

長締めボルトを用いた楔デバイス付梁継手の実験的研究

高松 隆夫*・玉井 宏章**・景山 朋定***・國井 翔平****

(平成25年10月30日受付)

Experimental study on beam connection with wedge-device used long-length bolt

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Tomosada KAGEYAMA and Shohei KUNII

(Received Oct. 30, 2013)

Abstract

The wedge-device used long-length bolt is proposed to solve problems of the beam connection with the wedge-device. Loading tests of the beam connection are conducted to examine the restoring force characteristics. Cyclic loading tests of T-type specimen with long-length-bolted connection show increase-from-origin-type restoring force characteristics with less stiffness.

Key Words: wedge-device connection, End plate type, Loading test

1. はじめに

本研究室では、楔デバイスを用いたボルト降伏型の接合部の研究を行っている^{1)~9)}。これは、鋼構造物が大地震時における過大な水平力を受けた際、通常の架構であれば部材の損傷によって生じる残留変形を低減する性能を有している。特に、梁継手にこの接合方法を適用したものを楔デバイス付梁継手と呼ぶ。楔デバイス付梁継手の特徴として、①ボルト降伏型でありながら継手位置を調整することで、高力ボルト摩擦接合した場合と同等の保有水平耐力が得られる。②梁継手位置に塑性ヒンジを形成させるため、柱梁接合部での脆性破断を回避できる。③楔デバイスのボルトの塑性伸びを埋める効果により、スリップ現象を起こさない原点立上り型復元力特性を持つ。

しかしながら、これまで提案していた本継手のディテールでは、弾性回転剛性の低下や、楔デバイスが十分に機能しないことに起因するスリップ現象が起こることが考えられた。これらの理由だが、まず、弾性回転剛性については、エンドプレートの面外変形により、接合部が理想的に回転

しない場合に低下する。スリップ現象については、ボルトの曲げ変形により、楔と楔受けにズレが生じ、楔が有効に貫入しない場合に起こる。

そこで、本論文では、これらの問題点を解消する楔デバイス付梁継手の新たなディテールを提案し、載荷実験により接合部の性能を確認する。

2. 工法概要

2.1 楔デバイス

図1に楔デバイスを示す。

楔デバイスはボルトの塑性伸びによって生じる間隙を埋める効果を持つ。これにより、スリップ現象を防ぎ、原点立上り型復元力特性を接合部に付与できる。設置はナット-エンドプレート間に楔と楔受けを、楔と反力板の間に、楔を貫入させるためのバネを設置する簡潔なものである。尚、楔および楔受けの接触面は発錆処理を施し、ボルトから伝達される圧縮力の接触面方向力に対して滑らないよう静止摩擦係数を増大させる。

