

ノンコンプレッションブレースによる耐震補強工法に関する実験的研究

高松 隆夫*・玉井 宏章*・加藤 孝昌**

(平成19年10月31日受理)

Experimental Study on Rehabilitation Technique by Means of Non-compression Brace

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Takamasa KATO

(Received Oct. 31, 2007)

Abstract

In this paper, horizontal loading tests on rigid frames with non-compression braces attached by high-strength bolts were carried out in order to examine the applicability of the braces to rehabilitation of existing structures. The initial rigidity and the strength of the frames with the braces increased and the cyclic characteristics of the frames showed spindle-shaped. The following conclusions were drawn from the experimental results. 1) No buckling phenomenon happens. 2) No slip phenomenon due to plastic deformation of the brace happens. 3) The restoring force characteristics show spindle-shaped curves.

Key Words: rehabilitation technique, existing structure, non-compression brace, cyclic loading test

1. はじめに

従来型ブレースでは、ブレースが塑性伸びをすることにより、スリップ現象が生じる。また、圧縮力を受けると座屈が発生し¹⁾、周辺部材への接触による2次被害が発生する可能性がある。このような背景のもと、著者等は、ブレース材端部に楔デバイスを用いることで、スリップ現象と座屈現象を改善できる、ノンコンプレッションブレースを提案している^{2~4)}。

しかしながら、既存構造物に適用する場合において、未だ、簡便な工法が確立していない。一般的な構造物においては、ガセットプレートが既に溶接接合してあるが、これまでに提案しているブレース接合方法では、このような接合形式に対応していない。場合によっては、既設のガセットプレートを除去する必要もある。

そこで、本論文では、従来型ブレースのガセットプレートを利用して、簡便に既存構造物にノンコンプレッションブ

レースを適用する工法を提案する。また、載荷実験を行い、耐震補強工法として用いることが可能であることを実証する。

ブレースには、既設の構造物に多く用いられている平鋼材、あるいは、著者等がこれまで用いてきた転造ねじボルトを使用する。また、ノンコンプレッションブレースによる降伏層せん断力、弾性剛性、および、保有する全エネルギー吸収量の評価式を示し、実験結果と比較検討を行う。

2. 実験

本実験では、ガセットプレートに各ブレースを高力ボルト接合した、門型ラーメン架構の載荷実験を行う。実験変数は、ブレース材の種類、および、楔デバイスの有無とする。尚、柱および梁は終始弾性範囲に留まり、ブレースのみが塑性化する。

2.1 試験体

表1に、試験体の素材特性と主要寸法を示す。また、図

* 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研究科建設工学専攻

表1 素材特性

材種	E (kN/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	σ_y/σ_u (%)	ϵ_{st} (%)	主要寸法 (mm)	
ブレース: Type R - NS	SNR400	205	324	413	78.5	20.1	$\phi_g = 10.8, A_g = 91.6$ (mm ²)
ブレース: Type R - G	SNR400	205	303	427	71.0	20.8	$\phi_g = 10.8, A_g = 91.6$ (mm ²)
ブレース: Type F	SS400	205	258	381	67.7	18.1	PL-20x4.5, A = 90 (mm ²)
柱 ウェブ	SS400	205	303	382	79.3	25.1	H-100x100x6x8
フランジ	SS400	205	306	433	70.7	21.8	
梁 ウェブ	SS400	205	281	396	71.0	26.2	H-150x75x5x7
フランジ	SS400	205	274	388	70.6	25.5	

E : ヤング係数
 σ_y : 降伏応力度
 σ_u : 引張強さ
 ϵ_{st} : ひずみ硬化開始ひずみ度
 ϕ_g : 軸部径
 A_g : 軸部断面積

表2 バネ特性

外径 (mm)	バネ径 (mm)	自由長さ (mm)	最大たわみ (mm)	最大荷重 (N)	バネ定数 (N/mm)
30.0	2.50	150	320.0	110	0.65

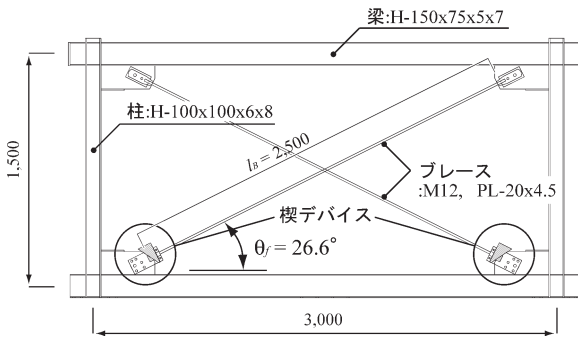


図1 ラーメン架構とブレース設置状態

1, 図2に, ラーメン架構およびブレースの形状を示す。
 試験体は, ブレースに丸鋼(Type R)および平鋼(Type F)を用い, ノンコンプレッションブレース(NC)とした場合と従来型ブレース(G)とした場合の, 合計4体の試験体を用意した。

