

1層Z型ノンコンプレションブレース架構の数値解析

高松 隆夫*・山西 央朗**

(平成23年10月25日受付)

A study on numerical analysis of single story Z-type non-compression braced frame

Takao TAKAMATSU and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 25, 2011)

Abstract

The non-compression brace has been investigated and developed as a new earthquake-resistant structural member by the authors. The Z-type brace shows one-side seismic responses of the structure controlled by the function of the wedge-device.

In this paper, an anti-symmetric Z-type braced frame subjected to seismic loadings shows torsional vibration. The braced frame in one-directional ground motions can absorb the plastic energy by twisting deformation.

Key Words: Z-type non-compression brace, wedge-device, torsion, response control, numerical analysis

1. はじめに

2011年3月11日、東北地方、関東地方をM9.0の規模を有する巨大地震が襲い、多くの被災者が避難のために長い避難所生活を強要されることとなった。

ところで、こういった災害時の避難所には、主に学校の体育館が使用されるのは衆知の通りである。一般に、鋼構造の体育館等の構造形式には、耐力の増強を容易に行えること等の理由から、引張ブレース構造が多く用いられている。しかしながら、引張ブレースは、小さな圧縮力で座屈を起こすとともに、引張力による塑性伸びに伴ってスリップ型の復元力特性を示す。そのため、地震後のブレース残留変形が過大となる、効率良く地震エネルギーを吸収することが出来ない、ブレースの座屈により非構造部材が破壊される、といった問題点を持っている。法律に基づいた耐震設計をクリアした構造物でも問題を抱えている場合が多い。

このような背景の中、本研究室では、楔デバイスを用いた新しい工法の開発・研究を行っている。楔デバイスを用

いた工法には、露出柱脚に適用したノンスリップ型露出柱脚、柱梁接合部に適用したセルフセンタリング柱梁接合部、ブレース接合部に適用したノンコンプレションブレースがある。この楔デバイスを用いた工法は、地震時に効率よく地震エネルギーを吸収することができるため、耐震上有利な構造物が実現可能となる。

その中でも、ノンコンプレションブレースをX型に配置したX型ノンコンプレションブレースは既に技術が確立されており¹⁾、近年、体育館の耐震改修で施工実績を伸ばしている。一方、ノンコンプレションブレースをZ型に配置したZ型ノンコンプレションブレースは、構造物の変形を一方向に漸増させる特性を持つため²⁾、層ごとでZ型ノンコンプレションブレースの配置を変化させることにより、多層構造物の応答を制御し、制振ブレースとしての性能にも期待が持てる³⁾。しかしながら、既往のZ型ノンコンプレションブレースの応答制御に関する研究は、一方向のみの応答制御に関するもので立体的な応答制御の研究はなされていない。

そこで、本論文では、Z型ノンコンプレションブレース

* 広島工業大学建築工学科

** 東京工業大学都市地震工学センター

を同一回転方向に配置する振りZ型ノンコンプレッションブレース架構を提案する。この新しい構造システムは、Z型ノンコンプレッションブレースの変形漸増特性により、意図的に構造物を揺らせることで地震の一方向の成分に対しても構造物全体で抵抗し、エネルギー吸収性能の高い構造物の実現を期待するものである。

1.1 ノンコンプレッションブレースの特徴

ノンコンプレッションブレースは、ブレース接合部のどちらかに楔デバイスを有している。

楔デバイスは、図1に示すように楔、楔受け、バネ、楔プレート、楔台で構成されている。楔デバイスの設置方法は、ブレースに楔受けを固定し、楔台に取り付けた楔プレートと楔受けの間に楔を貫入させ、楔と楔プレートの上にバネを設置するのみであり、設置に特別な技術を必要としない。楔デバイスの作動概念は、図2に示すように架構にブレース節点間距離を縮める変形が作用すると、楔と楔受けが離間して生じた隙間を楔がバネの復元力により徐々に埋めていくものとなる。また、楔受けと楔プレートの上に楔を噛ませることによりブレースを固定しているため、ブレースは節点間距離を縮める変形に対して拘束を受けない。

ノンコンプレッションブレースの特徴として以下の性能が挙げられる。1) ブレース接合部に取り付く楔デバイスの機構により、ブレースには圧縮力が作用せず座屈現象を生じない。2) ブレースが塑性変形してもブレース端部で生じた隙間を楔が埋めていくため、緩みが生じない。3) 楔が隙間を埋めていくため、ブレースはすぐに引張力に抵抗することができる。

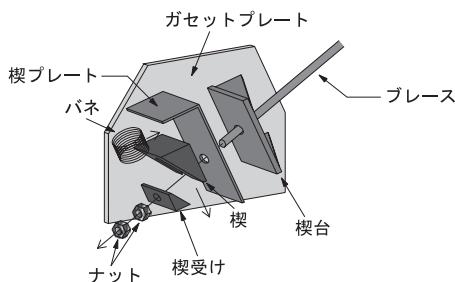


図1 楔デバイスの構成要素

したがって、ブレースは座屈せず、緩みも生じないため、引張ブレースのようなスリップ現象と周辺の非構造部材の破壊を解消することができる。

1.2 Z型ノンコンプレッションブレースの特徴

Z型ノンコンプレッションブレース架構では、楔が貫入することによりブレース節点間距離が徐々に短くなるため、図3に示すように変形はブレースの抵抗しない方向へ徐々に漸増していく。また、楔が貫入することで、変形漸増中に逆方向载荷を受けてもすぐに引張抵抗を開始することができる。

