

振動台加振実験による鋼構造2層純骨組の弾塑性地震応答の推定

木曾 翔太*・岩井 哲**

(平成20年10月31日受理)

Estimation of Elastic-Plastic Earthquake Response of Two-Story Steel Pure Frames under Shaking Table Tests

Shota KISO and Satoshi IWAI

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

The simple one-story and two-story steel pure-frame specimens were tested under the earthquake excitation increasing the maximum acceleration level, using the shaking table. The test structures consist of two columns with rigid roof and rigid floor. This research aims to investigate how the characteristic of the input earthquake wave changes the elast-plastic behavior of the frame specimen, compared with the results of the experiment and dynamic earthquake response analysis. Two types of analytical model of restoring force characteristics are employed, which are bi-linear and tri-linear models, to compare the maximum load-carrying capacity and the maximum story-displacement of the test model. It is found that the maximum acceleration level, in which the story-displacement response of the frame get into plastic range, is influenced by the periodical property of the input earthquake wave.

Key Words: steel pure frame, shaking table, earthquake wave pattern, elasto-plastic response analysis, restoring-force characteristics

1. 研究目的

地震に対する構造物の安全性を検討するためには、動的
外乱を受ける構造物の挙動を正確に把握することが重要と
なる。当研究室で、鋼構造骨組の単純な1質点系モデル⁽¹⁾
と2質点系モデル⁽²⁾の小模型試験体に対して、波形と最
大レベルの異なる地震波を加速度制御で振動台に入力し
応答を調べてきた。その中で、試験体の固有周期と、地震波
の速度応答スペクトルの卓越周期成分が近いとき、小さい
加速度で塑性変形が生じると考えられる傾向が見られた。
本研究では、地震波の特性が構造物の応答に与える影響に

引き続き注目し、地震動の波形や継続時間など特性の違い
によって柱材に塑性変形が起る最大加速度にどの程度の差
異が現れるかについて検証した。また、1, 2質点系モデル
の違いで同じ入力加速度レベルでの応答にどの程度違いが
現れるかについて比較を行い、その関連性を実験的に検証
した。さらに、これらの実験挙動に対して弾塑性応答解析
プログラムを使用して、鋼骨組の地震時応答がどの程度解
析的に推定が可能かを検証した。特に解析上の復元力特性
のバイリニア、トリリニアのモデル設定について、実験と
の比較から、より精度の高い推定が行えることを目指して
検討を行った。

* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

** 広島工業大学工学部建築工学科

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は2種類とし、柱と剛な屋根板及び剛な床板より構成される1スパンの純骨組みで、1層と2層のものを用意した。2層試験体の形状と実験計測装置の設置状況を図1に示す。自由振動実験より求めた各試験体の減衰定数と1次固有周期を表1に示す。柱材にはすべて幅100mm、せい2.3mmのSS400材を使用し、柱の内法高さを150mmとした。柱材の引張試験結果を表2に、応力-ひずみ関係を図2に示す。これまでのものと違い明確な降伏棚をもたない鋼材であった。40mm厚の屋根・床板の重量は80kgで、柱に比して剛なものである。柱は各層で上下端を40mm角の鋼ブロックを用いてM10ボルト2本で屋根板及び床板に固定している。歪ゲージ貼付位置を図3に示す。各柱の作用せん断力を求めるために、柱中央高さから、内法高さの1/4ずつ上と下の位置に、柱材1本につき両面で計4枚の弾性歪ゲージを貼付した。また柱の降伏を判定するため、柱の上下端からそれぞれ7.5mmの位置に片面に1枚ずつ、2つの柱で計4ヶ所に塑性歪ゲージを貼付して歪を計測した。本来は両面に貼付すべきであるが、計測に使用するブリッジボックスの数に制限があり、片面だけを計測している。左右の柱両側での復元力特性と、片面側の柱から得られた復元力特性を弾性域、塑性域について比較したが、大きな差は見られなかった。

2.2 振動台と計測方法

実験に用いた振動装置は、広島工業大学耐震防災研究棟の水平・垂直同時2軸振動試験機である。主な性能を表3



写真1. 試験体設置状況

表1. 各試験体の減衰定数と1次固有周期

	減衰定数	固有周期(s)
1層試験体	0.0008	0.185
2層試験体	0.0019	0.263

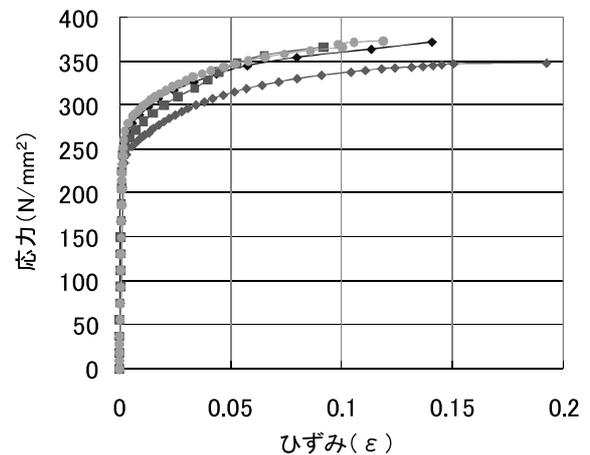


図2. 応力-ひずみ関係

表2. 柱材の引張試験結果

	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏比(%)	伸び(%)
柱材	187000	305	365	89	34

