

非埋込み型 CES 柱脚におけるベースプレートの変形性状に関する研究

CES 構造	合成構造	静的載荷実験	1240092	竹原 未来*
復元力特性	アンカーボルト	軸力比	指導教員	鈴木 卓

1. はじめに

鉄骨および繊維補強コンクリートの合成構造である CES (Concrete Encased Steel) は高い耐震性能を有しつつ施工性に優れた合成構造である。現在、CES 構造の実用化に向けて梁や柱などの開発が進められている¹⁾。

CES 柱脚には埋込み型と非埋込み型がある。中でも、西野らは工期短縮や経済性の向上が図れる非埋込み型柱脚の復元力特性および破壊性状の把握を目的とした静的載荷実験を実施した²⁾。これにより、軸力比の増加に伴う試験体の最大耐力の上昇およびスリップ型から紡錘型の履歴性状を示すことが認められた。また、軸力比の増大に伴い柱脚における損傷の減少および柱における損傷の増加が認められた。一方の当該実験では、ベースプレート (以下、BP) を降伏させないためにその厚みを大きくした。しかし、厚みの大きな BP は調達や施工が困難であり、非埋込み型 CES 柱脚の開発には改良の余地がある。

以上を背景とし本研究では、非埋込み型 CES 柱脚における BP の応力分布および変形性状の解明を目的として文献 2) の静的載荷実験を対象とした三次元 FEM 解析を実施した。

2. 静的載荷実験の概要

本報において示す非埋込み型 CES 柱脚の静的載荷実験および実験結果の詳細は文献 2) を参照されたい。試験体は実大 1/3 スケールのもの 2 体である。

試験体の形状および配筋状況を図 1、試験体概要を表 1 に示す。柱コンクリートの断面は 300mm 角、内蔵鉄骨は BH-200×150×6×9 (SS400) である。柱脚から加力位置までの高さは 600mm である。鉄骨 BP は PL-50×550×550 (SS400) として BP の面外降伏が阻止された。アンカーボルト (以下、AB) は 4-M24 (ABR400) として柱断面の外側の四隅に配置された。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示す。本試験体では、スタブに普通コンクリート、敷モルタルに無収縮モルタル、柱に繊維補強コンクリートが使用された。

試験体の下スタブは PC 鋼棒を用いて載荷フレームに固定され、上部プレートは高力ボルトを用いて垂直オイルジャッキ (最大容量 3,000kN) に固定された。載荷方法は、鉛直オイルジャッキによって所定の軸力 N が作用され、載荷フレームに取り付けた 2 台の水平オイルジャッキ (最大容量: 500kN) によって水平力が載荷された。水平力載荷は、試験体頂部の水平変位を柱脚から試験体頂部までの

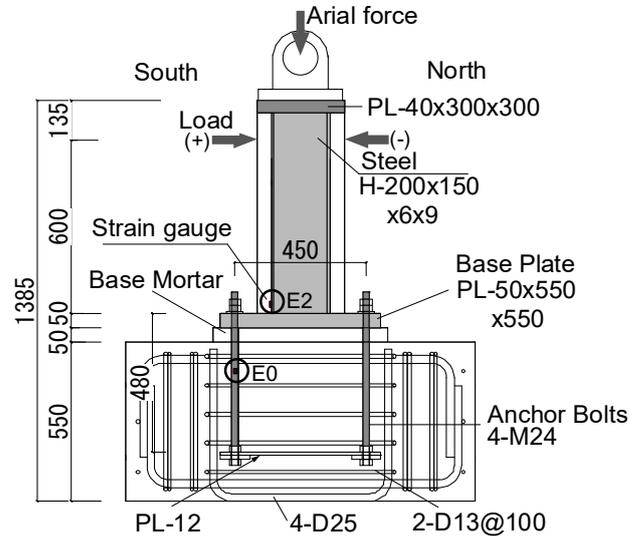


図 1 試験体の形状および配筋状況

表 1 試験体概要

試験体		E0	E2
実験変数	軸力比 N/N_0	0	0.2
	軸力 N (kN)	0	850
柱	断面 $b \times c \times D$	300 x 300	
	せん断スパン比	2.0 ($h=600$ mm)	
	鉄骨断面	BH-200 x 150 x 6 x 9 (SS400)	
柱脚	モルタル厚 (mm)	50	
	ベースプレート	PL-50 x 550 x 550	
	アンカーボルト	4-M24 (ABR400, 定着長さ 480mm)	

