

## Z型ブレース付門型ラーメン架構の振動台実験

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*・山西 央朗\*\*・澤田 樹一郎\*\*\*・松尾 彰\*\*\*

(平成20年10月31日受理)

### Shaking Table Tests on Steel Portal Framed Structures with Z-type Brace

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI,  
Kiichirou SAWADA and Akira MATSUO

(Received Oct.31,2008)

#### Abstract

A non-compression brace does not resist a compressive force but a tensile one by means of a wedge device. Therefore, the brace does not buckle or loosen due to plastic elongation of the brace. Response of z-type of non-compression braced frame under dynamic loading is predicted to be one-sided. The z-type brace is proposed as an earthquake resistant element with new behavior. Shaking table tests were carried out on one-story z-type braced frame specimens to clarify the one-sided response.

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

#### 1. はじめに

現在、一般的なブレース構造物においては、座屈拘束ブレースに代表されるエネルギー吸収ダンパーを設けて、地震エネルギーを塑性変形により吸収する設計が成されている。

エネルギー吸収ダンパーは圧縮引張繰返し载荷下におけるエネルギー吸収能力を確保する必要があり、座屈拘束ブレースにおいては、ブレース材が座屈しないように外周を拘束材で補剛することで圧縮軸力にも抵抗する性能を有している<sup>1,2)</sup>。また、著者等もエネルギー吸収ダンパーとして期待できるノンコンプレッションブレースを提案している。このブレースは、引張軸力のみ抵抗する機構を有しており、これをX型に配置することにより完全弾塑性型

の復元力特性を示し、安定したエネルギー吸収効率を有するブレースとなる<sup>3-6)</sup>。これら、各種ブレースにより、構造物にエネルギー吸収能力を付与し、地震外力を受けた際の建築構造物を制御するという設計が行われている。

一方、ノンコンプレッションブレースをX型ではなくZ型に配置した場合、“楔デバイス”の機構から、構造物の変形が一方に進行することが容易に予想される(図1参照)。このように、構造物の変形に方向性を持たせることにより、新たな構造システムを構築できる可能性がある。例えば、隣接する構造物間のクリアランスの問題の解消や、構造物の変形モードを調整・制御することが可能になると考えられる。これまで研究されている、いずれの装置も、構造物の変形応答の方向性(応答が発生する向き)を制御するコンセプトを持った装置は提案されていない。

\* 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知的機能科学専攻

\*\*\* 広島大学大学院社会環境システム専攻

表 1 試験体架構の耐力・剛性

	材料	E N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_y/\sigma_u$	$\varepsilon_{st}$ %	$\varepsilon_f$ %	
ブレース	丸鋼棒	SS400	205,000	318	453	0.68	2.36	26.0
	塑性化部位	SS400	205,000	318	436	0.72	2.34	29.0
柱	STKR400	205,000	318	433	0.71	2.00	27.0	

E:ヤング係数  
 $\sigma_y$ :降伏応力  
 $\sigma_u$ :引張強さ  
 $\sigma_y/\sigma_u$ :降伏比  
 $\varepsilon_{st}$ :歪硬化係数  
 $\varepsilon_f$ :終局歪

