論文 CES 埋込み型柱脚の応力抵抗機構に関する解析的研究

舟橋 のどか*1・鈴木 卓*2

要旨:本研究では,CES 埋込み型柱脚の耐力評価法に資するデータ取得を目的として,鉄骨埋込み深さ比お よびベースプレートの有無を変数とした柱脚試験体の三次元 FEM 解析を行った。その結果,本論の解析モデ ルは実験の履歴特性および鉄骨の応力推移を概ね再現できた。また,柱脚部鉄骨における曲げモーメントの 検討の結果,埋込み深さ1.0の試験体は2.0のものに比べて柱鉄骨とコンクリートの間の付着力の影響が小さ い傾向を示した。さらに,鉄骨埋込み深さ比およびベースプレートの有無に拘わらず,鉄骨とコンクリート の間の付着力による影響を終局耐力評価に考慮する必要性を示した。

キーワード:合成構造, FEM 解析, 終局耐力, 破壊形式, ベースプレート

1. はじめに

内蔵鉄骨および繊維補強コンクリート(以下,FRC) から構成される CES (Concrete Encased Steel)合成構造は 鉄骨鉄筋コンクリート(以下,SRC)構造の優れた構造 性能を活かしつつ施工面の合理化を図ることの可能な新 たな構造システムである。これまでに,CES 造柱,梁, 柱梁接合部および耐震壁などの研究開発が進められてき た¹⁾⁻⁴⁾。

CES 造建物では、上部構造の性能を発揮させるために CES 桂および基礎を結ぶ柱脚に高い性能が求められてお り、埋込み型柱脚の適用が第一に想定されている。しか しながら、現在までに CES 構造における埋込み型柱脚に 関する研究は行われておらず、その構造性能は不明であ った。

筆者の一人は、CES 埋込み型柱脚の構造性能および耐 力評価精度の検証を目的として鉄骨の埋込み深さを変数 とした試験体の静的載荷実験を実施した⁵⁾。その結果, すべての試験体において埋込み部周辺のコンクリートに 顕著な損傷は認められず,大変形時まで柱曲げ降伏型の 安定した復元力特性を示す傾向が確認された。一方で, SRC 規準のに基づいて埋込み部コンクリートの支圧破壊 型として設計された試験体の最大耐力は支圧破壊時の耐 力計算結果と比べて大幅に高く,当該部材の耐力評価法 に課題が残った。

以上を背景として本研究では、CES 埋込み型柱脚の耐 力評価法の開発に資するデータの取得を目的として文献 5)に示された静的載荷実験を対象とした三次元 FEM 解 析を実施した。本論文では、解析モデルの概要を示すと ともに、解析結果および実験結果の比較から解析モデル の妥当性の検討結果を述べる。さらに、解析結果から埋 込み部のコンクリートおよび鉄骨の間の応力伝達抵抗の 検討結果を述べる。



2. 静的載荷実験の概要⁵⁾

2.1 試験体

本章において示す CES 埋込み型柱脚の静的載荷実験 および実験結果の詳細は文献 5)を参照されたい。検討対 象とする試験体は実物の約 1/2 縮尺のもの 2 体である。 試験体の形状を図-1 に,試験体概要を表-1 にそれぞ れ示す。柱のコンクリート断面は 400mm 角および内蔵

*1 高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻(学生会員) *2 高知工科大学 システム工学群 建築・都市デザイン専攻 講師 博士(工学)(正会員)



表-1 試験体概要

CB1

CB2

試験体

表-3 鋼材の材料特性

	降伏強度	引張強度	ヤング係数
	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)
ウェブ(10mm)	344	456	213.3
フランジ(15mm)	285	435	212.9
アンカーボルト D16	377	529	209.7



図-3 実験のせん断カー部材角関係および最終破壊性状

鉄骨はH-300×200×10×15 である。 柱脚からピン支承の中 心までの高さは h=1200mm (せん断スパン比 3.0) である。 埋込み部ベースプレートには PL-19×225×325 が、アンカ ーボルトには 4-D16 がそれぞれ用いられた。

実験変数は柱鉄骨のせいおよび埋込み深さの比(以後, 埋込み深さ比と呼称する) である。試験体 CB1 は埋込み 深さ比 1.0 であり、試験体 CB2 は埋込み深さ比 2.0 であ る。累加強度理論による CES 柱の曲げ耐力および SRC 規準のに示される埋込み部コンクリートの支圧破壊時耐 力の計算結果に基づく破壊モードは試験体 CB1 が埋込 み部支圧破壊型,試験体 CB2 が柱曲げ降伏型であった。