1.3 振り振動に関する既往の研究

近年の構造物の振り振動に関する既往の研究は、以下のようなものがある。

- 1) 質量偏心、耐力偏心、剛性偏心等をパラメータとした偏心構造物の応答性状、応答解析に関するもの⁴⁾⁵⁾⁶⁾
- 2) 偏心を有する構造物の構造設計に関する提案⁷⁾⁸⁾

誌面の都合上、一部しか挙げていないが、振り振動に関する様々な研究がなされている。しかし、構造物を意図的に揺らせることによりエネルギー吸収を図る試みは過去に類を見ない。したがって、本論文で提案する新しい構造システムは、既往の研究と比較して振り振動を積極的に起こさせるという観点の異なるものである。

1.4 研究の目的

本研究の最終的な目的は、振りZ型ノンコンプレッションブレース架構において、一方向の力で構造物を揺らせることにより、直交方向のブレースも抵抗し、構造物全体で地

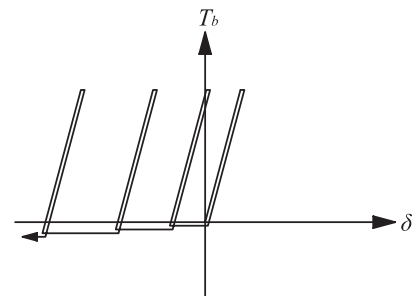


図3 Z型NCブレースの復元力特性

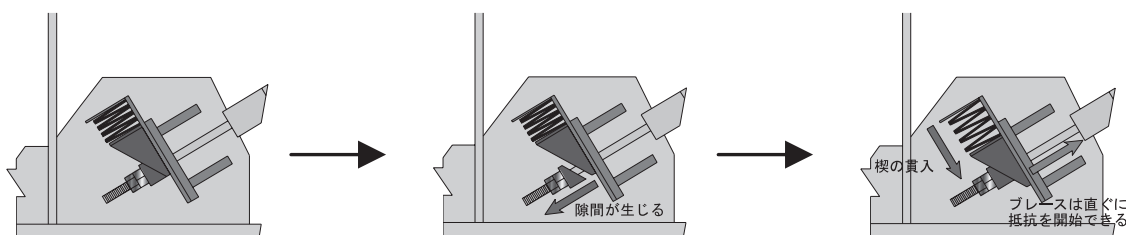


図2 楔デバイスの作動概念

震エネルギーを吸収させる新しい構造システムの構築とその設計法を確立することである。

本論文では、1層1スパン試験体の2構面にだけプレースを配置した振りZ型ノンコンプレションプレース架構について振動台実験、数値解析を行い、実験結果、現象の追跡が有効に行えることを確認する。そして、実大1層1スパン解析モデルの4構面でZ型ノンコンプレションプレースの配置を変数として数値解析を行い、振りZ型ノンコンプレションプレース架構の応答性状を明らかにする。

2. 振動台実験と数値解析

図4に示す試験体は、柱にPL-9×140×600 (SS400) を、梁にはH-100×100×6×8 (SS400) を使用し、柱と梁を隅肉溶接接合している。試験体は、この平面架構を2組並列し、梁の下フランジを桁PL-1000×85×16 (SS400) 3枚でボルト接合した立体骨組である。試験体に質量を与えるため、桁上部に錘PL-25×1000×200を12枚、約470 kg積載して試験体上部の質量 $m = 600.5 \text{ kg}$ としている。プレースは、柱の弱軸方向、柱梁接合部と柱脚部にそれぞれ接合されたガセットプレートに設置し、楔デバイスを柱脚部に接

合したガセットプレートに設けている。

2.1 実験方法

実験は、振動数、振幅を任意に変更することのできる正弦波を x 軸方向に入力し、試験体を振動させる。振動数を試験体の固有振動数、振幅を試験の制御値とし、試験体に作用する絶対加速度が1,000 gal程度となるまでの载荷とする。

2.2 解析方法

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。

解析モデルの x 軸方向、 y 軸方向スパンは、ともに図5に示すように試験体の部材心間距離としているが、試験体の柱接合部は剛域となるため、階高から算出した剛性と実際の剛性は一致しない。そのため、表2に示した剛性から逆算した階高459 mmを用いている。2層部分の梁は、節点5、6と7、8間はH-100×100×6×8 (SS400)、5、7と6、8間はPL-16×85×1000 (SS400)、試験体の柱脚部分は完全に固定支持と見なせるため、1層部分(節点1、

