

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

木 曾 翔 太*・岩 井 哲**

(平成19年10月31日受理)

Comparison of Earthquake Response of Two-Story Steel Pure Frames Due to the Difference of Earthquake Wave and the Maximum Acceleration Level by Shaking Table Tests

Shota KISO and Satoshi IWAI

(Received Oct.31,2007)

Abstract

In order to investigate the safety on response level of steel structures under dynamic excitation as an earthquake, simple one-story and two-story steel pure-frame structure models were tested using a shaking table controlled by acceleration input of seismic wave. The two-story frame structures with rigid roof and rigid floor consists of two types of columns: the one is “weak” first-story model and the other is “strong” first-story model. The test results were traced by a dynamic response analysis. The elasto-plastic tri-linear restoring force-deformation curves were employed to compare the maximum load and the maximum story-displacement of the test behavior for each model. It is found that the predominant period in the velocity spectrum property of the input seismic wave is influenced with the acceleration level where the deformation response of the model got into plastic range.

Key Words: steel pure frame, shaking table, seismic wave pattern, elasto-plastic response analysis, restoring force-deformation curve

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。本研究では、鋼構造骨組の単純な1質点系モデルと2質点系モデルの小模型試験体に対して波形、ならびに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た。ここでは地震動の波形や継続時間の違いを含む特性の違いによって、柱に塑性変形が起る最大入力加速度、頂部の最大応答加速度にどの程度の差異が現れるか、また1質点系モデルと2質点系モデルで同じ入力加速度レ

ベルで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算出した予想挙動を照らし合わせて、単純な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。また実験に使用した振動台は加速度レベルを上げることによってシステムダウンする場合があった。そこで、どの程度まで加振可能なのか、また入力した地震波を正確に再現できているかなどの、性能の検証も目的としている。

* 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. 実験概要

2.1 試験体仕様

試験体は3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スパンの純骨組で1層を1種、2層を2種用意した。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1に示す。屋根・床板の重量は78.85kgで、柱に比して40mm厚の剛なものである。1層試験体の形状と実験計測装置の設置状況、2層試験体の形状を図1に示す。柱は1層では上下端を40mm角の鋼ブロックを用いてM10ボルト各2本で屋根板及び床板に固定し、2層では上下端と1層部分について同様に固定している。2層では、通し柱2本のもの「弱一層」と称し、1層が4本の柱で構成される「強一層」と称した2種類の試験体を用意した。1層と「強一層」では、「強一層」の2層部分が1層試験体と近い挙動を示すと考えられる。また1層と「弱一層」では大きい鉛直荷重を受ける「弱一層」のほうが小さい加速度で塑性化すると思われる。これらについて実験を行い塑性化の具合を検証する。自由振動実験より求めた各試験体形状での減衰定数と固有周期を表2に示す。

柱の作用せん断力を求めるために各柱の面側に、柱中央高さから内法高さの1/4ずつの位置に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。ゲージ貼付位置を図1(c)に示す。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限りがあるた

め、片面だけを計測している。柱両側での復元力特性と、片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ため、片面計測だけでも大きな問題はないと考える。

2.2 実験方法

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（島津製作所製）である。主な性能を表3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。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（NEC三栄社製、9E-07A3）を設置した。2層試験体の設置状況を写真1に示す。

表1 柱材の引張試験結果

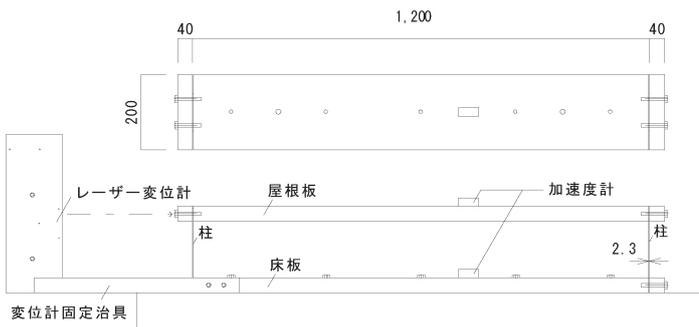
	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	降伏比(%)	伸び(%)
柱材	171900	207	305	68	49