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。

2.2 載荷方法

図-2 に載荷装置を示す。実験は載荷フレームに取り 付けた鉛直方向のオイルジャッキを2台によって軸力比 0.2 に相当する一定軸力 N(=1,800kN)を作用させつつ, 載荷フレームに取り付けた水平オイルジャッキによって 水平力を載荷した。水平力はピン支承中心の水平変位δ

を柱脚からピン支承中心までの高さhで除した相対部材 角Rにより制御された。

2.3 実験結果

破壊性状および履歴特性について,図-3に各試験体 のせん断力-部材角関係を示す。同図のせん断力-部材 角関係には各試験体の最大耐力点および CES 柱の終局 曲げ耐力の計算結果および柱脚支圧耐力のを併せて示し た。

埋込み深さ比 1.0 の試験体 CB1 の初期剛性および最大 耐力は試験体 CB2 のものと比べて僅かに低く,鉄骨埋込 み深さ比の影響が伺えた。しかしながら、両試験体とも に埋込み部に縦ひび割れの発生が確認されたものの、そ の顕著な拡幅は認められなかった。以上の実験結果から 両試験体の破壊モードは曲げ降伏型であったと考えられ た。

3. FEM 解析

3.1 解析モデル

解析対象は、前章に示した試験体 CB1 および CB2 に





図-5 材料構成則

加えて、両試験体から埋込み部ベースプレートとアンカ ーボルトを取り除いたモデル CB1N および CB2N の4体 とする。図-4 にコンクリートおよび鉄骨の要素分割を 示す。試験体は面外方向の対称性を考慮して片側の半分 のみをモデル化した。コンクリートおよび鉄骨の材料特 性は前章に示した表-2 および表-3 の値を用いた。コ ンクリートの引張強度は式(1)によって算定した⁹。

$$\sigma_{cr} = 0.33 \sqrt{\sigma_B} \tag{1}$$

ここで, oB: コンクリート強度である。

本解析では、実験と同様の加力状況とするために、ピン支承上端に鉛直力を与えた後に水平力を作用させた。 境界条件はスタブ下端における節点の変位を固定した。 また、試験体切断面におけるすべての節点の面外方向変 位を固定した。解析は、R=3.0×10⁻²radの載荷サイクルま での実施を原則とし、収束計算が不安定になった時点で 終了した。解析に使用したプログラムは市販の解析ソフ ト「FINAL」である。

3.2 材料構成則

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。三軸応力下の破壊条件は5パラメータ モデルに大沼らの係数⁷⁰を用いて定義した。応力ーひず み関係の上昇域は修正 Ahmad モデル⁸⁰とした。軟化域は, 普通コンクリートでは Nakamura モデル⁹⁰を, 繊維補強コ ンクリートでは材料試験結果を参考に図-5(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ィ フィニング特性は出雲らの提案モデル(柱:*c*=1.0, スタ ブ:*c*=0.4, *c*:モデル係数)¹⁰⁾を用いた。ひび割れ後のせ ん断伝達特性は, 図-5(b)に示すように Al-Mahaidi モデ ル¹¹⁾ (β =1.0 の場合)に対して,文献 12)を参考に剛性 低下率が高くなるように多折線 (β =0.8) でモデル化した とした。

鉄骨およびベースプレートは4節点積層平板シェル要素でモデル化し、埋込み部のアンカーボルトおよびフー

プ筋は2点トラス要素でモデル化した。鋼材の応カーひ ずみ関係はバイリニアモデルを仮定し、その履歴特性は 等方硬化則を仮定した。

鉄骨およびベースプレートとコンクリートの節点間に 8 節点アイソパラメトリック接合要素を定義することで 付着および開閉挙動を考慮した。付着応カーすべり関係 は天野モデル¹³⁾を用いた。最大付着応力は文献14)に従 い算定した。ここで,最大応力時のすべり量は0.05mmを 仮定した。また,摩擦係数を0.65として,面外圧縮力に 伴う摩擦力の増大を考慮した。引張側の開閉挙動は,最 大応力が0.04*σ*^Bに達するまで線形を仮定し,その後の応 力を負担しないように定義した。

3.3 実験結果および解析結果の比較

図−6 に各試験体の実験結果および解析結果の履歴特 性の比較を, 表−4 に初期剛性の比較を示す。図−6 では 解析における最大耐力点を○でそれぞれ示している。

試験体 CB1 および CB2 の解析結果をみると,最大耐力後の低下挙動は実験結果を模擬できている。解析結果は実験結果と比べて初期剛性が試験体 CB1 は 2 割程度, CB2 は 1 割程高い。しかしながら,すべての試験体において最大耐力の解析値は実験値と比べて概ね一致していた。

