

楔デバイス付柱継手に関する解析的研究

高松 隆夫*・玉井 宏章**・景山 朋定***・國井 翔平****

(平成26年10月30日受付)

Analytical study on column joint with wedge device

Takao TAKAMATSU, Hiroyuki TAMAI, Tomosada KAGEYAMA and Shohei KUNII

(Received Oct. 30, 2014)

Abstract

A column joint with self-centering capability is proposed and numerical analysis of a structure with the column joint is carried out to clarify the self-centering performance of the structure. It is obtained from the analytical results that the frame with the proposed column joints shows equivalent stiffness to rigid column-base and no residual deformation after an earthquake grand motion.

Key Words: Self centering, wedge-device connection, End plate type, Earthquake response analysis

1. はじめに

鋼構造の露出柱脚には、アンカーボルトを強くし、柱を塑性化させるものと、アンカーボルトを弱くし、アンカーボルトを塑性化させる二つのタイプが存在する。前者は柱脚を保有耐力接合とするため、後者に比べ耐力が大きくなるが、柱に塑性ヒンジが形成され、柱に残留変形が生じる。後者は、アンカーボルトを降伏させるため耐力が落ちるが、残留変形が生じにくいと言われるスリップ型復元力特性を持つ。

本研究室では、地震後の継続使用を困難にする要素である残留変形が生じない構造物の実現を目指した研究を行っている。これは、柱脚に図1に示す「ノンスリップ型露出柱脚¹⁾」、梁継手に図2に示す「楔デバイス付梁継手²⁾」を導入したものであり、これらの接合部は、残留変形低減に効果のある原点立上り型復元力特性を有している。これらの接合部を総称して「楔デバイス付接合部」と呼び、この復元力特性を付与した架構をセルフセンタリング (SC) 架構と称する。