表2 各試験体の減衰定数と固有周期

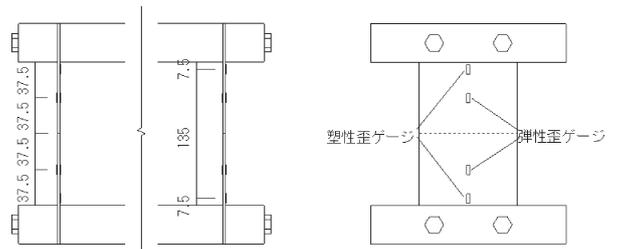
	減衰定数	固有周期(s)
1層	0.0030	0.160
2層「弱一層」	0.0019	0.263
2層「強一層」	0.0019	0.207

表3 振動試験機仕様

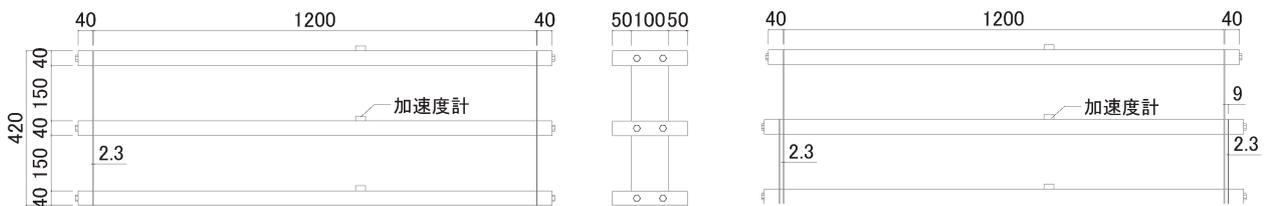
最大積載重量	2tons
加振力(水平方向)	5tons
最大振幅(水平方向)	±50mm
最大加速度(水平方向)	3G
テーブル寸法	1.5×1.5m



(a) 1層試験体形状及び動的荷重実験計測装置設置図



(c) 歪ゲージ貼付位置



(b) 2層試験体形状図 (左: 2本通し柱「弱一層」, 右: 1層4本柱「強一層」)

