

楔デバイス付柱梁接合部の載荷実験

高松 隆夫*・山西 央朗**・玉井 宏章*・田邊 真二郎***・弘永 佑太***

(平成22年11月2日受付)

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

Takao TAKAMATSU, Teruaki YAMANISHI, Hiroyuki TAMAI, Shinjiro TANABE and Yuta HIRONAGA

(Received Nov. 2, 2010)

Abstract

Beam-to-column connections with a wedge device show linear-from-origin-type restoring force characteristics and can possess self-centering capability that reduces residual horizontal displacements of a structure acted by an earthquake force. The connection with the wedge device can be used at an outer column, but it can hardly to be applied to an inner column. This paper proposes a new idea that the wedge device can be installed the beam-to-column connection of the inner column. An experimental study on the beam-to-column connection with the wedge device of the inner column subjected to cyclic loadings was carried out. The experimental results showed that the cyclic characteristics became linear-from-origin-type in loadings and oriented-to-origin-type in unloading.

Key Words: non-slip-type resotoring force characteristics, wedge-device, Beam-to-column connection, loading tests

1. はじめに

近年の構造物に要求される性能の中に、構造物の損傷を抑えて地震直後の耐震性能（残留変位を生じず、地震に対する抵抗力を有している状態）を確保し、更に、補修が簡便で次の地震に対して直ぐに対応可能であるという性能（構造物の継続使用）を有することが期待されている。このような要求性能に対して、接合部に原点を指向する復元力特性を付与する工法、制振ダンパーを用いて応答を抑える工法など、多くの研究が行われている¹⁻⁵⁾。

著者等もこれまでに、露出柱脚に楔デバイスを用いることで、アンカーボルト降伏後も外力が除去されると柱脚回転角が常に0に戻り残留変形を低減できる性能を有した、

ノンスリップ型露出柱脚を提案している⁶⁻¹⁰⁾。また、この機構を柱梁接合部に導入することにより、母材（柱、梁）を弾性状態に留め、更に、残留変形を低減できることも示している^{11,12)}。これにより、地震後も構造物の継続使用が可能となると考えている。加えて、補修方法もボルト交換といった簡便なものである。

しかしながら、これまでに提案してきた柱梁接合部は、接合ボルトが柱断面を貫通して取り付けいていたため^{11,12)}、中柱へは適用できなかった（図1(b)）。

そこで、本論文では、接合ボルトを柱断面外に設けるためのブロック（接合ボルトがを設置する部位）を設け、ブロックを柱梁接合部に溶接接合した試験体の載荷実験を行い、中柱型柱梁接合部に楔デバイス付接合部を適用する。

* 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

*** 広島工業大学大学院建設工学専攻

表 1 素材特性

| 材質 | E (kN/mm ²) | σ_y (N/mm ²) | σ_u (N/mm ²) | σ_y/σ_u (%) | ϵ_f (%) | |
|---------|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------|----|
| 柱フランジ | SS400 | 205 | 290 | 430 | 67 | 31 |
| 柱ウェブ | SS400 | 205 | 302 | 434 | 70 | 36 |
| 梁フランジ | SS400 | 205 | 310 | 423 | 73 | 17 |
| 梁ウェブ | SS400 | 205 | 361 | 439 | 82 | 29 |
| エンドプレート | SS400 | 205 | 253 | 423 | 60 | 37 |
| リブプレート | SS400 | 205 | 274 | 412 | 67 | 46 |
| 転造ねじボルト | ABR400 | 205 | 294 | 435 | 68 | 39 |

E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力度 σ_u : 引張強さ σ_y/σ_u : 降伏比 ϵ_f : 伸び量

