

Z型ノンコンプレションブレース付き2層骨組みの 振動台実験と数値解析

高松 隆夫*・玉井 宏章*・荊尾 友裕***・土江 葉菜子***
山西 央朗**・澤田 樹一郎****・松尾 彰****

(平成22年11月4日受付)

Shaking table tests and Numerical analysis of 2-storys-1-bay frame with Z-type non-compression brace

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Tomohiro KATARAO, Hanako TSUCHIE
Teruaki YAMANISHI, Kiichiro SAWADA and Akira MATSUO

(Received Nov. 4, 2010)

Abstract

Buckling restraint braces have resistant capability to both tension and compression because of blocking buckling phenomena. On the other hand, non-compression braces resist no compression and only tension by function of a wedge device. The buckling restraint braces do not possess such unique capability. Shaking table tests on one story frame with the brace arranged in z-type were carried out to verify one direction vibration and constant convergence.

In this paper, shaking table tests and numerical analysis on two stories frame are carried out to obtain the same results as the one story tests.

Key Words: non-compression brace, Z-type braced frame, Shaking table tests, Numerical analysis

1. はじめに

著者らは、楔デバイスを設置したブレースをノンコンプレションブレースと呼び、このブレースを用いた1/3～1/4スケールの部分架構試験体で静的載荷実験を行っている。ノンコンプレションブレースは、楔デバイスの機能により、ブレースに引張方向の変位増分が作用した場合には抵抗するが、圧縮方向の変位増分が作用しても抵抗しない抵抗特性を有している。このため、座屈現象やスリップ現象を起こさない。また、このブレースをZ型に配置した場合の振動特性についての研究を行っており、構造物を

地震波により振動させると、振動と共に構造物の変形が一方方向へ漸増することを明らかにしている。

これまで、ノンコンプレションブレースをZ型に配置した1層1スパン架構と2層1スパン架構の振動台実験を行い、以下の知見が得られている。

- 1) 架構の変形が、振動と共にブレースが抵抗しない側へと漸増していく。
- 2) ブレースが抵抗する側とブレースが抵抗しない側では弾性剛性が異なる。そして、ブレース端部に生じた間隙に楔が貫入し、ブレースに張力が導入されるため、架構の剛性が高くなり、加振前より加振後の固有振動