図1 試験体図

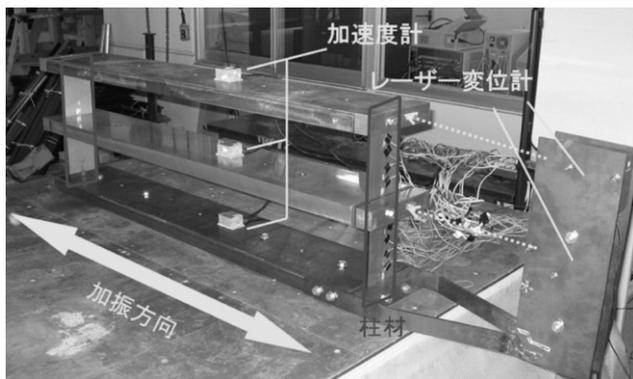


写真1 試験体設置状況

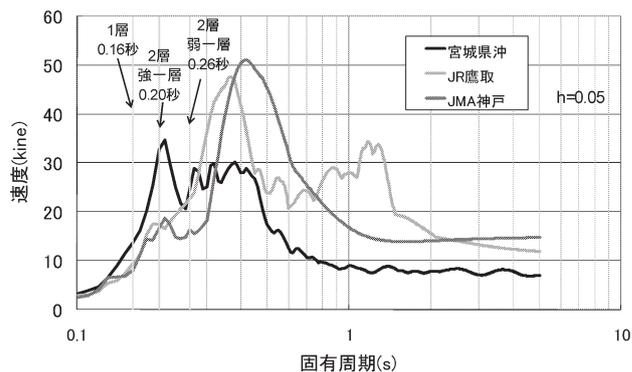
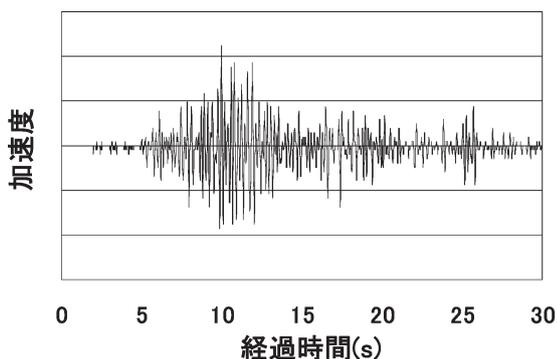
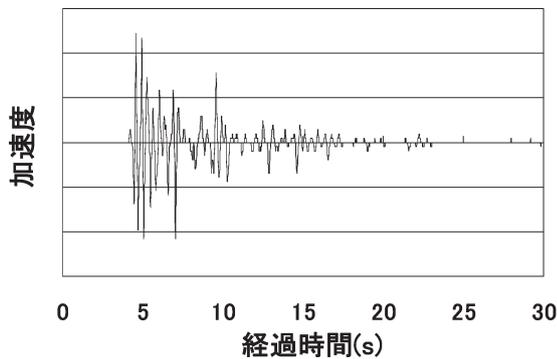


図4 地震波の速度応答スペクトル

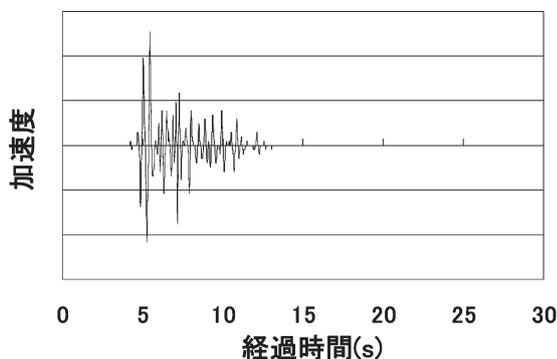
取駅 (EW 成分, 最大加速度 656Gal) と, 神戸海洋気象台 (NS 成分, 最大加速度 817Gal) の加速度記録を使用した。試験体の柱が塑性域で応答を示すまで, 地震波の最大加速度レベルを 25Gal 毎に段階的に上げるように設定した。実験において振動台上で計測した各地震波の加速度波形を図 3, 速度応答スペクトルを図 4 に示す。



(a) 加速度履歴 宮城県沖地震波 (NS 成分)



(b) 加速度履歴 JR 鷹取地震波 (EW 成分)



(c) 加速度履歴 JMA 神戸地震波 (NS 成分)

図3 地震波の加速

2.3 入力地震波

入力地震波には 1978 年宮城県沖地震の開北橋 (NS 成分, 最大加速度 150Gal), 1995 年兵庫県南部地震の J R 鷹

2.4 柱の復元力の計測方法

図 5 に示すように各柱の復元力 Q は以下の式で算定した。弾塑性ゲージ貼付位置を図 1(c) に示す。

$$Q = \frac{M_a - M_b}{\bar{l}} - \frac{M_c - M_d}{\bar{l}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで, (M_a, M_b) , (M_c, M_d) は左側及び右側柱での上下 2 点の曲げモーメントで, \bar{l} は左側及び右側柱における歪計測点間距離である。柱の断面両端のひずみ値: $(\epsilon_1 \sim \epsilon_8)$ から, 各断面の曲げモーメントは次式で算定できる。

$$M = E \cdot I \cdot \frac{\epsilon}{D} \dots\dots\dots (2)$$

であるから,

$$Q = (\epsilon_1 - \epsilon_2 - \epsilon_3 + \epsilon_4 + \epsilon_5 - \epsilon_6 - \epsilon_7 + \epsilon_8) / (EI / D\bar{l}) \dots\dots (3)$$