表 2 コンクリートの材料特性

		圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮強度時ひずみ (μ)
E0	柱	46.6	31.2	2,853
	モルタル	67.2	—	—
	スタブ	34.4	28.7	2,143
E2	柱	45.9	31.5	2,098
	スタブ	39.7	30.8	2,034

表 3 鋼材の材料特性

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
鉄骨ウェブ (6mm)	251	372	180
鉄骨フランジ (9mm)	289	464	188
ベースプレート PL-50	254	433	204
アンカーボルト M24	320	460	219

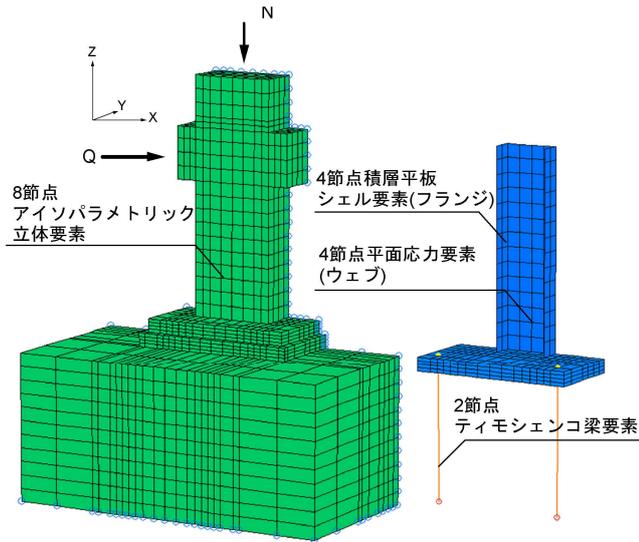


図2 要素分割

高さで除した変形角 R による変位制御とされた。軸力は、軸力比 N/N_0 (N : 作用軸力, N_0 : 軸圧縮耐力) を試験体 E0 では 0, 試験体 E2 では 0.2 相当の圧縮力が作用されている。

3. FEM 解析

図2に試験体の要素分割を示す。解析は三次元モデルとし、面外方向の対称性を考慮して試験体の半分をモデル化した。コンクリートは8節点アイソパラメトリック立体要素でモデル化した。鉄骨はフランジを4節点積層平板シェル要素、ウェブを4節点平面応力要素でモデル化した。ABは2節点ティモシェンコ梁要素でモデル化した。敷モルタルとBPおよび鉄骨と柱コンクリートの間にはフィルム要素を定義した。スタブ、敷モルタルおよびBPとABの間にはライン要素を定義した。AB上端にはリンク要素を定義しナットを再現した。

拘束条件は試験体切断面のY軸並進方向の固定である。また、スタブ下端のコンクリートの節点を完全固定とした。

载荷方法は、ピン支承上端に分布荷重として軸力を作用させつつ、実験と同様の加力点に水平方向の強制変位を与えた。また、解析は変位制御による正方向の片押し载荷とした。解析で用いた材料特性は表2, 3の値を用いている。モルタルのヤング係数およびひずみは、式(1), (2)を用いて定義した。

$$E_c = (0.114\sqrt{f'_c} + 0.582) \times 10^5 \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (1)$$

