# 柱脚破壊先行型 CES 埋込み柱脚の耐力評価に関する研究

合成構造	静的載荷実験	応力分布
最大耐力	柱脚曲げ耐力	

# 1. はじめに

内蔵鉄骨および繊維補強コンクリートから構成される CES (Concrete Encased Steel)構造は鉄骨鉄筋コンクリー ト構造の優れた構造性能を有しつつ,鉄筋の省略によっ て施工が合理化された新たな構造形式である。

CES 造建築物には、高い耐震性能を有する埋込み柱脚 の適用が想定されている。しかし、現在までに CES 埋込 み柱脚に関する研究例は行われておらず、その構造性能 は不明瞭であった。

文献 1)では柱脚曲げ降伏先行型で設計された試験体は 柱曲げ降伏先行型の破壊モードを示した。すなわち,柱 脚の破壊性状が確認されておらず,新たな柱脚曲げ耐力 評価法を構築するためには柱脚破壊先行型の実験結果に 基づく検討が必要である。

そこで、本研究では柱鉄骨の埋込み深さ比およびベー スプレートの有無を変数とした CES 埋込み柱脚の静的載 荷実験を実施した。本論では、実験の概要を述べるとと もに、破壊性状、復元力特性および埋込部鋼材の応力状 態の検討結果を示す。併せて、CES 埋込み柱脚の耐力評 価法の検討結果も報告する。

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体

表1に試験体概要を、図1に試験体形状および寸法を示 す。試験体は実大の約1/3のスケールのもの4体である。 柱のコンクリート断面 b×D は 300mm 角、内蔵鉄骨は BH-200×150×9×16 である。柱脚から加力位置までの高さ h は 900mm(せん断スパン比 *M/QD*=3.0)である。

実験変数には、柱鉄骨の埋込み深さを鉄骨せいで除した値(以下,埋込み深さ比)およびベースプレート(以下,BPと略記する)の有無を選択した。試験体 EB2と試験体 EN2の埋込み深さ比は 1.0 および試験体 EB4の埋込み深さ比は 2.0 である。また,試験体 EB2 および EB4 における鉄骨最下部の BP は PL-22×175×225 である。一方の試験体 EN2 には BP をつけないものとした。いずれの試験体も一般化累加強度理論による柱曲げ耐力計算値が柱脚曲げ耐力計算値より低くなるように設計された。

表2にコンクリートの材料特性を,表3に鋼材の材料特 性をそれぞれ示す。本試験体では,埋込み部であるスタ ブには普通コンクリートが,柱には繊維補強コンクリー トが使用されている。柱に使用した繊維は標準長さ30mm,



1230021 指導教員 今井 真奈美\*1

鈴木 卓

<b>衣</b>   試験体概安				
S	pecimen	EB4 EB2 EN2		EN2
軸力 N (kN)		1,130 ( <i>N</i> / <i>N</i> <sub>0</sub> =0.2)		2)
	<i>b</i> x <i>D</i> (mm)	300x300		
柱	鉄骨	BH-200x150x9x16 (SN490)		
	高さ (mm)	900		
柱脚	埋込み深さ比	2.0 1.0		.0
	ベースプレート	PL-22x175x225 (SS400) -		-

直径.66mm のビニロンファイバーであり、体積混入率は 1.0%である。

## 2.2 載荷計画

図2に載荷装置を示す。実験は鉛直オイルジャッキによっ て軸力 N=1,130kN (N/N₀=0.2,式(1),(2))を作用させつつ, 載荷フレームに取り付けた2台の水平オイルジャッキ(容 量:500kN)により水平力を載荷した。

$$N_0 = {}_c A_c r_u \sigma_B + {}_s A \sigma_y \tag{1}$$

$$_{c}r_{u} = 0.85 - 2.5_{s}p_{c} \tag{2}$$

	表 2	コンクリートの材料特性		
		圧縮強度 (N/mm²)	弹性係数 (kN/mm²)	強度時 ひずみ (µ)
ħ	È	51.0	33.4	2,090
スタブ	EB4	33.0	29.4	2,230
	EB3	27.6	26.3	1,870
	EN2	27.4	27.0	1,830

120 1	<u> 単両 17 0 7 17 1千 1千 1千</u>		
	降伏強度	弾性係数	引張強度
	(N/mm <sup>2</sup> )	(kN/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )
ウェブ (SN490)	367	196	542
フランジ (SN490)	362	194	575
PL-22 (SS400)	292	204	477
D10 (SD295)	332	214	479
D22 (SD345)	373	203	564