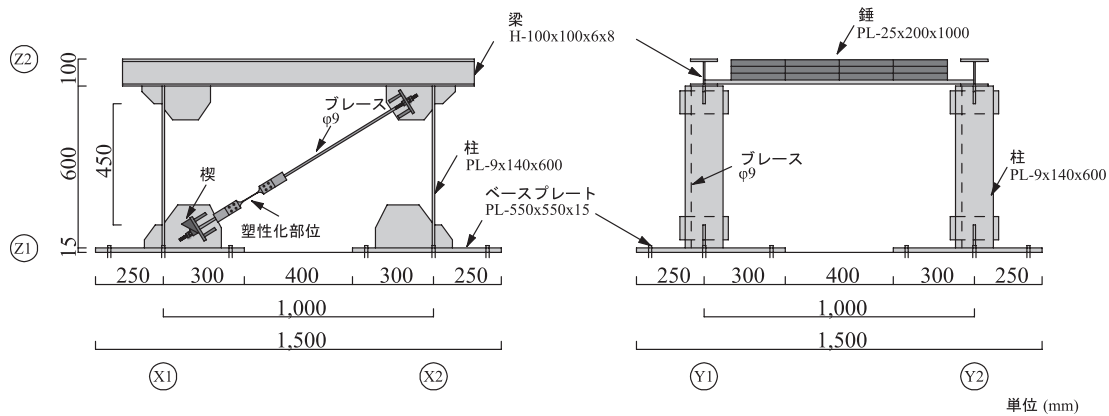


図4 試験体

表1 試験体の素材特性

素 材	ヤング係数 (N/mm ²)	降伏応力度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	降伏比	伸び率 (%)
プレース 丸棒鋼 SS400	205,000	318	453	0.68	26.0
柱 STKR400	205,000	318	433	0.71	27.0

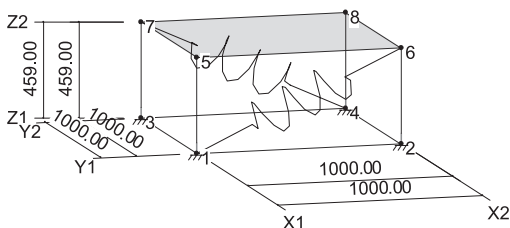


図5 解析モデル

表2 架構とプレースの性能

架 構		プレース架構	
剛 性 (kN/mm)	固有周期 (s)	剛 性 (kN/mm)	固有周期 (s)
8.63×10^{-1}	0.166	9.50	0.050

3, 4, 2)を基礎梁 H-100×100×6×8 (SS400) で接続し固定支持とした。本実験で使用した試験体は、平面架構同士を桁で繋ぎ、1箇所につき1本のボルトで接合しており、2層部分が剛床とは言い難い。しかしながら、解析では、モデル化の都合上2層部分を剛床と仮定しているため、層としての振り剛性が大きいと各平面架構の変形が漸増しない。そのため、柱はy軸方向の幅を小さくし、断面を PL-9×30 (SS400) とした。2層部分の床には、試験体の質量と等しくなるだけの積載荷重を与えて節点5, 7, 8, 6に1/4ずつ均等に振り分けた。

Z型ノンコンプレッションブレースとして、節点1, 6間と4, 7間にスプリングを配置している。スプリングに用いる復元力特性モデルは図6に示すものを用い、圧縮荷重が0.001 kNを超えると降伏し、変形漸増性能が得られるようにしている。試験体と解析モデルでは階高が異なるため、解析モデルの降伏耐力、剛性は試験体と水平成分が同

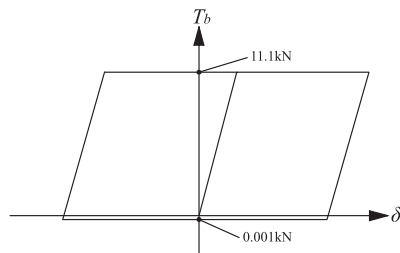


図6 スプリングの復元力特性モデル

じとなるように調整した値を入力した。

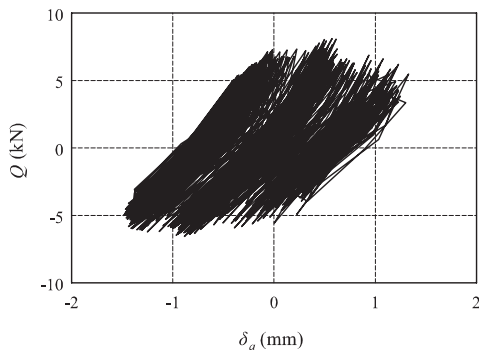
解析は、Newmark β 法 ($\beta=0.25$) を用いた立体解析とし、時間刻みを0.005秒とする。解析モデルの減衰は、Rayleigh 型減衰で評価し、減衰定数 h を0.042とする。

