

2. 中低層建物の柱脚部を想定した複合型露出柱脚の実験に関する報告

Report on Experiment of Composite Exposed-type Column Bases Supposed Low and Medium Rise Building.

新井佑一郎* 柳田佳伸* 寺内将貴* 石鍋雄一郎**

—概要—

複合型露出柱脚は、従来の露出型柱脚にベースプレート降伏型の要素を付加することで、効率的に地震エネルギーを吸収する柱脚ヒンジタイプの露出型柱脚である（図1）。ベースプレート降伏要素を積極的に取り入れることで、複数回の地震に対しても耐震性能を発揮することができる。

本報では、中低層建物の柱脚部を想定した、写真1に示す試験体（柱サイズ 550 角、柱型サイズ 1250 角）の加力実験について報告する。

—技術的な特長—

複合型露出柱脚は、2種類のアンカーボルトおよびベースプレートより構成されており、内周に配置されたアンカーボルトと外側の薄いベースプレートが降伏要素（図1中の灰色で示す部分）となる。これにより、アンカーボルトとベースプレート各々の弾塑性ばねが並列の関係となり、曲げ耐力および曲げ剛性は単純累加により評価することができる。実験結果より、アンカーボルトの塑性化が進展した領域において、ベースプレートの降伏効果によりスリップ型履歴の改善を確認した（図2）。

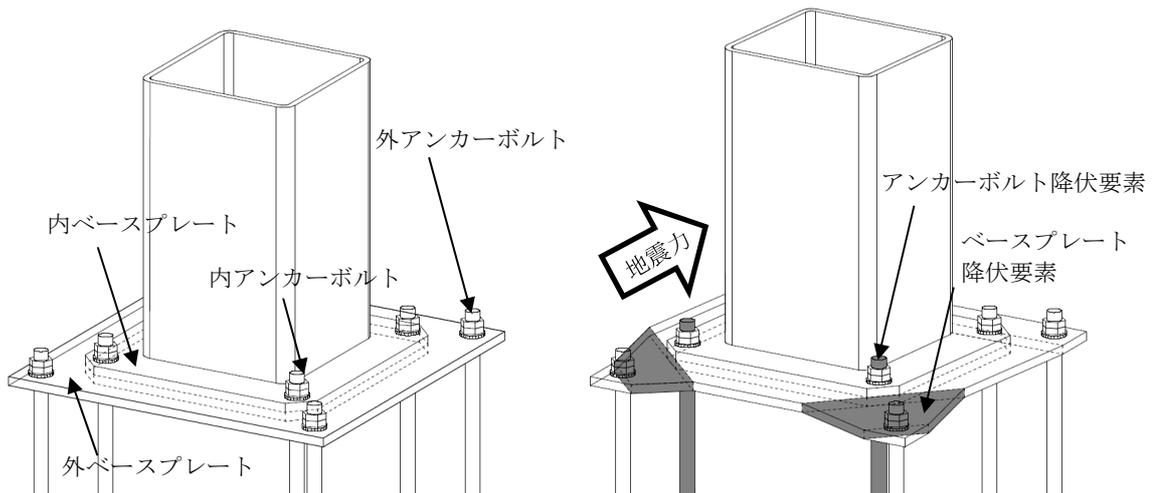


図1 複合型露出柱脚の概念図



写真1 中低層建物を想定した複合型露出柱脚試験体

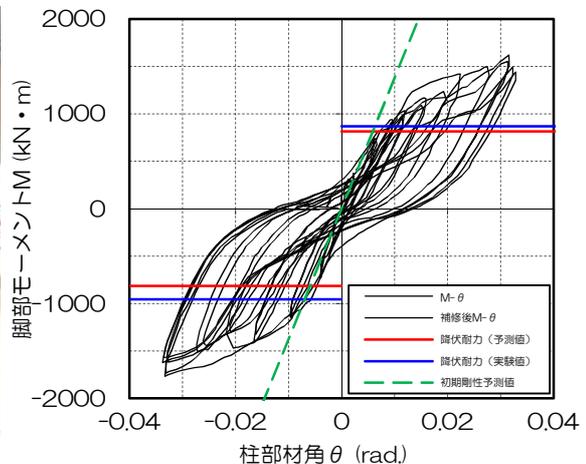


図2 脚部モーメント (kN・m) - 柱部材角 (θ) 関係図

※本報の内容は、日本建築学会大会学術講演概要集（2017.08.pp941-944）にて発表済みである。

*技術研究所建築研究室 **日本大学

中低層建物の柱脚部を想定した複合型露出柱脚の実験に関する報告
**Report on Experiment of Composite Exposed-type Column Bases Supposed
 Low and Medium Rise Building.**

○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. A procedure for strength confirmation and its application were given in the present.