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学高性能構造システム開発・研究センター

*** 広島工業大学工学系研究科建設工学専攻

**** 広島大学大学院工学研究科建築学専攻

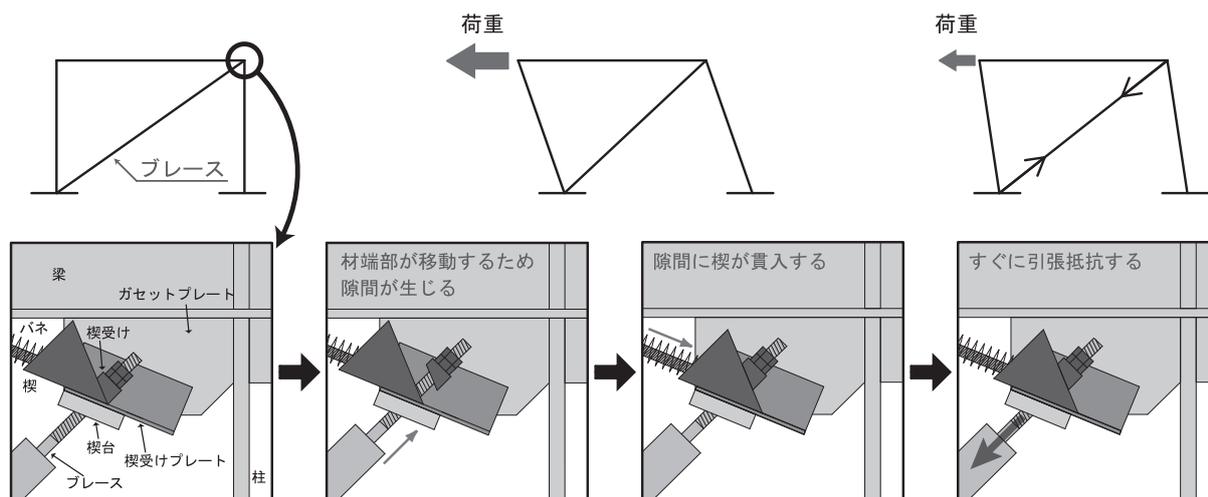


図1 楔デバイスの作動概念

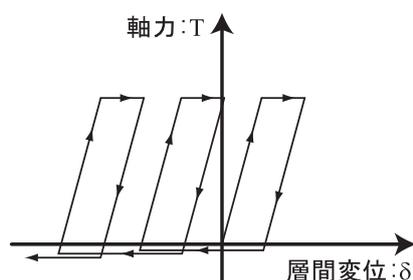


図2 復元力特性の模式図

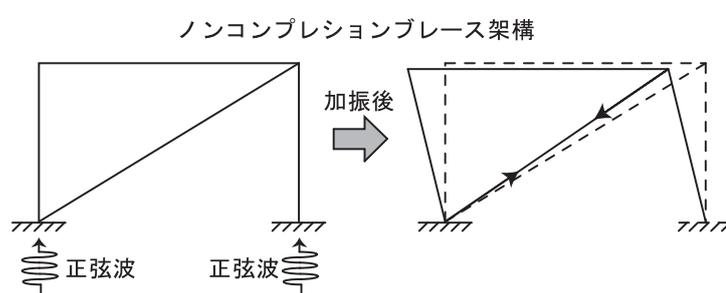


図3 変形状態

数が高くなる。

- 3) 正弦波による弾性加振実験の場合、一方向へ変形が漸増して収束する。収束時には、架構の荷重-変形関係は、完全な線形関係を示す。
- 4) 正弦波による弾塑性加振実験の場合、一方向へ変形が漸増して収束すると共に、楔が貫入限界を迎えない限り、一定の履歴ループを示す。
- 5) 2層の架構に1層目と2層目にブレースをZ型で同じ向きに配置した場合、1層の架構と同様にブレースの抵抗しない側へ変形が漸増する。
- 6) 2層の架構の1層目と2層目にブレースをZ型で配置方向を交互(1層目と2層目が逆向き)にした場合、1層目の変形と2層目の変形が相殺し、構造物頂部での変形を抑えることができる。

このように、新しい抵抗特性を有している。

そこで、本論文では、Z型に配置したノンコンプレッションブレース付き2層骨組みの振動台実験と数値解析を行い、振動特性について検討する。

2. ノンコンプレッションブレースの性能

図1にノンコンプレッションブレースにおける楔デバイスの作動概念を、図2にノンコンプレッションブレースの復元力特性の模式図を、図3にノンコンプレッションブレースをZ型に配置したときの変形状態を、それぞれ、示す。

ノンコンプレッションブレースは以下の機能を保有している。

- 1) ブレースに引張力が作用すると直ぐに抵抗する。
- 2) 圧縮方向変位に対して、ブレース端部がローラー支持の状態となっているため、ブレース端部が離間し、ブレースには圧縮力が作用しない。このため、座屈現象を起こさない。
- 3) ブレース端部に生じた間隙に、予め設置してある楔がバネの復元力により貫入するため、ブレースには緩みが生じない。

以上より、ノンコンプレッションブレースには、圧縮力が作用せず、座屈が生じない。また、楔の貫入によりブレースは緩まないため、細長比の大きなブレースを使用しても、スリップ現象が生じることはない。

また、ノンコンプレッションブレースをZ型に配置した場合、図2に示すように、一方向の変位増分には抵抗して、逆方向の変位増分には抵抗しない。このため、ブレースに初期軸力を導入したような状態となり、架構の変形が一方向に漸増する。

3. 実験概要

3.1 試験体

表1に試験体の素材特性を示す。また、図4に試験体形状を、図5にブレースの配置方法を、図6にブレース詳細

表1 素材特性

材種	ヤング係数 E (N/mm ²)	降伏応力度 σ_y (N/mm ²)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_u (%)	ひずみ硬化 開始ひずみ ϵ_{ST} (%)	
梁ウェブ	SS400	205,000	325	440	74	3.23
梁フランジ	SS400	205,000	308	438	70	2.45
柱	SS400	205,000	292	391	75	1.63
ガセットプレート	SS400	205,000	296	395	75	1.80

