

Z型ノンコンプレッションブレースの構造システムと数値解析 (その2 ブレース架構)

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

(平成22年11月8日受付)

Numerical analysis and structural system of frame with Z-type non-compression brace
(Part 2 Braced-frame)

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

(Received Nov. 8, 2010)

Abstract

A non-compression brace subjected to cyclic loadings shows resistant characteristics without both buckling and slip-type behavior, and cyclic curves of X-type braces become perfectly-elastic-plastic-type. Cyclic curves of a Z-type brace move to a compressive side of the brace in a cyclic loading test. The analytical study on Z-type braced multi-story frames subjected to earthquake ground motions verified that each story of the frames drifted horizontally to the compressive side of the brace. In this paper, two arrangements of Z-type braces were analyzed to examine applicability of the Z-type braces to multi-story frames. It was concluded from the analytical results that alternate arrangements of the Z-type braces in the multi-story frames showed perfectly-elastic-plastic restoring force characteristics.

Key Words: *non-compression brace, z-type arrangement, braced-frame, numerical analysis*

1. はじめに

これまでに、ノンコンプレッションブレース（以後、NCブレースと記す）は、X型に配置することで、細長いブレース材を用いても座屈現象およびスリップ現象を起こすことなく、完全弾塑性型復元力特性を示すことを明らかにしている¹⁻⁵⁾。更に、振動台実験等により、NCブレースをZ型に配置（以後Z型NCブレースと記す）すれば、架構の変形が一方に漸増する性能を付与できることが分かっ

ている⁶⁻⁹⁾。

ところで、NCブレースは引張抵抗型復元力特性を示すので、Z型NCブレースをブレース架構（H形鋼柱を用い、柱梁をピン接合した架構）に用いると、ブレースは圧縮力には抵抗せず、架構が不安定構造物になることは明らかである。しかしながら、多層構造物においては、柱材を通し柱として、更にZ型NCブレースを各層毎に交互に配置すれば、任意層のブレースが抵抗しなくても、柱を介して上下層のブレースに応力が伝播して抵抗することが予想さ

* 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

*** 広島工業大学大学院建設工学専攻

**** 広島大学大学院建築学専攻

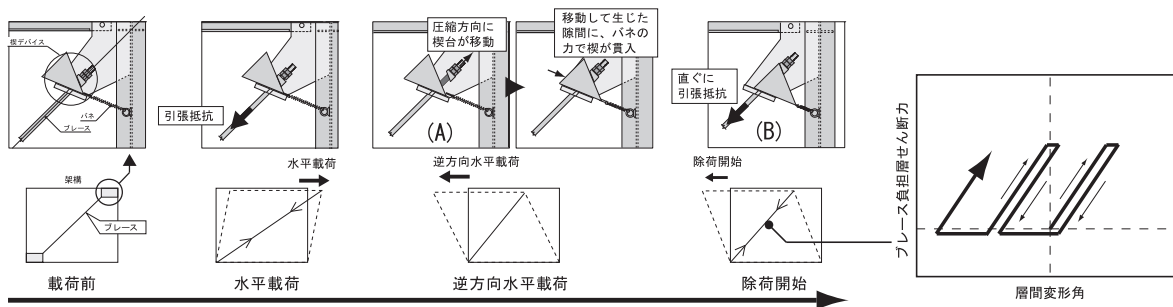


図1 楔デバイスの機能と作動の概念

表1 断面性能と材料特性

層	部材寸法	断面積 mm ²	断面2次 モーメント mm ⁴	塑性断面 係数 mm ³	降伏応力度 N/mm ²
5~6	柱 H-400x400x13x21	21870	2.24x10 ⁸	1.70x10 ⁵	325
	梁 H-450x200x9x14	9543	3.29x10 ⁸	1.65x10 ⁵	325
3~4	柱 H-414x405x18x28	23200	3.10x10 ⁸	2.33x10 ⁵	325
	梁 H-500x200x10x16	11220	4.68x10 ⁸	2.13x10 ⁵	325
1~2	柱 H-428x407x20x35	36070	3.94x10 ⁸	2.94x10 ⁵	325
	梁 H-600x200x11x17	3965	7.56x10 ⁸	2.90x10 ⁵	325