ラーメン架構の柱にはH-100x100x6x8を, 梁にはH-150x75x5x7を使用し, 柱通し型としてそれぞれ強軸方向に完全溶け込み溶接接合している。また, ラーメン架構の隅角部にはブレース設置用のガセットプレート: PL-350x150x9を全周隅肉溶接接合している。

ブレースは, Type R-NCには転造ねじ付丸鋼ブレース:M12を, Type R-Gにはターンバックル付丸鋼ブレース:M12を, Type F-NCおよびType F-Gには平鋼ブレース: PL-20x4.5を使用する。また, Type R-NC, Type R-G, Type F-NCにおいては, 降伏軸力の50%を初期張力として与えている。Type R-NC, Type R-Gでは, ナットおよびターンバックルを締付けて初期張力を導入, Type F-NSでは, 予備載荷を行い, 予め, 楔を貫入させて初期張力を導入している。尚, 転造ねじ付き丸鋼ブレース, および, ターンバックル付丸鋼ブレースは, 軸部の十分な塑性伸び能力が確保できるものを使用している。また, 平鋼ブレースは, 接合ボルト孔による断面欠損が原因の早期破断を防ぐための羽子板: PL-12を隅肉溶接接合しており, 軸部の十分な塑性伸び能力が期待できる。

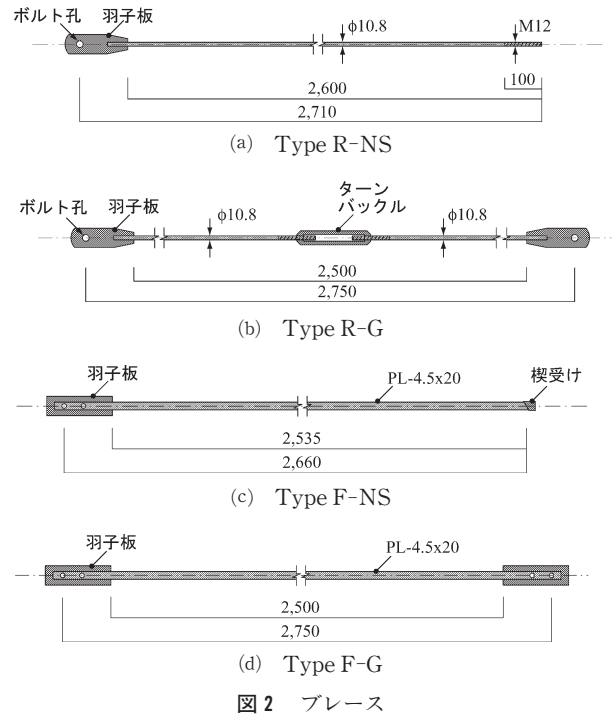


図2 ブレース

2.2 ノンコンプレッションブレース

図3, 4, 5に, 楔デバイス形状, 楔デバイス設置方法, 楔デバイス機能・概念図を示す。また, 本実験では, 既設のガセットプレートを利用して, 楔デバイスを設置するため, 図3(c)に示すような接合部を用いて, 図4に示すように楔デバイスを設置する。

楔デバイスは, 楔, 楔受け, バネから構成されている。また, 表2に, 楔を貫入させるバネの特性を示す。ブレースはX型に配置し, ブレース下端部に楔デバイスを設置する。

従来型のブレース付ラーメン架構においては, 地震外力により, 図5のようにラーメン架構が変形すると, 左側のブレース(ブレースL)は伸び変形を起こし, 一方, 右側のブレース(ブレースR)は縮み変形を生じる。そのため, ブレースLは弾塑性伸びを生じてスリップ現象の原因となり, ブレースRは座屈を生じる。

ノンコンプレッションブレースにおいては, ブレースLは引張抵抗するが, ブレースRでは端部が移動して圧縮力は作用しない。また, 端部が移動することにより生じた間隙に, 楔デバイスが貫入して間隙を埋める。そのため, 圧縮

