

## 2層Z型ノンコンプレッションブレース架構の振動台実験について

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*・荊尾 友裕\*\*・三好 行則\*\*  
山西 央朗\*\*\*・澤田 樹一郎\*\*\*\*・松尾 彰\*\*\*\*

(平成21年10月31日受理)

### Shaking table tests of 2-storys-1-bay steel portal framed with Z-type brace

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Tomohiro KATARAO, Yukinori MIYOSHI,  
Teruaki YAMANISHI, Kiichirou SAWADA and Akira MATSUO

(Received Oct. 31, 2009)

#### Abstract

Non-compression braces resist no compression and only tension by function of a wedge device. 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. Therefore, shaking table tests on two stories frame are carried out to obtain the same results as the one story tests.

**Key Words:** non-compression braced, z-type braced frame, shaking table tests

#### 1. はじめに

著者等は、楔デバイスを設置したブレースをノンコンプレッションブレースと呼び<sup>1~3)</sup>、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研究を行っている。このブレースは、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し、圧縮方向の変位増分に対しては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防ぎ、Z型に配置した構造物に地震波を入力して振動させると、振動と共に構造物の変形が一方向へ漸増する。

既報の文献<sup>4~5)</sup>では、1層1スパンの架構にノンコンプレッションブレースをZ型に配置した振動台実験を行い、以下の知見が得られている。

- 1) 構造部の変形が、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

弾性剛性が異なり、構造物の固有振動数は、架構のみとブレースをX型に配置した架構との間の値を示す。

- 3) 正弦波を入力した弾性加振実験の場合、一方向へ変形が収束し、変形の漸増が生じなくなる。この時、架構の荷重-変形関係は、完全な線形挙動(線形関係)となる。
- 4) 正弦波を入力した弾塑性加振実験の場合、楔デバイスが機能する限り(楔が貫入限界を迎えない限り)、エネルギーを吸収すると共に、ブレースが抵抗しない側への変形を保持したまま、一定の履歴を示す。

このような抵抗特性を有しており、これから新たな構造システムを確立できる可能性がある。

そこで、本研究では、多層構造物においてノンコンプレッションブレースをZ型に配置した場合、どのような影響を与えるかを明らかにすることを目的とし、2層1スパンの架構を用いて振動台実験を行う。方法としては、実験変数を2層1スパンの架構へのブレースの配置方法として、架構の固有振動数を有する正弦波を入力する弾塑性加振試

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

\*\*\* 広島工業大学高性能構造システム開発・研究センター

\*\*\*\* 広島大学大学院社会環境システム専攻

表1 素材特性

	材種	ヤング係数	降伏応力度	引張強さ	降伏比	ひずみ硬化 開始ひずみ
		E (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_y/\sigma_u$ (%)	$\epsilon_{ST}$ (%)
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

