

# セルフセンタリング性能を有するト字型柱梁接合部に関する研究

高松 隆夫\*・玉井 宏章\*・山石 健司\*\*・山西 央朗\*\*\*

(平成19年10月31日受理)

## A Study on T-Shaped Beam-to-Column Connection with Self-Centering Performance

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Kenzi YAMAISHI and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 31, 2007)

### Abstract

In this paper, an experimental study on self-centering performance of T-shaped beam-to-column connections with/without ribs on the end plate subjected to cyclic loadings was carried out. The following conclusions were drawn from the experimental results.

- 1) The T-shaped beam-to-column connections with/without ribs show excellent self-centering performance.
- 2) The connection with ribs shows no-slip behavior because of improvement of the device moving into the gap between the nut and the end plate.

**Key Words:** beam-to-column, wedge device, self centering performance, end-plate connection with rib-plate

### 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、構造部材の端部に塑性ヒンジが生成され、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、地震後に残留変形が生じる可能性があり、地震後継続使用が困難になる。

著者等はこれまでに、柱脚部において、塑性化後も外力が除去されると回転角が常に0に戻り残留変形を低減できる性能(以後、セルフセンタリング性能と記す)を有した、ノンスリップ型露出柱脚を提案している<sup>1)</sup>。また、柱梁接合部の接合方法にエンドプレート方式を採用し、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形を低減が期待できる接合部を提案している<sup>2)</sup>。

しかし提案した柱梁接合部では、エンドプレートの面外曲げ変形の影響により、期待通りの性能が得られなかった。本論文では、エンドプレートをリブにより補強した試験体を用いての載荷実験を行い、これまでの実験結果と比較して、エンドプレートの面外曲げ変形を抑えることで、期待した性能が得られることを実証する。

### 2. 実験

試験体には、階高やスパン長を一般的なものの1/2となるものを使用する。また、セルフセンタリング性能(以降SC性能と記す)を実現するため、転造ねじボルト接合部の降伏耐力を梁の全塑性モーメントの約0.6倍とし、梁端部を弾性状態に留める。更に、エンドプレートにはリブを取り付け、エンドプレートの面外変形による楔デバイスの機能不全を回避する。本実験では、柱を強軸方向に使用し、以

\* 広島工業大学工学部建築工学科

\*\* 広島工業大学工学研究科建設工学専攻

\*\*\* 広島工業大学工学研究科知的機能科学専攻

表1 素材特性

	E	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$\sigma_y/\sigma_u$	$\varepsilon_u$
	(kN/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(%)	(%)
リブ補強なし	205	327	445	73.4	21.2
柱	205	310	422	71.0	24.1
転造ねじボルト	205	303	444	68.2	29.2
梁	205	310	422	73.5	24.0
柱	205	310	422	71.0	24.1
リブ補強あり	205	259	402	64.5	27.7
リブ	205	232	405	57.3	33.0
エンドプレート	205	232	405	57.3	33.0
転造ねじボルト	205	302	446	67.7	30.4

