

鉄筋コンクリート製基礎を有する複合型露出柱脚の実大検証実験

Full scale test of composite exposed-type column bases with reinforced concrete foundation

○新井 佑一郎* 柳田 佳伸* 寺内 将貴** 石鍋 雄一郎***
Yuichiro ARAI Yoshinobu YANAGITA Masaki TERAUCHI Yuichiro ISHINABE

ABSTRACT : The composite exposed-type column bases can improve performance for earthquake resistant by addition of energy absorption of base plate hinge to that of yielding of anchor bolt. The composite exposed-type column bases are featured by combination of two types of anchor bolts and base plates. In this paper, the composite exposed-type column bases was verified of mechanical performance through full-scale experiment.

Keywords : 露出型柱脚, ベースプレート降伏, 力学的性能

Exposed-type column bases, Yield of base plate, Mechanical performance

1. はじめに

中低層の鉄骨建物では、鉄骨柱下部に設けたベースプレートをアンカーボルトで基礎コンクリートに緊結する露出型柱脚が用いられている。兵庫県南部地震以前は、伸び能力が低いアンカーボルトが用いられ、塑性変形能力が不足した露出型柱脚で大きな被害が発生した。以降、伸び能力を有するアンカーボルトを用いた設計が行われるようになり、柱脚の塑性変形能力は改善したものの、エネルギー吸収能力が乏しいスリップ型履歴による第1層への損傷集中¹⁾などの骨組全体の耐震性には課題を残している。

複合型露出柱脚は、2種のアンカーボルトとベースプレートから構成され、アンカーボルト降伏型にベースプレート降伏型の要素を付加することにより、繰り返し载荷におけるエネルギー吸収能力を高めた柱脚である。複合型露出柱脚の構成と変形の概念図を図1に示す。既報の実験²⁾では、柱サイズ 250 角の試験体を製作し、複合型露出柱脚が想定するメカニズムを形成するかどうかの検証を行った。この実験では、基礎コンクリート

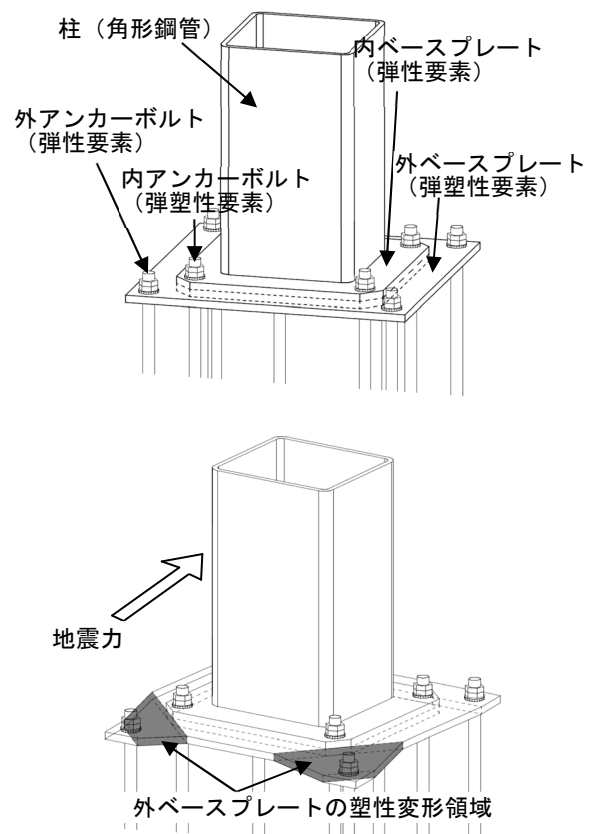


図1 複合型露出柱脚の構成と変形概念図

*工博 青木あすなろ建設(株)技術研究所(〒300-2622 茨城県つくば市要36-1) 第2種正会員
**工修 青木あすなろ建設(株)技術研究所(同上)
***工博 日本大学理工学部 助教(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14) 第2種正会員
本論文の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ, pp.941-944, 2017.8 にて発表

