

Z型ノンコンプレションブレースの構造システムと数値解析

(その1 ラーメン架構)

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 1 Rigid-frame)

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

(Received Nov. 8, 2010)

Abstract

Non-compression (NC) braces resist only a tensile axial force. A frame with Z-type NC braces deform in a single side of direction under a cyclic ground motion. An analytical study on frames with Z-type NC braces was carried out to clarify deformation behavior of the rigid frames. The following conclusions were obtained from the analytical results: 1) Multi-story frames with same-directional Z-type braces deform in a single direction under seismic ground motions. 2) Frames with alternate Z-type braces deform in small top displacement because of multi-degrees of deformation under earthquakes.

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

1. はじめに

ノンコンプレションブレース(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⁾。

ところで、NCブレース単体では、引張方向の変位増分に対してのみ抵抗する特性を有している。このため、架構にNCブレースをZ型に配置すれば(これをZ型NCブレースと呼ぶ)、一方向にのみブレースが抵抗すると共に、図1に示すように、ブレースに圧縮方向の変位増分が作用し

た際には楔が貫入するので、振動と共にブレースに張力が導入され、架構の変形が一方向に漸増していく。著者等は、この抵抗特性を、振動台実験にて実証している⁶⁻⁹⁾。

更に、2層架構のモデル試験体を用いた振動台実験により、Z型NCブレースを配置する向きを、1層および2層共に同一方向に配置すれば、各層の層間変位が累加されるので、上層に向う程、構造物の水平変位(地盤からの相対変位)が大きくなる。一方、1層と2層が逆方向になるように配置すれば、各層の層間変位が相殺し合って頂部の水平変位は小さくなることが明らかになっている⁸⁾。

このように、多層ラーメン架構においては、Z型NCブ

* 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

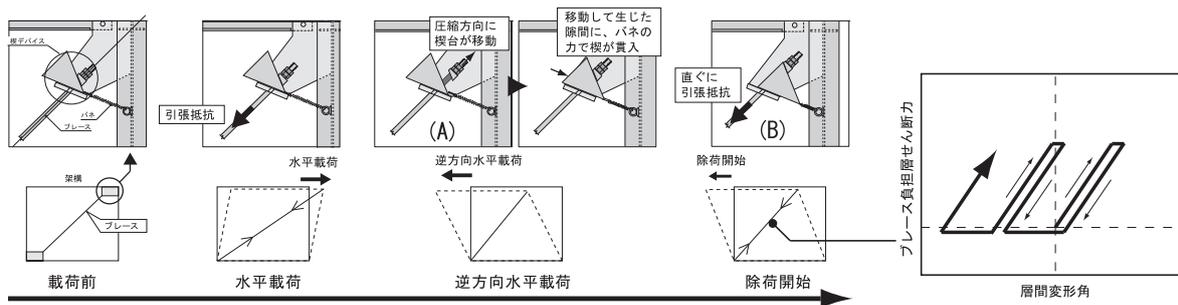


図1 楔デバイスの機能と作動の概念

表1 断面性能と材料特性

(a) F, Z, ZR					
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	6.66x10 ⁸	3.67x10 ⁶	325
	梁 H-450x200x9x14	9543	3.29x10 ⁸	1.65x10 ⁶	325
3~4	柱 H-414x405x18x28	23200	9.28x10 ⁸	5.03x10 ⁶	325
	梁 H-500x200x10x16	11220	4.68x10 ⁸	2.13x10 ⁶	325
1~2	柱 H-428x407x20x35	36070	1.19x10 ⁹	6.31x10 ⁶	325
	梁 H-600x200x11x17	3965	7.56x10 ⁸	2.90x10 ⁶	325

ブレース	材質	軸方向剛性 呼び径	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

(b) FF					
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-428x407x20x35	36070	1.19x10 ⁹	6.31x10 ⁶	325
	梁 H-600x200x11x17	13170	7.56x10 ⁸	2.90x10 ⁶	325
3~4	柱 H-458x417x30x50	52860	1.87x10 ⁹	9.54x10 ⁶	325
	梁 H-588x300x12x20	18720	1.14x10 ⁹	4.35x10 ⁶	325
1~2	柱 H-498x432x45x70	77010	2.98x10 ⁹	1.45x10 ⁷	325
	梁 H-700x300x13x24	23150	1.97x10 ⁹	6.34x10 ⁶	325