細材の材料性性





ここで、 $N_0$ : CES 柱の軸圧縮力,  $_{\sigma_u}$ : コンクリートの有効 強度係数,  $_{\sigma_A}$ : コンクリートの断面積,  $\sigma_B$ : コンクリート 強度,  $_{sA}$ : 鉄骨断面積,  $\sigma_y$ : 鉄骨の降伏強度,  $_{sp_c}$ : 圧縮側 鉄骨比である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 破壊性状および履歴特性

図3に各試験体のせん断カー変形角関係を,図4に各試 験体の実験終了後の損傷状況を示す。図3には,フランジ 降伏点,ウェブ降伏点,最大耐力点,第4章に示す柱の曲 げ耐力の計算値を灰色の実線および柱脚の曲げ耐力の計 算値を鎖線でそれぞれ示している<sup>1)</sup>。

埋込み深さ比 2.0 の試験体 EB4 では, *R*=1/50rad のサイ クルにおいて柱下部のコンクリートに圧縮ひび割れが発 生し,徐々に耐力低下する傾向が認められた。これらの 結果から試験体 EB4 の破壊モードは柱曲げ降伏先行型で あったと判定される。

埋込み深さ比 1.0 の試験体 EB2 および EN2 では, *R*=1/67rad のサイクルにおいてスタブ上面のコンクリート に柱からの放射状ひび割れの発生が確認された。BP のあ る試験体 EB2 ではスタブ上面の放射状ひび割れの拡幅が 顕著であった。一方の BP のない試験体 EN2 では,スタブ 上面の剥離および鉄骨の浮き上がりが顕著であった。以 上の結果から両試験体の破壊モードは柱脚曲げ降伏先行 型であったと判断される。

#### 3.2 フランジの応力分布

図5に正載荷時の鉄骨フランジの高さ方向応力分布を示 す。同図は R=1/200, 1/100, 1/67rad における1 サイクル 目のピーク時の値である。鋼材の応力は履歴特性をバイ リニア型と仮定し,同図に示す高さ位置のひずみゲージ 計測値から算出した。

試験体 EB2 の北側を除く各試験体の北側および南側と もに柱と柱脚の境界付近において応力が最も大きくなる。

BP 付近に着目すると, 試験体 EB4 および EB2 の  $R=1/200rad \ge 1/100rad$ では正の値が確認された。一方, 試 験体 EN2 では応力がほぼ 0 の値をとる。これは BP がない ことによりコンクリートとフランジ下端において応力伝 達が生じないためである。

### 3.3 ウェブの応力分布

図6に R=1/100の正載荷1サイクル目ピーク時における鉄骨ウェブの XZ 方向せん断応力の高さ方向分布を示す。 せん断応力は同図に示す位置における3軸ひずみゲージの 計算値から Mises の降伏条件を適用したロゼット解析によ り算出した。



各試験体ともに柱から埋込み部にかけて応力の減少が 認められた。また,柱と埋込み部の境界付近で応力の減 少が大きい。すなわち,当該区間において鉄骨およびコ ンクリートの間に水平支圧力の作用が推察される。

#### 4. 終局耐力計算

#### 4.1 終局耐力

CES 柱の曲げ耐力は一般化累加強度理論を用いて算出 した。鉄骨ウェブの曲げ耐力は精算値である。

図7に実験から想定される埋込み部における鉄骨-コン クリート間の応力状態を示す。柱下部位置では、軸力 N。 および曲げモーメント M。が仮定され、3.3節で示したウェ ブのせん断応力分布より当該位置のせん断力は無視した。 BP 位置では、軸力 N。、せん断力 Q。および曲げモーメント M。が仮定される。フランジーコンクリート間には鉛直付 着力と水平支圧応力の作用が考えられる。ただし、ウェ ブーコンクリート間の支圧力と摩擦力は無視した。

埋込み中立軸深さを x<sub>n</sub>とすると,左右フランジに作用 する支圧力は式(3),(5),(6),水平力のつり合いは式(4)~ (6)となる。その他の記号の詳細は文献 1)を参照されたい。

$$C = F_B b_e x_n, \quad T = F_B b_e \left({}_b h - x_n\right) \tag{3}$$

$$-C + T + Q_b = 0, \quad \therefore x_n = \frac{{}_b h}{2} \left( 1 + \frac{Q_b}{F_B b_{e\,b} h} \right) \tag{4}$$

$$b_e = {}_s t_w + 2{}_s d_f \tag{5}$$

$$F_{B} = \min\left(\sqrt{b / b_{e}}F_{c}, \quad 12F_{c}\right) \tag{6}$$

フランジーコンクリート間の付着応力は前述の支圧応 力の摩擦応力により上昇する。鉄骨ーコンクリート間の 摩擦係数を  $\mu = 0.5$  と仮定すると、摩擦力および鉛直方向 の力のつり合いは式(7)となる。

$$B_c = \mu C, B_r = \mu T, N_b = N_s - \mu Q_b$$
 (7)  
BP のせん断力  $Q_b$  は軸力による摩擦力と考えると, BP  
位置の軸力は柱下部の軸力と摩擦係数を用いた式(8)とな  
る。なお,式(8)中の  $Q_b$ は絶対値であり,  $N_s$ は柱曲げ耐力  
算定時の鉄骨軸力の値とした。

$$Q_b = \mu N_b$$
,  $N_b = \frac{1}{1 + \mu^2} N_s$  (8)