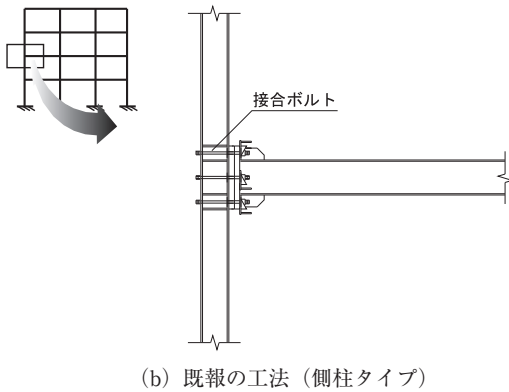
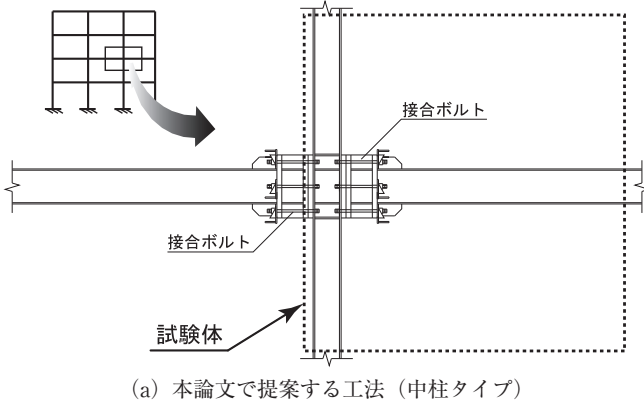


図 1 楔デバイス付接合部の適用図

また、ブロックの設置位置を変数とし、それぞれの性能の違いについても検討、考察を行う。

2. 実験概要

試験体の階高、スパン長や断面性能を一般的なものの 1/3 程度とし、中柱とそれに取り付く片側の梁とを取り出した T 字型試験体を用いる (図 1 (a) 参照)。T 字型試験体とすることで、柱の応力状態が実際のものとは異なるが、本機構における柱は弾性体であり、更に、柱フランジ補剛プレート (後述の図 2 (d) 参照) およびダブルプレートによって接合部パネルは降伏しない。よって、応力状態の差異が復元力特性に与える影響は無視できるものと考え、T 字型試験体を用いている。

また、接合ボルトによる最大耐力を梁の全塑性モーメントの 80% 程度とし、母材を弾性状態に留める。

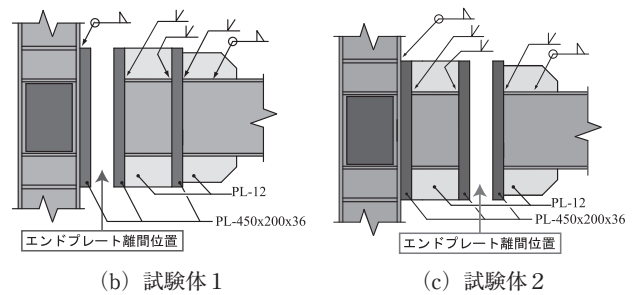
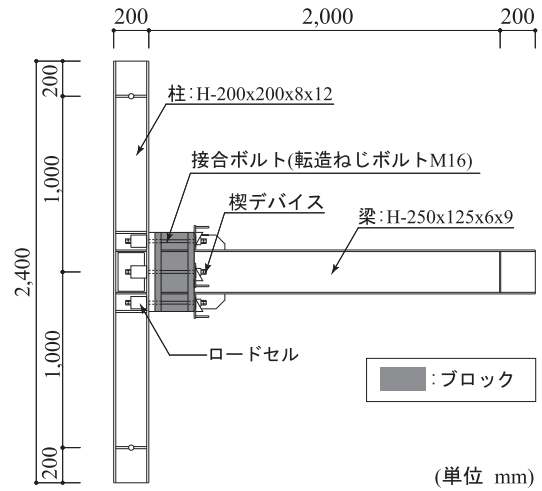