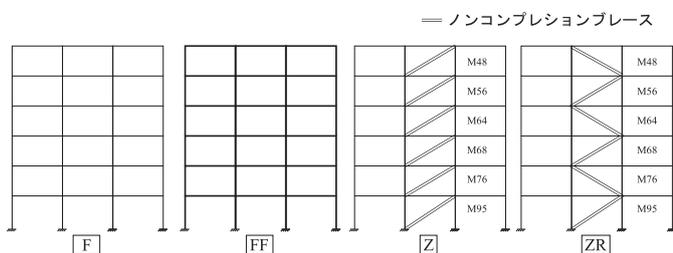


図3 配置方法とモデル名称

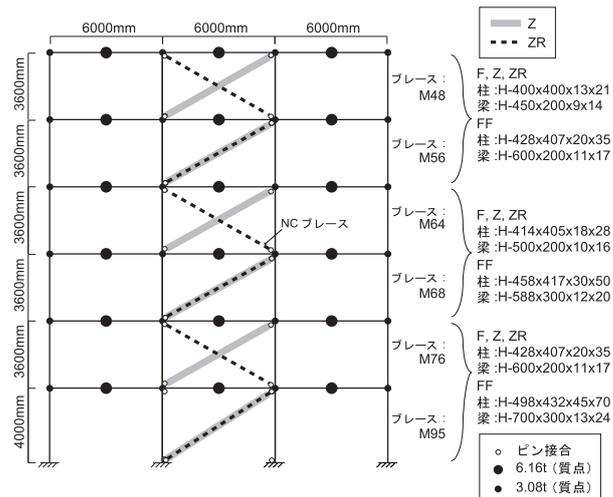


図2 解析モデルの架構とブレース

ブレースの配置方法を調整することで、地震時および地震後の変形状態を制御できると考えられる。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）を多層ラーメン構造物に付与することで、架構の振動時および地震後の変形状態を制御できることを明らかにすることを目的とする。方法としては、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、変形状態や地震時応答性状を検討するものとする。

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⁾。

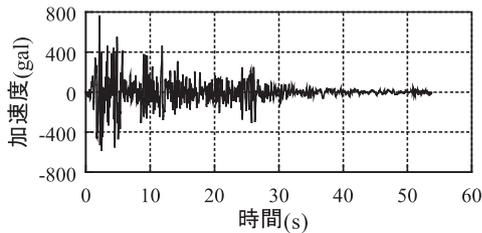


図4 EL CENTRO NS波

3. 数値解析

本解析では、Z型NCプレースの配置方法を変数とした数値解析を行い、Z型NCプレースの配置方法により、ラーメン架構がどのような応答性状を示すかを検討する。

また、比較のために、ラーメン架構のみのモデル(F)、Z型NCプレースを設置した場合と同程度の水平剛性を有するように柱梁断面を調整したモデル(FF)の数値解析も併せて行い、比較・検討する。

3.1 解析変数

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、柱を強軸方向に配置し、柱梁接合部および柱脚を剛接合としたものである。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プレースの断面には、プレース降伏時水平耐力が、架構の保有水平耐力と同程度になるような断面を選定している。

図3に解析変数とモデル名称を示す。モデルには、架構のみのF、Z型NCプレースを設置した場合と同程度の水平剛性を有するラーメン架構のFF、FにZ型NCプレースを同一方向に配置したZ、FにZ型NCプレースを交互に配置したZRの、合計4種類の解析を行う。

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プ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、プレース材には、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12、表2に解析結果を示す。

図5、図6には、1層および6層の加速度時刻歴を、図7には頂部水平変位(地盤からの相対変位)時刻歴を、図8には変位領域と残留変位を、図9には各層の地震終了時エネルギー吸収量の分布を、図10には1層目の層せん断力-層間変位関係を、図11には各層の最大過速度の分布を、図12には地震終了時の構造物の残留変位を、表2には解析結果として、固有周期、全エネルギー吸収量を、それぞれ、示す。また、図13に楔貫入後におけるZ型NCプレース付き架構の復元力特性の模式図を示す。

尚、図7、図8、図12中の、i層の水平変位および残留変位は、i層とi層より下層の層間変位量を累加して求め(地盤からの相対変位を求め)、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各層の $Q-\delta$ 関係を積分して求めている。

4.1 加速度応答

図5より、1層目の加速度応答は、Fと他のモデルとでは、あまり対応していない。特に10秒~20秒の間は従来型に比較して低目の加速度となっている。一方、図6より、6層目の加速度応答は、Fに比較してZとZRとは、1層目と同様に対応していない。また、FFはFよりも小さめの分布を示している。