ここで E は柱のヤング係数, I は柱の断面 2 次モーメント, D は柱せいで, $\bar{l} = 75\text{mm}$ である。

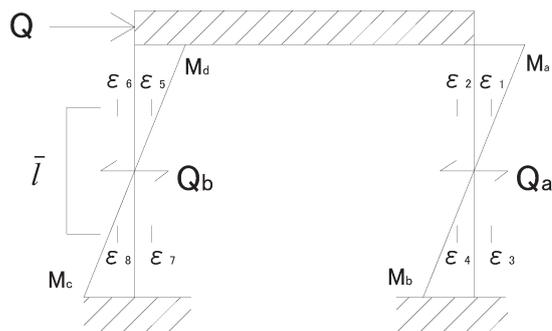


図5 復元力 Q 算定方法

3. 解析方法

弾塑性応答解析プログラムは 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、入力地震波の加速度履歴である。実験により振動台上で計測された地動加速度を入力加速度とする。

3.1 プログラムの入力値

第1剛性、第2剛性、降伏後の剛性低下率の3要素について入力する tri-linear での解析を行う。入力値は以下のように算定した。

(1)剛性

弾性剛性は降伏荷重、降伏変位から算定する。降伏時の水平荷重 Q_y は以下の式で求める。

$$Q_y = X \frac{\sigma_y B D^2}{3H} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 σ_y は柱材の降伏応力である。また、 B 、 D 、 H は試験体の幅、せい、柱の内法高さである。 X は柱本数で二本柱では2、四本柱では4である。

降伏変位 Δ_y は以下の式となる。

$$\frac{\Delta_y}{2} = \frac{\left(\frac{Q_y}{2}\right) \times \left(\frac{H}{2}\right)^3}{3EI} \dots\dots\dots (5)$$

これより、 $Q_y = 486.7\text{N}$ 、 $\Delta_y = 3.94\text{mm}$ である。この降伏荷重、降伏変位の値を使用して、第1剛性、第2剛性を設定する。第1剛性は算定した降伏荷重・降伏変位の3/4の値とした。そして第2剛性は Δ が降伏変位の1.7倍で、 Q は(3)で述べる降伏後の剛性低下率を使用して算出する。

第1剛性は $Q_1 = 0.3\text{kN}$ 、 $\delta_1 = 2.4\text{mm}$ で、第2剛性は $Q_2 = 0.6\text{kN}$ 、 $\delta_2 = 6.8\text{mm}$ と設定した。また2層「強一層」の一層部分は Q を2倍にした値である。

(2)減衰定数

自由振動試験より求めた。1層試験体は $h = 0.30\%$ 、2層「弱一層」は $h = 0.19\%$ 、2層「強一層」は $h = 0.19\%$ となった。

(3)降伏後の剛性低下率

降伏後の剛性の初期剛性に対する比 β は、静的載荷実験を行い求めるのが一般的であるが、本研究では、動的載荷実験より算定し、 $\beta = 0.3$ とした。図6に示すように、実験結果での弾性域と塑性域の復元力履歴応答から求める。 K は剛性の理論値である。

3.2 復元力履歴応答

復元力履歴応答について実験結果と解析結果の比較を行った。 $\frac{\sigma_y}{E} = 207/172000 = 0.0012$ より、最大歪 $1200\mu\epsilon$ となった時を基準として塑性変形を判定し、3種類の段階で