図 2 (a) ~ (c) 試験体

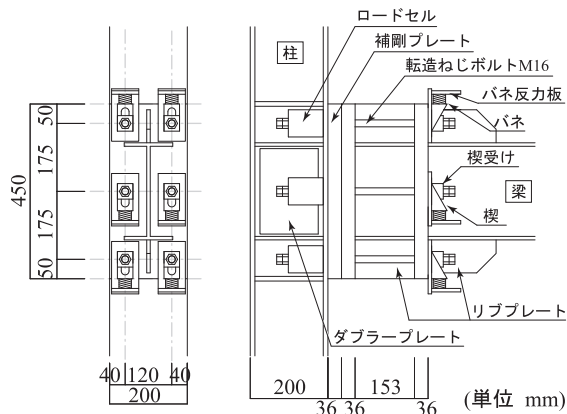
2.1 試験体

図 2 に試験体を、表 1 に素材特性を示す。

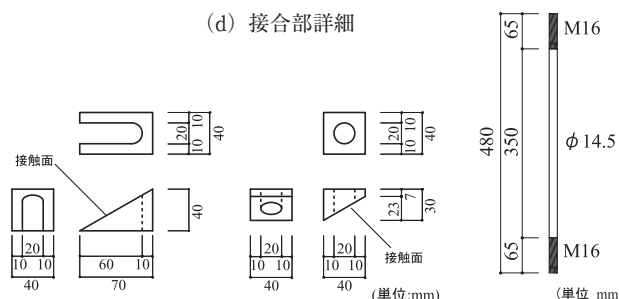
本実験では、図 1 (a) に示すように、中柱に取り付く左右の梁それぞれを独立した接合ボルトで接合して、梁端毎に期待する性能 (原点立上り型および原点を指向する復元力特性) が得られる工法としている。また、試験体は、水平荷重に対する各部材の曲げモーメントの反曲点位置までを取り出したものとする。

試験体の柱には H-200x200x8x12、梁には H-250x125x6x9、接合ボルトには転造ねじアンカーボルト M16、エンドプレートには PL-450x200x36 を使用する。接合ボルトは 3 列に 2 本ずつ、計 6 本を配置し、楔デバイスを介してダブルナットにより梁端部を柱に接合する。また、梁フランジレベルで囲われる領域をパネルゾーンとして耐力を算出し、接合部の最大耐力に対して十分な耐力を有していなかったため、ダブルプレート PL-220x150x4.5 を隅肉溶接接合して補強する。

中柱において左右に取り付く梁毎に楔デバイス付接合部の機構を独立させるためには、それぞれ、独立したボルトで梁を接合する必要がある。しかしながら、エンドプレートのみでは、接合ボルトの有効長さが十分に確保できず、従来のディテールと比較して、接合ボルトの累積塑性変形倍率が增大することが推測される。そこで、本実験で使用する試験体においては、柱と各梁との間にブロックを設ける。



(d) 接合部詳細



(e) 楔デバイス

(f) 転造ねじボルト

図2 (d) ~ (f) 試験体

このブロックは、2枚のプレート PL-450x200x36 で梁 H-250x125x6x9 を挟み込んで、接合ボルトの有効長さ領域を確保するディテールとなっている。また、柱・梁間の応力伝播をスムーズにするため、リブプレート PL-12 を設ける。但し、エンドプレートは、フランジフェイスライン上に仮定したヒンジラインを用いて、降伏耐力を降伏線理論より算出し、エンドプレートと柱間に生じる接触反力（引張り側接合ボルト降伏軸力の総和）に対して崩壊しないように設計している¹³⁾。尚、ブロックは梁端部に完全溶込み溶接接合した試験体1、柱側に全周隅肉溶接接合した試験体2の、計2種類を用意した。また、接合ボルトに初期軸力として、軸部降伏軸力の30%と80%とを導入した、計4体について、実験を行う。

2.2 楔デバイス付柱梁接合部の概要

図2 (d) 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。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。