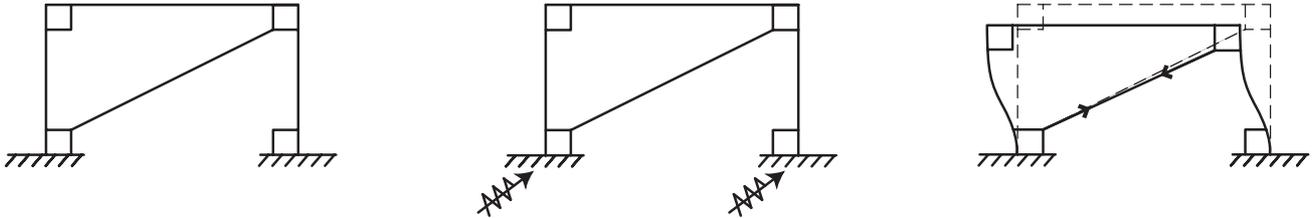


図 1 変形状態

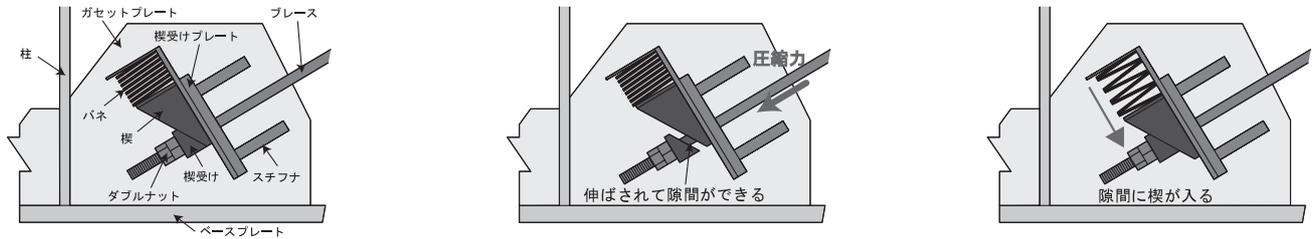


図 2 ノンコンプレッションブレースの材端部詳細及び作動概念

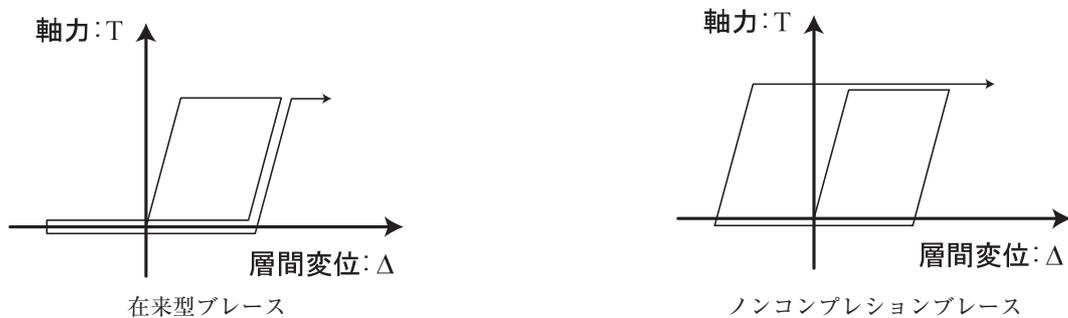


図 3 復元力特性モデル

そこで、本論文では、まず、ノンコンプレッションブレースを Z 型に配置した場合において、期待通りの性能（構造物の変形に方向性を持たせる性能）を付与できるか否かを検証することを目的とする。当該性能を検証するには、振動台実験を行う必要があるため、方法としては、モデル試験体として Z 型ブレース付門型ラーメン架構を用いた振動実験を行うものとする。

## 2. 実験概要

本実験では、従来型およびノンコンプレッションブレースを設置した門型ラーメン架構を用いて、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 2 に楔デバイスを配置したノンコンプレッションブレースの材端部詳細図及び作動概念図を、図 3 に在来型ブレースとノンコンプレッションブレースの復元力特性のモデルを示す。

ノンコンプレッションブレースの機能は、①地震水平力が作用すると、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し、塑性変形をして地震エネルギーを吸収する。②一方、ブレースは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せず、座屈を起こさない。③ブレース端部が

