

Z型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

高松 隆夫*・玉井 宏章*・三好 行則**・澤田 樹一郎***
山西 央朗****・荊尾 友裕**・松尾 彰***

(平成21年10月31日受理)

A study on vibration behavior of Z-type non-compression braced frame

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Yukinori MIYOSHI, Kiichiro SAWADA
Teruaki YAMANISHI, Tomohiro KATARAO and Akira MATSUO

(Received Oct. 31, 2009)

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 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-storey Z-type braced frame specimens to clarify the one-sided response.

Key Words: *Z-type brace, Vibration characteristics, Relative storey displacement, Convergence of the deformation, Shaking table test*

1. はじめに

著者等は、ブレース端部に楔デバイスを取付け、端部の離間・接触を利用してブレースが引張力のみ抵抗するノンコンプレッションブレース（以後、NCブレースと呼ぶ）を開発・提案している^{1)~7)}。

このNCブレースの特徴の一つとしては、ブレースを圧縮する方向では端部が離間して、楔が貫入すると共に、ブレースを引張る方向に変位する場合は、すぐに引張抵抗することが挙げられる。このNCブレースの特徴に着目すると、ブレースを圧縮する方向に構造物に変形した後に徐荷すると、ブレースを引張る方向側にブレース端部が変位、NCブレースがすぐに引張抵抗することで、架構が傾く。そのため、図1に示すように、NCブレースをZ型配置す

ることで、地震等の繰返し載荷下において、構造物の変形方向を制御することが可能になる新しい構造システムが開発できると考えられる。

Z型NCブレース架構の場合、弾性範囲では変形した後にNCブレースの軸力が常に作用していれば、それ以上傾くことはない。また、弾塑性において、一定荷重を与えた場合、ある程度、変形後に同じ地点をループすることで、変形の進行が収束すると考えられる。本実験において、変形方向の確認と共に、変形の収束の確認も併せて行う。

本研究では、実験及び解析において、NCブレースをZ型に配置した1層1スパンのZ型NCブレース架構の振動台実験を行い、構造物の変形方向、変形の収束を確認する。

* 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系研究科建設工学専攻

*** 広島大学大学院社会環境システム専攻

**** 広島工業大学高性能構造システム開発研究センター

表1 素材特性試験結果

材料	E N/mm ²	σ_y N/mm ²	σ_u N/mm ²	σ_y/σ_u	E_{sh} %	ϵ_f %	E:ヤング係数 σ_y :降伏応力度 σ_u :引張強さ σ_y/σ_u :降伏比 E_{sh} :ひずみ硬化開始ひずみ度 ϵ_f :伸び	
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	SS400	205,000	318	433	0.71	2.00	27.0	

