

1層非対称Z型ノンコンプレッションブレース架構の振動台実験

高松 隆夫*・玉井 宏章**・山西 央朗***・小松 真吾****

(平成24年10月31日受付)

Shaking table tests on single-story anti-symmetric Z-type non-compression braced frame

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Teruaki YAMANISHI and Shingo KOMATSU

(Received Oct. 31, 2012)

Abstract

A non-compression brace developed by authors has useful mechanism resisting only tensile axial force by function of wedge-device. Z-type non-compression braced plane frames show one-directional horizontal deformation characteristics. Anti-symmetric Z-type non-compression braced space frames consisting of the non-compression-braces arranged in a same rotational direction possess high-level seismic capability and high degree of freedom of brace arrangement in seismic design. This paper shows fundamental characteristics of the anti-symmetric Z-type braced frame by use of the shaking table tests and numerical analyses.

Key Words: Non-compression brace, Z-type braced frame, Shaking table tests, Numerical analyses

1. はじめに

地震時に大きく損傷させることにより地震エネルギーを積極的に吸収し、構造物に減衰性能を付加することのできる鋼材ブレースとして、座屈拘束ブレース¹⁾が挙げられる。座屈拘束ブレースは、芯材を座屈拘束材により拘束したもので、圧縮力作用時に座屈拘束材が芯材の座屈を拘束することで耐力低下を生じることなく安定した挙動を示すため、繰返し載荷時に完全弾塑性型の復元力特性が得られる。しかしながら、接合部も含めて大きな圧縮力が作用することにより、例えば、ガセットプレートの構面外座屈²⁾、座屈拘束材の幅厚比が大きい場合における局部座屈³⁾等の問題が生じ、座屈拘束ブレースが有効に機能できないことが他の研究者らによって指摘されている。

一方、著者らはノンコンプレッションブレースを開発し、研究を行っている。ノンコンプレッションブレースとは、著

者らが提案している楔デバイス⁴⁾を引張ブレースに適用したものであり、圧縮力が作用せず、引張力にのみ抵抗する鋼材ブレースのことをいう。このノンコンプレッションブレースを平面架構にX型配置すれば(X型ノンコンプレッションブレース架構)、完全弾塑性型の復元力特性を示すことが既往の実験的研究により明らかにされている⁵⁾。また、平面架構にZ型配置すれば(Z型ノンコンプレッションブレース架構)、楔デバイスの機能によって、平面架構の層間変形角が一方方向へと漸増していく特性を示すことが既往の実験的ならびに解析的研究によって明らかにされている⁶⁾。

Z型ノンコンプレッションブレースを用いた構造システムとして、図1に示すように、立体架構に非対称配置する非対称Z型ノンコンプレッションブレース架構を提案し、1層1スパン立体架構で種々のノンコンプレッションブレース配置とブレース降伏軸力50%の初期張力を変数とした地震応答解析を行った⁷⁾。文献7)の解析結果によると、①同一回

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 長崎大学工学部工学科

*** 東京工業大学都市地震工学センター

**** 広島大学大学院工学研究科建築学専攻

転方向配置とした場合、Z型の特性によって漸増振り変形を生じる②逆回転方向配置とした場合および初期張力を導入した場合、漸増振り変形を生じない③非対称Z型は完全弾塑性型の復元力特性を示す、という知見が得られており、振り変形を止めた場合においては、非対称Z型とX型の性能は等しくなる。したがって、非対称Z型として振り変形を止めることで、構造物の耐震性能を向上させるとともに設計の自由度が高くなる、ノンコンプレッションブレースの新しい可能性を活かした耐震設計法の確立に期待できる。

本論では、非対称Z型の基本的性能を明らかにするため、1層1スパンの模型試験体でブレース配置とブレース初期張力を変数とした振動台実験を行い、更に、振動台実験結果を数値解析で追跡することにより、実験結果と解析結果の対応を評価する。

2. ノンコンプレッションブレース

2.1 ノンコンプレッションブレースの基本性能と種々のノンコンプレッションブレース架構

ノンコンプレッションブレースの基本的な性能を説明する。ノンコンプレッションブレース端部の楔デバイスは、図2(a)に示すように楔、楔受け、バネ、楔台により構成されている。楔デバイス側ではブレースと架構とが直接接合されていないため、(b)ブレース張力が0の時点から圧縮方向変形を生じると、楔と楔受けが離間してブレースは圧縮力から逃れることができる。(c)離間した隙間には楔がバネの復元力によって逐次貫入するため、接合部に遊びを生じさせず、更に、引張方向変形を生じると直ぐに抵抗を開始できるという機構を有している。ノンコンプレッションブレースの性能を以下に示す。

