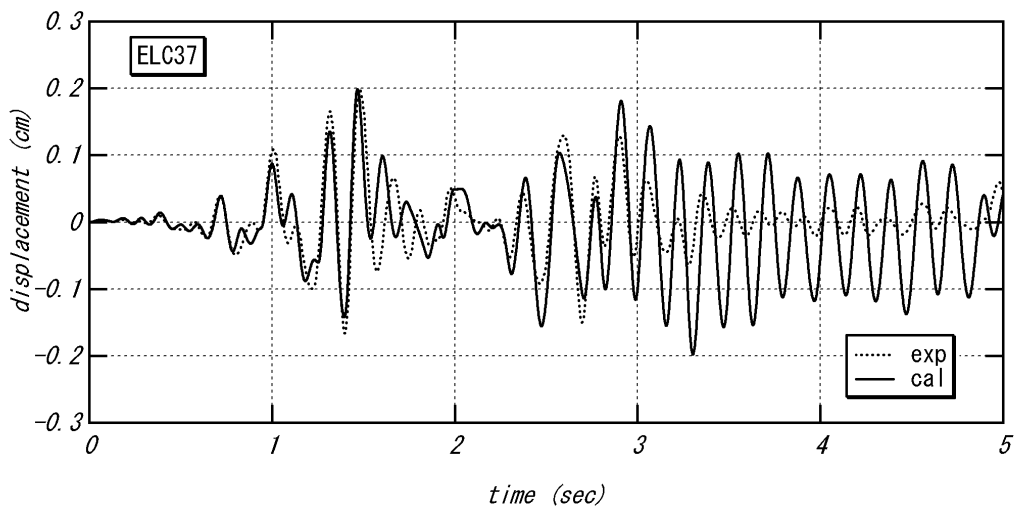
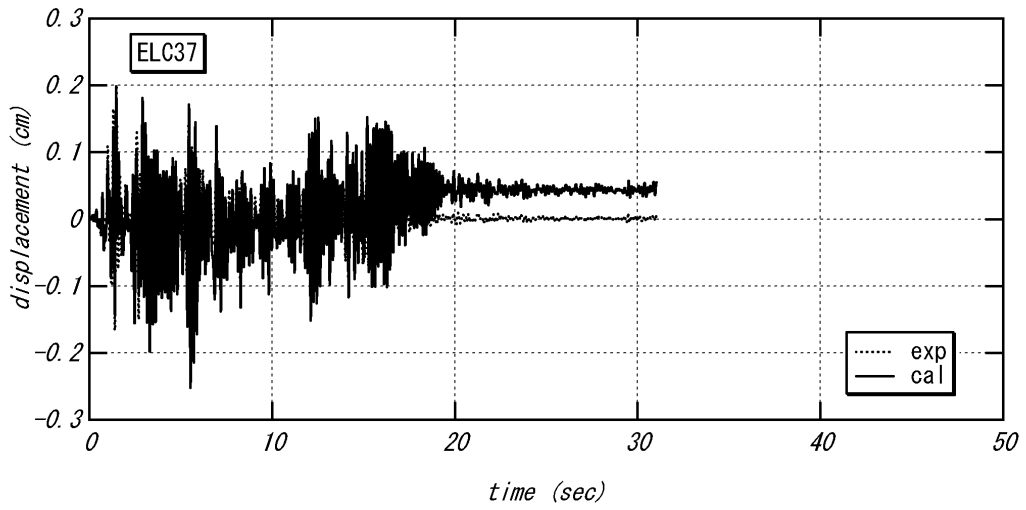


図 5 (b) 応答変位の時刻歴 (試験体 B)

