

新接合システムを用いたト字型柱梁接合部復元力特性に関する研究

高松 隆夫*・玉井 宏章*・小畑 寛行**

(平成18年10月30日受理)

Study on restoring force characteristics of T-shaped beam-to-column connection jointed by new joint system

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI and Hiroyuki KOBATA

(Received Oct. 30, 2006)

Abstract

In this paper, an experimental study on beam-to-column connections subjected to cyclic loadings was carried out. Three types of T-shaped specimens were employed for the loading tests. The following conclusions were drawn from the experimental results.

- 1) A connection with non-compression knee braces shows bi-linear restoring force characteristics.
- 2) A connection using normal-strength bolts with a wedge device possesses self-centering capability.
- 3) A self-centering connection with non-compression knee-braces is applicable to a sustainable structure having all elastic members except the knee-braces and bolts.

Key Words: non-compression knee-braces, self-centering performance, beam-to-column, restoring force characteristics

1. は じ め に

地震時において、柱梁接合部は大きな応力を受ける。パネルゾーン、梁端あるいは柱端に塑性ヒンジが生成される。特に、外柱におけるト字型柱梁接合部では、中柱と較べて梁端部に大きな曲げモーメントが作用し早期に降伏する。塑性ヒンジが十分な塑性変形能力を発揮できるように柱梁接合部近傍における接合部には保有耐力接合が用いられている。しかしながら、新耐震設計法が施行された1981年以前の鋼構造の中には、フランジ部の破断等により、早期に著しい耐力の劣化が見られ、梁の全塑性耐力を保持した塑性変形が不可能な状態の接合部が有り、簡易に耐震改修する方法の提案が切望されている。著者等は、ノンコンプレッション方杖（以降、NC方杖と記す）による十字型柱梁

接合部の耐震補強の有効性について報告している¹⁾。本論文では、方杖の設置が容易である、ト字型柱梁接合部に適用した場合について実験を行う。

一方、現在では、耐震補強において耐力・剛性の付与だけでなく、地震直後の避難、地震後の継続使用を可能とする、残留変形を低減するセルフセンタリング性能（以後、SC性能と記す）の要求が高まっている。著者等は、柱脚部において、SC性能を有する、ノンスリップ型露出柱脚を提案している^{2),3)}。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、ボルトの設計により骨組に必要な耐力・剛性を確保することで、建物の長寿命化に着目したリユースを可能にするサ

* 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

ステナブル構造システム⁴⁾としても期待できると考えられる。

しかしながら、SC 性能を付与するとき、転造ねじボルト降伏先行型にするため、柱梁が過大設計になる。そこで、NC 方杖を用い SC 性能を持つ構造物の耐力・剛性を上昇させ、且つ、エネルギー吸収も期待できるため、柱梁を過大設計することなくサステナブル構造システムとして実用的である。

このように、NC 方杖により接合部の補強を、そして、ノンスリップ型機構により SC 性能の実現が期待できる。更に、これらの性能を併用した場合には、大地震時においても柱や梁を弾性領域に留める、サステナブル構造システムが期待できる。本論文では、ト字型柱梁接合部の耐震補強と新接合システムを対象として、柱梁接合部の各隅に、NC 方杖を設置した試験体、SC 性能を有した新接合システムの試験体及び、NC 方杖の機構と SC 性能を併用した試験体について行い、それらの履歴性状について検討する。

2. NC 方杖と SC 機構の概要

以下に、提案する NC 方杖と楔付き転造ねじボルトによる SC 機構の概要を示す。

2.1 構成について

NC 方杖を有するとともに梁端部接合部に SC 機構を有する柱梁架構を図 1 に、方杖端部及び梁端部の詳細を図 2 に、それぞれ、示す。

NC 方杖には、両端にネジの付いた丸鋼棒が用いられ、楔を介して楔受けとダブルナットで方杖端部接合部に接合されている。(図 2. (a) 参照)

