CES 埋込み型柱脚の応力抵抗機構に関する基礎的研究

1200135　〇舟橋　のどか
指導教員　鈴木　卓

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。

CES 造建物では，上部構造の性能を発揮させるためにCES 柱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。

文献 1)では，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。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 2)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1)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.　FEM 解析

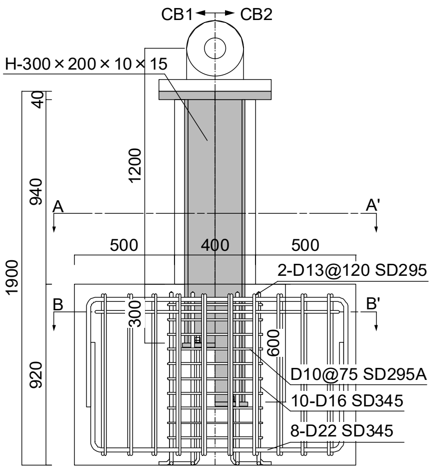
2.1 解析モデル

解析対象は，文献 1)の試験体 CB1 および CB2 に加えて，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。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。図－2 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。また，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。コンクリートの引張強度は式(1)によって算定した 2)。

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

ここで，σ_B：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。



試験体立面

図－1　試験体の形状および寸法

表－1　試験体概要

試験体		CB1	CB2
埋込み深さ $_bh$ (mm)		300	600
埋込み部	ベースプレート	PL-19×225×325	
	アンカーボルト	4-D16 (SD295A)	
CES 柱	断面 $_cb\times{}_cD$ (mm)	400×400	
	せん断スパン比	3.0 (h=1200m)	
	鉄骨断面	H-300×200×10×15 (SS400)	
スタブ	$_bb\times{}_bD$	700×1400	
軸力 N (kN)		1,800	

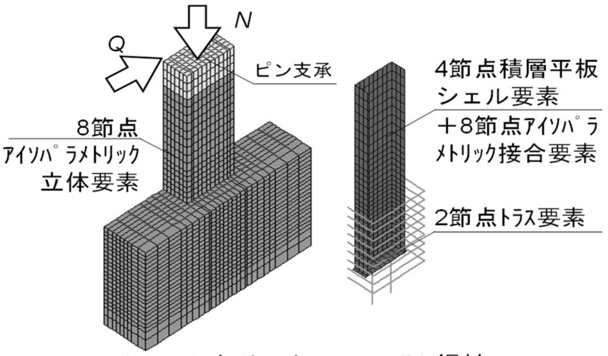
表－2　コンクリートの材料特性

		圧縮強度 (N/mm²)	ヤング係数 (N/mm²)	圧縮強度時ひずみ (μ)
CB1	柱（繊維）	55.3	31.1	3,024
	スタブ（普通）	30.8	27.3	2,028
CB2	柱（繊維）	52.0	33.1	2,733
	スタブ（普通）	29.7	29.6	1,848

表－3　鋼材の材料特性

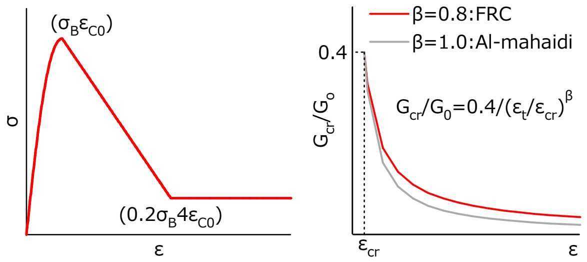
	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)
ウェブ（10mm）	344	456	213.3
フランジ（15mm）	285	435	212.9
アンカーボルト D16	377	529	209.7