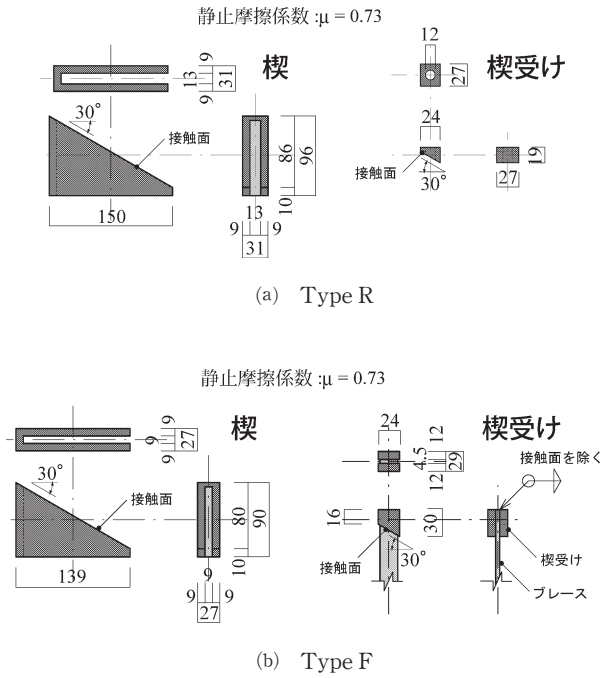


図3 楔デバイス

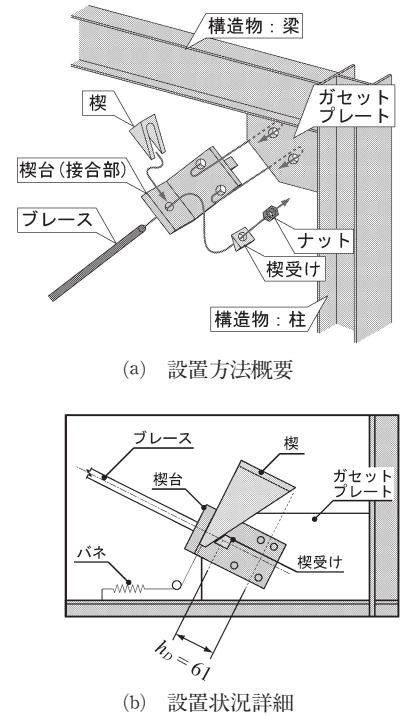


図4 楔デバイス設置方法

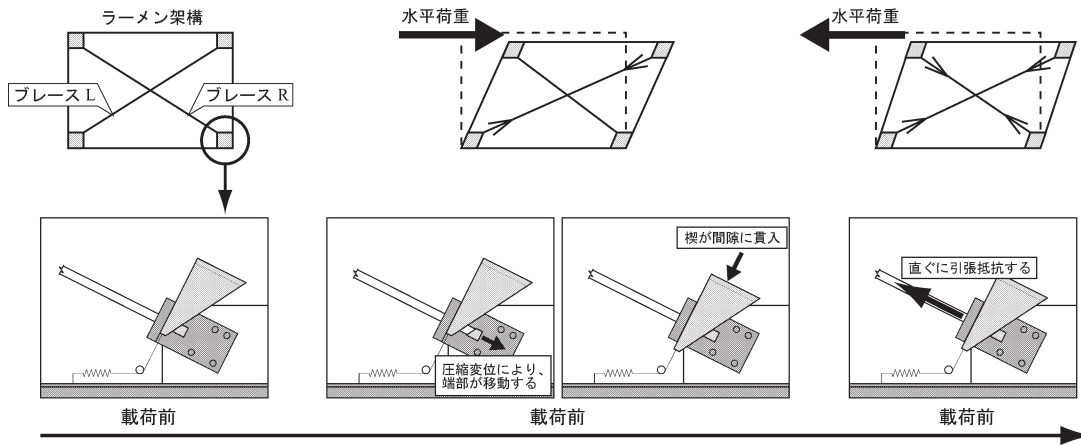


図5 楔デバイスの機能と作動概念

力は作用せず、更に、いかなる変形下においても伸び変形が生じると直ぐに引張抵抗を開始する。

2.3 载荷装置と载荷方法

図6に本実験で使用する载荷装置を示す。ラーメン架構柱頭部に、油圧ジャッキをピンを介して接合し、水平载荷を行う。载荷は、層間変形角を制御値として、1/1000, 1/500, 1/250, 1/200, 1/125と漸増させて各2サイクル行い、楔が貫入限界を迎えた時点で、実験を終了している。

2.4 計測方法

図7に計測位置を示す。変位計測としては、柱頭部の水平変位： δ を計測して、層間変形角を算出している。荷重計測としては、ジャッキ先

端に設置したロードセルより、水平荷重： P を計測している。ひずみゲージは、柱の4断面（1断面あたり4枚）に貼付しており、ラーメン架構の負担する層せん断力を算出している。

3. 各種評価式

ブレースの評価式を算出するに当たり、図8に示すモデルを用いる。ブレースのみの履歴を算出するため、モデルでは、柱梁架構をピン接点として、水平外力に対してはブレースのみが抵抗するものとしている。