表2 バネの形状・特性

自由長	バネの外径	線の径
95mm	45mm	3mm
最大縮み	最大強さ	バネ定数
62mm	116.6kN	1.86N/mm

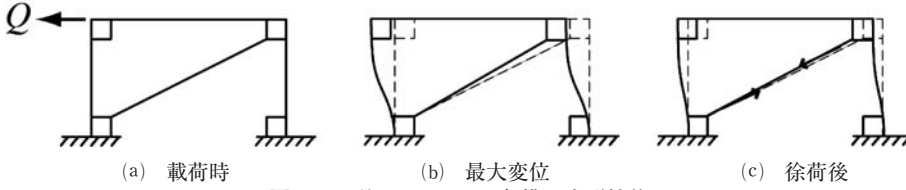


図1 Z型NCブレース架構の変形状

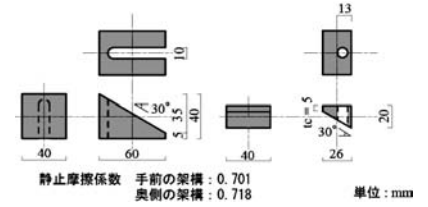


図3 楔と楔受けの詳細図

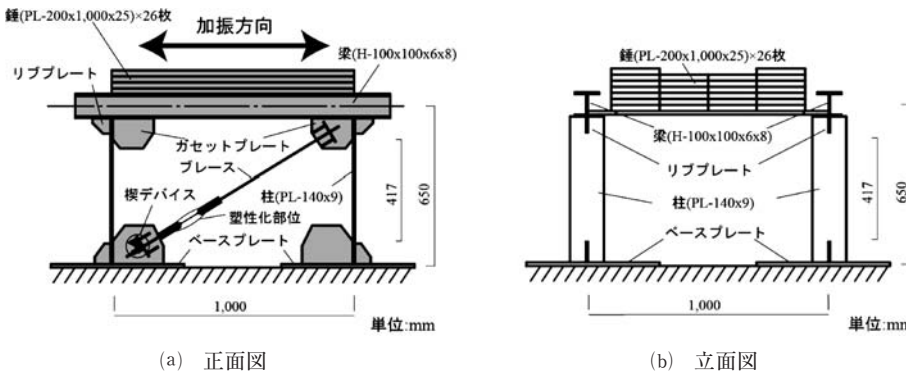


図2 試験体

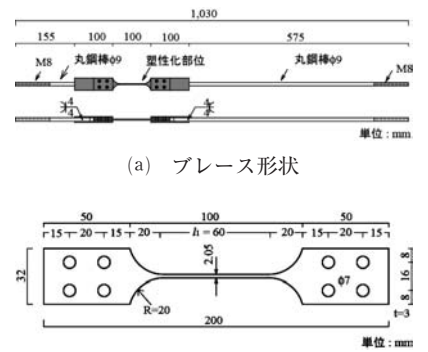


図4 ブレース詳細図

2. 実験概要

2.1 試験体

図2に試験体を、図3に楔デバイスの詳細を、図4にブレースの詳細を、それぞれ、示す。

試験体にNCブレースを、Z型に配置したもの(NC型試験体)を用意した。また、架構の振動特性を得るために、ブレースを取付けていない架構のみの試験体(N型試験体)の弾性加振実験を行った。

試験体は、柱に平鋼(PL-140x9)、梁にH形鋼(H-100x100x5x8)を使用し、溶接接合しているラーメン架構である。柱と梁の接合部および柱とベースプレートの接合部には、ガセットプレート及びリブプレートを全周隅肉溶接接合している。試験体は、ブレースが最大耐力に達した場合においても柱と梁は弾性範囲に留まるように十分強く設計した。

試験体は、上記の架構を2列並列させ、各架構の梁下フランジの3箇所に桁(PL-1000x150x16)を高力ボルト接合して、連結した立体骨組架構である。桁には、錘として平鋼(PL-200x1000x25)を26枚積載し、質点質量 m は約 $1.15t$ である。

ブレースは、丸棒鋼(M8, $\phi 9$, $L=1030$)を使用し、ブレース軸耐力を調整するため、図4(b)に示す塑性化部位

(Fuse)をブレースに設けている。

表1に試験体の素材試験結果を、表2にNCブレース端部に設置するバネの詳細を、それぞれ、示す。

2.2 NCブレースの概要

図5に楔デバイスを設置したブレースの材端部詳細を、図6に作動概念を、それぞれ、示す。

NCブレース材端部は、楔、楔受け、楔台、バネとナットで構成されている。ブレースから力を受けても、楔と楔受けが滑らないように摩擦係数を確保している。本実験では、摩擦係数を確保するために発錆処理を施している。ガセットプレートや楔台は、水平荷重及びブレース軸力に対して、十分な強度と面外曲げ剛性を有している。

NCブレースは、ブレース軸力が0以下のときに、ブレース圧縮方向(負方向)に架構が変形すると、NCブレース端部が離間し、圧縮力が作用せず、座屈が生じることはない。この端部に隙間が生じて、楔に取付けられたバネの復元力により、楔が楔台と楔受けとの間に貫入するため、ブレースに緩みは生じない。負方向からブレース引張方向側(正方向)に架構が変形すると、ブレースが引張抵抗を始める。