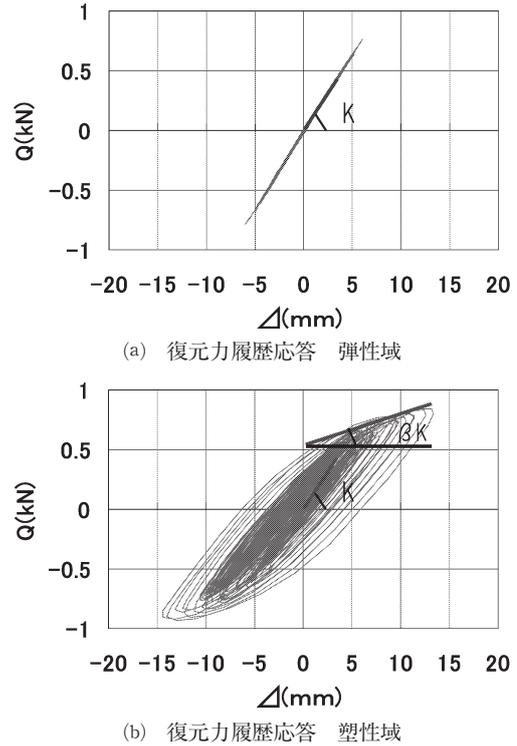


図6 降伏後の剛性低下率の算定方法

示す。1つ目は試験体が塑性変形する直前の実験（弾性域）、2つ目は塑性変形した実験（塑性域1）、3つ目は目測によって残留変形が確認された実験（塑性域2）である。地震波は宮城県沖-NSである。図7は1層、図8は2層「弱一層」、図9は「強一層」である。なお塑性変形の判断は最大歪の大きい方を選んだ。2層「弱一層」では一層部分、「強一層」では二層部分である。

弾性域の剛性は理論値とほぼ一致している。また最大変形量もある程度対応している。しかし解析での最大の復元力が実験よりも小さく、解析の耐力が低い設定であることが分かる。これは動的実験では、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だと考えられ