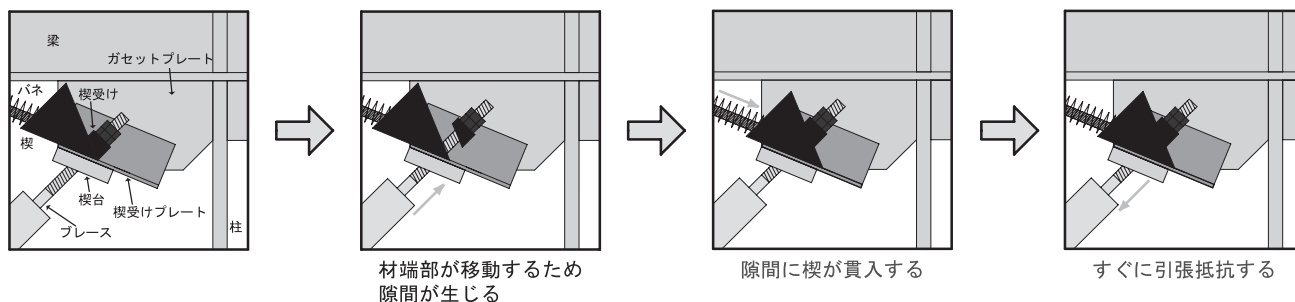


図1 ノンコンプレッションブレースの作動概念

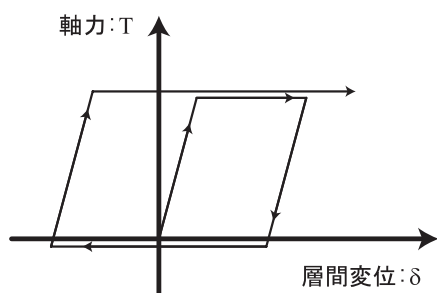


図2 復元力特性

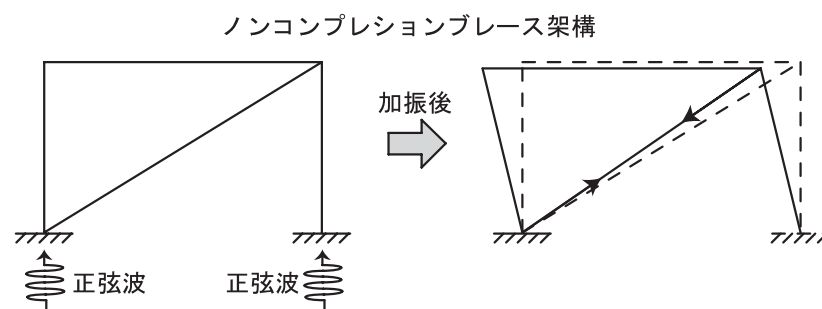


図3 変形状態

験を行う。

## 2. 実験概要

本実験では、2層1スパンのラーメン架構にノンコンプレッションブレースをZ型に配置して振動台実験を行う。

### 2.1 ノンコンプレッションブレース

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の機能として、以下の機能が挙げられる。

- 1) 架構がいかなる変形状態であっても、ブレースに引張変形が作用すると直ぐに引張抵抗する。
- 2) 圧縮方向の変形に対しては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) ブレース端部が移動することで生じた間隙に、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、ブレースには緩みは生じない。

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ため、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、スリップ現象等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、ブレースに圧縮変形が作用すると楔が貫入し、ブレースに軸力が導入されていくので、構造物の層間変位が一方向に増加していく。このため、構造物の変形を一方向に生じるように制御する事が可能となる。

