広島工業大学紀要研究編
第41巻（2007）pp. 93-99
論　　文

ト字型柱梁接合部のセルフセンタリング性能に関する実験的研究

高　松　隆　夫*・玉　井　宏　章*
小　畑　寛　行**・山　西　央　朗***

（平成18年10月30日受理）

An Experimental Study on Self-Centering Performance of T-Shaped Beam-to-Column Connection

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI
Hiroyuki KOBATA and Teruaki YAMANISHI

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

In this paper, an experimental study on self-centering performance of T-shaped beam-to-column connections subjected to cyclic loadings was carried out. Parameters of the specimens were employed the diameter and the initial axial force of the normal- strength bolts. The following conclusions were drawn from the experimental results.

1) T-shaped beam-to-column connections of 0.8 in yield bending strength show excellent self-centering performance.
2) Initial stiffness of the normal-strength bolted connection by introducing the initial axial force of 0.9 in yield strength shows the same one as high-strength bolted connection.

Key Words: beam-to-column, wedge device, self-centering performance, restoring force characteristics

1．は　じ　め　に

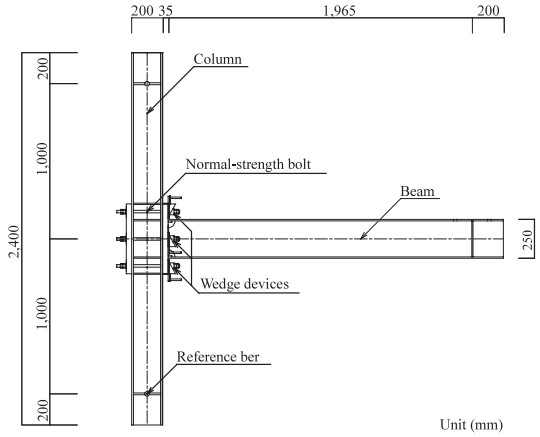
耐震設計では，構造物の倒壊を回避することが絶対的な条件であり，崩壊機構より崩壊荷重を導出して，構造物の崩壊の是非を検討する。この場合，梁端部に塑性ヒンジを仮定するので，梁端接合部には，保有耐力接合としての耐力・靭性を確保する必要がある。しかし，溶接接合部においては，スカラップ加工および溶接部金属性能（靭性）の劣化が，接合部の靭性を著しい劣化を招き，構造物の耐震性能を過大評価する可能性がある。

また，上述のような劣化が生じず，靭性を十分に確保できても，地震後の残留変形を制御することが非常に困難となり，これまで，継続使用の断念を余儀なくされた事例が多数報告されている。

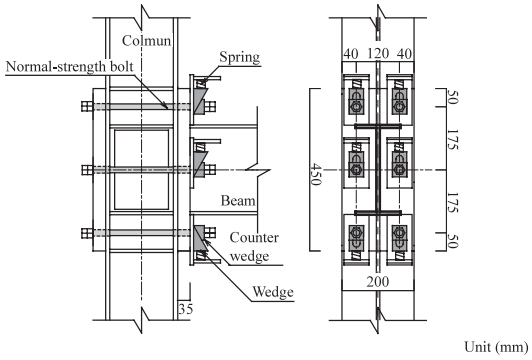
著者等はこれまで，柱脚部において，残留変形を低減する性能（以後，セルフセンタリング性能（SC 性能）と記す）を有した，ノンスリップ型露出柱脚を提案してきた[1)]。したがって，同様の機構を柱梁接合部に導入することにより，残留変形の低減が期待できるとともに，塑性ヒンジの生成位置・耐力の評価が容易となり，母材である柱や梁は弾性域に留めることができるので，建物の長寿命化に着目したリユースを可能にするサステナブル構造システム[2)]としても期待できることは示されている[3)]。

しかしながら，SC 性能を付与するとき，転造ねじボル

* 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土木工学専攻
*** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻



