

3. 複合型露出柱脚の引抜き荷重作用時の構造性能に関する実験的研究

An Experimental Study on Structural Performance of Composite Exposed-type Column Bases Under Pull-out Load

寺内将貴* 柳田佳伸* 新井佑一郎* 石鍋雄一郎**

—概要—

本研究では、複合型露出柱脚の引抜き荷重作用時の構造性能について示す。

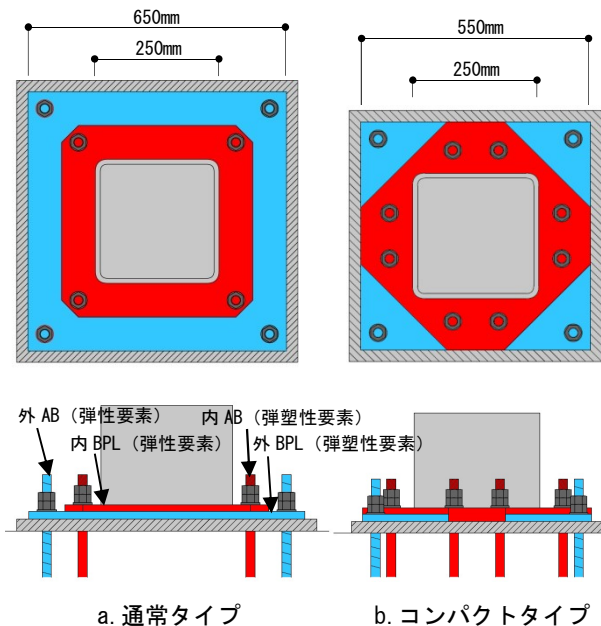
複合型露出柱脚は、鉄骨造建物の柱脚部として用いられることから、塔状比の大きい建物に適用した場合、地震時に大きな引抜き荷重が作用する場合がある。筆者らの既報の実験では、これまでに圧縮軸力が作用した場合の構造性能を確認してきた。一方、引張軸力となる領域の性能は確認していなかったことから、引抜き荷重を作用させた複合型露出柱脚の構造性能を確認する必要があると考えた。

本報では、写真1に示す試験装置を用いて、一定の引抜き荷重を作用させながら正負交番繰返し載荷を実施した。試験体は、通常タイプ試験体(図1-a.)およびコンパクトタイプ試験体(図1-b.)を2体ずつ合計4体製作した。実験の結果、内アンカーボルトの片側のみ引張となる試験体では、既報の実験と同一の傾向であること、内アンカーボルト全てが引張となる試験体では図2で示すような紡錘型の復元力特性となった。また、設計式との対応性を検証し、妥当性を示した。

—技術的な特長—

複合型露出柱脚は、従来の露出柱脚の降伏要素であるアンカーボルト降伏要素を形成する内側に配置されたアンカーボルトとベースプレートに加え、ベースプレート降伏要素を形成する外側のアンカーボルトとベースプレートから構成される(図1)。それぞれの降伏要素がほぼ同時に降伏するように設計することで復元力特性は、アンカーボルト降伏型(スリップ型)とベースプレート降伏型(最大点指向型)を累加したものとなる。これにより、従来の