トのひび割れなどの要素を排除し、柱脚自体の基本的な性能を把握するために、鋼製基礎を用いた。しかしながら、実際の柱脚は、曲げおよび軸力を、コンクリートに埋め込まれたアンカーボルトの引張力と鋼—コンクリート間に生じる支圧力で基礎に伝達させる。特に、複合型露出柱脚は、外側に配置された薄いベースプレートが、繰り返し加力に対して安定的に塑性変形することが求められ、変形に必要な反力も基礎コンクリート部分から受ける。よって、複合型露出柱脚は一般的なアンカーボルト降伏型柱脚と比較して、基礎コンクリート部分により高い安定性が求められる。

本論では、実大建物を想定した鉄骨柱、柱脚、鉄筋コンクリート造基礎梁を模擬した試験体を2体製作し、既往の実験³⁾で確認された柱脚の耐力・剛性式の適用性と、繰り返し加力時の基礎コンクリートの健全性を確認し、複合型露出柱脚を実用化する上での知見を得ることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体は、10 層程度の中高層鉄骨建物の柱下端・柱脚・基礎梁を想定したモデルとした。試験体形状を図 2 に、試験体緒元を表 1 に、使用鋼材の機械的性質を表 2 に示す。また、基礎に使用されるコンクリートの圧縮強度試験結果および、基礎とベースプレートの間に充填される無収縮

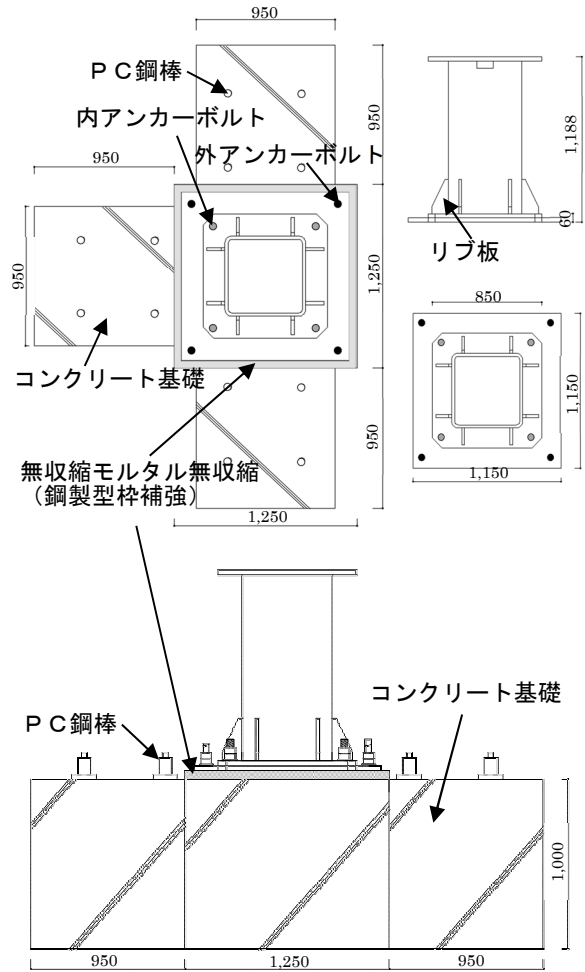


図 2 試験体形状

モルタルの圧縮試験結果を表 3 に示す。コンクリートの設計基準強度は Fc24、充填する無収縮モルタルは強度 50N/mm² クラスの市販のプレミックス品とした。柱材は、断面□ - 550×550×22 の冷間成形角形鋼管 (BCR295) を用い、柱長さ

表 1 試験体緒元

試験体名	柱断面(mm)	柱型断面(mm)	コンクリート強度	BPL-内側(mm)	BPL-外側(mm)	A.bolt-内側	A.bolt-外側
No.1	□-550×550	1250×1250	Fc=24N/mm ²	PL60-850×850	PL32-1150×1150	M42-ABR490	D38-SD490
No.2	t=22 h=1188	l=1000		TMCP325B	SN400B	l=931mm	l=903mm