（a） 試験体



（b） 接合部の詳細

図１ SC 性能付き柱梁接合部架構

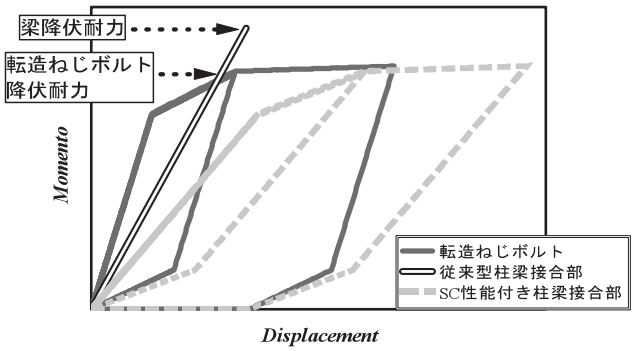


図２ SC 性能の復元力特性モデル

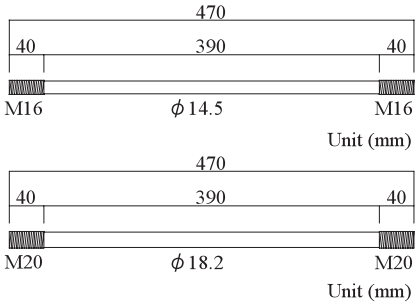


図３ 転造ねじボルトの詳細

ト降伏先行型にするため，柱梁が過大設計になる。本論文では，ボルトの性能に着目しボルト径及びボルトに導入する初期軸力を考慮した，SC 性能付き柱梁接合部架構の実用的な設計法を提案する。

２．接合部における SC 性能の概要

2.1 接合部の構成

SC 性能付き柱梁接合部架構及び接合部の詳細を図１に示す。

接合部は，エンドプレート形式柱梁接合部が用いられ，転造ねじボルトで接合されている。すなわち，梁端部に溶接接合されたエンドプレートが，エンドプレートとナットの間に，予め楔デバイスを設置した転造ねじボルトにより柱へ接合されている。

転造ねじボルトには，梁端部の回転に伴い，エンドプレートを介して引張力が作用し，また，エンドプレート圧縮側には柱フランジを反力面とした接触圧が作用する。引張力及び接触圧に対して，面外変形を生じさせないために，エンドプレートは十分な剛性と強度を有している。さらに，接触圧が作用することにより柱フランジの面外変形が考えられるため，エンドプレート端部の柱にはスチフナが溶接されている。

2.2 機構

文献１）より，著者等が提案しているノンスリップ型露出柱脚では，柱脚部に楔デバイスを用いることで原点を指向する復元力特性を示し，SC 性能を付与できることが示されている。この性能を柱梁接合部に適用させた場合，転造ねじボルト接合部の降伏耐力を，梁端部の降伏耐力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，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２参照）。

３ 載荷試験概要

ボルト径及び初期軸力による，SC 性能の効果を検討するため，柱を強軸方向に使用したＨ形鋼柱梁接合部ト字型試験体を作製し，梁端に水平荷重を載荷する繰返し漸増振幅載荷試験を行う。

3.1 試験体

試験体の概要及び接合部の詳細を図１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り出したト字型柱梁接合を対象とする。接合部は，３列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が柱に接合されている。

文献１）より，転造ねじボルトが３列配列の場合には，中央のボルト列が弾性範囲内であれば，セルフセンタリング性能を付与できることが明らかになっている。

転造ねじボルトには，ボルト径による耐力増加の確認のため，M16 と M20 を用い，また，ボルトに導入する初期軸力の影響を確認するため，ボルト降伏軸力の 0.3，0.5，0.8 を導入する。尚，比較のために，接合部を剛接合とした梁降伏先行型の試験体も用意した。図４に試験体パラメーターを示す。

梁には H-250x125x6x9 の SS400 材を，柱には H-200x200x8x12 の SS400 材を，ボルトには M16・M20 の ABR400 材を使用した。それぞれの引張素材特性を表１に示す。

3.2　載荷・計測方法

載荷装置の概要を図５に示す。載荷は，試験体を 90° 回転させ反力柱に取り付けられたオイルジャッキにより梁上端部に水平荷重を導入する。梁の横座屈を防止するため，加力点近傍にボールベアリングを取り付け，両側面から鋼板で挟みこんで構面外変形を抑えている。

載荷方法は，漸増繰返し水平載荷とし，梁上端部に水平強制変位を加え，層間変形角：δ/l_b で変位制御する。ボルト径をパラメーターとする試験では，層間変形角の振幅を 1/1000，1/500，1/250，1/125，1/75，1/50（rad）とし，ボルトに導入する初期軸力をパラメーターとする試験では，中央のボルトが弾性範囲に留まるよう 1/75（rad）まで漸増し各振幅レベルで２サイクル行う。