図7にNCブレースの復元力特性を示す。図7に示すように、NCブレースは、負方向から正方向に増分する変形

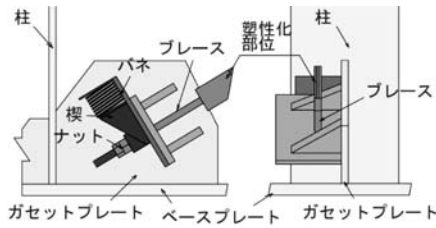


図5 ブレース端部の詳細

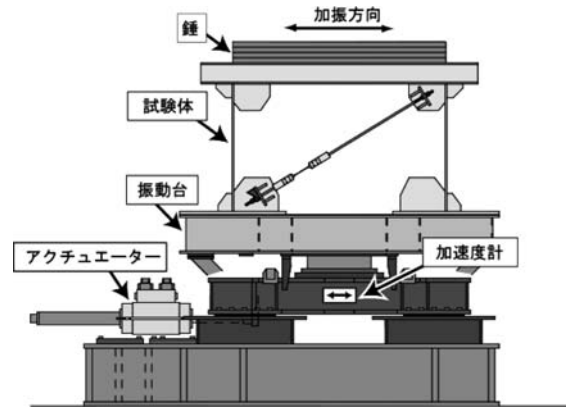


図8 振動台加力装置

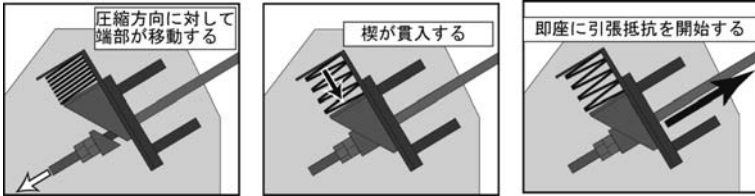


図6 NCブレースの作動概念

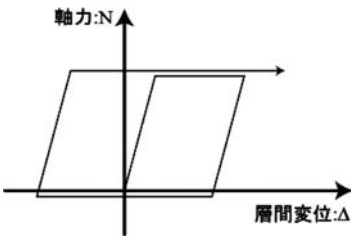


図7 ブレースの復元力特性

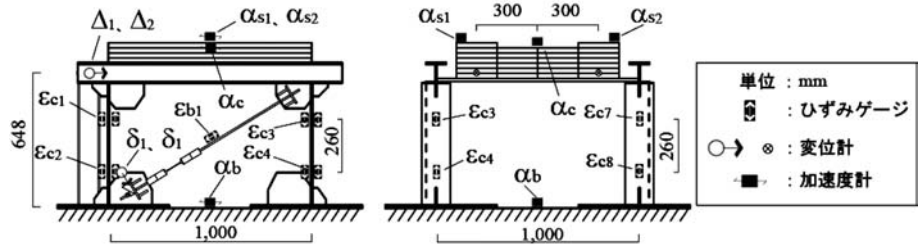


図9 計測位置

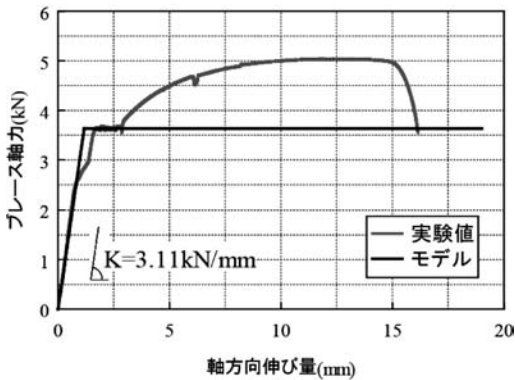


図10 ブレース引張試験結果

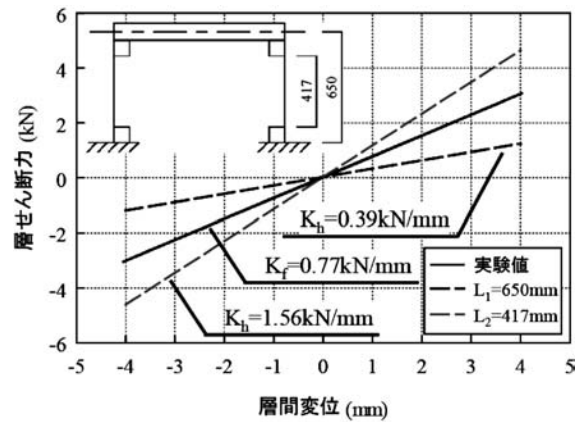


図11 N型試験体の実験結果

に対して、抵抗する復元力特性にしている。

2.3 荷重方法

図8に本実験で使用する振動台を示す。振動台は、垂直水平2軸振動試験機（島津製作所 EHV-5x/4z 形）で、加振は、水平方向に行い、振動台加速度 α_b をフィードバック制御する加速度制御で行った。試験体のベースプレートを振動台に緊結して、試験体を設置する。