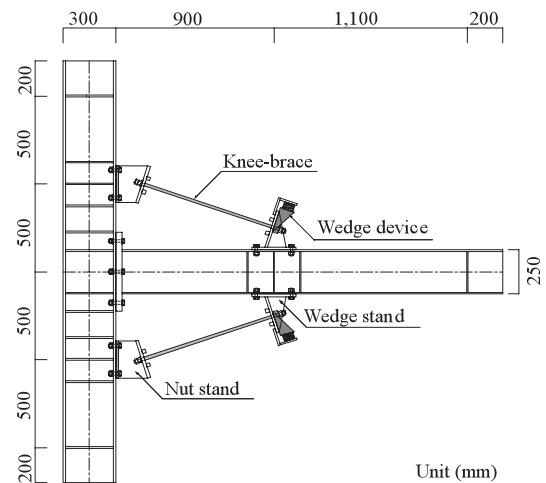
方杖端部接合部において、楔やナットを受けるプレートはスチフナが溶接されており、丸鋼棒からの引張力に対して十分な強度と面外曲げ剛性を有している。

SC 機構には、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。(図 2. (b) 参照)

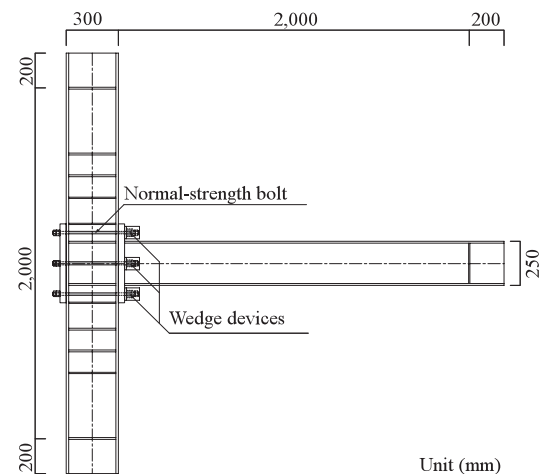
転造ねじボルトには、梁端部の回転に伴い、エンドプレートを介して引張力が作用し、また、エンドプレート圧縮側には柱フランジを反力面とした接触圧が作用する。引張力及び接触圧に対して、面外変形を生じさせないために、エンドプレートは十分な剛性と強度を有している。さらに、接触圧が作用することにより柱フランジの面外変形が考えられるため、エンドプレート端部の柱にはスチフナが溶接されている。

両機構に用いる、楔と楔受けには、丸鋼棒からの引張力

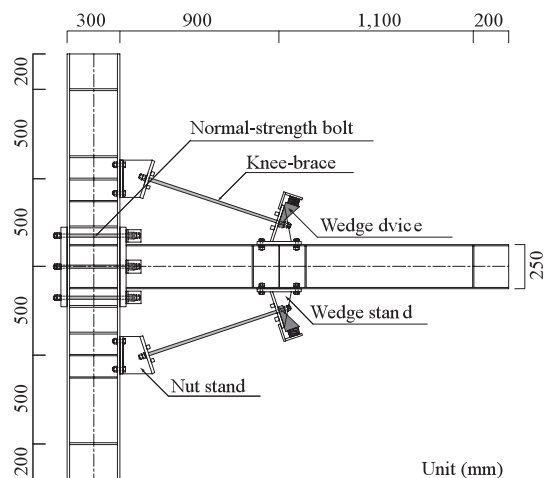
による押し戻りを防ぐため、大きな摩擦係数を確保するように発錆処理を施している。また、楔の後方には、楔が貫入する方向に力が作用するようにバネが設置されている。