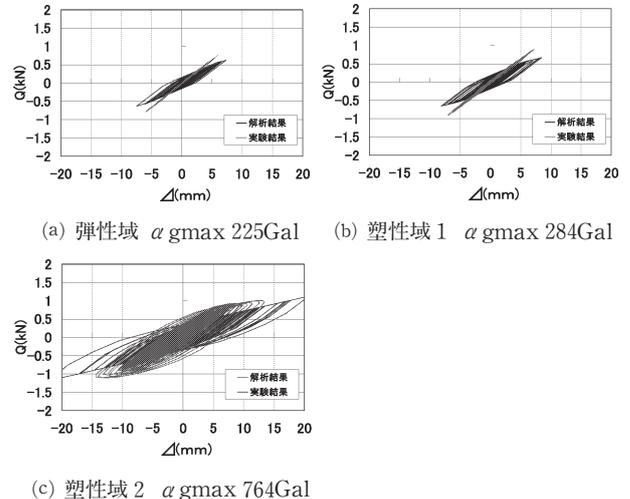


図7 1層試験体の復元履歴応答比較

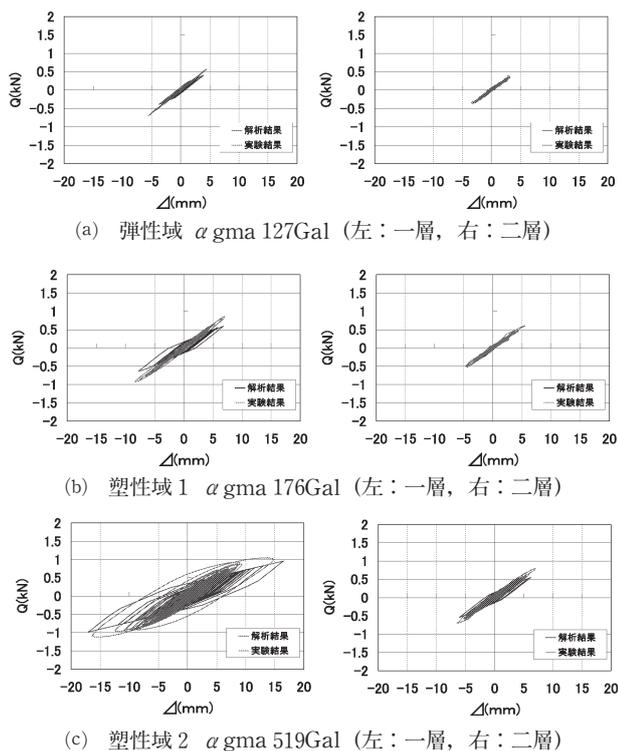


図 8 2 層「弱一層」試験体の復元履歴応答比較

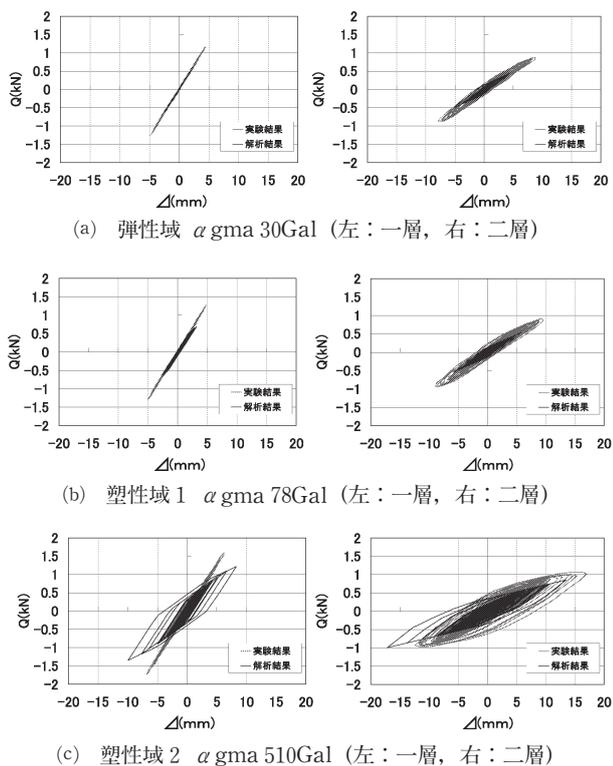


図 9 2 層「強一層」試験体の復元履歴応答比較

る。また降伏後の剛性低下率は静的実験，または解析的に求めるべきであるので，材料試験より算定する方法を考察する必要がある。これらのことを考慮し，文献調査や様々な実験データと比較を行い対応する tri-linear モデルの設定を研究する必要がある。また解析結果では材の塑性変形

が実験の弾性域で既に起きている。これはボルトの締付による柱材の固定度が低く，柱の内法高さが実際より高いため，降伏変位が設定した値より大きい可能性がある。

4. 塑性変形時の最大加速度の比較

塑性変形発生時の最大入力加速度と最大応答加速度が，地震波，試験体形状によってどの程度の差異があるかを調べた。また解析結果での塑性変形時の加速度レベルも調べた。解析に使用する入力地震波は最大加速度を実験と同様に 25Gal 毎に上げて設定し，降伏変位に達した時の入力，応答加速度を実験と比較した。ここでの塑性変形の判定は，解析結果がひずみ値を得ることができないため，降伏変位 4 mm を基準として変位量によって確認する。なお，JMA 神戸地震波の比較がないのは，「強一層」試験体の実験を行っていないからである。

図 10 に最大入力加速度と降伏変位と応答変位量の比の関係，図 11 に頂部最大応答加速度と降伏変位と変位量の比の関係について実験結果，解析結果を示す。ここで，変位量は「弱一層」の試験体では塑性変形が先に起こる第 1 層の柱の層間変位を，「強一層」の試験体では第 2 層の柱の層間変位を使用した。グラフの降伏変位と変位量の比が 100% である時が塑性変形を生じた加速度である。図 12 に各試験体形状，各地震波での塑性変形時の最大入力加速度の比較を示す。また同様に図 13 に頂部最大応答加速度の比較を示す。