加振は、N型試験体、NC型試験体の弾性正弦波加振実験2種類と、S型試験体およびNC型試験体の弾塑性正弦波加振実験2種類の、計5種類の実験を行った。

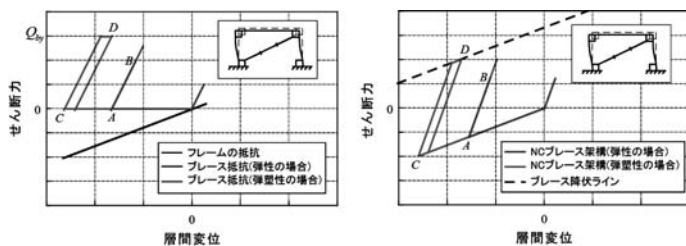
また、固有振動数 f を求めるために、実験の前後で、

SWEEP 試験を行った。SWEEP 試験は、1 Hz から 20 Hz まで、1 秒に 0.1 Hz ずつ振動数を上昇させるものである。この SWEEP 試験の結果を基に、S 型及び NC 型試験体の各頂部加速度が揃うように入力加速度を調整した。

2.4 計測方法

計測には、加速度計（2G）、ひずみゲージ、変位計を使用した。図9に計測位置を示す。

加速度の計測は、試験体の錘上部の中心位置および振動台中心位置の加振方向の加速度、 α_c 、 α_b について行った。試験体に作用する層せん断力 Q は、次式で算定する。



(a) NC ブレースとフレームの抵抗 (b) NC ブレース架構の抵抗
図 12 NC ブレース架構の収束

表 3 解析データ
(a) 柱と梁

	寸法	断面積 mm ²	断面2次 モーメント mm ⁴	断面係数 mm ³	降伏応力度 N/mm ²
柱	PL-140x9	1260	8510	2835	318
梁	H-100x100-6x8	2519	3780000	86400	318

(b) ブレース

	軸方向剛性 kN/mm	降伏軸力 kN
ブレース	3.11	3.6

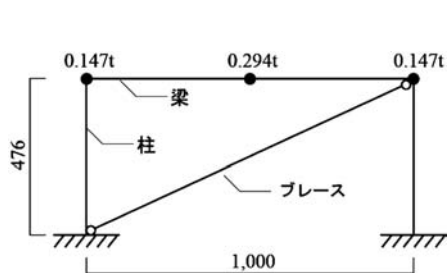
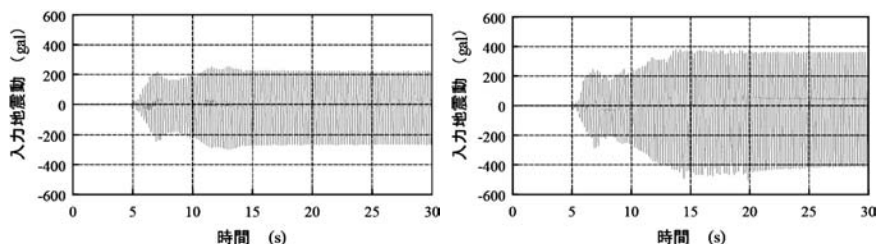


図 13 解析モデル



(a) NC 型試験体弾性加振

(b) NC 型試験体弾塑性加振

図 14 入力地震動

$$Q = m\alpha_c \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 m は試験体上部の質量である。

変位の計測は、層間変位、 Δ について行った。変位量は、試験体の 2 つの架構の変位計の計測値を平均して求めた。ひずみは、柱 16 箇所とブレース軸部にひずみゲージを貼付し、計測した。

本実験では、加速度計より算出した層せん断力と、ひずみゲージから算出した層せん断力はほぼ一致した。そのため、層せん断力は、(1)式を用いる。

3. 試験体評価

3.1 水平弾性剛性

NC 型試験体は、門型架構にブレースを 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、以下の仮定を設ける。