Keywords :露出型柱脚, ベースプレート降伏, 実験, 力学的性質
Exposed-type column bases, Yield of base plate, Experiment, Mechanical performance

1. はじめに

本報で対象とする複合型露出柱脚は、鉄骨柱脚の一種である露出型柱脚のエネルギー吸収能力が向上するように改良したものである。現在の設計において露出型柱脚を保有耐力接合としない場合の降伏形式はアンカーボルト降伏型が一般的であるが、アンカーボルトが塑性化し永久変形が生じると、耐力を負担できない領域を有するスリップ型の履歴特性^{1) 2) 3)}となる。そこで、履歴特性の改善に着目した研究が行われてきた^{2) 4)}。

また、一般的な降伏形式ではないが、ベースプレート降伏型とすることもできる。ベースプレート降伏型は履歴特性が紡錘型となるため、スリップ型に比べて多くのエネルギーを吸収することが示されている^{3) 5)}。しかし、ベースプレート降伏型の設計は、回転剛性を確保し難いこと、変形性状が複雑であることから、降伏耐力等を評価し難いことが挙げられる。

本研究はこれらの課題を解決するものとして、アンカーボルト降伏型にベースプレート降伏型を取り入れた複合型露出柱脚（図 1）を提案し、

その性能を実験的に検証したものである。

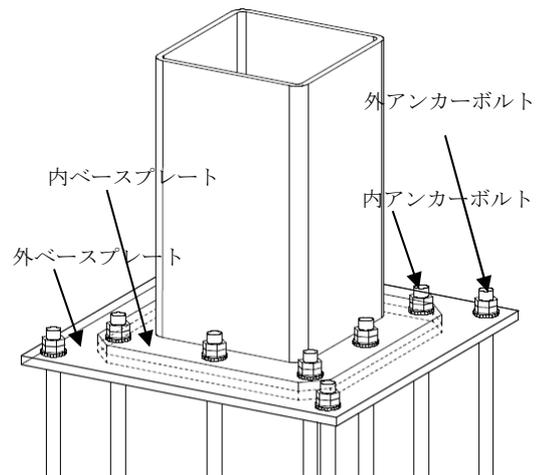


図 1 複合型露出柱脚の構成図

複合型露出柱脚は、柱脚の形状および構成に工夫を加えることで、アンカーボルトだけでなく、ベースプレートの一部分を意図して降伏させる特長がある。図 2 にベースプレートの構成概要図を示す。ベースプレートは塑性化させない内側のベースプレート（以下、内ベースプレート）と一部の領域が塑性化する外側のベースプレート（以下、外ベースプレート）から構成される。図中の

*技術研究所 建築研究室

**日本大学

※本報の内容は、日本建築学会大会学術講演梗概集（2017.08.pp.941-944）にて発表済みである。

斜線部は弾塑性領域を示す。これにより、耐力が向上するだけでなく、アンカーボルト降伏型特有のスリップ現象が改善されることは、鋼製基礎を用いた既報の実験⁵⁾において確認している。

また、複合型露出柱脚の特性は、アンカーボルト降伏型とベースプレート降伏型の弾塑性ばねが並列に配置されたものとして考えることができることであり、柱脚の降伏耐力をアンカーボルト降伏耐力とベースプレート降伏耐力の単純累加で評価することが可能⁵⁾であることも確認している。

本報では、中低層建物の柱脚部を模擬するため基礎コンクリート部分を再現し、T字型の側柱を

模擬した試験体で、複合型露出柱脚の性能を確認することを目的としている。また、建物の機能維持の観点から、大地震後に補修した状態を想定した性能確認を行った。

2. 試験体概要

表1に試験体諸元、図3に試験体形状・寸法を示す。試験体は建物外周部の柱を想定し、T字型の基礎部（柱型サイズ 1250mm、基礎梁サイズ 950mm）を製作した。

鉄骨柱脚部について、柱断面は10階建て程度の鉄骨ラーメン構造を想定し□-550×550×22とした。ベースプレートのサイズは内ベースプレートを PL60-850×850、外ベースプレートを