### 2.2 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にブレース配置方法を、図6にブレース詳細を、図7に塑性化部位詳細を、図8に楔・楔受けの詳細を、それぞれ、示す。

鉄骨架構の柱には、PL-12x50 (SS400) を、梁には

2層Z型ノンコンプレッションブレース架構の振動台実験について

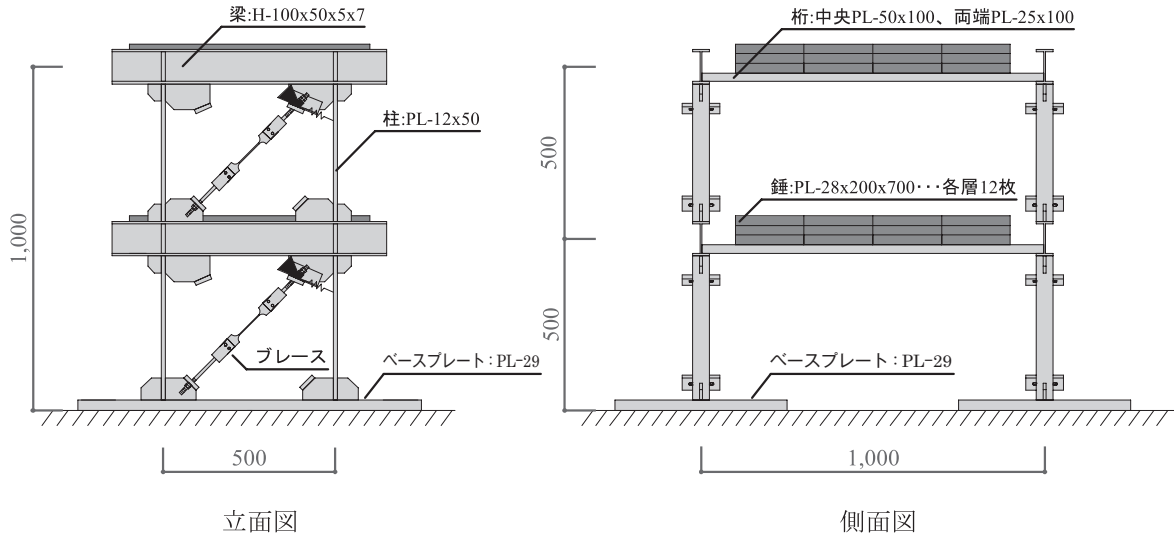


図4 試験体形状

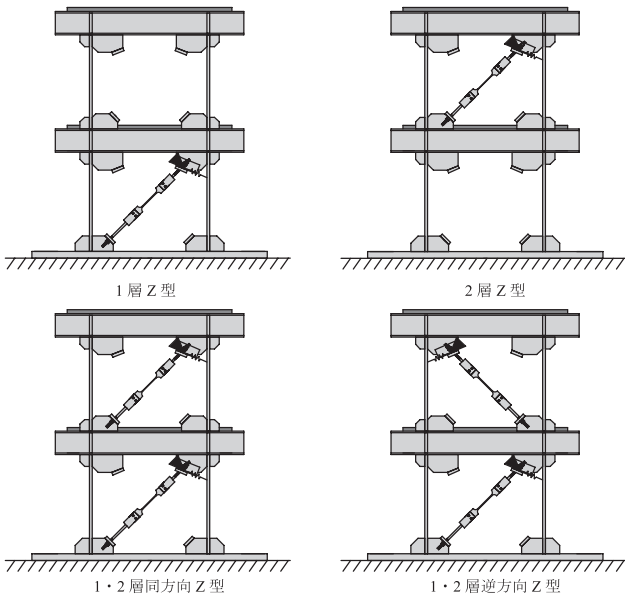


図5 実験変数

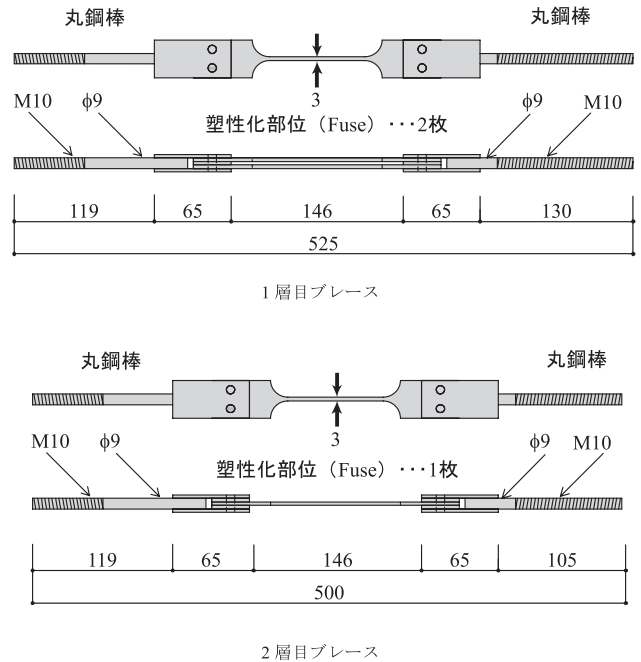


図6 ブレース詳細図

H-100x100x5x7 (SS400) 使用し、柱と梁を隅肉溶接接合し、2層1スパンの架構としている。そして、柱と梁および柱とベースプレートの接合部には、ガセットプレートとリブプレートを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-25x100 (SS400)、両端部にPL-25x50 (SS400)を設置して、ボルト接合した立体骨組である。そして、試験体の各層の桁の上部には、鉋としてPL-28x200x700を12枚(約4kN)積載し、質点としての質量mを430kgとする。

ブレース配置方法として、まずノンコンプレッションブレースを1層目のみに設置したもの(1層Z型)、2層目のみに設置したもの(2層Z型)、1層目と2層目にZ型

で同方向になるようブレースを配置したもの(1・2層同方向Z型)及び、2層目のブレースを向きを変えて逆方向になるよう配置したもの(1・2層逆方向Z型)とし、計4種類としている。また、抵抗特性を確認するために、ブレースのない架構のみの実験も行っている。尚、本実験では、ブレース以外の部位は各実験時に弾性範囲に留まる素材特性・断面特性を採用している。

ブレースには、1層目に材長525mm、2層目に材長500mmの丸鋼棒(M10, φ9, SS400)を使用する。全長の中央には、ブレース軸耐力を調整するための塑性化部位(Fuse)を1層目には2枚2層目には1枚取付け、2層目より1層目の剛性を高くしている。ブレースの初期導入軸力に関しては、ナットを軽く締める程度に留めている。