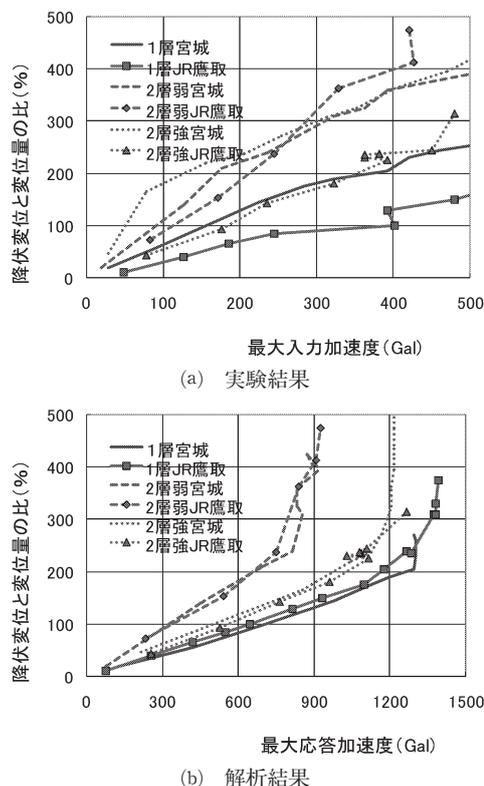
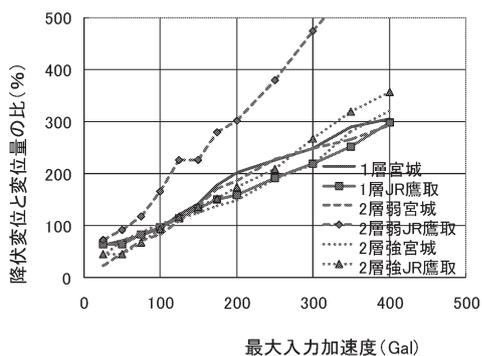
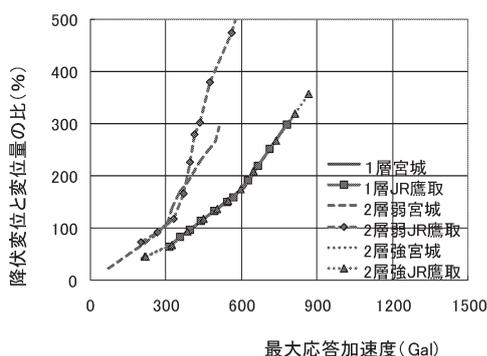


図 10 最大入力加速度と降伏変位と変位量の比



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図 11 最大応答加速度と降伏変位と変位量の比

1層試験体では、宮城県沖地震波において最大入力加速度が160Galで塑性変形が生じた。一方、JR鷹取地震波では最大入力加速度が400Galで塑性変形を生じた。宮城県沖地震波実験の方が小さい加速度で塑性変形を生じている。これは継続時間が長いことよりも、速度応答スペクトルの卓越周期が試験体の固有周期と近い値であることの影響が大きいと思われる。

2層「弱一層」試験体は宮城県沖地震波の実験において、最大入力加速度が90Galで塑性変形が生じ、JR鷹取の地震波では最大入力加速度が110Galで塑性変形が生じている。1層と比較すると、2層「弱一層」は小さい加速度で塑性変形している。これは、2層「弱一層」が1層よりも2層部分の大きい鉛直荷重を受けていることと整合する。

2層「強一層」試験体は宮城県沖地震波の実験では最大応答加速度が500Galで塑性変形が生じ、JR鷹取地震波の実験では560Galで塑性変形が生じている。1層での最大応答加速度と近い加速度で塑性化している。これは、「強一層」の1層部分が4本柱で剛いため、地盤面と同じように揺れたために1層試験体と「強一層」の2層部分が近い挙動を示したと受け取れる。

解析結果では入力加速度、応答加速度ともに実験と比較して小さい加速度で塑性変形が生じている。これより実験の降伏耐力が動的な場合に増大していることが伺える。3.2の復元力履歴応答の項でも述べたが、これはひずみ速度効

