

EP 柱脚の抵抗特性に関する研究

山西 央朗*

(平成28年11月1日受付)

A STUDY ON RESISTING CHARACTERISTICS OF EP COLUMN-BASE

Teruaki YAMANISHI

(Received Nov. 1, 2016)

Abstract

Generally, an exposed column-base consists of anchor-bolts and thick base plate, connecting steel column and concrete foundation. These column-bases showed semi-rigid behavior, caused by anchor-bolt elongation and base plate bending deformation of out of plane. The conventional column-base detail is very difficult to evaluated of rigidity and strength. The author propose a new type of column-base, that has enhanced precision of rigidity and strength.

In this paper, a FEM analysis was carried out for the purposes of comparison of conventional column-base with a new type of column-base.

Key Words: *Exposed column-base, Restoring force characteristics, Resisting mechanism, FEM analysis*

1 序論

鉄骨露出柱脚は、柱下端に溶接接合したベースプレート
を、コンクリート基礎に埋設したアンカーボルトで緊結し
て固定度を確保する工法である。中低層鋼構造物に多用さ
れておりアンカーボルト降伏型として設計することが多
く、復元力特性上のスリップ現象、アンカーボルトの基礎
からの抜け出し（コーン状破壊）等により、他の鋼構造部
材にはない抵抗特性を有している¹⁾。特に、抵抗機構が特
徴的であり、曲げモーメントを受けた時には、ベースプレ
ートの回転離間に対してアンカーボルトの引抜き抵抗力で柱
脚の固定度を保持し、RC柱と類似した機構となる。

この抵抗機構が形成された時、ベースプレートの面外曲
げ変形が生じるが、柱スキンプレートから平面的に張出し
たベースプレートの境界条件を定めることは容易ではな
く、基礎との接触力分布を評価することが困難となる。こ
の挙動に着目した研究としては、一定のディテールに対す
る定量化や評価方法の整合性を確保する試みがなされてい

る^{2), 3)}が、抵抗特性の指標となる圧縮合力点位置や回転中
心位置については、載荷実験またはFEM解析などを用い
て得られる値を使用している。

このような研究背景を持つ露出柱脚に対して、著者は露
出柱脚のディテールを拡張した柱脚を提示し（これを「EP
柱脚」と呼ぶ）、簡便かつ精確にその挙動を評価できるこ
とを示した^{4), 5)}。しかし、従来の露出柱脚との比較・検討
を十分に行っておらず、従来の露出柱脚と著者等が提案す
る柱脚の違いを明示できていない。

そこで本論文では、先ず露出柱脚のベースプレート板厚、
アンカーボルト径、柱軸力を変数としたFEM解析を行う。
次いで、ベースプレートの面外曲げ変形が柱脚の弾塑性挙
動へ与える影響を回避することで、簡便かつ精度よく露出
柱脚の挙動を評価可能となる新しいディテールの柱脚の
FEM解析を行い、それぞれの結果を比較して、著者等が
提案する柱脚の有用性を明示する。