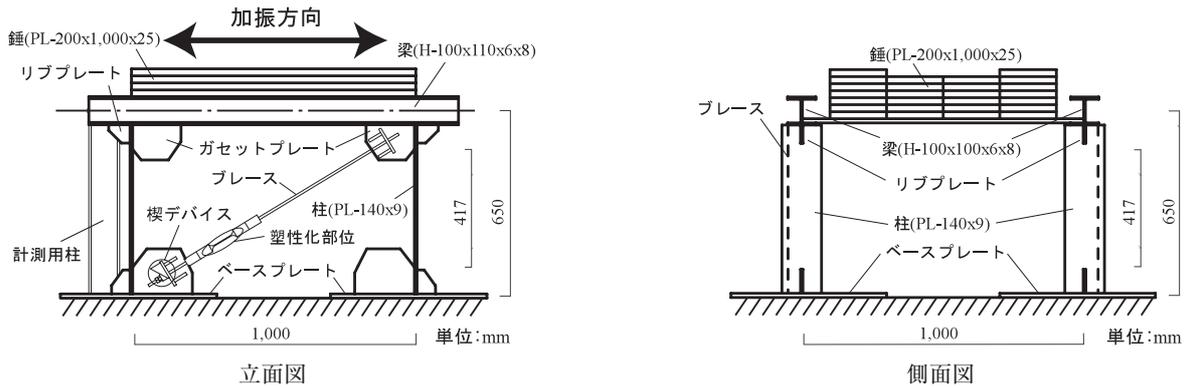


図4 試験体形状

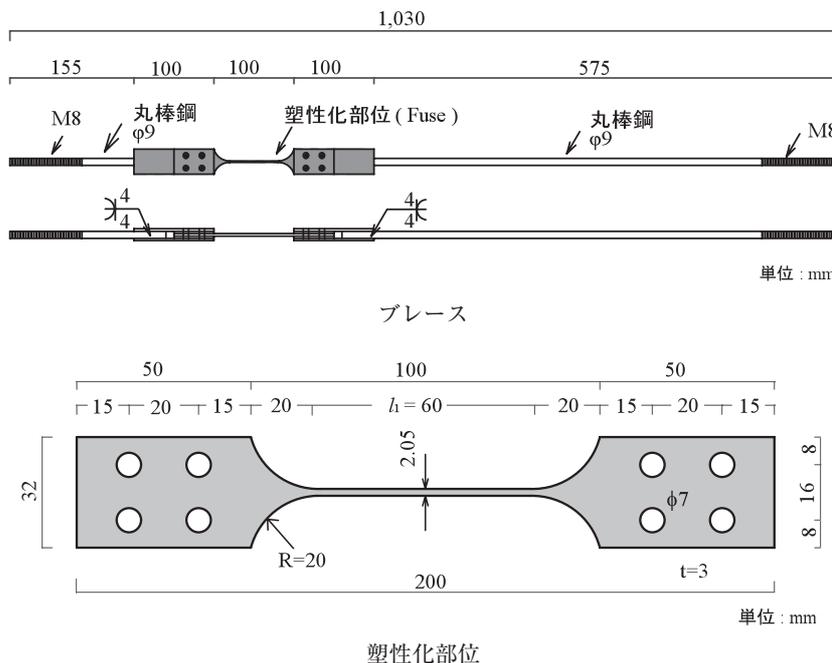


図5 ブレース・塑性化部位詳細

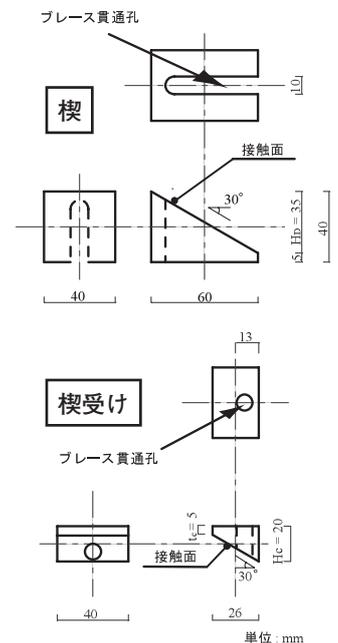


図6 楔・楔受けの詳細

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、細長比の大きなブレースが使用でき、比較的長いスパンの架構に対してもブレースの断面を過大にすることなく適用できる。

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方向に増加していく。このため、構造物の変形を一方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、図5にブレース・塑性化部位詳細を、それぞれ示す。

試験体は在来型ブレースをZ型に配置した(S型)ものと、ノンコンプレッションブレースをZ型に配置した(NC型)ものの2種類を用意する。また、架構のみの抵抗特性を検討するために、ブレース無しの架構(N型)の試験体も用意する。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。

鉄骨架構の柱には、PL-140x9(SS400)を、梁にはH-100x100x6x8(SS400)を使用し、柱と梁を隅肉溶接接合する。そして、柱と梁及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する。試験体は、この架構を2組並列させ、各架構を梁下フランジにボルト接合した桁PL-1000x150x16(SS400)3列並列により連結した立体骨組架構である。