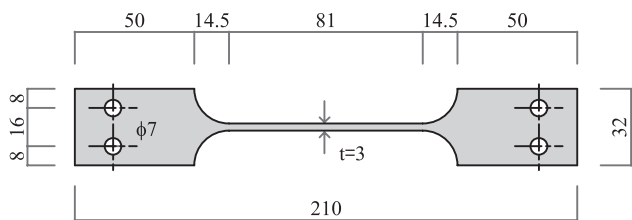


図7 塑性化部位詳細図

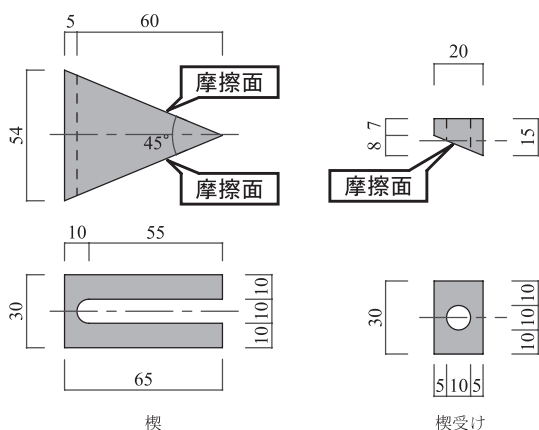


図8 楔・楔受け詳細図

楔および楔受けは、ブレースから伝達される圧縮力の接触面方向分力に対して、接触面における摩擦力により抵抗し、滑らないようにする必要がある。このため、楔と楔受け、楔と楔台との接触面には、発錆処理（塩分濃度5%程度の食塩水により、2週間程度湿潤状態に保つ）を施して、静止摩擦係数 $\mu$ を増大させている。本実験で用いた楔デバイスは、静止摩擦係数 $\mu = 0.78$ であり、楔が滑らないように貫入角度を45度としている。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、小さなバネ定数を持つバネを用いている。

### 2.3 加振装置と加振プログラム

図9に本実験で用いる加振装置と計測位置を示す。

振動台の上に試験体のベースプレートを緊結して、試験体を設置する。加振としては、振動台を水平方向に加速度加振する。振動数と振動台直下に設置した加速度計より得られた加速度を制御値とする。

本実験では、SWEEP試験と正弦波加振試験をそれぞれの試験体で行う。SWEEP試験は、1 Hz から 20 Hz まで 0.1 秒間に 0.01 Hz ずつ徐々に振動数を上昇させ、共振曲線から試験体の固有振動数を求める。また、正弦波加振試験で入力する振動数は、SWEEP試験により得られた試験体の固有振動数としている。尚、各試験体の性状が異なるため、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。

### 2.4 計測方法

変位を計測するために、ベースプレートに計測用柱 H-100x100x6x8 (SS400) を隅肉溶接接合している。そして、

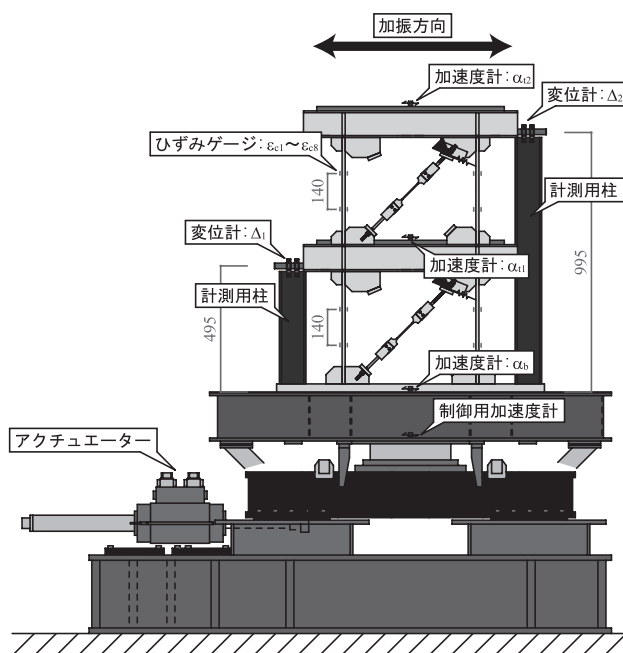


図9 加振装置と測定位置

頂部に変位計を設置し、各層で振動台との相対変位（絶対変位） $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ を計測する。また、各層の層間変位 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ は、 $\delta_1 = \Delta_1$ 、 $\delta_2 = \Delta_2 - \Delta_1$ として算出する。尚、計測用柱は加振方向に対して強軸となるように設置している。このため、固有振動数が高く加振時においても振動することがないため、計測値としては、それぞれの層と振動台との相対変位を計測している。

加速度としては、加速度計から振動台中心位置の加速度 $\alpha_b$ 、各層の垂上面中心位置の加速度 $\alpha_{t1}$ 、 $\alpha_{t2}$ を計測する。そして、試験体の層せん断力 $Q$ 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して柱軸方向ひずみ $\epsilon_{c1} \sim \epsilon_{c8}$ を計測する。尚、柱軸方向ひずみにおいては、架構の1構面のみ計測し、2倍することで架構全体のひずみとしている。

## 3. 水平弾性剛性

試験体は、2層1スパンの門型フレーム架構にノンコンプレッションブレースをZ型に配置したものである。

試験体の水平弾性剛性評価式を算出するにあたり、図10に示す力学モデルを用い、図11に復元力特性モデルを示す。ブレース架構であるので、架構とブレースによるトラス構造とに分解して、それぞれの剛性を算出した後に、足し合わせるものとする。剛性を算出するにあたり、以下の仮定を設ける。尚、各水平剛性は表2にまとめた。