- ブレースは、軸部、軸部と塑性化部位の接合部、塑性化部位を含む不均等断面を有しており、軸方向弾性剛性の算出が複雑なため、図 10 に示す引張試験結果より、軸方向弾性剛性及び降伏耐力を求める。
- ブレースに、引張試験結果を基とした完全弾塑性型モデルを用いる。
- 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を溶接接合されており、柱の曲げ剛性が簡単に計算できないため、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。
- ブレースを Z 型に配置し、正方向変位に抵抗するように設置している。そのため、水平弾性剛性は、正方向

に変位が増分する場合は架構とブレースの値の和を、負方向に変位が増分する場合は架構のみの値とする。図 11 に N 型試験体の結果を示す。

3.2 変位の収束性

図 12(a)に、ブレースなしの架構と NC ブレースのみの復元力特性を、図 12(b)に、Z 型 NC ブレース架構の復元力特性を、それぞれ示す。

図 12(a)には、簡単化のため、NC ブレースの抵抗を弾性範囲と弾塑性範囲とに分ける。図 12(a)より、図中の AB 範囲の弾性荷重であれば、NC ブレース架構の剛性に変化がないため、それ以上、負方向に傾かない。つまり、地震時に弾性範囲での最大荷重が分かれば、変位が収束する位置が分かる。また、ある程度傾くと、一定の荷重に対してもブレース軸力が増大するため、ブレースが降伏するようになる。そのため、弾塑性荷重に対して、CD 範囲の荷重であれば、CD 範囲を基点とする復元力特性になる。

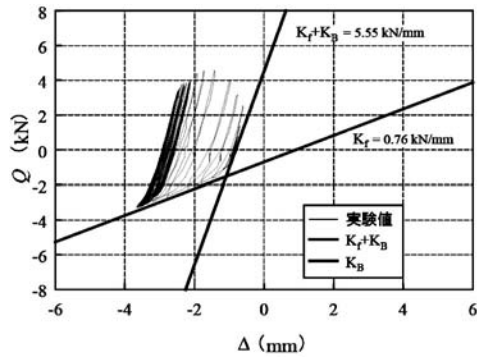
以上のことより、Z 型 NC ブレース架構は、一方方向に傾くと同時に、変位がある値で収束することが分かる。

4. 数値解析

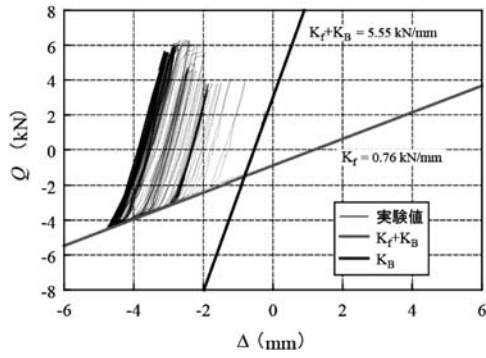
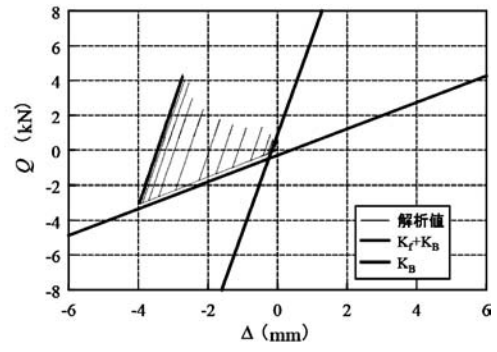
図 13 に、数値解析に用いる解析モデルを示す。表 3 に、解析に用いる入力データを示す。

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)」⁸⁾に、図 7 に示す NC ブレースの復元力特性を利用できるように修正したものを用いる。