FEM解析を行い、それぞれの結果を比較して、著者等
が提案する柱脚の有用性を明示する。

* 広島工業大学工学部建築工学科

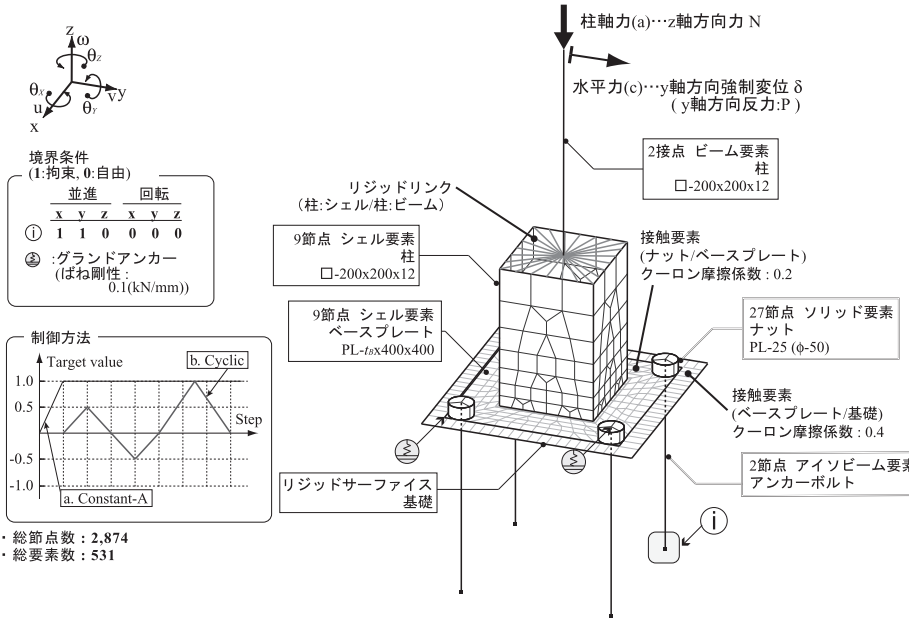


図1 露出柱脚のFEM解析モデル概要

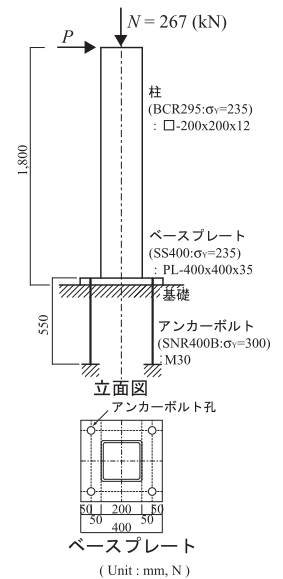


図2 露出柱脚の基本寸法

2. 露出柱脚のFEM解析

露出柱脚の抵抗機構を議論するため、図1に示す要素形式、要素分割の様子、境界条件を有するモデルを用いて、汎用構造解析プログラム「ADINA ver. 8.7.1」によりFEM解析を行う。

図2に示す試験体を基本として、解析変数をベースプレート板厚を変数とした解析I、アンカーボルト径を変数とした解析II、アンカーボルト径の変化に伴いベースプレート板厚を調整した解析III、柱軸力を変数とした解析IVを行う。それぞれの変数一覧を、表1に示す。

また、アンカーボルトの有効長さは、実設計時の値（コーン状破壊を考慮した埋込み長さ⁶⁾20d、d:はアンカーボルトの呼び径）を確保している。

○素材特性と塑性化の取り扱い

- ・基礎を除く全要素は、各材料の公証値（下限値）の降伏応力度と、鋼材の一般的なヤング係数(205,000 (N/mm²))とポアソン比 (0.3) を有する bi-linear の弾塑性体モデルを入力する（二次勾配は0）。但し、アンカーボルトについては、これまでの研究実績に基づいて、降伏応力度は 300 (N/mm²) としている。
- また、ナットは linear の弾性体モデルを入力している。
- ・各要素の降伏条件には、VonMises の降伏条件を用い、硬化則は移動硬化則を用いる。

○異種要素の接続方法と応力伝播について

- ・基礎とベースプレート、ベースプレートとナットの間には、それぞれ、クーロン摩擦係数を 0.4 および 0.2 とする接触要素を設置している。これにより、基礎とベ

表1 露出柱脚のFEM解析変数

解析シリーズ	アンカーボルト (呼び径)	ベースプレート板厚 (mm)	柱軸力 (kN)
基準	M30	35	267
解析I	M30	30	267
		40	
		45	
		50	
解析II	M27	35	267
	M24		
	M22		
	M20		
解析III	M27	32	267
	M24	28	
	M22	25	
	M20	22	
解析IV	M30	35	0
			133
			400
			534

ースプレート、ベースプレートとナットとの間で生じる、接触・離間現象と接触反力により発生する摩擦力を再現している。

○幾何学的境界条件

- ・アンカーボルト下端部の x, y, z 軸方向の並進を拘束している。
- ・基礎は剛面とし、全節点の x, y, z 軸方向の並進を拘束している。

○力学的境界条件

柱軸力として、柱頭部に z 軸方向の力 N を、柱脚部に曲げモーメントを入力するために柱頭部 y 軸方向に強制変位 δ を与える。また、柱脚（柱およびベースプレートで構成された要素）はアンカーボルトにより拘束され、柱軸力により基礎に押し付けられているものの、接触要素を使用