E:ヤング係数  $\sigma_y$ :降伏応力度  $\sigma_u$ :引張強さ  $\varepsilon_u$ :伸び率

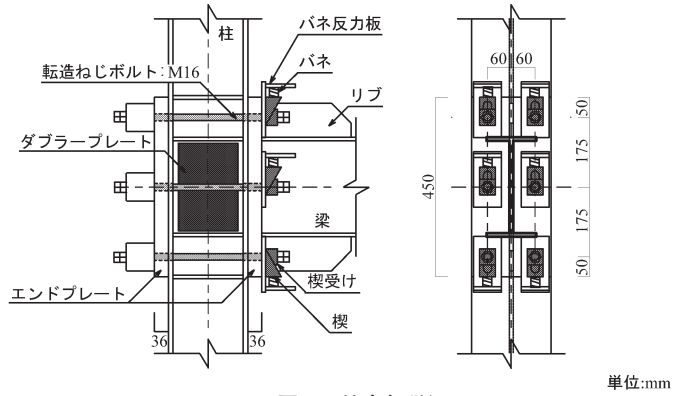


図2 接合部詳細

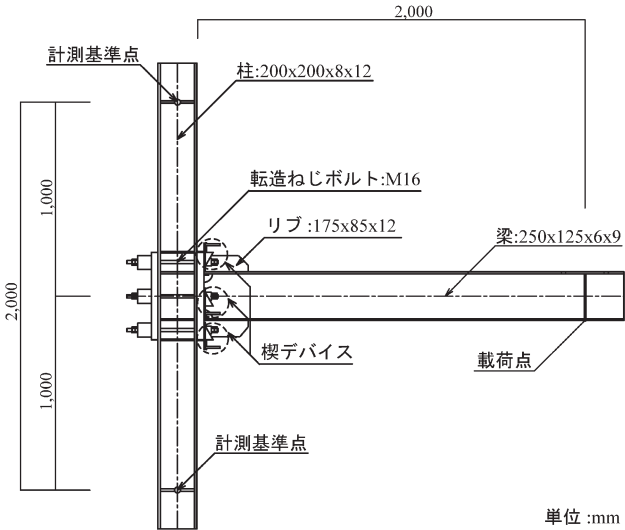


図1 試験体

上の条件を満たすH形鋼柱梁接合部T字型試験体を作製し、正負交番繰返し载荷を行う。

2.1 試験体

試験体の概要を図1に、接合部の詳細を図2に、転造ねじボルトの詳細を図3に示す。試験体は、外柱において反曲点位置から取出したT字型柱梁接合部を対象とする。接合部は、3列に2本ずつ、計6本の転造ねじボルトを用い、楔デバイスを介してダブルナットにより梁端エンドプレートを柱に接合する。また、柱フランジの面外変形を防止するため、梁端エンドプレートを接合する柱の反対側にも梁端エンドプレートと同じ形状のエンドプレートを溶接接合する。更に、接合部パネルが塑性化しないように、柱パネル部にはダブラープレートを溶接接合する。

梁にはH-250x125x6x9(SS400材)、柱にはH-200x200x8x12(SS400材)、エンドプレートにはPL-450x200x36(SS400材)、リブにはPL-175x85x12(SS400材)、転造ねじボルトにはM16(ABR400材)を使用した。それぞれの素材特性を表1に示す。

試験体は、リブをエンドプレートと梁に全周隅肉溶接接合した場合、リブを取り付けない場合の2種類用意し、また、転造ねじボルトに、軸部降伏張力の30%( $T_0=15kN$ )と

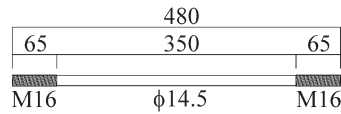


図3 転造ねじボルト

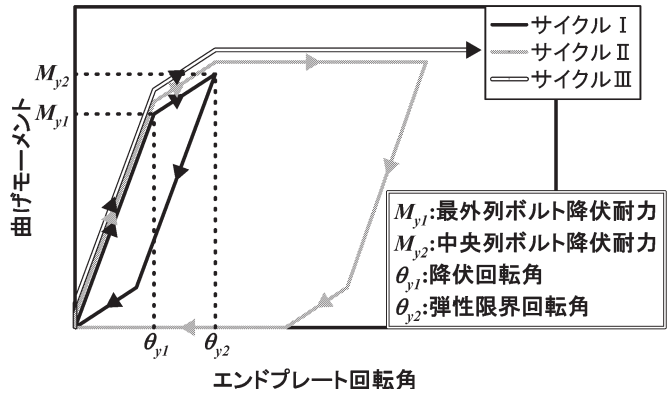


図4 履歴モデル

80%( $T_0=40kN$ )の初期張力を導入し、合計4体の試験体に正負交番繰返し载荷実験を行う。

2.2 接合部におけるSC性能の概要

図2に示すように、楔デバイスは、楔、楔受け、バネおよびバネ反力板から構成されている。設置方法は、楔と楔受けをナットとエンドプレートの間に設置し、バネを楔とバネの反力板との間に設置するのみである。