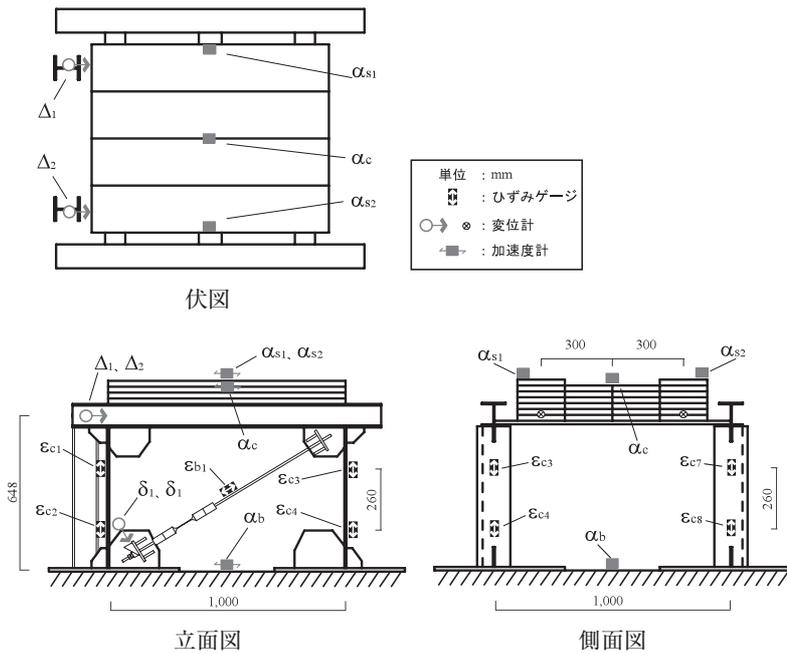


図7 計測点位置と計測諸量

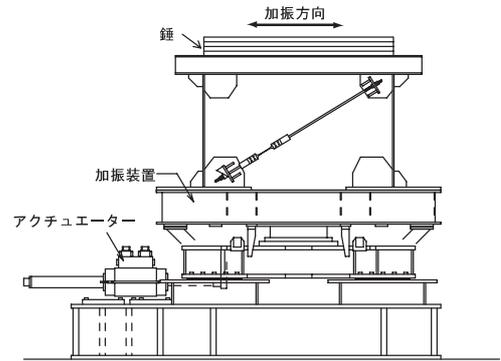


図8 加振装置

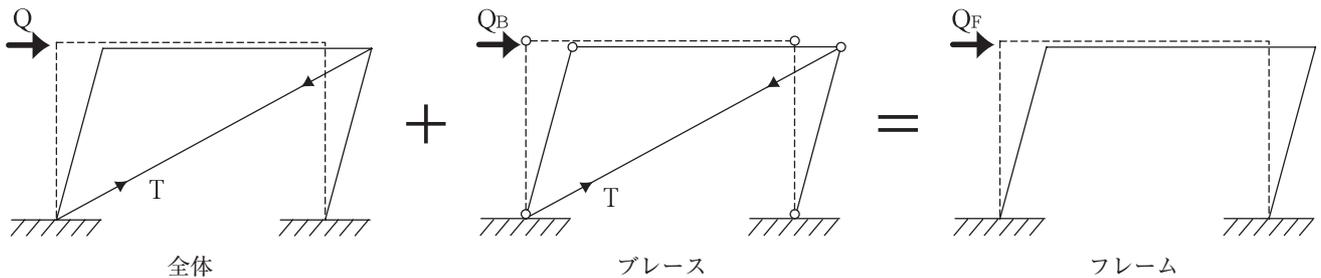


図9 力学モデル

そして、試験体の桁に錘（PL-200x1000x25を26枚）を約10kN積載し、質点としての質量：mを試験体中央上部の合計質量約1.15tとする。

また、ブレースには、材長1,030mmの丸鋼棒（M8，φ9，SS400）を使用する。全長の1/3の箇所にはブレース軸耐力を調整するための塑性化部位（Fuse）を取り付けている。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る。尚、在来型ブレースにおいては、座屈現象が生じることで、応答が複雑になる。これを回避するために、下端部の内側のナットを除去して、圧縮力が入らないように設置している。

図6に楔・楔受けの詳細図、表2にバネの特性を、それぞれ示す。楔および楔受けは、アンカーボルト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、楔と楔受けの接触面には、発錆処理（塩分濃度5%程度の食塩水により、1週間ほど湿潤状態を保つ）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 $\mu=0.73$ であり、楔が滑らないように貫入角度を30度としている。また、図2からもわかるように、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、表2に示す程度の小さなバネ定数を持つバネを用いている。

### 2.3 载荷装置と加振プログラム

図8に本実験で用いる振動台を示す。振動台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、純鉄骨架構（N型）、在来型ブレース付架構（S型）、ノンコンプレッションブレース付架構（NC型）の弾性正弦波加振試験（N-E、S-E、NC-E）と、S型、NC型の弾塑性正弦波加振試験（S-P、NC-P）を行う。

弾性加振試験および弾塑性加振試験の前後には、固有振

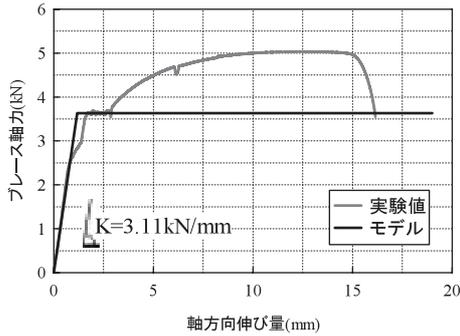


図10 ブレース軸力-軸方向伸び量関係

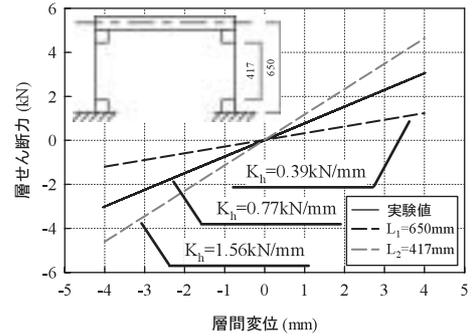


図11 ブレース軸力-軸方向伸び量関係

動数を求めるための弾性 SWEEP 試験を行う。尚、SWEEP 試験は、1Hz から 20Hz まで、1 秒に 1Hz ずつ振動数を上昇させるものである。また、弾性加振試験および弾塑性加振試験では、入力する振動数を SWEEP 試験より得られた試験体の固有振動数とし、入力加速度を、S 型と NC 型の頂部平均加速度が同程度となるように載荷する。

