

# セルフセンタリング柱梁接合部を用いた構造物の 残留変位に関する解析的研究

高松 隆夫\*・山西 央朗\*\*・玉井 宏章\*・弘永 佑太\*\*\*  
澤田 樹一郎\*\*\*\*・松尾 彰\*\*\*\*

(平成21年10月31日受理)

## Analytical study on residual deformation of steel structure with self-centering beam-to-column connection

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI, Yuuta HIRONAGA,  
Kiichirou SAWADA and Akira MATSUO

(Received Oct. 31, 2009)

### Abstract

An experimental study on self-centering beam-to-column connections was carried out, and in this paper earthquake response analysis of steel structures with the connections is conducted to verify reduction of residual story drift after an earthquake. Multi-stories and multi-spans steel buildings are selected and analytical results are discussed. It is concluded that the self-centering connections are more effective than the rigid ones.

**Key Words:** self-centering performance, wedge-device, numerical analysis,  
Beam-to-column connection

### 1. はじめに

現在の耐震設計は、主に保有水平耐力計算法を用いての設計が行われている。この場合、柱、梁の端部に塑性ヒンジを生成させて全体崩壊を起こすように各部材を設計することで、地震エネルギーを効率的に吸収するという利点を有している。しかしながら、地震後に残留変位が生じる可能性があり、地震後継続使用が困難になる<sup>1)</sup>。

著者等はこれまでに、アンカーボルト降伏先行型露出柱脚に楔デバイスを設置することで、原点立上り型復元力特性を示すノンスリップ型露出柱脚について研究を行い、復元力特性から、アンカーボルト塑性化後も外力が除去され

ると回転角が常に0に戻り残留変位を低減できる性能（以後、セルフセンタリング性能と記す）が得られることを示してきた<sup>2)</sup>。また、柱梁接合部の接合方法にエンドプレート形式を採用し、更に、楔デバイスを設置することで、エネルギー吸収すると共に残留変位の低減が期待できる柱梁接合部を提案している<sup>3)</sup>。

しかしながら、楔デバイス付接合部（ノンスリップ型露出柱脚、楔デバイス付きのエンドプレート形式柱梁接合部）が構造物全体の地震時変形挙動に与える影響は明らかになっていない。更に、側柱の柱梁接合部へ本工法を適用して実験は行っているが、中柱に適用した実験的な検討は行っていない。