露出柱脚ではスリップ型の復元力特性となる領域において、複合型露出柱脚ではベースプレート降伏要素により耐力負担が期待できる。



a. 通常タイプ b. コンパクトタイプ
図1 複合型露出柱脚の構成部材の配置

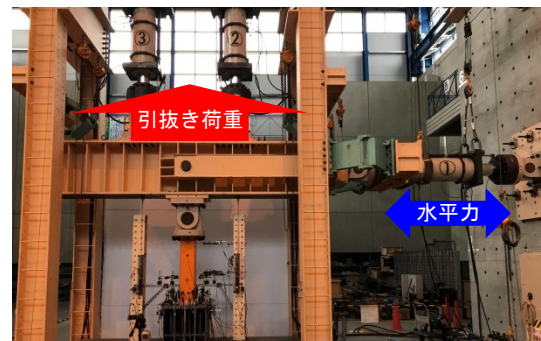


写真1 試験体加力状況

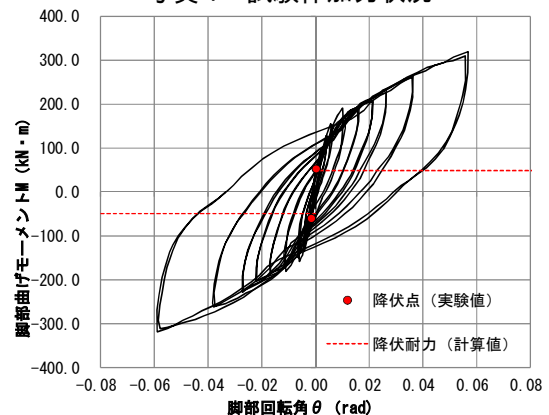


図2 コンパクトタイプ試験体
M-θ関係(軸力N=-543kN)

複合型露出柱脚の引抜き荷重作用時の構造性能に関する実験的研究 An Experimental Study on Structural Performance of Composite Exposed-type Column Bases Under Pull-out Load

○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 The composite-type exposed column base is one type in exposed column base of steel frame building. Considering the case of applying to a building with a large aspect ratio, it was necessary to confirm the required structural performance under seismic load. In this paper, the structural performance under constant tensile force and horizontal force was confirmed through some experiments. As a result, it was shown that design formula is applicable.

Keywords :露出型柱脚, ベースプレート降伏型, アンカーボルト降伏, 復元力特性, 引張軸力
Exposed-type column bases, Base plate yield type, Anchor bolt yield type, Restoring force characteristics, Tensile axial force

1. はじめに

複合型露出柱脚は、鉄骨造建物における露出柱脚の一形式であり、従来の露出柱脚の降伏形式であるアンカーボルト降伏型に加え、ベースプレート降伏型の要素を有する柱脚である（図1）。

従来の露出柱脚では、柱脚部に降伏ヒンジを設ける場合の降伏形式はアンカーボルト降伏型である。そのため、復元力特性はアンカーボルトが塑性化した領域では耐力を負担できないスリップ型¹⁾（図2）となる。一方、ベースプレート降伏型は、優れたエネルギー吸収性能を有することがこれまでの研究²⁾などからわかっているが、一般的に用いられていない。その要因として、曲げ耐力および曲げ剛性が小さいことと、複雑な変形性状が生じることから、曲げ耐力および曲げ剛性の評価が困難であることが挙げられる。

そこで、筆者らは、図1に示すアンカーボルト降伏型とベースプレート降伏型の2種類の降伏形式を有する複合型露出柱脚の開発を行ってきた^{3), 4)}など。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が、ほぼ同時に降伏するよ