2.3 実験結果と解析結果の考察

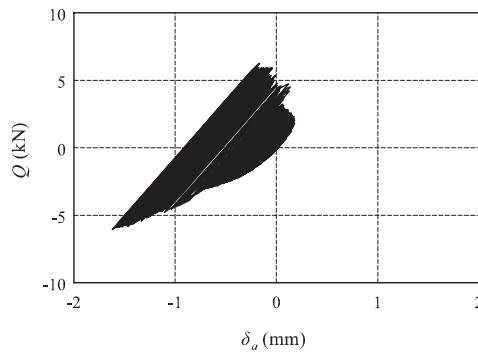
振りZ型ノンコンプレッションブレース架構は、図7に示す層せん断力 Q と重心位置の変形 δ_a による復元力特性より、楔デバイスの機能によって架構とブレース2本分の剛性で振動し、一方のブレース除荷と同時にもう一方のブレースが抵抗を開始している。実験では、 δ_a が初期状態において正方向の値となり、最終状態において負方向に漸増したため、復元力特性履歴は図7(a)に示すようになっているが、解析では、負方向のみに成分が出ているため、復元力特性履歴も図7(b)に示すように負方向のみに漸増するものとなった。しかしながら、 Q の最大値と最小値、最終状態のサイクルを評価できており、解析結果は妥当といえる。

Y1 通り平面架構の変形 δ_{p1} 、Y2 通り平面架構の変形 δ_{p2} は、図8に示すようにブレースが層せん断力の大部分を負担したため、振幅が実験結果に比べて小さいが、それぞれ逆方向に漸増しており、実験結果と解析結果の最大応答値も良く一致している。

回転角 θ は、層せん断力の大部分をブレースが負担した、実験と解析の振動モードに違いがあった等の理由か

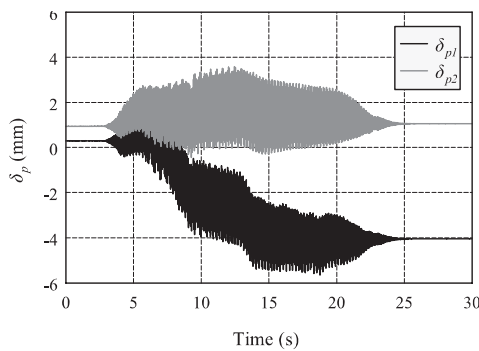


(a) 実験結果

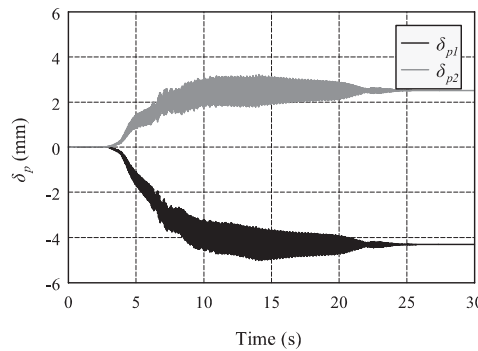


(b) 解析結果

図7 復元力特性



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図8 平面架構の変形時刻歴

1層Z型ノンコンプレッションブレース架構の数値解析

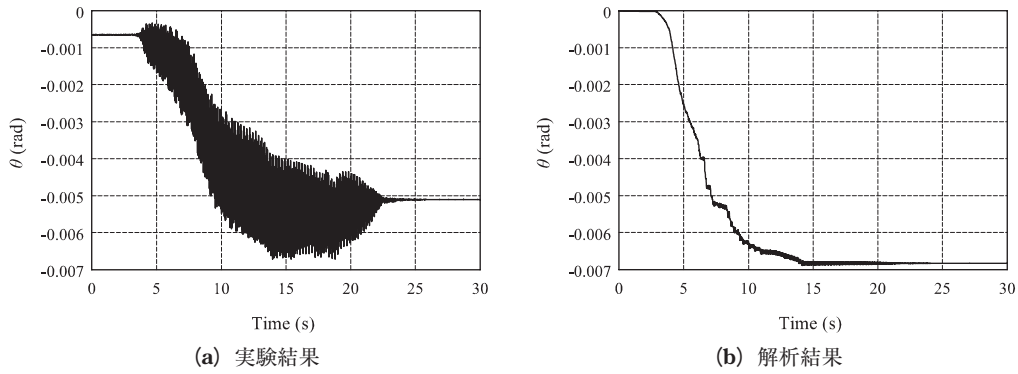


図9 回転角時刻歴

ら、図9に示すように振りの振幅が小さいが、図8からも分かるように最大応答値は良好に評価することができた。

したがって、実験結果、性能の評価を行うことができたので、振りZ型においても「SNAP」を用いれば有効に解析を行えることが明らかとなった。

3. 1層4構面振りZ型ノンコンプレッションブレース架構の数値解析

第2章より、振りZ型ノンコンプレッションブレース架構においても「SNAP」を用いることによって有効に数値解析を行うことが可能であるという知見が得られた。そこで、本章では、実大1層1スパンモデルの4構面において、ブレース配置を変数とした解析の実験を行う。

3.1 解析モデル

解析モデルは、標準層せん断力係数 $C_0=0.2$ の地震荷重に対して全部材が弾性域に留まり、層間変形角が1/200以下となるように設計した。

解析対象構造物の寸法は、図10に示すように x 軸方向スパン、 y 軸方向スパンを 5000 mm、 z 軸方向スパンを 3000 mm としている。柱は荷重方向と直交方向の性能が等しくなるように \square -200×200×6 (BCR295) を、2層部分の梁には H-400×200×8×13 (SS400) を、1層部分の梁には H-600×