(a) NC 試験体



(b) SC 試験体



(c) NC-SC 試験体

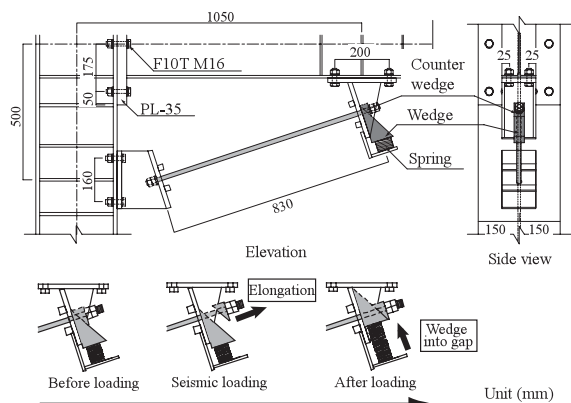
図 1 NC 方杖及び SC 性能を有する柱梁接合部架構

2.2 機構について

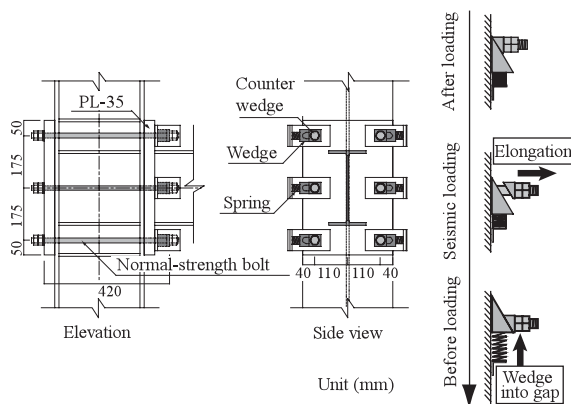
NC 方杖及び SC 性能の作動概念を図 2 に示す。

NC 方杖付柱梁接合部に、地震水平力が作用すると、引張方向に力が作用する場合には方杖材は効率よく引張抵抗し、方杖材全体は塑性変形してエネルギー吸収を行う。一方、圧縮方向に力が作用する場合には、方杖端部が離間し方杖材には圧縮力は作用せず、座屈は生じない。方杖端部に間隙が生じると楔に取付けられたバネの復元力により、楔が楔受けと楔受けプレートとの間の間隙に貫入して、方杖は緩みを生じない。

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³⁾。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。



(a) NC 方杖



(b) SC 性能付き接合部

図 2 NC 方杖及び SC 性能を有する柱梁接合の詳細と作動概念

3. 載荷試験概要

NC 方杖の補強効果、SC 機構の性能、及びそれらを併用した場合の性能を検討するため、柱を強軸方向に使用した H 形鋼柱梁接合部ト字形試験体を作製し、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 試験体概要

試験体の概要を図 1 に、NC 方杖及び SC 機構の詳細を図 2 に、転造ねじ付き丸棒鋼及び転造ねじボルトの詳細を図 3 に、それぞれ、示す。

試験体は、NC 方杖で補強された NC 試験体、楔付き転造ねじボルトを用いて柱と梁を接合させ SC 性能を付与させた SC 試験体、さらに、NC 試験体と SC 試験体の性能を併用した NC-SC 試験体、計 3 体とする。

NC 試験体は、柱と梁とを高力ボルトによるエンドプレート形式接合した架構（梁降伏先行型）の隅角部に転造ねじ付き丸棒鋼と楔デバイスからなる NC 方杖を柱や梁の図心から偏心させることなく、設置したものである。方杖材には、M16 ($A_b=164\text{mm}^2$) の転造ねじ付き丸棒鋼を用い、方杖降伏先行型とするよう径、方杖長さ及び設置角度を決めている。

SC 試験体においては、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 3) 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。

NC-SC 試験体については、NC 方杖と SC 機構の性能を併用させている。柱及び梁を弾性範囲に留めるため、NC 方杖の降伏を先行させ、次に、転造ねじボルトが降伏するように設定している。

尚、NC 方杖及び SC 機構では、楔と楔受けの噛み合わせの不具合から生じる初期不整を防ぐために、転造ねじ丸棒鋼には降伏軸力の 50% を、転造ねじボルトには降伏軸力の