高知工科大学　システム工学群　建築・都市デザイン専攻



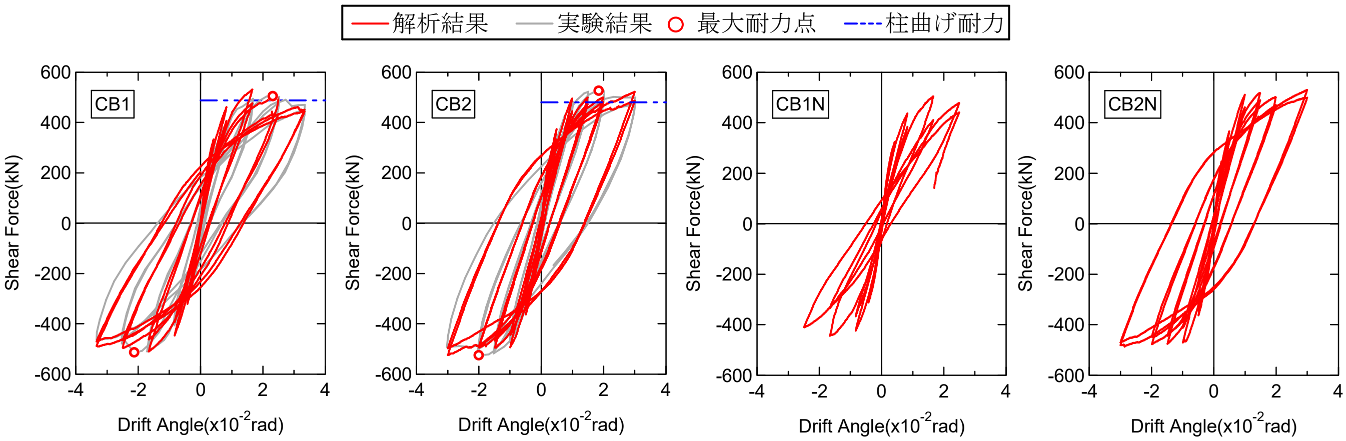
(a) コンクリート　　(b) 鋼材

図－2　要素分割



(a)応力－ひずみ関係　(b)ひび割れ後のせん断特性

図－3　材料構成則



図－4　各試験体の履歴特性

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^{-2}rad 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。

2.2 材料構成則 [3)]

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を用いて定義した。応力－ひずみ関係の上昇域は修正 Ahmad モデルとした。軟化域は，普通コンクリートでは Nakamura モデルを，繊維補強コンクリートでは材料試験結果を参考に図－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）を用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性は，図－3(b)に示すように Al-Mahaidi モデル（β=1.0 の場合）に対して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。鋼材の応力－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。付着応力－すべり関係は天野モデルを用いた。最大付着応力は式 2)に従い算定した。

$$\tau_{max} = 0.05 \cdot (C / B) \cdot \sigma_B \qquad (2)$$

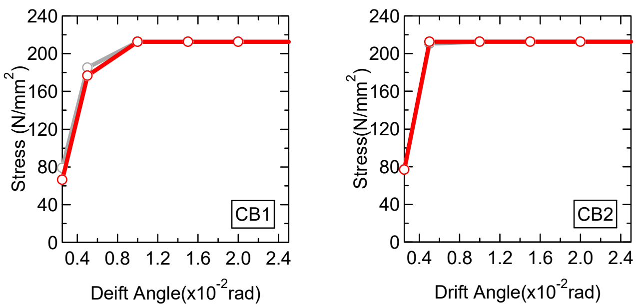
た。ここで，最大応力時のすべり量は 0.05mm を仮定した。また，摩擦係数を 0.65 として，面外圧縮力に伴う付着応力の増大を考慮した [4)]。引張側の開閉挙動は，最大応力が $0.04\sigma_B$ に達するまで線形を仮定し，その後の応力を負担しないように定義した。

2.3 実験結果および解析結果の比較

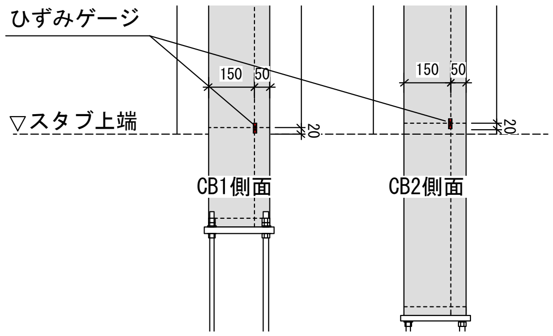
図－4 に各試験体の実験結果および解析結果の履歴特性の比較を示す。同図では解析における最大耐力点を○でそれぞれ示している。

試験体 CB1 および CB2 の解析結果は実験結と比べて初期剛性が僅かに高い。しかしながら，両試験体の最大耐力および耐力低下の挙動は実験結果と概ね対応している。

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



図－5　鉄骨応力推移の比較



図－6　ひずみゲージ貼り付け位置

トのある試験体 CB1 の解析結果と比べて R=1.5×10^{-2}rad の負載荷サイクルからせん断力を低く見積もり，R=2.0×10^{-2}rad の載荷サイクルで解析が終了した。

図－5 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－6 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。

3.　内部応力状態

3.1 最小主応力分布

図－7 に各試験体の R=1.5×10^{-2}rad 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。