ブレース 呼び径	材質	軸方向剛性 kN/mm	降伏軸力 kN	降伏応力度 N/mm ²	ひずみ硬化係数 %
M48	ABM400	46.5	505.6	325	1.0
M56	ABM400	64.0	696.2	325	1.0
M64	ABM400	85.2	926.9	325	1.0
M68	ABM400	96.8	1053.1	325	1.0
M76	ABM400	116.4	1266.4	325	1.0
M95	ABM400	181.7	2037.6	325	1.0

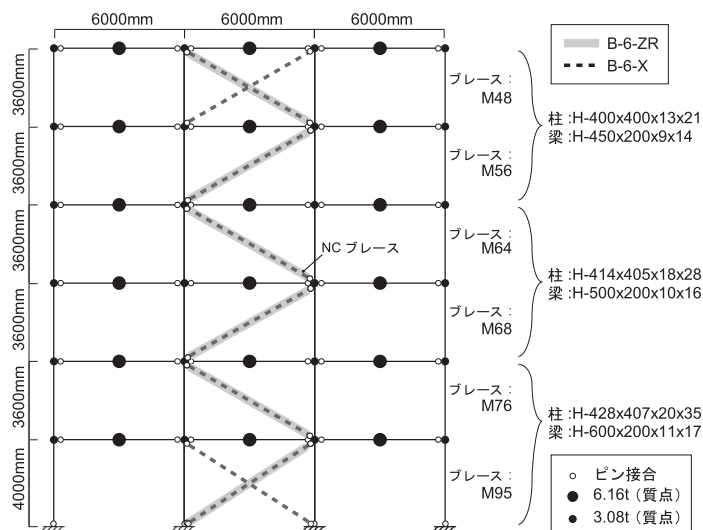


図2 解析モデルの架構とブレース

れる。

このように、Z型NCブレースをブレース架構に適用できる可能性があり、更に、X型に配置した場合と同様の抵抗特性が付与できれば、耐震要素として使用することができる。ブレース架構においてもNCブレースをZ型に配置することが可能であれば、設計の自由度が広がると共に、新しい構造システムを考案できる可能性がある。

そこで、本論文では、NCブレースの復元力特性（引張方向の変位増分には抵抗し、圧縮方向の変位増分には抵抗しない抵抗特性）を用いて、Z型NCブレースの配置方法を変数とした数値解析を行い、ブレース架構にZ型NCブレースを用いた場合の変形挙動・抵抗特性を検討することを目的とする。

2. Z型NCブレース

Z型NCブレースの概要とブレースのみの復元力特性を図1に示す。

NCブレースは、ブレースの上端部に楔デバイスを配置したものである。特徴としては、1) 圧縮側の変位増分に

対して端部が離間することで、圧縮力を負担しない(A)。2) 楔が端部の離間による隙間を埋めるので、ブレースの引張側の変位増分に対して、ブレースは直ぐに引張抵抗する(B)。

このため、図1に示すように、Z型NCブレースを配置した架構では、正方向荷重に対してはブレースが抵抗するが、負方向荷重に対してはブレースは抵抗しない。更に、楔デバイスが機能することで、負方向荷重時に楔が貫入して、除荷と共にブレースが抵抗を開始する。このため、繰返し荷重に伴ない架構の変形は一方向へ漸増していく⁶⁻⁹⁾。

3. 数値解析

本解析では、Z型NCブレースの配置方法を変数とし、ブレース架構に適用した場合の数値解析を行い、Z型NCブレースの配置方法により、ブレース架構がどのような挙動を示すかを検討する。