※BPL=ベースプレート A.bolt=アンカーボルト

表 2 材料試験結果

部材名	鋼種	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び率 (%)	試験片
内 BPL	TMCP325B	374.7	509.4	40	4 号
外 BPL	SN400B	266.7	424.4	35	1A 号
内 A.bolt	ABR490	338.6	537.5	32	14A 号
外 A.bolt	SD490	532.1	704.2	18	14A 号
柱	BCR295	347.9	506.5	45	5 号

※BPL=ベースプレート A.bolt=アンカーボルト

表 3 コンクリートおよび無収縮モルタル圧縮強度

部材名	材 齢	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン 比
コンクリート	131 日	36.6	2.33	0.21
モルタル	69 日	73.4	3.23	0.25

は 1188mm である。試験体は共通の形状 2 体とし、軸力の有無をパラメータとして実験を行う。

柱脚部は、厚い内側のベースプレート（以下、内ベースプレート）60mm（TMCP325B）と、薄い外側のベースプレート（以下、外ベースプレート）32mm（SN400B）を突合せ溶接で接合し、一体化された凸型のベースプレートを用いている。ベースプレートの製作方法の概念図を図 3 に示す。内ベースプレートは、図 1 に示される変形モードを実現するために、四隅を面取りすることで形状が八角形となっている。また、内ベースプレートの面外剛性を確保するため、リブ板 8 枚を取り付けた。

アンカーボルトの配置は、内ベースプレートを緊結する内アンカーボルトが 4 本、外ベースプレートを緊結する外アンカーボルトが 4 本の、合計 8 本である。内アンカーボルトは加力時に塑性変形させるため、伸び能力が高い転造ネジの構造用アンカーボルト（ABR490 M42）を用いた。これに対し、外ベースプレートを緊結する外アンカーボルトは、大変形領域までベースプレートを固定する機能が求められているため、軸降伏しないことが求められる。そこで、強度と高い付着性能を有する材料として、高強度のねじ節鉄筋（SD490 D38）を用いた。

2.2 無収縮モルタル部の補強

複合型露出柱脚は外周部の外ベースプレートが、繰り返し加力時に面外曲げ変形することでエネルギーを吸収する。そのため、外ベースプレートからの支圧応力（てこ反力）を受ける無収縮モルタルは、繰り返し加力時でも剥落しないことが求められる。これに対し、使用する無収縮モルタルは脆性材料であり、外ベースプレートからのてこ反力を受けた場合（図 4）、ひび割れの発生が避けられない。既往の研究⁴⁾では、無収縮モルタル部分の側面を鋼板で覆うことにより、繰り返し加力時のモルタルの剥落が防止され、安定した