2.3 荷重装置と荷重方法

荷重装置を図3に示す。荷重は、試験体を90度回転させて、柱上下端をピンを介して反力梁に設置する。また、反力柱に取り付けた油圧ジャッキを梁端部に設置し、梁端

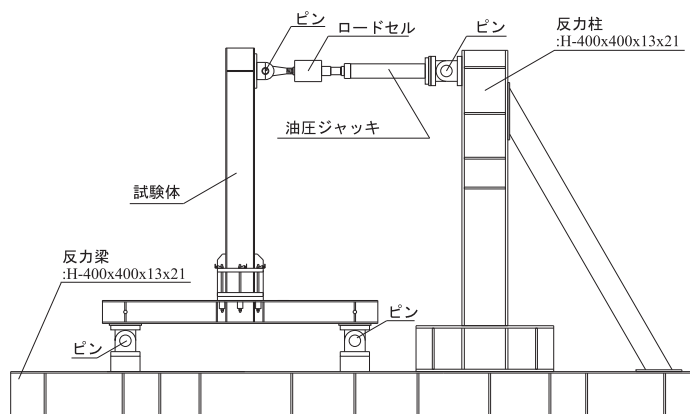


図3 荷重装置

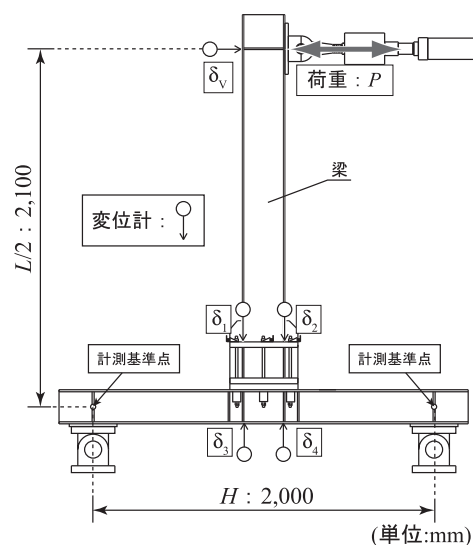


図4 計測位置

部の変位から算出した層間変形角 r_i を制御値とした正負交番繰返し荷重を行う。荷重サイクルは、1/1000, 1/500, 1/250, 1/125, 1/75radの各振幅を2サイクルずつ行う。尚、梁の横座屈を防止するため、荷重点の構面外たわみを抑えている。

2.4 計測方法

図4に計測位置を示す。計測は、柱上下端部を計測基準点とし、梁上端部の変位 δ_v 、エンドプレート左右の鉛直変位 δ_1, δ_2 、及びエンドプレート位置の柱左右の鉛直変位 δ_3, δ_4 を変位計により、梁端部に作用するの荷重 P を油圧ジャッキ先端に取り付けたロードセルにより、ボルト軸力 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セルにより、それぞれ、計測している。

また、層間変形角 r_i 、エンドプレート回転角 θ を次式により算出する。

$$r_i = \frac{\delta_v}{L} \dots \dots \dots (1.a)$$

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

表2 楔デバイス付接合部特性値

| K_I (kNm/rad) | K_{II} (kNm/rad) | M_Y (kNm) | M_U (kNm) |
|--------------------|--------------------|-------------|-------------|
| 8.92×10^9 | 1.32×10^9 | 23.27 | 33.07 |

