

3. 2種類の降伏機構を有する複合型露出柱脚の開発

Development of Composite Exposed-type Column Bases with Two Types of Yield Mechanisms

寺内将貴* 柳田佳伸* 新井佑一郎* 石鍋雄一郎**

ー概要ー

複合型露出柱脚は、鉄骨建物の柱脚部にあたる露出型柱脚の一種である。柱脚部にヒンジを形成し効率的に地震エネルギーを吸収するため、アンカーボルト降伏型にベースプレート降伏要素を積極的に取り入れている。なお、本構法の適用対象は10階建て以下の鉄骨建物である。

本報では、複合型露出柱脚の概要（図1、2）および基本性能確認実験（図3、4）について示す。

ー技術的な特長ー

本構法は、内周部と外周部で異なる役割を与えたアンカーボルト、ベースプレートを配置している。アンカーボルトは、内周部に弾塑性要素の構造用アンカーボルト、外周部にベースプレートの相対変位を形成する要となる弾性要素としたアンカーボルトを配置している。ベースプレートは、降伏領域を明確化するため内周部を八角形状の厚い板とし、外周部を内周部より薄い板で構成することで外周部のみ塑性化させる。以上より、既存の設計方法で評価可能なアンカーボルト降伏型と、高いエネルギー吸収能力を有するベースプレート降伏型が複合した柱脚を実現することができる。