\* 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

\*\*\* 広島工業大学工学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

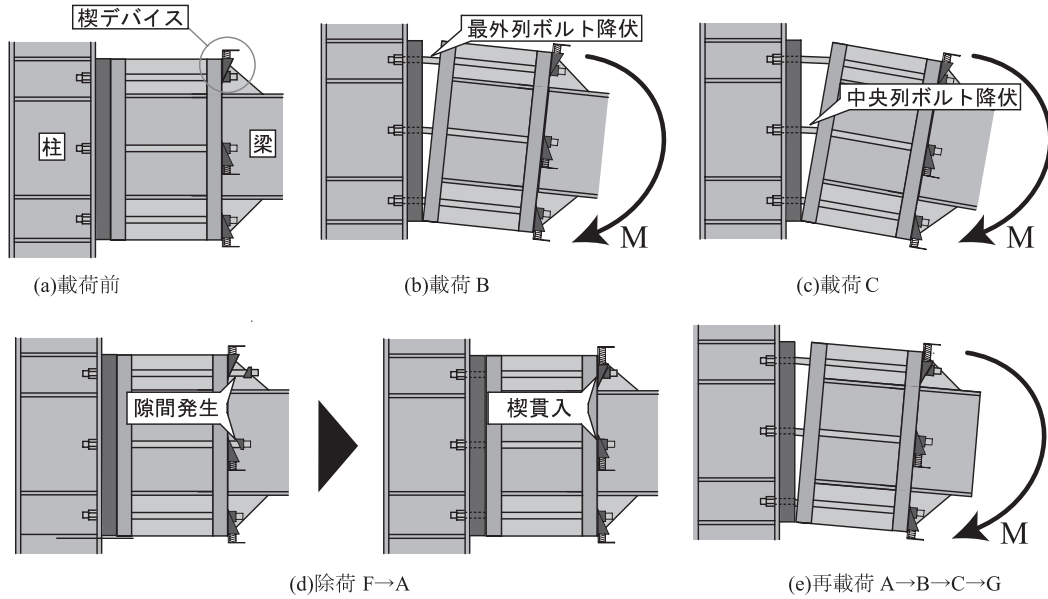


図1 楔デバイス付きのエンドプレート形式柱梁接合部作動概念

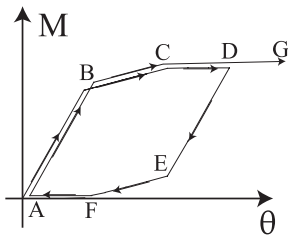


図2 セルフセンタリング柱梁接合部のM-θ関係

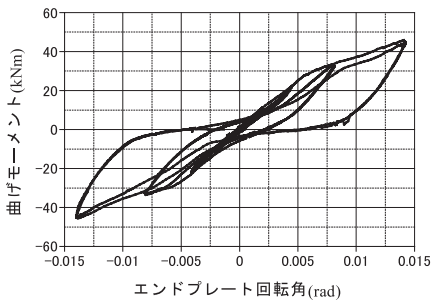


図4 曲げモーメント-エンドプレート回転角

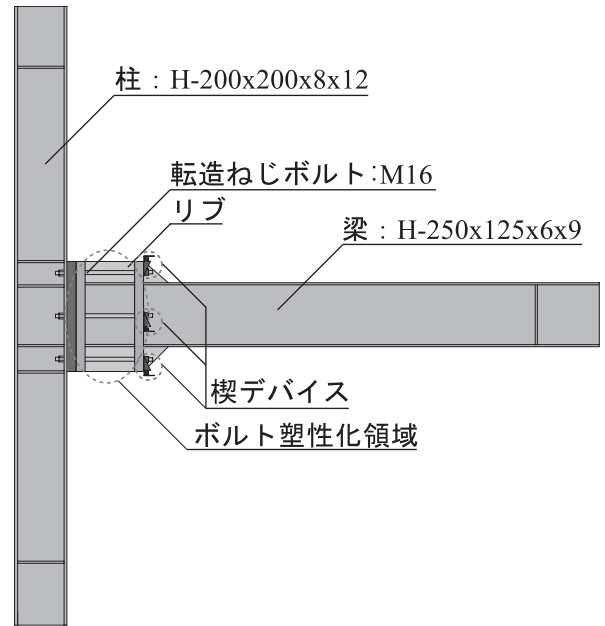


図3 試験体

そこで、本研究では、楔デバイス付接合部を有した多層多スパン鋼構造骨組の地震応答解析を行い、骨組の地震時挙動の特性を明らかにする。方法としては、まず、中柱の柱梁接合部における楔デバイス付接合部の適用工法、並びに実験的検討を行う。次いで、得られた復元力特性を有する回転ばねを各接合部に配置した解析を行う。更に、比較のため、柱梁を剛接合とした骨組の地震時応答解析結果も示し、楔デバイス付接合部を有する構造物の有効性を検証する。

## 2. セルフセンタリング柱梁接合部

### 2.1 作動概念

図1、図2は、楔デバイス付きのエンドプレート形式柱梁接合部の作動概念と、復元力特性を示している。楔デバイス付きのエンドプレート形式柱梁接合部に地震力が作用すると、まず最外列ボルトが降伏し、塑性伸びが生じる（図中のB→C）。更に、大きな荷重が作用すると、続いて中央列ボルトが降伏し、塑性伸びを生じる（図中のC→D）。