200×11×17 (SS400) を使用した。2層部分の床には、解析モデルの質量が設計の際に仮定した地震力算定用荷重 ($\Sigma W_i = 600 \text{ kN}$) と等しくなるような積載荷重 (19.27 kN/m^2) を与え、質量の偏在による偏心が起こらないように各節点 (節点 5, 7, 8, 6) に1/4ずつ分配した。なお、2層部分の床には、剛床の仮定を適用している。実験変数は、図11(a)に示すように荷重方向の2構面にそれぞれが対角方向となるようにスプリングを配置したもの (NC-2P), (b)に示すように荷重方向と直交方向の変形の漸増による回転が同一方向となるもの (NC-4P-S), (c)に示すように荷重方向と直交方向の変形の漸増による回転が逆方向となるもの (NC-4P-R) とする。スプリングの復元力特性モデルは図6

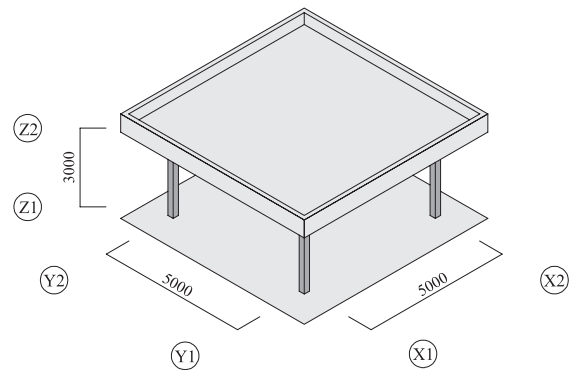


図10 解析対象構造物

表3 部材表

(a) 柱・梁

断面寸法	ヤング係数 (N/mm^2)	断面積 (mm^2)	断面二次 モーメント (mm^4)	降伏応力度 (N/mm^2)
柱 \square -200×200×6	205,000	4,532	2.8×10^7	324.5
梁 H-400×200×8×13	205,000	8,337	2.35×10^8	258.5
基礎梁 H-600×200×11×17	205,000	13,170	7.56×10^8	258.5

(b) ブレース

呼び径	断面積 (mm^2)	降伏軸力 (kN)	軸剛性 (kN/mm)	水平剛性 (kN/mm)
ブレース M27 ($d=24.69 \text{ mm}$)	479	124	14.6	11.7

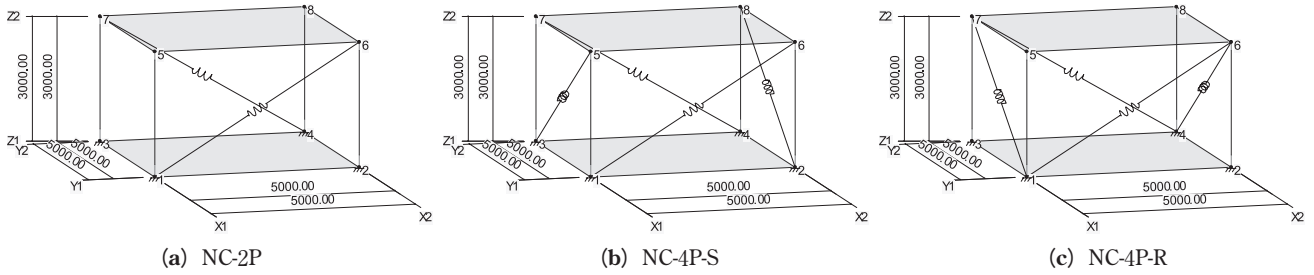


図11 実験変数

に示したものと同様のものを用い、圧縮降伏荷重 0.001 kN とする。

3.2 解析方法

解析は、Newmark β 法 ($\beta=0.25$) を用いた立体解析とし、時間刻みを0.005秒とする。地震波は、図12に示す「El Centro 1940 NS」を入力する。解析モデルの減衰は、

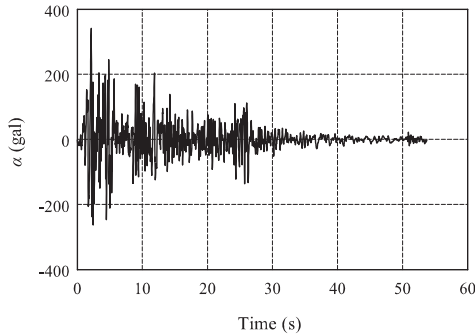


図12 地震波

Rayleigh 型減衰で評価し、減衰定数 h を0.05とする。

3.3 解析結果と考察

○復元力特性

ここで、Y1 通り平面架構を平面架構 1、Y2 通り平面架構を平面架構 2、X1 通り平面架構を平面架構 3、X2 通り平面架構を平面架構 4 と呼び、それぞれの平面架構に取り付くブレースにも同様の番号を設け、ブレース 1、ブレース 2、ブレース 3、ブレース 4 とする。