### 2.4 計測方法

図7に計測位置を示す。変位としては、図4に示す計測用柱に設置した変位計により、変位 $\Delta_1$ 、 $\Delta_2$ を計測し、平均値を試験体層間変位 $\Delta$ としている。加速度としては、振動台中心位置の加速度 $a_b$ 、錘上面の中心位置の加速度 $a_c$ を計測し、応答倍率( $= a_c/a_b$ )を算出する。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 $\epsilon_{c1} \sim \epsilon_{c8}$ 、ブレース軸部にひずみゲージを貼付してブレース材軸方向ひずみ $\epsilon_b$ を、それぞれ計測する。柱軸方向ひずみから求めた曲率と柱の曲げ剛性より、架構の負担する層せん断力 $Q_i$ を、ブレース軸部の軸方向ひずみ $\epsilon_b$ とブレースの軸方向剛性よりブレース軸力 $T_1, T_2$ を算出する。更に、試験体の層せん断力 $Q$ を、架構の負担する層せん断力 $Q_i$ とブレース軸力より算出するブレース負担層せん断力 $Q_b$ を足し合わせて算出する( $Q = Q_i + Q_b$ )。

### 3. 水平弾性剛性

試験体は、門型フレーム架構にブレースを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9に示す力学モデルを用いる。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。

- 1) ブレースは、軸部、軸部と塑性化部位の接合部、塑性化部位を含む辺断面を有しており、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。

- 2) ブレースの素材特性には、完全弾塑性型モデルを用いる。
- 3) 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、柱の曲げ剛性が簡単には計算できないため、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。
- 4) ブレースをZ型に配置し、正方向載荷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、正方向載荷では、架構とブレースの値を足したもの、負方向載荷では、架構のみの値とする。

### 4. 実験結果と考察

図12-14に、各試験体のSWEEP試験結果、弾性正弦波加振試験結果および弾塑性正弦波加振試験結果を、それぞれ示す。

図12にはSWEEP試験より得られた正弦波加振前後の応答倍率 $a_c/a_b$ -入力振動数 $f$ 関係を、図13には正弦波加振試験の層せん断力 $Q$ -層間変位 $\Delta$ 関係を、図14には正弦波加振試験の層間変位 $\Delta$ 時刻歴を示す。また、図12中には比較のためにN型の結果と既往の研究からX型に各ブレースを設置した場合の弾性時の結果を、図13中には図10と図11より求めた水平弾性剛性を併せて示す。

各値については、応答倍率 $a_c/a_b$ は振動台の加速度 $a_c$ と錘上面の加速度 $a_b$ より、入力振動数 $f$ は試験台の振動数より、柱とブレース軸部に貼付したひずみゲージ( $\epsilon_{c1} \sim \epsilon_{c8}, \epsilon_b$ )より、層間変位 $\Delta$ は振動台と試験体柱頭部の相対水平変位より、それぞれ算出している。

#### 4.1 振動性状

図12より、いずれの試験体においても正弦波加振試験前の振動数はほぼ10Hz前後で揃っている。また、試験後においては、S型の振動数が減少し、NC型の振動数は僅かに増加しており、NC型は弾塑性の加振を受けても振動