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 長崎大学工学部工学科

*** 広島工業大学大学院工学研究科知的機能科学専攻

**** 広島工業大学大学院工学研究科建設工学専攻

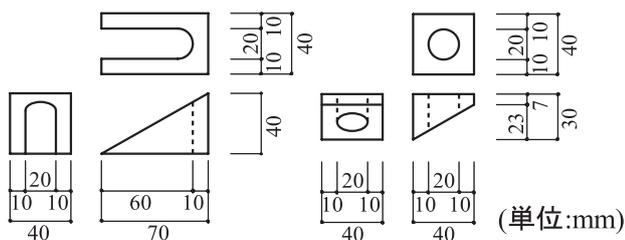


図1 楔デバイス

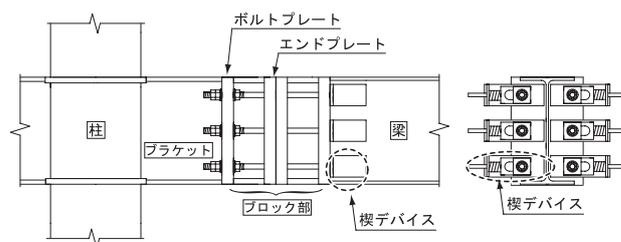


図2 楔デバイス付梁継手

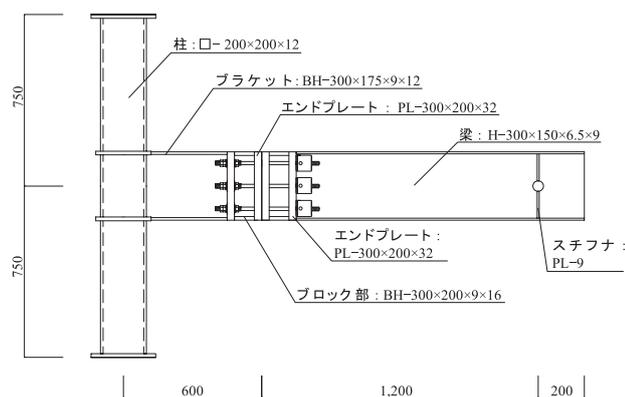


図3 試験体

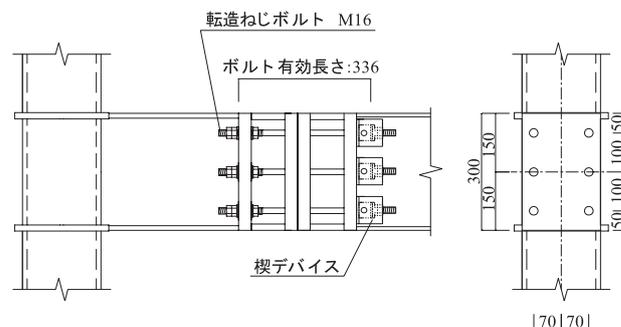


図4 接合部詳細図

2.2 ディテール

図2に楔デバイス付梁継手を示す。

提案する工法の変更点はボルトプレートを追加したことである。接合ボルトはこのボルトプレートに緊結させる。これにより、エンドプレートには接合部回転中心位置の圧縮力を、ボルトプレートには接合ボルトの反力をそれぞれ別々に作用させるため、エンドプレートに面外変形が生じにくい。また、ボルトプレートの位置によってボルトの有効長さを変更できるため、接合部弾性回転剛性の調整が容易になる。さらに、楔デバイスをボルトプレートに設置すれば、楔デバイスの位置でのボルトの曲げ変形の影響は無くなり、楔が理想的に機能できる。内ナットは片側のみに設けて楔デバイス側のみに塑性伸びが発生するようにしている。尚、回転中心位置での圧縮力が過大になることで、局部座屈を生じる恐れがあるため、ブロック部フランジ厚を大き目にする。

本工法は、エンドプレート形式の接合部で一般的な柱梁接合部位置でボルト接合せず、ブラケットを設けているため、接合部の位置がスパン中央方向へ移動する。このため、ボルト接合部の耐力を変化させることなく架構の保有水平耐力を上昇させ、更にブラケットの材長によって調整も可能な機構となっている。さらに、ブラケットを設けることで、角形・円形鋼管柱にも適用可能な形状である。

ブラケットの断面は梁の全塑性モーメントに対して弾性状態を保つものとし、梁からの応力伝播を考慮し、梁と同一とする。

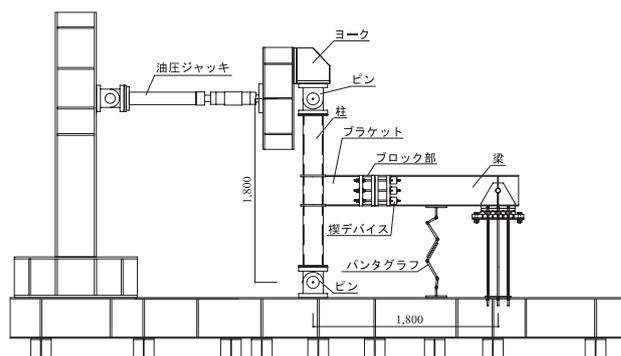


図5 荷装置

3 実験概要

3.1 試験体

図3に試験体を、図4に接合部詳細図を、表1に素材特性を、表2に接合部特性を、それぞれ、示す。

試験体にはト字型試験体を用いる。柱には□-200x200x12を、梁にはH-300x150x6.5x9を、アンカーボルトには転造ねじアンカーボルト M16を使用した。ボルト接合部は、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接合する。