荷重方向の層せん断力 Q_x と重心位置の変形 δ_x による復元力特性履歴は、図13に示すように3つの実験変数で一致しており、直交方向のブレースの有無、配置の影響を受けていないことがわかる。荷重方向と平行方向に配置したブレース 1、ブレース 2 のブレース張力 T_b と各平面架構の変形 δ_b によるブレース復元力特性は、図14に示すようにいずれの実験変数においても降伏し、抵抗しない方向へ変形が漸増している。ここで、NC-2P, NC-4P-S ではほぼ同じ履歴

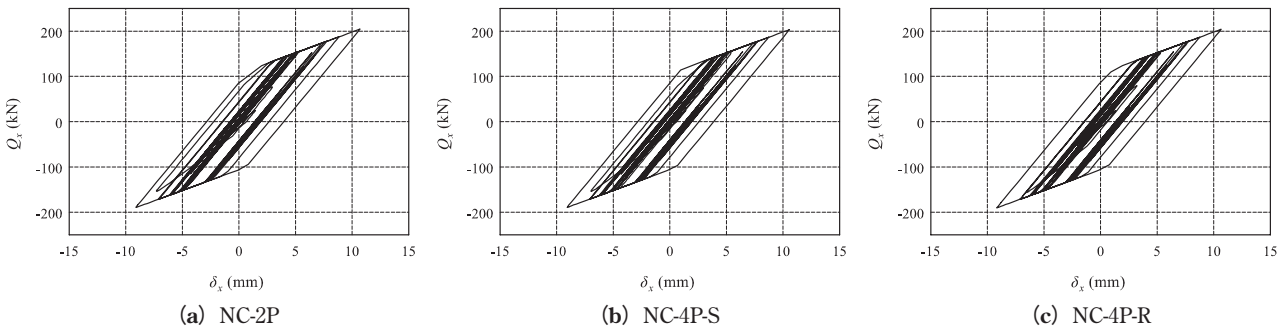


図13 x 軸方向の復元力特性

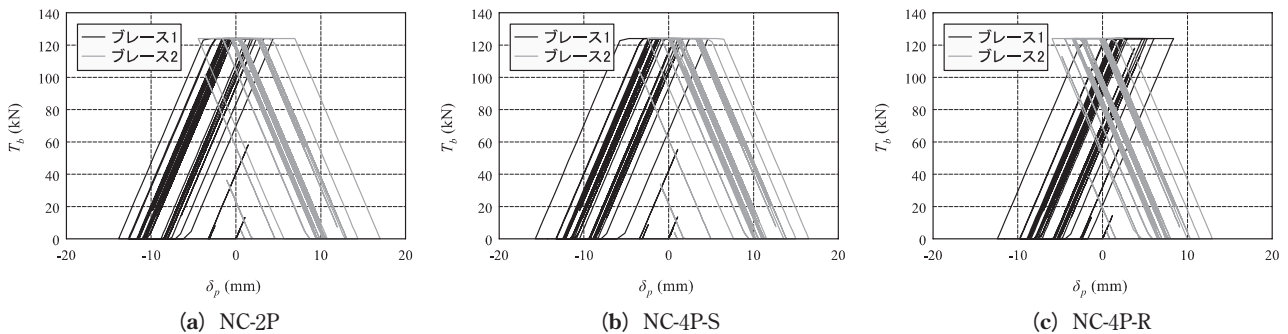


図14 x 軸方向のブレース復元力特性

性状となっているが、NC-4P-Rでは他のものに比べ変形が若干小さい。この理由は、平面架構の変位応答時刻歴に後述する。図15に示すように荷重方向と直交方向に取り付けたブレース3、ブレース4は、NC-4P-Sでは、約16kNの抵抗（ブレース1、2の約1/8）を示し、変形が漸増している。これは、平面架構1、2の変形が漸増することによってz軸周りに負方向の回転を生じると、平面架構3,4はブレース節点間距離を縮める変形を受けるために楔が貫入し、ブレースに張力が作用したことによる。NC-4P-Rでは、約40kNの抵抗（ブレース1、2の約1/3）を示しており、平面架構1、2の変形の漸増により生じる回転は平面架構3、4のブレース節点間距離を伸ばすため、ブレース抵抗も大きく楔も貫入していない。

○平面架構の変位応答時刻歴

x軸方向の平面架構の変位応答時刻歴は、図16に示すようにNC-2P, NC-4P-Sの応答性状が平面架構1、2ともに良

く一致しているが、NC-4P-Rは前者2つに比べて応答量が小さい。これは、復元力特性の項で述べたように、平面架構1、2の変形の漸増による回転を平面架構3、4のブレースが抵抗して止めたため、回転による変位増分が小さくなったためである。

y軸方向の平面架構の変位応答時刻歴は、図17に示すように楔が貫入したNC-4P-Sが一番大きく、ブレースが抵抗したNC-4P-Rが一番小さくなっている。また、いずれの実験変数も3秒経過後はほぼ定常状態となっているが、これは、約2秒の時点で入力波が最大加速度を示し、それ以降、平面架構1、2に取り付くブレースの楔が貫入しなかったことに起因する。

○振りモーメント・回転角時刻歴

振りモーメント、回転角の時刻歴は、共に図17に示したy軸方向の平面架構の変形と同様にNC-4P-R, NC-2P, NC-4P-Sの順に大きくなっており、解析開始から約3秒経過後には