楔および楔受けは、転造ねじボルトから伝達される圧縮力の接触面方向分力に対して、接触面における摩擦力により抵抗し、滑らないようにしてある。このため、楔と楔受けの接触面には、発錆処理を施して、静止摩擦係数を増大させている(静止摩擦係数:0.88)。

接合部は、転造ねじボルト接合部の降伏耐力を、梁端部の降伏モーメント以下に設定しておけば、転造ねじボルトの塑性伸びによりエネルギー吸収を行い、梁端部は弾性状態を保持できる。また、ボルトの塑性伸びにより生じた隙間には、バネの復元力により楔が貫入するためスリップ現象は生じない。

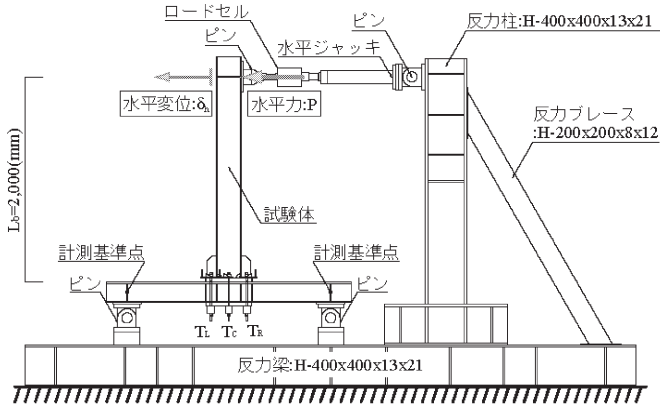


図5 荷装置

SC性能を有する柱梁接合部の履歴モデルを図4に示す。梁端部に曲げモーメントが作用すると最外列のボルトが降伏耐力に達し、更に、変形角が大きくなると中央ボルトが降伏耐力に達する。その時のエンドプレート回転角を接合部の弾性限界回転角： $\theta_{y2}$ とする。サイクルIのように弾性限界回転角以内の回転角であれば、除荷時に中央ボルトの弾性剛性により原点を指向とする復元力特性となり、SC性能が得られる。また、サイクルIIの初期では、最外列ボルトの塑性伸びによる間に楔が貫入し、再荷重直後からボルトが引張抵抗するため、スリップ現象は生じない。更に、サイクルIIのように弾性限界回転角以上の回転角が生じると中央ボルトに塑性伸びが生じるため、除荷時に剛性が0の状態では原点を指向する。しかしながら、サイクルIIIの初期では、中央ボルトに生じた塑性伸びによる間隙にも楔が貫入するため、再び荷重する時には常に原点から荷重が上昇する。

### 2.3 荷装置と荷方法

荷装置の概要を図5に示す。荷は、試験体を90°回転させ、反力柱に取り付けた水平ジャッキにより梁上端部に水平強制変位を加え正負交番繰返し荷を行う。また、梁の横座屈を防止するため、加力点近傍位置の構面外たわみを抑えている。

荷プログラムは、梁上端部の水平変位から算定した層間変形角による変位制御とし。1/1000, 1/500, 1/250, 1/125, 1/75(rad)の各振幅レベルで2サイクルずつ行う。

### 2.4 計測方法

図5に計測位置も示す。計測は、柱上下端部を計測基準点とし、梁端部の水平変位： $\delta_h$ 、エンドプレート左右の鉛直変位： $\delta_1, \delta_2$ 及びエンドプレート位置の柱左右の鉛直変位： $\delta_3, \delta_4$ を変位計により、水平荷重： $P$ をオイルジャッキ先端に取り付けたロードセルにより、ボルト張力： $T$ を転造ねじボルト下端部に設置したセンターホール型ロード