各式の誘導にあたり、以下の仮定を設ける。

- i) ブレースの有効長さは柱と梁の軸線の交点間距離とし、ブレースの断面性能はブレース軸部のものとする。

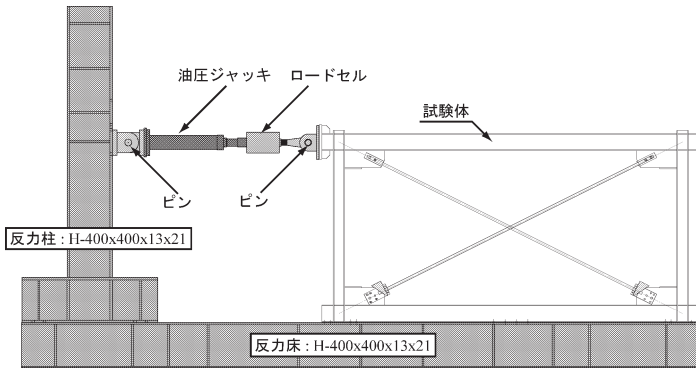


図6 荷装置

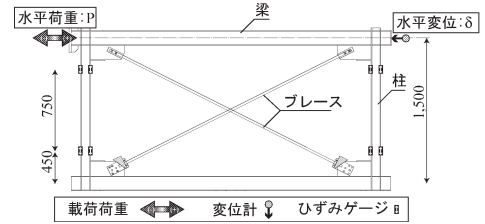


図7 計測位置

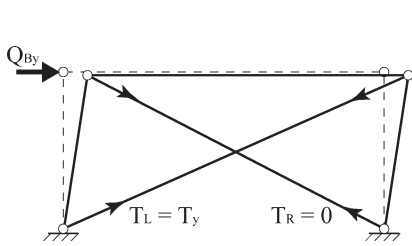


図8 解析モデル

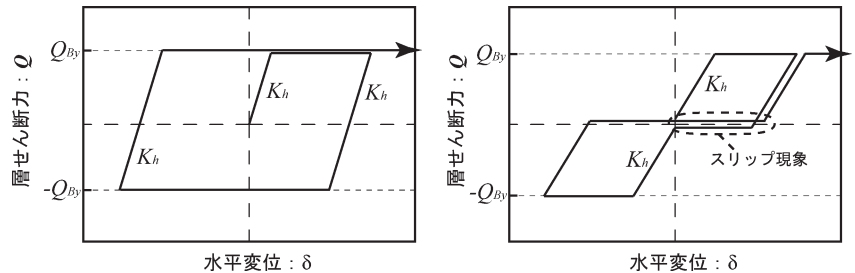


図9 復元力特性モデル

- ii) 弾性剛性は、従来型ブレース(G)ではブレース1本分の弾性剛性、ノンコンプレッションブレース(NS)ではブレース2本分の弾性剛性が得られるものとする。
- iii) ブレースの素材特性には、完全弾塑性型モデルを用いる。
- iv) ノンコンプレッションブレースでは端部が移動して圧縮力が作用せず、従来型ブレースでは曲げ座屈を起こして圧縮力に抵抗しないため、いずれのブレースも引張力だけに抵抗するものとする。

3.1 降伏耐力および弾性剛性

以上の仮定を用いて、ブレースの降伏層せん断力： Q_{By} は、次式により求められる。

$$Q_{By} = A_B \cdot \sigma_y \cdot \cos \theta_f \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 A_B ：ブレース軸部断面積、 σ_y ：ブレース材の降伏応力度、 θ_f ：ブレースの水平面からの角度(図1参照)である。

また、ブレースの水平剛性： K_h は、次式のように表される。

$$K_h = n \cdot E \cdot A_B \cdot \cos^2 \theta_f / l_b \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 E ：ヤング係数、 l_b ：ブレースの有効長さ(鉄骨架構の柱梁接合部対角距離=3,350 mm)、 n ：抵抗するブレースの本数であり仮定ii)より、NSでは2、Gでは1である。

3.2 復元力特性モデル

各ブレースの復元力特性モデルを図9に示す。

ブレースの復元力特性モデルの降伏耐力および弾性剛性は式(1)、(2)より求める。また、ノンコンプレッションブレースでは完全弾塑性型の復元力特性モデル、従来型ではスリップ型の復元力特性モデルとする。

3.4 ブレースの保有する全エネルギー吸収量

次いで、ブレースの保有する全エネルギー吸収量は、ノンコンプレッションブレースの場合、楔の貫入限界高さ： h により決定し、従来型ブレースの場合、最大層間変形角により決定する。