3.2 鉄骨曲げモーメントの寄与

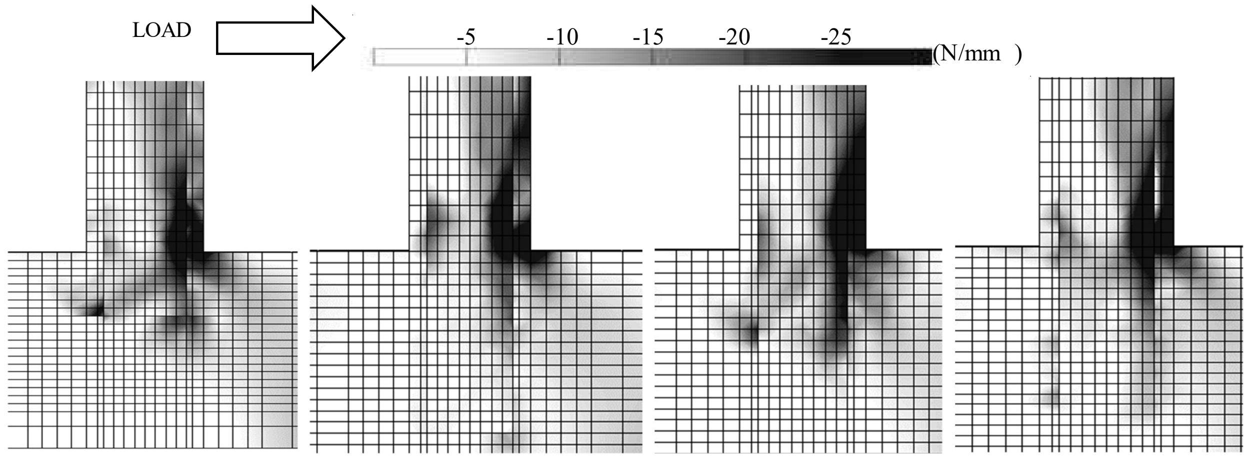
図－8 に各試験体の埋込み部の柱脚部鉄骨曲げモーメントへの寄与（以下，曲げ寄与）の推移を示す。曲げ寄与分は，鉄骨要素およびコンクリート要素の間に定義した接合部要素の垂直力とせん断力を基に柱脚部の柱心までの距離を乗じることで算出した。ここで，曲げ寄与分は柱鉄骨とコンクリートの間の付着作用（付着抵抗と呼称）と支圧作用（支圧抵抗と呼称），およびベースプレートとコンクリートの間の付着作用（せん断抵抗と呼称）と支圧作用による抵抗機構（曲げ抵抗と呼称）の 4 つの抵抗機構に区別して示した。アンカーボルトによる曲げ寄与分は上記の曲げ抵抗に含むこととした。

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。

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。一方で，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。

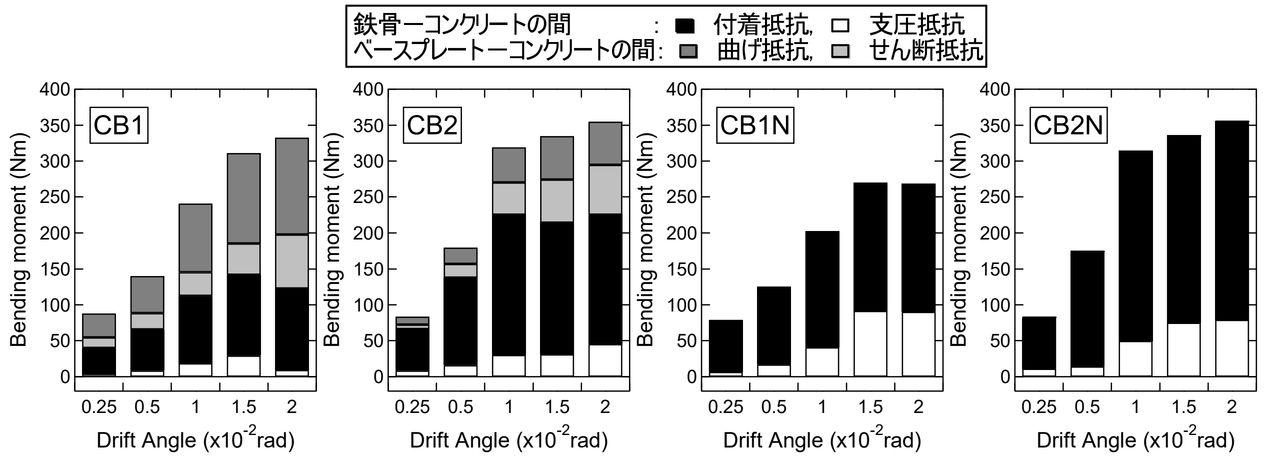
次に，ベースプレートの有無に着目すると，R=1.5×10^{-2}rad における試験体 CB1 の付着抵抗および支圧抵抗はモデル CB1N のものに比べてそれぞれ小さい。また，モデル CB1N では，R=1.5 から 2.0×10^{-2}rad において支圧抵抗および付着抵抗の推移に顕著な変化は認められず，両抵抗機構が概ね上限値に達したものと推察された。一方の試験体 CB1 では，R=1.5 から 2.0×10^{-2}rad にかけて支圧抵抗の減少が認められるものの，その他の抵抗機構の推移および増加が認められた。換言すると，ベースプレートのある試験体 CB1 では，柱鉄骨およびコンクリー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 2)の埋込み部の支圧耐力評価法に



(a) 試験体 CB1　(b) 試験体 CB2　(c) 試験体 CB1N　(d) 試験体 CB2N

図－7　コンクリート最小主応力部分布



(a) 試験体 CB1　(b) 試験体 CB2　(c) モデル CB1N　(d) モデル CB2N

図－8　各試験体の柱脚部鉄骨曲げモーメントの寄与の推移

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。

4. 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。本論より得られた知見を以下に示す。

1) 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。
2) コンクリートの最小主応力分布から，埋込み深さ比 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比 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) 鉄骨埋込深さ比およびベースプレートの有無に拘らず，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する。

参考文献

1) 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
2) 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
3) FINAL/V11.0 ヘルプ
4) 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