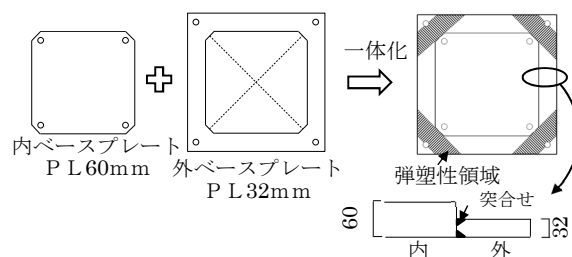


図 3 ベースプレート製作方法概念図

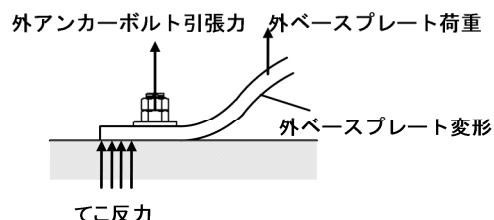


図 4 外ベースプレートからのてこ反力

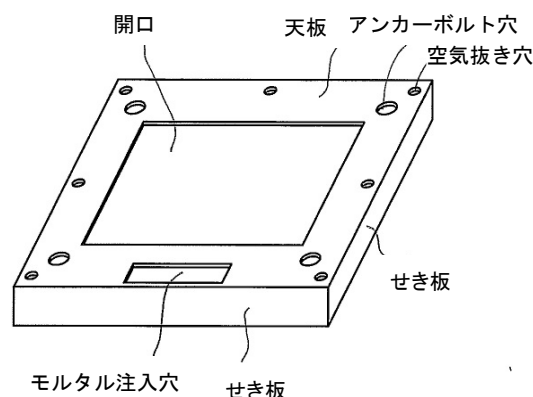


図 5 鋼製型枠形状



写真 1 鋼製型枠設置状況

履歴が得られることが示されている。

そこで、既往の研究⁴⁾および指針⁵⁾での解説で示される側面の補強要素（せき板）に、外ベースプレート部分との接触部を覆う板要素（天板）で

構成される鋼製型枠を設置した。天板中央部には内ベースプレートの面積と同等程度の開口があり、内ベースプレート部分が無収縮モルタルと接触するようになっている。これにより、ベースプレートとコンクリート間の摩擦力によるせん断抵抗が可能になる。形状を図 5 に、設置状況を写真 1 に示す。なお、この補強材は、無収縮モルタルの型枠および、アンカーボルト位置決め用のテンプレートと兼用することもできる。

2.3 基礎コンクリートの概要

基礎コンクリートは、建物の側柱を想定し、伏図方向の形状を T 形とした。

試験体基礎コンクリートの各部の断面および配筋を表 4 に示す。基礎コンクリートは、既往の研究 2) をもとに設定した実大試験体の予測耐力および、既報の実験で見られた柱脚降伏後の曲げ耐力上昇の挙動を参考に、実験時で想定される荷重（予測耐力の 2 倍）でも弾性範囲に留まるように設計した。コーン状破壊についても、鋼構造接合部設計指針 5) に示される方法で算定を行い、外アンカーボルトと内アンカーボルトの両方から作用する引張力を累加した荷重に対し、コーン状破壊の耐力が上回るように設計した。

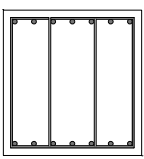
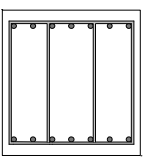
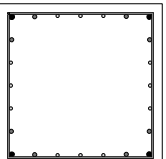
2.4 加力方法

加力は、試験体頂部にピン治具を取り付け、柱に軸力とせん断力を同時に作用させた。加力装置の概要を図 6 に示す。

図中の鉛直アクチュエータ 2 本で軸力を、水平アクチュエータを用いて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、正負交番繰り返し載荷を行った。載荷プログラムを表 5 に示す。軸力は、無軸力と、柱角形鋼管の降伏軸力 N_y を基準に、 $N/N_y=0.2$ となる荷重として 2640kN の一定軸力の 2 タイプとした。

加力は、試験体 No.1, 2 ともに、最初に軸力を作用させない状態で短期許容曲げ耐力の 0.5 倍、1.0 倍の荷重制御による加力を行う。これにより、

表 4 試験体基礎コンクリート各部の断面及び配筋図

部材名	梁断面 A	梁断面 B	柱型断面
断面形状			
断面サイズ	1000×950(mm)	1000×950(mm)	1250×1250(mm)
主筋	上 7-D32 下 7-D32	上 7-D35 下 7-D35	4-D38 (外 A.bolt) 8-D32 16-D25
せん断補強筋	D13@100	D16@100	D13@100