ノンコンプレッションブレースが保有する全エネルギー吸収量： E_{NC} 、および、従来型ブレースが保有する全エネルギー吸収量： E_G は次式により求められる。

$$E_{NC} = n_E \cdot h \cdot A_B \cdot \sigma_y \quad \dots \dots \dots (3.a)$$

$$E_G = n_E \cdot \Delta_{Bmax} \cdot A_B \cdot \sigma_y \quad \dots \dots \dots (3.b)$$

ここに、 n_E ：配置されているブレースの本数、 h ：楔の貫入限界高さ(図4参照)、 Δ_{Bmax} ：最大変形時の柱梁対角距離の増加量である。

4. 実験結果と考察

図10、図11、図12、表3に実験結果を示す。

図10には、水平荷重-水平変位関係を、図11には、ブレース負担層せん断力-水平変位関係を、図12にはエネルギー

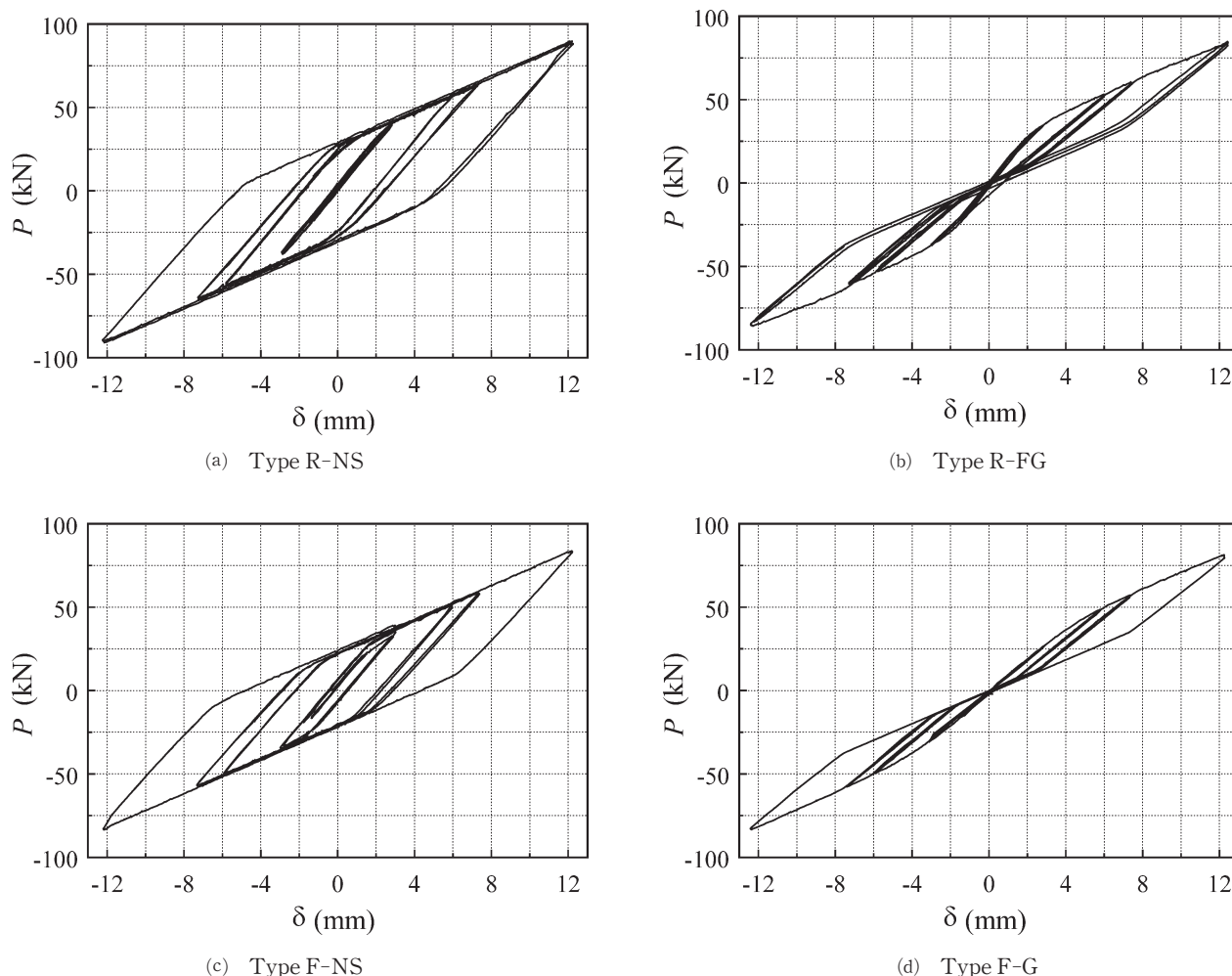


図 10 水平荷重－水平変位関係

ギー吸収量－水平変位関係を示す。ブレース負担層せん断力は、水平荷重から、ラーメン架構が負担する層せん断力を差し引いて算出している。また、エネルギー吸収量は、図 10 の復元力特性の履歴面積を積分して算出している。尚、図 11 には式 (1), (2) から求めた復元力特性モデルを、図 12 には、式 (3.a), (3.b) から求めたブレースが保有する全エネルギー吸収量を併せて示す。