- ブレースには引張力のみが作用し、圧縮力が作用しないため、座屈は問題とならない。

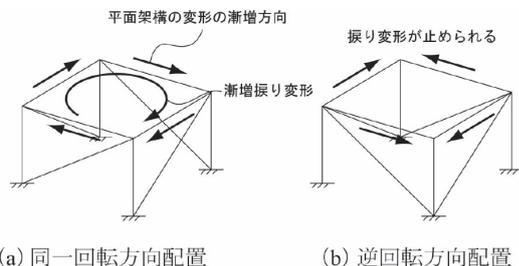


図1 非対称Z型

- ブレースが塑性伸びして遊びを生じても、楔が貫入することで緩まない。

続いて、ノンコンプレッションブレースを種々の配置とした場合について説明する。X型の場合、弾塑性型荷を受け引張側ブレースが塑性伸びすると、圧縮側ブレース端部では張力が0となって楔が貫入していき（一般にブレース構造における弾性範囲の層間変形は小さいため、X型における弾性範囲で楔はほとんど貫入しない）、除荷されると圧縮側ブレースが引張方向変形を生じて直ぐに引張抵抗を開始するため、繰返し載荷時には常に両ブレースの初期剛性を持った完全弾塑性型の復元力特性を示す。Z型の場合、ブレース圧縮方向においては剛性が架構のみであるため、弾性範囲においても楔が貫入していき、更に、楔が貫入することで架構が変形した状態が保持され、繰返し載荷時に架構の層間変形角がブレース圧縮方向に漸増していく特性を示す。

立体架構にZ型を非対称配置した非対称Z型は、これらX型とZ型の考えを組合せたもので、Z型の特性によってそれぞれの平面架構がブレース圧縮方向に変形漸増し、漸増振り変形を生じるが、繰返し載荷に対してはX型と同じく平面架構ごとに引張側、圧縮側となって常に両ブレースが抵抗するため、剛性の偏在による振り振動を生じることはなく、完全弾塑性型の復元力特性を示す。また、非対称Z型の一方向を見たとき、それと直交する方向のブレースを同一回転方向、または、逆回転方向とすることで漸増振り変形量に変化する。

2.2 初期張力導入の効果

X型ノンコンプレッションブレース架構の性能をより効果的に発揮させるためには、初期状態においてブレース降伏耐力の50%の張力を導入する必要がある（図3）。ブレース

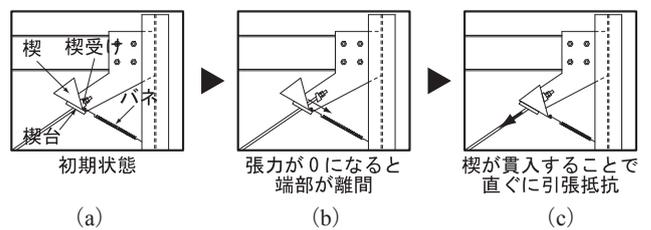


図2 楔デバイスの機能

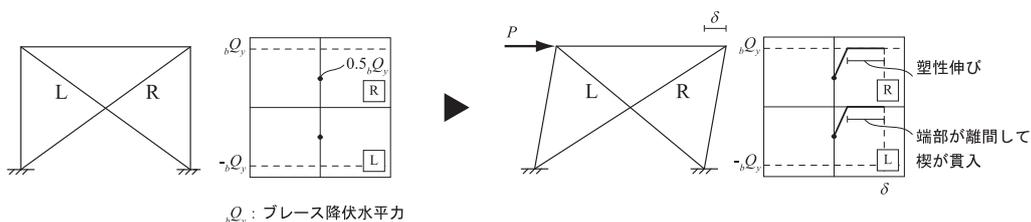


図3 初期張力導入の効果

の復元力特性を完全弾塑性モデルと仮定すれば、50%の初期張力をブレースに導入することによって、どちらかのブレースが降伏するまで初期張力は0とならないため、弾性範囲では楔が貫入することはなく、初めから両ブレースの初期剛性が得られる。非対称Z型において初期張力を導入すると、弾性範囲で楔は貫入せず、漸増振り変形しない。