0.2% offset

表3. 振動試験機仕様

最大積載重量	2tons
加振力(水平方向)	5tons
最大振幅(水平方向)	±50mm
最大加速度(水平方向)	3G
テーブル寸法	1.5×1.5m

表4. レーザー変位計仕様

	基準距離(mm)	測定範囲(mm)
LB-300	300	±100
LK-500	350	±100

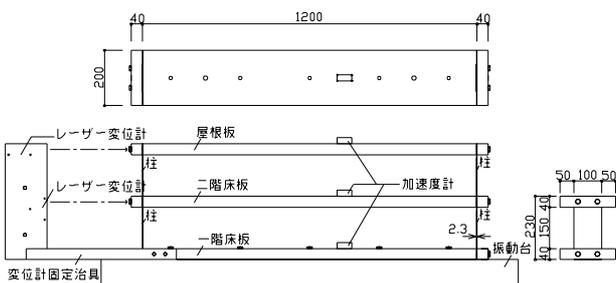


図1. 2層試験体形状及び動的载荷実験計測の設置図

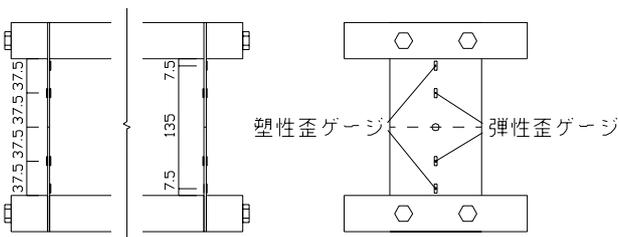


図3. 歪ゲージ貼付位置図

に示す。試験体の1層と2層の層間変位はレーザー変位計 (KEYENCE社製, LB-300, LK-500) を各屋根板と平行に設置し, 非接触で計測した。レーザー変位計の計測範囲の性能を表4に示す。また屋根板及び床板の中央上部に5G (Gは重力加速度) 用の加速度計を設置した。2層試験体の設置状況を写真1に示す。なお振動台は所定の性能を満足せず, 地震波の加速度レベルを上げるとシステムダウンする場合があった。そこで, どの程度まで最大入力レベルまで加振可能なのか, また入力した地震波を台上で正確に再現できているかの検証も行った

2.3 入力地震波

入力地震波は1978年宮城県沖地震の開北橋 (NS成分, 最大加速度150Gal), 1968年十勝沖地震の八戸 (NS成分, 最大加速度231Gal) の実地震波2種類と, 財団法人日本建築センターより提供されている模擬地震波BCJ-L1の計3種類である。各地震波の加速度波形及び, 速度応答スペクトルを図4に示す。入力は, 試験体の柱が塑性域で応答を示すまで, 地震波の最大加速度レベルを50Gal毎に段階的に上げるように設定した。更に, 模擬地震波BCJ-L1において, 加速度レベルを漸増段階的に上げたことによる試験体の累積塑性応答に示す影響を調べるため, 試験体が塑性変形を生じた最大加速度レベルで入力として一気に加振し, 段階的に上げた時の応答と比較した。

3. 解析方法

弾塑性応答解析は直列質点系プログラムAnswer (有限会社ストラクチャー) を使用した。応答解析を行うのに必要なデータは, 試験体の質量・階高・減衰定数・剛性, および入力地震波の加速度履歴である。本研究では, 実験により振動台上で計測された地動加速度波と加速度レベルを, 入力に用いている。