$$\epsilon_p = 1.37f'_c + 1,690 \quad (\text{kgf/cm}^2, 10^{-6}) \quad (2)$$

ここで f'_c : コンクリート強度である。

なお、解析には3次元解析ソフト"FINAL"を使用した。

各材料の材料構成則は文献3)に従った。コンクリートの応力-ひずみ関係の上昇域は修正 Ahmad モデルとした。

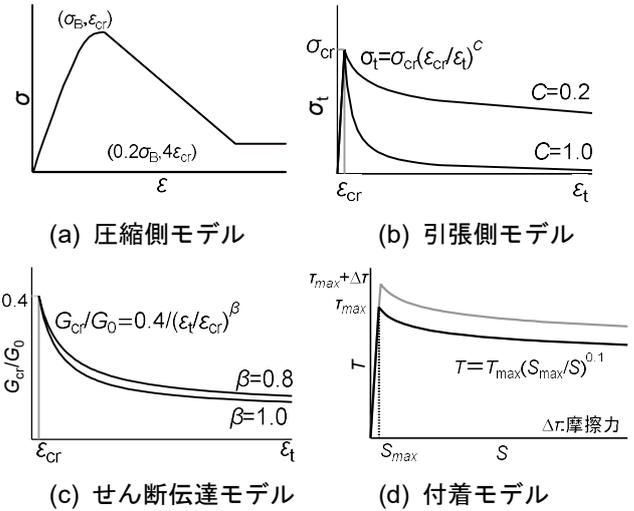


図3 材料モデル

軟化域は、スタブおよび敷モルタルでは修正 Ahmad モデルとし、柱では図3(a)のように多折線でモデル化した。ひび割れ後のテンションステイフニング特性は出雲らの提案モデル(スタブ: $c=0.4$, 敷モルタル, 柱: $c=1.0$, c =モデル係数)を用いた(図3(b))。多軸応力下の破壊条件は Willam-Warke の5パラメータモデルに従い大沼らの係数を用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性は、スタブおよび敷モルタルでは Al-Mahaidi モデルとした。柱では図3(c)に示す Al-Mahaidi モデル ($\beta=1.0$ の場合) に対して多折線 ($\beta=0.8$) でモデル化した。

鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルとし、ひずみ硬化則は等方硬化則とした。

フィルム要素の付着応力-すべり関係は天野モデル⁴⁾を用い、最大付着応力度は文献3)を参考に定義した。最大応力時のすべり量は敷モルタルとBPのフィルム要素では 0.025mm とし、鉄骨と柱コンクリートのフィルム要素では文献3)を参考に定義した。この時、摩擦係数を 0.65 と定義し、面外圧縮力に伴う摩擦力の増大を付着応力に加えた(図3(d))。さらに敷モルタルとBPは浮上がりによる開閉を考慮した。開閉の挙動は、引張応力を0とみなすため 0.50N/mm^2 と定義し、引張応力がひび割れ強度に達したときに開閉が起こり、以後は剛性が0となるよう定義した。

ライン要素の付着応力-すべり関係は天野モデルを用いた。最大付着応力は、式(3)に40%を乗じた値とした⁵⁾。

$$f_{bo} = 0.28f'_c{}^{2/3} \leq 3.2 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (3)$$

リンク要素の応力-変位関係は、引張方向およびせん断方向の剛性を0とし、圧縮方向は剛体とした。

4. 解析結果と実験結果の比較

図4に実験と解析の復元力特性の比較を示す。試験体 E0 では、 $R=0.25 \times 10^{-2}\text{rad}$ 程度までの実験と解析の復元力

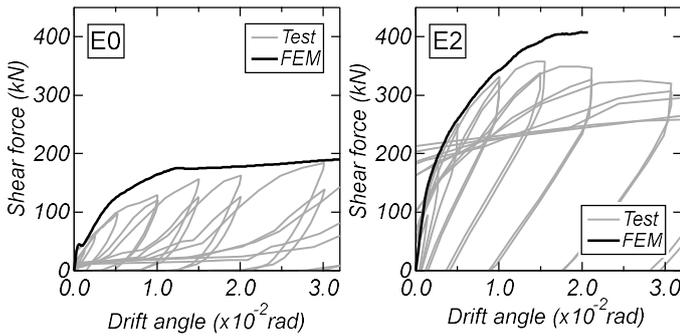
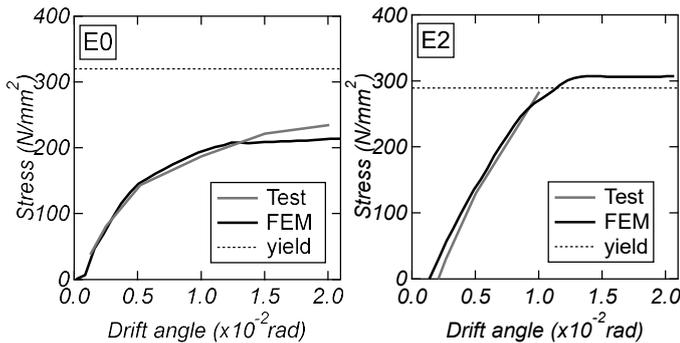


図4 実験と解析の復元力特性の比較



(a) AB (b) 鉄骨フランジ
図5 鋼材の引張応力-変形角関係

特性は概ね一致している。その後、 $R=2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度までの解析のせん断力は実験のものに比べてわずかに高い値となっている。一方の試験体 E2 では、 $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度までの実験と解析の復元力特性は概ね一致しているものの、それ以降の解析のせん断力は実験のものに比べて高い値となっている。これらは、片押し载荷の解析では、材料の繰返しによる剛性低下が考慮されていないためだと考えられる。