1) ブレースは、軸部、軸部と塑性化部位の接合部、塑性化部位を含む偏断面を有しており、軸方向弾性剛性の算出が煩雑なため、引張実験結果より軸方向弾性剛性を求

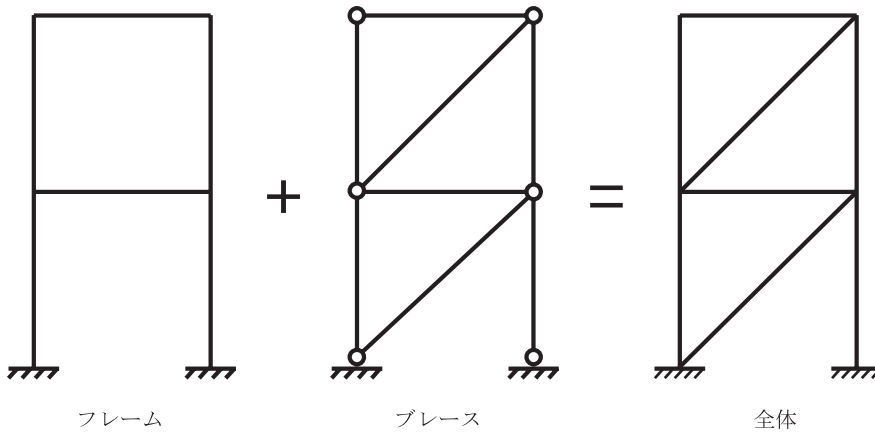


図10 力学モデル

表2 水平剛性

		水平剛性 (kN/mm)
フレーム	1層目	2.20
	2層目	2.48
ブレース	1層目	3.50
	2層目	2.58

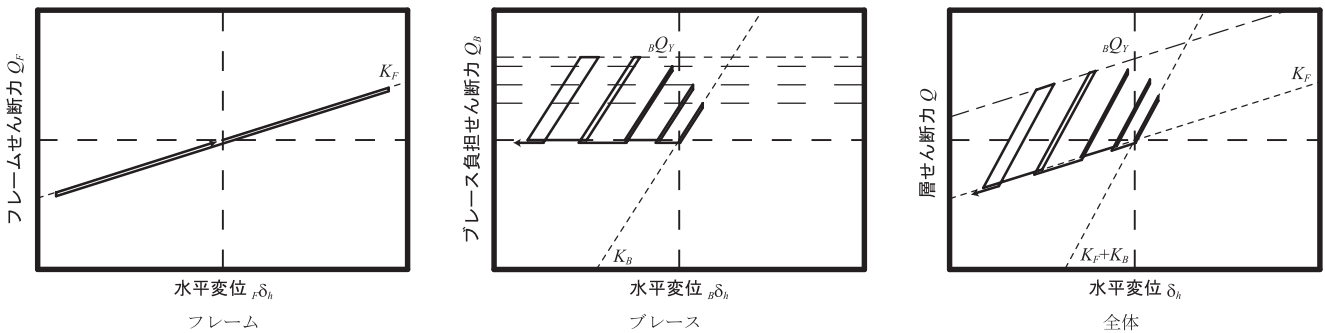


図11 復元力特性モデル

- める。また、降伏耐力については、塑性化部位の降伏耐力を用いる。
- ブレースの素材特性には、完全弾塑性型モデルを用いる。
  - 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は算定できないため、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。
  - ブレースをZ型に配置し、正方向荷重で抵抗するように設置している。このため、水平弾性剛性は、正方向荷重では、架構とブレースの値を足したもの、負方向荷重では、架構のみの値とする。

#### 4. 実験結果と考察

図12, 図13, 図14に各実験結果を示す。図12に加速度時刻歴を、図13に層せん断力 $Q$ -層間変位 $\delta$ 関係を、図14に相対変位時刻歴をそれぞれ示す。

##### 4.1 加速度時刻歴

図12(a)に1層Z型, (b)に2層Z型, (c)に1・2層同方向Z型, (d)に1・2層逆方向Z型の実験結果を示す。尚、いずれかの楔が貫入限界を迎えるまでのデータを使用している。

(a), (b)より、1層目の最大加速度がほぼ同じであるが、

2層目の加速度は(b)のほうが小さい。これは、(b)の1層目が2層目よりも固有振動数が小さく免震のような効果を発揮したものと考えられる。

(a), (b), (c)より、いずれも試験体の負方向に比べ、正方向の加速度が大きくなっている。これは、1層1スパンの架構の結果と同様にブレースが抵抗する側は、ブレースの抵抗しない側より加速度が大きくなるためである。