このように、プレース付架構とすることで、加速度の応答が小さくなる傾向にある。これは、プレースが導入されたことによる剛性の増大や、図10から分かるように、架構に比較してプレースは早期に降伏するため、プレース塑性化に伴う履歴減衰が生じたためと考えられる。

また、図11より、Z型NCプレースを配置した場合も最大加速度の分布は逆三角形型となっている。Z型NCプレースを配置すると、図13の復元力特性の概念図に示すように、地震動初期の段階(0-step)の時点では、正方向はプレースと架構を足し合わせた剛性 K^+ 、負方向では架構のみの剛性 K^- となっている。この時点では、正負の弾性剛性が異なるので、同一周期の波に対する正負の応答倍率が異なることは明らかである。しかしながら、i-stepの

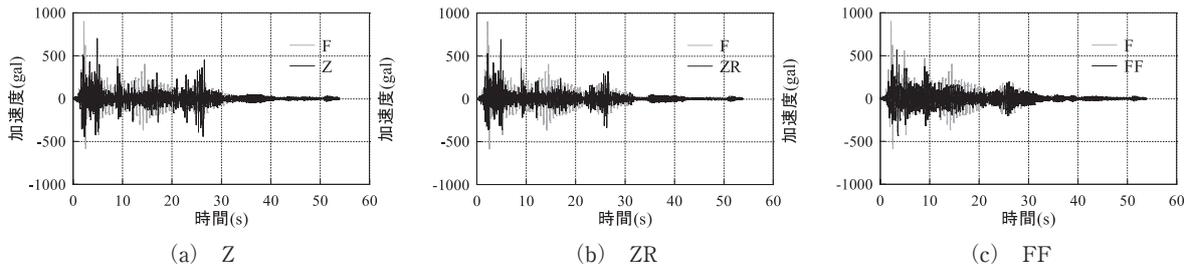


図5 1層目の加速度時刻歴

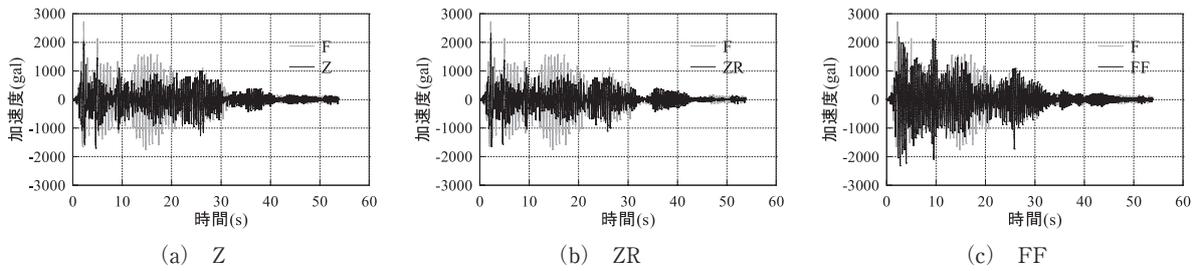


図6 6層目の加速度時刻歴

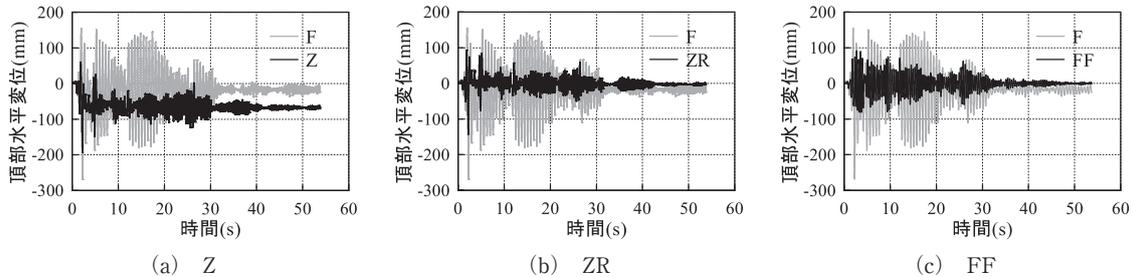