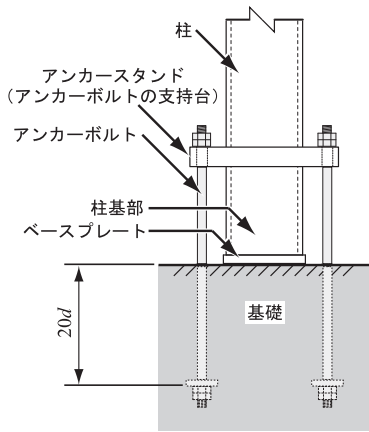


図3 EP柱脚の構成

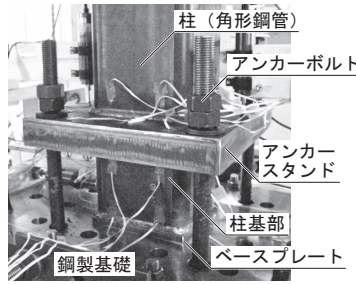


写真1 EP柱脚セットアップ

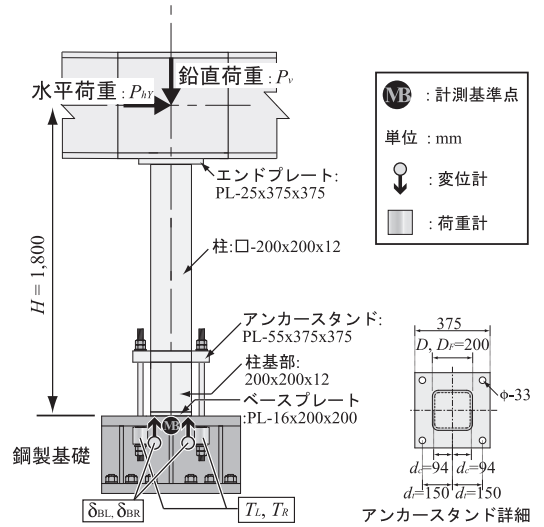


図4 EP柱脚の試験体

表2 実験試験体の素材特性

材質	E (N/mm^2)	σ_y (N/mm^2)	主要寸法 (mm)
アンカーボルト M30 SNR400B	205,000	286	$\phi_g=27.2$
アンカースタンド	SS400	205,000	PL-55x375x375
柱、柱基部	BCR295	205,000	□-200x200x12
ベースプレート	SS400	205,000	PL-16x200x200

E : ヤング係数 σ_y : 降伏応力度 ϕ_g : 軸部径

表3 EP柱脚のFEM解析変数

名称	アンカーボルト (呼び径)	アンカースタンド 板厚 (mm)	ベースプレート 板厚 (mm)	柱軸力 (kN)
実験	M30	55	16	267
基準		35	16	267
BPL32		35	32	267
N=0	M30	35	16	0
N=0.2N _y		35	16	534
SPL55		55	16	267

しているために不安定状態となる可能性がある。特に、解析初期は解が発散しやすいので、ベースプレートやナットには剛性の極小さい弾性バネ要素（グランドアンカー）を配置している。

3. EP柱脚の載荷実験・FEM解析

3.1 構成

図3に、EP柱脚の構成を示す。

EP柱脚は、アンカーボルトを支持するためのプレートを柱下端部近傍に設け、これをアンカースタンドと呼ぶ。更に、その下部に柱と同じ断面を有する柱基部を、最下部にはベースプレートを取り付けたものである。

まず、ベースプレートは柱基部と同じ幅として、柱型からの張出し距離を0とする。従って、柱の曲げ成分を伝播する主要素の圧縮側柱フランジの直下がベースプレートの端部とほぼ重なるため、基礎の状態に関係なく、圧縮合力点位置を強制的にベースプレート端部近傍へと推移させる

ことが可能となる。更に、ベースプレートは柱型内において、柱断面による補剛効果で面外曲げ変形が生じない剛領域が確保される。即ち、図3のディテールであれば、ベースプレートの面外曲げ変形は生じないと見なせるので、回転中心位置もベースプレート端部に固定できる。

3.2 実験概要⁵⁾

写真1、図4に試験体を、表2に素材特性を、それぞれ示す。試験体はアンカーボルト降伏型として設計し、かつベースプレートはアンカーボルトに対して非常に薄いものを選定する。

柱および柱基部に□-200x200x12(BCR295)を、アンカースタンドにPL-55x375x375(SS400)を使用している。ベースプレートは、柱基部からの張出し距離が0となるように柱基部の断面寸法に揃え、板厚は柱フランジより1ランク上の寸法(PL-16x200x200(SS400))を採用している。アンカーボルトには伸び能力を確保できる転造ねじアンカーボルトM30(SNR400B)を使用している。尚、基礎には十分な耐力・剛性を保持させた鋼製基礎を用い、コンクリート基礎の非線形化に伴う実験結果の不明瞭化を回避している。

載荷方法としては、柱軸力を与える片持ち柱の応力状態を再現するため、柱軸力 N を柱降伏軸力の10%($0.1N_y=266$ (kN))まで載荷した後に荷重を保持し、ベースプレート回転角 θ を目標値として水平ジャッキにより水平荷重を与える正負交番繰返し載荷を行う。

変位計測位置は、ベースプレート回転角および回転中心位置を算出するための δ_{BL} 、 δ_{BR} を計測する。次いで、荷重計測は、水平ジャッキおよび鉛直ジャッキ先端に設置したロードセルにより試験体に入力する荷重を、アンカーボ