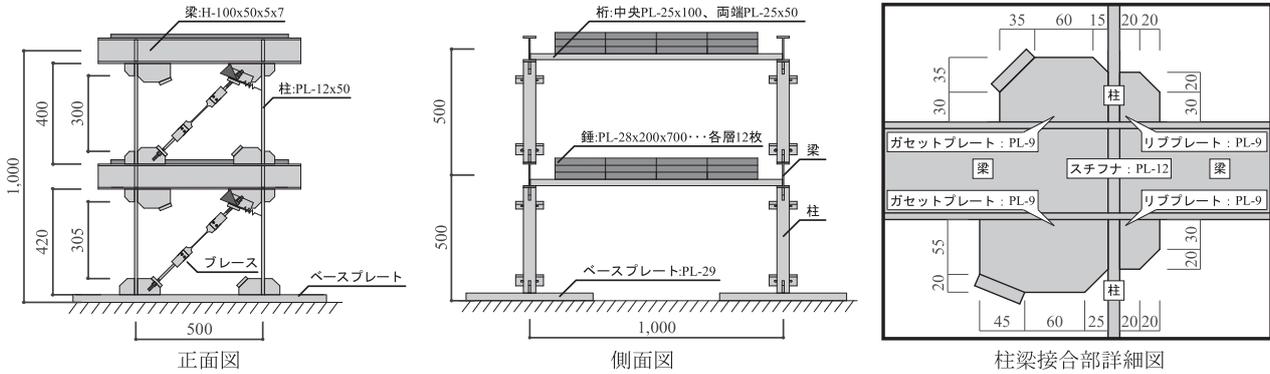


図4 試験体形状

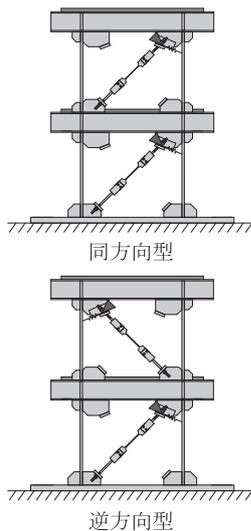


図5 実験変数

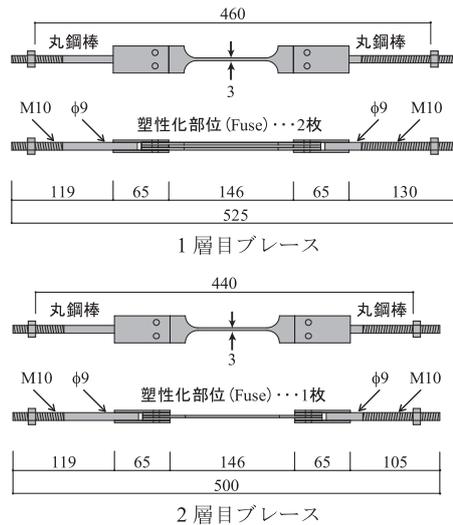


図6 ブレース詳細図

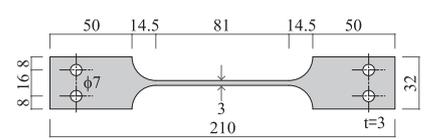


図7 塑性化部位 (Fuse) 詳細図

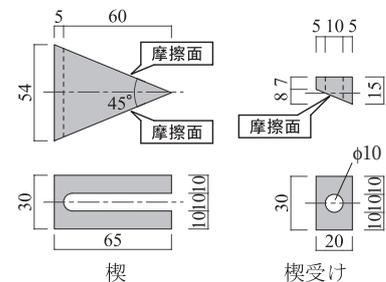


図8 楔・楔受け詳細図

を、図7に塑性化部位 (Fuse) 詳細を、図8に楔・楔受けの詳細を、それぞれ、示す。

架構の柱に PL-12x50 を、梁に H-100x50x5x7 を使用し、2層1スパンの架構としている。柱と梁、柱とベースプレートの接合部には、ガセットプレートおよびリブプレート全周隅肉溶接接合している。尚、ブレースは柱断面の弱軸方向に設置している。試験体はこの架構を2組並列させ、桁として各層の梁下フランジの中央部に PL-25x100x990 を1枚、両端部に PL-25x50x990 を1枚ずつ設置して、ボルト接合している。そして、各層の桁の上部には、錘として、PL-28x200x700 を各層12枚 (約4 kN) 積載し、質点の質量 m を430kg とする。

ブレースの配置方法は、ノンコンプレッションブレースを

1層目と2層目がZ型で同じ方向になるようにブレースを配置したもの (同方向型)、2層目の向きを1層目と逆の方向になるように配置したもの (逆方向型) の2種類としている。また、抵抗特性を確認するために、架構のみの試験体の実験も行っている。尚、本実験では、ブレース以外の部位には、各実験時に弾性範囲に留まるような素材特性・断面特性を採用している。

ブレースには、丸鋼棒 (M10, $\phi 9$) を使用する。ブレースの中央部には、ブレース軸耐力を調整するために、塑性化部位 (Fuse) を1層目には2枚、2層目には1枚取付けている。

楔および楔受けは、発錆処理を施して、静止摩擦係数 $\mu=0.78$ とし、楔が滑らないように貫入角度を45度として

表2 固有振動数・減衰定数

	固有振動数 f (Hz)	減衰定数 h
1・2層同方向Z型	9.4	0.03
1・2層逆方向Z型	9.4	0.04

表3 水平弾性剛性

	1層目 (kN/mm)	2層目 (kN/mm)
フレーム	2.24	2.45
ブレース	3.20	2.22
フレーム+ブレース	5.44	4.67

表4 解析用素材特性

	寸法	断面積 mm^2	断面2次 モーメント mm^4	塑性 断面係数 mm^3	ヤング係数 N/mm^2	降伏応力度 N/mm^2
柱	PL-12x50	600	31,500	1,200	205,000	315
梁	H-100x50x5x7	1,185	1,870,000	44,100	205,000	330

	軸方向剛性 kN/mm	降伏軸力 kN	ひずみ 硬化係数 %
2層目ブレース (Fuse1枚)	2.22	2.5	1.0
1層目ブレース (Fuse2枚)	3.20	5.0	1.0