図5に鋼材の引張応力-変形角関係を示す。応力の計測位置は図1に示している。柱脚降伏型の試験体 E0 では AB の応力を、柱降伏型の試験体 E2 では鉄骨フランジの応力を示している。両試験体ともに実験と解析の結果は概ね一致している。

以上の結果から、試験体 E0 および E2 の解析結果は実験結果を概ね再現しているといえる。

5. パラメトリックスタディ

5.1 試験体概要

試験体の BP 厚さを減少させたモデル3体のパラメトリック解析を行う。表4に解析パラメータを示す。本解析では、BP および敷モルタルの厚みを変化させ、その他の試験体形状、加力条件および材料特性は3章と同じものを使用した。

表4 解析パラメータ

	敷モルタル (mm)	BP (mm)
E0-50, E2-50 (実験モデル)	50	50
E0-40, E2-40	60	40
E0-30, E2-30	70	30
E0-20, E2-20	80	20

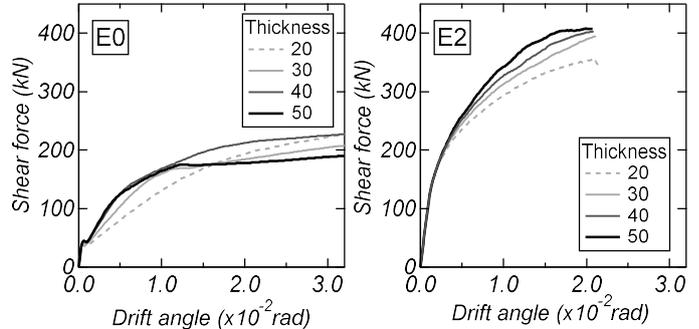


図6 BP厚さ変更後のせん断力-変形角関係

5.2 解析結果

図6に各BP厚さにおける復元力特性の結果を示す。モデル E0 では、BP 厚さの減少に伴い $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度まで剛性の減少が確認された。しかし、モデル E0-50 および 40 では $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度で BP の浮上がりおよびすべりに伴う顕著な剛性低下が認められた。それに伴い、その後の変形角において、BP の薄いモデルのせん断力は BP の厚いモデルのものに比べて高い値となった。

モデル E2 では、 $R=0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度までは BP 厚さの減少によるせん断力の値に大きな変化はみられなかった。その後 BP 厚さの減少に伴うせん断力の低下が確認された。

図7にBPの Mises 応力分布 (E0 : $R=2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$, E2 : $R=1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$) を示す。同図はBPの上面および正面切断位置のものを示している。

モデル E0 では、BP 厚さの減少に伴い柱の圧縮側コンクリート付近および引張側フランジ付近で応力の増大が確認された。モデル E2 では、BP 厚さの減少に伴い柱の圧縮側コンクリート付近において応力の顕著な増大はみられなかったものの、引張側フランジ付近において応力の増大が確認された。また、両モデルのすべての解析において引張側のフランジ付近から AB 付近にかけて応力の減少が認められた。これは、AB の降伏に伴う伸び変形によるものと推察される。さらに、軸力比の増加に伴い柱の圧縮側コンクリート付近で生じた高い応力の作用位置は内側に移行する傾向が確認された。これは、図8に示すように、敷モルタルから BP にかかる圧縮応力が軸力により高くなったことに起因するものと推察される。一方で、引張側では高い応力の生じる位置に大きな変化はみられなかった。