3. 振動台実験の概要

3.1 試験体

試験体を図4に示す。試験体は、角形鋼管柱の上端にH形鋼梁を、下端にベースプレートをすみ肉溶接接合して製作したx, y方向スパン1,000 mm, 階高920 mmの整形な立体架構であり、試験体上部の桁に錘を積載して質量1,600 kgとしている。試験体には、図5に示すブレースを張力による偏心曲げが試験体に作用しないよう、各平面架構に2本ずつ計8本、同一回転方向配置および逆回転方向配置する。本実験においては、荷重装置の加振性能が限られているため、ブレースの軸部中央に図6に示す塑性化部位を取り付けて耐力および剛性を調整する方法を採用した。平面架構当たりのブレース降伏水平力はブレース引張試験結果より4.33 kN (0.2%オフセット)、水平剛性はブレース架構の予備実験より3.51 kN/mmである。素材特性ならびに諸元は表1、2に示してある。なお、表2中の剛性はSWEEP実験から、減衰定数は自由振動実験より対数減衰を用いて算出した値である。

ブレース接合部には、図7に示す楔と楔受けからなる楔デバイスを設けており、引張バネと圧縮バネの復元力により楔を進行方向へ貫入させる。楔と楔受けの表面に赤錆を

発生させることで、接触面には楔デバイスの機能に必要な静止摩擦係数が確保されている。

実験変数は、表3に示すようにブレース配置ならびに初期張力(ブレース降伏軸力の50%)の有無とし、計4種類用意した。

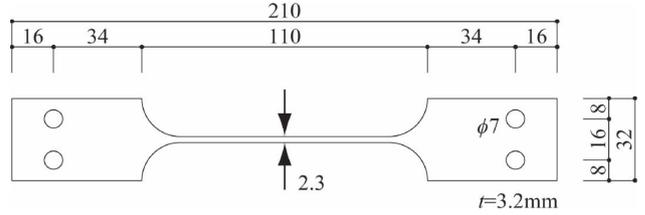


図6 塑性化部位

表1 素材特性

鋼種	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比	伸び (%)	
梁フランジ	SS400	327	436	0.75	40
梁ウェブ	SS400	331	443	0.75	34
ガセットプレート	SS400	296	409	0.72	39
柱	STKR400	378	454	0.83	19

表2 試験体の諸元

	剛性 (kN/mm)	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	減衰定数
主架構	1.79	0.187	5.35	0.01
ブレース架構	8.80	0.085	11.4	0.03