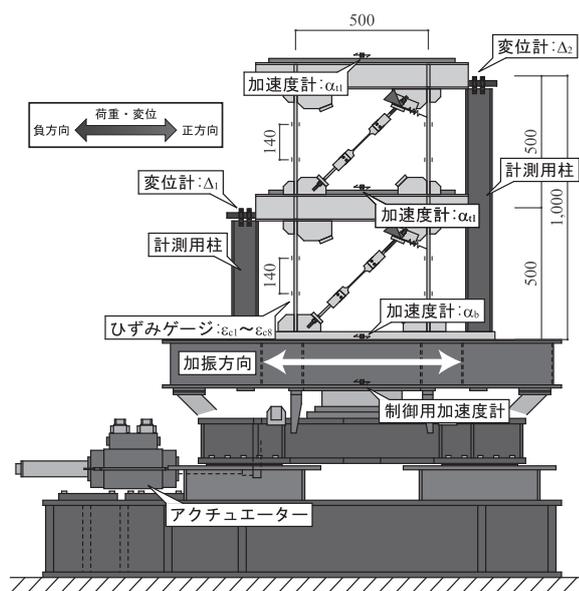


図9 加振装置と計測位置

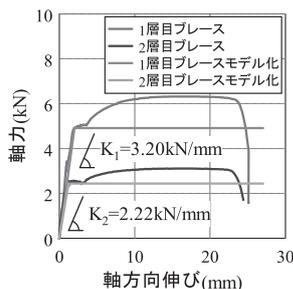


図10 ブレース引張試験結果

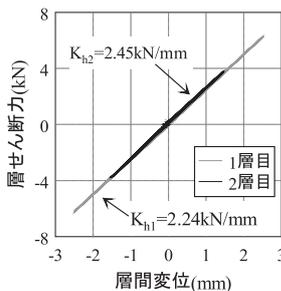


図11 架構のQ-δ関係

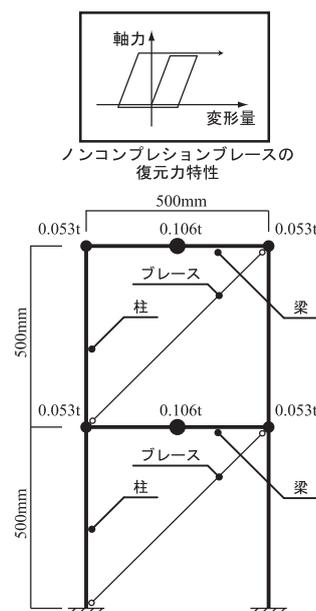


図12 解析モデル

いる。また、楔デバイスに用いるバネは、楔を水平移動させる程度の復元力を有していれば良いので、小さなバネ定数をもつバネを用いている。

3.2 計測方法

図9に本実験で用いる加振装置と計測位置を、表2に各試験体の固有振動数と減衰定数を、それぞれ、示す。

試験体のベースプレートを振動台上に緊結して、振動台を水平方向に加速度加振する。本実験では、先ずインパルス実験とSWEEP実験を行い、その後、正弦波加振実験を行う。インパルス実験から1層目と2層目の減衰定数を平均し、試験体の減衰定数を求める。また、SWEEP実験では、1Hzから20Hzまで0.1秒間に0.01Hzずつ振動数を上昇させ、共振曲線から各試験体の固有振動数を求める。また、正弦波加振実験で使用する振動数は、SWEEP実験により得られた試験体の固有振動数としている。尚、弾塑性加振実験では、各試験体の振動性状が異なるため、徐々に加速度を上昇させ、ブレースが塑性化したところで、加速度を一定に保っている。

変位を計測するために、ベースプレートに計測用柱 H-100x100x6x8 を隅肉溶接接合している。尚、計測用柱は固有振動数を高くし、加振時に変形しないことを確認している。そして、頂部に変位計を設置し、各層の絶対変位 Δ_1 、 Δ_2 (地動に対する相対変位) を計測し、各層の層間変位 $\delta_1 (= \Delta_1)$ 、 $\delta_2 (= \Delta_2 - \Delta_1)$ を算出する。

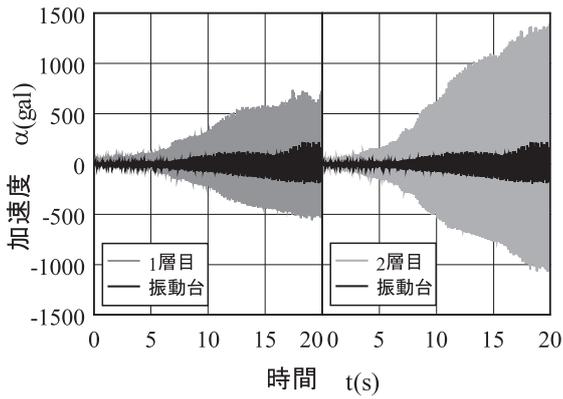
加速度としては、加速度計から振動台上面の加速度 α_b 、各層の垂上面の加速度 α_{a1} 、 α_{a2} を計測する。そして、試験体各層の層せん断力 Q を加速度より算出する。