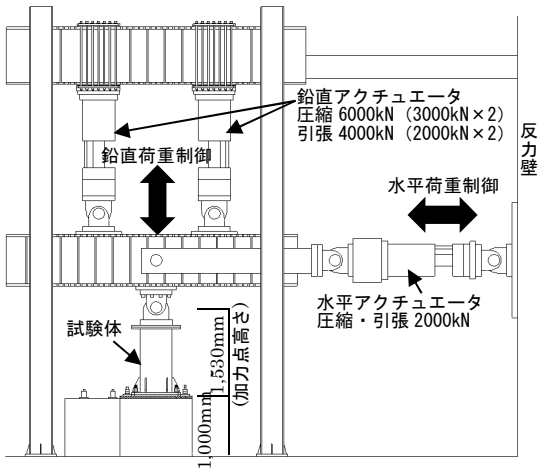


表 5 載荷プログラム

サイクル数	No.1	No.2
1 回	弾性範囲確認	水平荷重 240kN
正負交番繰り返し載荷	短期許容耐力	水平荷重 480kN
		軸力導入=2640kN
	柱部材角 $\theta=1/100\text{rad}$	柱部材角 $\theta=1/133\text{rad}$
	$\theta=1/67\text{rad}$	$\theta=1/67\text{rad}$
	$\theta=1/50\text{rad}$	$\theta=1/50\text{rad}$
3 回	$\theta=1/33\text{rad}$	$\theta=1/33\text{rad}$
	アンカーボルトの締直し作業	
2 回	$\theta=1/33\text{rad}$	$\theta=1/33\text{rad}$
1 回	$\theta=1/25\text{rad}$	$\theta=1/25\text{rad}$

複合型露出柱脚の純粋な回転剛性を算出する。その後は、所定の軸力で柱部材角 $\theta=1/40\text{rad}$ まで、各サイクル 2 回繰り返し、柱部材角 $\theta=1/33\text{rad}$ サイクルでは 3 回の繰り返し加力を行う。柱部材角 $\theta=1/33\text{rad}$ のサイクルが終了した後に、被災

後の性能回復を模擬した作業⁶⁾として、塑性化した内アンカーボルトの締め直しを行い、柱部材角 $\theta=1/25\text{rad}$ まで加力を行った。

計測は、各アクチュエータに取り付けられたロードセル、加力点の水平変位を計測するピストン式変位計、柱脚部の浮き上がりおよび横滑りを検出する高感度変位計、ベースプレートやアンカーボルトに貼り付けられたひずみゲージで行った。

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変形関係

実験により得られた、脚部モーメント M - 柱部材角 θ 関係を図 7、8 に示す。脚部モーメントは、アクチュエータで載荷したせん断力に加力点高さ 1530mm を乗じた値である。図中には、複合型露出柱脚の予測降伏曲げモーメントと、降伏曲げモーメントの実験値も示している。予測降伏曲げモーメントは、既報²⁾に示される算出方法による。予測降伏曲げモーメントの算出式を式(1)に示す。

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

- M_y : 複合型露出柱脚の降伏耐力
- M_{by} : 外ベースプレート降伏による耐力
- M_{ay} : 内アンカーボルト降伏による耐力
- M_n : 軸力による付加曲げモーメント
- σ_y : 外ベースプレート降伏点
- b : 外ベースプレート塑性化板要素 (長辺)
- d : 外ベースプレート塑性化板要素 (短辺)
- B : 外ベースプレート幅
- t : 外ベースプレート板厚
- c_{am} : 実験定数 (=2.3)