表 3 には、図 11 から求めた実験値降伏耐力および弾性剛性、図 12 から求めた実験終了時の実験値エネルギー吸収量、および、式 (1), (2), (3.a), (3.b) から求めた、各種計算値を示す。

4.1 水平荷重－水平変位関係

図 10 (a), (c) より、Type R-NC および Type F-NC は、Bi-linear 型の復元力特性を示し、エネルギー吸収効率が良いことが分かる。また、Type R-NC および Type F-NC においては、常に、一定の弾性剛性が保たれていることが分かる。

図 10 (b), (d) より、Type R-G および Type F-G は、いずれも、スリップ型の復元力特性を示していることが分かる。これは、本実験で使用したブレースは細長比：120 を超

過しているため、曲げ座屈を起こし、圧縮力に抵抗しなかったこと、ブレースに塑性伸びによる緩みが生じたことによる影響である。また、Type R-G では、ターンバックルにより初期張力を加えていたので、初期の弾性剛性は、ブレース降伏後の剛性と比較して、高め値となっている。

4.2 ブレース負担層せん断力－水平変位関係

いずれの試験体においても、復元力特性モデルと実験結果は良好に対応している。

図 11 (a), (c) より、Type R-NC および Type F-NC は、ブレースの履歴が完全弾塑性型を示し、更に、弾性剛性はほぼ全てブレース 2 本分の弾性剛性を示している。ブレース 2 本分の弾性剛性が得られるのは、初期弾性の弾性載荷時の場合は、初期張力を加えている影響で左右のブレースが抵抗し、ブレース降伏後においては、一方は除荷剛性で抵抗し、他方は載荷剛性で抵抗するためである。

図 11 (b), (d) より、Type R-G および Type F-G は、スリップ型となり、1 本分の弾性剛性を示している。尚、Type R-G では、ターンバックルにより初期張力を加えていたので、初期の弾性剛性は、ブレース 2 本分の弾性剛性を示し