図7 頂部水平変位時刻歴

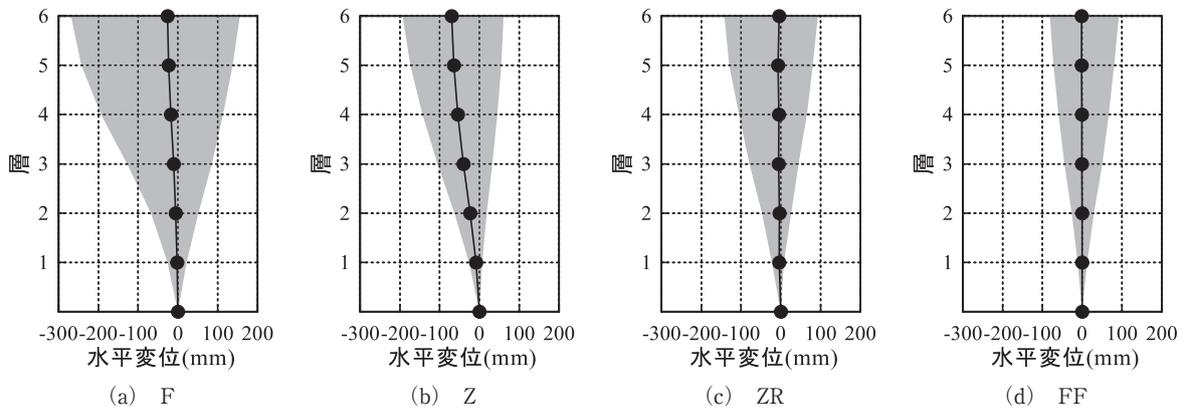


図8 変位領域と残留変位

時点では、楔が振動と共に貫入してブレースに初期軸力を導入したような状態になっているため、正負の剛性が等しく K^+ になっている。このように、楔が貫入した荷重下では正負の応答が等しくなり、一般的なラーメン架構と同様の加速度分布を示すものと考えられる。

すなわち、一般的な A_1 分布等を用いた許容応力度設計を行うことが可能であり、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。

4.2 水平変位

図7より、頂部の水平変位は、Fと比較していずれのモデルも低目の応答を示している。特に、ZRとFFとは地震後の頂部水平変位がほぼ0付近であると共に、図8の変位領域や図12の残留変位の結果は類似している。

一方、図10に示すように、FFはほぼ線形の挙動を示しているのに対して、ZRは早期に降伏して bi-linear 型復元力特性を示している。このように、Z型 NC ブレースによる補剛・補強のみで、同程度の剛性を有するラーメン架