また、図中には柱脚剛性の予測値も示した。柱脚の回転剛性予測式は既往のベースプレート降伏型柱脚の研究³⁾をもとに、式(2)のように設定した。

降伏曲げモーメントの実験値は、既報の実験と同様に、引張側の内アンカーボルト群に貼り付けられたひずみゲージの内 1 ヶ所が、アンカーボルト

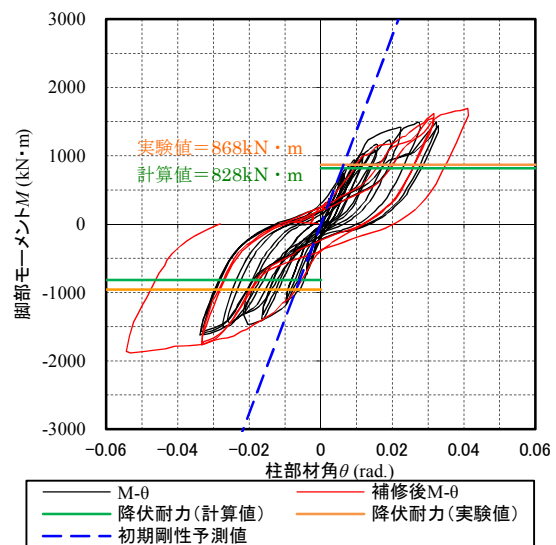


図 7 試験体 No. 1 M - θ 関係図

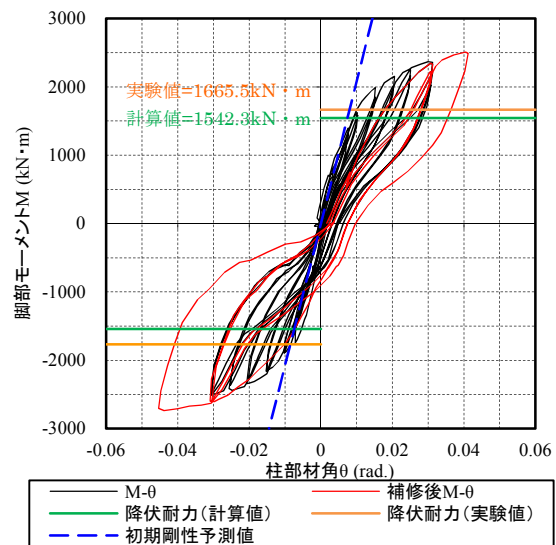


図 8 試験体 No. 2 M - θ 関係図

$${}_{ab}K_y = \alpha_N \left(\frac{E \cdot b \cdot B^2 \cdot t}{d \cdot c_k} + {}_aK_{yi} \right) = \alpha_N ({}_bK_{by} + {}_aK_{yi}) \cdots (2)$$

- ${}_{ab}K_y$: 複合型露出柱脚の回転剛性
- α_N : 軸力効果の係数
- b : 外ベースプレート塑性化板要素 (長辺)
- d : 外ベースプレート塑性化板要素 (短辺)
- B : 外ベースプレート幅
- t : 外ベースプレート板厚
- c_k : 剛性に関する実験定数 (=345)
- ${}_bK_{by}$: 外ベースプレート要素の回転剛性
- ${}_aK_{yi}$: 内アンカーボルト要素の回転剛性

ト材の引張試験により求められた素材の降伏ひずみを超過した時点とした。実験結果から、降伏曲げモーメントの実験値は予測値を上回っており、既報の実験と同様に、予測式は安全側の評価が可能であることが分かった。

履歴形状を見ると、No.1,2 試験体ともに、弾性範囲では従来のアンカーボルト降伏型と同様の挙動を示していることが確認された。これに対し、内アンカーボルトおよび外ベースプレートに塑性変形が生じた領域では、アンカーボルト降伏型では、スリップ現象により応力を負担しなくなる領域でも、ベースプレートが荷重を負担し、履歴面積の累積が増大することが確認された。ベースプレートの耐荷力は安定しており、繰り返し載荷時でもほとんど低下が見られず、安定してエネルギー吸収が可能であることが示された。

内アンカーボルトの締め直し作業後の荷重 - 変形関係は、図 7,8 の赤で示される履歴曲線である。なお、締め直し作業に際して、軸力 $N=0$ の No.1 試験体では外ベースプレート変形による残留変形が生じていたため、軸力を加え、柱の部材角を $\theta=0$ に戻した後に締め直しを行い、再び軸力を 0 に戻した。

締め直し作業後の脚部モーメント M - 部材角 θ から、軸力なしの No.1 試験体では、正側で締め直し前と比較して荷重が低くなっているが、負側では上回る結果となった。また、軸力を作用させた No.2 試験体では、正側で締め直し前と比較して荷重が低くなる領域が見られたが、負側では締め直し前の耐力とほぼ同等になった。