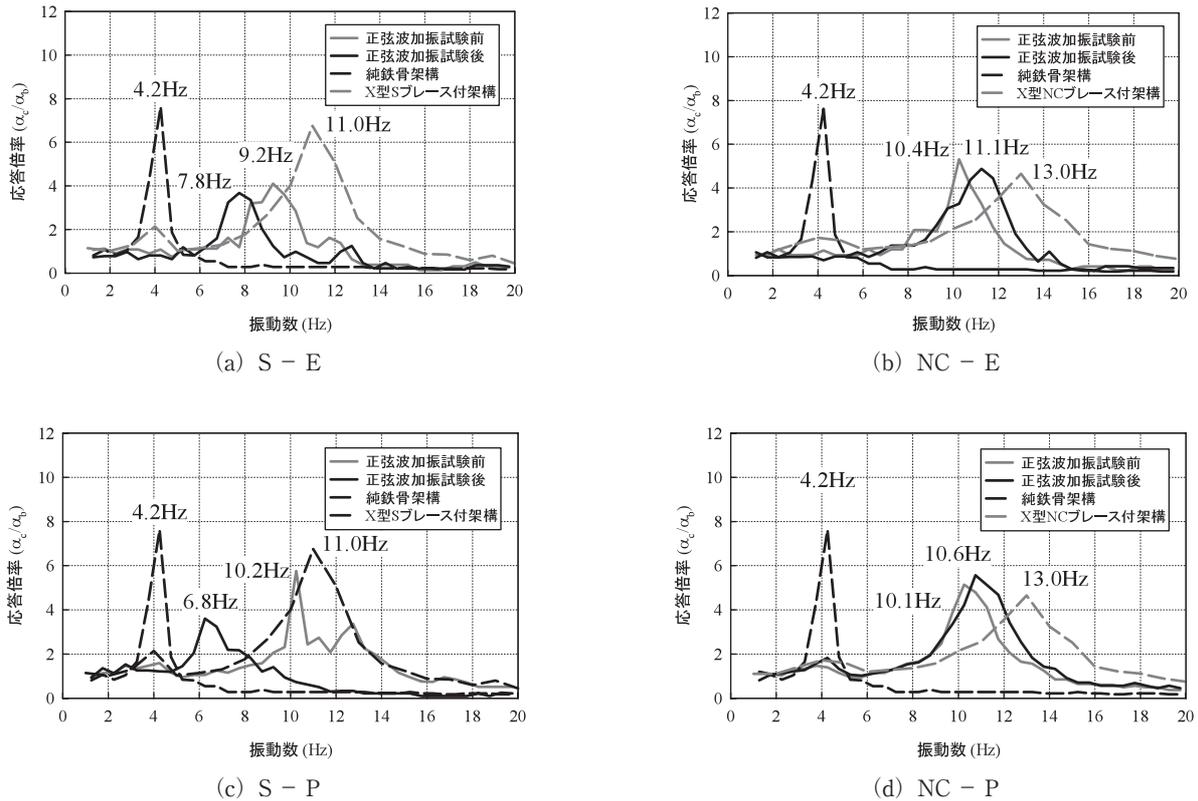


図 12 共振曲線比較

数がほぼ一定であり安定していることが分かる。

図 12(a), (c)より、弾性加振試験後よりも弾塑性加振試験後の方が振動数の減少が大きい。これは、弾性加振試験によりブレースが多少緩んだ影響であると考えられ、一方、弾塑性加振試験では、図 13(c)からも分かるように、ブレースに塑性伸びが生じることでスリップ現象が生じて試験体の水平弾性剛性が低下した影響である。

図 12(b), (d)より、いずれの加振試験後も振動数はほぼ一定である。これは、従来型では加振を受けることでブレースに緩みが生じる傾向にあったが、ノンコンプレッションブレースでは、楔が貫入するのでブレースに緩みが生じることなく、更に、楔が貫入することによりブレースに張力が導入されるために、僅かではあるが振動数が増加している。

#### 4.2 層せん断力-層間変位関係

図 13より、従来型 (S型) の正方向では架構とブレースの剛性を合わせた剛性で抵抗し、負方向では架構のみの剛性で抵抗する。S-E では履歴を描くことなく Bi-linear 型の履歴を、S-P ではスリップ型の履歴を、NC-E および NC-P ではいずれも徐々に負方向に層間変位が進行していることが分かる。

図 13(a)より、従来型ブレースの弾性加振試験では、正方向と負方向の弾性剛性が大きく異なるため、正方向の応

答が約 0.5(mm)、負方向の応答が約 1.0(mm)となり、正方向の応答が抑えられていることが分かる。一方、図 13(c)より、従来型ブレースの弾塑性加振試験では、正方向と負方向の剛性が異なるものの、正方向の応答が約 2.4(mm)、負方向の応答が約 2.7(mm)となり、正負の応答値に大きな差異は生じていない。これは、従来型ブレースでは、ブレースが塑性伸びを起こすことで、スリップ現象が生じ、試験体の水平弾性剛性が著しく低下し、負方向 (架構のみの水平弾性剛性) と一緒になるためである。