荷重の計測は，オイルジャッキ先端に取り付けたロードセルから水平荷重：P を，変位の計測は，柱中央を不動点とする計測冶具を用いて梁上端部の水平変位：δ を計測する。

ここで，梁端部に作用するモーメント：M 及び，層間変形角：θ は次式により算出する。

$$M = PL_b \quad \cdots\cdots (1.a)$$

$$\theta = \frac{\delta}{L_b} \quad \cdots\cdots (1.b)$$

ここに，L_b は梁の長さである。

また，離間が生じなければ接合部は剛体と見なせることから，エンドプレート回転角：${}_e\theta$ は，次式により算出する。

$${}_e\theta = \theta - \frac{M}{K_f} \quad \cdots\cdots (1.c)$$

ここに，K_f（kNm/mm）は剛接合試験体の初期剛性である。

表１　素材特性

	E (kN/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	σ_u (N/mm^2)	σ_y/σ_u (%)	ε_u (%)
Beam	205	310.3	422.1	71.0	24.1
Column	205	326.5	444.7	73.4	21.2
Normal-sterength bolt M16	205	303.1	444.2	68.2	29.2
Normal-sterength bolt M20	205	309.5	461.6	67.0	35.0

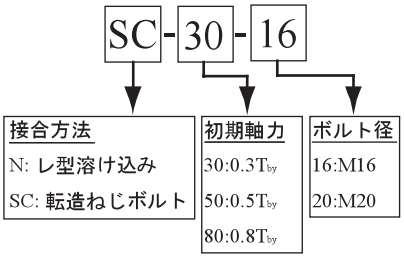


図４　試験体名称の説明

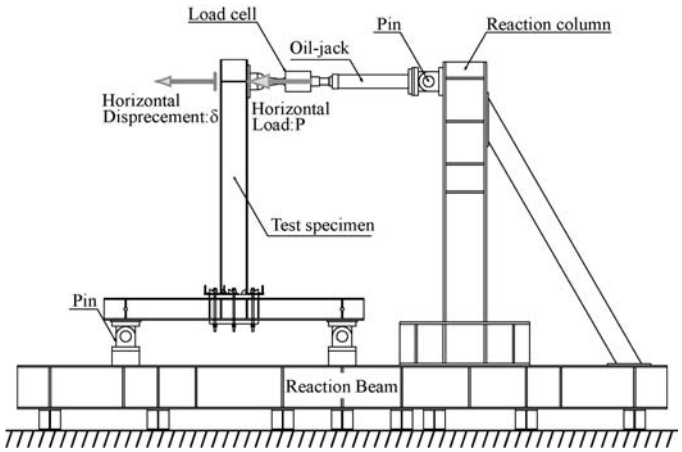


図５　試験装置

４．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。

4.1　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：M_{by2} を梁の降伏耐力：${}_bM_y$ 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[4]：M_0，最外列ボルト降伏時の耐力：M_{by1} と中央のボルト降伏耐力：M_{by2} は，次式より求められる。

$$M_0 = n \cdot 0.9 \cdot T_0 \cdot \left(d_1 + \frac{d_2^{\,2}}{d_1} \right) \quad \cdots\cdots (2.a)$$

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

$$M_{by2} = n \cdot T_{by} \cdot \left(d_1 + d_2 \right) \quad \cdots\cdots (2.c)$$

ここに，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である。

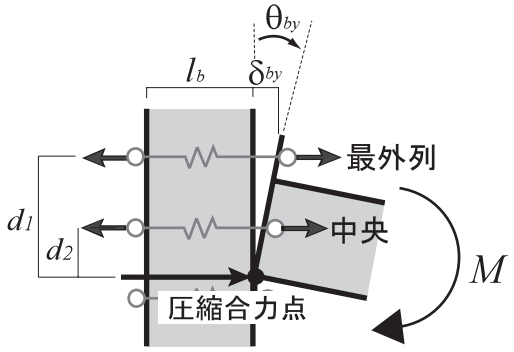


図6　梁端接合部の力学モデル

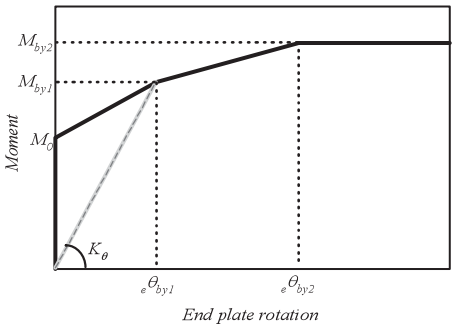


図7　エンドプレート回転剛性の定義

4.2　エンドプレート回転剛性

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：δ_{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。