また、基本性能確認実験では複数回の地震動に対応できる繰り返しに強い性能を保有していることを確認した。

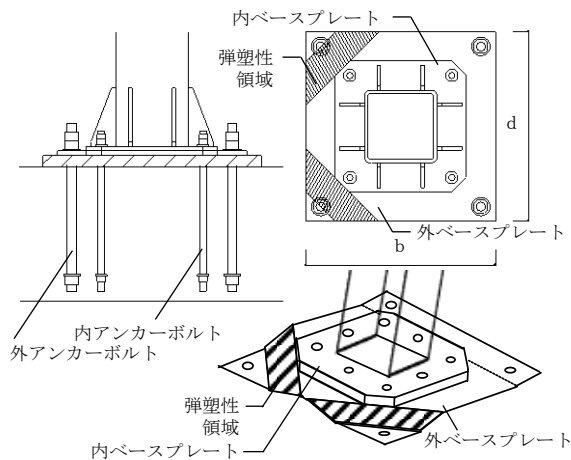


図1 複合型露出柱脚概念図

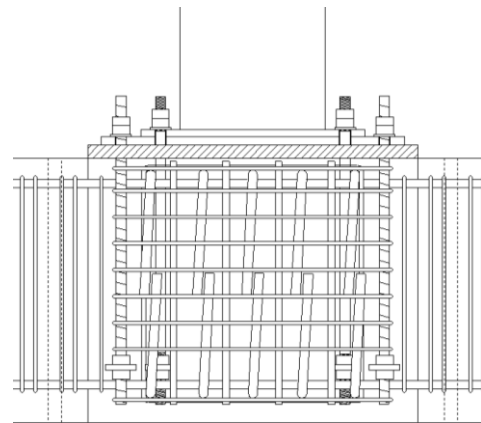


図2 複合型露出柱脚基礎配筋イメージ図

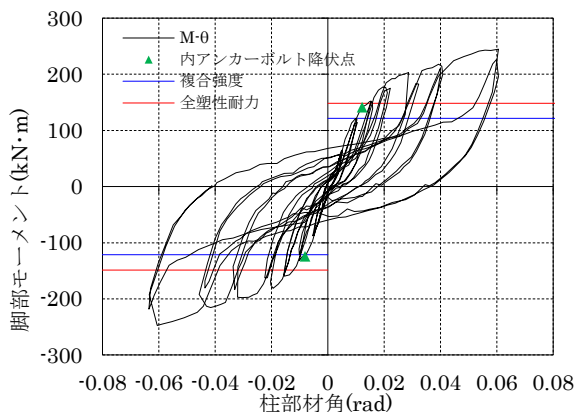


図3 基本性能確認実験 M-θ 関係図

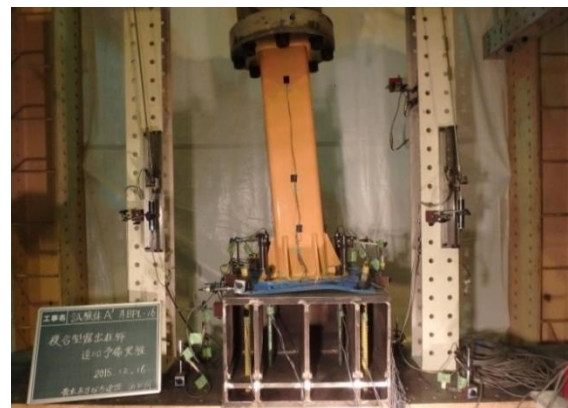


図4 基本性能確認実験加力状況

2 種類の降伏機構を有する複合型露出柱脚の開発

Development of Composite Exposed-type Column Bases with Two Types of Yield Mechanisms

○寺内 将貴* 柳田 佳伸* 新井 佑一郎* 石鍋 雄一郎**

Masaki TERAUCHI Yoshinobu YANAGITA Yuichiro ARAI Yuichiro ISHINABE

ABSTRACT Composite exposed-type column bases has been used in medium low-rise steel frame building. The designer selects week anchor-bolt type or week column-lower limit type according to the condition. In this paper, composite exposed-type column bases of composite-type is a kind of exposed-type column bases. It consists of week anchor-bolt type and week base-plate type having energy absorption.

Keywords :複合型露出型柱脚, ベースプレート降伏, 強度特性

Composite Exposed-Type Column Bases, Yield of Base Plate, Strength Properties

1. はじめに

中低層の鉄骨建物では柱脚に露出型柱脚を採用することが多く、設計者が条件に応じて降伏を生じさせる箇所としてアンカーボルトもしくは柱母材を選択する。

本論で報告する複合型露出柱脚は、アンカーボルト降伏型に、高い耐震性能を有するベースプレート降伏要素を積極的に取り入れた 2 種類の降伏機構を有する柱脚である。これにより、柱脚部にヒンジを形成し、効率的に地震エネルギーを吸収する。

2. 複合型露出柱脚の概要

複合型露出柱脚の概念図を図 1 に示す。

2.1 構成部材の特徴

構成上の特徴として、ベースプレートが 2 種類の厚さの鋼板で構成され、内側の厚いベースプレートを内ベースプレート、外側の薄いベースプレートを外ベースプレートと称す。同様に、アンカーボルトは 2 種類配置され、内側に配置されたアンカーボルトを内アンカーボルト、外側に配置されたアンカーボルトを外アンカーボルトと称す。

ベースプレートは、板の重ね合わせではなく凸型の一体構造となっており、隅切りされた八角形の内ベースプレートに額縁状の外ベースプレートをはめ込み、双方を突合せ溶接で接合したもの