以上の応力状態を基に柱下部におけるモーメントのつ り合いは式(9)となる。



図7 鉄骨―コンクリート間の応力状態

$$M_{s} = M_{b} + Q_{bb}h + \frac{\mu F_{B}b_{eb}hj}{2} + \frac{F_{B}b_{eb}h^{2}}{2} \left[1 - \left\{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{Q_{b}}{F_{B}b_{eb}h}\right)\right\}^{2}\right]$$
(9)

ここで, j: はフランジの重心間距離である。

式中右辺第1項の BP の曲げモーメント M<sub>b</sub>は式(6)の作 用軸力 N<sub>b</sub>を対象にコンクリートの有効強度係数を 0.85 と した BP 上下面のコンクリートの曲げ耐力である。第2項 は BP に作用するせん断力,第3項はフランジに作用する 摩擦力および第4項はフランジに作用する支圧力をそれぞ れ表している。柱脚曲げ耐力は式(7)の計算値と柱曲げ耐 力時の柱コンクリートの曲げモーメント計算値を単純累 加した値である。

#### 4.2 計算結果

表4に実験結果および計算結果の一覧を,図8に実験値 と計算値の比較をそれぞれ示す。同式中の計算値は実験 の最大耐力時の変形による *P*-δ 効果を考慮して曲げモーメ ントをせん断力に換算したものである。

柱脚曲げ耐力と柱曲げ耐力の計算値の比率は試験体 EB4 では 1.0 以上であり,柱曲げ降伏先行型の破壊モードを示 している。また,試験体 EB2 および EN2 の比率は 1.0 未 満であり柱脚曲げ降伏先行型の破壊モードを示す。これ は 3.1 節に示す損傷状況に基づいて判断された破壊モード と対応している。

試験体 EB4 において実験の最大耐力と柱曲げ耐力の計 算値との比率は 1.1 である。一方で試験体 EB2 と EN2 に おいて提案する柱脚曲げ耐力の計算値と実験値との比率 は 1.1 と 1.2 程度である。したがって、本論に示す CES 埋 込み柱脚の最大耐力および破壊モードは一般化累加強度 理論による柱曲げ耐力と提案した柱脚曲げ耐力によって 精度よく評価可能である。

表4 実験結果および計算結果

		EB4	EB2	EN2
実験値 Q <sub>exp</sub> (kN)		299	276	213
計算値	柱 Q <sub>mcu</sub>	271	263	288
(kN)	柱脚 Q <sub>mbu</sub>	535	251	184
実験値	柱	1.10	1.05	0.74
/計算値	柱脚	0.56	1.10	1.15
柱脚	『Q <sub>mbu</sub> / 柱 Q <sub>mcu</sub>	1.97	0.96	0.64



5. まとめ

本研究では,柱鉄骨の埋込み深さおよびベースプレートの有無を変数とした CES 埋込み柱脚の静的載荷実験を 実施した。本論より得られた知見を以下に示す。

- 埋込み深さ比 2.0 以上の試験体では、柱下部の損傷が 顕著であり、柱曲げ降伏先行型の破壊モードを示す傾 向が認められた。埋込み深さ比 1.0 の試験体ではスタ ブの損傷が顕著であり、柱脚曲げ降伏先行型の破壊モ ードを示す傾向が確認された。
- 2) 柱脚曲げ耐力評価のための埋込み部の鉄骨およびコン クリート間の支圧応力と付着応力に基づく抵抗機構を 提案した。
- 3)本論に示す CES 埋込み柱脚の最大耐力および破壊モードは一般化累加強度理論による柱曲げ耐力と提案する柱脚曲げ耐力により評価可能である。

#### 参考文献

- 日本建築学会:鉄骨コンクリート(CES)造建築物の 性能評価型構造設計指針(案)・同解説, 2022.3
- 金子佳樹,鈴木卓: CES 埋込み柱脚の構造性能に及ぼ す埋込み深さ比の影響,コンクリート工学年次論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 1087-1092, 2019.7
- 日本建築学会:鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・ 同解説,2014.1
- 4) 舟橋のどか,鈴木卓: CES 埋込み柱脚の構応力抵抗機 構に関する解析的研究,コンクリート工学年次論文集, Vol. 42, No. 2, pp. 991-996, 2020.7