次いで、除荷によりエンドプレート回転角が0に戻る場

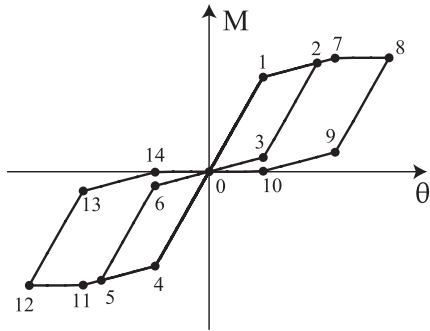


図5 柱梁接合部に使用する材端ばねの復元力特性

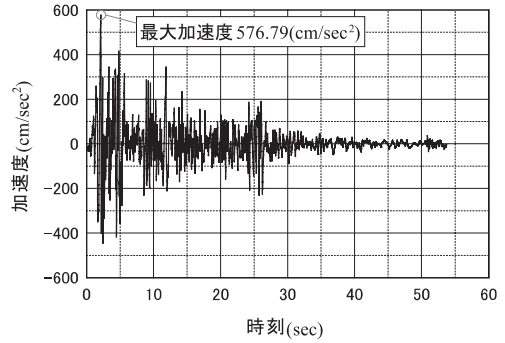


図6 エルセントロ NS 波加速度時刻歴

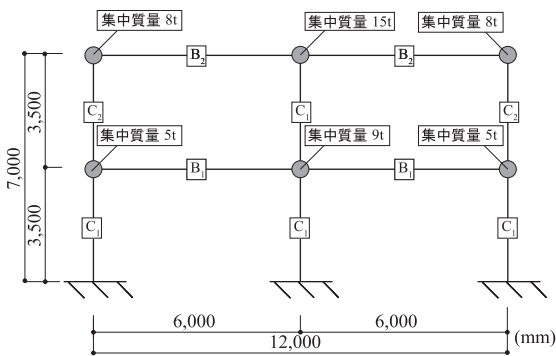


図7 2層2スパンラーメン構造骨組

表1 柱断面性能

	部材寸法	$I(\text{mm}^4)$	$Z_p(\text{mm}^3)$	$M_y(\text{kNm})$
$C_1$	H-300×300×10×15	$2.02 \times 10^8$	$1.48 \times 10^6$	317.25
$C_2$	H-250×250×9×14	$1.07 \times 10^8$	$9.53 \times 10^5$	202.10
$B_1$	H-396×199×7×11	$1.98 \times 10^8$	$1.11 \times 10^6$	234.77
$B_2$	H-346×174×6×9	$1.10 \times 10^8$	$7.12 \times 10^5$	149.93

表2 回転ばね特性

	$K(\text{mm}^4)$	$M_{by1}(\text{kNm})$	$M_{by2}(\text{kNm})$
柱脚部回転ばね	$2.40 \times 10^4$	198.16	84.93
1層梁接合部回転ばね	$4.49 \times 10^4$	148.40	57.17
2層梁接合部回転ばね	$3.43 \times 10^4$	92.60	37.87

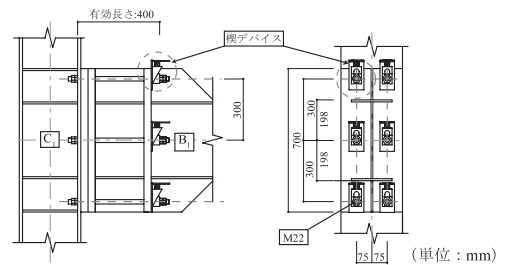


図8(a) 1層柱梁接合部寸法

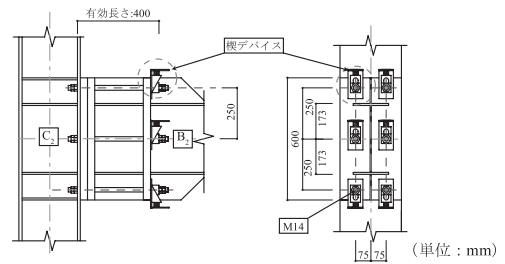


図8(b) 2層柱梁接合部寸法

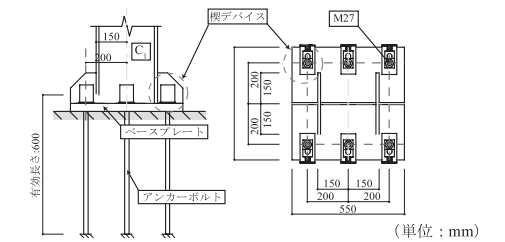


図8(c) 柱脚部寸法

合、ナットとエンドプレートとの間に間隙が発生するが、この間隙にばねの復元力により楔を貫入させることで間隙が消滅する(図中のE→F→A)。このため、再載荷時においても、変位増分に対して即座に地震外力に抵抗する(図中のA→B→C→G)。

## 2.2 中柱に楔デバイス付のエンドプレート形式柱梁接合部を適用した荷重の実験

楔デバイス付きのエンドプレート形式柱梁接合部を中柱に適用する実験を行うため、図3に示す試験体を用いて載荷実験を行う。試験体はト字型ではあるが、梁端部にボル

ト塑性化領域を設けており、中柱にも適用できる形状である。

## 2.3 実験結果

図4にエンドプレート回転角-曲げモーメント関係を示す。原点立上り型復元力特性を示すと共に、除荷時に僅かではあるが、原点を指向する復元力特性が得られる。尚、最終サイクルでは、中央列ボルトが塑性化したため、原点を指向する復元力特性が得られなかったが、除荷時に変形角を0にする過程でエネルギーを必要とするのではなく、残留変位が生じ難い復元力特性を有している。