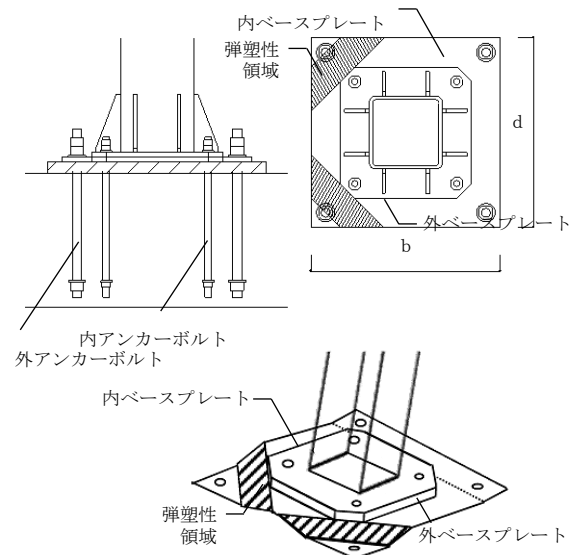


図 1 複合型露出柱脚概念図

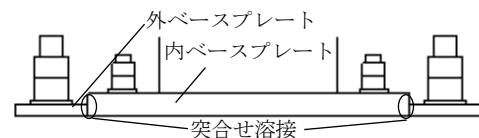


図 2 複合型露出柱脚断面図

である (図 2)。この形状により、ベースプレートに生じる降伏線位置が明確になり、ベースプレート降伏時の挙動が予測しやすくなる。

内アンカーボルトは構造用アンカーボルトで構成され、地震力を受けた際は降伏し、スリッ

*技術研究所建築研究室 **日本大学 助教

型の履歴を描く。外アンカーボルトは、外ベースプレートを基礎コンクリートに緊結させる目的で配置されているため、柱脚が終局状態に至った場合でも降伏させない。これにより、内アンカーボルトと外アンカーボルトの間に相対変位が生じることとなり、薄い外ベースプレートは地震時に面外曲げ降伏し、紡錘型の履歴でエネルギー吸収する。

複合型露出柱脚は、内アンカーボルトと外ベースプレートの 2 つの弾塑性要素が並列に取り付けられていることから、全体の履歴性状はスリップ型（内アンカーボルト）と紡錘型（外ベースプレート）の単純累加となり、安定したエネルギー吸収能力を発揮することが可能な柱脚である¹⁾。

2.2 耐力式

複合型露出柱脚はアンカーボルト降伏型にベースプレート降伏型を組み合わせたものであり、既往の研究を基に軸力の効果を加算した単純累加式で柱脚の降伏強度 M_y と終局強度 M_u を表すことができる。

$$M_y = \frac{\sigma_y b B t^2}{d c_{am}} + M_{ay} + M_n = s_f M_{by} + M_{ay} + M_n \quad (1)$$

$$M_u = s_a \cdot s_f M_{by} + M_{ay} + M_n \quad (2)$$

M_y : 複合型露出柱脚の降伏強度

M_{ay} : アンカーボルト降伏による強度

M_u : 複合型露出柱脚の終局強度

M_n : 軸力による付加モーメント

s : 形状定数 (=1.5)

s_a : ベースプレート塑性化後の強度上昇係数

σ_y : ベースプレートの降伏点

B : ベースプレート幅

c_{am} : 実験定数²⁾

ここで、アンカーボルト降伏による強度 M_{ay} と軸力による付加モーメント M_n は、指針²⁾等に

示される従来のアンカーボルト降伏柱脚と同一の式を用いる。

3. 基本性能確認実験

複合型露出柱脚の基本的な性能、挙動を把握するため実験を行い、履歴形状および耐力が単純累加であることを確認する。

3.1 実験概要

複合型露出柱脚が想定した挙動を示すか否かを検証し、(1)式と実験値の対応を確認するため、低層建物の柱下端・柱脚を想定した試験体を製作し加力実験を行った。実験で確認するポイントを以下に示す。

①既往の研究³⁾で示されるベースプレート降伏型耐力式で予測した試験体耐力と実験結果から評価した耐力が対応するか。

②外ベースプレートに形成される降伏線の位置は図 1 の斜線部に示すよう想定している弾塑性領域部分となるか。

③外アンカーボルトは終局まで外ベースプレートを固定する機能を発揮できるか。

試験体は、外ベースプレートの厚さを変数とした 3 パターン (9mm、16mm、25mm) を基本とし、内ベースプレート 32mm に対して外ベースプレートが 25mm のように厚い板の場合、想定通りの変形状態を形成しない可能性があるため、リブ板を取り付け内ベースプレートの面外剛性を高めた試験体を 2 体製作し、試験体数は計 5 体とした。試験体名称は、外ベースプレート厚さの値に添え字 (リブ板なし N、リブ板あり R) をつけ区別している。柱、内ベースプレート、内アンカーボルトの断面と材質はすべての試験体で共通とした。なお、弾塑性要素である内アンカーボルトには、ABR400 (M22) を使い、塑性変形能力を確保できるようにしている。