締め直し前後の加力 ($\theta=1/33\text{rad}$) における、引張側アンカーボルトの塑性率の比較を表 6 に示す。なお、表中の右側は負加力時に、左側は正加力時に引張力を受ける。荷重の低下が見られた No.2 正側では、内アンカーボルトの塑性率が、3.22 と他の値 (6.39~8.19) と比較して小さかった。これは、ベースプレートの残留変形により生

表 6 引張側内アンカーボルトの塑性率比較

	締め直し前	締め直し後	塑性率増分
No.1 右側(負)	13.6	21.0	7.33
No.1 左側(正)	10.6	17.0	6.39
No.2 右側(負)	9.9	18.1	8.19
No.2 左側(正)	9.3	12.5	3.22



写真2 ベースプレート変形状況①



写真3 ベースプレート変形状況②

じたモルタルとベースプレート間の隙間によるものだと考えられる。

3.2 試験体破壊状況

各試験体の加力後におけるベースプレートの変形状況を写真 2、3 に示す。

内ベースプレートの四隅面取り部を起点に外ベースプレートが曲げ変形している状況が確認できた。外ベースプレートの塑性化に伴う塗装剥がれの領域も、複合型露出柱脚の変形をモデル化した際に想定した弾塑性領域と概ね対応していた。なお、リブ板の効果もあり内ベースプレート側で塑性変形が生じた兆候はほとんど見られな

かった。

無収縮モルタル部を補強する目的で設置した鋼製型枠は、写真4に示すようにNo.1試験体で側面のせき板に変形と亀裂が見られた。しかし、無収縮モルタルの剥落はなく、最終加力まで耐力を維持していた。No.2試験体では、鋼製型枠に明らかな変形や亀裂はなく、No.1試験体と同様に最終サイクルまで耐力が維持された。鋼製型枠の損傷が比較的大きかったNo.1試験体について、加力後に柱を撤去し、外ベースプレートからのてこ反力が集中する外アンカーボルト周辺の沈下量を計測した。その結果、沈下量は1～1.5mmであり複合型露出柱脚の機能を維持する上で支障がない程度の損傷であることが確認された。

4. 試験体の耐力・剛性の評価

実験により得られた脚部モーメント - 部材角関係および脚部モーメント - 脚部回転角関係を用いて、複合型露出柱脚の曲げ耐力・回転剛性の実験値を求め、式(1)、(2)で算出した予測値と比較した。部材の耐力は、軸力とせん断力の組み合わせにより変化するため、No.2試験体では2640kNの定軸力が作用した場合の値を予測値としている。なお、軸力が作用した場合の回転剛性の評価は、図9に示すように、原点と降伏曲げ耐力に達した際の座標を結んだ割線剛性とした。

実験値と予測値の比較を表7に示す。比較から、回転剛性は軸力なしの場合、実験値/予測値の比が1.18～1.35となった。軸力ありの場合でも比率は1.13～1.17であり、十分な精度で安全側の評価を行うことができることが分かった。降伏曲げ耐力の実験値/予測値の比は1.06～1.17の範囲に納まり、軸力の有無による傾向の違いも見られなかった。なお、No.2試験体は無軸力で行った予備加力では柱脚を降伏させなかったため、曲げ耐力の実験値を求めている。