数値積分には、Newmark の β 法を使用しており、 β 値



(a) NC型試験体弾性加振



(b) NC型試験体弾塑性加振

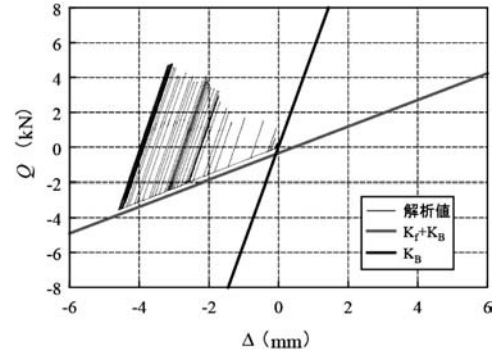
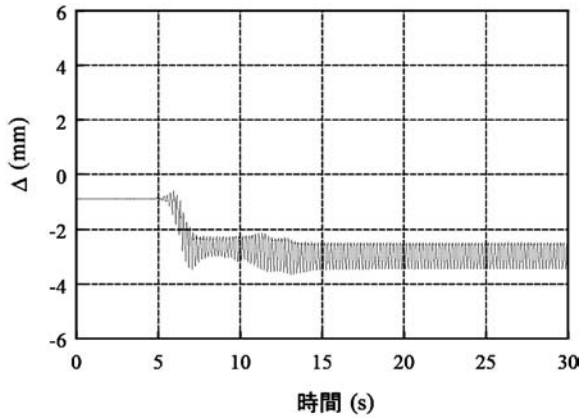
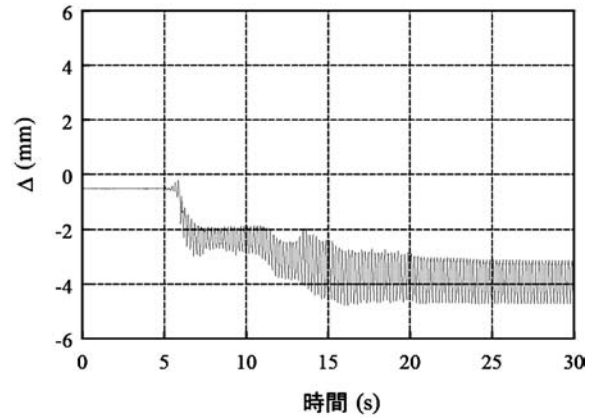


図15 Q-Δ関係

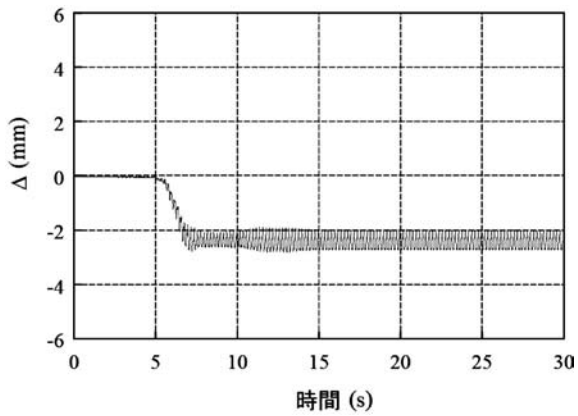


(a) NC型試験体弾性加振

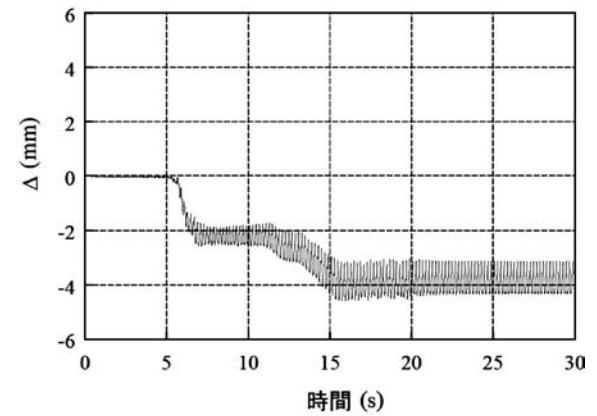


(b) NC型試験体弾塑性加振

図16 層間変位時刻歴



(a) 従来型試験体弾性加振



(b) NC型試験体弾塑性加振

図17 層間変位時刻歴 (解析結果)

を1/4（平均加速度法）、時間刻みを1/1000としている。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。また、柱は、高さを調整することで、加振実験より求めた水平剛性と等しくなるような剛比にしている。減衰定数は0.01とする。

柱および梁には、表2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、ブレースには、軸方向剛性、引張降伏軸力を、それぞれ、入力する。NC型試験体のブレースには、図7のNCブレースの復元力特性を入力する。入力波形には、振動台実験の入力波形を使用した。