著者等は、SC 架構を設計する際、通常の架構の設計後、楔デバイス付接合部を別途設計し、そのまま適用するという手法で設計を行うことを目指している。しかしながら、

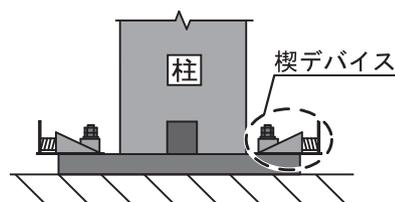


図1 ノンスリップ型露出柱脚

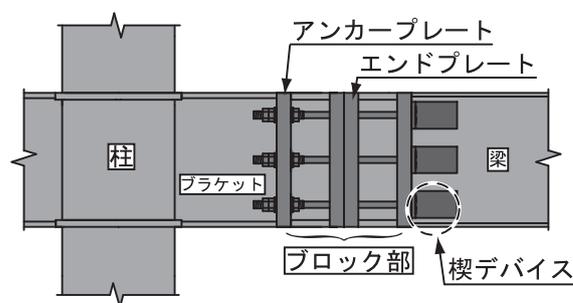


図2 楔デバイス付接合部

* 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系研究科知的機能科学専攻

**** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

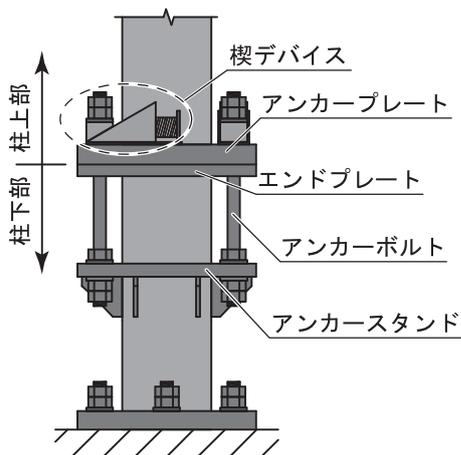


図3 提案する楔デバイス付柱継手

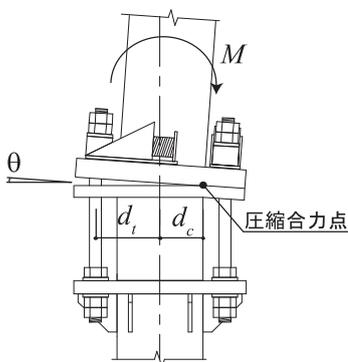


図4 抵抗機構

現在の中層程度の鋼構造物は柱脚を保有耐力接合とするものが多く、ノンスリップ型露出柱脚のようにアンカーボルトを降伏させる柱脚では、保有水平耐力が低下する。アンカーボルト降伏型で設計する場合、一層部分の層剛性が低下し、部材断面を大きくする必要がある。

また、楔デバイス付接合部はボルトに損傷を集中させ、損傷が大きくなったボルトは交換するものとしているが、ノンスリップ型露出柱脚ではアンカーボルトがコンクリートに埋め込まれているため、ボルト交換が困難であった。

そこで、本論文の目的は、上述の課題を解決する新しい接合部を提案し、それを適用した架構の性能を確かめることである。方法として、接合部形式を変数とした数値解析を行う。

2. 楔デバイス付柱継手

図3に提案する楔デバイス付柱継手を、図4に抵抗機構を、図5に力学モデルを、それぞれ、示す。

楔デバイス付柱継手は、柱下部と柱上部より構成される。柱下部にはアンカーボルトを定着させるためのアンカースタンドおよびエンドプレートを取り付ける。柱上部にはボルトを緊結させるアンカープレートおよび楔デバイスを取り付ける。アンカープレート・アンカースタンドは剛体と

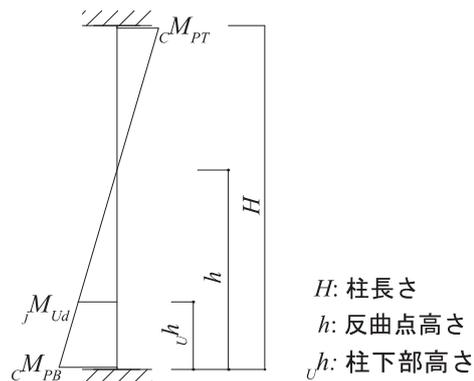


図5 力学モデル

H: 柱長さ
h: 反曲点高さ
h_c: 柱下部高さ

して設計し、エンドプレートを変形させ、圧縮合力点位置を柱フランジ外縁とする。アンカーボルトには伸び能力の高い転造ねじアンカーボルト³⁾を用いる。アンカースタンド側のアンカーボルトに内ナットを設け、ボルトの塑性変形が楔デバイス側に生じ、楔の貫入によって原点立上り型復元力特性を得る。柱下部と基礎コンクリートの接合は埋込み形式か保有耐力接合として十分な剛性・耐力を持った露出形式とする。

本工法の特徴として、柱下部の高さによって設計用継手耐力を定められ、柱下端に塑性ヒンジを作る場合と同等の保有耐力を得られる。ボルトを塑性化させるため架構に残留変形を生じず、楔デバイスによって原点立上り型復元力特性が得られる。また、アンカースタンド高さによりボルト長さが決められ、曲げ耐力を変えることなく弾性回転剛性を調整できる⁴⁾。ボルトは露出柱脚とは異なりコンクリートに埋め込まないため損傷したボルトの交換が容易に行える。