図 3 転造ねじ付き丸棒鋼と転造ねじボルトの詳細

30% を初期軸力として導入している。

楔・楔受けの先端角度は 30° とした。文献5) に示されているように楔表面の摩擦係数が、0.6 程度であり、方杖材及び転造ねじボルトに対して傾斜面が 30° 以下となる先端角度を採用すれば、楔は押し戻されることはないことがわかっている。尚、楔・楔受けは SS400 鋼ブロックから切削して作製している。

梁には、H-250x125x6x9 の SS400 材を、柱には、H-300x300x10x15 の SS400 材を、丸棒鋼及びボルトには、M16 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。

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	319.2	462.3	69.0	28.1
Column	205	319.5	459.7	69.5	29.8
Knee Brace, Normal-strength Bolt	205	316.3	489.7	64.6	23.1

E : Young's modulus σ_y : Yield stress σ_u : Tensile strength
 σ_y/σ_u : Yield ratio ϵ_u : Elongation

3.2 荷重・計測方法

荷重装置の概要を図 4 に示す。荷重は、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力を導入する。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。

荷重方法は、漸増繰返し水平荷重とし、水平強制変位を加え、層間変形角: δ/l_b で変位制御する。層間変形角の振幅を $1/1000$, $1/500$, $1/250$, $1/125$, $1/70$ (rad) と漸増し各振幅レベルで 2 サイクル行う。尚、NC 試験体については、楔が貫入限界に達した時点で荷重を終了する。

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治具を用いて梁上端部の水平変位: δ を計測す

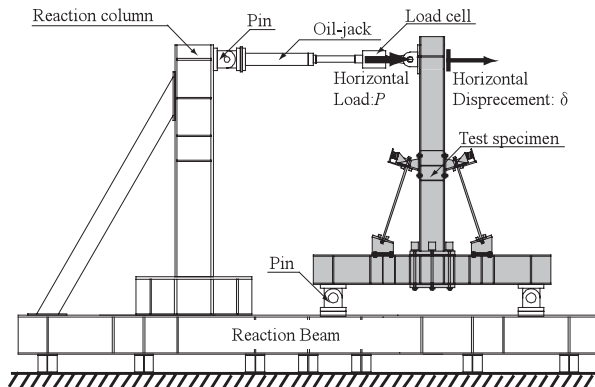


図 4 荷重装置

る。また、柱梁接合部架構が弾性範囲に留まっていることを確認するため、梁端部から 100mm 離れた位置における、梁フランジのひずみ値: ϵ を計測する。

4. 復元力特性モデル

解析モデルを図 5 に、単調載荷時の復元力特性モデルを図 6 に示す。

4.1 NC 方杖付き柱梁接合部

解析モデル誘導のための仮定を以下に示す。

(1) NC 方杖は、引張力のみに抵抗する。(2) 方杖に初期軸力を導入しているため、初期剛性は方杖 1 本分の剛性の 2 倍とする。(3) 方杖材端部は、剛体として取り扱う。(4) 方杖設置位置までの距離: l'_b , l'_c は、柱梁接合部の軸心から方杖取り付け位置までの距離とする。

(5) 方杖有効長さ: l_k は、方杖のナット間距離とする。

NC 方杖付き柱梁接合部架構は、内的不静定構造物となることから、仮想仕事法を用いることにより次式が求められる。

$$\delta = \sum \int \frac{M_x \bar{M}_x}{EI} dx + \frac{N \bar{N}}{EA_k} l_k \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\bar{M}_x$, $\bar{N}$ は、梁端部に $\bar{P}=1$ を作用した時の柱及び梁に生じる曲げモーメント及び方杖軸力である。また、 I は柱及び梁の断面二次モーメント、 E はヤング係数、 A_k は方杖断面積、 l_k は方杖有効長さである。