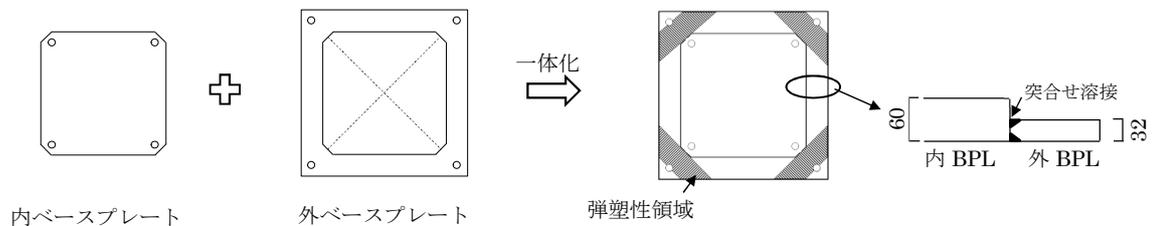


図2 ベースプレートの構成概要図

表1 試験体諸元

試験体名	柱断面(mm)	柱型断面(mm)	コンクリート強度 (N/mm ²)	BPL-内側(mm)	BPL-外側(mm)	A.bolt-内側 (mm)	A.bolt-外側 (mm)
No.1	□-550×550 t=22 h=1096	1250×1250 f=1000	F _c =24	PL60-850×850	PL32-1150×1150	M42-ABR490 l=931	D38-SD490 l=903
No.2				TMCP325B	SN400B		

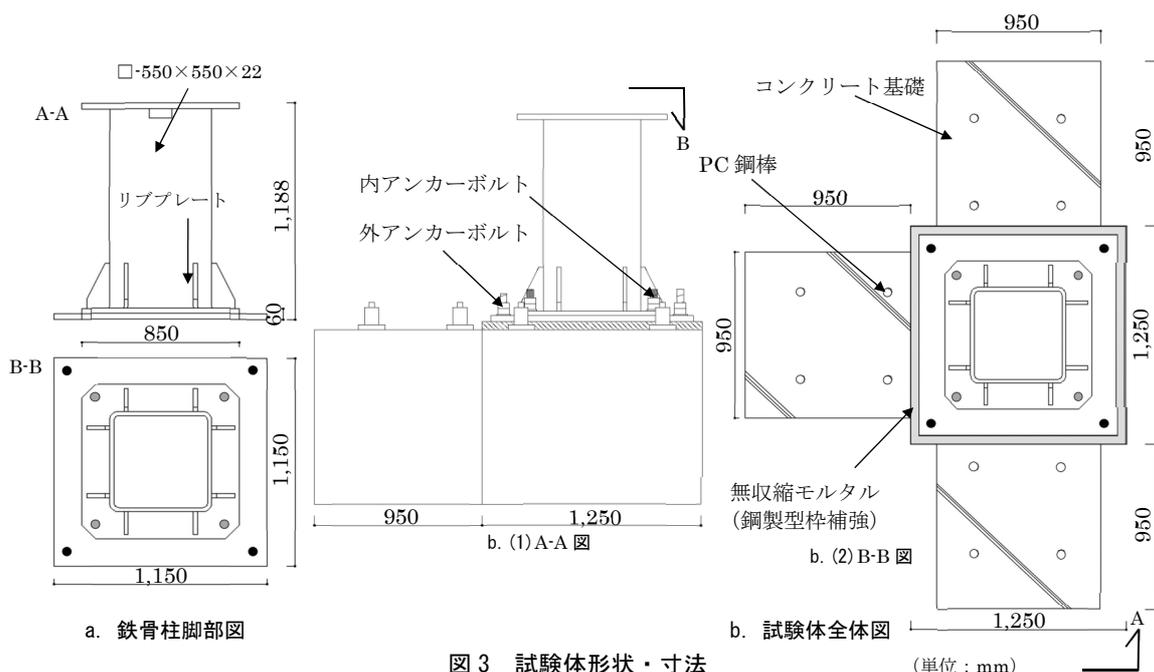


図3 試験体形状・寸法

(単位: mm)

PL32-1150×1150 とし、板厚が内ベースプレートの 1/2 程度となるように設定した。また、内ベースプレートの剛性を確保するためにリブプレート (t=22mm) を配している。内ベースプレートは、塑性化する領域を確保するため四隅の一部を切断し、八角形の形状としている。アンカーボルトは、内側のアンカーボルト (以下、内アンカーボルト) を伸び能力がある構造用アンカーボルト (ABR490) とし、塑性化を許容する。外側のアンカーボルト (以下、外アンカーボルト) は、塑性化させないため高強度の異形鉄筋を用いた。両アンカーボルトの定着長さは、内アンカーボルト軸径の 20 倍程度に設定している。