継手耐力設定は、架構の崩壊メカニズム時における曲げ応力から求める。継手曲げ耐力設定値 jM_{Ud} の算定式を以下に示す。

$$jM_{Ud} = \frac{|cM_{PB}| + |cM_{PT}|}{H} \cdot (h - h_c) \quad \dots (2.1)$$

$$h = \frac{|cM_{PB}|}{|cM_{PB}| + |cM_{PT}|} \cdot H \quad \dots (2.2)$$

ここに、 cM_{PT} 、 cM_{PB} ：崩壊メカニズム時の柱頭・柱脚の曲げモーメントである。

3. 解析概要

数値解析は静的増分解析と地震応答解析の2種類行う。

3.1 解析手法

解析には、「CLAP.F^{5,6)}」を楔デバイス付接合部の原点立上り型復元力特性を有する回転ばねが利用できるように

コード修正したものを用いる。部材の塑性化は、一般化硬化ヒンジ法により考慮し、部材の応力度-ひずみ度関係は、bi-linear型（降伏後剛性比1/100）としている。静的増分解析では、Ai分布に基づく外力分布による荷重を与える。地震応答解析では、ニューマークβ法のβ値0.25、数値積分時間間隔1/200秒、減衰のタイプは瞬間剛性比例減衰とし、一次減衰定数は、一般的な構造物を想定して0.02としている。入力波には、JMA Kobe波NS成分の速度を50kineおよび100kineに基準化した波を用いる。尚、床スラブの梁の合成効果による剛性・耐力の増加、柱脚の変動軸力による影響は考慮していない。

3.2 ボルト接合部評価式

図6に復元力特性モデルを、示す。

本解析では、ボルト接合部に図6に示す原点立上り型復元力特性を有する回転ばねを設置する。柱継手の特性値の算出には、以下の式を用いる。尚、梁継手は文献7)の式を用いている。

$$K = \frac{E \cdot n_i \cdot A \cdot (d_c + d_t)^2}{R \cdot l_b} \quad \dots (3.1)$$

$${}_j M_U = n_i \cdot A \cdot \sigma_Y \cdot (d_c + d_t) \quad \dots (3.2)$$

表1 部材断面リストと断面性能

層	種別	断面寸法	σ_y (N/mm ²)	I_x (mm ⁴)	Z_p (mm ³)	M_p (kNm)
1	柱	□-500x500x22	325	1.61x10 ⁹	7.55x10 ⁶	2,452
2		□-450x450x22	325	1.15x10 ⁹	6.05x10 ⁶	1,966
3		□-450x450x19	325	1.02x10 ⁹	5.30x10 ⁶	1,722
4		□-400x400x16	325	6.05x10 ⁸	3.54x10 ⁶	1,151
2	梁	H-650x250x12x25	325	1.44x10 ⁹	4.99x10 ⁶	1,621
	ブラケット	BH-650x300x16x28	325	1.91x10 ⁹	6.64x10 ⁶	2,157
3	梁	H-600x250x12x22	325	1.10x10 ⁹	4.11x10 ⁶	1,335
	ブラケット	BH-600x300x16x25	325	1.46x10 ⁹	5.52x10 ⁶	1,795
4	梁	H-550x250x9x19	325	7.71x10 ⁸	3.11x10 ⁶	1,011
	ブラケット	BH-550x300x12x22	325	1.05x10 ⁹	4.25x10 ⁶	1,382
R	梁	H-550x200x9x16	325	5.61x10 ⁸	2.31x10 ⁶	752
	ブラケット	BH-550x250x12x19	325	8.04x10 ⁸	3.31x10 ⁶	1,075

σ_y : 降伏応力度 I_x : 断面2次モーメント Z_p : 塑性断面係数 M_p : 全塑性モーメント

表2 回転ばね特性値

部位	K (kNm/rad)	${}_j M_U$ (kNm)
柱脚部	3.28x10 ⁵	3,131
1層側柱継手部	2.25x10 ⁵	536
1層中柱継手部	1.46x10 ⁵	232
2階梁継手部	5.51x10 ⁵	1,235
3階梁継手部	3.99x10 ⁵	968
4階梁継手部	2.96x10 ⁵	760
R階梁継手部	1.97x10 ⁵	504
4層中柱継手部	1.75x10 ⁵	423