方杖が降伏軸力: N_{ky} に達する時の水平荷重: P_{ky} は、次式より求められる。

$$P_{ky} = \frac{N_{ky}}{\alpha} = \frac{A_k \cdot \sigma_{ky}}{\alpha} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 σ_{ky} は方杖の降伏応力度、 α は方杖設置角度: θ 及び方杖有効長さ: l_k に起因する係数である。

よって、方杖降伏時の水平変位: δ_{ky} とすると、架構の弾性剛性: K_k は式 (1), (2) より求められる。

$$K_k = \frac{P_{ky}}{\delta_{ky}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

4.2 SC 性能付き柱梁接合部

解析モデルは、柱と梁の接合はエンドプレート形式とし、3列6本の転造ねじボルトを配列したものとする。また、圧縮合力点位置は梁フランジ位置とする。

復元力特性モデルは、梁の上端部に水平力: P を作用させ、そのときに生じる、エンドプレートの回転による梁上端部の変位: δ_1 と、柱梁架構の弾性曲げ変形による梁上端部の変位: δ_2 を累加して求められる変位: δ を架構全体は式 (4.a) より求められる。尚、転造ねじボルトの弾性回転剛性: K_b' は文献3) に示されている、ノンスリップ

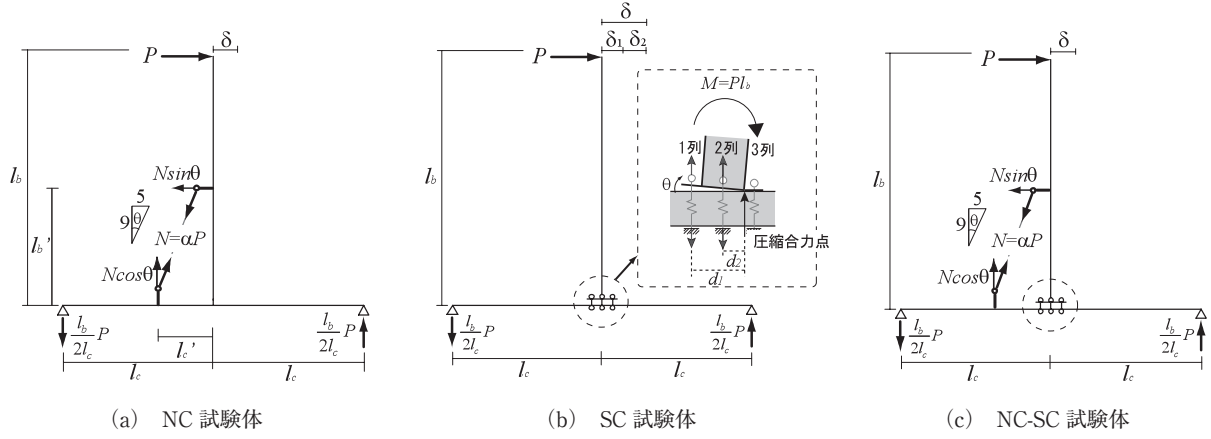


図5 解析モデル

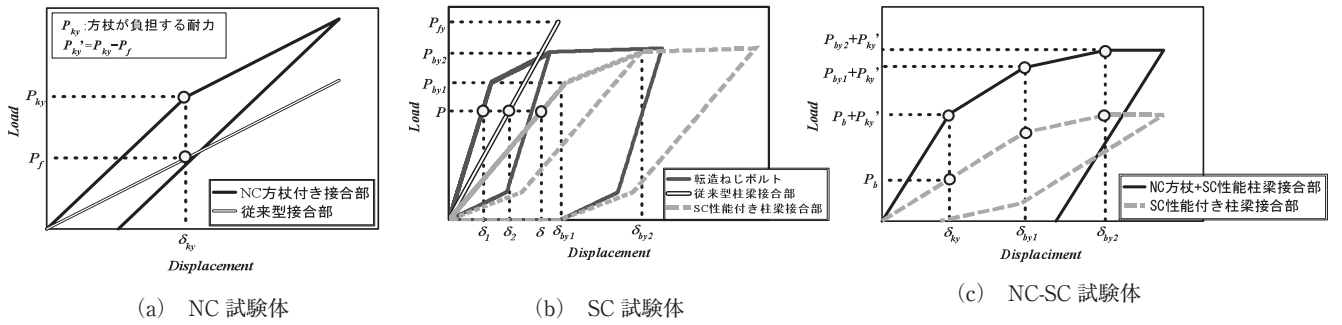


図6 復元力特性モデル

型復元力特性の剛性を用いる。

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = \frac{M}{\sum K_b} \cdot l_b + \sum \int \frac{M_x \bar{M}_x}{EI} dx \quad (4.a)$$

$$K_b = \frac{E_b \cdot n \cdot A_b \cdot d_i^2}{R \cdot l_{ab}} \quad (4.b)$$

ここに、 M は梁端部に生じる曲げモーメント、 l_b は梁の長さ、 $\sum K_b$ は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： K_b の総和である。また、 E_b はボルトのヤング係数、 n は各列のボルト本数、 A_b はボルト断面積、 d_i 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_{ab} はボルトの有効長さである。 R については、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、 $R=2$ を採用した。