図 13(b), (c)より、ノンコンプレッションブレースの弾性加振試験および弾塑性加振試験共に、応答が負方向に進行している。弾性および弾塑性に関係なく、変形の方向が一方方向に進む性能が得られていることがわかる。いずれの場合も、負方向に層間変位が生じた時に楔が貫入して、変形が正方向に増分すると共に抵抗を開始するため、張力を導入するような作用が生じて、構造物の変形が負方向に進行する。弾塑性载荷下において、ブレースに塑性伸びが生じる場合においても、同様の性能が得られる。

#### 4.3 層間変位時刻歴

図 14より、従来型ブレースでは、弾性加振試験および弾塑性加振試験で共に、終始、正方向および負方向に層間変位が生じている。一方、ノンコンプレッションブレースでは、加振直後 (NC-P では 5 秒まで、NC-P では 3 秒まで)

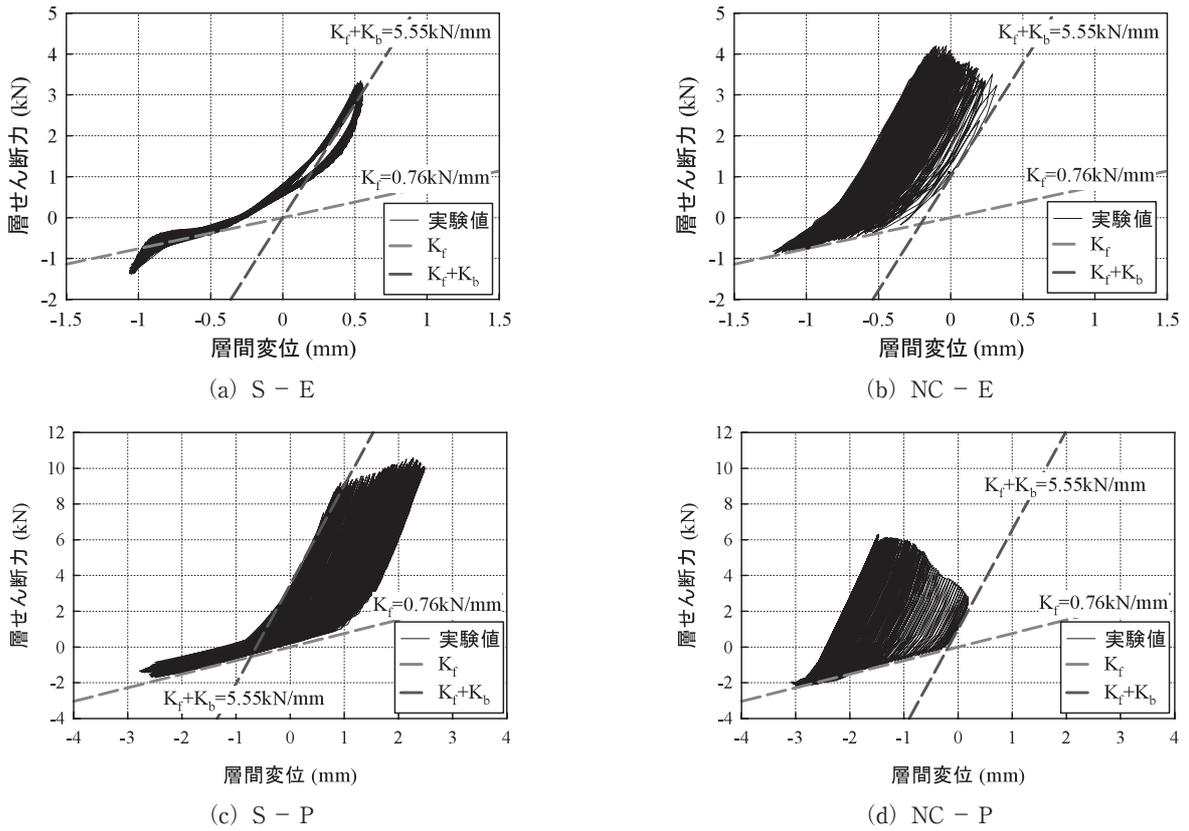


図 13 層せん断力-層間変位関係

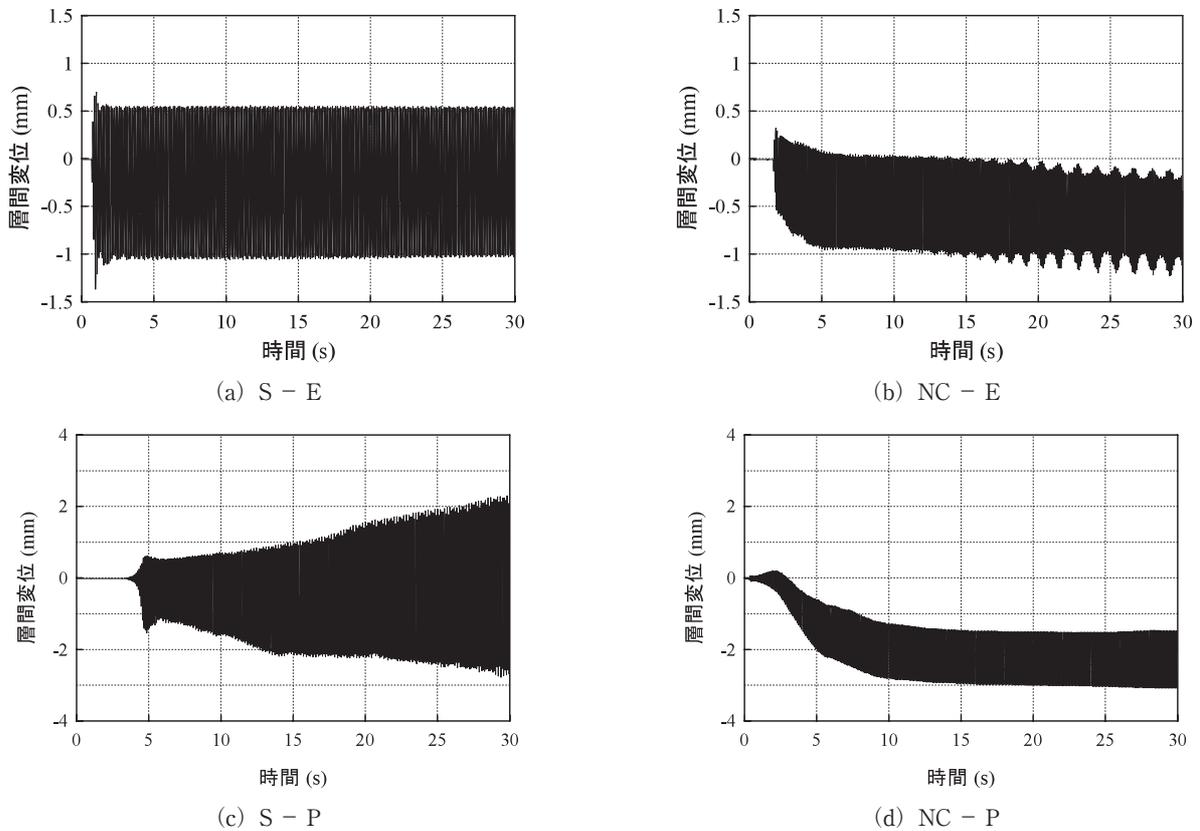


図 14 層間変位時刻歴

正方向にも層間変位が生じているものの、その後は、負方向に変形が進行し、正方向には変形が生じていないことが分かる。

以上より、ノンコンプレッションブレースにより、弾性および弾塑性関係なく、著者等の期待する性能（変形の方法を制御する性能）が得られることが分かる。

## 5. まとめ

Z型ノンコンプレッションブレースおよびZ型従来型ブレース付門型ラーメン架構の振動台実験を行い、以下の知見が得られた。

1. 従来型ブレースをZ型に配置することにより、弾性範囲であればブレースが抵抗する側の応答を小さくすることができるが、弾塑性になると、スリップ現象が生じるため、ブレースが抵抗する側の応答を小さくすることは期待できない。