$$ {}_e\theta_{by1}=\frac{\delta_{by}}{d_1}=\frac{R\cdot l_b\cdot\left(\sigma_{by}-T_0/A_b\right)}{E\cdot d_1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.a) $$

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。

$$ {}_e\theta_{by2}=\frac{\delta_{by}}{d_2}=\frac{R\cdot l_b\cdot\left(\sigma_{by}-T_0/A_b\right)}{E\cdot d_2} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3.b) $$

よって，最外列ボルト降伏時までを初期のエンドプレート回転剛性：K_θ とすると，K_θ は式（2.b），（3.a）より次式が求められる。（図7参照）

$$ K_\theta=\frac{M_{by1}}{{}_e\theta_{by1}}=\frac{n\cdot T_{by}\cdot\left(d_1+\dfrac{d_2^{\,2}}{d_1}\right)\cdot E\cdot d_1}{R\cdot l_b\cdot\left(\sigma_{by}-T_0/A_b\right)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (4) $$

ここに，l_b はボルト有効長さ，E はヤング係数，σ_{by} はボルトの降伏応力度，R はエンドプレートと柱材の弾性変形を考慮した低減係数[5]であり，$R=2$ を採用している。

尚，層間変形角：θ は，エンドプレート回転角と柱梁の弾性変形を累加するもとし，次式より求められる。

$$ \theta=\frac{\delta}{L_b}=\frac{M}{\Sigma K_\theta}+\frac{M}{K_f} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (5) $$

表2に，各試験体の計算値を示す。

5．実験結果と考察

中央ボルトに塑性化が生じる1/50rad までの漸増繰返し水平載荷試験結果を図8に，中央ボルトが弾性範囲である1/75rad までの漸増繰返し水平載荷試験結果を図9，10に示す。

図8，9の右軸及び下軸には，梁の降伏曲げ耐力：${}_bM_y$ 及び梁降伏時の層間変形角：${}_b\theta_y$ で無次元化した値を示す。また，図8の左軸及び上軸には，中央ボルトが降伏時の曲げ耐力：M_{by2} 及びその時の層間変形角：θ_{by2} で無次元化した値を，図9の左軸及び上軸には，最外列ボルトが降伏時の曲げ耐力：M_{by1} 及びその時の層間変形角：θ_{by1} で無次元化した値も併せて示す。

図10は，初期軸力による影響を把握するため，下軸に式（1.c）から求めたエンドプレート回転角で示し，上軸に ${}_e\theta_{by1}$ で無次元化した値が1.0となるラインを示す。

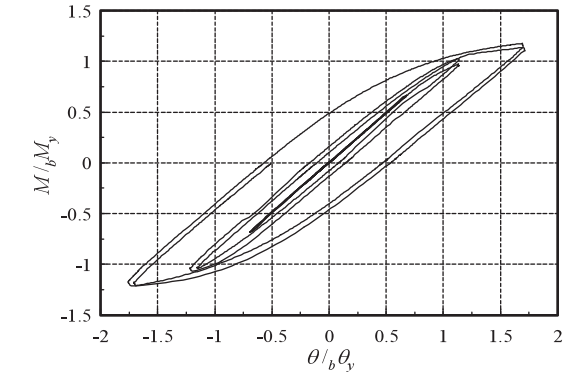
5.1　最大曲げ耐力

図8．（b），（c）より，試験結果と M_{by2} 及び θ_{by2} の計算値を比較すると，SC-30-20試験体の正載荷時で若干低い値を示すものの，ほぼ良好に対応している。また，θ_{by2} 以内であれば，中央ボルトは，弾性体であるため固定度を失うことなく，原点指向型復元力特性となりSC性能は実現でき