また、比較のために、ブレースに一般的な完全弾塑性型復元力特性を有するブレースを導入した場合の解析も併せて行い、比較・検討する。

— ノンコンプレッションブレース

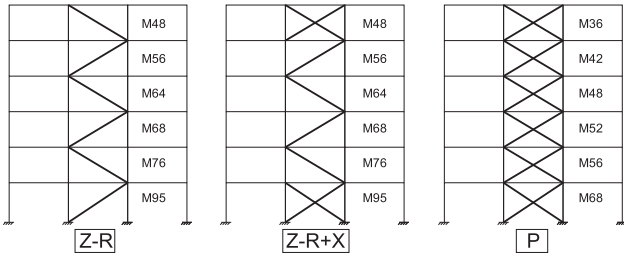


図3 配置方法とモデル名称

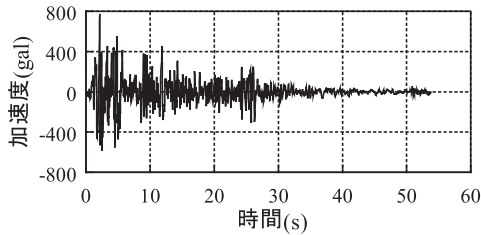


図4 EL CENTRO NS 波

3.1 架構とブレース

図2に解析に用いる架構を、表1に架構の断面性能と材料特性を、それぞれ、示す。

架構は、柱を弱軸方向に配置し、柱梁接合部および柱脚をピン接合としたものである。柱が強軸方向である場合(ラーメン架構である場合)、1次許容設計荷重を受けても層間変位が1/200 (rad) 以内に納まるように設計している架構である。

Z型 NC ブレースの断面には、柱が強軸方向である場合と同程度の保有水平耐力となるような断面を有するものを選定している。

図3に配置方法を示す。配置方法としては、まず、Z型 NC ブレースを各層毎に方向を交互に配置したもの(Z-R)、最下層および最上層をX型に配置したもの(Z-R+X)を選定する。交互に配置することで、正負の水平力に抵抗可能となり、更に、Z-R+Xでは、最上層および最下層を安定させることで、変形が一方向に大きく生じないように安定させる。

尚、比較のために、一般的な完全弾塑性型復元力特性を有するブレースを配置したもの(P)として、NCをX型に配置したものの解析も行う。Pのブレースの断面は、Z型に配置するブレースの半分程度の断面積となるようにブレースを選定する。

3.2 解析方法

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)」を用いる。尚、プログラムをコード修正して、図1中のNCブレースの復元力特性が利用できるようにしている。

数値積分には、Newmarkの β 法を使用しており、 β 値を1/4(平均加速度法)、解析の時間増分を0.005秒とし、減衰を考慮して減衰定数を0.02とする。平均加速度法は、時間刻みの大小に関わらず、無条件に安定かつ発散が生じない。

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。

解析には、表1に示す断面積、断面2次モーメント、塑性断面係数、降伏応力度を使用する。また、ブレース材には、軸方向剛性、降伏軸力、ひずみ硬化係数を入力する。入力地震波は、構造物の終局状況を検討するために、図4に示すEL CENTRO NS波を最大加速度が766.2gal(75kine:震度6強相当)となるように基準化したものを使用する。

4. 実験結果と考察

図5-図13、表2に解析結果を示す。

図5には、1層、3層、6層の層間変位時刻歴を、図6には1層、3層、6層の層せん断力-層間変位関係を、図7には3層のブレースおよび柱負担層せん断力-層間変位関係を、図8には変形領域と地震後残留変位の分布を、図9には水平最大変位(地盤からの最大相対変位)の分布を、図10には架構の振動時変形状態を、図11には各層の最大過速度の分布を、図12には各層の地震終了時のエネルギー吸収量を、図13にはエネルギー吸収量の比較を、表2には解析結果として、固有周期、ブレースの累積塑性変形倍率、全エネルギー吸収量を、それぞれ、示す。また、図14にブレースおよび柱負担層せん断力の模式図を示す。

尚、図7中の柱負担層せん断力は、層せん断力とブレース軸力水平成分の差分(=Q-Q_B)として算出し、i層の水平変位(地盤からの相対変位)はi層とi層より下層の層間変位量を累加して求め、変位領域は各層の正負の水平最大変位をプロットした領域である。エネルギー吸収量はQ- δ 関係を積分して求めている。

4.1 ブレースの累積塑性変形倍率

表2より、ブレースの累積塑性変形倍率は最大でも16.90であり、塑性ひずみに換算すると27,000 μ 程度となる。JJS規格に則ったブレースであれば、伸びの能力10%(100,000 μ)は確保されるので、ブレースの変形性能を超えることはない。