耐力は、力の釣り合い条件から、最外列ボルト降伏時の耐力： M_{by1} と、その時の水平耐力： P_{by1} 及び、中央のボルト降伏耐力： M_{by2} と、その時の水平耐力： P_{by2} は、次式より求められる。

$$M_{by1} = n \cdot A_b \cdot \sigma_{by} \cdot \left(d_1 + \frac{d_2^2}{d_1} \right) \quad (5.1.a)$$

$$P_{by1} = \frac{M_{by1}}{l_b} \quad (5.1.b)$$

$$M_{by2} = n \cdot A_b \cdot \sigma_{by} \cdot (d_1 + d_2) \quad (5.2.a)$$

$$P_{by2} = \frac{M_{by2}}{l_b} \quad (5.2.b)$$

最外列ボルト降伏時の水平変位： δ_{by1} とすると、架構の弾性剛性： K_k は式(4.a)、(5.1.b)より求められる。

$$K_k = \frac{P_{by1}}{\delta_{by1}} \quad (6)$$

4.3 NC 方杖と SC 性能付き柱梁接合部

解析モデルは、NC 方杖及び SC 性能を組み合わせた柱梁接合部架構とする。

復元力特性モデルは、NC 方杖付き柱梁接合部架構において、 δ_{ky} 時に方杖が負担する水平耐力： P_{ky}' を、SC 性能付き柱梁接合部架構の耐力に累加し求める。

方杖降伏先行型であるため、 δ_{ky} 時を架構の弾性剛性： K_{kb} とすると、 K_{kb} は次式より求められる。

$$K_{kb} = \frac{P_{ky}' + P_b}{\delta_{ky}} \quad (7)$$

ここに、 P_b は δ_{ky} 時における SC 性能付き柱梁接合部架構が負担する水平耐力である。

表2 試験結果と解析値

Test specimen	EK (kN/mm)		$A K$ (kN/mm)	$E K / A K$		$E K / K_f$		$E P_y$ (kN)	$A P_y$ (kN)	$E P_y / A P_y$
	1/1000 (rad)	1/125 (rad)		1/1000 (rad)	1/125 (rad)	1/1000 (rad)	1/125 (rad)			
NC	3.91	3.89	3.88	1.01	1.00	1.71	1.70	31.6	35.8	0.88
SC	1.60	1.25	1.28	1.25	0.98	0.70	0.55	22.5	22.8	0.99
NC-SC	3.16	3.19	3.28	0.96	0.97	1.38	1.39	25.7	27.5	0.93