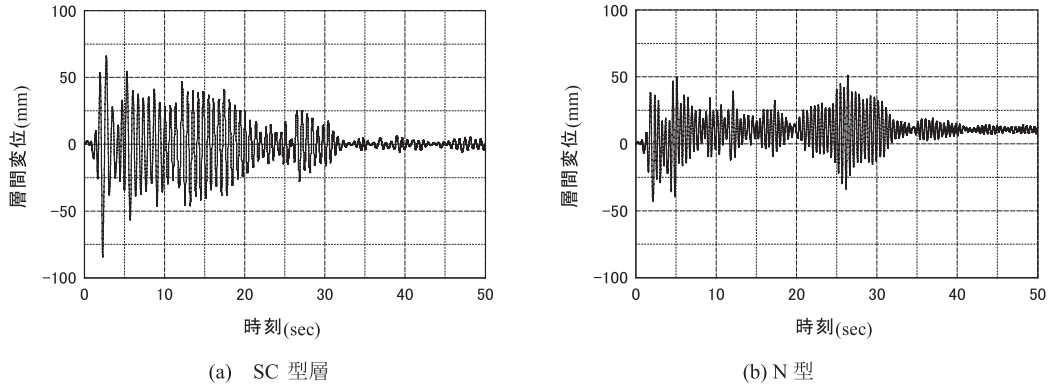


図9 第2層の層間変位時刻歴

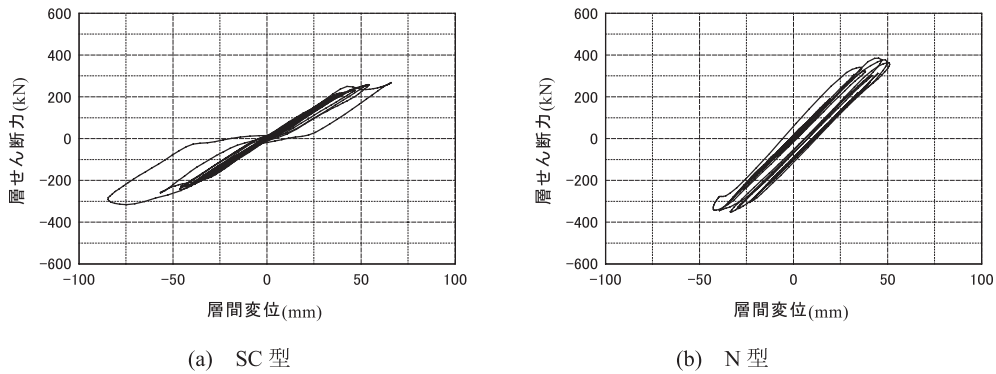


図10 第2層の層せん断力-層間変位

表3 各層残留・最大層間変位 (層間変形角)

	1層残留変位(mm)	1層最大層間変位(mm)	2層残留変位(mm)	2層最大層間変位(mm)
SC型	0.002 (5.71×10 <sup>7</sup> )	65.16 (0.019)	0.006 (1.71×10 <sup>6</sup> )	66.56 (0.019)
N型	11.708 (3.35×10 <sup>3</sup> )	38.75 (0.011)	10.659 (3.05×10 <sup>3</sup> )	51.22 (0.015)

( ) 内は、層間変形角である

## 2.4 楔デバイス付接合部の復元力特性モデル

図4<sup>1)</sup>より、本解析に使用する回転ばねの復元力特性モデルは図5のように設定した。漸増変位振幅に対して、0 → 1 → 2 → 3 → 4 → 5 → 6 → 0 → 1 → 7 → 8 → 9 → 10 → 0 → 4 → 11 → 12 → 13 → 14 → 0のように履歴をたどる<sup>1), 3)</sup>。

## 3. 地震応答解析

### 3.1 解析プログラム

地震応答解析には、「CLAP. f<sup>(4/5)</sup>」を楔デバイス付接合部の復元力特性を有する回転ばねが利用できるようにコード修正したものをを用いる。部材の塑性化は、一般化硬化ヒンジ法により考慮される。また、幾何学的非線形性が考慮されている。数値微分には、ニューマークβ法が用いられている。