4.2 架構の変形状態

○ Z-R

図5の層間変位時刻歴より、ブレースが抵抗しない側へと大きな変位が生じると共に、地震終了時においても1層

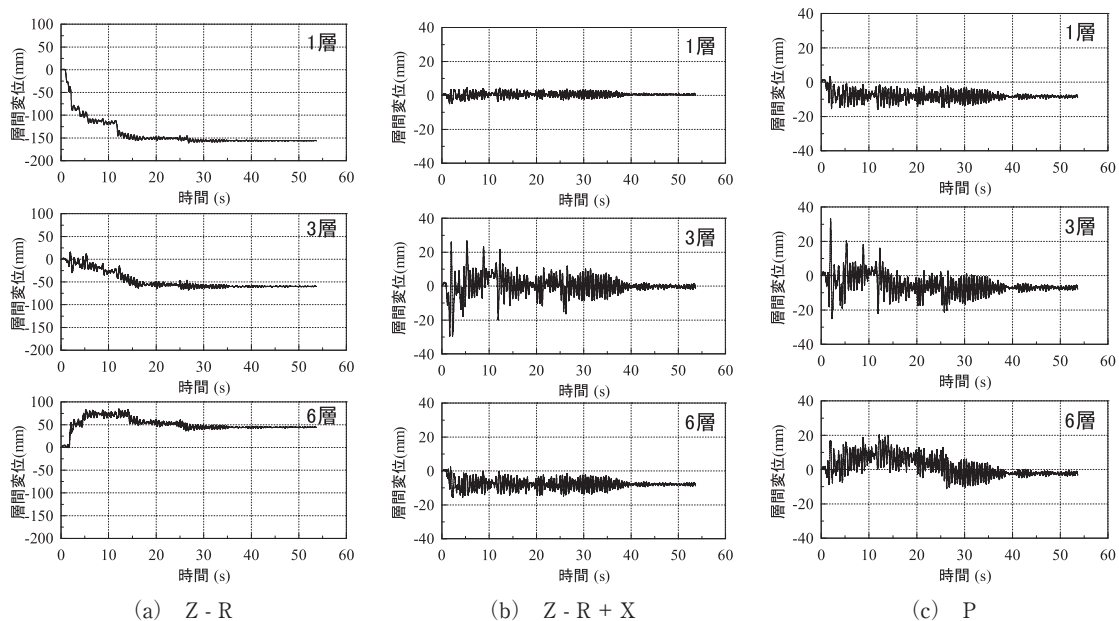


図5 層間変位時刻歴

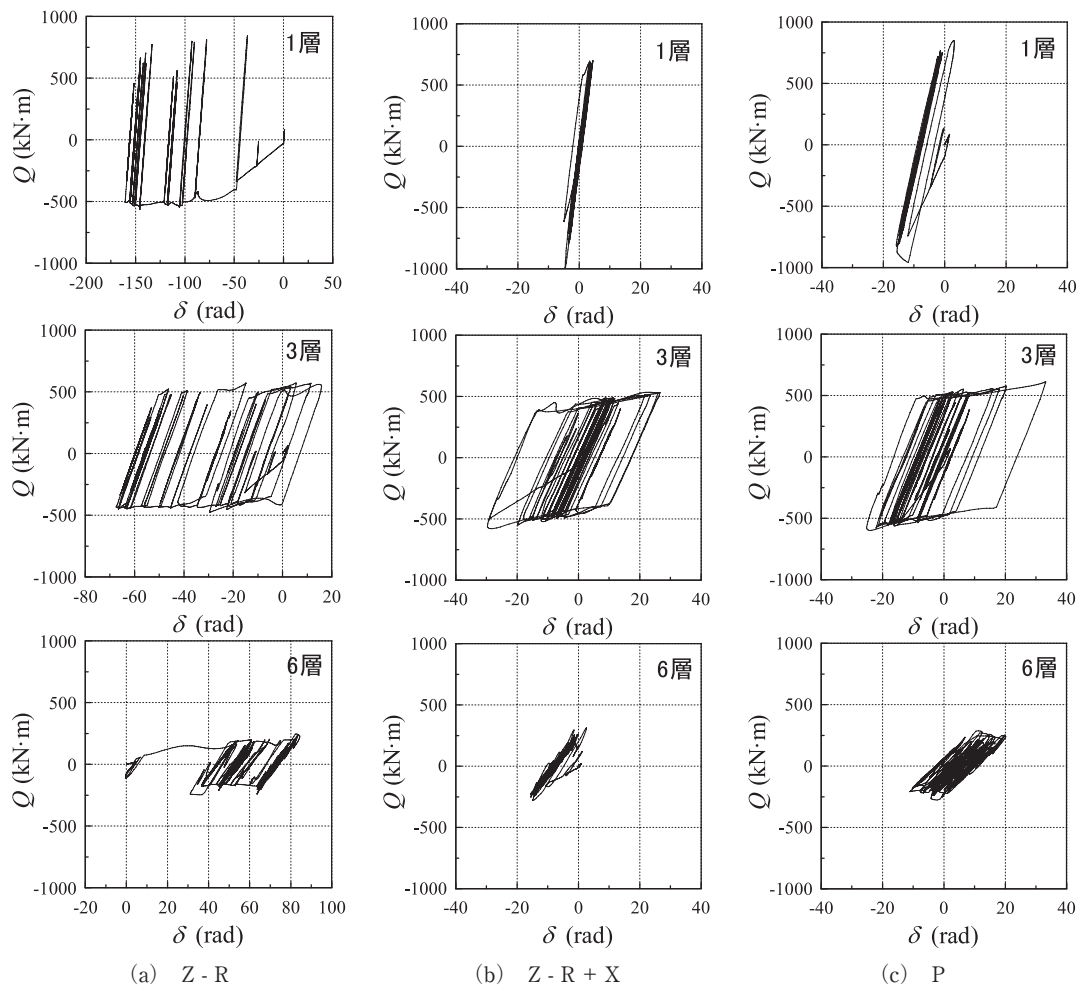


図6 層せん断力 Q - 層間変位 δ 関係

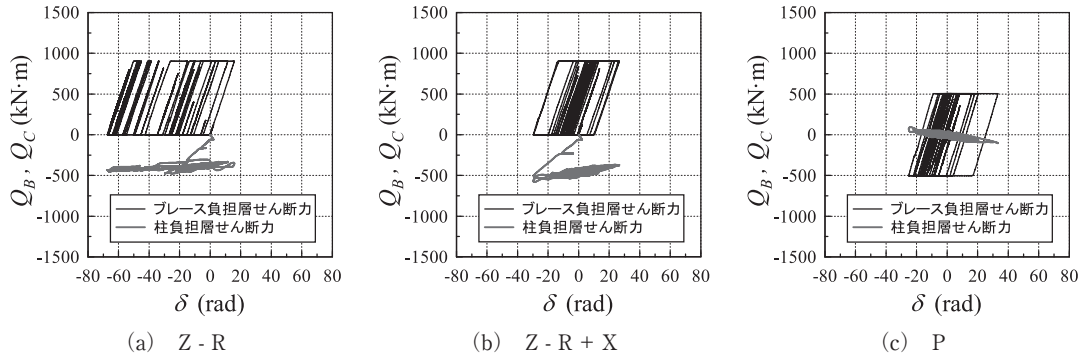


図7 3層のプレースおよび柱負担層せん断力 Q_B , Q_C - 層間変位 δ 関係

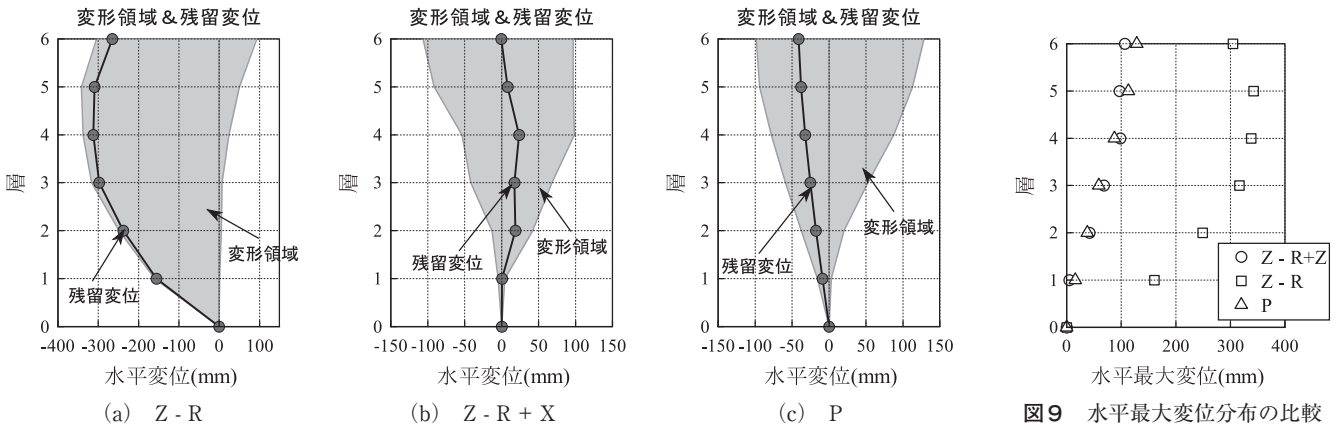


図8 変形領域と残留変位

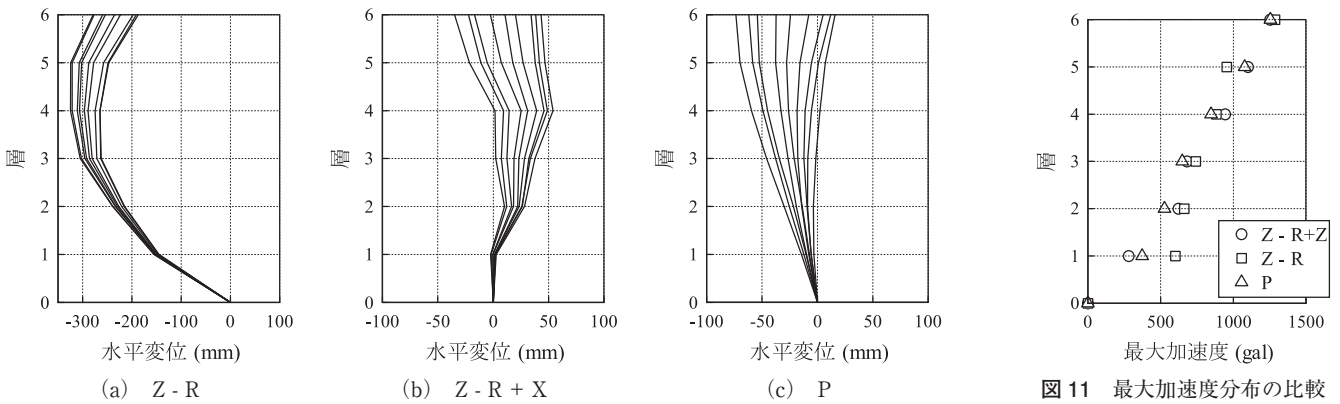


図9 水平最大変位分布の比較

図10 振動時挙動

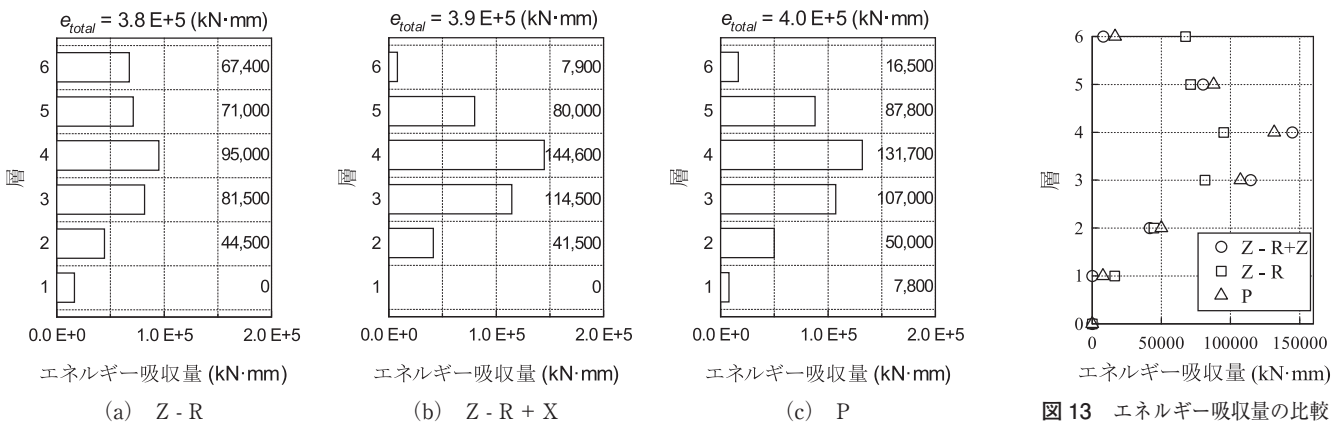


図12 エネルギー吸収量の分布