試験体の諸元を表 1、使用材料の機械的性質を表 2、試験体形状を図 3 に示す。加力装置の概要を図 4 に示す。

加力は、試験体頂部にピン治具を取り付け、柱

表 1 試験体諸元

試験体	柱材	内ベースプレート	外ベースプレート	内アンカーボルト	外アンカーボルト
9N	□-250×250×12 L=1166mm BCR295	PL32-450×450 (隅切り 50mm) SN490C	PL9-650×650 SS400	M22 L=550mm ABR400	D29-SD345 L=580mm
16N			PL16-650×650 SS400		
16R			PL25-650×650 SS400		D29-SD490 L=580mm
25N					
25R					

表 2 材料試験結果

部材名	鋼種	降伏点 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ ε (%)	引張強さ σ_u (N/mm ²)	伸び率 ε_f (%)	試験片
内 A.bolt(9N,16N,25N,25R)	SNR400B	309.7	0.15	459.3	27.5	2号
内 A.bolt(16R)		317.9	0.15	462.6	30.9	2号
外 A.bolt(9N,16N,16R)	SD345	361.0	0.20	532.0	26.7	14A号
外 A.bolt(25N)	SD490	559.9	0.34	736.5	19.0	14A号
外 A.bolt(25R)		565.8	0.31	740.0	17.5	14A号
内 BPL(9N,16N,25N,25R)	SN490C	348.5	0.17	498.3	32.2	1A号
内 BPL(16R)		346.1	0.21	505.1	32.3	1A号
外 BPL PL9	SS400	366.7	0.20	438.1	27.5	1A号
外 BPL PL16(16N)		281.8	0.13	424.0	30.5	1A号
外 BPL PL16(16R)		274.5	0.14	412.7	32.2	1A号
外 BPL PL25		303.6	0.14	440.9	31.3	1A号
柱材	BCR295	387.4(0.2%オフセット耐力)		461.5	42.0	5号

※A.bolt=アンカーボルト BPL=ベースプレート

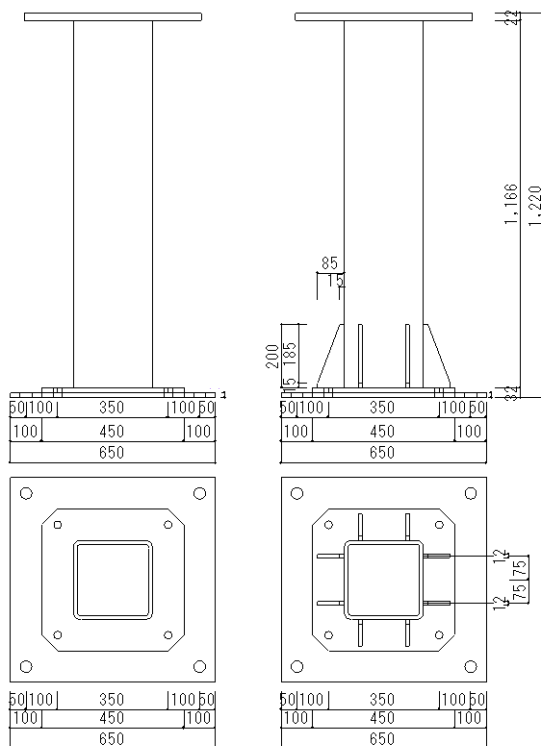


図 3 試験体形状

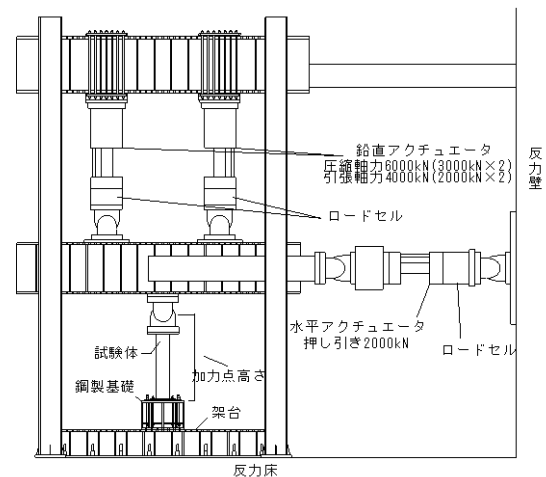


図 4 加力装置図

直アクチュエータ 2 本で軸力を、水平アクチュエータで柱にせん断力を作用させる。コントロールは柱部材角を基準として、正負交番繰り返し载荷を行った。加力サイクルを表 3 に示す。軸力は、外ベースプレート厚さ 16mm の試験体(16N、16R)を除き、柱降伏軸力 N_y の 0.2 倍に相当する圧縮荷重 645kN を定軸力として作用させた。