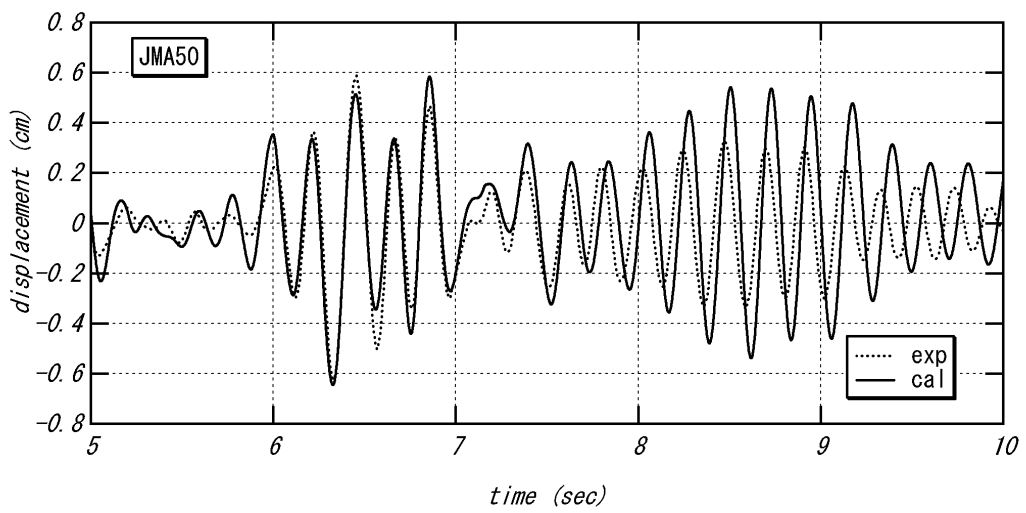
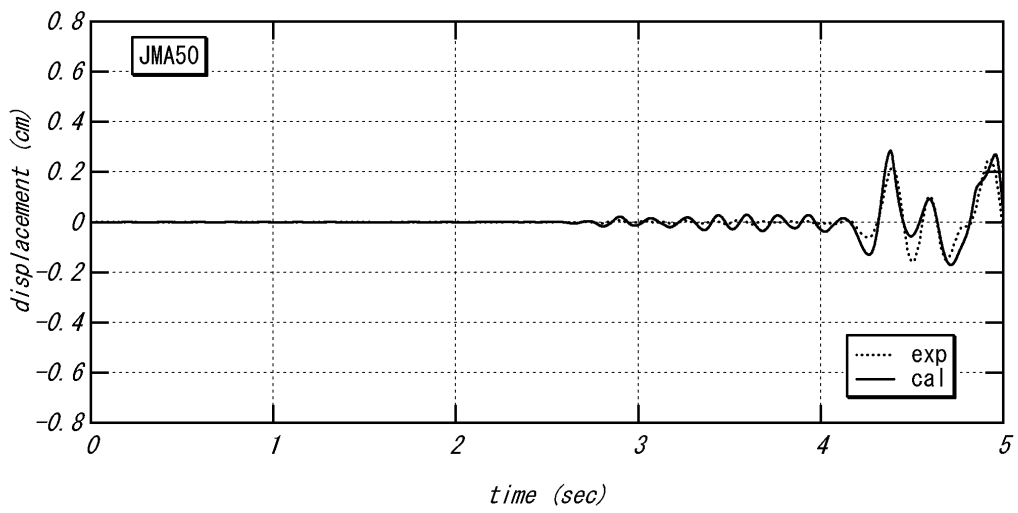
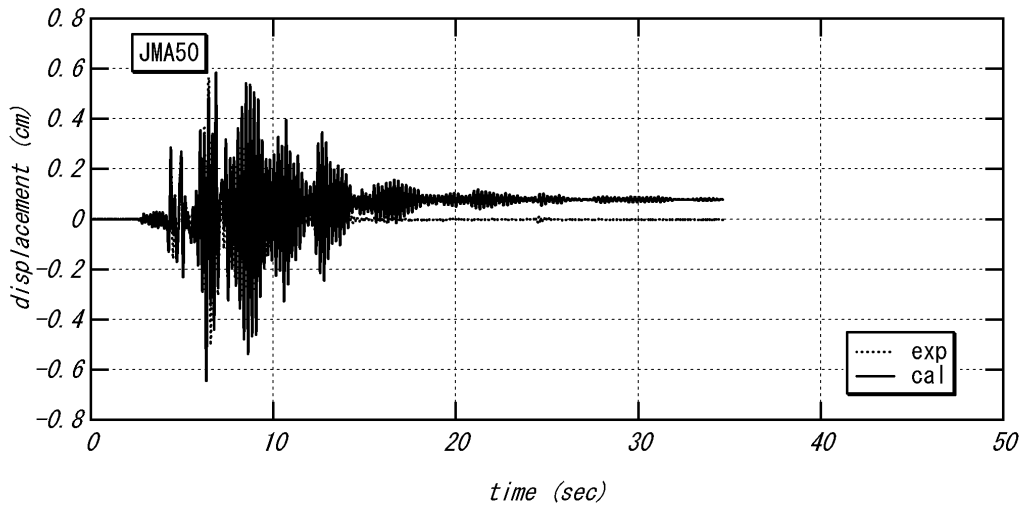


図 5 (b) 応答変位の時刻歴 (試験体 B)