本実験では、外ベースプレートの降伏に伴うてこ反力による、無収縮モルタルの損傷に与える影響を最小限に抑えるため鋼製型枠を用いた。

鋼材引張試験結果、コンクリートおよび無収縮モルタルの圧縮試験結果は表 2、3 に示す通りである。

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	35	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

3. 加力実験概要

実験変数は柱軸力の有無とし、試験体 No.1 は軸力無し、No.2 は 2640kN (柱軸降伏耐力の 0.2 倍) を載荷する。加力装置を図 4 に、載荷プログラムを表 4 に示す。

加力は一定軸力を保持しながら水平力を作用させて行い、変位制御は試験体の柱部材角を基準として、正負交番繰り返し載荷を行った。弾性範

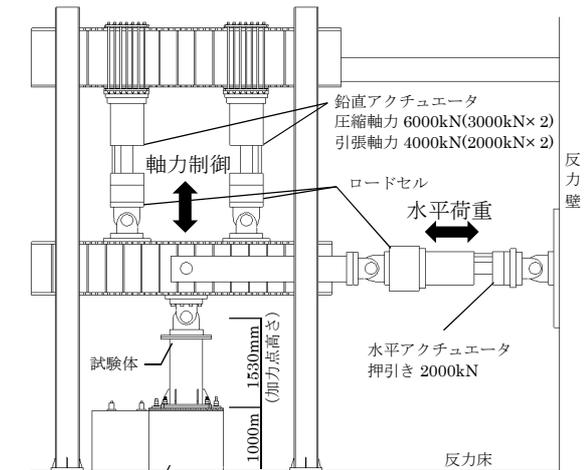


図 4 加力装置

表 4 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 $\theta=1/133$
	柱部材角 $\theta=1/100$	$\theta=1/100$
	$\theta=1/67$	$\theta=1/67$
	$\theta=1/50$	$\theta=1/50$
	$\theta=1/40$	$\theta=1/40$
3回	$\theta=1/33$	$\theta=1/33$
アンカーボルトの締直し補修		
2回	$\theta=1/33$	$\theta=1/33$
1回	$\theta=1/25$	$\theta=1/25$

囲での柱脚の挙動を確認後、柱部材角 $\theta=1/133$ から $\theta=1/33$ の加力を行い、地震後の補修作業を想定し、アンカーボルトのナット締直し補修⁶⁾を行い、伸びが生じた分の隙間を埋めた後、再度加力を行った。

ベースプレートの浮き上がりを計測するために内側・外側のベースプレートに高感度変位計を 4 か所ずつ設置した。ベースプレートの横滑りは、外側のベースプレート左側 2 か所に高感度変位計を取り付け計測した。また、柱および各ベースプレート、アンカーボルトにはひずみゲージを貼り付けている。