ベースプレートのないモデル CB2N の最大耐力点およ び履歴性状はベースプレートのある試験体 CB2 の解析 結果と概ね対応している。一方のモデル CB1N はベース プレートのある試験体 CB1 の解析結果と比べて R=1.5×10⁻²rad の負載荷サイクルからせん断力が低く, R=2.0×10⁻²rad の載荷サイクルにおいて,柱脚部の引張側 コンクリートのひずみ軟化挙動が顕著となり,解析が終 了した。

図-7 に試験体 CB1 および CB2 の実験および解析に おける鉄骨フランジの応力推移の比較を示す。鉄骨の応 力は図-8 に示すように柱脚部フランジの正載荷時に引 張側となる位置の値である。



試験体 CB1 および CB2 ともに解析結果および実験結 果の応力推移は概ね対応する傾向が確認された。

以上の実験および解析における履歴特性および鉄骨フ ランジの推移の比較より、本論に示した解析モデルは CES 埋込み柱脚の履歴特性および鉄骨の応力推移の実験 結果を概ね再現することができる。

4. 内部応力状態

4.1 最小主応力分布

図-9 に各試験体の *R*=1.5×10⁻²rad 到達時におけるコ ンクリートの最小主応力分布を示す。同図は試験体の面 外方向切断面位置(試験体中心)のものである。

すべての試験体において柱脚部の圧縮域に高い応力の 発生が,柱脚部における引張側フランジ付近のコンクリ ートに圧縮応力の発生が認められた。

ベースプレートのある試験体に着目すると,埋込み深 さ比1.0の試験体CB1のベースプレート付近に発生する 圧縮応力のレベルは埋込み深さ比2.0の試験体CB2のも のと比べて高くなる傾向が確認された。また,試験体CB1 における埋込み脚部の鉄骨フランジ付近に発生する圧縮 応力は試験体CB2のものに比べて高い。一方でベースプ レートのない試験体に着目すると,モデルCB1Nの埋込 み脚部における圧縮鉄骨フランジ付近に発生する応力は モデルCB2Nのものに比べて高くなる傾向が確認された。

ベースプレートの有無に着目すると、ベースプレート のある試験体 CB1 および CB2 では、ベースプレート下



表-4 初期剛性の比較



面側に圧縮応力の発生が認められた。一方のベースプレ ートがないモデル CB1N および CB2N では,圧縮側の鉄 骨フランジに沿って応力の発生が認められた。

4.2 鉄骨曲げモーメントの寄与

図-10 に各試験体の埋込み部の柱脚部鉄骨曲げモー メントへの寄与(以下,曲げ寄与)の推移を,図-11 に 曲げ寄与分の概念をそれぞれ示す。曲げ寄与分は,鉄骨 要素およびコンクリート要素の間に定義した接合部要素 の垂直力とせん断力を基に柱脚部の柱心までの距離を乗 じることで算出した。ここで,曲げ寄与分は柱鉄骨とコ ンクリートの間の付着作用(付着抵抗と呼称)と支圧作 用(支圧抵抗と呼称),およびベースプレートとコンクリ ートの間の付着作用(せん断抵抗と呼称)と支圧作用に よる抵抗機構(曲げ抵抗と呼称)の4つの抵抗機構に区 別して示した。アンカーボルトによる曲げ寄与分は上記 の曲げ抵抗に含むこととした。

すべての試験体において,付着抵抗が曲げモーメントの大部分に寄与していることがわかる。また,試験体CB1 は他の試験体に比べて曲げ抵抗の寄与が大きい。



図-11 曲げモーメント寄与の概念

ベースプレートのある試験体に着目すると、埋込み深 さ1.0の試験体 CB1 は埋込み深さ2.0の試験体 CB2 に比 べて付着抵抗の寄与分が小さい。また、両試験体の支圧 抵抗およびせん断抵抗の寄与の推移に大きな差異はみら れなかった。

ベースプレートのない試験体に着目すると,埋込み深 さ 1.0 のモデル CB1N の付着抵抗は埋込み深さ 2.0 のモ デル CB2N のものに比べて小さい。また,両試験体の支 圧抵抗の推移に大きな差異はみられなかった。