図13 エネルギー吸収量の比較

表2 解析結果

試験体名称	固有周期 (s)	ブレース材の累積塑性変形倍率 η						全エネルギー吸収量 e_{total} (kN・mm)
		1層目	2層目	3層目	4層目	5層目	6層目	
Z-R	0.559	0.00	5.67	12.30	10.60	6.86	0.00	375,000
Z-R+X	0.537	0.00	4.29	16.90	14.26	5.14	0.00	388,000
P	0.536	0.00	5.59	12.62	12.10	6.78	0.47	401,000

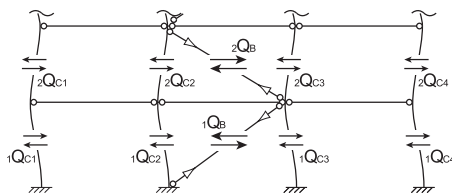


図14 ブレースおよび柱負担層せん断力の模式図

目では150mm程度の層間変位（層間変形角にして1/27 (rad)）が生じている。これは、中間層（最下層と最上層以外の層）では、ブレースが抵抗しない場合においても上下層のブレースが抵抗するが、1層目では、2層目のブレースが抵抗するのみで、正負のバランスが取れない不安定な状態になるためである。

また、図8、9からも、1層目に大きな変形が生じており、更に、頂部の水平変位を見てもPと比較して3倍近くの値が出ている。そして、変形の状態としては、図10より、負方向に大きくたわんだ弓なり状の変形をしており、全体的に負方向に大きく傾いて変形しているのは、第1層の影響であると考えている。

○ Z-R+X

図5の層間変位時刻歴より、1層および3層は地震後の残留変位がほぼ0 (mm)であり、6層の残留変位がほぼ10 (mm)程度であった。また、図8、9より、変形が集中している層はなく、頂部の水平最大変位を見てもほぼPと同程度の値（±100 (mm)程度）となっている。これは、最上層と最下層をX型に配置することで、上下端は正負の水平力に対して安定した応答を示すためである。また、図10より、変形状態は各層の変位が交互に生じて複雑な挙動を示しているが、各層の変位が相殺し合うため、最上部の変位等は大きくは生じていない。

4.2 各層の復元力特性

○ Z-R

図6より、1層目は、負方向に変位が大きく生じて、その復元力特性はZ型NCブレース単体の復元力特性に類似している（図1参照）。これは、1層の正方向では750 (kN)程度の層せん断力を受けても降伏していないのに対して、負方向では500 (kN)程度で降伏しており、正方向と負方向との復元力のバランスが取れていないためである。一方、3層目および6層目においては、それぞれ、負方向と正方向とに大きく変位しているものの、正負の降伏

耐力はほぼ等しく、更に、復元力特性はbi-linear型である。このようにbi-linear型復元力特性を示すのは、図7、14に示すように、ブレースのせん断力に対して柱のせん断力が逆方向に作用するためである。

但し、いずれの層においても、Pの復元力特性とは大きく異なる挙動を示している。

○ Z-R+X

図6より、1層および6層はほぼ弾性挙動を示しており、3層目がbi-linear型復元力特性を示している。3層目がbi-linear型となるのは、上述したようにブレースおよび柱負担層せん断力が、それぞれ、逆方向に発生するためである。