に軸力とせん断力を同時に作用させた。図中の鉛

表3 加力サイクル

試験体	9N 試験体	16N 試験体	16R 試験体	25N 試験体	25R 試験体
軸力	645kN	0kN	0kN	645kN	645kN
加力 サイ クル	弾性剛性確認（軸力=0kN）				
	2 サ イ ク ル	柱部材角 1/200rad			
		柱部材角 1/100rad			
		柱部材角 1/67rad			
		柱部材角 1/50rad			
		柱部材角 1/33rad			
		柱部材角 1/25rad			
		柱部材角 1/17rad			

本実験では図4に示すように、ベースプレート下端の基礎部分を鋼製部材で模擬した。鋼製基礎を用いることにより、基礎コンクリートによる影響因子を除去し、現象を単純化できるため、複合型露出柱脚の特徴である外ベースプレートの降伏が全体の履歴性状に及ぼす影響を観察しやすくなる。鋼製基礎は、一般的なベースプレート・コンクリート間の摩擦係数（ $\mu = 0.4 \sim 0.5$ ）が確保できるよう、高力ボルト相当の摩擦面処理（ブラスト処理、 $\mu = 0.45$ ）を行っている。

また、一般的なアンカーボルトの定着長さ（アンカーボルト径の20倍）を模擬できる形状となっている。

柱部材角は、ベースプレート底面から高さ方向に1100mmの位置に設置したワイヤー変位計の値を、設置高さで除すことで算出している。ベースプレートには浮き上がりを計測するために高感度変位計を計4か所に設置した。ベースプレートの横滑りは、外ベースプレート左側に2か所取り付け付けた高感度変位計で計測した。また、柱角形鋼管および内・外ベースプレート、内・外アンカーボルトにはひずみゲージを貼り付け、降伏判断を行うことにした。

3.2 ベースプレートの変形状態

実験終了後のベースプレート変形状況を写真1に示す。ベースプレート変形状況は、外ベースプレートの厚さにより異なった。試験体ごとに整理したベースプレート変形状況を以下に示す。

9N 試験体：降伏線は外ベースプレートに発生



写真1 実験終了後試験体外観（9N 試験体）

し、ほぼ想定モデル通りの変形状態となった。軸力の効果により、圧縮側の内ベースプレートに若干の塑性化がみられた。

16N 試験体：降伏線は外ベースプレートに発生し、概ね想定モデル通りの変形状態となった。内ベースプレートに若干の塑性変形がみられた。

16R 試験体：降伏線は外ベースプレートに発生し、想定通りの変形状態となった。リブ板により面外剛性が増加したことから、内ベースプレートに塑性変形はほとんどみられなかった。

25N 試験体：変形がベースプレート全体におよび、想定位置に降伏線が形成されなかった。変形状態は、想定モデルと異なるものだった。

25R 試験体：降伏線は内ベースプレートの内アンカーボルト穴部分に生じた。降伏線発生位置は想定モデルと異なるが、全体的な変形状態は想定に近いものとなった。

以上より、外ベースプレート厚さが9mm、16mmの試験体では、概ね想定通りの挙動となることが確認された。また、外ベースプレートが25mmの試験体の結果から、リブ板による補強は面外剛性を増加させ、想定した変形状態を実現する上で有効であることが確認された。