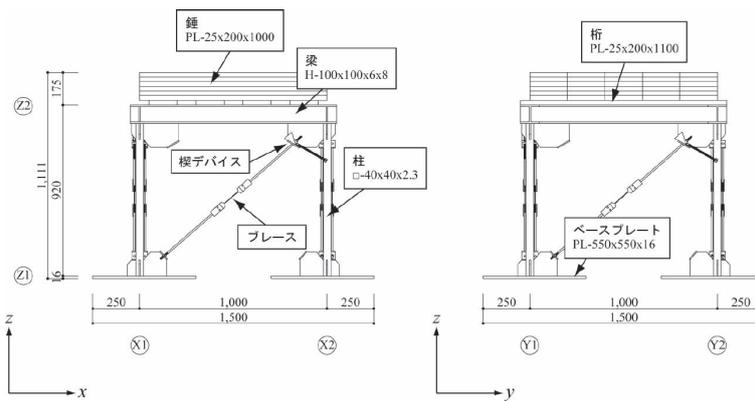


図4 試験体

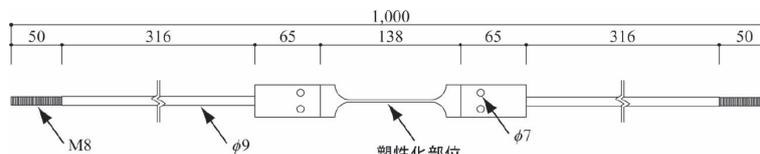


図5 ブレース

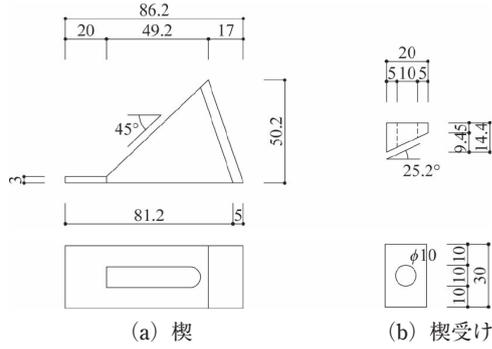


図7 楔と楔受け

表3 実験変数

実験変数	ブレース配置	初期張力
S-0	同一回転方向	0%
S-50		50%
R-0	逆回転方向	0%
R-50		50%

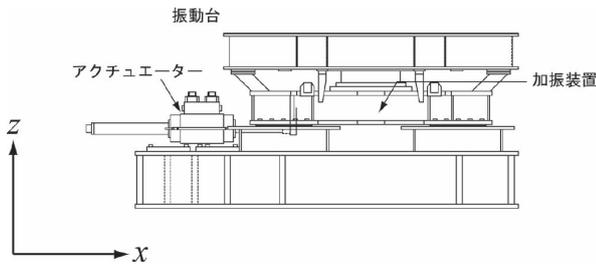


図8 水平垂直同時2軸振動試験機

3.2 実験方法

本実験では、荷重装置に図8に示す水平垂直同時2軸振動試験機を使用しており、ベースプレートを振動台に緊結することにより試験体を設置した。振動台実験の荷重プログラムは、全ての実験変数において振動数5 Hzの正弦波を試験体のx方向に inputsする正弦波加振実験であり、振動台の変位振幅を徐々に増加させることにより入力加速度を調整し、荷重終了を塑性化部位が破断するまでとした。

3.3 計測計画

計測計画を図9に示す。加速度計により、振動台上部の地動加速度 α_g および錘上部における重心位置でのx方向の絶対加速度 α_x を、ベースプレートにすみ肉溶接接合した変位計測用柱の上部に取り付けた変位計によりベースプレート位置からのY1, Y2通り平面架構の相対変形 δ_{Y1} , δ_{Y2} を、柱のx方向、上部および下部に貼り付けたひずみゲージにより各柱のせん断力の総和 $\Sigma_c Q_x$ を、Y通り平面架構のブレースに貼り付けたひずみゲージにより各平面架構当たりのブレース負担せん断力 ${}_b Q_{Y1}$, ${}_b Q_{Y2}$ をそれぞれ計測する。x方向の層せん断力 Q_x 、層間変位 δ_x ならびに回転角 θ は、それぞれ以下の各式を用いて算出する。

$$Q_x = \sum {}_b Q_{Yi} + \sum {}_c Q_x \quad (1)$$

$$\delta_x = \frac{\delta_{Y1} + \delta_{Y2}}{2} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\delta_{Y1} - \delta_{Y2}}{l} \quad (3)$$

ここに、 l : 試験体のスパン

なお、変位計測用柱は試験体に比べて固有周期が短くなるように設計しており、計測に影響のないことを確認している。

4. 数値解析の概要

解析モデルを図10に示す。解析モデルは、1層1スパンの立体架構であり、x, y方向スパンを1,000 mm、柱にすみ肉溶接接合されたガセットプレートの影響により、柱長さが柱の可撓部の長さとは一致しないため、主架構のみの実験により求めた剛性から逆算し、階高を740 mmとしている。解析モデルの質量は1,600 kg、柱は□40x40x2.3、梁はH-100x100x6x8である。

Z型ノンコンプレッションブレースは、解析モデルの節点間に軸バネを配置することで評価する。塑性化部位の引張試験より、そのP-δ関係は図11に示すものとなったが(引張試験用の治具を用いたため、剛性は一致しない)、数値解