K_I : 弾性剛性 K_{II} : 2次勾配 M_Y : 降伏曲げモーメント
 M_U : 最大曲げモーメント

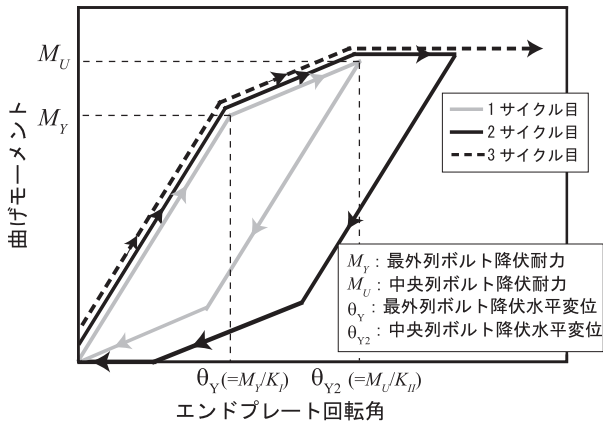


図5 履歴モデル

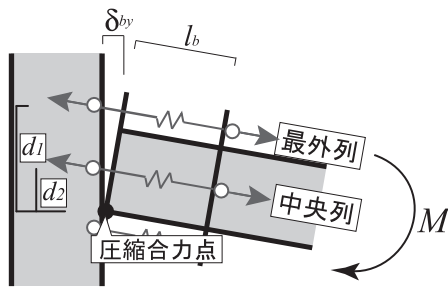


図6 抵抗機構

ここで、 L は載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間の距離である。

3. 評価方法

接合部の履歴モデルを図5に、表2に楔デバイス付接合部の特性を示す。図中へは、漸増繰返し載荷における履歴を示す。また、圧縮合力点位置及び回転中心位置を同じ位置と仮定し、梁断面図心から圧縮合力点位置迄の距離を $d_e=d_2=125\text{mm}$ としたときの抵抗機構を図6に示す。

梁端部に曲げモーメントが作用すると、ボルトに伸び変形が生じ、エンドプレートが回転する。更に載荷すると、ボルトが降伏・塑性伸びする。この時、除荷と共に生じる塑性伸びによるエンドプレートとナットとの間の隙間に楔が貫入する。このため、図5に示すように再載荷したときには、原点立上り型の復元力特性となる。

更に、2列のボルトが抵抗して、弾性範囲のボルトが存在する場合には、原点を指向する復元力特性が得られる。

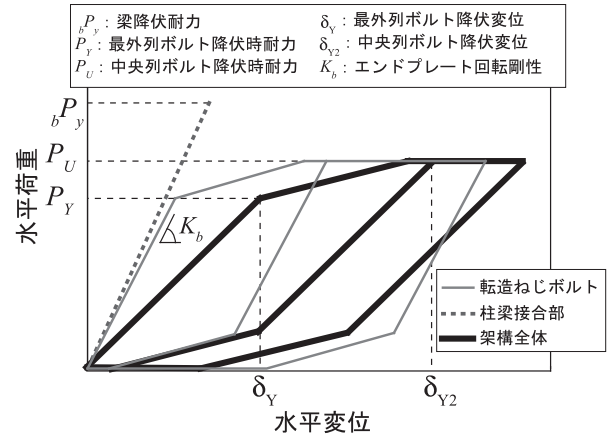


図7 復元力特性モデル

3.1 耐力評価

耐力評価については、中央列ボルト降伏時抵抗力 P_U を梁の降伏耐力 P_b 以下に設定しなければならない。

図6の抵抗機構から、最外列ボルト降伏時抵抗力 P_Y と中央列ボルト降伏時抵抗力 P_U は、次式により求められる。

$$P_Y = \frac{n \cdot T_Y \cdot (d_1 + d_2^2/d_1)}{L_b} \dots\dots\dots (2.a)$$

$$P_U = \frac{n \cdot T_Y \cdot (d_1 + d_2)}{L_b} \dots\dots\dots (2.b)$$

ここで、 n はボルト本数、 T_Y 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(図4中の $L/2$)である。

3.2 弾性剛性

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剛性は次式より求めることができる。

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

ここで、 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ボルト軸心までの距離、 l_b はボルト有効長さ、 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であり、 $R=2$ を採用している。

尚、水平変位 δ_v 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、降伏変位 δ_Y は次式より求められる。

$$\delta_Y = \frac{P_Y}{K_f} + \frac{P_Y}{K_b} \dots\dots\dots (4)$$

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.a)、(2.b)の各耐力と、式(4)より求められる水平変位を用いて、Tri-linear型とする。また、いかなる載荷