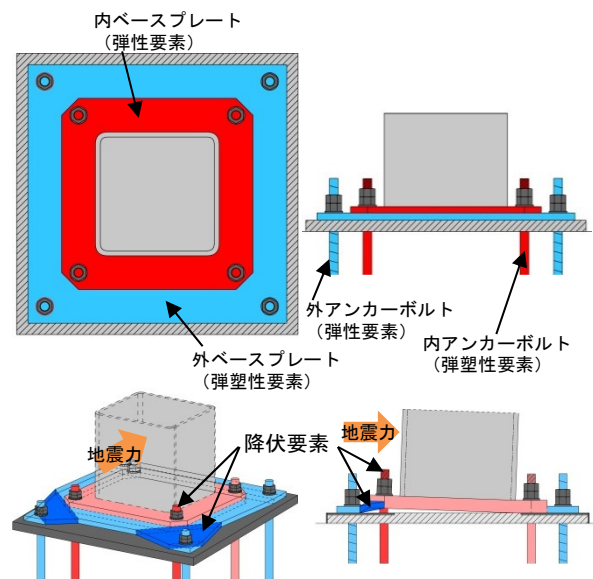


図1 複合型露出柱脚の部材構成と変形概念図

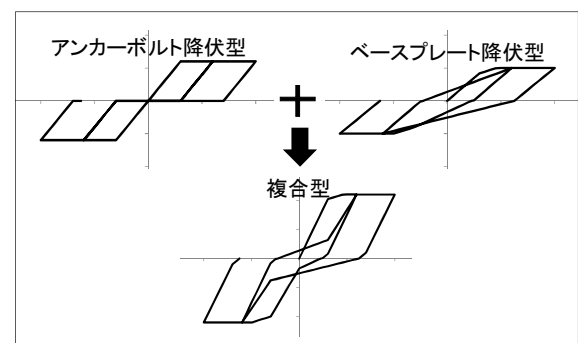


図2 複合型露出柱脚の復元力特性モデル

*技術研究所 構造研究部 建築構造研究室

**日本大学短期大学部 准教授

う設計し、内アンカーボルト降伏要素で回転剛性を確保しながら、外ベースプレート降伏要素で、アンカーボルトが塑性変形した領域においても耐力負担できる復元力特性（図 2）を有する。

本報では、塔状比の大きい建物に用いた場合に柱脚に大きな引抜き力が作用することを想定し、引抜き荷重を作用させた加力実験について報告するとともに、引抜き荷重が作用した場合の複合型露出柱脚の復元力特性と設計式との対応性を確認する。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

試験体諸元を表 1 に、試験体形状を図 3、図 4 に示す。

試験体は、既報の実験^{3)、4)}を参考に柱サイズ 250 角の試験体を通常タイプ（以下、N タイプ）2 体、コンパクトタイプ（以下、C タイプ）2 体の計 4 体製作した。

柱サイズおよびアンカーボルトの有効長さに若干の違いがあるが、試験体取付治具の違いによるものであり、構造特性に大きな違いを与えるものではない。また、柱脚のみの性能を確認するため基礎部を鋼製基礎としている。

2.2 載荷プログラム

載荷プログラムを表 2 に示す。加力は軸力（引張方向を負とする）を一定に保持し、水平力を作用させた。軸力は、降伏曲げ耐力時に片側の内アンカーボルトが引張となる状態（N タイプ=-116kN、C タイプ=-181kN）と全ての内アンカーボルトが引張となる状態（N タイプ=-348kN、C タイプ=-543kN）を設定した。

加力は、柱に取り付けた変位計を基準として、柱部材角 $R=1/200\text{rad}$ から $R=1/17\text{rad}$ まで正負交番繰返し載荷を実施した。

3. 実験結果

3.1 復元力特性について

各試験体の $M-\theta$ （脚部モーメント - 脚部回転角）関係を図 5～図 8 に示す。以降、試験体名は

表 1 試験体諸元

試験体名	N タイプ	C タイプ
柱	BCR295 - 250 × 250 (mm) t=16mm	
	h=1, 158mm	h=1, 058mm
内 BPL ^{※1}	SN490C - 450 × 450 (mm)	SN490C - 495 × 495 (mm)
	t =40mm	
外 BPL ^{※1, 3}	SN400B - 650 × 650 (mm)	SS400 - 550 × 550 (mm)
	t =16mm	
内 AB ^{※2}	ABR400 - M22	
	$\ell =466\text{mm}$ （有効長さ）	$\ell =508\text{mm}$ （有効長さ）
外 AB ^{※2}	TS700-M30 ^{※4}	SD490 - D29
	$\ell =442\text{mm}$ （有効長さ）	$\ell =484\text{mm}$ （有効長さ）