また、ひずみとしては、柱の2断面にひずみゲージを貼付けて、柱軸方向ひずみ $\epsilon_{c1} \sim \epsilon_{c8}$ を計測する。尚、柱軸方向ひずみは、架構のねじれ等は生じないものとして、架構の1構面のみ計測している。

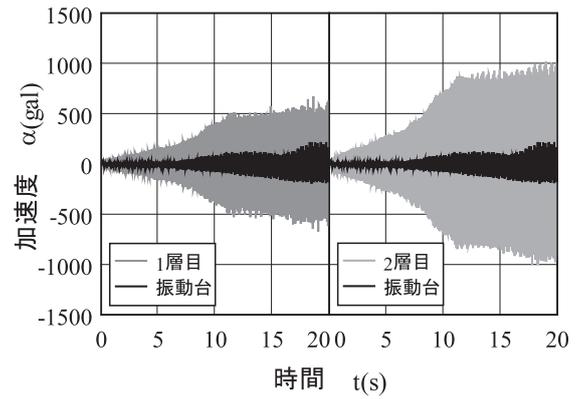
3.3 水平弾性剛性

各水平弾性剛性を表3に示す。

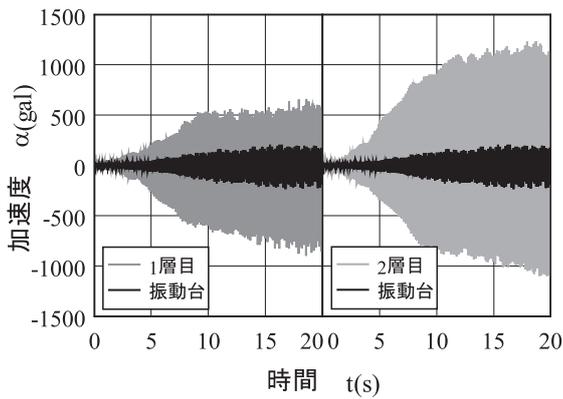
各試験体の水平弾性剛性を求めるにあたり、ブレースは、変断面であり、軸方向弾性剛性の算出が煩雑なため、図10に示す引張試験結果より軸方向弾性剛性を求めている。



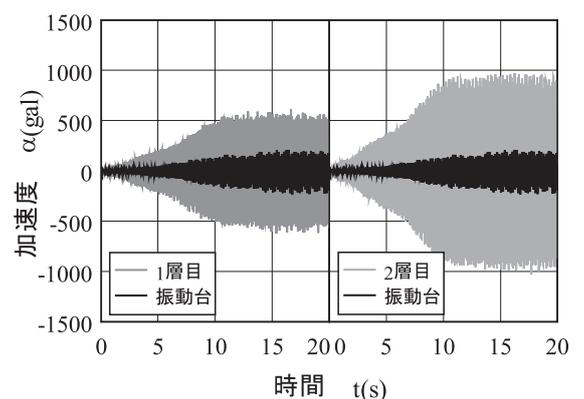
(a) 同方向型 (実験)



(b) 同方向型 (解析)

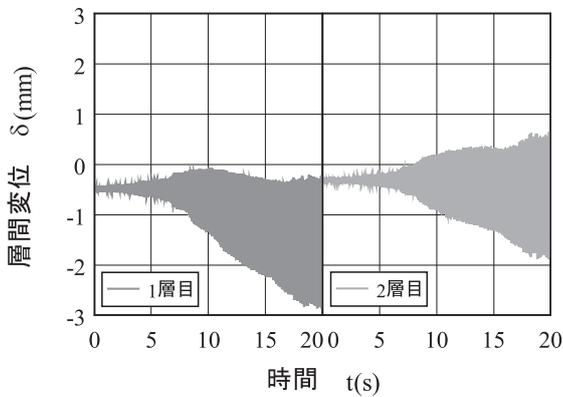


(c) 逆方向型 (実験)

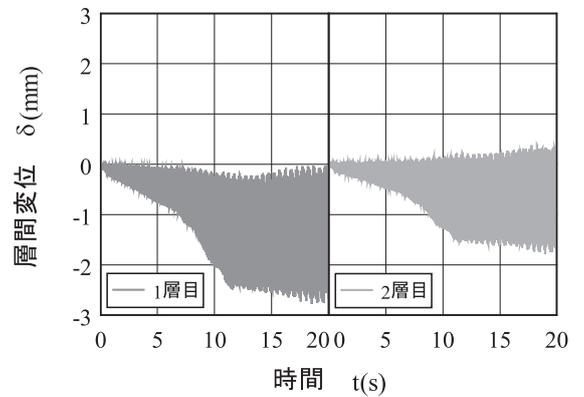


(d) 逆方向型 (解析)