表3 固有周期

モデル	1次固有 周期 (sec)
<i>N type</i>	1.02
<i>SC type</i>	1.15

K : 弾性回転剛性 ${}_j M_U$: 最大曲げ耐力

ここに、 K : 弾性回転剛性、 E : ヤング係数、 n_i : i 列目のボルト本数、 A : ボルトの断面積、 R : ボルト以外の要素の弾性変形を考慮した低減係数(=2⁸)、 l_b : ボルトの有効長さ(ナット間距離)、 ${}_j M_U$: ボルト接合部の最大曲げモーメント、 σ_Y : ボルトの降伏応力度である。

楔デバイス付柱継手の弾性回転剛性・曲げ耐力は露出柱脚のものと同様の算定式⁸⁾である。柱継手の評価式は、今後、実験により確かめるが、露出柱脚と似た抵抗機構であることから露出柱脚の式を用いる。

3.3 解析対象架構

図7に解析モデルを、表1に部材リストと断面性能を、表2に回転ばね特性値を、表3に固有周期を、それぞれ、示す。

解析モデルは「パッシブ制振構造設計・施工マニュアル⁹⁾」の4層4スパンモデルを基にする、側柱と中柱を含んだ魚骨モデルとしている。鉛直荷重は各接点に集中荷重として与えている。解析変数として、一般的な柱脚を保有耐力接合としたモデル(*N type*)と本論文で提案する楔デバイス付柱継手および楔デバイス付梁継手を導入したモデル(*SC type*)の2種類とする。*SC type*における柱継手の位置および耐力は2章に従って決定している。尚、柱継手

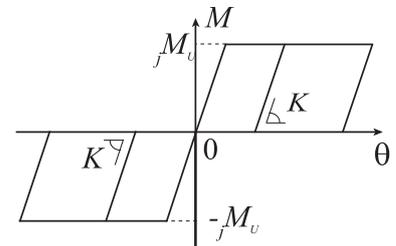


図6 復元力特性モデル

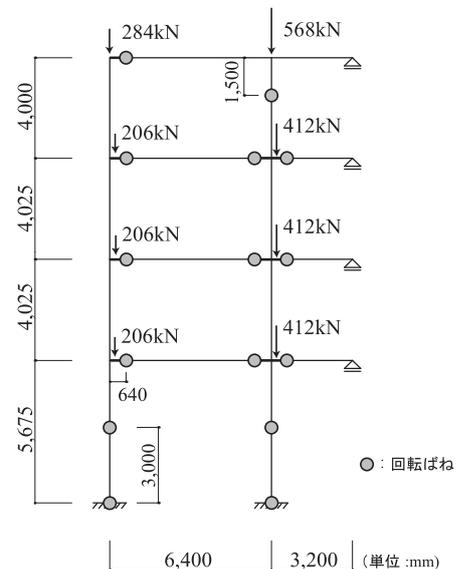


図7 解析モデル

のアンカーボルトの長さをボルト径の10倍とし、回転剛性 K を算出している。梁継手のブラケットは、材長をスパンの1割である640mmとし、断面を梁より大きくした溶接組立てH鋼としている。梁継手の設計は保有耐力を低減しないよう耐力を設計している。また、節点振り分け法で考えた際、4層中柱柱頭部には塑性ヒンジが形成される。梁継手にエネルギー吸収をさせようとする、大きく耐力を低減させる必要があるため、4層中柱にも柱継手を4FLから-1500mmの位置で用いている。

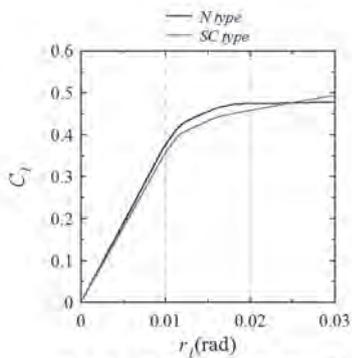
4. 結果と考察

静的増分解析結果により架構の剛性と耐力を比較し、地震応答解析結果より残留変形と応答変形について考察する。

4.1 静的増分解析

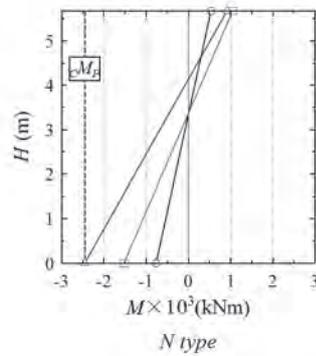
図8にベースシア C_1 -層間変形角 r_1 関係を、図9に1層側柱曲げモーメント分布を、それぞれ、示す。