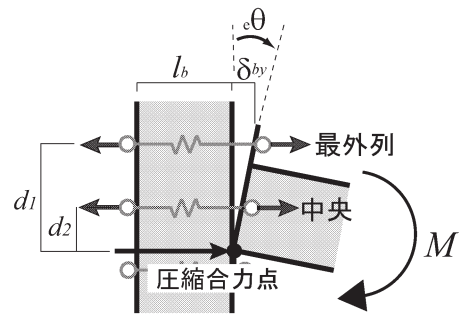


図6 力学モデル

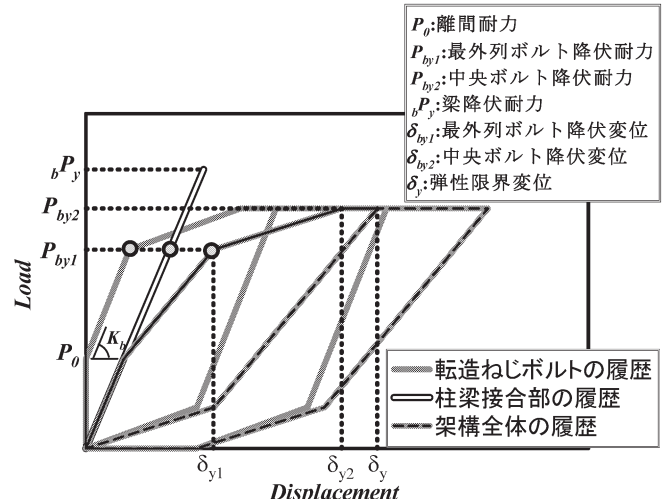


図7 復元力特性モデル

セルにより、それぞれ計測している。

また、層間変形角： $\theta$ 及び、エンドプレート回転角： $e\theta$ は次式により算出する。

$$\theta = \frac{\delta_h}{L} \quad \dots(1.a)$$

$$e\theta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{D} - \frac{\delta_3 - \delta_4}{D} \quad \dots(1.b)$$

ここで、 $L$ は荷点から柱図心までの距離、 $D$ はエンドプレート及び柱に設置した変位計の距離である。

## 3. 評価方法

圧縮合力点位置を梁フランジ端部としたときの力学モデルを図6に示す。

### 3.1 耐力評価

耐力の評価について、SC機構の性能を満足させるためには、中央ボルト降伏耐力： $P_{by2}$ を梁の降伏耐力： ${}_bP_y$ 以下に設定しなければならない。

力の釣り合いから、離間耐力<sup>3)</sup>： $P_0$ 、最外列ボルト降伏時の耐力： $P_{by1}$ と中央のボルト降伏耐力： $P_{by2}$ は、次式より求められる。

$$P_0 = \frac{M_0}{L_b} = n \cdot 0.9 \cdot T_0 \cdot \left( d_1 + \frac{d_2^2}{d_1} \right) / L_b \quad \dots(2.a)$$