また、(b)の1層目にはブレースを設置していないが、上正負の加速度に差異が生じているのは、2層目に影響されたためと考えられる。

そして、(d)においては、1層目では負方向の加速度が大きく、2層目では正方向の加速度が大きい。ブレースの設置状態としては、1層目が(a)と同じで、2層目が(b)と逆である。2層目については、同様の結果が得られているが、1層目では逆の結果が出ている。これは、1層目が2層目からの影響を受けやすいためと考えられる。

##### 4.2 層せん断力 $Q$ -層間変位 $\delta$ 関係

図13(a)に1層Z型, (b)に2層Z型, (c)に1・2層同方向Z型, (d)に1・2層逆方向Z型の実験結果を示す。

(a)から1層目のブレースにおいて、正方向では、フレームとブレースを足し合わせた剛性で抵抗し、負方向ではフレームのみの剛性で抵抗したことが良く分かる。そして、正方向への変位は、生じなかった。更に、変形が収束して



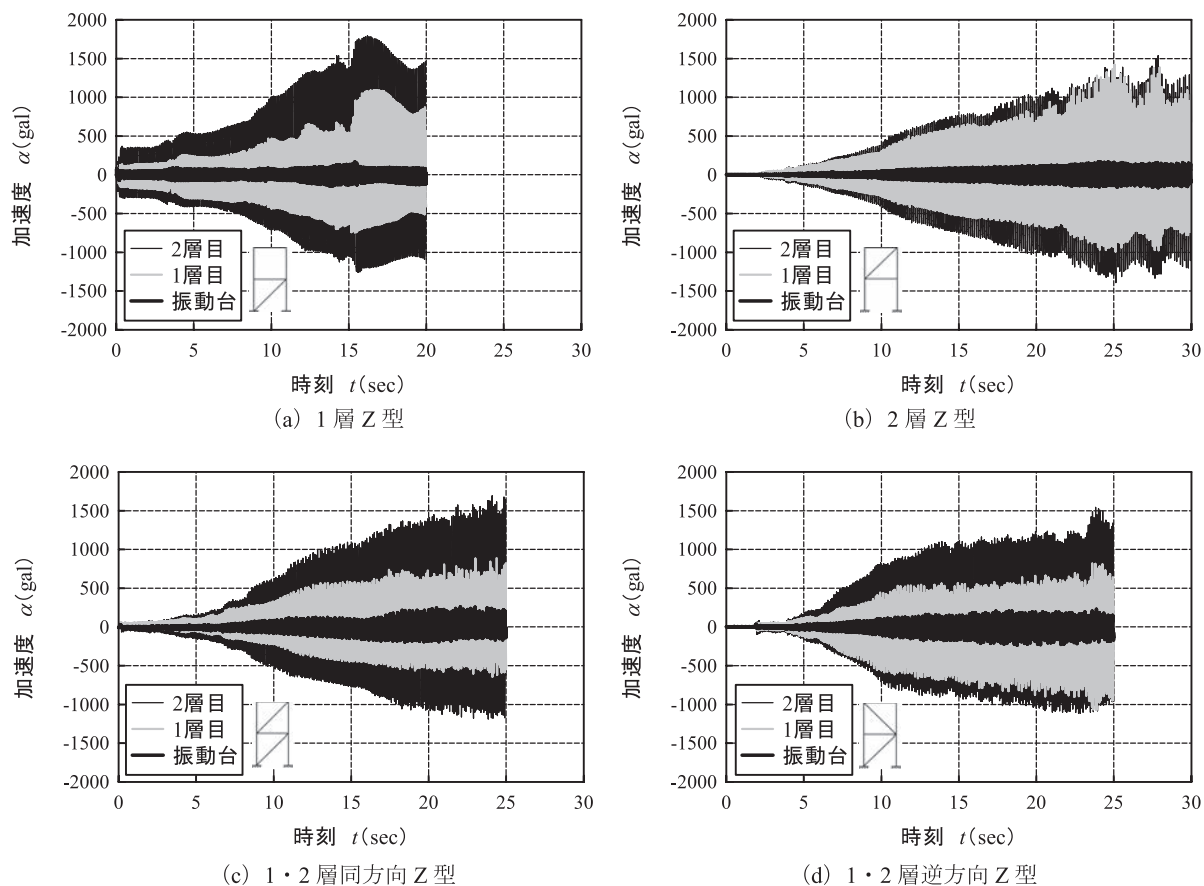


図12 加速度時刻歴

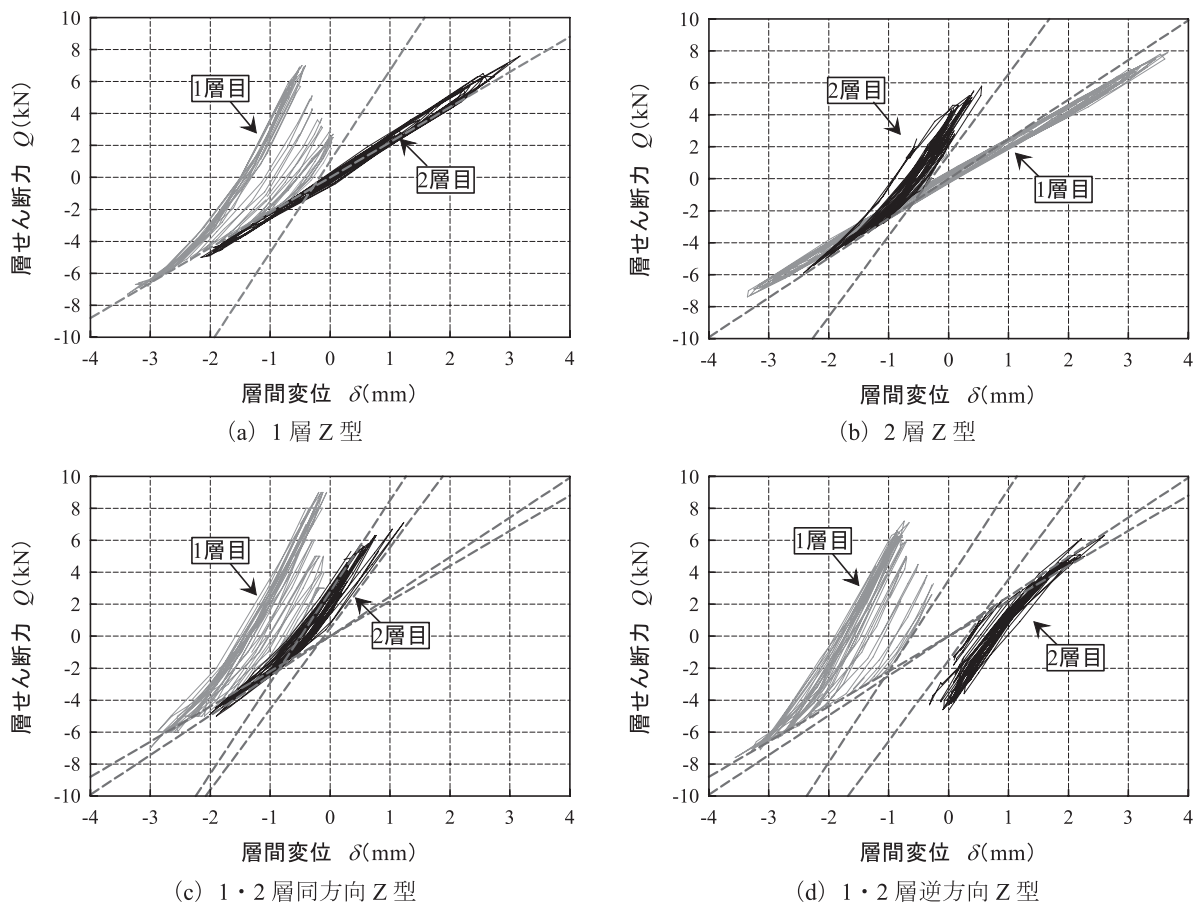


図13 層せん断力Q - 層間変位 $\delta$ 関係

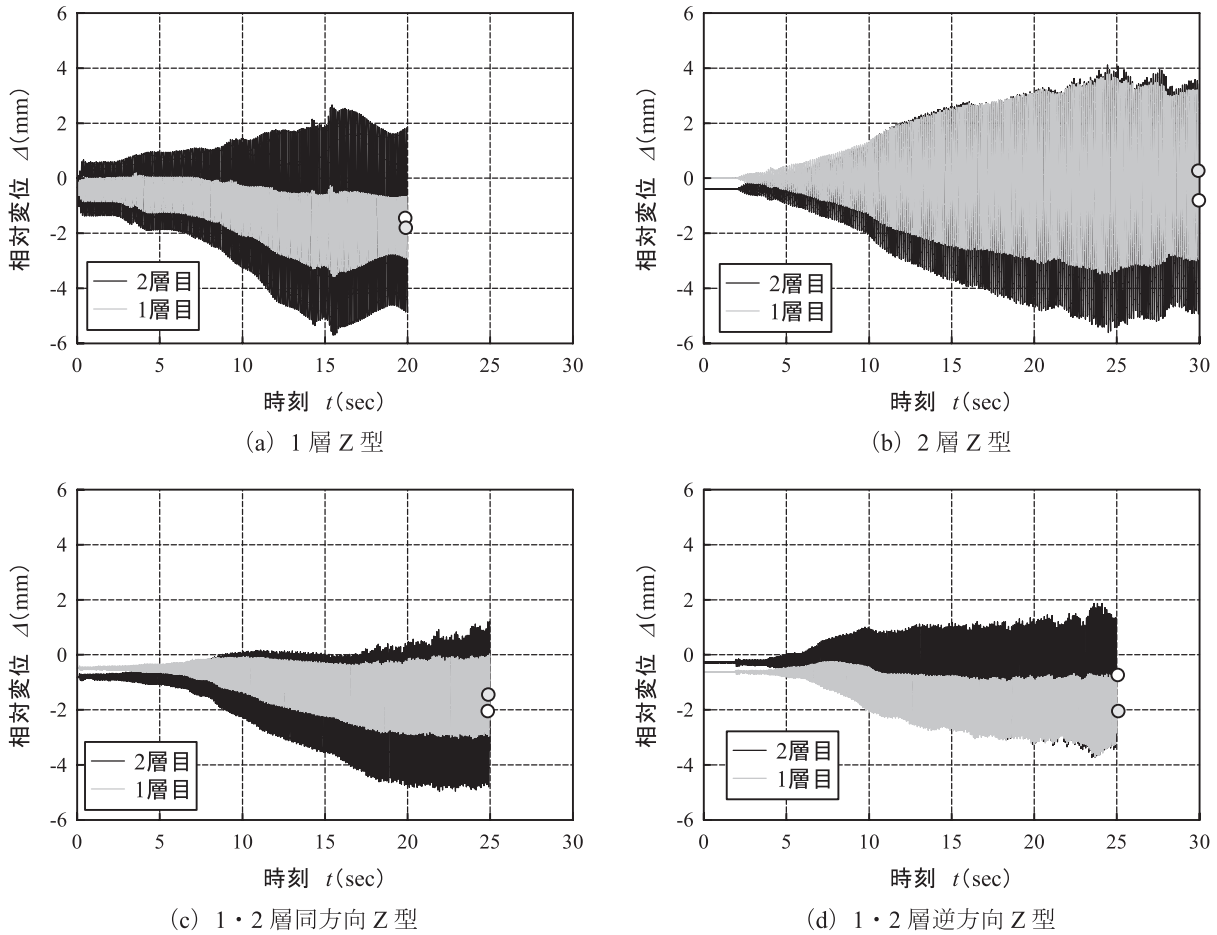


図14 相対変位時刻歴