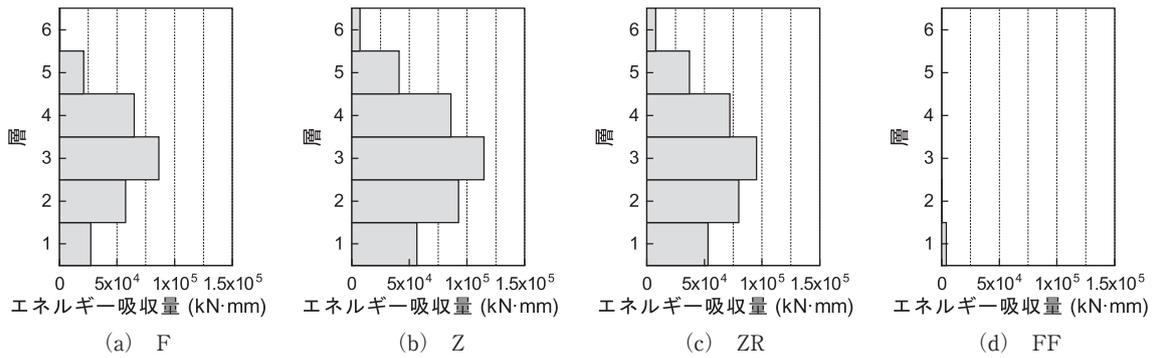


図9 エネルギー吸収量の分布

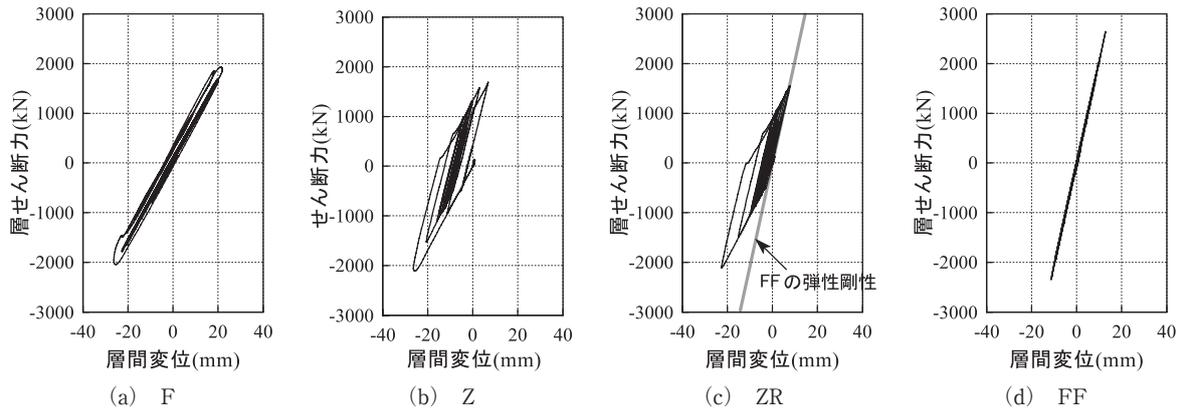


図10 1層目の層せん断力 Q - 層間変位 δ 関係

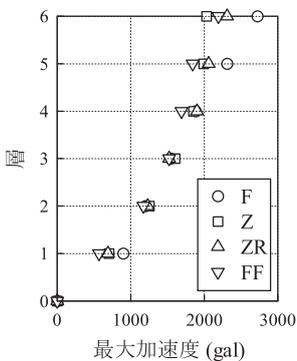


図11 最大加速度分布の比較

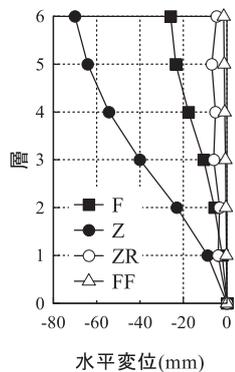


図12 残留変位の比較

構と同等の応答性状を得られることが分かる。

次いで、Zにおいては、Z型NCブレースを全層同一方向に設置しているため、図12の頂部の地震後残留変位は70 (mm) 程度となり、更に、図7の結果より、頂部において殆ど正方向へ変位が生じていないことが分かる。このように、Z型NCブレースを同一方向に配置すれば、水平変位を一方方向のみに生じさせるように制御することができる。

4.3 エネルギー吸収量

図9、表2より、各層のエネルギー吸収量の分布、および値は、ブレースを設置しているZとZRとがほぼ対応している。また、ラーメン架構のFは、ブレースよりエネ

表2 解析結果

試験体名称	固有周期 (s)	全エネルギー吸収量 e_{total} (kN·mm)
F	0.649	257,000
Z	0.446	398,000
ZR	0.432	345,000
FF	0.411	4,220

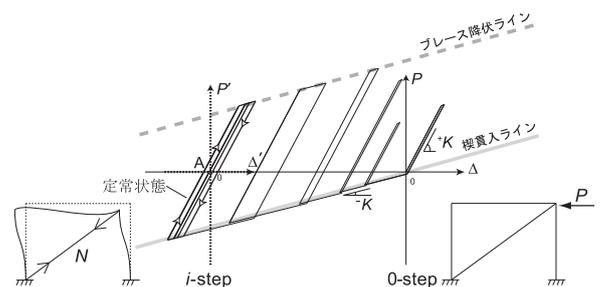


図13 Z型NCブレース付架構の復元力特性模式図

ルギー吸収量が少な目ではあるが、分布の傾向はブレース付架構と類似している。

この様に、Z型NCブレースを配置した場合においても、エネルギー吸収量の分布等は一般的なラーメン架構と同じであり、特別な検討を必要としないことが分かる。

尚、FFは、入力波に対して保有水平耐力が高く、ほぼ全層が弾性挙動を示したので、塑性変形によるエネルギー吸収は、殆ど行われていない。

5. まとめ

ラーメン架構にZ型NCブレースを配置し、配置方法を変数とした数値解析を行い、以下の知見が得られた。

- 1) Z型NCブレースを交互に配置すれば、頂部の水平変位は、地震後においてもほぼ0となる。
- 2) Z型NCブレースを同一方向に配置すれば、地震後の残留変位が発生する方向を制御することができる。
- 3) 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。また、交互に配置した場合は、ブレースの履歴減衰や剛性上昇の影響により、同程度の弾性剛性を有するラーメン架構と同等の応答（加速度分布、水平変位領域や地震後残留変位）が得られる。このため、Z型NCブレースを用いる場合においても、特殊な設計法を適用する必要はなく、一般的な設計法が適用できると言える。

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.