### 3.2 解析条件

本解析例では、ニューマークβ法のβ値0.25、数値微分

時間間隔1/200秒、減衰のタイプは瞬間剛性比例減衰とし、一次減衰定数は、一般的な構造物を想定して0.02としている。また、部材の応力度-ひずみ度関係は、bi-linear型(降伏後剛性比1/50)としている。

### 3.3 入力地震動

平面骨組の構面内水平方向にエルセントロNS波を入力する。また、最大加速度が576.79 (cm/sec<sup>2</sup>)となるように、加速度記録に倍率を乗じて基準化した。入力時振動の加速度時刻歴を図6に示す。

### 3.4 解析骨組

解析骨組を図7に示す。鋼材の降伏強さは、235 (N/mm<sup>2</sup>)、ヤング係数は、2.05 × 10<sup>5</sup> (N/mm<sup>2</sup>)としている。表1の柱梁断面に対して、柱梁接合部および柱脚部に楔デバイス付接合部を想定した回転ばねを用いるSC型、柱梁接合部および柱脚部を剛接合とするN型の2パターンを設定する。

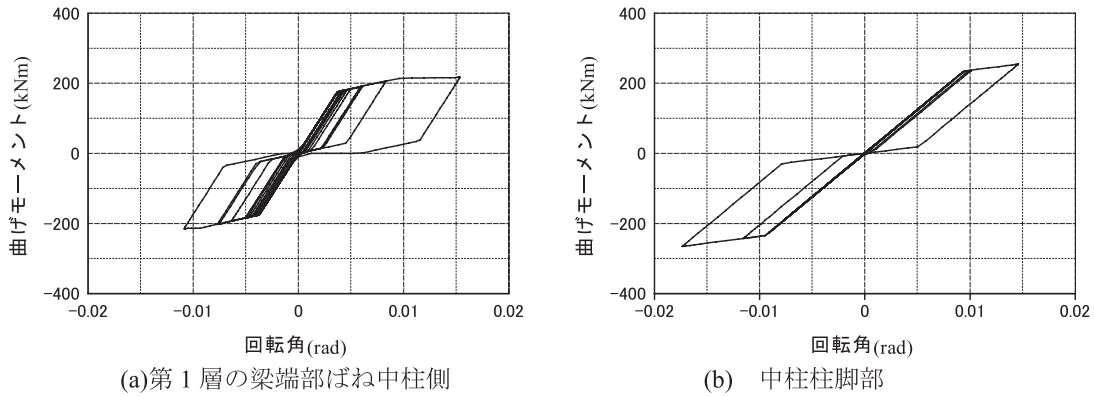


図 11 SC 型材端部 M-θ 関係

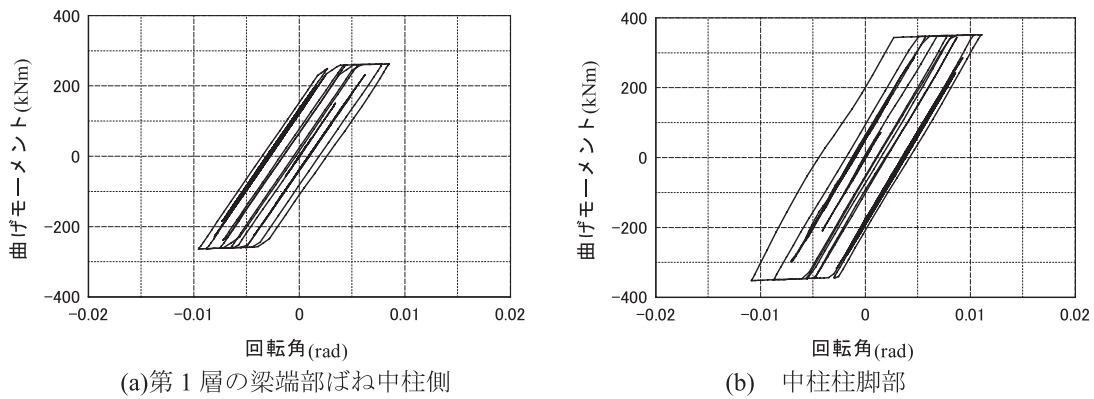


図 12 N 型材端部 M-θ 関係

また、SC 型で使用する回転ばねについては、柱梁を降伏させないために降伏比（接合部は梁に対する降伏比、柱脚は柱に対する降伏比）をそれぞれ 0.8 程度となるように図 8 (a), (b), (c) に示す柱脚、柱梁接合部寸法、並びに各ボルト径を算定した。柱脚・柱梁接合部の最外列ボルトの降伏曲げモーメント  $M_{by1}$ 、同じく中央列ボルトの降伏曲げモーメント  $M_{by2}$ 、弾性回転剛性は、次式より算定している。