3.1 復元力特性モデルの種類

復元力特性モデルは, バイリニア型とトリリニア型の2種類を用いた。バイリニア型, トリリニア型のモデルの概

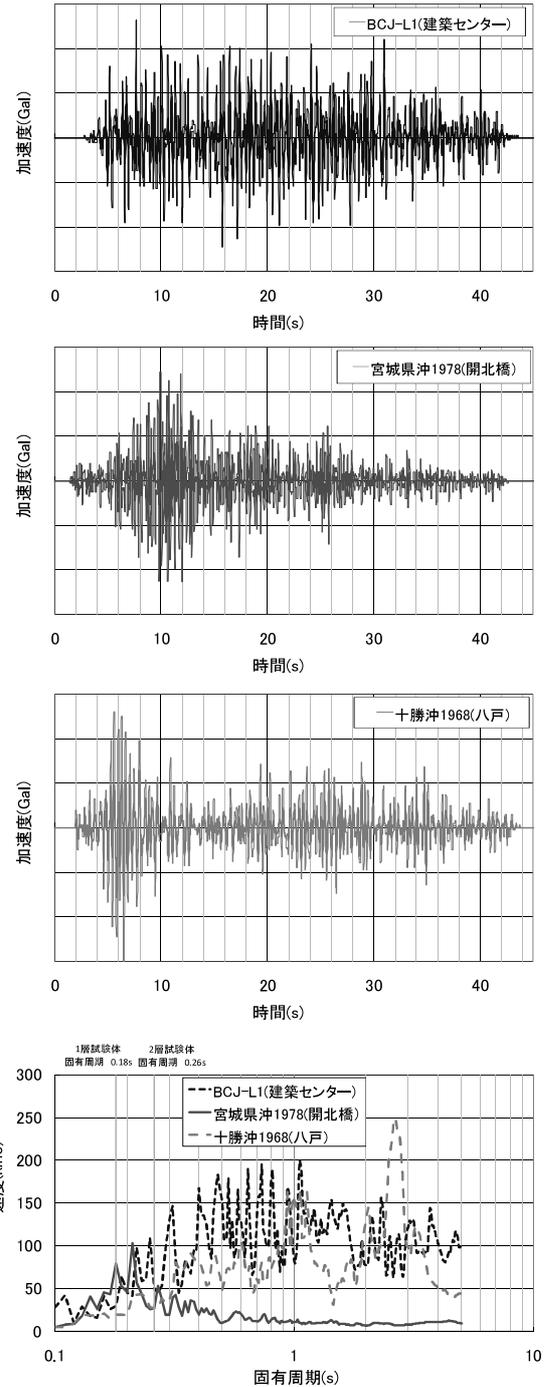


図4. 各地震波の加速度波形及び速度応答スペクトル

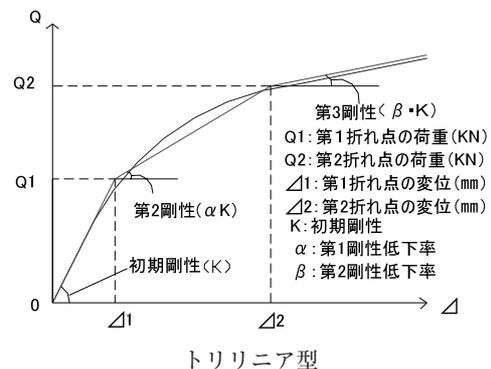
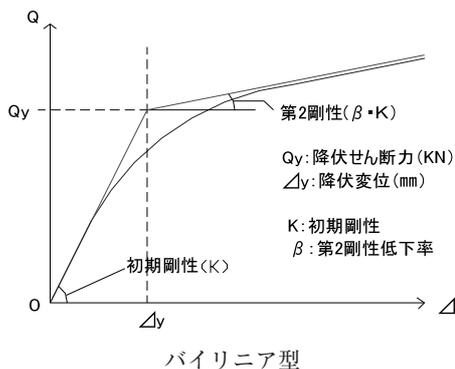


図5. 復元力特性モデルの概要

要を図5に示す。バイリニア型は、弾性剛性と、塑性後の剛性の2種の勾配で表わされる単純化したモデルである。トリリニア型は、弾性剛性と塑性後剛性の間に中間の剛性勾配を加え、大変形域にいたる前の降伏時復元力の低下を表したモデルである。

3.2 バイリニア型モデルの設定

復元力特性モデルのバイリニア型の形状を決定するために、剛性に関わる要素について検討した。

まず、内法高さについて検討した。本研究での試験体の内法高さ h は、柱材と梁をボルトで固定しているため、動的外力によって固定面に開きが出る可能性がある。そこで解析での内法高さの設定を150mm, 155mm, 160mmの3種類の場合での復元力履歴曲線を実験結果と比較し、より近くなるものを探した。地震波は建築センター模擬波BCJ-L1を使用し、実験での設定加速度50Gal, 400Galで、弾性域と塑性域での応答の比較を行った。復元力履歴曲線の比較を図6に示す。これより、内法高さ H を155mmとした場合の剛性が、実験結果に近くなった。