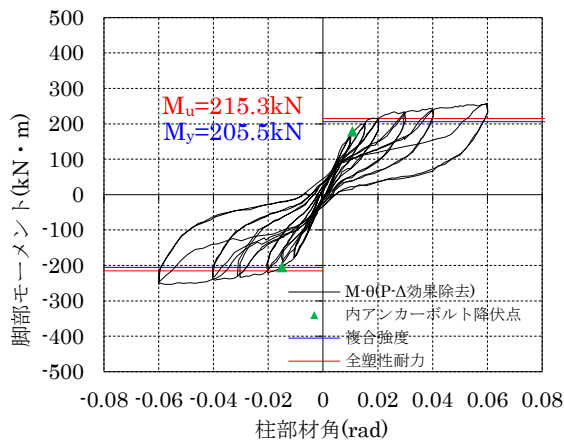


図5 M-θ関係図 (9N 試験体)

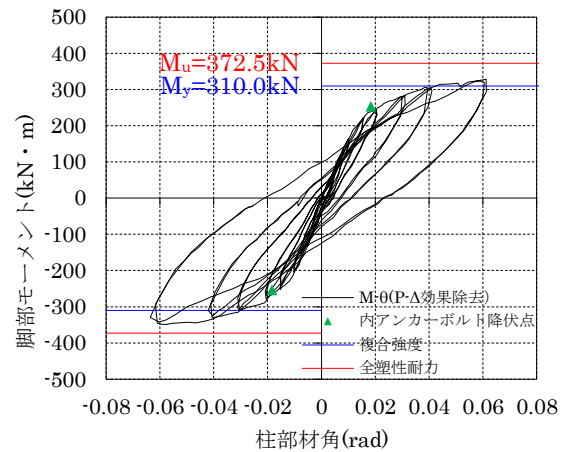


図8 M-θ関係図 (25N 試験体)

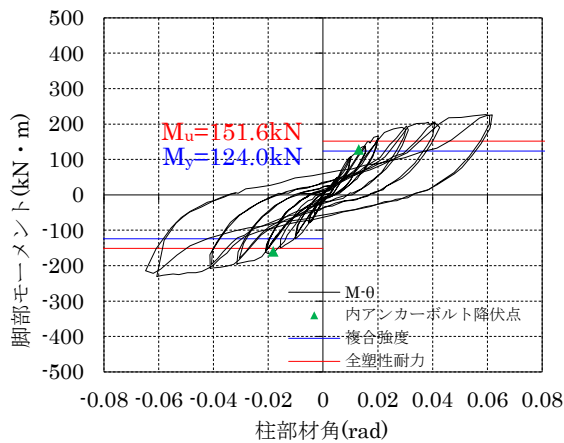


図6 M-θ関係図 (16N 試験体)

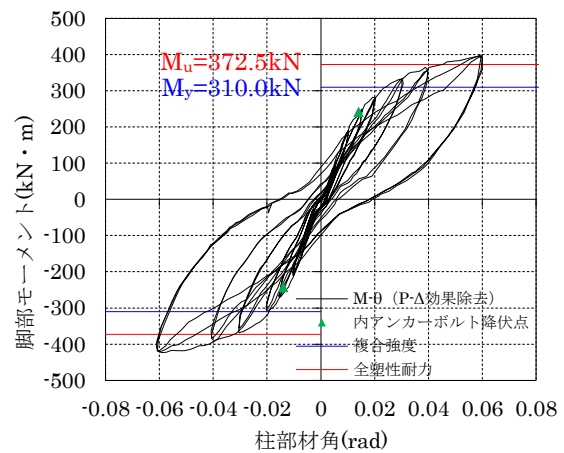


図9 M-θ関係図 (25R 試験体)

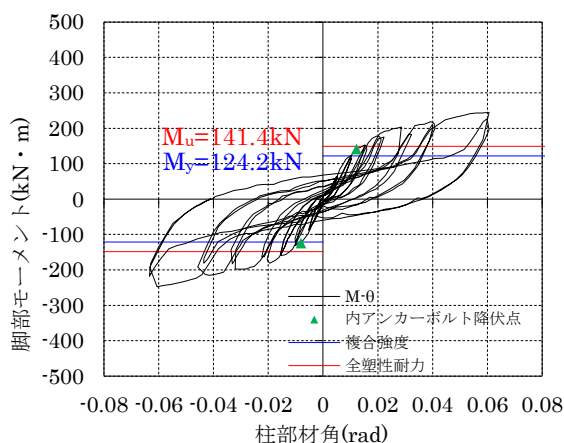


図7 M-θ関係図 (16R 試験体)