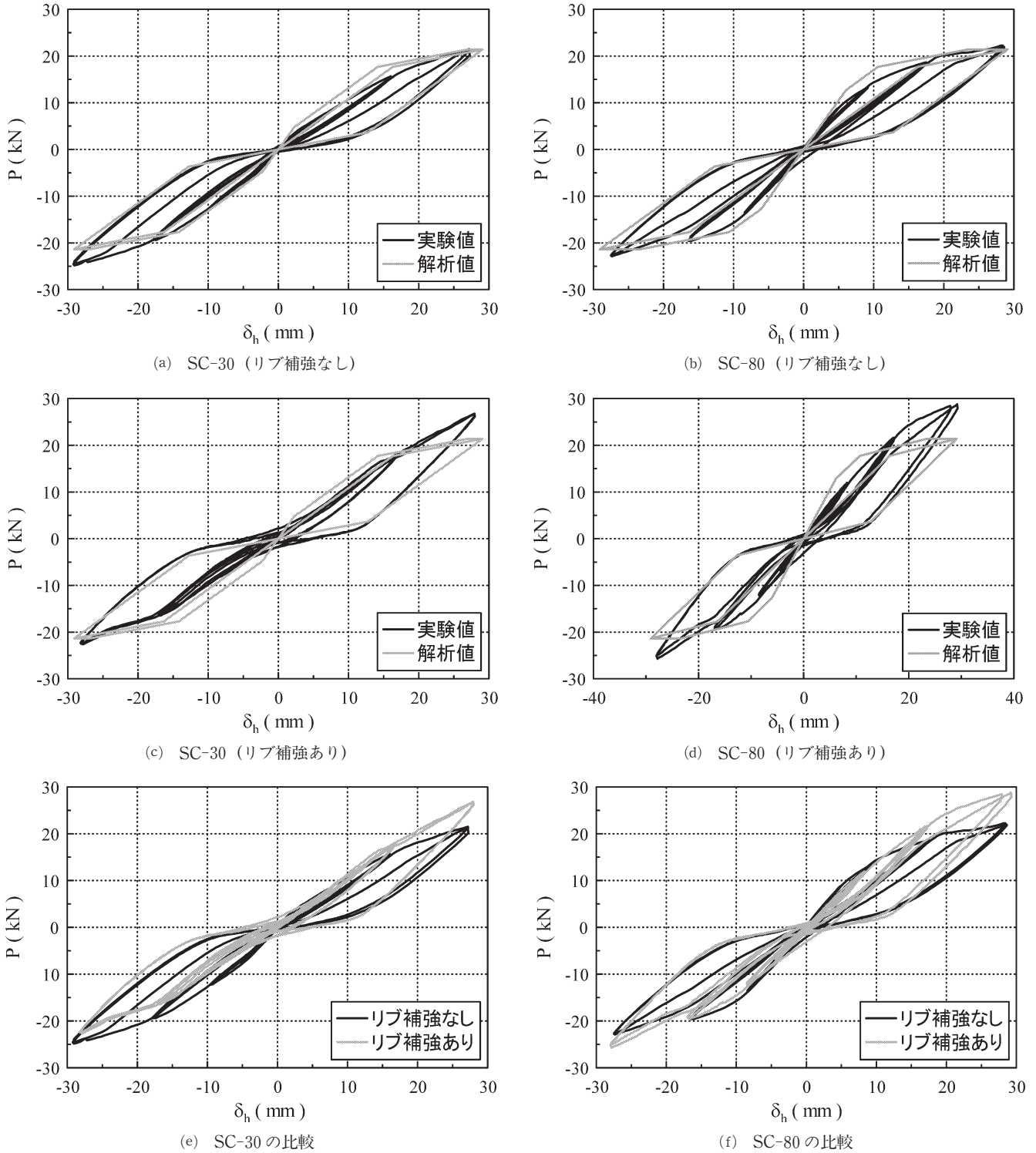


図8 水平荷重－水平変位関係

$$P_{by1} = \frac{M_{by1}}{L_b} = n \cdot T_{by} \cdot \left( d_1 + \frac{d_2^2}{d_1} \right) / L_b \quad \dots (2.b)$$

$$P_{by2} = \frac{M_{by2}}{L_b} = \frac{n \cdot T_{by} \cdot (d_1 + d_2)}{L_b} \quad \dots (2.c)$$

ここで、 $n$  はボルト本数、 $T_0$  はボルトの初期軸力、 $T_{by}$  はボルトの降伏軸力、 $d_1$ 、 $d_2$  は、圧縮合力点位置からボルト軸心までの距離、 $L_b$  は梁の長さである。

### 3.2 エンドプレート回転剛性

各ボルト列におけるボルトの弾性伸びから求められる弾性回転剛性については次式より求めることができる。

$$K_b = \frac{E_b \cdot n \cdot A_b \cdot d_i^2}{R \cdot l_b} \quad \dots (3)$$

ここで、 $E_b$  はヤング係数、 $n$  は各列のボルト本数、 $A_b$  はボルト断面積、 $d_i^2$  は圧縮合力点位置から各列のボルト中心位置までの距離、 $l_b$  はボルト有効長さ、 $R$  はエンドプレー