※ K_f は柱梁を剛接合とした架構の解析値 (2.29 kN/mm) である。

5. 実験結果と考察

漸増繰返し水平載荷試験結果を表2に、水平荷重と水平変位の復元力特性を図7に示す。

表2には、各試験体における1/1000rad時の初期剛性と1/125rad時の除荷剛性を EK 、解析から求められた弾性剛性を $A K$ 、各試験体における降伏水平荷重を $E P_y$ 、解析から求められる降伏水平荷重を $A P_y$ として示す。また、実験値と解析値の比較について、 $E K / A K$ 、 $E P_y / A P_y$ で示す。各試験体における降伏水平荷重を $E P_y$ は、NC試験体とNC-SC試験体は方杖降伏時の水平荷重、SC試験体は最外列ボルト降伏時の水平荷重である。尚、 K_f は、柱梁を剛接合とした架構の解析値である。

図7には、解析で得られた骨格曲線及び降伏荷重： $A P_y$ を示す。また、梁端部が弾性範囲に留まっていることを示すため最大変形時の梁端部ひずみ： ${}_b \epsilon$ も併せて示す。図7(a)では、考察を容易とするため柱梁を剛接合とした架構の降伏水平耐力： P_{fy} (43.8kN) と降伏水平変位： δ_{fy} (18.7mm) の解析値で無次元化した値も示す。

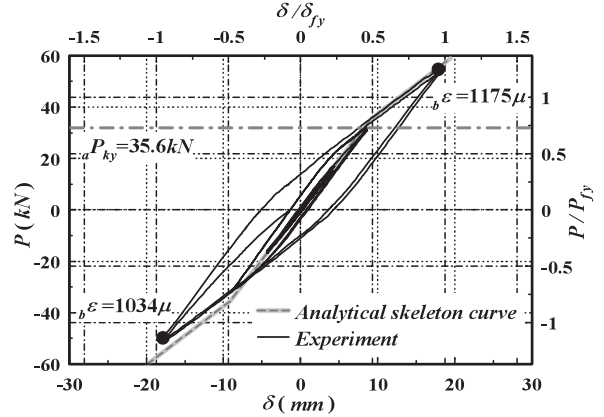
5.1 弾性剛性・降伏耐力

表2より、実験値と解析値を比較すると、NC及びNC-SC試験体において初期剛性・除荷剛性とも良好に対応している。SC試験体では、除荷剛性は良好に対応しているものの、初期剛性は1.25と高い値を示している。これは、転造ねじボルト導入した初期軸力の影響により最外列ボルトが早期に降伏したためである。柱梁を剛接合した架構の剛性との比較では、NC試験体では約1.7倍、NC-SC試験体では約1.4倍の剛性上昇が確認できる。

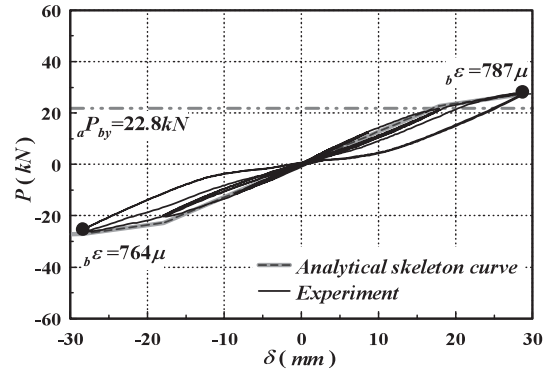
降伏耐力では、NC試験体では若干低い値となるものの、各試験体ともほぼ良好に対応している。

5.2 復元力特性

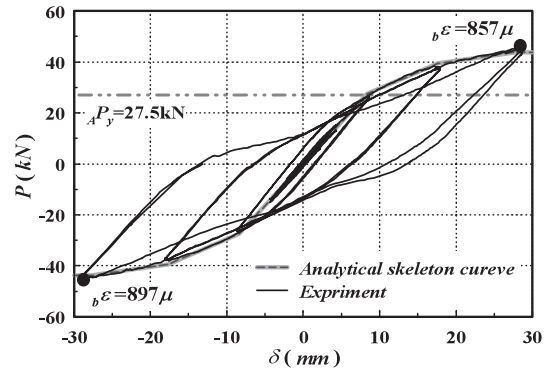
図7.(a)より、NC方杖で補強すれば、1/250rad ($\delta_{ky}=8.4\text{mm}$) の小さな層間変形角時において方杖が降伏し、楔が貫入限界変位に達するまでは、スリップ現象は起こさず、Bi-linear型復元力特性となっている。また、解析結果による骨格曲線とほぼ良好に対応している。