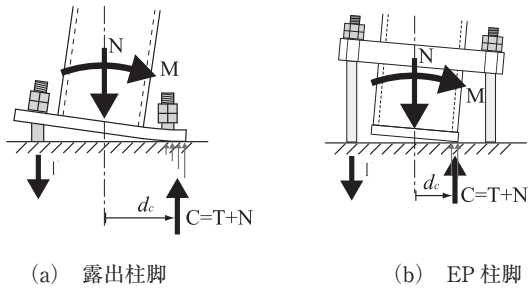


図5 圧縮合力点位置 d_c

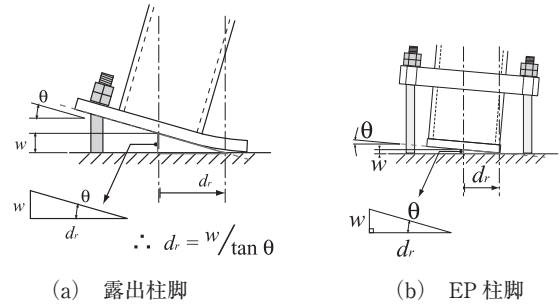


図6 回転中心位置 d_r

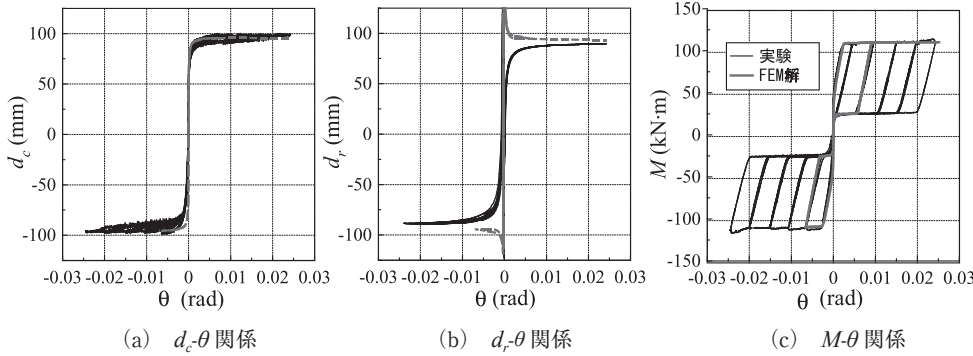


図7 EP柱脚の実験結果とFEM解析結果

表4 EP柱脚の実験結果とFEM解析結果

降伏曲げ耐力 M_y (kN・m)		
Exp.	FEM	FEM/ Exp.
109.1	108.8	1.00
弾性回転剛性 K_i (kN・m/rad)		
Exp.	FEM	FEM/ Exp.
23,100	25,700	1.10

※Exp.: 実験、FEM: FEM解析

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アンカーボルト軸力 T_L , T_R を、それぞれ、計測する。

3.3 FEM 解析概要

図1に示す解析モデルを拡張してEP柱脚の解析モデルを作成⁵⁾し、汎用構造解析プログラム「ADINA ver. 8.7.1」を用いたFEM解析を行う。

ここでは、実験試験体との整合性を確認するための解析(実験)と、ベースプレート板厚および柱軸力を変数とした解析を行う。

後者の解析では、まず、アンカーボルトのコーン状破壊を考慮した埋込み長さ $20d$ を確保し、アンカースタンド板厚をアンカーボルトに対して弾性を保持する程度の板厚(PL-35)としたものを基準とする。変数としては、ベースプレート板厚を実験試験体の2倍(32mm)としたもの、柱軸力を0または534(kN) ($=0.2N_y$)としたもの、アンカースタンド板厚を厚く(PL-55)したものの解析を行う。変数の一覧を、表3に示す。

4. 結果の整理方法と指標値・評価方法

露出柱脚の弾塑性挙動を検討する指標値として、以下の数値を用いる。

まず、基礎とベースプレート間の接触反力の分布を包括した数値として図5に示す圧縮合力点位置 d_c を、圧縮側ベースプレートの折れ曲がりを変現した数値として図6に

示す回転中心位置 d_r を、そして、全体挙動を検討するため復元力特性(柱脚曲げモーメント M -ベースプレート回転角 θ 関係)を、それぞれ算出・検討する。

まず、実験および解析結果からは、以下の式を用いてベースプレート回転角を算出する。

$$\theta = \frac{\delta_{BL} - \delta_{BR}}{D'} \quad (1)$$

ここに、 δ_{BL} , δ_{BR} は柱フランジ直下のベースプレート鉛直変位量、 D' はベースプレート鉛直変位計測間距離である。

4.1 圧縮合力点位置

圧縮合力点位置は、基礎とベースプレートとの接触反力の合力作用位置である。従って、露出柱脚曲げモーメントの釣合条件より算出でき、また、接触力分布を検討する上の指標値として用いられる。

一方、3.1節に記述したように、EP柱脚では応力伝播の特性上、圧縮合力点位置を強制的に圧縮側柱フランジ位置近傍に位置させる。力学的には、柱の曲げモーメントは柱フランジ要素の中立面から基礎に伝播されるので、圧縮側柱フランジの中立面の位置を評価値 ($=94(\text{mm})$) とする。