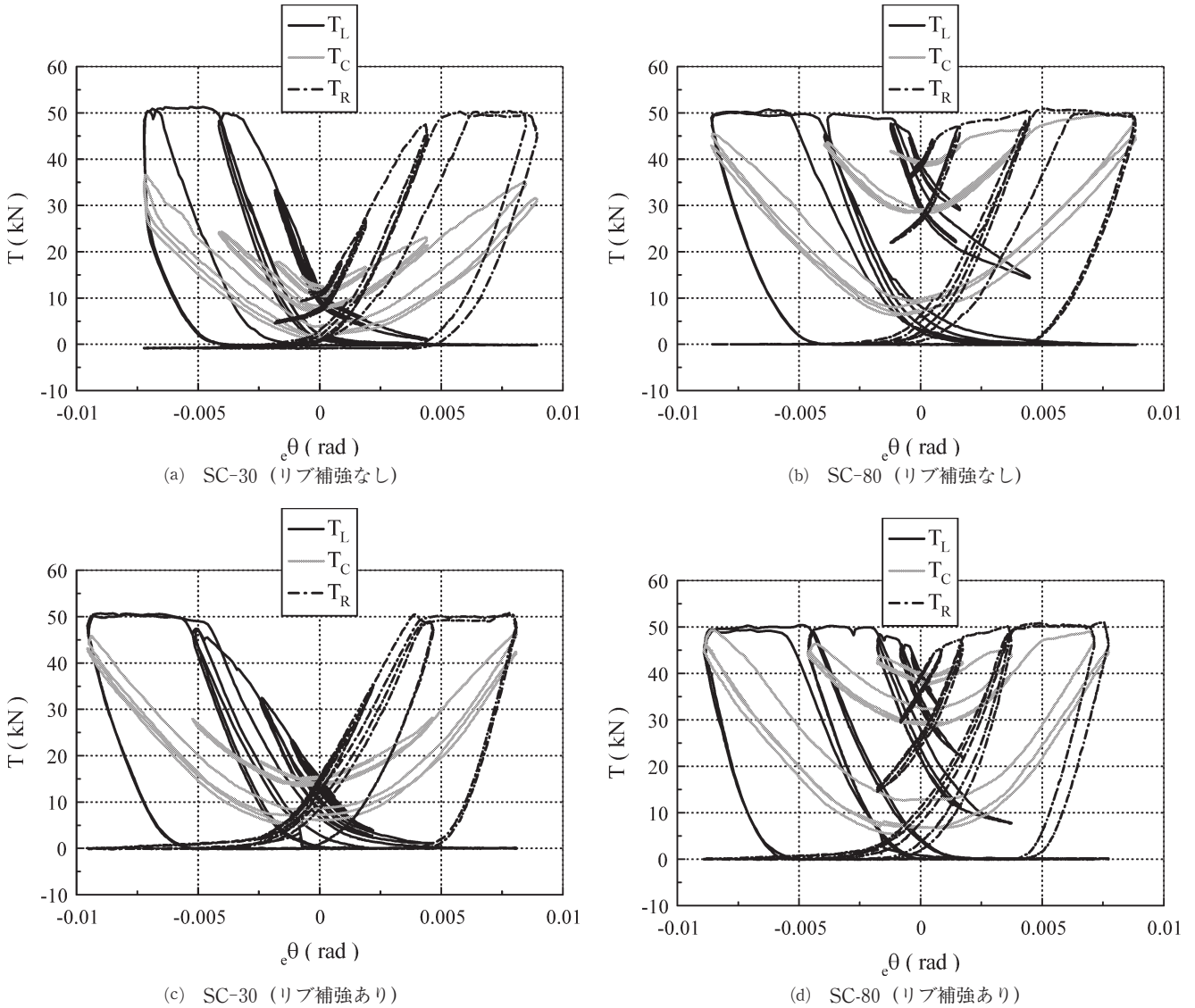


図9 ボルト張力-エンドプレート回転角関係

トと柱材の弾性変形を考慮した低減係数<sup>4)</sup>であり、 $R=2$ を採用している。

また、エンドプレートが離間するまでは梁端接合部を剛とし、離間後、ボルトの降伏軸方向変位： $\delta_{by1}$  から、最外列ボルト降伏時のエンドプレート回転角： $e\theta_{by1}$  を次式から求められる。

$$e\theta_{by1} = \frac{\delta_{by}}{d_1} = \frac{R \cdot l_b \cdot (\sigma_{by} - T_0/A_b)}{E \cdot d_1} \quad \dots(4.a)$$