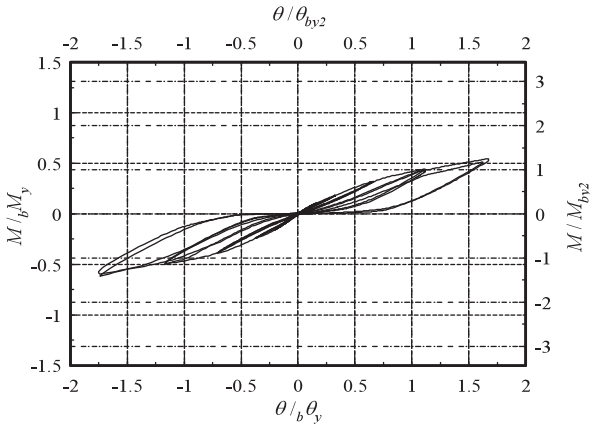
表2　各試験体の性能

Specimen	${}_bM_y$ (kN・m)	${}_b\theta_y$ (x10^3 rad)	K_f (x10^3 kN・m/rad)
N	98.4	11.7	8.41

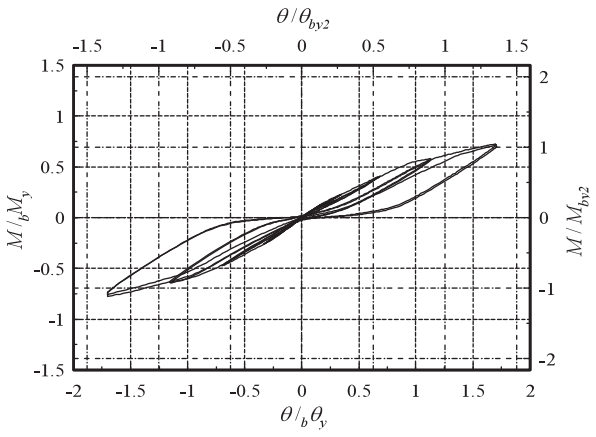
Specimen	M_0 (kN・m)	M_{by1} (kN・m)	M_{by2} (kN・m)	${}_e\theta_{by1}$ (x10^3 rad)	${}_e\theta_{by2}$ (x10^3 rad)	θ_{by1} (x10^3 rad)	θ_{by2} (x10^3 rad)	K_θ (x10^3 kN・m/rad)	K_f (x10^3 kN・m/rad)
SC-30-16	9.4	35.6	43.0	2.69	6.46	6.92	11.6	13.2	5.14
SC-50-16	15.6	35.6	43.0	1.92	4.61	6.16	9.73	18.5	5.78
SC-80-16	25.0	35.6	43.0	0.77	1.85	5.01	6.97	46.2	7.11
SC-30-20	15.0	56.6	68.3	2.75	6.81	9.49	14.7	20.6	5.96