実験およびFEM解析結果からは、以下の式を用いて算出する。

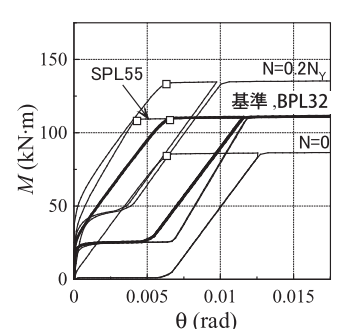
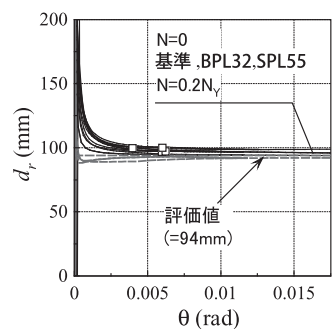
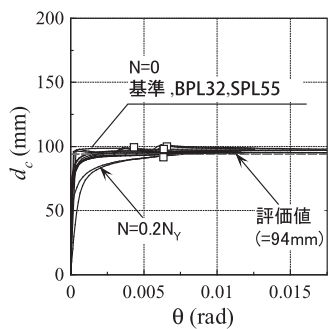
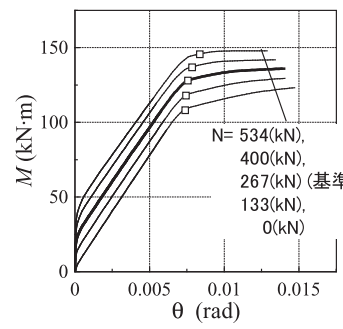
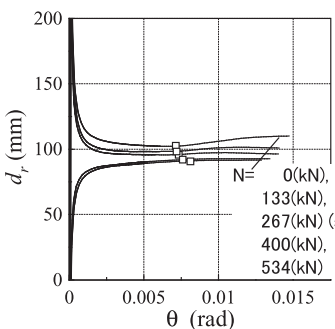
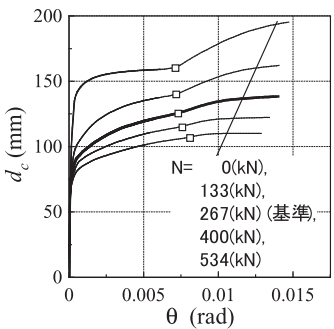
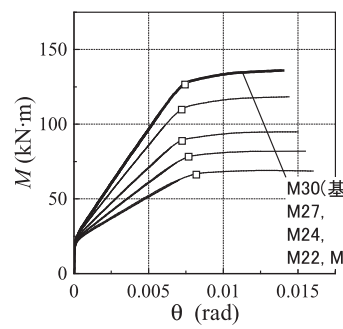
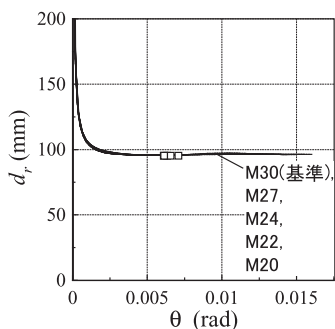
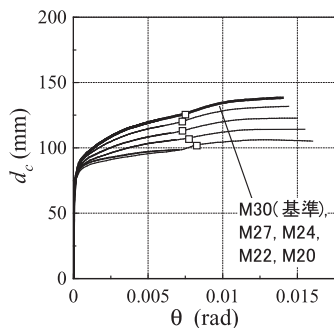
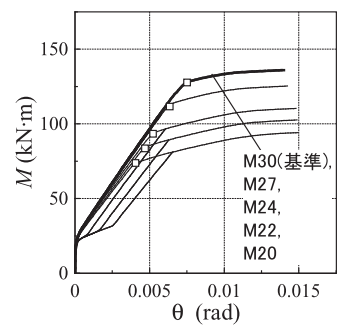
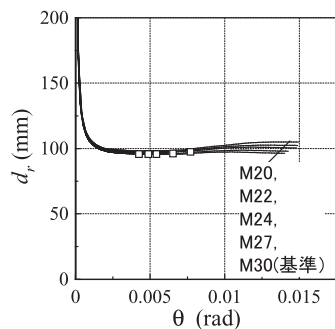
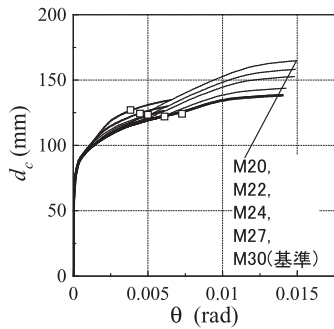
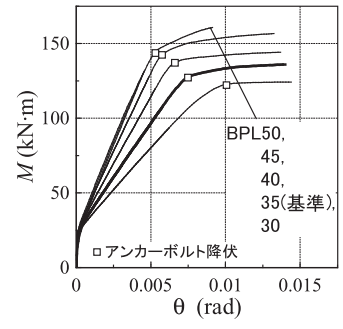
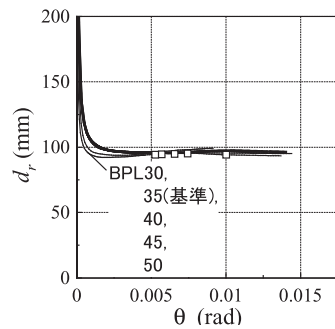
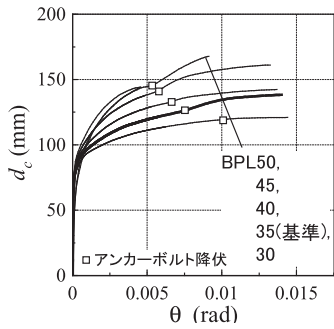