(a) NC 試験体



(b) SC 試験体



(c) NC-SC 試験体

図7 水平荷重-水平変位関係

梁端部のひずみ値： ${}_b \epsilon$ は1000 μ 程度と弾性域に留まっており、方杖の塑性伸びによりエネルギー吸収していることが分かる。

最終サイクル時の耐力は、柱梁を剛接合した架構の降伏

耐力： P_{fy} と比較して2割程度上昇している。このことから、耐震補強に有効であると言える。

図7.(b)より、中央のボルトが弾性範囲内である、弾性限界変位： $\delta_{by}=28.6\text{mm}$ までは、残留変形がほとんど無く、原点を指向するSC性能が実現できる。また、スリップ現象が生じない安定したBi-linear型復元力特性を示し、骨格曲線と良好に対応している。

梁端部のひずみ値： ϵ は760～780 μ 程度と弾性域に留まっていることから、転造ねじボルトのエネルギー吸収が期待できる。

図7.(c)より、履歴性状は、初期時の1/500rad程度までは、NC方杖による剛性が付与され、方杖降伏以降は、漸増する毎にエンドプレート作用する曲げモーメントが大きくなり、SC試験体の履歴性状に近づいていく。骨格曲線と良好に対応しているため、NC方杖効果とSC性能付き柱梁接合部架構の履歴特性の総和になると考えられ、Tir-linear型復元力特性を示す。

NC試験体では、梁上部変位20mm程度が梁端部の弾性限界であるが、NC-SC試験体では、梁端部のひずみ値： ϵ は760～780 μ 程度と、1/70rad($\delta=28.6\text{mm}$)の大変形下においても弾性に留まり、サステナブル構造システムに実用的であると考えられる

6. 結 論

本研究では、ト字型柱梁接合部の耐震補強と新接合システムを対象として、柱梁接合部の各隅に、ノンコンプレッション方杖を設置した試験体、セルフセンタリング性能を有した新接合システムの試験体及び、ノンコンプレッション方杖の機構とセルフセンタリング性能を併用した試験体について、漸増繰返し水平載荷試験を行いそれらの履歴性状について検討した。

その結果、以下のような結論が得られた。

- 1) NC方杖によりト字型接合部の耐力及び剛性が上昇し、かつ、安定したBi-linear型復元力特性を示し、耐震補強に有効である。
- 2) 柱と梁を楔付き転造ねじボルトで接合することにより、原点指向型復元力特性となり残留変形を低減できるSC性能を実現できる。また、スリップ現象が生じないため、転造ねじボルトによるエネルギー吸収性能が期待できる。

3) NC方杖およびSC性能の両機構を併用することにより、Tir-linear型復元力特性を示す。その復元力特性は、SC性能にNC方杖効果を累加することで求められる

4) SC、NC-SC試験体において、大振幅下においても柱及び梁は弾性状態を保持し、サステナブル機能システムに、エネルギー吸収性能を付与することが可能である。

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、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、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, 小畑寛行, 竹内一郎: ノンコンプレッション方杖によるH形鋼柱梁接合部の耐震補強法, 鋼構造年次論文報告集, 第13巻, pp.215-222, 2005.11
- 2) 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗: ノンスリップ型鉄骨露出柱脚の復元力特性モデル, 構造工学論文集, Vol.51B, pp.293-302, 2005.3.
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 高松隆夫, 玉井宏章, 小持明宏: ノンコンプレッション・プ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.
- 6) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂出版, 1985.3