また降伏せん断力、剛性低下率については、以下のように検討した。初期剛性 K は試験体寸法、材料強度から算

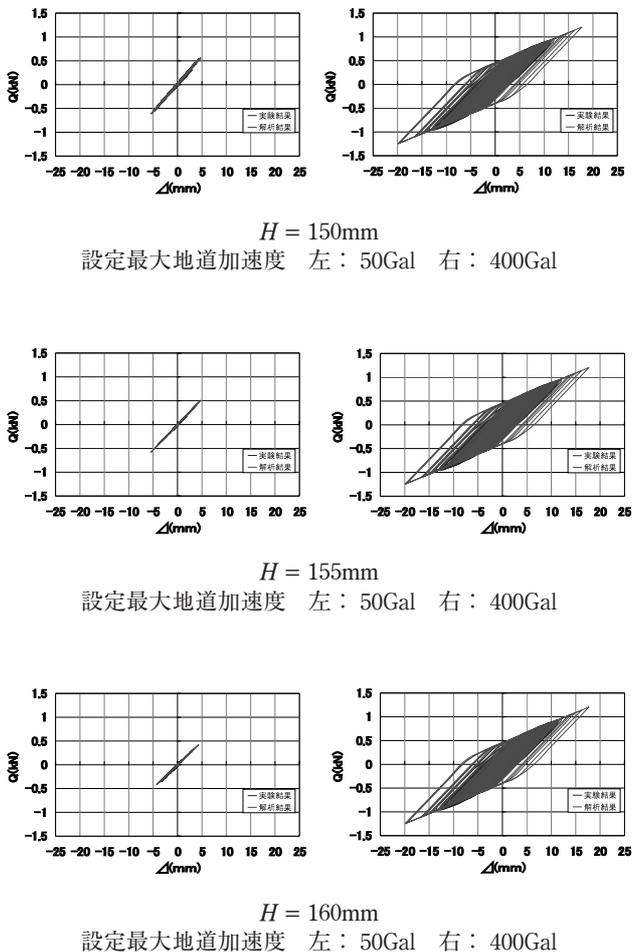


図6. 内法高さの違いによる復元力履歴曲線の比較

定した。そして降伏せん断力 Q_y を式(1)、降伏変位 Δ_y を式(2)で求めた。

$$Q_y = 2 \frac{\sigma_y B D^2}{3H} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\Delta_y}{2} = \frac{\left(\frac{Q_y}{2}\right) \times \left(\frac{H}{2}\right)^3}{3EI} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 σ_y は柱材の降伏応力、 B 、 D 、 H は試験体の幅、せい、柱の内法高さである。

これより $Q_y = 0.645\text{kN}$ が得られる。しかし、解析プログラムの制約で入力できる降伏荷重 Q_y は小数第一位までであるので0.6kN, 0.7kNの2種から選択した。また降伏後の剛性低下率 β は動的載荷実験より算定した0.3を基準に0.4, 0.5の計3種から選択した。図7の実験と解析の比較より最も対応すると考えられる設定値を $Q_y = 0.7\text{kN}$ 、 $\beta = 0.4$ を決定した。そして初期剛性 K と、降伏せん断力 $Q_y = 0.7$ より降伏変位は $\Delta_y = 6.54\text{mm}$ となる。

3.3 トリリニアモデルの設定

バイリニア型に続いて、トリリニア型の形状を決定する。トリリニア型は、第2剛性は最初の降伏が生じた値を用い、第3剛性は一般的に解析結果と実験結果の包絡する面積、つまりエネルギー量が同じになるように定める⁽³⁾。しかし今回は復元力特性をより実験値に近づけることがトリリニア型を使用する目的であるため、前章で設定したバイリニア型の設定に新たな勾配を加えることとする。