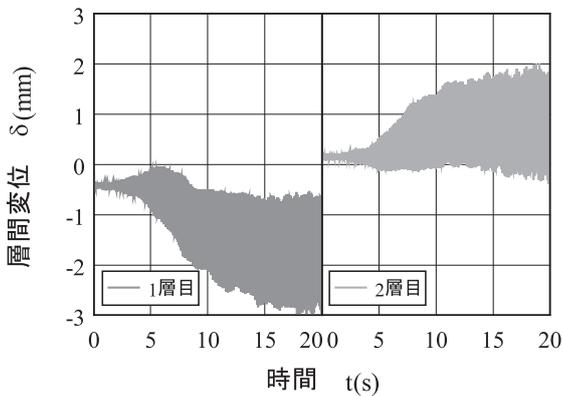
図 13 加速度時刻歴



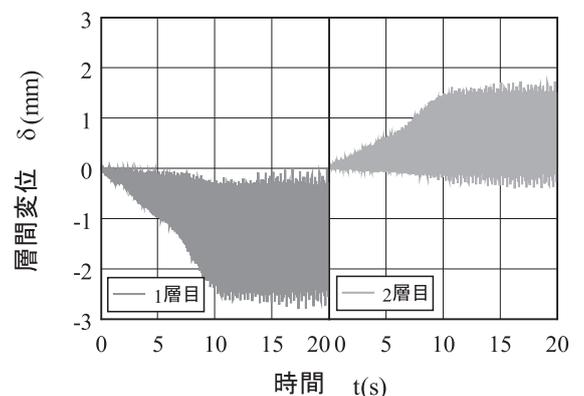
(a) 同方向型 (実験)



(b) 同方向型 (解析)



(c) 逆方向型 (実験)



(d) 逆方向型 (解析)