※1 : BPL=ベースプレート ※2 : AB=アンカーボルト

※3 外 BPL の寸法はベースプレート全体の寸法を記載

※4 : 建築構造用 700N/mm² アンカー用ボルト

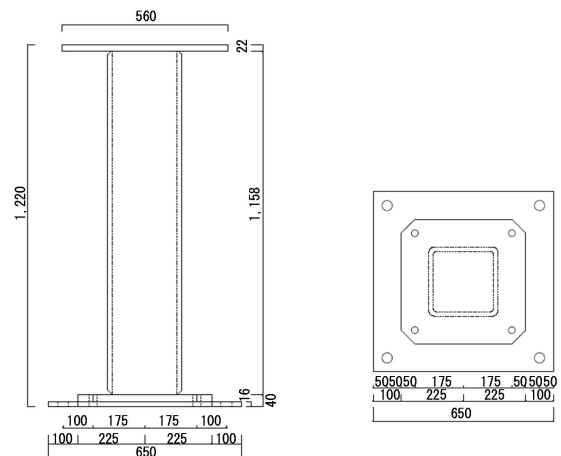


図 3 N タイプ試験体寸法

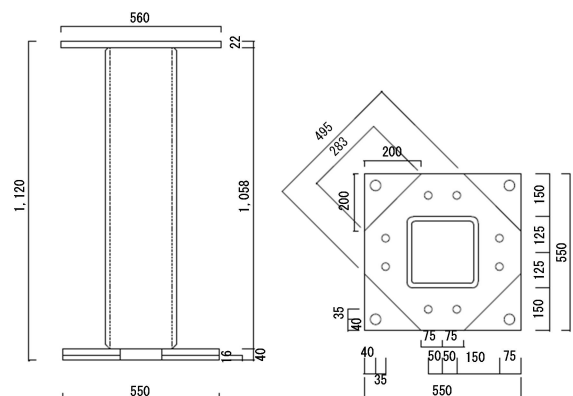


図 4 C タイプ試験体寸法

（タイプ） - （軸力）で示す。

図中の降伏耐力（計算値）は式（1）より算出

し、降伏点（実験値）は内アンカーボルトに取り付けたひずみゲージのひずみ値が材料試験より求めた降伏ひずみに達した時点としている。ここで、内アンカーボルトおよび外ベースプレートの降伏耐力の計算では、材料試験結果から得られた降伏応力を用いている。

Nタイプ試験体の負側の降伏点（実験値）が降伏耐力（計算値）を下回った。これは、試験体と基礎部の隙間が発生しており、回転角にズレが生じた影響によるものだと考えられる。

N-116 試験体（図5）と C-181 試験体（図7）の復元力特性は、図2に示す複合型と一致する結果となり、N-348 試験体（図6）と C-543 試験体（図8）は、紡錘形の復元力特性となった。これは、内アンカーボルトおよび外ベースプレートが常に抵抗機構となっていたためだと考えられる。

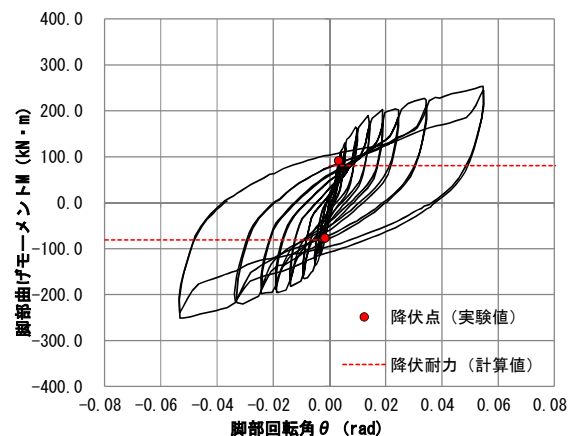


図5 N-116 試験体 $M-\theta$ 関係

表2 载荷プログラム	
サイクル数	制御
軸力導入	Nタイプ：軸力=-116kN, -348kN Cタイプ：軸力=-181kN, -543kN
1回	弾性範囲確認 水平荷重 15kN
2回	柱部材角 $R=1/200$ rad
	$R=1/133$ rad
	$R=1/100$ rad
	$R=1/67$ rad
	$R=1/50$ rad
	$R=1/40$ rad
	$R=1/33$ rad
	$R=1/25$ rad
	$R=1/17$ rad