2. ノンコンプレッションブレースをZ型に配置することにより、弾性および弾塑性の荷重に対して、構造物の変形を一方方向に進行させる性能を付与できる。
3. Z型に配置した場合の固有振動数は、ブレース無しの架構とブレースをX型に配置した場合の中間の値を示す。

## 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。

本研究の経費の一部は、社団法人日本鉄鋼連盟「2007

年度鋼構造研究・教育助成事業（建築）」の助成金から支出しました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 長尾直治, 高橋茂治: 角鋼管を鉄筋コンクリートで被覆したアンボンドブレースの弾塑性性状, その2 解析的考察, 日本建築学会構造系論文集, 第422号, pp.45-56, 2001. 11.
- 2) 中村庄滋, 矢部喜堂, 真瀬伸治, 堀富博, 石川二巳穂, 宮本秀樹: 極低降伏点鋼を用いたアンボンドブレースに関する研究, その3.アンボンドブレースダンパーを有する建物の試設計, 日本建築学会大会学術講演梗概集, c-1, 構造Ⅲ, pp.411-412, 1995. 8.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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
- 6) 高松隆夫, 玉井宏章, 福原章宏, 山西央朗, 加藤孝昌: ガセットプレートへのノンコンプレッションブレースの簡易設置工法, 鋼構造年次論文報告集, 第16巻, 印刷中