ブラケットの断面性能について、成は、梁からの応力伝播を考慮して梁と同一とする。更に梁の全塑性モーメントに対して弾性状態を保持する必要があるため、ブラケット断面をBH-300x175x9x12とした。ブロック部はフランジの局部座屈防止のため、BH-300x175x9x16とした。エンドプレート・ボルトプレート厚はボルト径の2倍である32mmとして面外変形に対して安全側に設計している。エ

表1 素材特性

部材	材質	ヤング係数 E (N/mm^2)	降伏応力度 σ_y (N/mm^2)	引張強さ σ_U (N/mm^2)	降伏比 σ_y/σ_U (%)	破断伸び (%)
柱	STKR400	205,000	460	515	89	19
梁フランジ	SS400	205,000	325	440	74	31
梁ウェブ	SS400	205,000	370	460	80	23
ブラケットフランジ	SS400	205,000	344	469	73	27
ブラケットウェブ	SS400	205,000	367	440	84	26
ブロック部フランジ	SS400	205,000	292	432	68	31
ブロック部ウェブ	SS400	205,000	381	447	85	23
転造ねじボルト	ABR400	205,000	291	444	66	32

表2 接合部特性

弾性回転剛性 K_I (kNm/rad)	2次勾配 K_{II} (kNm/rad)	降伏モーメント M_y (kNm)	最大モーメント M_U (kNm)
8.61×10^4	2.28×10^4	32.9	38.7

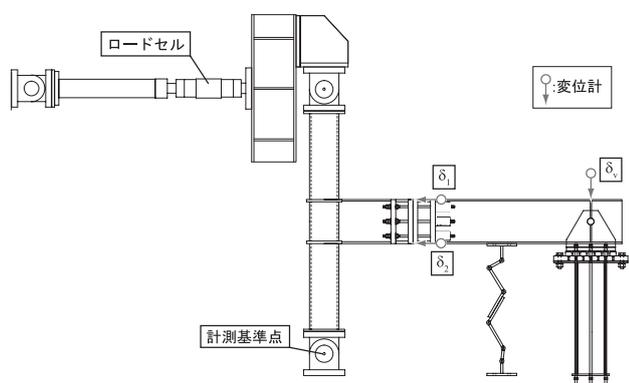


図6 計測位置

エンドプレートの板厚はボルトプレートを介しているため板厚を上げる必要はないと予想されるが、今回の実験ではこれらについて考慮していない。適正な板厚の設計は今後の課題である。

実験変数はボルトに導入する初期張力とし、降伏の30%、70%とした2種類実験を行う。

3.2 荷重装置と計測方法

図5に荷重装置を、図6に計測位置を、それぞれ、示す。

荷重は、柱上端に取り付けたピンにヨークを介して設置した油圧ジャッキによって行う。油圧ジャッキは、ピン中心とジャッキ軸心が一致するように設置している。

試験体の支持状態としては、柱下端部をピン支持、梁先端をピンローラー支持としている。また、梁の横振れ止めとして、梁中央部にパンタグラフを設置している。

計測値として、油圧ジャッキ先端に設置したロードセルより荷重 P を、梁端部に設置した変位計により、鉛直変位 δ_V 、エンドプレート離間量 δ_1 、 δ_2 をそれぞれ計測する。尚、 δ_1 、 δ_2 は、ブラケット側エンドプレートからの相対変位である。また、荷重 P より、ボルト接合部曲げモーメント M を、エンドプレート離間量 δ_1 、 δ_2 より、エンドプレ