初期剛性、降伏せん断力、降伏変位、そして第3剛性で

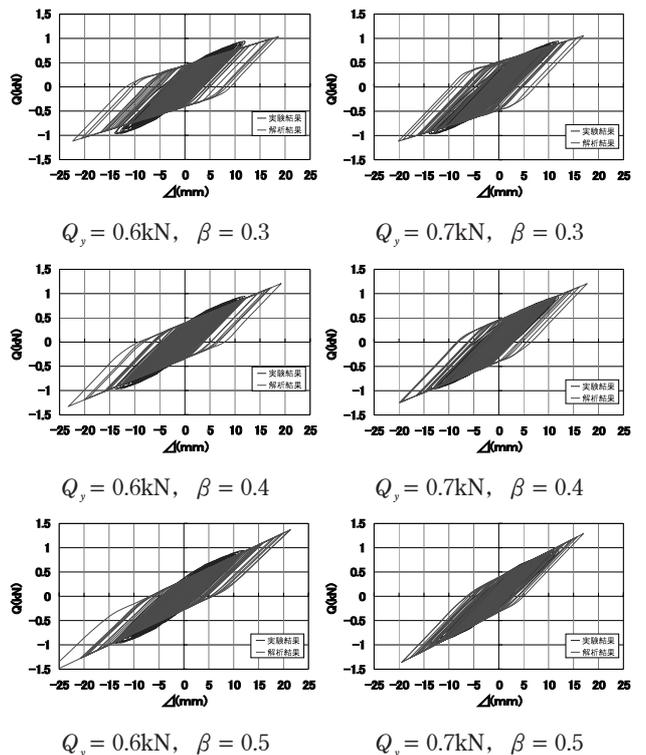


図7. 降伏せん断力、剛性低下率の比較

の剛性低下率はバイリニアと同様とした。第1折れ点のせん断力 Q_1 は、降伏せん断力 $Q_y=0.7\text{kN}$ より低い値0.3, 0.4, 0.5, 0.6の3種, そして第2折れ点のせん断力 Q_2 は、降伏せん断力より高い値0.8, 0.9, 1.0の3種で、この2つの組み合わせによる計9種類で復元力応答の比較を行った。

検討したパターンを図8に、実験結果との比較を図9に示す。剛性と最大変位量を基準に判断し、もっとも実験を追跡できると考えられる $Q_1=0.6$, $Q_2=0.8$ をトリリニアの形状と決定した。

4. 実験結果と解析結果の比較

4.1 復元力履歴応答

1層試験体と2層試験体について各地震波での復元力履歴応答を実験結果と解析結果で比較を行った。実験を行った最大加速度レベルでの比較を図10に示す。解析結果は、バイリニア型, トリリニア型の2種の復元力モデルについて示す。漸増加振の実験では残留変形を生じているので、基点を揃えるため解析ではその分を層間変位初期値に加えた。