3.3 荷重変形関係

実験により得られた、各試験体の脚部モーメン

ト(M) - 柱部材角(θ)関係を図5～9に示す。脚部モーメントは試験体ベースプレート下面を基準に算出した。図中には、式(1)、(2)で予測した降伏荷重(複合強度)と全塑性荷重(式(2)に $s_a=1.0$ 、 $s=1.5$ を代入した値)を示す。

結果より9N、16N、16R試験体は、複合型露出柱脚で想定されるスリップ型と紡錘型が混合された履歴性状となった。これに対し、25N試験体では、スリップ型の効果が全体の履歴にほとんど表れなかった。これは、ベースプレートが一体的に変形したため、内アンカーボルトの変形量が外ベースプレートが薄い試験体と比較して小さくなったためだと考えられる。25R試験体では、リブ板の効果により内ベースプレートの面外剛

表5 柱部材角- s_a の比較(16N試験体)

柱部材角	加力方向	M (kN・m)	M_{ay} (kN・m)	eM_b (kN・m)	外 BPL 負担率	計算値	s_a
1/33rad	+	190.4	76.9	113.5	0.60	70.4	1.61
	−	196.1	77.5	118.6	0.60		1.69
1/25rad	+	206.0	76.9	129.1	0.63		1.83
	−	207.8	78.5	129.3	0.62		1.84
1/17rad	+	227.2	85.7	141.5	0.62		2.01
	−	230.3	87.0	143.3	0.62		2.03

※BPL=ベースプレート

表6 柱部材角- s_a の比較(16R試験体)

柱部材角	加力方向	M (kN・m)	M_{ay} (kN・m)	eM_b (kN・m)	外 BPL 負担率	計算値	s_a
1/33rad	+	203.3	71.5	131.8	0.65	69.5	1.87
	−	197.8	72.1	125.7	0.64		1.79
1/25rad	+	218.2	72.0	146.2	0.67		2.08
	−	215.6	75.3	140.3	0.65		1.99
1/17rad	+	244.9	82.5	162.4	0.66		2.31
	−	247.6	85.6	162.0	0.65		2.30

※BPL=ベースプレート

性が増加し、内アンカーボルトにも荷重が伝達しやすくなったため、スリップ型の効果が履歴にも表れるようになった。なお、すべての試験体で塑性化後も強度上昇する傾向が見られた。

3.4 強度式に関する考察

実験結果より評価した柱脚強度と式(1)、(2)に示した強度式との比較を行う。

3.4.1 複合強度算定式の検証

複合型露出柱脚の強度式の整合性を確認するため、想定モデルに近い挙動をした、9N、16N、16R 試験体を対象とし実験結果との比較を行う。実験結果から求められた柱脚の降伏強度を表4に示す。

降伏強度の判断基準は、引張側の内アンカーボルト群の各々に貼り付けられたひずみゲージのうち1本が、材料試験より求めた降伏ひずみを超過した点とした。表4より、実験値と計算値の比率は0.87~1.29程度であり、対応性は概ね良好であることが確認された。今後、コンクリート基礎を用いた実験による検証が必要となるが、式(1)の実験定数 $c_{am}=2.3$ とほぼ同値で、複合型露出柱脚の設計が可能であることが示された。

表4 降伏強度の比較

試験体名	加力方向	計算値 (kN・m)	実験値 (kN・m)	実験値/計算値
9N	+	205.4	178.9	0.87
	-		204.3	0.99
16N	+	124.0	128.2	1.03
	-		159.5	1.29
16R	+	121.6	156.9	1.29
	-		124.2	1.02