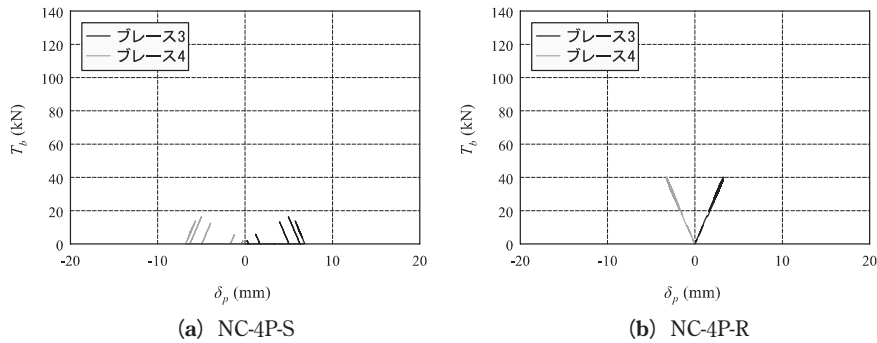


図15 y軸方向のブレース復元力特性

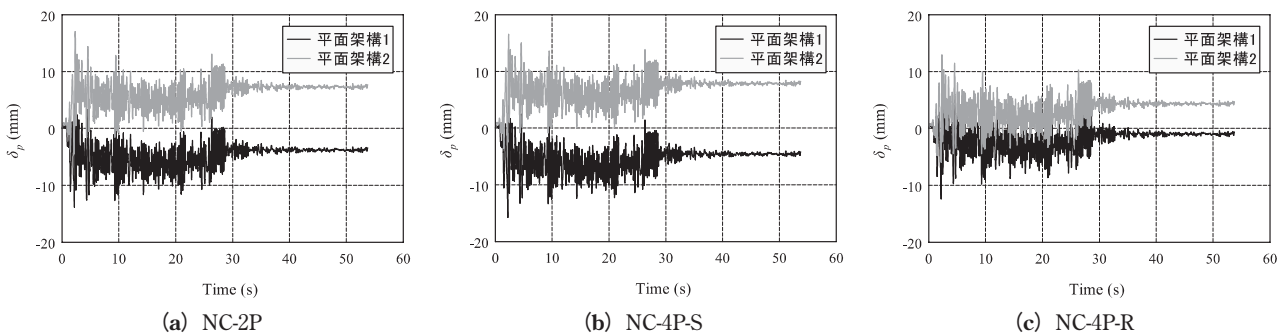


図16 x軸方向の平面架構の変形

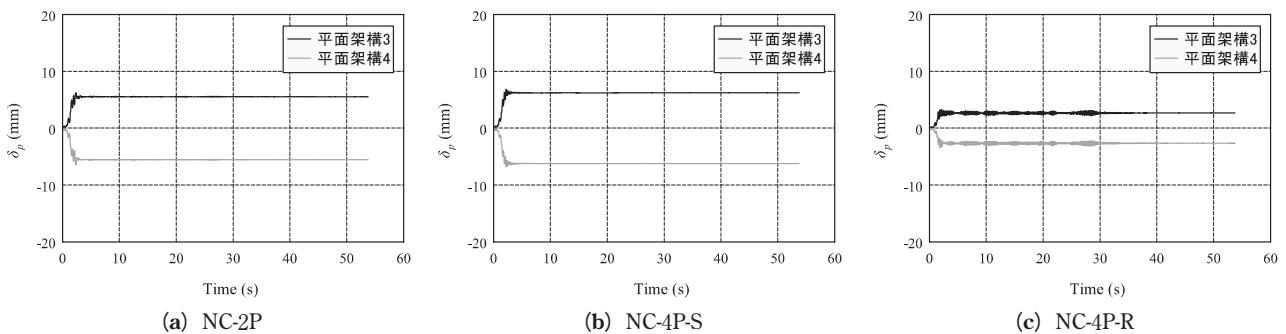


図17 y軸方向の平面架構の変形

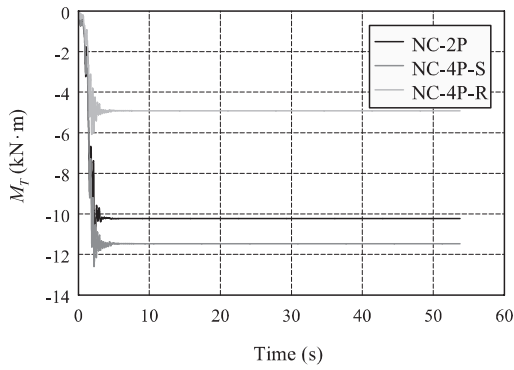


図18 振りモーメント時刻歴

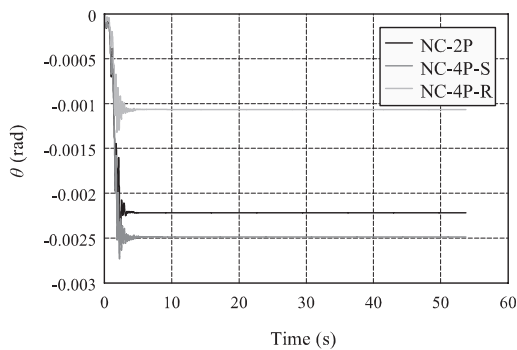


図19 回転角時刻歴

定常状態となっている。このことから、振りモーメントと回転角は、 y 軸方向の平面架構の変形と関連性があることが見うけられる。つまり、振りZ型ノンコンプレッションブレース架構の直交方向の変形、振りモーメント、回転角は、載荷方向の楔貫入量に支配され、楔が貫入している間は並進と振りを伴って振動し、楔が貫入しなければ通常の構造物同様に並進のみの振動となる。