2層試験体は塑性化の応答が大きい1層部分での結果を

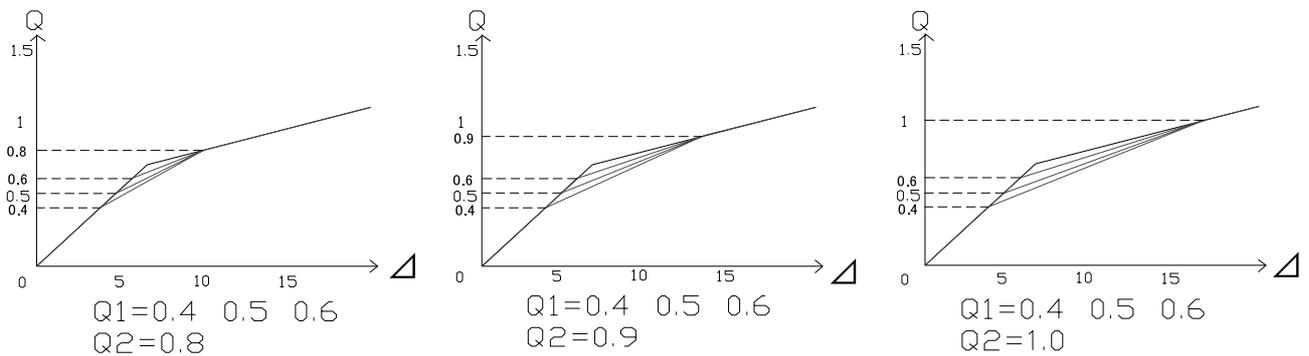


図8. トリリニアの設定パターン

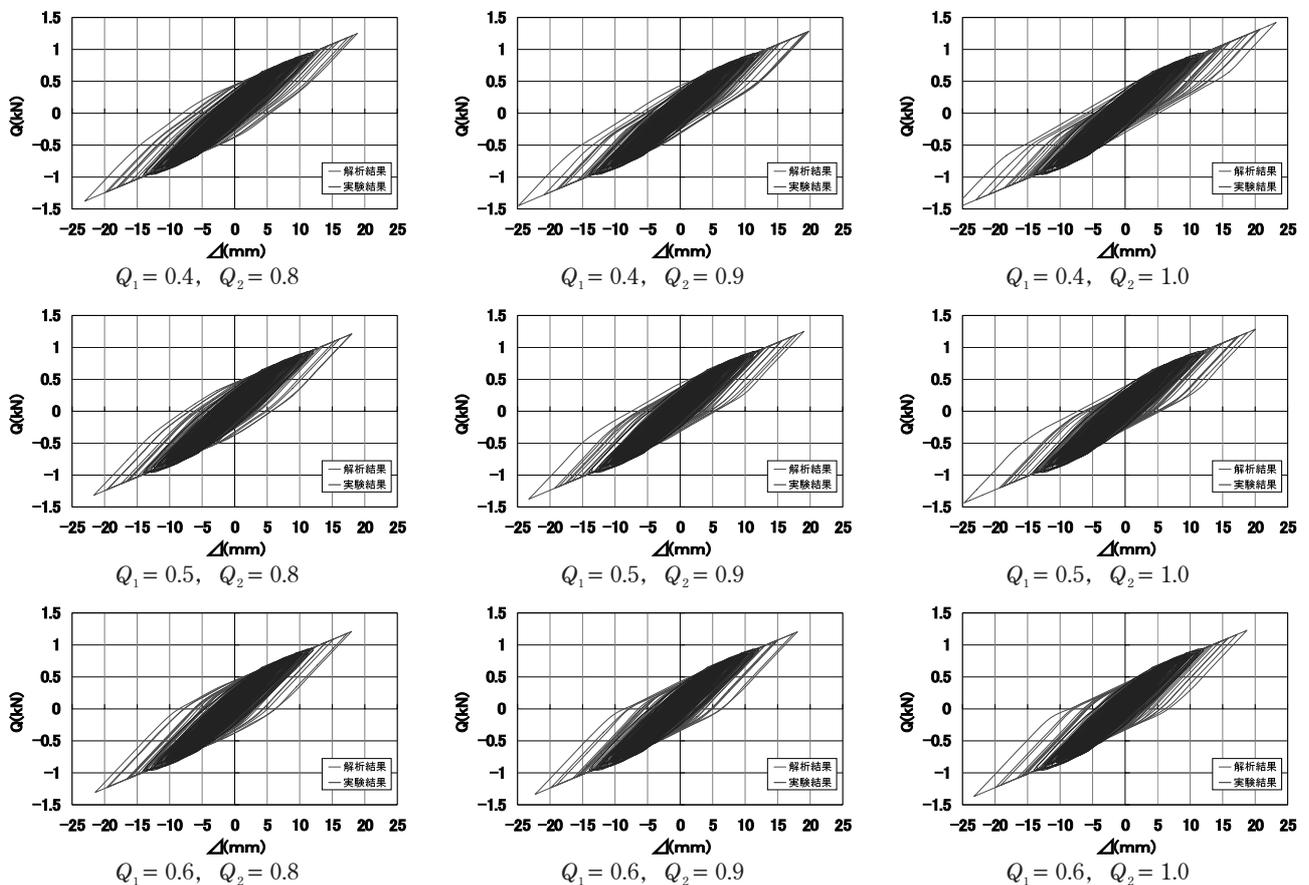


図9. トリリニアモデルと実験結果の比較

示す。また塑性変形を示した実験での最大入力加速度 (αg_{max}) と最大応答加速度 (αg_{max}) を記す。最大応答加速度は、1層試験体では頂部、2層試験体では2層床板部の値である。なお模擬地震波 BCJ-L1 では、塑性変形が生じるまで加速度レベルを 50Gal 毎に漸増段階的に上げた実験と、塑性変形が生じた際の加速度レベルで、一気に加振した実験の2種類について復元力応答を示している。

実験結果において、漸増段階的に加速度レベルを上げて加振した場合と、塑性変形が生じた加速度レベルを一気に加振した場合では応答に大きな差異は出なかった。ただし、2層試験体において、ほぼ同様の加速度レベルであったにも関わらず、最大の応答変位に大きな開きが生じた。十勝沖地震波は振動台で再現できる最大加速度レベルでは、他の地震波実験と比べ、大きな塑性変形を生じさせることができなかった。

実験と解析を比較すると、初期剛性は設定値にほぼ一致した。しかし、解析結果の最大時の変形量は実験の3割前後大きい。最大時の復元力は実験結果よりも小さく、耐力が低くなっている。これは動的实验では静的実験での降伏

耐力よりも高くなるひずみ速度効果が原因の一つと考える。

また復元力モデルを比較すると、トリリニア型の復元力履歴曲線は、バイリニア型よりも滑らかな履歴ループを描いたが、最大応答変位には大きな変化がなかった。図9でのパターンの検討で分かる通り、トリリニア型の第1折れ点のせん断力、第2折れ点のせん断力を、降伏せん断力から大きく異なった値にすると、最大層せん断力が小さくなり、最大層間変位が大きくなる。従って、それを避けるため、設定値を降伏せん断力に近い値にしたが、トリリニア型であるにも関わらず、バイリニア型に近い形状となってしまった。

4.2 降伏時の最大加速度の比較

降伏時の最大入力加速度と最大応答加速度が、地震波によってどの程度の差異があるかを調べた。図11に最大入力加速度と応答変位/降伏変位の関係、図12に最大応答加速度と応答変位/降伏変位の関係について実験結果と、解析結果を示す。最大応答加速度は、1層では頂部、2層では2層床板部の値である。解析はバイリニア型復元力モデルを使用したものである。降伏の判定は、解析ではひず