図8 d_c - θ 関係

図9 d_r - θ 関係

図10 M - θ 関係

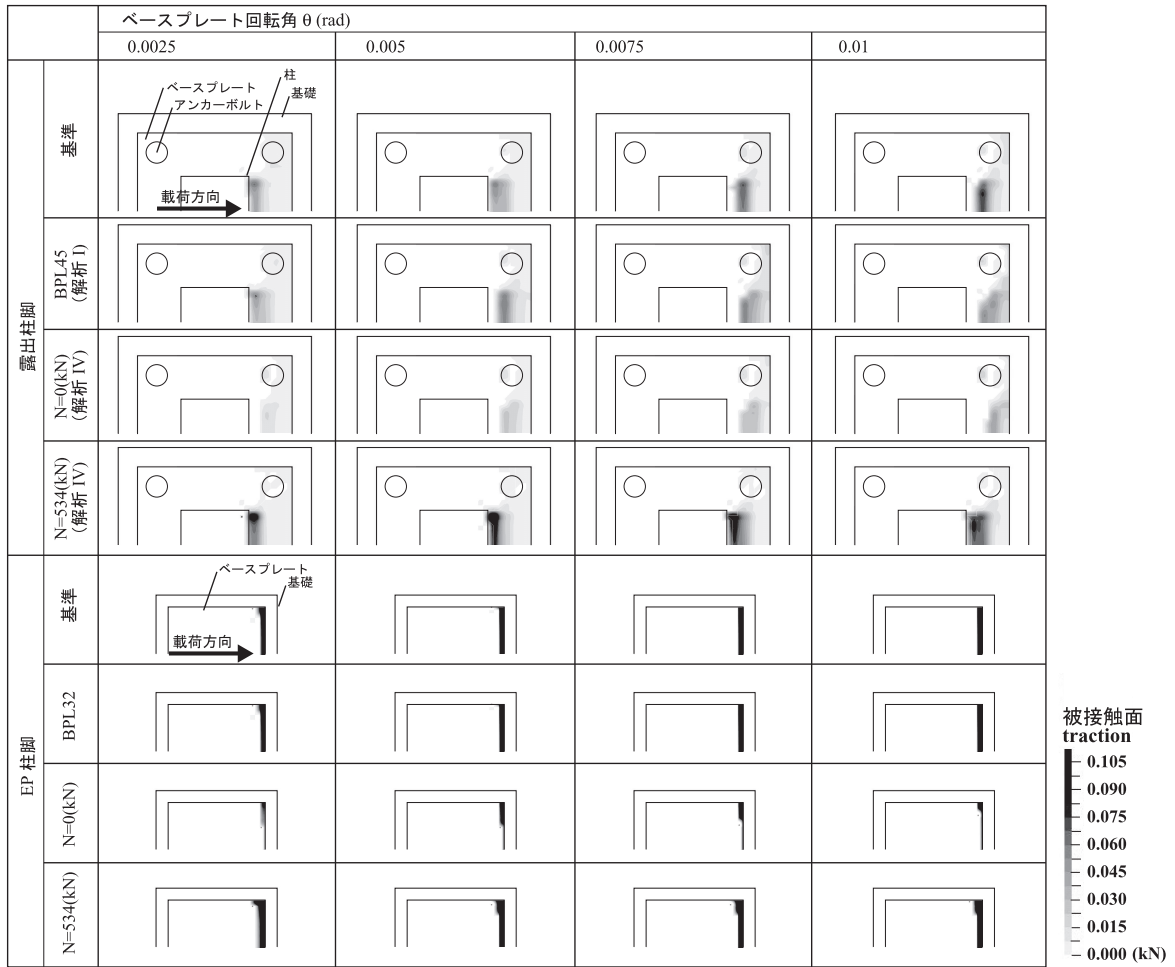


図 11 代表変数の接触力分布

$$d_c = \frac{M - \sum d_i \cdot T}{N - \sum T} \quad (2)$$

ここに、 M は柱脚の曲げモーメント、 $\sum d_i \cdot T$ は柱断面図心からアンカーボルトまでの距離とアンカーボルト軸力を乗じたものの総和、 $\sum T$ はアンカーボルト軸力の総和である。