○最大層間変形角

表4に示す最大層間変形角の平均は、解析モデルの x, y 軸方向それぞれの重心位置で生じた最大層間変形角、 x 軸方向の平面架構は、平面架構1, 2の生じた層間変形角のうち最大の値、 y 軸方向の平面架構は、平面架構3, 4の生じた層間変形角のうち最大の値である。

x 軸方向の平均、平面架構、 y 軸方向の平面架構は、今まで考察してきたように妥当な結果といえる。しかしながら、 y 軸方向の平均は、NC-4P-S, NC-2P, NC-4P-Rの順に大きくなっている。これは、NC-4P-Rでは直交方向に取り付けたブレース3, 4には常に張力が作用するため、ブレース3, 4の差分の力が y 軸方向に作用して架構が変形したためである。実際に、NC-4P-Rではブレース3, 4の差分の力と y 軸方向の層せん断力 Q_y はほぼ一致しており、それによる履歴も生じていた。NC-2Pでは、回転により生じる y 軸方向の力を全て架構が受け持つため、最大層間変形角がNC-4P-Rに次いで大きくなったと考えられる。

表4 最大層間変形角

	x 軸方向		y 軸方向	
	平均	平面架構	平均	平面架構
NC-2P	1/266	1/167	1/21000	1/444
NC-4P-S	1/269	1/172	1/73400	1/417
NC-4P-R	1/267	1/220	1/6200	1/849

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 1層1スパン架構の4構面にZ型ノンコンプレッションブレースを配置したNC-4P-SとNC-4P-Rは、一方方向の力に対しても架構が振れることにより、直交方向のブレースにも抵抗が生じる。特に、直交方向で載荷方向の回転変形を止めるようにブレースを配置したNC-4P-Rでは、直交方向のブレースが載荷方向のブレース張力の約1/4の抵抗を示した。
- 2) NC-4P-Rでは、載荷方向の回転変形を直交方向のブレースが抵抗して止めたため、3つの実験変数で最も振り変形が小さくなった。
- 3) 入力波が最大加速度を示した後、 y 軸方向の変形、振りモーメント、回転角が定常状態を迎えた。つまり、一方方向の載荷に対してもブレースが2本で抵抗するため、振りZ型ノンコンプレッションブレース架構は剛性偏心を有しておらず、楔がそれまでの載荷で最大の貫入量となった後には振りを生じない。
- 4) NC-4P-Rは、直交方向のブレース張力の差分が架構に作用し、履歴を生じるため、載荷を受けない方向でも地震エネルギーを吸収することが期待できる。

今後の研究計画

本報では、振りZ型ノンコンプレッションブレース架構は、一方方向の力に対しても構造物全体で抵抗するということが明らかとなった。そこで、今後の研究計画として、X型ノンコンプレッションブレース架構との比較を行い、振りZ型ノンコンプレッションブレース架構の有用性について検討する。

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)の研究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) 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
- 2) 荊尾友裕, 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特性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp. 743-744, 2009.8
 - 3) 荊尾友裕, 高松隆夫, 玉井宏章, 澤田樹一郎, 山西央朗, 土江葉菜子, 松尾彰: 2層Z型ノンコンプレッションブレース鉄骨架構の振動台実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸), pp. 1171-1172, 2010.9
 - 4) 高松隆夫, 松尾彰, 森松秀雄: 鋼構造立体骨組のねじり振動に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集 第22巻, pp. 209-212, 1999.3
 - 5) 聲高裕治, 井上一朗: 鋼構造強柱立体骨組におけるエネルギー消費部材の必要塑性変形能力(1層1スパン耐力偏心骨組), 日本建築学会構造系論文集 第524号, pp. 125-132, 1999.10
 - 6) 山田哲, 和田智子, 薩川恵一, 前澤将男, 北村春幸, 和田章: 履歴ダンパーが耐力・剛性偏心して取り付けられた1層鋼構造骨組の振動台実験, 日本建築学会構造系論文集 第590号, pp. 111-119, 2005.4
 - 7) 倉本洋, 三浦直之, 星龍典: 単層偏心構造物における等価1自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測, 日本建築学会構造系論文集 第606号, pp. 123-130, 2006.8
 - 8) 笠井和彦, 山下忠道, 山崎義弘, IGUSA Takeru: 振れ振動をともなう1層高減衰構造のスペクトル応答予測法, 日本建築学会構造系論文集 第636号, pp. 225-234, 2009.2