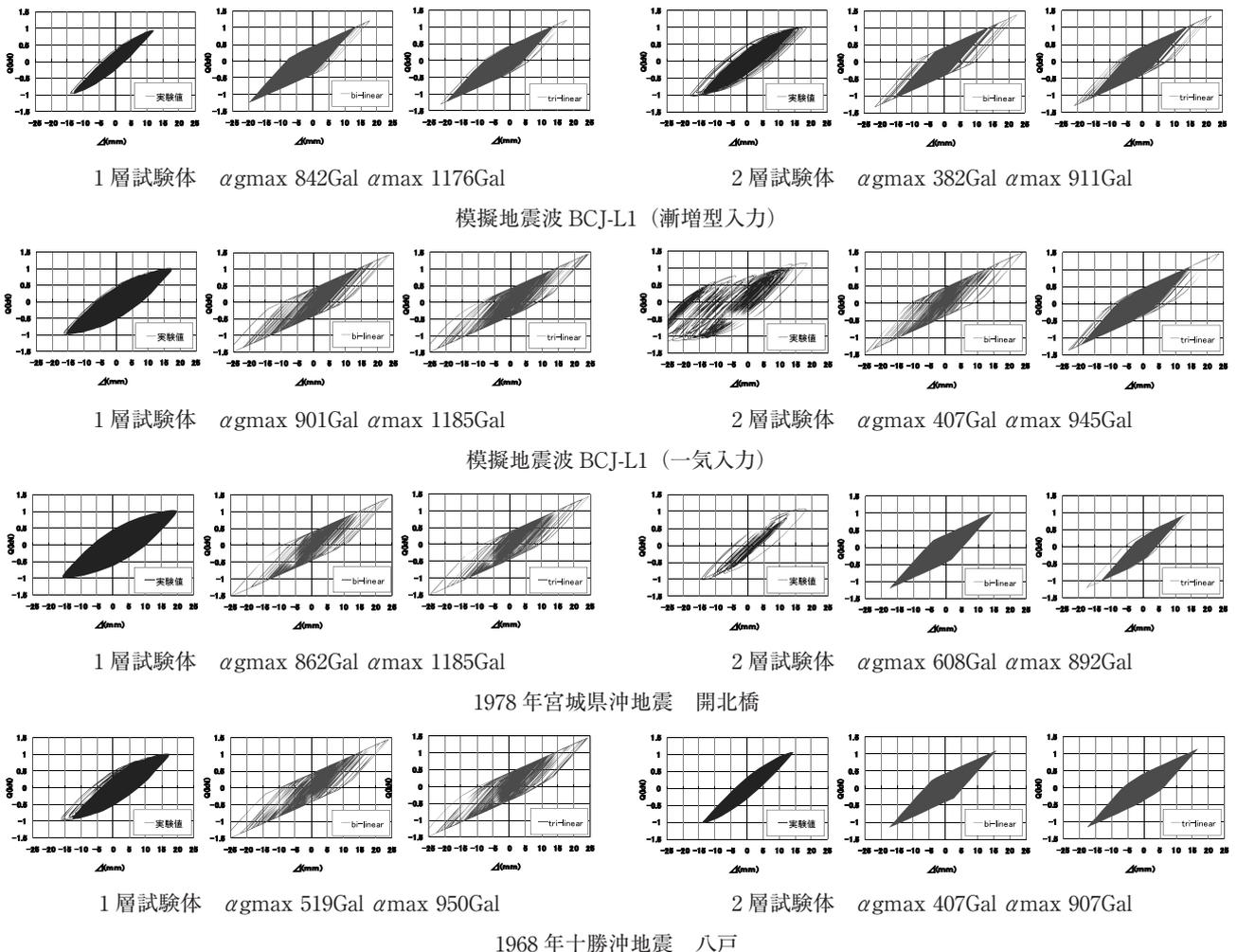


図10. 実験と解析での復元力応答履歴の比較

み値を得ることができないため降伏変位を基準として確認している。

1層試験体において降伏が生じた際の入力加速度は、実験結果では模擬地震波 BCJ-L1 は 400Gal、宮城県沖地震波は 200Gal、十勝沖八戸地震波は 420Gal となっており、解析結果では模擬地震波 BCJ-L1 は 50Gal、宮城県沖地震波は 100Gal、十勝沖八戸地震波は 300Gal となっている。もっとも小さい加速度で降伏が生じた地震波は実験では宮城県沖地震であるのに対し、解析では模擬地震波 BCJ-L1 となっている。

2層試験体において降伏が生じた際の入加速度は、実験では模擬地震波 BCJ-L1、十勝沖八戸地震波の2つは1回目の加速度レベルで、降伏が生じており、正確には分らない。また宮城県沖地震波は 250Gal であった。解析結果では模擬地震波 BCJ-L1 は 50Gal、宮城県沖地震波は 100Gal、