$$M_{by} = \frac{b \sigma_{yo} \cdot b \cdot B_o \cdot t_o^2}{d \cdot c_m} + n_t \cdot b a_{ie} \cdot a \sigma_y \cdot (d_{c1} + d_t) + M_n$$

... (1) 1), 2)

M_{by} : 複合型露出柱脚の降伏耐力
 $b \sigma_{yo}$: 外ベースプレートの降伏応力（材料試験結果）
 b : 想定降伏線の平均長さ
 B_o : 外ベースプレート幅
 t_o : 外ベースプレート板厚
 d : 弾塑性板の幅
 c_m : ベースプレート形状定数 (=2.3)
 n_t : 引張側アンカーボルト本数
 $b a_{ie}$: 内アンカーボルトのねじ部有効断面積
 $a \sigma_y$: 内アンカーボルトの降伏応力（材料試験結果）
 d_{c1} : 柱芯から圧縮側のベースプレートの接地までの距離
 d_t : 柱芯から引張側内アンカーボルトまでの距離
 M_n : 軸力による曲げモーメント

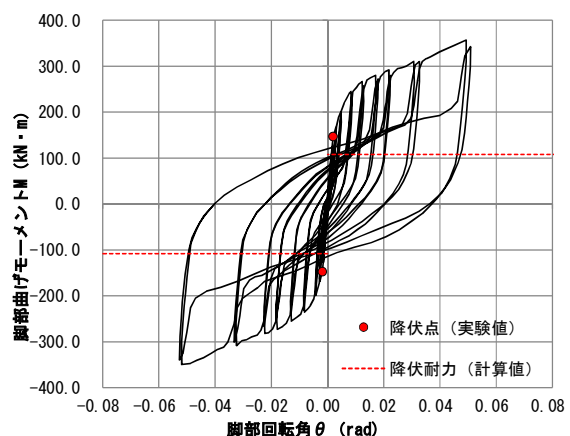


図7 C-181 試験体 $M-\theta$ 関係

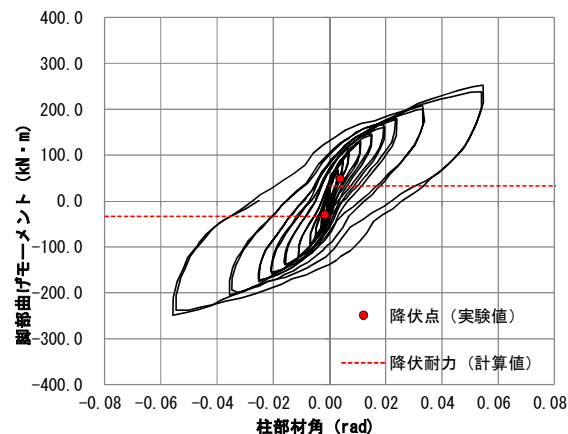


図6 N-348 試験体 $M-\theta$ 関係

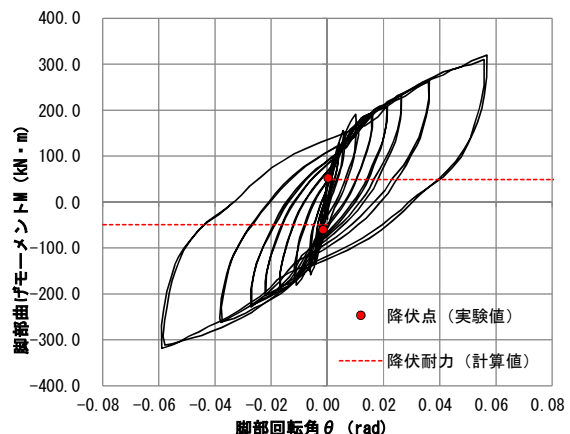


図8 C-543 試験体 $M-\theta$ 関係

3.2 降伏曲げ耐力の比較

降伏耐力（計算値）と降伏点（実験値）の比較を表3に示す。試験体によってはベースプレート底面と鋼製基礎間に生じた隙間の影響から正負の回転角に差が見られたため、表3では降伏点（実験値）について、正負の平均値としている。