更に、このZ-R+Xは、いずれの層の復元力特性もPと類似した挙動を示しており、Z-Rで現れたような一方に大きく変位が生じたり、正負の降伏耐力が異なったりするような不安定な挙動は生じていない。これらは、最上層および最下層をX型配置して、安定した挙動を示すように調整したためと考えられる。

4.3 加速度応答

図11より、いずれのモデルの最大過速度分布も、逆三角形分布となっている。Z-Rの1層目が他のモデルより高目の値を示しているものの、全体的に、いずれのモデルの分布も類似している。

Pは、各層が完全弾塑性型復元力特性を示すブレースを使用しており、履歴特性はほぼラーメン架構と同じである。すなわち、Pと類似した分布状態であれば、一般的なAi分布等を使用した許容応力度設計を行うことが可能であると言え、ブレース架構にZ型NCブレースを配置する場合においても、一般的な設計法が適用できることが分かる。

4.4 エネルギー吸収量

図12、13より、各層のエネルギー吸収量の分布、および値は、Z-RとPとは分布の傾向が大きく異なっているが、これは、4.1節および4.2節にも示したように、最下層と最上層の応答が不安定なためと考えている。

一方、Z-R+XとPとは、構造物の総エネルギー吸収量 e_{total} がほぼ一致し、更に、分布の傾向も類似している。これは、それぞれの復元力特性が類似しているためと思われる。

以上より、数少ないモデルでの検討結果ではあるが、Z型 NC ブレースをブレース架構に適用する場合において、最上層および最下層を X 型配置すれば、完全弾塑性型復元力特性を有したブレースを配置した構造物と類似した安定した挙動を示すことが分かった。

5. まとめ

ブレース架構に Z 型 NC ブレースを配置した架構の数値解析を行い、以下の知見が得られた。

- 1) ブレース架構に Z 型 NC ブレースを配置する場合においても、ブレースの方向を交互に配置すれば、ブレースが抵抗しない方向の水平力が作用しても、水平力は柱を介して上下のブレースに力が分散されて、各層は bi-linear 型復元力特性を示す。
- 2) 全層に Z 型 NC ブレースを配置した場合、最上層と最下層の復元力が不安定になり（正負の降伏耐力が異なり）、変形集中が生じる可能性がある。
- 3) Z 型 NC ブレースを用いる配置する場合、最上層と最下層を X 型配置とすれば、変形集中等は生じない。このため、各層の復元力特性やエネルギー吸収量は、完全弾塑性型復元力特性を有するブレースを配置した場合と類似した挙動を示す。
- 4) Z 型 NC ブレースを用いる場合においても、最大過速度の分布は A_i 分布と同じ逆三角形分布となる。

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, pp129-136, 2003. 11.

- 2) Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU: Cyclic loading tests on Non-compression brace considering performance-based seismic design, Journal of Constructional Steel Research, Vol.61, Issue 9, pp.1310-1317, 2005. 9.
- 3) 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.
- 4) 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, pp429-436, 2006. 11.
- 5) 高松隆夫, 玉井宏章, 岡部政和, 古賀稔章: 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, pp349-356, 2006. 11.
- 6) 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 型ブレース付き門型ラーメン架構の振動応答性状について, 日本建築学会中国支部研究報告集, CD-ROM 論文番号 -233, 2009. 3.
- 7) 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: 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, 広島工業大学紀要 第 45 巻 研究編, 2010, 2.
- 8) 荊尾友裕, 高松隆夫, 玉井宏章, 三好行則, 山西央朗, 澤田樹一郎, 松尾彰: 2 層 Z 型ノンコンプレッション弱軸方向架構の振動特性について, 日本建築学会中国支部研究報告集, CD-ROM 論文番号 -249, 2010. 3.
- 9) 土江葉菜子, 高松隆夫, 澤田樹一郎, 玉井宏章, 三好行則, 山西央朗, 荊尾友裕, 松尾彰: Z 型ノンコンプレッ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報告集, CD-ROM 論文番号 -250, 2010. 3.