十勝沖八戸地震波は 100Gal となっている。実験では十勝沖八戸地震波が、解析では模擬地震波 BCJ-L1 の方が早い段階で降伏が生じる結果となった。

応答加速度では、実験、解析ともに地震波に関わらず近い加速度で降伏変位に達する結果となった。1層試験体では、実験は 900Gal、解析は 700Gal で降伏変位に達している。ここでの解析は、実験の7割程度での応答加速度で降伏が生じる推定になっている。2層試験体では、実験は入力加速度での検証同様に、1回目の加速度レベルで、降伏が生じており、正確には分らなかったが、解析では 400Gal で降伏変位に達する推定となっている。

5. 結論

(1) 1層試験体実験において最大入力加速度は、1978年宮城県沖地震波は 200Gal で降伏変位に達し、他の2種の地震波は 400Gal 程度で降伏変位に達した。解析では宮城県沖地震波と模擬地震波 BCJ-L1 が小さい加速度で塑性変形を生じる結果となった。試験体の固有周期と地震波の速度応答スペクトルの卓越成分が近いとき、共振の影響で小さい加速度で塑性変形が生じると考えられる。これは速度応答スペクトルにのみ注目した結果である。加速度応答スペクトルや、地震波の継続時間など他の地震特性に注目し、どのような要素が構造物の応答に大きな影響を与えるのか、さらに考察する必要がある。

(2) 弾塑性応答解析の復元力モデルは実験結果に合わせて設定した。そのため、剛性はほぼ一致する結果となった。しかし、実験と比較して解析の最大応答変位は3割前後大きくなる傾向がある。動的実験は、静的実験で予測される降伏耐力よりも高くなる傾向がある。これは必ずみ速度効果が重要な因子の一つと考える。

(3) 2層試験体は1層試験体に比べて、5割から7割程度の小さい加速度レベルで塑性変形が生じた。これは2層試験体の1層部分に、大きい鉛直荷重が作用しているためであると考えられる。

(4) 漸増加振で加速度レベルを上げた実験と、塑性変形を生じる加速度レベルで一気に加振した実験は概ね同じ応答を示し、過去の履歴の影響を受けない結果となった。

文 献

- 1) 水田, 岩井: 鋼構造骨組の復元力特性における動的載荷の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2006)
- 2) 木曾, 岩井: 鋼構造2層純骨組小模型の振動台実験の地震波加振レベルの違いによる応答比較, 広島工業大学紀要, (2008)
- 3) 有限会社ストラクチャー: 振動解析入門

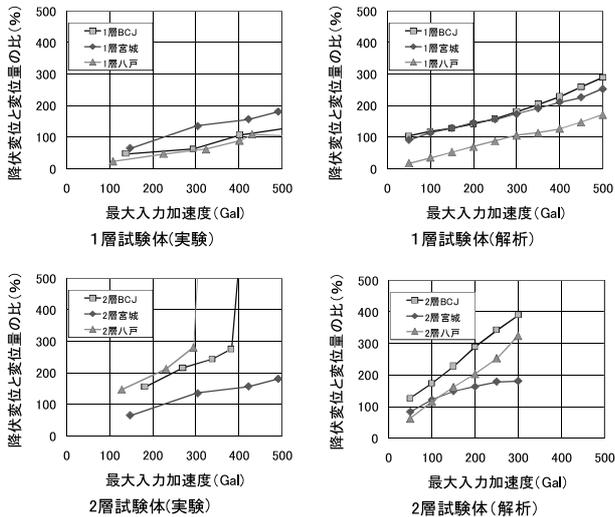


図 11. 最大入力加速度—応答変位／降伏変位の比

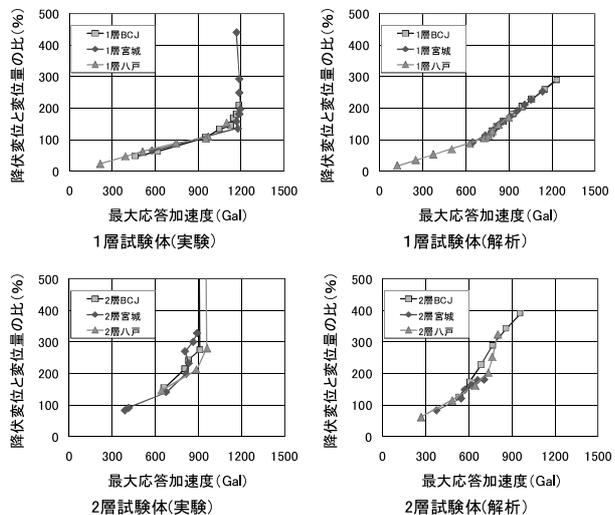


図 12. 最大応答加速度—応答変位／降伏変位の比