(a)　N

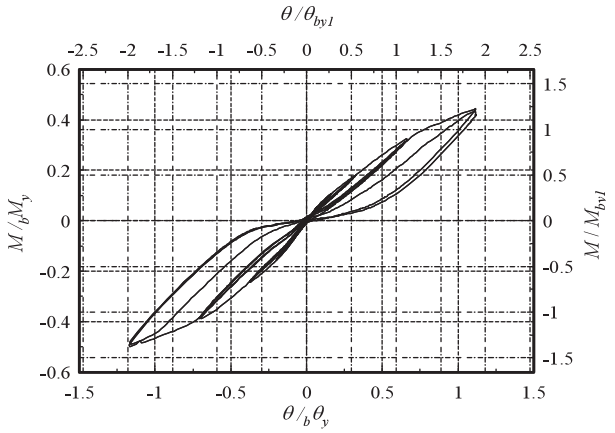


(b)　SC-30-M16

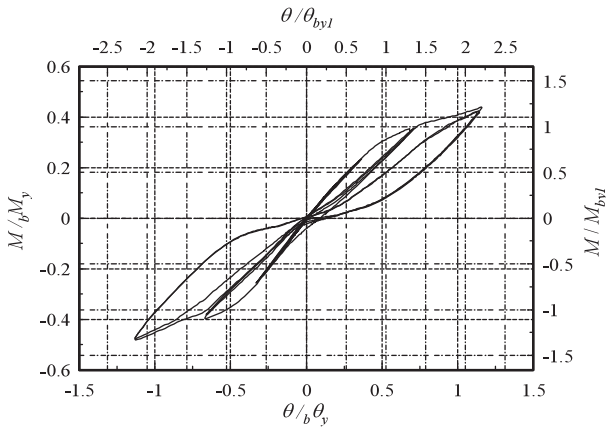


(c)　SC-30-M20

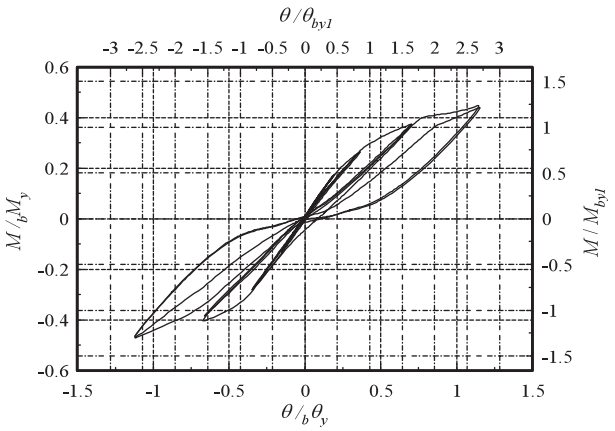
図8　曲げモーメント－層間変形角関係　（1/1000 ～ 1/50rad）



(a)　SC-30-16



(b)　SC-50-16



(c)　SC-80-16

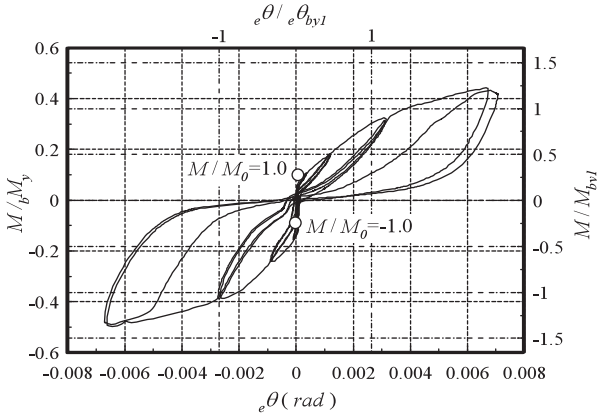
図9　曲げモーメント－層間変形角関係　（1/1000 ～ 1/75rad）

る。θ_{by2} 以上であると除荷時において曲げモーメントに抵抗することなく原点を指向するがスリップは生じていないため，転造ねじボルトによるエネルギー吸収が期待できる。

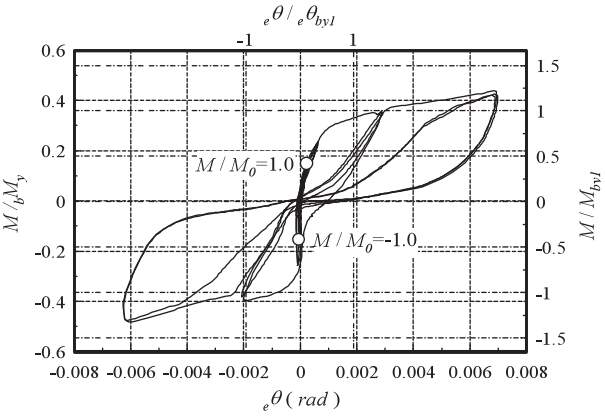
θ_{by2} を弾性限界とするとSC性能付き接合部の最大曲げ耐力は M_{by2} となり，梁降伏曲げ耐力と比較すると，SC-30-16試験体では4割程度，SC-30-20試験体では6割程度とかなり低い値となる。設計において，θ_{by2} 以降は曲げ耐力が一定となるTri-linear型復元力特性で設計すれば，$M_{by2} \leqq 1.0_bM_y$ で可能であるが，試験結果において，θ_{by2} 以降で耐力上昇が確認できる。これは，圧縮合力点が梁フランジ端部からエンドプレート端部に移動するために耐力上昇が起こる考えられるため，安全側を考慮すると $M_{by2} \leqq 0.8_bM_y$ が妥当であると考えられる。