図 14 層間変位時刻歴

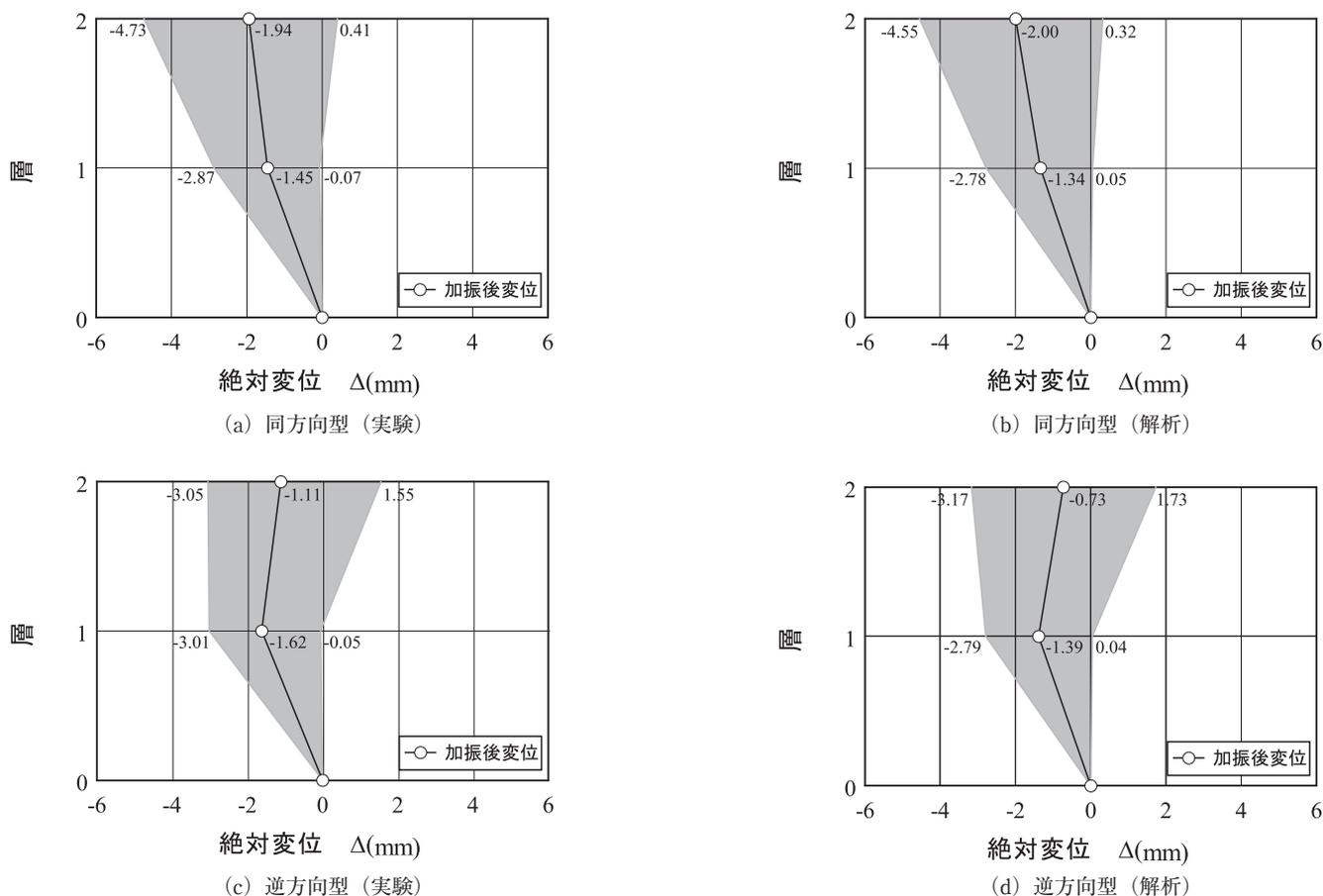


図 15 変形状態と加振後変位

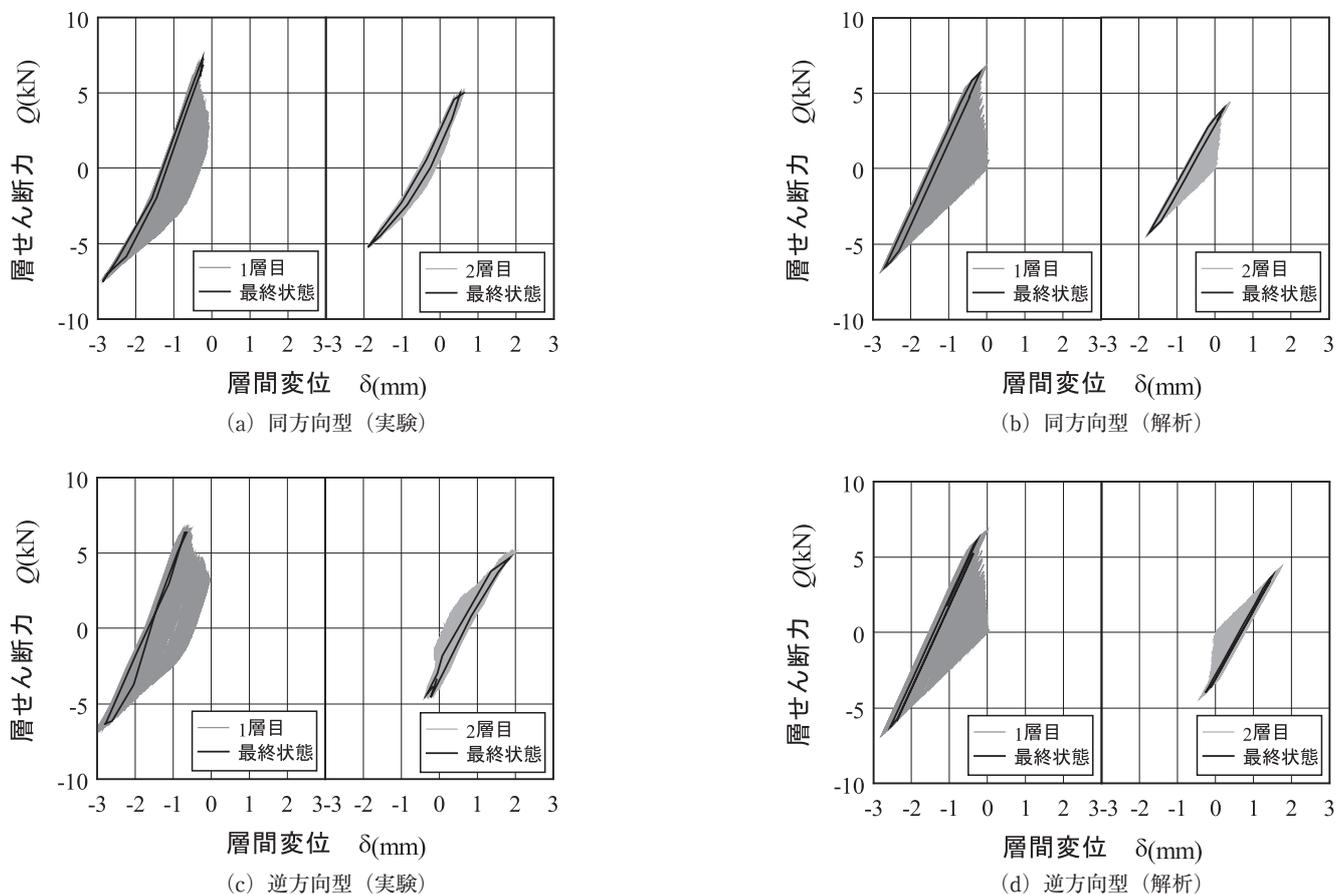


図 16 層せん断力-層間変位関係

素材特性には、完全弾塑性型モデルを用いる。また、架構の水平弾性剛性は、柱上下端部にガセットプレートおよびリブプレートが溶接接合されており、柱の曲げ剛性が容易に算定できないため、図11に示す架構のみの振動台実験より算出した水平弾性剛性を用いる。