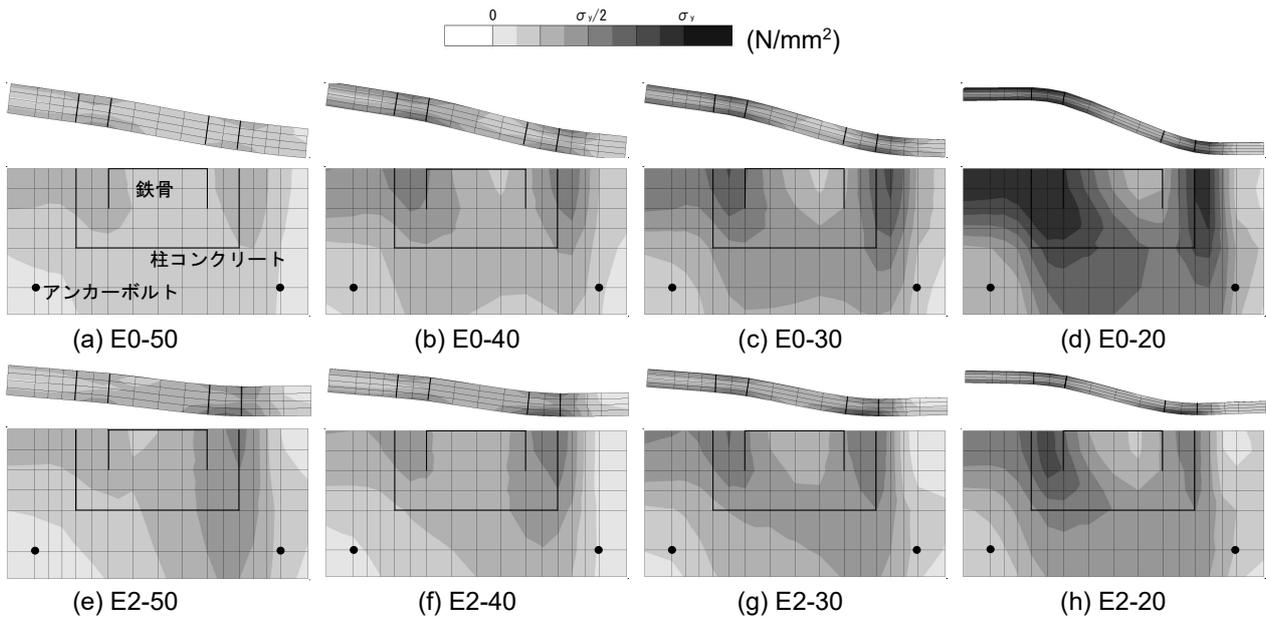


図7 BPのMises応力分布

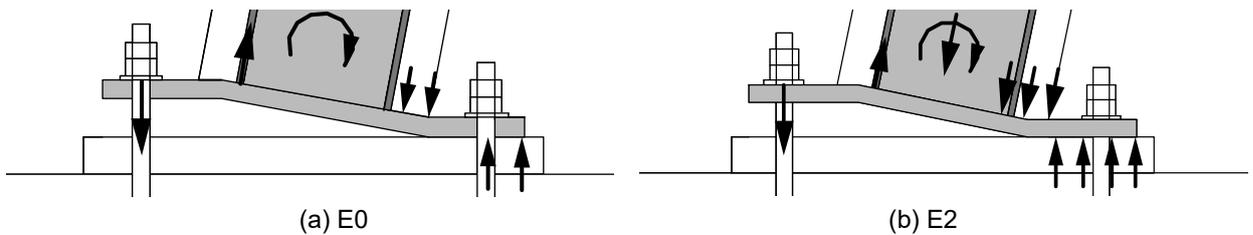


図8 BPの変形および応力分布

6. まとめ

本研究では、軸力比を変数とした非埋込み型 CES 柱脚の三次元 FEM 解析を行った。本研究によって得られた知見を以下に示す。

- 1) 本報に示す解析モデルは復元力特性および鋼材の応力状態を概ね再現することができる。
- 2) 軸力比 0 のモデルでは、BP 厚さの減少に伴い $R=1.0 \times 10^{-2}$ rad 程度までの剛性の減少が認められたものの、その後のせん断力の増加が認められた。一方の軸力比 0.2 のモデルでは、BP 厚さの減少に伴うせん断力の減少が認められた。
- 3) 軸力比 0 のモデルでは BP 厚さの減少に伴い柱圧縮側コンクリート付近および引張側フランジ付近における BP 応力の増加が認められた。一方の軸力比 0.2 のモデルでは、BP 厚さの減少に伴い引張側フランジ付近における BP 応力の増加が認められた。
- 4) 柱の圧縮側コンクリート付近の BP に生じる応力は軸力比の増加に伴い柱の内側に移行する傾向が認められた。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄骨コンクリート（CES）造建物の性能評価型構造設計指針（案）・同解説，2022.3
- 2) 西野天駿，鈴木卓：CES 露出柱脚の静的載荷実験および構造解析モデル，コンクリート工学年次論文集，Vol. 44, No. 2, pp. 751-756, 2022
- 3) 鈴木卓，倉本洋，森翔太：片側袖壁付き CES 柱の 3 次元 FEM 解析，第 10 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集，No. 34, pp. 1-8, 2013.11
- 4) 天野修，他 4 名：鋼管・コンクリート複合構造橋脚のせん断挙動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 20, No. 2, pp. 823-828, 1998.7
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，2018