4.2 回転中心位置

回転中心位置は、圧縮側ベースプレートの折れ曲がりに変形に依存し、ベースプレートの回転量、接触反力 C の大きさに起因して変動することが予想されるが、設計指針等では圧縮合力点位置と同値として取り扱われている。この時、不整合が生じるが低減係数を乗じて、実挙動との対応をさせている⁶⁾。

EP柱脚ではベースプレートの面外曲げ変形を回避できるので、回転中心位置も圧縮側柱フランジ中立面に位置する(=94(mm))。

実験およびFEM解析結果からは、以下の式を用いて算

表 5 露出柱脚の耐力・剛性

変数	降伏曲げ耐力 (kN・m)	弾性回転剛性 (kN・m/rad)	
基準	126.5	14,600	
I	BPL30	121.8 (0.96)	11,100 (0.76)
	BPL40	136.3 (1.08)	18,000 (1.23)
	BPL45	141.3 (1.12)	21,100 (1.45)
	BPL50	143.2 (1.13)	24,400 (1.67)
II	M27	112.1 (0.89)	14,300 (0.98)
	M24	93.6 (0.74)	13,400 (0.92)
	M22	83.6 (0.66)	12,900 (0.88)
	M20	73.5 (0.58)	12,300 (0.84)
III	BPL32(M27)	110.4 (0.87)	12,400 (0.85)
	BPL28(M24)	88.7 (0.70)	9,400 (0.64)
	BPL25(M22)	77.5 (0.61)	7,500 (0.51)
	BPL22(M20)	66.4 (0.52)	5,700 (0.39)
IV	N=0	107.1 (0.85)	14,900 (1.02)
	N=133	117.4 (0.93)	14,700 (1.01)
	N=400	134 (1.06)	14,300 (0.98)
	N=534	142.8 (1.13)	14,000 (0.96)

表 6 EP柱脚の耐力・剛性

名称	降伏曲げ耐力 (kN・m)	弾性回転剛性 (kN・m/rad)
基準	108.6	13,400
BPL32	108.9 (1.00)	13,500 (1.01)
N=0	85.4 (0.79)	13,400 (1.00)
N=0.2N _y	132.6 (1.22)	13,600 (1.01)
SPL55	108.9 (1.00)	16,800 (1.25)

()内は、基準試験体との比

出する。

$$d_r = \frac{w}{\tan \theta} = \frac{\delta_{BL} + \delta_{BR}}{2 \cdot \tan \theta} \quad (3)$$

ここに、 w は柱断面図心位置の鉛直変位である。

5. 結果と考察

図7、表4にEP柱脚の実験結果とFEM解析結果との整合性を、図8～11、表5～6にベースプレート板厚や柱軸力を変数とした露出柱脚とEP柱脚のFEM解析結果を、それぞれ示す。

図7(a)、図8に圧縮合力点位置 d_c -ベースプレート回転角 θ 関係を、図7(b)、図9に回転中心位置 d_r - θ 関係を、図7(c)、図10に柱脚曲げモーメント M - θ 関係を、図11に露出柱脚・EP柱脚の代表的な変数の基礎とベースプレート間の接触力分布を、それぞれ示す。また、図8～10中の□印は、アンカーボルトが降伏した時点を示している。

表5、6に各解析結果のアンカーボルト降伏時曲げ耐力、弾性回転剛性を、それぞれ示す。

まず、図7および表4より、実験結果とFEM解析とは良好に対応しており、鋼製基礎を使用した場合のEP柱脚の挙動をFEM解析で再現できることを確認している。

5.1 圧縮合力点位置について

図8より、まず、露出柱脚の圧縮合力点位置は、ベースプレート板厚、アンカーボルト径(軸力)、柱軸力から影響を受けている。ベースプレート板厚はベースプレートの面外曲げ剛性を、柱軸力およびアンカーボルト径は接触反力の大きさを支配し、それぞれの変化は接触反力分布に影響するためである。特に、柱軸力を変化させた場合が最も影響が大きい。これ等は図11の接触力分布にも見られ、更に同図から、平面的に広がる接触力の分布はベースプレートの面外曲げ剛性や接触力の大きさにより様子が異なり、容易には予測できないことが示唆される。

また、アンカーボルト降伏後も d_c が収束していないものは、図10(a)～(d)の復元力特性上にて明解な二次勾配が現れている。従って、露出柱脚の降伏時と終局時とは、異なる圧縮合力点位置を示すものと考えらるべきである。

次に、EP柱脚では、 $N=0.2N_y$ 以外は、いずれの変数でも概ね基準とほぼ一致し、更に、アンカーボルトが降伏する前に評価値(圧縮側柱フランジ)に収束している。また、図11からは、接触力は圧縮側柱フランジ近傍にのみ生じており、ベースプレートの面外曲げ剛性を高めることで接触力分布の発生領域を限定できていることが分かる。

以上よりEP柱脚は、柱軸力が增大すると収束時のベー

スプレート回転角がやや大きくなるものの、簡便かつ正確に圧縮合力点位置を予測でき、更に、アンカーボルト降伏後であっても圧縮合力点位置はほぼ一定値を示し、図10(e)の復元力特性上において二次勾配は生じていない。