3.4.2 強度上昇係数 s_a の検証

実験結果より、複合型露出柱脚は降伏後も緩やかに強度上昇する傾向が見られた。これは、終局時の耐力が全塑性耐力よりも大きくなることを表し、基礎梁などの周辺部材設計に必要な安全率の設定に影響を及ぼす。強度上昇の要因は外ベースプレートの塑性化後の挙動と考えられるため、実験により得られた荷重 M_{CB} から内アンカーボルト負担分 M_a を除去することで、外ベースプレートの負担荷重 eM_b を求めた。なお、検証は無軸力の16N、16R試験体で行った。 eM_b 、 s_a の算出式を式(3)、(4)に示す。

$${}_f M_b = M_{CB} - M_a = M_{CB} - \sum_{k=1}^n \sigma_{ak} \cdot A_{bi} \cdot d_i \quad (3)$$

$$s_a = {}_f M_b / ({}_f M_{by}) \quad (s = 1.5) \quad (4)$$

ここで、内アンカーボルト引張力による脚部の曲げモーメント算定では、支点を内ベースプレート圧縮側はね出し部の中央と仮定し、本実験では $d=35\text{cm}$ とした。内アンカーボルト作用応力は、ひずみゲージ計測値をもとに、材料試験により得られた応力 - ひずみ曲線に対応する値とした。比較は、十分塑性化が進んだ柱部材角 $1/33\text{rad}$ 、 $1/25\text{rad}$ 、 $1/17\text{rad}$ サイクルの正負 1 回目で行った。比較結果を表 5、6 に示す。

比較結果から、変形量が増加するにつれ M_a 、 eM_b の値が増加した。全体荷重 M_{CB} に対する外ベースプレート負担荷重 eM_b の割合は、16N 試験体で 0.6 程度、16R 試験体で 0.66 程度と、サイクルによらず一定の値となった。強度上昇率 s_a は 16N 試験体で 2.0 程度、16R 試験体で 2.3 程度となり、リブ板を設けた試験体が高い値となった。

以上の結果より、必要最大回転角を $1/25\text{rad}$ とすると、外ベースプレートの強度上昇率 s_a は 2.0 程度となる。

4. まとめ

本論で得られた知見を以下に示す。

- 1) ベースプレートとアンカーボルトの 2 種類の弾塑性ばねで構成された複合型露出柱脚を提案し、ベースプレート降伏強度とアンカーボルト降伏強度の単純累加で耐力式を構築した。
- 2) ベースプレートの変形状態が想定モデルに近いほど、スリップ型と紡錘型を累加した履歴性状を示すことが確認された。この傾向は、外ベースプレートの板厚が内ベースプレートの厚い板の $1/2$ 以下の場合に示されることを確認した。
- 3) 実験による試験体耐力と 2 章の耐力式で評価した耐力を比較した結果、対応性は概ね良好であることが確認された。既往の研究²⁾で設定した実験定数 $c_{am}=2.3$ と同等の値で、複合型露出柱脚の設計が可能であることが示された。

- 4) 外ベースプレート降伏後の強度上昇係数 s_a は実験結果から終局状態（柱部材角 $=1/25\text{rad}$ ）で 2.0 程度となることが示された。

[謝辞]

本研究を行うに際し、(株)伊藤製鐵所に協力をいただいた。関係各位に感謝の意を表す。

[参考文献]

- 1) 柳田佳伸：複合型露出柱脚の提案，平成 25 年度日本大学理工学部学術講演会論文集，pp.71-72，2013.12
- 2) 鋼構造接合部設計指針，日本建築学会，2012.3
- 3) 柳田佳伸，半貫敏夫，秋山宏：露出型鉄骨柱脚の履歴特性に関する実験的研究，日本建築学会構造工学論文集，vol.51B，pp.303-310，2005.3
- 4) 秋山宏：鉄骨柱脚の耐震設計，技報堂出版，1985.3
- 5) 柳田佳伸，寺内将貴，新井佑一郎，石鍋雄一郎：2 種の降伏メカニズムを有する複合型露出柱脚の履歴特性に関する実験的研究 その 1，2：日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1171-1174，2016.8
- 6) 是此田涉，吉住孝志，土井紀佳，野田善弘，西小野芳壮，梶山博光：ベースプレート降伏先行型鉄骨露出柱脚の弾塑性変形性状に関する研究（その 1）実験計画および実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（関東），pp.967-968，2001.9