以上より、降伏曲げ耐力の評価でも、予測値は

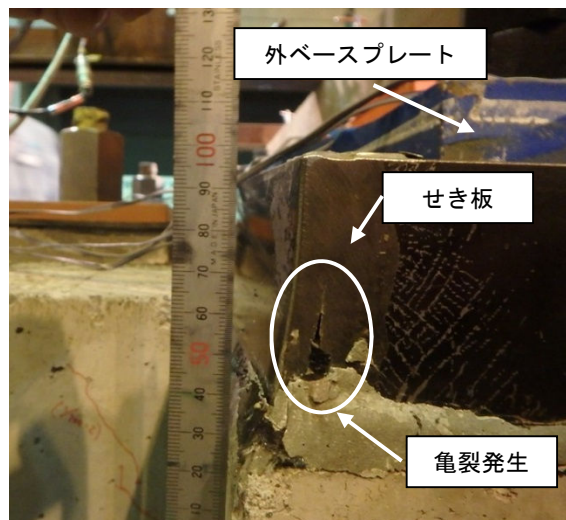


写真4 鋼製型枠の亀裂発生状況

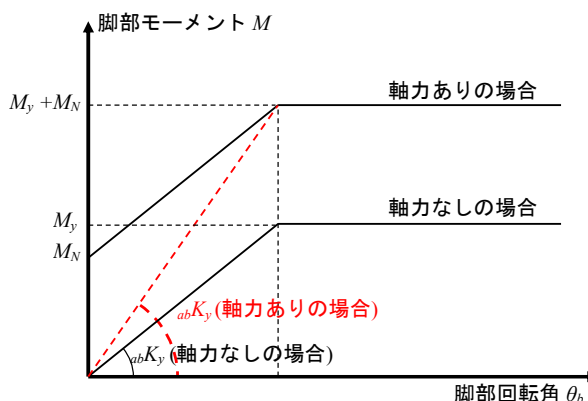


図9 軸力を考慮した回転剛性の評価

表7 回転剛性と強度の実験値と予測値比

試験体	加力 方向	軸力 (kN)	回転剛性 ($\times 10^5 \cdot \text{kN} \cdot \text{m/rad}$)		実験/予測	降伏荷重(kN・m)		実験/予測
			予測値	実験値		予測値	実験値	
No.1	+	0	1.80	2.43	1.35	816.3	868	1.06
	-			2.12	1.18		-957	1.17
No.2	+	0	1.80	2.24	1.24			
	-			2.20	1.22			
	+	2640	3.40	3.97	1.17	1542	1666	1.08
	-			3.83	1.13		-1765	1.14

十分な精度かつ安全側の評価を行うことが可能であることが示された。

5. まとめ

本論では、ベースプレート降伏の効果を付加し、エネルギー吸収能力を改善した複合型露出柱脚について、基礎コンクリートを含む実大試験体を製作し加力実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 加力実験により得られた脚部モーメント - 柱部材角関係から、既報の実験結果と同様にベースプレート降伏の効果によるスリップ現象の緩和が見られた。
- 2) 実験終了後のベースプレート変形状況から、実構造物に近い状態での加力でも、設計式構築時に想定した変形モデルに近い形状となっていることが確認された。
- 3) 被災後の性能回復手段として、塑性化した内アンカーボルトの締め直しを行い再加力した。その結果、簡単な締め直し作業のみで柱脚の性能は概ね加力前の水準に回復した。
- 4) 鋼製型枠で無収縮モルタルを補強することで、大変形時の繰り返し加力でも耐力を維持し、安定した履歴形状となった。
- 5) 既往の実験³⁾をもとに設定した複合型露出柱脚の降伏曲げ耐力・回転剛性の設計式と、実験値を比較した結果、十分な精度かつ安全側の予測が可能であることが確認された。

[参考文献]

- 1) 秋山宏：露出柱脚の耐震設計，技法堂出版，1985.3, pp.73-82
- 2) 新井，柳田，寺内，石鍋：2種類の降伏機構を有する露出型柱脚の強度特性に関する研究，日本鋼構造協会，鋼構造年次論文集，第24巻，2016.11, pp.217-224
- 3) 柳田，半貫，秋山：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) 九谷，増田：鉄骨柱脚部の力学性状に関する実験的研究，露出柱脚の降伏耐力について，その8，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1633-1634, 1993.9
- 5) 日本建築学会：鋼構造接合部設計指針，2008.7, pp.262-263
- 6) 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型柱脚設計施工指針・同解説（改定版），2011.9