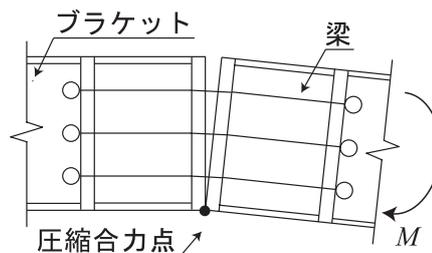


図7 抵抗機構

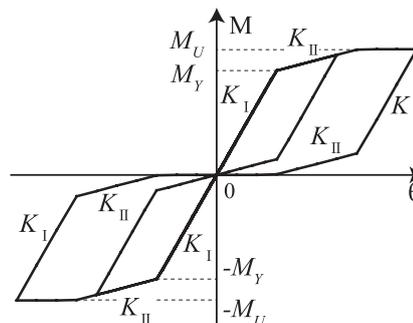


図8 復元力特性モデル

ト回転角 θ を算出する。

ボルト接合部曲げモーメント M 、エンドプレート回転角 θ は次式により算定する。

$$M = P \cdot L_B \quad \dots \dots \dots (3.2.1)$$

$$\theta = \frac{\delta_1 - \delta_2}{D} \quad \dots \dots \dots (3.2.2)$$

ここに、 P : 荷重、 L_B : 梁支点からボルト接合部までの距離、 D : エンドプレートに設置した変位計間距離である。

層せん断力 Q 、層間変形角 r は、以下の算定方法により求める。

$$Q = P \quad \dots \dots \dots (3.2.3)$$

$$r = \frac{\delta_V}{L_C} \quad \dots \dots \dots (3.2.4)$$

ここに、 L_C : 柱支点間距離である。

3.3 復元力特性モデル

図7に抵抗機構を、図8に復元力特性モデルを、それぞれ

れ、示す。

耐力評価について、各列ボルト降伏曲げモーメント M_{Yi} は、圧縮合力点位置からの曲げモーメントの釣り合いにより、次式より算定する。

$$M_{Yi} = n_i \cdot A \cdot \sigma_Y \cdot d_i \quad \dots \dots \dots (3.3.1)$$

ここで、 n_i :各列のボルト本数、 A :ボルト断面積、 σ_Y :ボルト降伏応力度、 d_i :圧縮合力点位置から各列ボルト軸心までの距離である。

各ボルト列の弾性回転剛性 K_i は次式により算定する。

$$K_i = \frac{E \cdot n_i \cdot A \cdot d_i^2}{R \cdot l_b} \quad \dots \dots \dots (3.3.2)$$

ここに、 E :ヤング係数、 l_b :ボルト有効長さ、 R :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、 $R=2^{10}$ を採用している。

復元力特性モデル算定式を以下に示す。

$$K_I = K_1 + K_2 \quad \dots \dots \dots (3.3.3)$$

$$K_{II} = K_2 \quad \dots \dots \dots (3.3.4)$$

$$M_Y = M_{Y1} + \frac{d_2}{d_1} M_{Y2} \quad \dots \dots \dots (3.3.5)$$

$$M_U = M_{Y1} + M_{Y2} \quad \dots \dots \dots (3.3.6)$$

$$\theta_Y = M_Y / K_I \quad \dots \dots \dots (3.3.7)$$

$$\theta_U = \theta_Y + (M_U - M_Y) / K_{II} \quad \dots \dots \dots (3.3.8)$$

ここに、 K_I :弾性剛性、 K_{II} :二次勾配、 M_Y :ボルト接合部降伏曲げモーメント、 M_U :ボルト接合部最大曲げモーメント、 θ_Y :ボルト接合部降伏曲げモーメント時のエンドプレート回転角、 θ_U :ボルト接合部最大曲げモーメント時のエンドプレート回転角である。