5.2　初期剛性

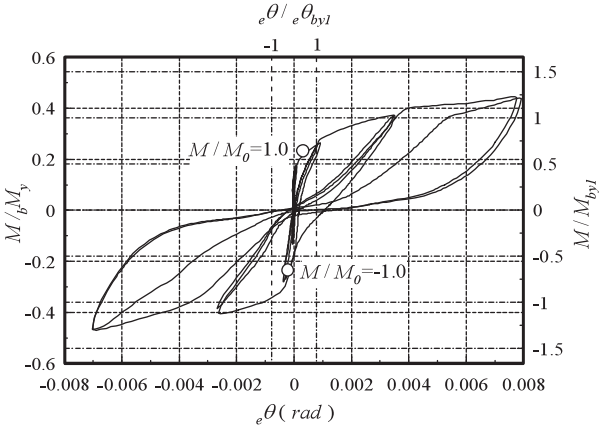
図9，10より，試験結果と M_{by1}，θ_{by1}，$_e\theta_{by1}$ の計算値を比較すると各試験体とも正載荷時において若干低い値を示すものの，負載荷では良好に対応しており，ボルト初期軸力の増加に伴いエンドプレート回転剛性及びSC性能付き柱



(a) SC-30-16



(b) SC-50-16



(c) SC-80-16

図 10 曲げモーメント－エンドプレート回転角関係

梁接合部架構の初期剛性が上昇することが分かる。この剛性の上昇は，図 10 から分かるように離間曲げ耐力に関係しており，M/M_0 = 1.0 まではエンドプレート回転角は生じず柱梁は剛接合となり，ボルト初期軸力の上昇に伴い早期に M_{by1} に達するため，図 7 に定義したエンドプレート回転剛性が上昇する。

設計では，最外列ボルトの離間曲げ耐力を SC 性能付き接合部の降伏曲げ耐力とし，離間が生じるまでの初期剛性は，剛接接合部と同じ剛性となるようにする。つまり，T_0 = 1.0T_{by} とすれば M_0 = M_{by1} 時に転造ねじボルトが降伏する。しかしながら，T_0 = 1.0T_{by} であると，初期軸力導入時に，ひずみ流れ域に達する危険性があるため安全側を考慮して，T_0 = 0.9T_{by} とすれば，離間直後に転造ねじボルトが降伏し剛接接合部と同等の剛性が得られる。

降伏曲げ耐力は，最大曲げ耐力の 0.7 とし，M_0 = M_{by1} = 0.56M_{by2} を目標にボルト径を選定する。

6. 結　　論

本研究では，ボルトの性能に着目しボルト径及びボルトに導入する初期軸力を考慮した，SC 性能付き柱梁接合部架構の漸増繰返し水平載荷を行い試験結果と計算値の比較から実用的な設計法を提案した。

その結果，以下のような結論が得られた。

1）SC 性能付き柱梁接合部の最大曲げ耐力は，$M_{by2} \leqq 0.8_bM_y$ となるボルト径で設計することで梁を過大設計することなく SC 性能を実現できる。

2）初期剛性は，ボルト初期軸力は T_0 = 0.9T_{by} とすることで，最外列ボルト降伏曲げ耐力が離間曲げ耐力となり，剛接接合部と同等の初期剛性が得られる。また，高力ボルト設計と同様の設計が可能である。

以上のことから，SC 性能付き柱梁接合部架構は，転造ねじボルトで接合しているものの，初期軸力を降伏軸力まで導入することで高力ボルト設計が可能となり，せん断力はエンドプレートと柱フランジの摩擦で伝達させることができる。今後は，今回提案した設計法を十字型柱梁接合部に適用させ検証していく。

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，本研究を行なうにあたり，社団法人日本鉄鋼連盟「2005 年度鋼構造研究・教育助成事業（建築）」による学生研究助成，2006 年度財団法人古川技術振興財団奨学金の助成を使用させていただいた。また，2006 年度広島工業大学卒論生，山石健司，河内勇児，諸君の協力をいただきました。

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）會澤貴浩，山田哲，岩田衛：サステナブルビル構造シ

ステムの提案とその基本特性，日本建築学会環境系論文集，第 581 号，pp.109-116，2004．7

3）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

4）日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2006

5）秋山宏：　鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985．3