5.2 回転中心位置について

図9より、露出柱脚の回転中心位置は、アンカーボルト径やベースプレート板厚によらず、圧縮側柱フランジ位置に収束している。但し、柱軸力の大きさを変数とした解析IVでは、収束する値に差異が生じている。また、EP柱脚でも圧縮側柱フランジ近傍に収束している。

このように、露出柱脚においても比較的捉えやすい挙動を示しているものの、図8の圧縮合力点位置とは全く異なる挙動を示している。

一方、EP柱脚であれば、圧縮合力位置と近い値・挙動を示す(共に、早期に収束する)ので、降伏時、終局時共に挙動を捉えやすいことが分かる。

5.3 復元力特性

図10(a)～(d)、表5より、露出柱脚の復元力特性はベースプレート板厚、アンカーボルト径、柱軸力の影響を受けて挙動が変化していることが分かる。特に、ベースプレート板厚が変化する場合(解析IとIII)は、弾性回転剛性や降伏時回転角が大きく変化しており、露出柱脚挙動にベースプレートの面外曲げ剛性が支配的な影響を与える。

図10(e)と表6より、EP柱脚は柱軸力による付加曲げ抵抗の増減が生じているものの、BPL32、 $N=0$ 、 $N=0.2N_y$ は、いずれの弾性回転剛性も基準値とほぼ一致している。これは、5.1節、5.2節で述べたようにEP柱脚の圧縮合力点位置や回転中心位置は、本解析で用いた変数に対して変化し難いためである。一方、SPL55は弾性回転剛性が1.25倍と大きくなっているが、これはアンカースタンドの曲げ剛性が増大した影響であり、柱脚の抵抗機構(d_c や d_r)に変化があったためではない。

最後に、表5、6の比較より、それぞれの基準試験体の降伏曲げ耐力や弾性回転剛性は、露出柱脚の方が大きい。これは、EP柱脚の圧縮合力点位置は予測し易い一方で、 d_c や d_r が露出柱脚よりも小さい値を示すためであり、そのことはディテールや接触反力の分布から明らかである。従って、露出柱脚と同等の降伏耐力を得るには、大き目(今回のディテールであれば、およそランク上5))のアンカーボルトを使用する必要がある。

6. 結論

露出柱脚とEP柱脚の抵抗特性に着目したFEM解析を行い、それぞれの結果を比較して以下の知見を得た。

○露出柱脚

1. 圧縮合力点位置は、ベースプレートの板厚、アンカーボルト径および柱軸力の大きさの影響を受ける。また、アンカーボルト降伏時に収束することはないので、降伏時と終局時とでは、挙動が大きく変化する可能性があることに留意する必要がある。
2. 回転中心位置は、いずれの場合もほぼ圧縮側柱フランジ近傍に位置している。しかしながら、いずれの場合においても圧縮合力点位置とは異なった挙動を示している。

○EP柱脚

3. ベースプレートの張出し距離を0として、圧縮側ベースプレートの面外曲げ変形を抑制することで、基礎とベースプレート間の接触力分布を圧縮側柱フランジ近傍（ベースプレート端部近傍）に限定させることができた。従って、圧縮合力点位置および回転中心位置は共に、柱軸力およびベースプレートの板厚に関係なく柱フランジ近傍に位置する。
4. EP柱脚の圧縮合力点位置は、そのディテールから露出柱脚よりも小さくなることは明らかである。従って、露出柱脚と同一の降伏曲げ耐力・弾性回転剛性を得るには、大き目のアンカーボルト径を選定する必要がある。

以上、本論文ではEP柱脚の優位点として、圧縮合力点位置や回転中心位置が設定しやすいことを示した。その一方、接触力分布の発生領域を狭めることは、その応力度を

高めることに繋がり、基礎の局所的な崩壊が予想される。その影響、ならびに評価手法については今後の課題とする。

参考文献

- 1) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3.
- 2) 宮坂博信，新井聡，内山政彦，山田丈富，橋本篤秀：露出型固定柱脚構成要素の弾塑性挙動解析手法に関する研究 - その1 曲げモーメントのみが作用する柱脚 -，日本建築学会構造系論文集，第550号，pp.167-174，2001.12.
- 3) 角屋治克，川口淳，森野捷輔：曲げモーメントを受ける露出型固定柱脚の弾塑性挙動及び終局耐力に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第583号，pp.123-130，2004.9.
- 4) 山西央朗，笠井和彦，高松隆夫，玉井宏章：性能評価精度を向上させることができる鉄骨柱脚に関する研究 - (その1) 基本性能 -，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造C-III，pp.1129-1130，2012.9.
- 5) 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く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78巻，第683号，pp.213-222，2013.1.
- 6) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，第3版，2012.3.