4. 実験結果

4.1 荷重変形関係

主な実験結果として、柱脚の脚部モーメント-柱部材角関係を図 5、6 に示す。

図中の降伏耐力 (実験値) の判断基準は、加力

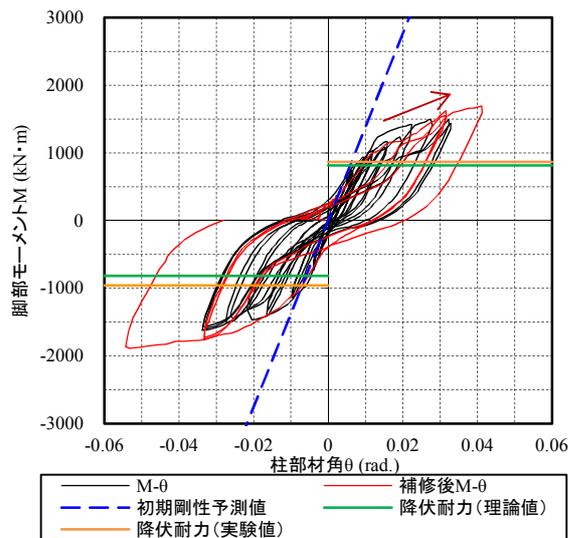


図5 試験体 No. 1 (軸力なし) M-θ 関係図

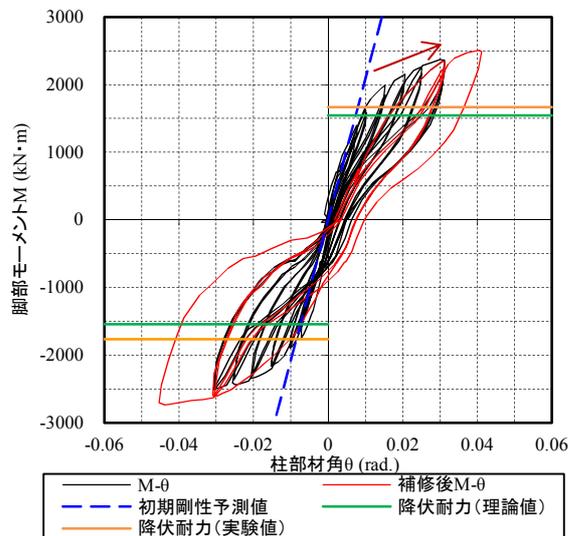


図6 試験体 No. 2 (軸力あり) M-θ 関係図

時の引張側となるアンカーボルト群に貼りつけたひずみゲージの内、1本が材料試験結果により求められた降伏ひずみを超過した時点としている。

試験体 No.1、No.2 ともに弾性範囲内の挙動はアンカーボルト降伏型と変わらない挙動を示し、アンカーボルトの降伏が進展し、スリップ型の履歴形状を描く部分においてベースプレートの降伏効果による耐力の上昇が見られる。その後、再度アンカーボルトに荷重が作用する変形領域になると剛性が増加する挙動を確認した。これは、

既報の実験⁵⁾で確認した挙動と同様である。

複合型露出柱脚の降伏耐力式を式(1)に回転剛性算出式を式(2)示す。さらに、式(1)、(2)より算出した降伏耐力と回転剛性(予測値)と、実験結果より算出した降伏耐力と回転剛性(実験値)の比較を表5に示す。

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

- M_y : 複合型露出柱脚の降伏耐力
- $f M_y$: 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_m : 実験定数 (=2.3)

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

- ${}_{ab}K_y$: 複合型露出柱脚の回転剛性
- α_N : 軸力効果の係数
- 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

表5 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(×10 ⁵ ・kN・m/rad)		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	1542	1666	1.08
	-			2.20	1.22			
	+	2640	3.40	3.97	1.17			
	-			3.83	1.13			

比較の結果、実験/予測の比は降伏耐力で1.06~1.17、回転剛性で1.13~1.35と良好な対応性を示した。このことからコンクリート基礎上に複合型露出柱脚を施工した場合でも、想定した性能が発揮されると考えられる。

繰返し性能について、柱部材角 $\theta=1/33$ を3サイクル行ったが2サイクル目と3サイクル目は同様の履歴形状となったことから、繰返しの地震に対してアンカーボルト降伏型よりもエネルギー

吸収効率が高いことが確認された。また、地震後の補修を模擬したアンカーボルトのナット締直し作業⁹後に、再加力（柱部材角 $\theta = 1/33$ ）を行い、締直し作業前後で同様の履歴形状を描くことを確認した（図5、6赤線）。

終局状態として柱部材角 $\theta = 1/25$ のサイクルでも耐力の低下はみられないことを確認した。

4.2 試験体外観・ベースプレートの変形状況

外ベースプレートの変形状況を写真1に示す。外ベースプレートは想定変形領域と同一の領域で塑性化していた。また、外側のアンカーボルト軸部は弾性に留まり、外ベースプレートの降伏機構の前提となる四隅の固定が終局サイクルまで保持されていることを確認した。

試験体 No.1 にて、無収縮モルタル部を補強するために設置した鋼製型枠に亀裂が発生した（写真2）。しかし、無収縮モルタルに剥落はなく、最終サイクルまで耐力を維持していたことから、複合型露出柱脚の挙動および性能への影響は少ないと考えられる。