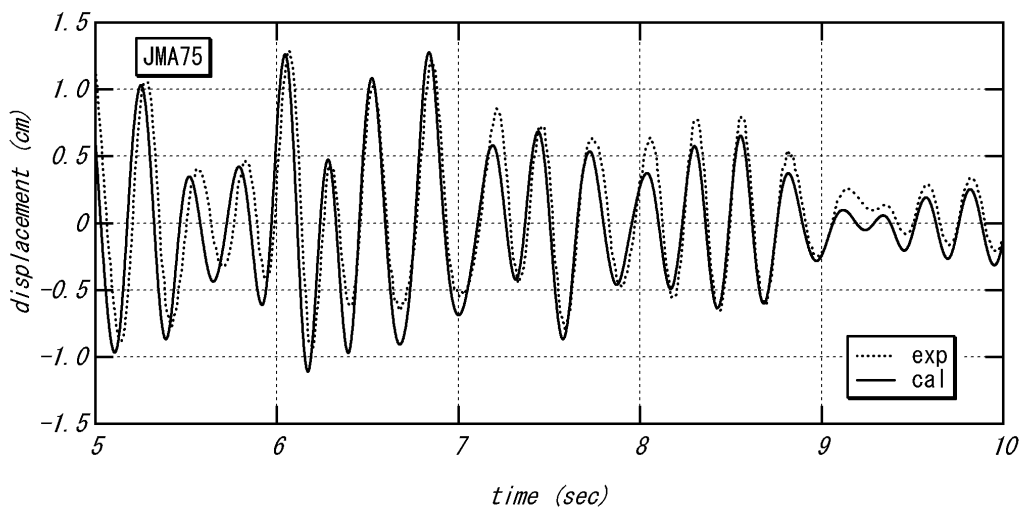
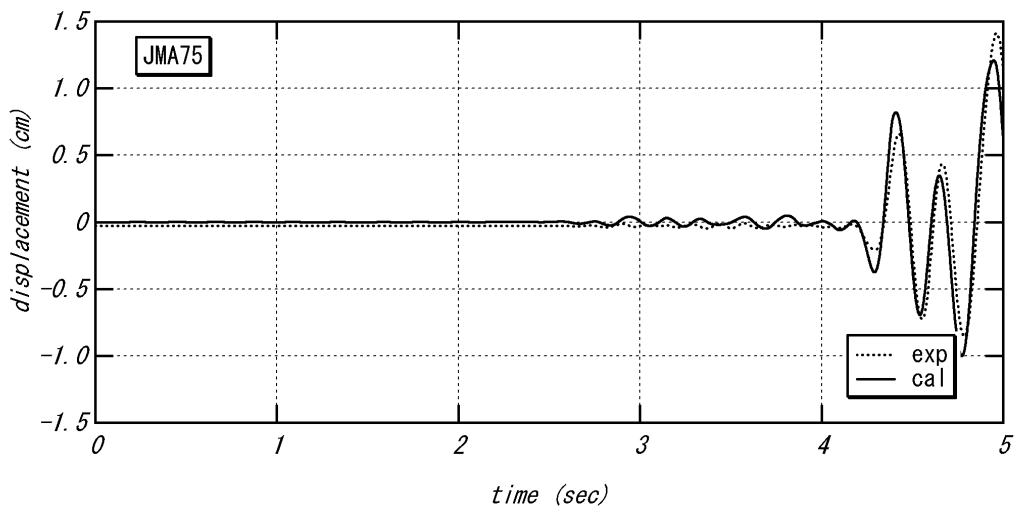
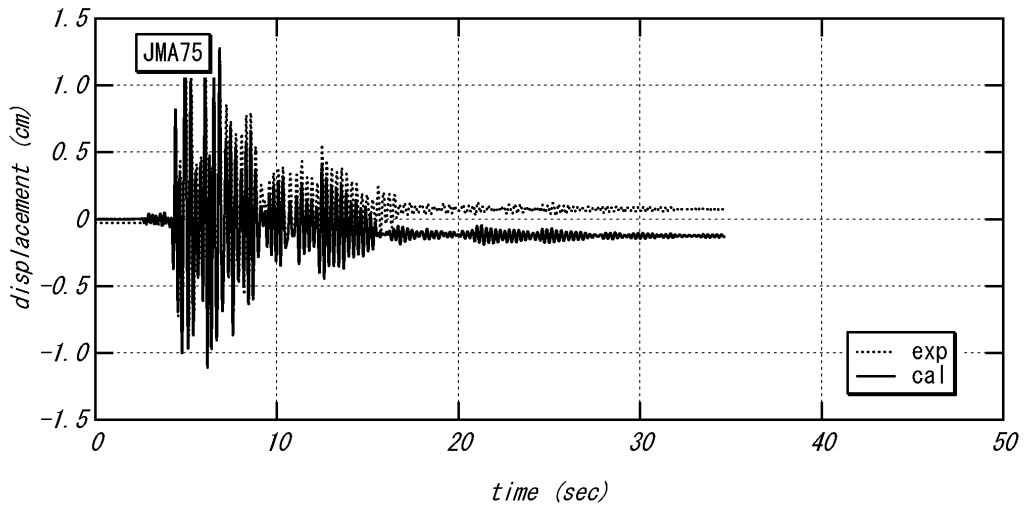