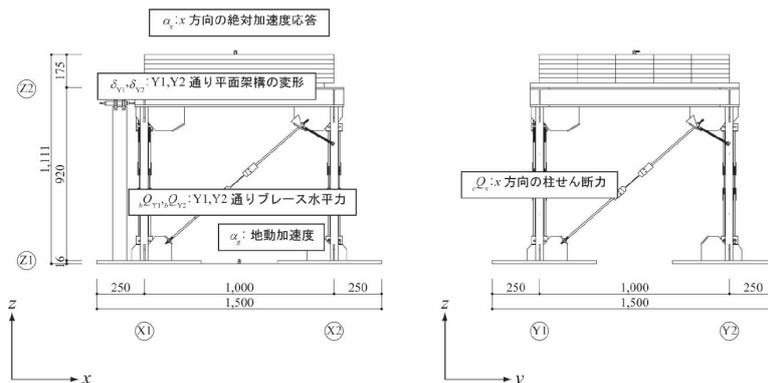


図9 計測計画

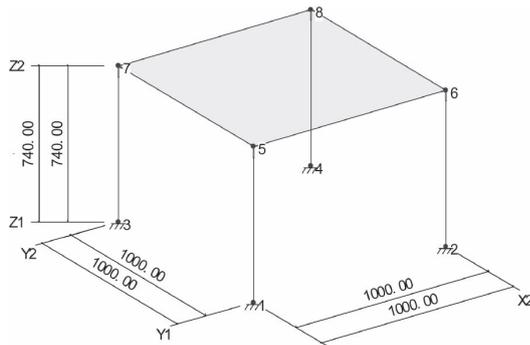


図10 解析モデル

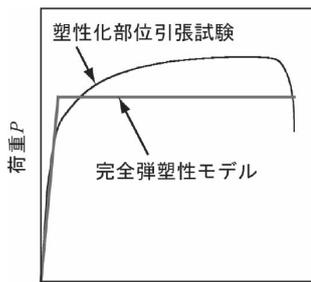


図11 P- δ 関係

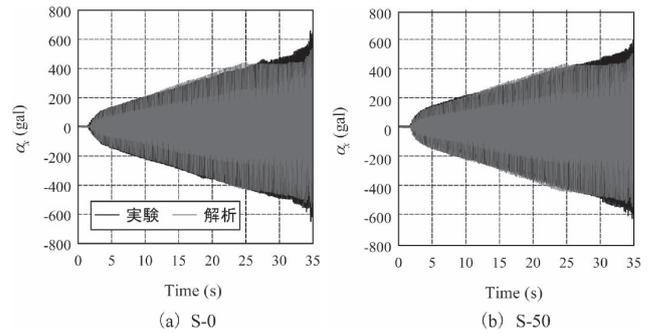


図12 α_x -Time

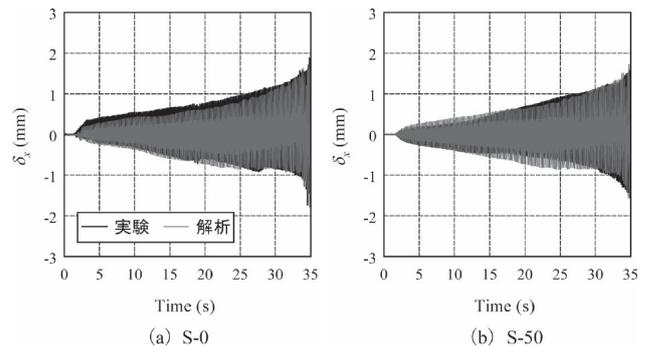


図13 δ_x -Time

析では簡単のために復元力特性を完全弾塑性モデルと仮定し、降伏水平力を 5.39 kN、水平剛性を 3.51 kN/mm とした。

数値解析の諸条件を以下に示す。

- 1) 数値解析には、任意形状立体フレームの弾塑性解析プログラム「SNAP」を用いる。
- 2) 数値積分には、Newmark の β 法 ($\beta=0.25$) を用いる。
- 3) 数値解析の時間刻みは、0.002 s とする。
- 4) 入力波には、振動台実験で計測した α_g を用いる。
- 5) 解析モデルの減衰定数は、1 次固有周期に対して 0.03 の初期剛性比例型とする。

5. 振動台実験および数値解析結果

振動台実験および数値解析結果を以下に示す。なお、振動台実験結果は塑性化部位が破断する直前までの結果である。

○応答性状について

応答性状は、S-type、R-type どちらも同様の結果となったため、ここでは S-type の結果のみを示す。

α_x の時刻歴を図12に示す。S-0 の場合、後述のように4つの実験変数の中で最も大きな振り変形を生じたが、振り変形をほとんど生じていない S-50 の実験結果と比較して、その応答値はほぼ等しい。解析結果においては、ブレースの復元力特性を完全弾塑性モデルとして降伏水平力を最大

の耐力としているため、実験結果と比較して、降伏以降ではブレース耐力が上昇しておらず応答値も小さいが、それ以前では精度良く対応している。

δ_x の時刻歴を図13に示す。S-0 の場合、振り変形を生じたが、これは Z 型ノンコンプレッションブレースの特性によって生じたものであり、各平面架構の変形量の絶対値が等しく、S-50 と比較しても振り変形の影響を受けていない。また、解析結果とも精度良く対応している。したがって、ブレース配置を非対称 Z 型とすれば剛心と重心が一致するため、平面架構の変形漸増によって振り変形が徐々に大きくなっていくのみであり、地震時の応答に支配的な影響を与える振り振動を生じていないことが分かる。