全ての試験体において、降伏耐力（計算値）を降伏点（実験値）が4%～27%程度（表3）上回った。既報^{3), 4)}において、計算値は1割から2割程度安全側に評価しており、同様の傾向にあることが確認できた。

3.3 試験体の変形状況

試験体の変形状況を写真1、2に示す。

N-118 試験体（写真1）、C-543 試験体（写真2）において、複合型露出柱脚の降伏概念図（図1）と概ね同等の変形をしている。

また、外アンカーボルトが逆ハの字型に曲がるよう変形している。これは、既往の実験^{3), 4)}でも同様の現象を確認しているが、柱部材角 $R=1/33\text{rad}$ を超えた変形角から外ベースプレートの浮上りに伴い発生する。しかし、最終サイクルまで外アンカーボルトに緩みは発生せず、固定機能を失わないことを確認した。

4. まとめ

本実験で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 引抜き荷重を作用させた複合型露出柱脚の復元力特性は、片側が引張状態となる軸力領域では、既報^{3), 4)}の複合型露出柱脚の復元力特性と一致し、すべてのアンカーボルトが引張状態となる軸力では紡錘型の復元力特性となった。
- 2) 降伏耐力（計算値）と降伏点（実験値）は、概ね一致する結果となり、全てのアンカーボルトに引抜き荷重が作用する条件下においても設計式との対応性が良好であることが示された。

表3 降伏耐力（計算値）と降伏点（実験値）の比較

試験体名	軸力 [kN]	降伏耐力 M_{by} (計算値) [kN・m]	降伏点 M_y (実験値) [kN・m]	M_{by}/M_y
N-116	116	81	84	0.96
N-348	348	33	39	0.85
C-181	181	108	148	0.73
C-543	543	49	57	0.86

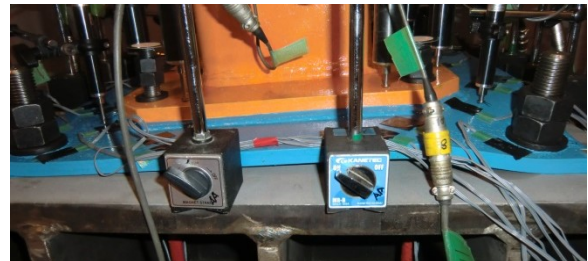


写真1 N-118 試験体加力状況
(柱部材角 1/25rad)



写真2 C-543 試験体加力状況
(柱部材角 1/17rad)

[謝辞]

本研究を行うに際し、天雲産業（株）よりアンカーボルト（TS700）を提供していただいた。関係各位に感謝の意を表す。

[参考文献]

- 1) 秋山宏, 鉄骨柱脚の耐震設計, 技法堂出版, 1985.3
- 2) 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, 構造工学論文集, Vol.51B, pp303-310, 2005.4
- 3) 柳田佳伸, 新井佑一郎, 石鍋雄一郎, 牛島栄: 基礎コンクリートを配した複合型露出柱脚の性能確認実験, 日本コンクリート工学会年次論文集, 第41巻 No.1, pp.1483-1488, 2019.6
- 4) 寺内将貴, 柳田佳伸, 新井佑一郎, 石鍋雄一郎: 複合型露出柱脚の弾塑性要素に関する実験, 青木あすなろ建設技術研究所報, Vol.4, p.2, 2019.4