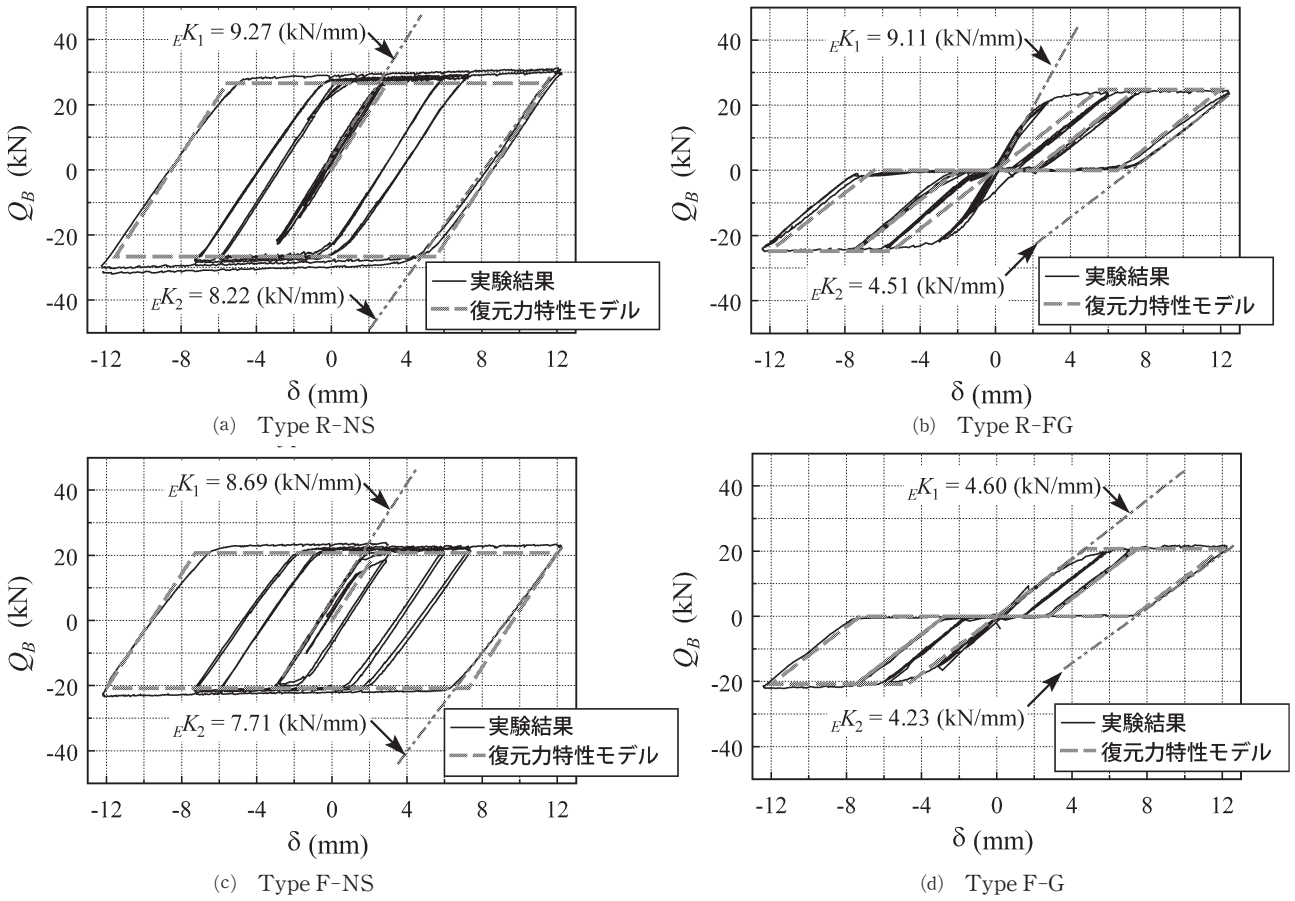


図 11 プレース負担層せん断力-水平変位関係

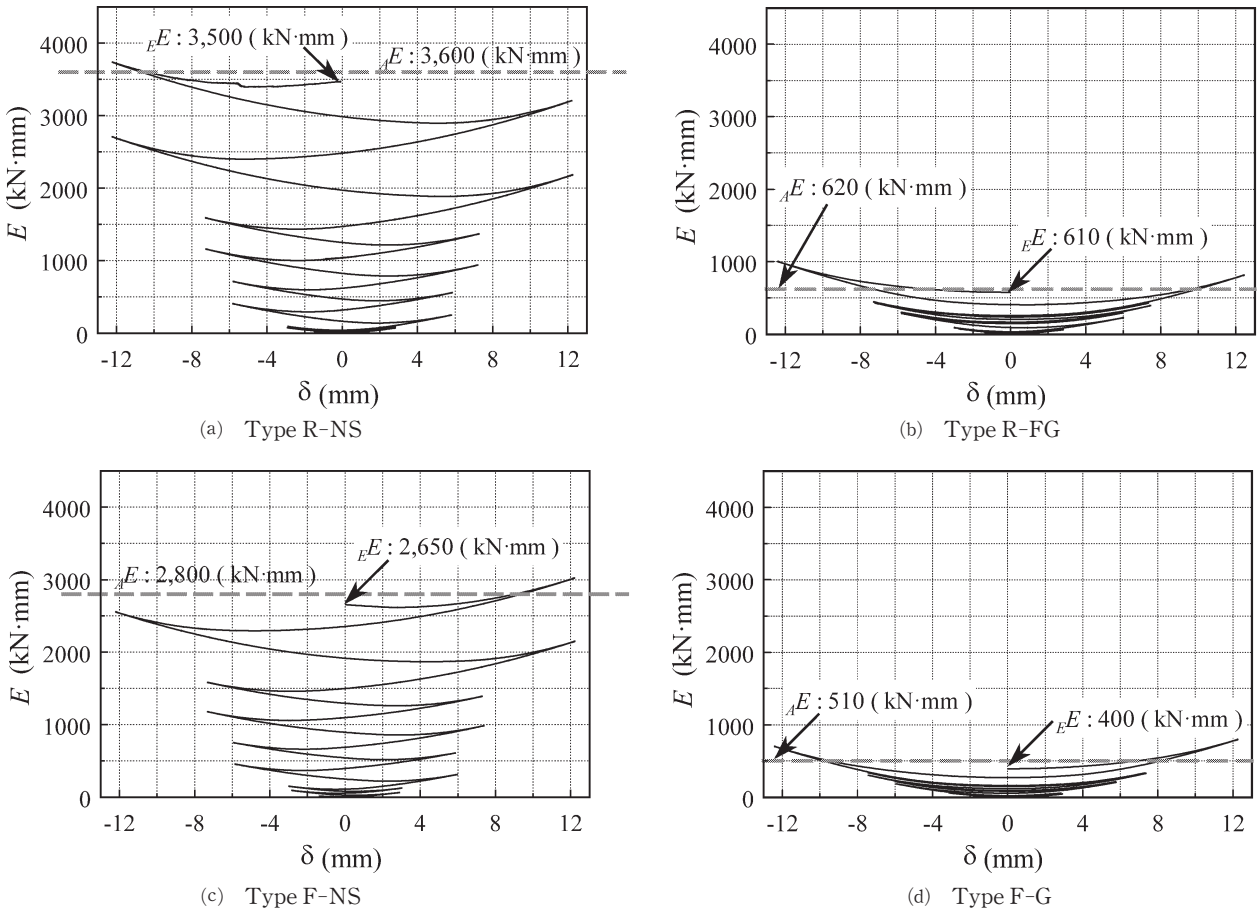


図 12 エネルギー吸収量-水平変位関係

表3 実験結果と計算値

試験体名称	実験値			計算値			実験値 / 計算値		$E Q_{By}$: 実験降伏せん断力
	$E Q_y$ kN	$E K_1$ kN/mm	$E E$ kN mm	$A Q_y$ kN	$A K$ kN/mm	$A E$ kN mm	$E Q_y / A Q_y$	$E K / A K$	
Type R - NC	27.2	9.27	3,500	26.6	8.96	3,600	1.02	1.03	$E E$: 実験エネルギー吸収量
Type R - G	23.3	9.11	610	24.8	4.48	620	0.94	2.03	$A Q_{By}$: 計算降伏せん断力
Type F - NC	20.1	8.69	2,650	20.8	8.78	2,800	0.97	0.99	$A K$: 計算弾性剛性
Type F - G	20.6	4.60	400	20.8	4.40	510	0.99	1.05	$A E$: 計算エネルギー吸収量

ている。

4.3 エネルギー吸収量－水平変位関係

図12(a), (c)より, Type R-NS および Type F-NS は, 常にエネルギーを吸収している。また, 式(3.a)より求めたエネルギー吸収量の計算値と実験終了時のエネルギー吸収量は, ほぼ, 一致しており, 式(3.a)により, 容易にノンコンプレッションブレースの保有する全エネルギー吸収量が評価できることが分かる。

図12(b), (d)より, Type R-G および Type F-G は, 一度, エネルギー吸収した区間では, エネルギー吸収をしていない。また, 式(3.b)により求めた, エネルギー吸収量の計算値と実験終了時のエネルギー吸収量はほぼ一致しており, 従来型ブレースのエネルギー吸収量は, ブレースの引張性能と最大変形量に依存することが分かる。尚, Type F-G の実験値が少し低めなのは, 初期張力を加えられなかったために, 初期不整等の影響により, 塑性伸び量が少ないためと考えられる。

4.4 実験値と計算値

表3から, 降伏耐力と弾性剛性の実験値と計算値の比は, 降伏耐力が0.94~1.02, 弾性剛性が0.99~2.03となっている。