図8より、SC type は N type と比較して、剛性・耐力ともわずかながら低下するが、同等の値を示している。図9



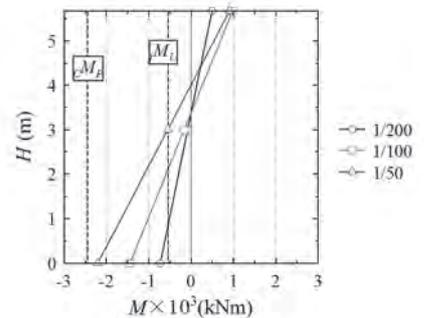
ベースシア C_1 -層間変形角 r_1 関係

図8 ベースシア C_1 -層間変形角 r_1 関係



N type

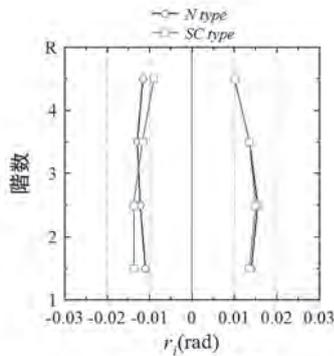
(a) N type



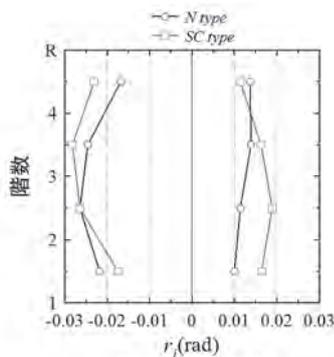
SC type

(b) SC type

図9 1層側柱曲げモーメント分布

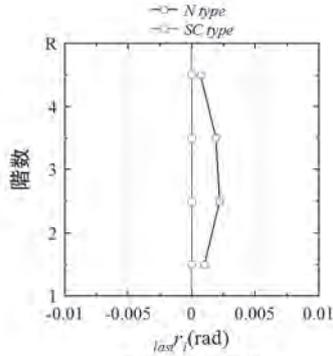


(a) 50kine

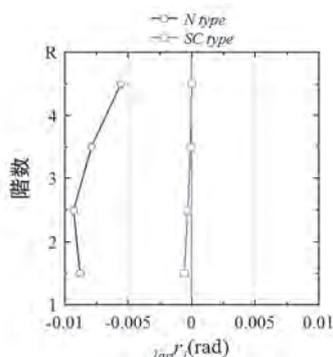


(b) 100kine

図10 最大層間変形角 r_1

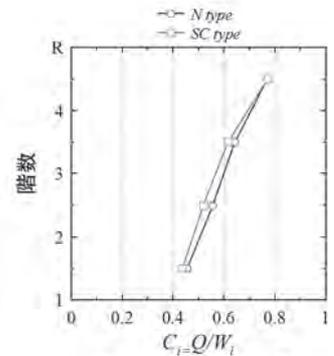


(a) 50kine

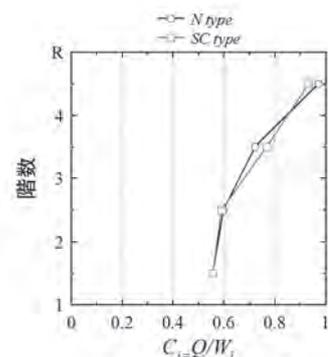


(b) 100kine

図11 残留層間変形角 $last r_1$



(a) 50kine



(b) 100kine

図12 層せん断力係数 C_i 分布

は、ある層間変形角時の1層側柱における曲げモーメント分布であり、柱の cM_p と柱継手の jM_U をあわせて示している。これを見ると、SC typeの曲げモーメントの分布がN typeと同じ形状であり、楔デバイス付柱継手の保有水平耐力を調整できる性能が発揮されている。また、SC typeは柱継手に塑性ヒンジが形成され、柱脚は塑性化していないことがわかる。柱継手耐力と位置によって柱脚に作用する曲げ応力を制御できる。