○振り性状について

θ の時刻歴を図14に示す。振り変形量は、S-50 ならびに R-50、R-0、S-0 の順に大きくなっており、特に初期張力を導入していない S-0 および R-0 は漸増振り変形を生じている。S-0 よりも R-0 の振り変形量が小さいのは、直交方向のブレースが振りに対して抵抗するためであるが、本実験のように一方向载荷の場合には直交方向のブレース張力による抵抗が小さいため、S-0 の半分程度の振り変形を生じている。また、S-50 および R-50 は初期張力の効果により、直交方向のブレース配置に関係なくほとんど振り変形を生じていない。解析結果はこれらの実験結果とも良好に対応しているが、ブレースが降伏してからは一定値となっている。これは、ブレースの復元力特性に完全弾塑性型を仮定

しているため、引張側ブレース平面架構でブレースが塑性伸びしたことによる変形と圧縮側ブレース平面架構でブレース端部が離間したことによる変形とが等しくなるためである。振り変形の大きさについてだが、最も大きな値となったS-0は1/300 rad程度である。この値は、本実験における重心位置の最大層間変形角1/370 radと比較して大きく、二方向荷重の場合には両方向ともにブレース配置が同一回転方向のため、更に大きな振り変形を生じ、ブレース降伏以前に構造物外周部の柱または梁が塑性化する可能性がある。したがって、振り変形は原則として止めるものとして考える。

○復元力特性履歴について

${}_bQ_Y-\delta_Y$ 関係を図15に示す。実験結果において、S-0およびR-0はY1, Y2 通り平面架構ともに変形漸増特性を示しており、それによって図14に示したように漸増振り変形を

生じているが、S-50 およびR-50 はブレースが降伏するまでは楔が貫入しないため、変形漸増特性を示しておらず、振り変形を生じていない。また、解析においても初期張力の有無によって同様の結果が得られている。

$Q_x-\delta_x$ 関係を図16に示す。いずれの実験変数においてもBi-Linear型に近似できる復元力特性を示しており、ブレースを完全弾塑性モデルと仮定した解析結果とも比較的良い精度で対応している。したがって、今まで示してきた結果よりブレース配置を非対称Z型として振り変形を止めた場合、その性能はX型とほぼ等しくなる。

6. まとめ

非対称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、更に、実験結果を数値解析により追跡した。得られた知見は以下のように要約できる。

- 1) S-0 と S-50 の応答性状を比較した結果、絶対加速度応答ならびに変位応答は振り変形の影響を受けておらず、非対称Z型配置した場合にも通常の構造物と同様に外力を仮定できる。
- 2) 実験変数S-0, R-0は漸増振り変形を生じ、S-50, R-50は初期張力の効果によって振り変形を生じない。また、初期張力を導入しない場合においても、振り変形量は直交方向のブレース配置により制御することが可能である。
- 3) 非対称Z型の復元力特性はBi-Linear型に近似できる