$$M_{by1} = n \cdot A_t \cdot \sigma_y \cdot (d_t + d_c) \dots\dots\dots(1)$$

$$M_{by2} = n \cdot A_t \cdot \sigma_y \cdot d_c \dots\dots\dots(2)$$

$$K = \frac{n \cdot A_t \cdot E \cdot (d_t + d_c)^2}{2l_b} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、E: ヤング係数、n: 各列の引張ボルト本数、 $A_t$ : ボルト断面積、 $\sigma_y$ : ボルト降伏強さ、 $d_t$ : 部材断面図心から引張側ボルト軍図心までの距離、 $d_c$ : 部材断面図心から圧縮側フランジ外縁までの距離、 $l_b$ : ボルト有効長さ、K:  $K_{BS}$  並びに  $K_{EP}$  の初期剛性である。

#### 4. 地震応答解析結果

図 9 に第 2 層の層間変位時刻歴を示す。表 3 に各層の残

留変位と最大層間変形角を示す。ここでは、地震波入力後にせん断力が 0 となった時刻の層間変位を残留変位としている。SC 型ではおよそ 20sec までの振幅が大きくなっているが、N 型ではそれ以降の振幅が大きくなっていることがわかる。また、SC 型では、残留変位はほぼ 0 となっているが、最大層間変形角が N 型と比較して 1 層では約 1.7 倍、2 層では約 1.3 倍となっている。これは、剛接合よりも各接合部の弾性回転剛性や降伏曲げモーメントが低いためだと考えられる。図 10 に第 2 層目の層せん断力-層間変位を示す。SC 型では原点を指向する復元力特性を示しており、各接合部の性能により残留変位の生じ難い履歴（原点立上り型となり、また、除荷時に変位を 0 にする過程でエネルギーを必要としない性能）を有していることが分かる。図 11 は、SC 型の柱梁接合部及び柱脚回転ばねの曲げモーメント-回転角関係を示している。図 12 に示した N 型の 1 層梁端部の曲げモーメント-回転角関係と比較すると、いずれの回転ばねも弾塑性挙動を示しており、SC 型では原点立上り型、N 型では完全弾塑性型の復元力特性を示している。また、N 型に対して SC 型の弾性回転剛性及び降伏曲げモーメントは低目であるので、最大回転角は、いずれも SC 型の方が大き目となっている。尚、中柱と側柱については、履歴特性に大きな差異が見られなかった

め、中柱の結果を示している。

以上より、SC型では、N型と比べて耐力・剛性が低目になるため、構造物の最大変位及び各接合部での回転角は大き目となるが、残留変位が生じ難い履歴を有しているので、地震後残留変位がほぼ0になった。このため、楔デバイス付接合部がセルフセンタリング性能を有しており、構造物の残留変位低減へ効果があることを地震応答解析により明らかにした。

## 5. まとめ

本論文では、中柱に楔デバイス接合部を適用する工法、楔デバイス付接合部を有した多層多スパン鋼構造骨組の地震応答解析結果を示し、骨組の地震時の挙動の特徴（特にセルフセンタリング性能や梁の損傷状態）を明らかにした。本研究で得られた知見を以下に記す。

- (1) 本論文で示す工法により、中柱に楔デバイス付柱梁接合部を適用でき、期待通りの性能（セルフセンタリング性能）が得られる。
- (2) 多層多スパン鋼構造骨組全体の復元力特性にセルフセンタリング性能を付与することができる。
- (3) 最大層間変位は大きくなるが、残留変位を低減することができる。

## 謝 辞

本研究では、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, 山西央朗, 松尾彰: ノンスリップ型露出柱脚のセルフセンタリング性能に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp173-180, 2005.11
- 2) 高松隆夫, 玉井宏章, 小畑寛行, 松尾彰, 山西央朗: 転造ねじボルト接合されたH形鋼梁端接合部の復元力特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp597-598, 2006.9
- 3) 高松隆夫, 玉井宏章, 山石健司, 山西央朗: エンドプレート形式ト字型柱梁接合部のセルフセンタリング性能, 鋼構造年次論文報告書第16巻, pp237-244, 2008.11
- 4) 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, pp79-84, 1994.12
- 5) 多田元英: CLAP.f 利用説明書・解析方法説明書, 鋼材倶楽部