図 5 (b) 応答変位の時刻歴 (試験体 B)

c) 解析のまとめ

TOH25 では試験体 A、B ともに解析を弾性範囲に収めた。結果、実験値とほぼ一致した。ELC3 では試験体 A、B ともに解析がひび割れ点に達するようにした。実験結果と比較すると、解析の方が実験よりも応答が大きくなった。これは解析モデルの第 2 勾配が、実験で得られた S 字形の履歴をうまく近似できていないためである。

両試験体とも JMA50 でもこの傾向が見られた。その原因は解析時に定める第 2 勾配にある。実験で JMA50、JMA75 の地震波を入力した結果、同じ S 字形でも、解析の第 2 勾配にあたる部分における剛性の変化の仕方が ELC37 とは異なったものになったが、それに対して、解析ではいずれかの場合に合わせて一つの勾配しか定められない。したがって、第 2 勾配の定め方によって近似が良くなる地震波とそうでない地震波が出てきた。そこで、今回は試験体 A では JMA100、試験体 B では JMA75 での近似が良くなるように解析を行った。これは、その 2 つが試験体 A、B が最大耐力に達し降伏したと推測される地震波だからである。

解析でも試験体 A は JMA100 で、試験体 B は JMA75 で降伏点に達するようにした。実験値との比較において、S 字形の履歴を示している場合よりも良好な適合を示す結果となった。その理由にはこの地震波で良い近似が得られるようにしたことと、S 字形が崩れて直線状に近くなり、TAKEDA-SLIP モデルで近似し易い逆 S 字形に移行したことが挙げられる。

また、チリの地震波を用いた解析では周期が全く実験値と一致せず、十分な比較検討を行うことが困難であった。

(d) 結論ならびに今後の課題

1) 耐震壁単体の実験結果の検討

鉄筋コンクリート造耐震壁単体を 1 自由度系にモデル化し地震応答解析を行い、振動台実験結果と解析結果を比較検討した。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- ① せん断スパン比が小さい試験体 A よりも、せん断スパン比が大きい試験体 B の方が履歴曲線、応答変位のいずれにおいても、解析との一致が良いという結果となった。
- ② 解析の結果、試験体 A の方が試験体 B よりもスリップが大きいことが分かった。これにより、履歴ループにおけるエネルギー吸収能力は試験体 A の方が低いことが確かめられた。
- ③ 実験における両試験体の応答は、弾性範囲においては S 字形であったが、降伏後は逆 S 字形へと移行し、さらに大変形時には、逆 S 字形のスリップが大きくなった。しかし、解析ではこのような変化を完全に再現することはできなかった。
- ④ TOH25 や ELC37 などの入力では応答が小さく、解析では考慮できていない様々な減衰の影響を大きく受けるために、解析では応答を大きく評価することとなった。

2) 1 自由度系地震応答解析と振動台実験結果の比較

本研究における地震応答解析は良好な結果を得たとは言えず、解析誤差を小さくするためのさらなる改善が必要である。また、TAKEDA-SLIP モデル以外の履歴モデルを用い

た解析を行うことも課題であり、より適合精度の高い耐震壁の復元力特性モデルの構築が望まれる。来年度は、より適合精度の高い耐震壁の復元力特性モデルの構築を目的として、振動台実験と同型、同配筋の耐震壁の静的載荷実験を実施する予定である。

(e) 引用文献

- 1) 小出敏弘，小谷俊介，永井潔：鉄筋コンクリート構造の設計用地震力，構造工学論文集，Vol. 31B，1985.

(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

平成15年度は、業務題目を「鉄筋コンクリート造連層耐震壁の動的挙動と静的挙動の比較に関する研究」として行う。

鉄筋コンクリート造連層耐震壁の動的耐震性能と静的耐震性能を比較・検討することを目的とした静的加力実験を実施する。2002年度に実施した振動台実験に用いたものと形状・寸法および配筋が同一の試験体を2体製作し、せん断スパン比を実験変数とする。

次に、静的実験結果に基づいて当該耐震壁の復元力特性モデルを構築する。

さらに、モデル化した復元力特性を用いた地震応答解析により2002年度に実施した震動台実験結果のシミュレーションを試み、動的挙動に及ぼす静的復元力特性の影響因子を検討する。