但し, Type R-G の場合においては, 初期張力を加えているためにブレース2本分の弾性剛性となり, 計算値の2倍の弾性剛性値となった。

以上より, 本論文で示す, 既設のガセットプレートを利用した簡便なノンコンプレッションブレースの設置工法により, 紡錘型の復元力特性を示し, 効率の良いエネルギー吸収性能を示すことが分かる。また, 初期張力を導入することで, 安定した弾性剛性を得ることができるため, ノンコンプレッションブレースには, 丸鋼ブレースを用いる方が有利であると考えられる。

5. まとめ

既設のガセットプレートを利用した, ノンコンプレッションブレースによる耐震補強工法として, ブレース材および楔デバイスの有無を変数として実験を行った。得られた知

見を, 以下に示す。

1. 本論文で示す, 既設のガセットプレートを利用したノンコンプレッションブレース工法により, 紡錘型でエネルギー吸収効率のよい復元力特性を示した。
2. 丸鋼ブレース(転造ねじボルト)を用いることで, 初期張力を導入できるため, 常に一定の弾性剛性が得られる。
3. 本論文で示した, 各種評価式は, 実験結果と良好に対応している。
4. 楔デバイスの接合部は, 容易にガセットプレートにボルト接合でき, また, 楔デバイスの設置工法も非常に簡便であるため, 耐震補強工法として用いることができる。
5. 本実験で用いた試験体の最大層間変形角を1/125(rad)とした場合の繰返し載荷実験下においては, ノンコンプレッションブレースは従来型に比較して, 7倍のエネルギー吸収量を有している。

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。

また, 試験体作製にあたりフルサト工業株式会社には, 転造ねじアンカーボルト, 並びに, 転造ねじ付ブレースを提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 社団法人日本鋼構造協会, 他; 2000年鳥取県西部地震および2001年芸予地震鋼構造被害調査報告書[建築編], 社団法人 日本鋼構造協会, 2002.3.
- 2) 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, 2003.11.
- 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, pp.429-436. 2006.11.