おり、完全な線形挙動を示した。

(b)において、2層目のブレースは1層目と異なり、ブレースの剛性が低いため、最大の正方向にもわずかに層間変位が生じたが、全体として変形に方向性を持たせることができている。

(c)では、(a)と(b)におけるブレース設置層の結果と同じになったが、(d)では、2層目のブレースを逆方向に配置しているため、2層目において(b)とは逆の性能が出ている。

いずれの試験体においても、変形が一方へ漸増する性能が得られていることがわかる。楔デバイスの機能により、ブレースが抵抗しない側へ変形したとき、楔が貫入することで変形が反対側へ移動すると共に、ブレースが直ぐに抵抗するため、張力を導入するような作用が生じて、構造物の変形が一方へ漸増するためである。また、ブレースを設置していない層では、変形が漸増する現象は生じていない。このため、各層におけるZ型ブレースの性能は独立していることがわかる。ただし、地震波の入力量については、4.1節からもわかるように他層の影響を受ける可能性があるため、架構の応答を検討するには、各層間における相互の影響を考慮する必要がある。

#### 4.3 相対変位時刻歴

図14(a)に1層Z型、(b)に2層Z型、(c)に1・2層同方向Z型、(d)に1・2層逆方向Z型の実験結果を示す。

ブレースを設置している層においては、SWEEP試験の時に楔が貫入してしまうので、負方向へ変位が生じた状態から計測を行っている。いずれの試験体も、全体では、負方向へ変形が漸増していくのがわかる。

(c)においては、前述にも述べたように、2層目は1層目よりも剛性が低く、正方向へわずかに戻っている。(d)では、1層目の変形が2層目で相殺されて、最終的に、0.8mm程度となった。このように、逆方向にブレースを配置することで、頂部の変形を抑えることができる。

#### 5. まとめ

2層鋼構造Z型ノンコンプレッションブレース架構の振動台実験を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 1・2層同方向Z型にブレースを配置した場合には、1層1スパンの架構と同様にブレースの抵抗しない一方へ変形が漸増する。
- 2) 1・2層逆方向Z型にブレースを配置した場合には、1層目の変形を2層目の変形と相殺し、構造物頂部での変形を抑えることができる。

## 謝 辞

本研究は、広島工業大学「高性能構造システム開発研究センター」(代表者 高松隆夫教授)のプロジェクト研究の一環として実施されました。

## 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: ノンコンプレッ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.