図14に、振動台実験及び数値解析に使用した入力波形を示す。

5. 実験結果と解析結果

図15に実験結果及び解析結果の層せん断力、 Q -層間変位、 Δ の関係を、図16には層間変位時刻歴の結果を、図17にはNC型試験体の層間変位時刻歴の解析結果を、それぞれ、示す。図15には、架構のみの振動台実験およびブレースの引張試験の結果より算出したブレース架構の剛性(K_f+K_b)と架構のみの剛性 K_f を併せて示している。表4には、各試験体の算定値と実験結果を示す。

実験結果より、以下のことが分かる。

○層せん断力-層間変位関係

図15(a)、(b)より、NCブレース架構の弾性加振実験および弾塑性加振実験のいずれにおいても、層間変位が初期位置より負方向に漸増している。そのため、弾性および弾塑性に関係なく、変位の方向が一方に進む性能を示していることが分かる。NCブレースは、いずれの場合においても、負方向から正方向に変位が増分する際に端部に設置している楔が貫入して抵抗を開始するためである。弾塑性加振実験においても、同様の性能を得られる。ただし、入力エネルギー量が大きく、弾性加振実験よりも、変位量が大きくなる。

○層間変位時刻歴

図16(a)、(b)より、NC型試験体は、加振直後では、初期位置より正方向側に層間変位が生じているが、その後、NCブレースにより、負方向へ徐々に変位しているのが分かる。

従って、NCブレースをZ型配置したNC型試験体での期待した性能（変位が一方に漸増する性能）を確認でき、変位方向を制御することが可能である。

○傾く変位量の収束

図16(a)より、NC型試験体は、弾性加振実験の7秒付近より傾く変位量が減少し、13秒付近で負方向の最大変

位に達し、それ以降は層間変位がそれ以上負方向に傾かないことが分かる。また、図16(b)より、弾塑性加振実験でも同じく、7秒付近より傾く変位量が減少し、15秒以後では、ほぼ傾く変位量が0となっていることが分かる。

図17より、NC型試験体は、解析においても、実験と同様の挙動を示し、弾性加振および弾塑性加振ともに、傾く変位量が減少・収束していることが分かる。

以上のことから、傾く変位量は、荷重の大きさによって決定し、構造物が受ける最大荷重以降は、傾かない。そのため、地震時の応答が分かれば、変形が収束する値が分かる。

6. まとめ

ノンコンプレッションブレース（NCブレース）をZ型に配置した試験体の振動台加振実験を行った。得られた知見は、以下のように要約できる。

- 1) 弾性および弾塑性の加振に対して、構造物を一方に変位させる性能を有する。
- 2) NCブレースにより層間変位が一方に傾くと同時に、次第に傾く変位量が減少し、最終的に収束する。
- 3) 地震時の応答値が分かれば、Z型NCブレース架構の変形が収束する値を特定できる。
- 4) NCブレースをZ型配置することで、変形方向が制御できる。

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。ここに、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 玉井宏章、高松隆夫、小持明宏：ノンコンプレッションブレースの復元力特性に関する実験的研究、その1. Z型鉄骨ブレースの場合、日本建築学会中国支部研究発表会、第26巻、pp. 237-240, 2003. 3.
- 2) 小持明宏、高松隆夫、玉井宏章：ノンコンプレッションブレースの復元力特性に関する実験的研究、その2. X型鉄骨ブレースの場合、日本建築学会中国支部研究発表会、第26巻、pp. 241-244, 2003. 3.
- 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、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, 2005. 9.

- 5) 加藤孝昌, 高松隆夫, 玉井宏章, 小畑寛行: エネルギーの釣合いに基づくノンコンプレッションブレース付き鋼構造骨組の耐震設計法, 日本建築学会中国支部研究発表会, 第30巻, pp. 53-56, 2007. 3.
- 6) 高松隆夫, 玉井宏章, 岡部政和: ノンコンプレッションブレース付鋼構造骨組の地震応答性状に関する振動台実験, 日本建築学会構造工学論文集, Vol. 54B, pp. 707-714, 2008. 3.
- 7) 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, pp. 611-618, 2008. 11.
- 8) 小川厚治, 多田元英: 柱・はり接合部変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, 第17回情報・システム・利用技術シンポジウム論文集, pp.79-84, 1994. 12.
- 9) 柴田明德: 最新建築学シリーズ-最新耐震構造解析第2版-, 森北出版株式会社, pp.16-54, 2007. 6.