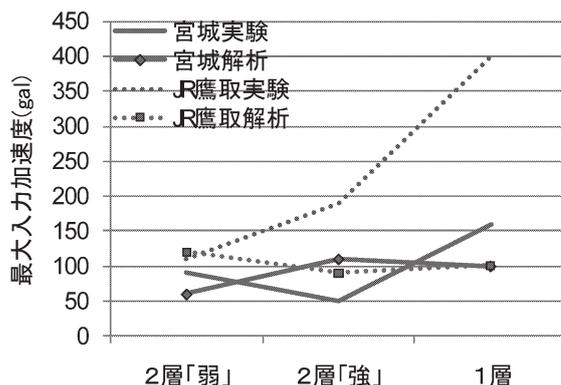


図 12 降伏変位達成時の最大入力加速度

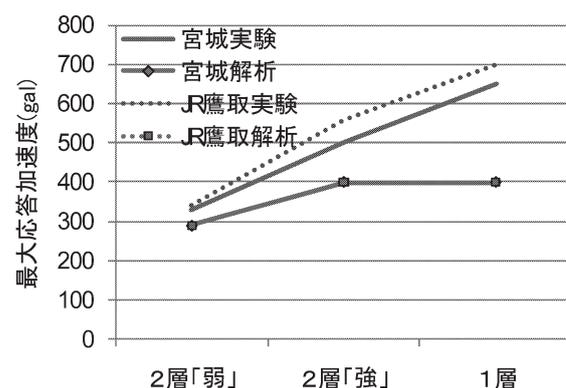


図 13 降伏変位達成時の頂部最大応答加速度

果が原因となっている可能性がある。また地震波の違いによる各試験体の応答は、あまり差異がなかった。実験結果では試験体の固有周期と各地震波の速度スペクトルの卓越周期が近いところにある場合、共振により大きな応答を示したように見られた。しかし、解析では差異が現れなかった。また、応答加速度に関して、塑性変形が生じた時の加速度が「弱一層」試験体では290Gal、1層試験体と「強一層」試験体は400Galとなった。実験結果で得られたことと同じく1層試験体と「強一層」の2層部分が近い挙動を示したことは、「弱一層」の1層部分に2層部分の鉛直荷重を受けているため、大きい荷重がかかることが原因と考察する。

5. まとめ

- (1) 試験体は1層と、1層部分が4本の柱で構成される2層「強一層」と、通し柱2本の2層「弱一層」の3種である。1層と「強一層」では「強一層」の2層部分が1層試験体と近い挙動を示すため、近い加速度レベルで塑性変形が生じた。また「弱一層」は他に比べて大きい鉛直荷重を受けるため、小さい加速度レベルで塑性変形が生じた。
- (2) 実験結果と解析結果を比較すると、入力加速度は各試験体、各地震波の違いであまり加速度に大きな差異が見られなかった。応答加速度では小さい加速度で解析は塑性変形が生じた。これはひずみ速度効果が原因だと考える。ま

た、復元力履歴応答も剛性は一致したが、最大時の復元力等、対応しなかった部分が多かった。tri-linear 復元力モデルの設定をさらに研究する必要がある。

(3) 実験結果では、JR 鷹取地震波より、宮城県沖地震波の方が小さい入力加速度で塑性変形が生じている。これは宮城県沖地震波の速度応答スペクトルの卓越周期と試験体の固有周期が対応しているためだと考える。しかし、解析結果では、地震波特性による影響は見られなかった。

文 献

- 1) 水田新也：鋼構造骨組の復元力履歴特性における動的
載荷の影響，広島工業大学修士論文，(2006)
- 2) 栢木慧太：振動台加振実験による 1 層鋼構造骨組の地
震時応答，広島工業大学卒業論文，(2007)
- 3) 得能昌憲：振動台加振実験による 2 層鋼構造骨組の地
震時応答，広島工業大学卒業論文，(2007)
- 4) 若林實：鉄骨構造学詳細，丸善株式会社，(1985)