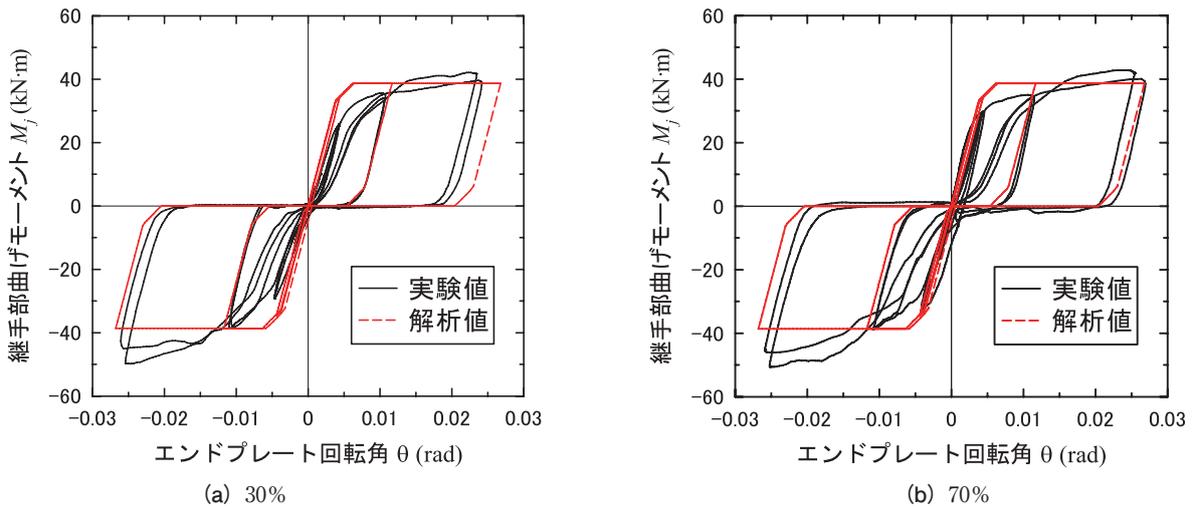


図9 接合部曲げモーメント M -エンドプレート回転角 θ 関係

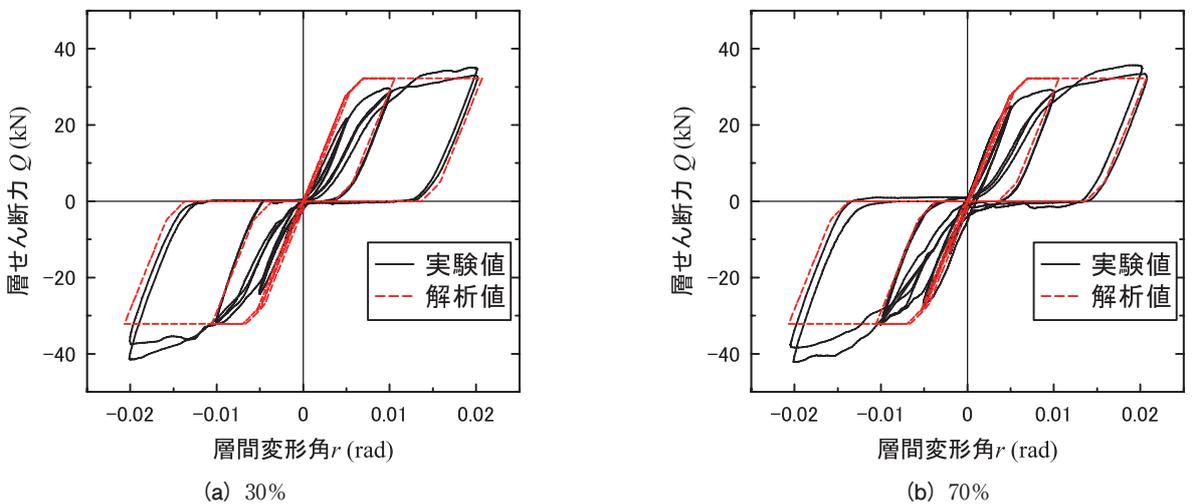


図10 層せん断力 Q -層間変形角 r 関係

4. 実験結果と考察

図9に接合部曲げモーメント M -エンドプレート回転角 θ 関係を、図10に層せん断力 Q -層間変形角 r 関係をそれぞれ、示す。

図9には解析値として復元力特性モデルを実験結果に合わせて示す。図10には解析値として下式を用いて求めた理論値を示し比較を行う。

層せん断力 Q -層間変形角 r 関係の弾性剛性、2次勾配については、ボルト接合部と、架構の弾性剛性を直列ばねとして加える。架構の弾性剛性 K については、以下の式を用いて算出している。

$$K = \frac{L_C}{\frac{2 \cdot (L_C/2)^3}{3 \cdot E \cdot I_C} + \frac{L_B^3}{3 \cdot E \cdot I_B} + \frac{L_{BR} \cdot (L_G \cdot (2 \cdot L_G + L_B) + L_B \cdot (2 \cdot L_B + L_G))}{6 \cdot E \cdot I_{BR}}} \quad \dots \dots \dots (4.1)$$