写真1 ベースプレートの変形状況



写真2 鋼製型枠に生じた亀裂

4.3 アンカーボルトの変形状況

内アンカーボルトの変形状況を写真3に、ひずみ度（各サイクル最大荷重時）－柱部材角関係を図7、8に示す。



写真3 アンカーボルトの伸び

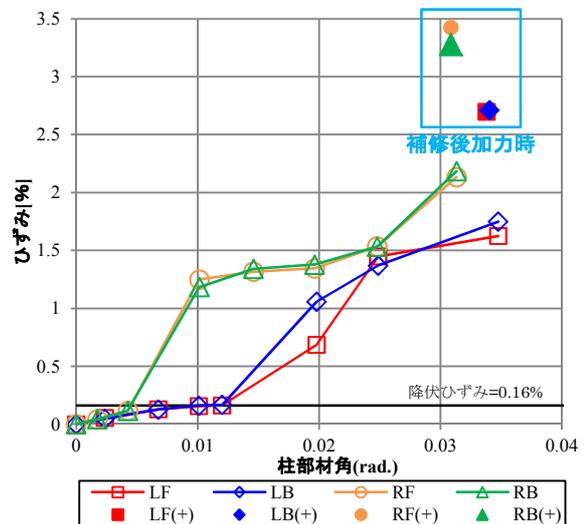


図7 試験体 No.1 内アンカーボルト $\varepsilon - \theta$ 関係図

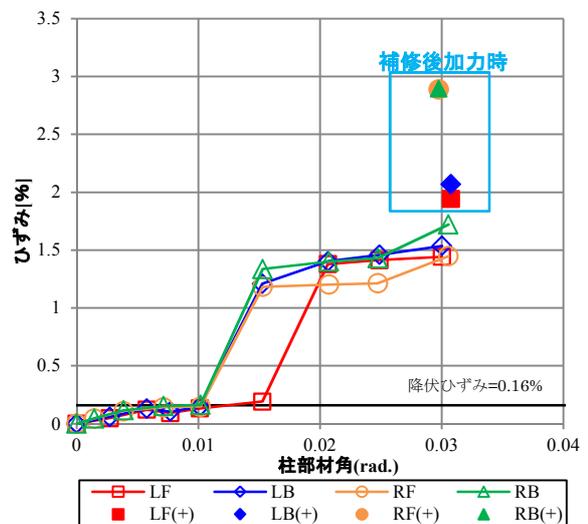


図8 試験体 No.2 内アンカーボルト $\varepsilon - \theta$ 関係図

図中の L は正方向の加力で引張となり R は負方向の加力で引張側となるアンカーボルトを示し、加力直角方向の前方を F、後方を B として、(+) 表示は補修後加力時のひずみ度を示す。

試験体 No.1、試験体 No.2 とともに柱部材角 $\theta=1/100$ を超えたあたりで内アンカーボルトが降伏ひずみに達している。その後、柱部材角 $\theta=1/33$ で 1.5% から 2.0% 程度までひずみ度が増加した。補修後の柱部材角 $\theta=1/33$ 時点でのひずみ度を塗りつぶした記号で示すが、締直し後も軸部のひずみ度が増加したことから内アンカーボルトは、十分な塑性変形能力を有していることがわかる。試験体 No.1 については無軸力であることからベースプレートの回転変形が大きくなるためアンカーボルトの伸びも大きく、ひずみ度が増加したと考えられる。

5. まとめ

本実験で得られた結果を以下に示す。

- 1) コンクリート基礎部が与える影響について、履歴形状は鋼製基礎を用いた既報の研究¹⁾と同様の挙動であることを確認した。
- 2) 複合型露出柱脚の降伏耐力と回転剛性において、理論値(式(1), (2))と実験値の対応性は良好であった。
- 3) M- θ 関係図より、スリップ型の履歴形状は改善され、繰り返しの載荷時でもエネルギー吸収能力を発揮することから、懸念されている繰り返しの地震に対しても有効であることを確認した。
- 4) 内アンカーボルトのひずみ度は柱部材角 $\theta=1/100$ 程度より降伏ひずみに達し、柱部材角 $\theta=1/33$ で 1.5% から 2.0% 程度となった。補修後の再加力においても、ひずみ度が増加したことから、十分な変形性能を発揮することを確認した。

[参考文献]

- 1) 秋山宏, 鉄骨柱脚の耐震設計, 技法堂出版, 1985年3月
- 2) 渡辺亨, 中野達也, 萩野毅, 角屋治克, 増田浩志, 森田耕次, 紡錘型履歴性状のアンカーボルト降伏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 vol.75, 2010年3月, pp.651-660
- 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, 2005年3月, pp.303-310
- 4) 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耐震性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2005年9月, C-1, pp.649-650
- 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2016年8月, 構造III, pp.1171-1174
- 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柱脚設計施工指針・同解説改訂版, 2011年9月, p.17