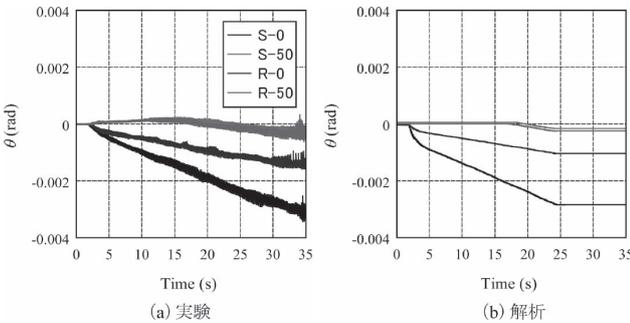


図14 θ -Time

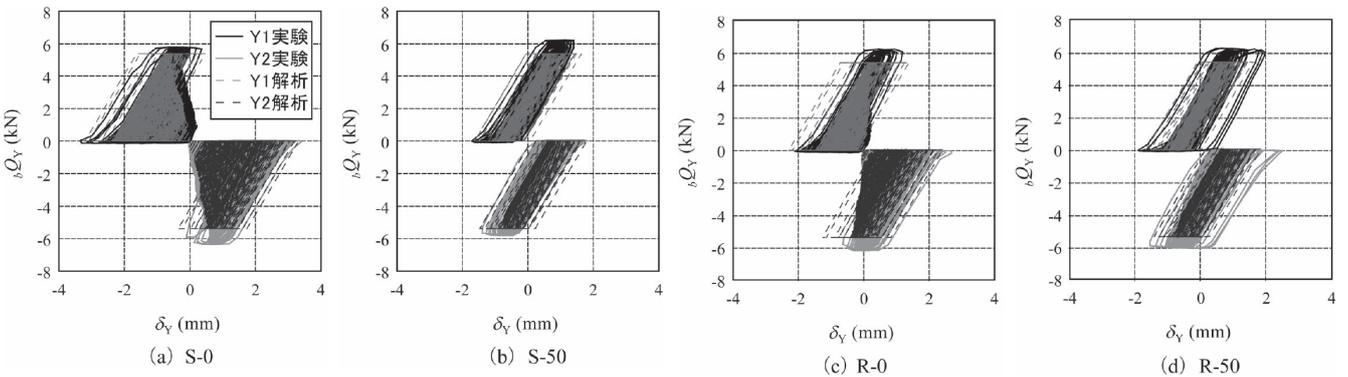


図15 ${}_bQ_Y-\delta_Y$

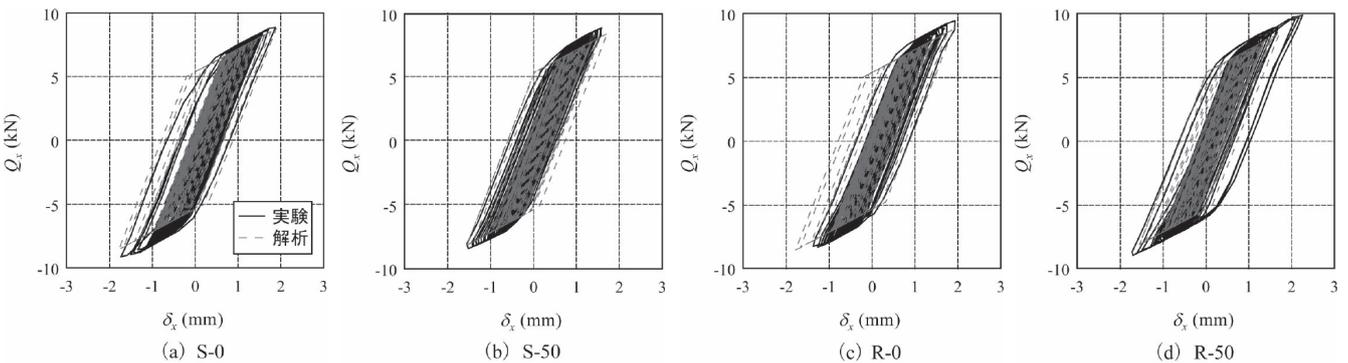


図16 $Q_x-\delta_x$

ため、性能を簡単に評価できる。

- 4) 非対称Z型ノンコンプレッションブレース架構は、数値解析により十分な検討が可能である。

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。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 井上一朗：建築鋼構造の理論と設計，2003.
- 2) 天島秀秋，聲高裕治，井上一朗：接合部を含む座屈拘束ブレースの構面外座屈荷重，日本建築学会構造系論文集 第581号，pp. 127-134, 2004.7.
- 3) 竹内 徹，松井良太，ジェロム・ハジャー，西本晃治，イアン・アイケン：座屈拘束ブレースにおける芯材局部座屈の拘束条件，日本建築学会構造系論文集 第634号，pp. 2231-2238, 2008.12.
- 4) 中村慎太郎，高松隆夫，小持明宏：改良型復元力特性を有する露出柱脚に関する研究：その1 デバイスについて，日本建築学会中国支部研究報告集 第25巻，pp. 229-232, 2002.3.
- 5) 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.
- 6) 澤田樹一郎，高松隆夫，玉井宏章，松尾 彰，山西央朗，三好行則，荊尾友裕：振動台実験と時刻歴応答解析によるZ型NCブレース付き鋼構造骨組の一方方向変形漸増性能と累積エネルギー吸収量評価，日本建築学会構造系論文集 第656号，pp. 1883-1890, 2010.10.
- 7) 小松真吾，高松隆夫，玉井宏章，山西央朗：ノンコンプレッションブレース架構の振動性状に関する研究，日本建築学会中国支部研究報告集 第35巻，2012.3.