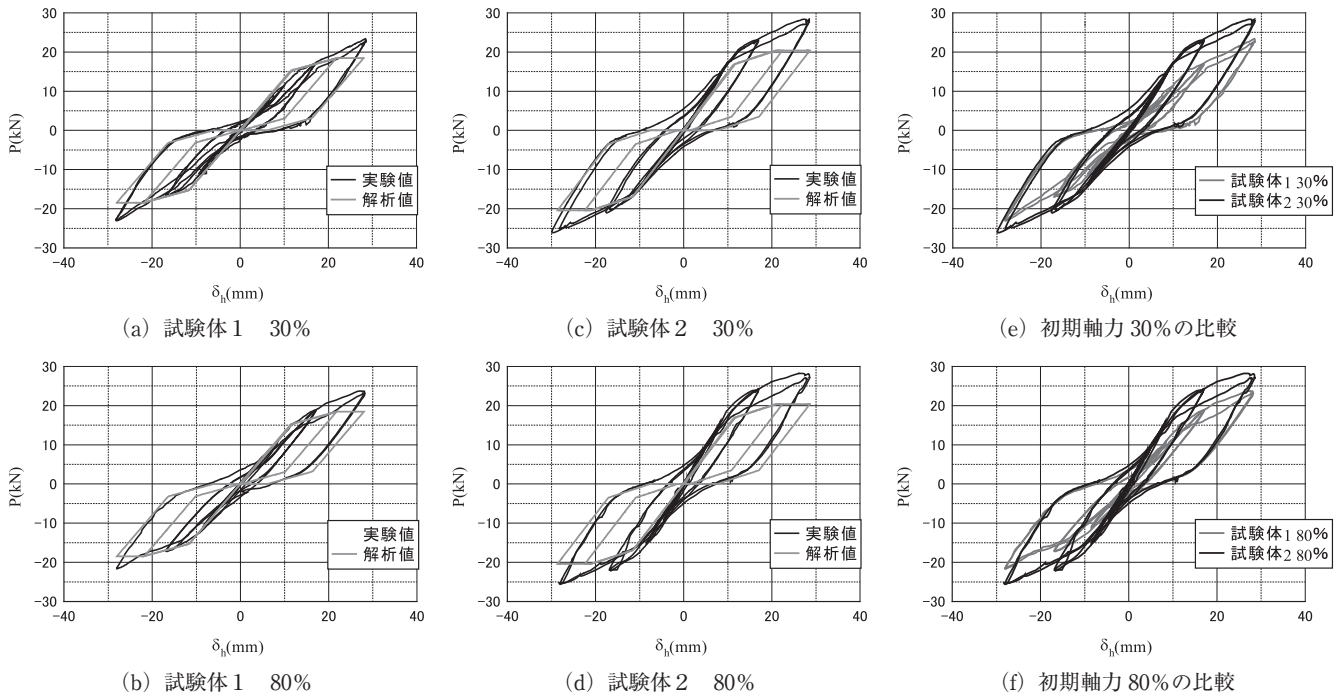


図8 (a) ~ (f) 水平荷重-水平変位関係

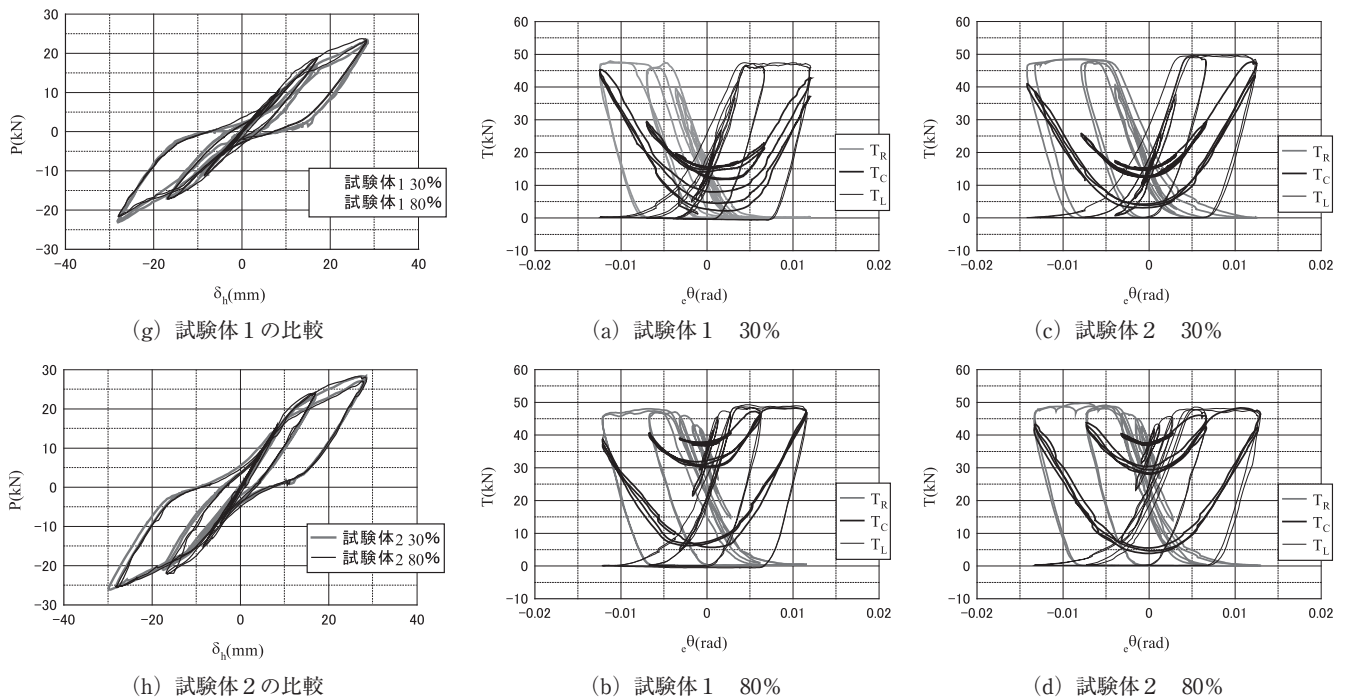


図8 (g) ~ (h) 水平変位-水平変位関係

図9 ボルト軸力-エンドプレート回転角関係

下においても、原点より荷重が上昇する。

尚、文献11)では、エンドプレート離間耐力を考慮して復元力特性モデルを作成していた。しかし、本実験で使用了試験体には、溶接によるエンドプレートの湾曲が見られた。湾曲していると、荷重初期(回転角が0.005rad以下)の時に、 $d_c \neq 0$ となり、エンドプレート回転に対する接合ボルトの抵抗力が小さくなるため、本論文では、復元力特性のモデル化において、ボルト初期軸力による離間耐力の増加を考慮していない。

4. 結果と考察

図8に、実験結果と解析値の水平荷重 P -水平変位 δ_v の関係を、図9に、ボルト軸力 T -エンドプレート回転角 θ の関係を示す。

尚、図9中には、各列のボルト軸力を T_L , T_C , T_R としてそれぞれ記している(図5参照)。

4.1 水平荷重 - 水平変位関係

図8 (a) ~ (d) より、エンドプレート離間位置や初期軸力の大きさに関わらず、原点立上り型および原点を指向する復元力特性を示している。また、実験値と解析値はほぼ対応しているものの、実験結果の耐力が高目になっている。これは、モデルの圧縮合力点位置が、梁フランジ位置に固定してあるのに対して、実験では回転と共にエンドプレート端部へと推移していったためである¹²⁾。

図8 (e) ~ (f) より、試験体1よりも、試験体2の耐力・剛性が高目なことがわかる。これは、エンドプレート離間位置の耐力は一定であるのに対して、載荷点からエンドプレート離間位置までの距離が短い（モーメントアームが小さい）試験体2の方が、梁せん断力が高めになり、結果として、柱梁接合部の見かけの耐力が増加するためである。