ここに、 I_C ：柱の断面2次モーメント、 I_B ：梁の断面2次モーメント、 L_{BR} ：ブラケットの長さ、 L_G ：梁支点から柱図芯までの距離、 I_{BR} ：ブラケットの断面2次モーメントである。

図9より、初期軸力を降伏の30%導入したものと70%としたもの共に常に原点より抵抗が始まっていることがわかるが、層間変形角 1/50 のサイクルで剛性の低下が見られる。これは、1/100 のサイクルで生じた塑性伸びを埋める際、重力により楔にズレが生じ、理想的に楔が貫入しなかったためである。しかしながら、他のサイクルでは、概ね実験値と解析値が対応しており、全てのサイクルで原点立上り型復元力特性を示している。

弾性回転剛性については初期軸力で比較して、30%より70%の方が若干ではあるが上昇している。層間変形角 1/100rad 以下のサイクルで曲げモーメントの最大値がモデルと一致していない。これはエンドプレートの弾性変形により、離間部が剛体的に回転せず、圧縮合力点位置がモデルより梁図芯側にあったためである。

図10より、層せん断力 Q -層間変形角 r 関係の理論値との対応も接合部曲げモーメント M -エンドプレート回転角関係のモデルとの対応と同様のものになっている。これは、楔デバイス付接合部のみに塑性ヒンジを形成させているためである。このため、接合部以外の母材の部分が塑性変形しておらず、載荷終了時の層間変形角が0に戻っており、架構に残留変形を生じていないことがわかる。

5. 結論

本論文では改良型楔デバイス付梁継手の提案を行い、載荷実験によりその性能を確認した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 改良型楔デバイス付梁継手は、接合ボルトを位置の変更ができるボルトプレートに緊結するため、回転剛性の調整が可能である。
- 2) 転造ねじアンカーボルトを長締めとするため、変形性能を確保できる。
- 3) 改良型楔デバイス付梁継手は、層間変形角 1/100 以下のサイクルで原点立上り型復元力特性を示し、1/50 のサイクルでは剛性がわずかに低下するが、ほぼ原点立上り型復元力特性を示す。

提案・検討している接合部は、エンドプレート間で接触・離間が発生する接合部形式である。このため、床スラブの影響や、柱の拘束効果による圧縮軸力¹⁾が生じ、ボルト接合部耐力の上昇や母材（梁・ブラケット）の降伏曲げモーメントが低下することが考えられる。その場合、母材が降伏・塑性変形等異なる崩壊機構が発生する可能性があるが、本論文では、これらを考慮できていない。今後、上述の影響を考慮した検討を行い、設計法を確立していく。

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。

試験体作製にあたりまして、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、感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 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.
- 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. 51 B, pp.293-302, 2005.4.
- 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) 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.
- 5) 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.
- 6) 山西央朗，高松隆夫，玉井宏章，松村高良，松尾彰：2軸曲げを受ける従来型およびノンスリップ型露出柱脚に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第73巻 第634号 pp.2223-2230，2008.12.
- 7) 景山朋定，高松隆夫，玉井宏章，山西央朗：楔デバイス付梁継手の載荷実験，日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），CD-ROM論文番号－22641，2012.9
- 8) 高松隆夫，玉井宏章，澤田樹一郎，田邊真二郎，山西央朗：楔デバイス付接合部を有した架構の保有水平耐力と最大層間変形角，鋼構造年次論文報告集，第19号，pp.755-760，2011.11.
- 9) 高松隆夫，玉井宏章，澤田樹一郎，山西央朗，景山朋定：楔デバイス付接合部を有する架構の地震応答性状，鋼構造年次論文報告集，第20巻，pp.807-814，2012.11.
- 10) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技法堂出版，1985.3.
- 11) 吉敷祥一，山田哲：高力ボルト半剛接合部に対する柱の拘束効果に関する基礎検討，鋼構造年次論文報告集，第17巻，pp.81-86，2009.11.