次に、ベースプレートの有無に着目すると、R=1.5×10⁻ ²radにおける試験体 CB1の付着抵抗および支圧抵抗はモ デル CB1N のものに比べてそれぞれ小さい。また、モデ ル CB1N では、R=1.5 から 2.0×10²rad において支圧抵抗 および付着抵抗の推移に顕著な変化は認められず、両抵 抗機構が概ね上限値に達したものと推察された。一方の 試験体 CB1 では、R=1.5 から 2.0×10⁻²rad にかけて支圧抵 抗の減少が認められるものの、その他の抵抗機構の推移 および増加が認められた。換言すると、ベースプレート のある試験体 CB1 では、柱鉄骨およびコンクリートの間 の応力伝達に余力があるものと推察される。また、試験 体 CB2 の付着抵抗および支圧抵抗はモデル CB2N のも のに比べて小さい。

以上に示した柱鉄骨およびコンクリート間の付着抵抗 による曲げ寄与は文献6)の埋込み部の支圧耐力評価法に おいて考慮されておらず,これらのことから支圧耐力計 算が実験の最大耐力を下回った要因の一つと推察される。 CES 埋込み型柱脚の終局破壊評価法では,柱鉄骨脚部の 曲げモーメントに寄与する付着抵抗の考慮が必要だとい える。

5. まとめ

本研究では,鉄骨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 埋込み型柱脚の三次元 FEM 解 析を実施した。限られた範囲の検討ではあるものの,本 論より得られた知見を以下に示す。

- 本論に示した解析モデルは CES 埋込み型柱脚の履 歴特性および鉄骨の応力推移の実験結果を概ね再 現することができる。
- コンクリートの最小主応力分布から、埋込み深さ
 1.0の試験体における埋込み部圧縮側鉄骨フランジ 付近およびベースプレート付近の圧縮応力は埋込 み深さ2.0の試験体のものに比べて高くなる傾向が 認められた。
- 3) 埋込み深さ比 1.0 の試験体は埋込み深さ比 2.0 の試 験体と比べて,柱脚部鉄骨の曲げモーメントに寄与 するベースプレートとコンクリートの間の支圧力 の影響が大きく,柱鉄骨とコンクリートの間の付着 力の影響が小さい。
- 4) 鉄骨埋込み深さ比およびベースプレートの有無に 拘わらず,柱鉄骨とコンクリートの間の付着力によ る鉄骨の曲げモーメントへの寄与の影響は大きく, CES 埋込み型柱脚の終局耐力評価に付着の影響を 考慮する必要があると判断される。

参考文献

- 石鈞吉,他4名:H型鉄骨内蔵CES柱の復元力特性のモデル化に関する研究,日本建築学会構造系論文集,Vol. 78, No. 693, pp. 2019-2026, 2013.11
- 石川智康,小山勉,松井智哉,倉本洋:CES合成建 築物における梁の静的加力実験,コンクリート工学 年次論文集,Vol.37, No.2, pp.1057-1062, 2015.7
- 松井智哉, 倉本洋: CES 柱梁接合部の構造性能に及 ぼす作用軸力の影響, 日本建築学会構造系論文集, No. 663, pp. 1025-1031, 2011.5
- 4) 鈴木卓,倉本洋,松井智哉:CES 造耐震壁の復元力 モデル,日本建築学会構造系論文集,Vol. 78, No. 693, pp. 2027-2034, 2013.11
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 大沼博志,青柳征夫:三軸応力下におけるコンクリ ートの強度特性,電力中央研究所報告, No. 474, 1981.12
- 長沼一洋:三軸圧縮下におけるコンクリートの強度 特性,日本建築学会構造系論文集,No.474, pp.163-170, 1995.8
- Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone length of Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structure Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp. 259-272, 1999.10
- 出雲淳一,島弘,岡村甫:面内力受ける鉄筋コンク リート板要素の解析モデル,コンクリート工学, Vol. 25, No. 9, pp. 134-147, 1987.9
- Al-Mahaidi, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Beam Member, Report 78-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, 1979.1
- 松井智哉, 溝淵博己, 倉本陽:H形鉄骨内臓 CES柱の構造実験と FEM 解析, コンクリート呼応学次論 文集, Vol32, No.2, 2010
- 13) 天野修,他3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
- 14) 佐藤政勝,田中祐人:鋼管,H型鋼の付着強度に及 ぼすコンクリートの拘束効果について、コンクリー ト工学年次論文報告集,Vol. 15, No. 2, 1993.7
- 15) 米澤健次,野口博:柱RC・梁Sを用いた混合構造柱 梁接合部のせん断性能に関する解析的研究,コンク リート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, 1994.7