図8 (g) ~ (h) より、初期軸力を30%と80%とした場合では、履歴に大きな差異が生じていない。本来、エンドプレート形式の接合部ボルトに初期軸力を導入すると、離間耐力の増大、降伏変位の減少が生じる。しかしながら、本実験で用いた試験体のエンドプレートが湾曲しており、変形が小さい領域ではエンドプレート回転中心位置が、柱図心線上に位置するため、初期軸力導入による効果が明瞭には現れていない¹¹⁾。

4.2 ボルト軸力 - エンドプレート回転角関係

図9 (a) ~ (d) より、いずれの試験体の除荷時においても、エンドプレート回転角が0になる前に、圧縮側の最外列ボルト（例えば、正方向除荷時の T_R ）が抵抗を開始している。これは、溶接によってエンドプレートが湾曲していたため、回転中心位置が最外列ボルトよりも梁図心方向に在り、回転角が0に戻る前に圧縮側ボルトに伸び変形が作用したためである。

更に、試験体2の方が早期に抵抗を開始していることがわかる。これは、ブロック側のプレートも、溶接によって湾曲していたためと考えられる。また、試験体2の方が、エンドプレートの最大回転角が大きくなっているため、ボルト伸び量が大きくなる。これは、載荷点からエンドプレート離間位置までの距離が試験体1よりも短いためである。

5. 結論

本研究では、中柱における楔デバイス付柱梁接合部を導入する工法を用いた試験体の正負交番繰返し載荷を行い、以下のような結論を得た。

- 1) 本論文で示す工法によって、中柱の柱梁接合部に楔デバイス付柱梁接合部を導入できることがわかった。このため、中柱にも、原点立上り型および原点を指向す

る復元力特性を付与できる。

- 2) ブロックを柱側に設置することで、耐力、剛性、エネルギー吸収量が増加する。

エンドプレートの湾曲によって、初期軸力が増加した場合の差異が見られなかった。今後、エンドプレートの湾曲による影響を回避する方法を検討する必要がある。

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、試験体作成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わします。

参考文献

- 1) 中島正愛, 吹田啓一郎, 池永昌容, 松宮智央, 倉田真宏: セルフセントリング導入による鋼構造骨組の残留変形低減効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.765-766, 2004.8.
- 2) J.M.Ricles, R.Sause, S.W.Peng, L.W.Lu: Experimental evaluation of earthquake resistant posttensioned steel connections, ASCE Journal of structural engineering, pp.850-859, 2002.7.
- 3) 池永昌容, 松宮智央, 倉田真宏, 中島正愛, 吹田啓一郎: セルフセントリング導入による鋼構造骨組の残留変形低減効果, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp.163-168, 2004.11.
- 4) 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛, 吹田啓一郎: ダンパー付セルフセントリング柱脚の開発と大変形下の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.643-644, 2005.9.
- 5) 池永昌容, 長江拓也, 中島正愛, 吹田啓一郎: 残留変形低減をめざしたセルフセントリング柱脚の開発と載荷実験, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp.223-230, 2007.2.
- 6) Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI: Non-slip-type restoring force characteristics of exposed-type column base, Journal of Constructional Steel Reserch, Vol.61, pp.942-961, 2005.
- 7) 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.51 B, pp.293-302, 2005.4.
- 8) 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ト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.
- 9) 玉井宏章, 高松隆夫, 山西央朗, 白木剛, 多田元秀 :
統合化評価法を用いた実大ノンスリップ型露出柱脚の
仮動的実験, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻,
pp.269-276, 2006.11.
- 10) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: アンカーボ
ルトを多数配列したノンスリップ型露出柱脚の復元力
特性 - 無軸力下の場合のセルフセンタリング性能 -,
日本建築学会構造系論文集, 第621号 pp.155-162,
2007.11.
- 11) 高松隆夫, 玉井宏章, 山石健司, 山西央朗: エンドブ
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, 第16巻, pp.237-244, 2008.11.
- 12) 山西央朗, 高松隆夫, 玉井宏章, 松尾彰: 単調載荷下
における鉄骨露出柱脚のFEM解析, 鋼構造年次論文
報告集, 第14巻, pp.689-696, 2006.11.