同様に、中央ボルト降伏時のエンドプレート回転角： $e\theta_{by2}$  を次式から求められる。

$$e\theta_{by2} = \frac{\delta_{by}}{d_2} = \frac{R \cdot l_b \cdot (\sigma_{by} - T_0/A_b)}{E \cdot d_2} \quad \dots(4.b)$$

尚、層間変位： $\delta_h$  は、エンドプレート回転角と柱梁の弾性剛性： $K_f$  から求められる弾性変形を累加するものとし、各列ボルトの降伏変位： $\delta_{yi}$  は次式より求められる(図7参照)。

$$\delta_{yi} = e\theta_{byi} \cdot L_b + \frac{M_{byi}}{K_f} \cdot L \quad \dots(5)$$

### 3.3 復元力特性モデル

図7に復元力特性モデルを示す。復元力特性モデルは、式(2.b)、(2.c)の各耐力と、式(5)より求められる水平変位を用いて、Tri-linear型とする。また、いかなる荷重においても、原点より荷重が上昇する。

## 4. 結果と考察

図8に、実験結果の水平荷重： $P$ -梁端部の水平変位： $\delta_h$  の関係を、図9に、実験結果のボルト張力： $T$ -エンドプレート回転角： $e\theta$  の関係を示す。

尚、図8(a)~(d)中には、3.3節に示す復元力特性モデルを併せて示し、図8(e)、(f)中には、リブ補強の有無の試験体を重ねて示す。また、図9中には、各列のボルト張力を、 $T_L$ 、 $T_C$ 、 $T_R$  としてそれぞれ示している(図5参照)。



#### 4.1 水平荷重－水平変位関係

図8(a)～(d)より、リブで補強していない場合、補強した場合のどちらにおいても原点を指向する復元力特性を示し、SC性能が得られた。また、初期導入張力を与えることで、初期剛性の上昇、同一載荷下のエネルギー吸収量の増加が期待できる。

図8(a), (b)より、リブ補強なしの実験結果と解析値を比較して、SC-30とSC-80のどちらの場合においても、最終サイクル時の載荷時の剛性が低く、若干のスリップ現象が起きている。しかし、図8(c), (d)より、リブ補強ありの実験結果と解析値を比較して、スリップ現象は起きていない。これは、リブ補強することで、エンドプレートの面外曲げ変形が抑制され、楔デバイスの機能不全が改善されたためと考えられる。また、図8(e), (f)より、リブ補強なしとリブ補強ありの実験結果を比較して、リブ補強ありの初期剛性がリブ補強なしの初期剛性よりも低くなっている。これは、リブ補強した場合のエンドプレートが、リブを溶接接合した際、溶接熱によりリブ補強なしの場合よりも湾曲したために、リブ補強なしの場合よりも初期において圧縮合力点が内側に入っていたためと考えられる。更に、最終サイクルの正方向載荷時は、リブ補強なしの場合よりもリブ補強した場合の圧縮合力点が外側になり、耐力が高くなっていると考えられる。

#### 4.2 ボルト張力－エンドプレート回転角関係

図9(a)～(d)より、リブ補強なしの場合では、スリップ現象を示している。しかし、リブ補強した場合では、スリップ現象が生じていない。また、軸部降伏張力の30%と80%の初期張力を導入した場合を比較して、最外列ボルト降伏時のエンドプレート回転角は、30%よりも80%の方が、小さい回転角である。これは、初期張力を導入することで、ボ

ルトが降伏張力に達するまでの軸方向の変形量が減少するためである。

### 5. 結論

本研究では、SC性能付の柱梁接合部の正負交番繰返し載荷を行い、以下のような結論が得られた。

- 1) リブ補強の有無に関わらず原点指向型の復元力特性を示し、SC性能が得られた。
- 2) エンドプレートをリブ補強することで、楔の機能不全が改善されスリップ現象が解消された。
- 3) 初期張力を上昇させると、ボルトが早期に降伏し、エネルギー吸収が期待できる。

### 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。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) 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, pp 173-180, 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型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), PP 597-598, 2006.9
- 3) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2006
- 4) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3