4.2 地震応答解析

図10に最大層間変形角 r_i を、図11に残留層間変形角 $last r_i$ を、図12に層せん断力係数 C_i 分布を、それぞれ、示す。

図10より、SC typeの残留層間変形角は、50kineではほぼ生じず、100kineで継手のひずみ硬化による耐力上昇で母材が塑性変形し、1, 2層に若干生じているが、N typeと比べれば非常に小さい。構造物の継続使用が可能な残留変形角は $1/200^{10)}$ という研究結果があり、それを利用すると、N typeの100kineでこれを超えている。しかしながら、原点立上り型復元力特性を持った継手に塑性ヒンジを形成するSC typeでは生じる残留変形角を、継続使用が可能な水準まで落とすことができる。

図11より、層間変形角は、50kineで同等の値を示すが、100kineでは大きめになる傾向がある。100kineでは架構の塑性変形が大きく生じており、復元力特性により応答が原点から始まるSC typeの応答と異なるためである。残留変形角が大きい50kineでは近い値を示すため、SC接合部にすることで最大層間変形角は大きくならないことがわかる。

図12より、50kine, 100kineどちらの地震波においても層せん断力係数分布が同様の形状を示している。SC typeでも大きく変わらない外力分布を示すことがわかる。

5. 結論

本論文では楔デバイス付柱継手を提案し、数値解析を行うことで、その有用性を示した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 楔デバイス付柱継手は、継手の位置によって設定耐力を調整でき、ボルト降伏型でありながら保有水平耐力を保有耐力接合とした場合と同等の値を得ることができる。
- 2) 楔デバイス付柱継手および楔デバイス付梁継手を導入

したセルフセンタリング架構は、残留変形をほぼ0にできる。

- 3) セルフセンタリング架構と通常架構を比較すると、50kineにおいて最大層間変形角が同等の値を示し、50kine, 100kineとも層せん断力係数分布が同様の形状を示す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 景山朋定, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 國井翔平: 長締めボルトを用いた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(近畿), CD-ROM 論文番号-22393, 2014.9
- 3) 社団法人日本鋼構造協会: 建築構造用アンカーボルトを用いた露出柱脚設計施工指針・同解説, 2009.10.
- 4) 山西央朗, 笠井和彦, 高松隆夫, 玉井宏章: 弾性回転剛性と耐力を広範囲・高精度で調整できる鉄骨柱脚-性能指定型設計に対応できる柱脚に関する研究 その1-, 日本建築学会構造系論文集, 第683号 pp.213-222, 2013.1.
- 5) 小川厚治, 多田元英: 柱・はり接合部変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発, 第17回情報・システム・利用技術シンポジウム論文集, pp79-84, 1994.12
- 6) 多田元英: CLAP. f利用説明書・解析方法説明書, 鋼材倶楽部
- 7) 景山朋定, 高松隆夫, 玉井宏章, 山西央朗, 國井翔平: 楔デバイス付接合部を有する架構のエネルギー吸収性能, 鋼構造年次論文報告集, pp498-503, 2013.11
- 8) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技法堂出版, 1985.3.
- 9) 日本免震構造協会: パッシブ制震構造設計施工マニュアル, 2003.10
- 10) 油野弘, 池永昌容, Jason McCormick, 中島正愛, 生活・技術・安全から見た許容残留変形-文献調査と1970年に建設された建物調査-, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.221-224, 2007.