4. 解析概要

表4に数値解析に用いた材料特性を、図12に解析モデルを、それぞれ、示す。

数値解析には、任意形平面骨組の複合非線形解析プログラム「Combined non-Linear Analysis for Plane frame (CLAP. f)」をコード修正し、ノンコンプレッションブレースの復元力特性が利用できるものを用いる。

数値積分には、NewMarkの法を利用しており、値を $1/4$ (平均加速度法)、解析の時間増分を0.005秒としている。

解析モデルは、柱は2節点ビーム要素、梁の各節点は錘の質量を有する2節点ビーム要素とする。尚、柱の断面2次モーメントを調整することで、加振実験より求めた水平弾性剛性と等しくなるようにしている。

また、解析に用いる入力波と減衰定数は、振動台実験と同じものを用いる。

5. 結果と考察

図13～16に各実験結果と数値解析結果を示す。図13に加速度時刻歴を、図14に層間変位時刻歴を、図15に変形状態と加振後変位を、図16に層せん断力-層間変位関係を、それぞれ、示す。また、それぞれ図の(a)に同方向型の実験結果を、(b)に同方向型の解析結果を、(c)に逆方向型の実験結果を、(d)に逆方向型の解析結果を、それぞれ、示す。

5.1 加速度時刻歴

架構の水平弾性剛性は、図16に示されているように正負で異なるが、図13より、正負の加速度の大きさはほぼ一致している。これは、徐々に加速度漸増させることで、直ぐに応答が収束して、図16の最終状態に見られるように、正負の弾性剛性が一定の履歴ループを示すためと考えている。また、2層目の加速度において、数値解析結果より振動台実験結果の方がやや大きくなった。

5.2 層間変位時刻歴

図14より、振動台実験ではSWEEP実験の時に楔が貫入するため、変位がわずかに生じた状態から計測を行っている。いずれも各層でブレースの抵抗しない側へと変形が漸増している。また、振動台実験値と数値解析値は概ね対応している。

5.3 変形状態と加振後変位

図15より、振動台実験値と数値解析値は概ね対応しており、同方向型では、各層でブレースの抵抗しない側へ変形が漸増している。また、逆方向型では、1層目の変位を2層目の変位で相殺し、構造物頂部での変位を抑えることができています。

5.4 層せん断力-層間変位関係

図16から、正方向載荷時には架構とブレースで抵抗し、負方向載荷時には架構のみで抵抗している。ただし、逆方向型では、2層目のブレースを逆向きに設置しているため、逆の性能が出ている。また、最終状態では、ブレースが塑性化することで、履歴ループを示している。

6. まとめ

Z型に配置したノンコンプレッションブレース付き2層骨組みの振動台実験と数値解析を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 数値解析結果においても、振動と共に架構の変形がブレースの抵抗しない側へ変形が漸増する。また、ノンコンプレッションブレースをZ型に配置することで、正負の水平弾性剛性は異なるが、正負の加速度は等しい。
- 2) いずれも振動台実験値と数値解析値は、概ね対応している。

以上の結果から、Z型に配置したノンコンプレッションブレース付き2層骨組みの数値解析においても構造物の変形に方向性を持たせ、変形のモードを調整・制御することができる。

謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクトの一環として実施されました。ここに、感謝の意を表させていただきます。

参考文献

- 1) 高松隆夫, 玉井宏章, 小持明宏: ノンコンプレッションブレースの履歴性状とエネルギー吸収性能について, 鋼構造年次論文報告集, 第11巻, pp.129-136, 2003. 11.
- 2) 玉井宏章, 高松隆夫, 松尾彰: ノンコンプレッションブレースの耐震性能向上について, 日本建築学会構造系論文集, 第595号, pp.131-138, 2005.9.
- 3) 高松隆夫, 玉井宏章, 加藤孝昌, 小畑寛行: ノンコン

- プレションブレースで補強した鋼構造骨組の復元力特性, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.429-436, 2006. 11
- 4) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 澤田樹一郎, 松尾彰:Z型ブレース付門型ラーメン架構の振動台実験, 広島工業大学紀要研究編, 第43巻, pp.213-220, 2009. 2.
- 5) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 荊尾友裕, 澤田樹一郎, 松尾彰:Z型ブレース付門型ラーメン架構の振動特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 B, 構造Ⅱ, pp.743-744, 2009. 8.
- 6) 土江葉菜子, 高松隆夫, 澤田樹一郎, 玉井宏章, 三次行則, 山西央朗, 荊尾友裕, 松尾彰:Z型ノンコンプレションブレース鉄骨架構に関する振動解析, 日本建築学会中国支部研究会報告集, CD-ROM論文番号-253, 2010. 3.