

ベースプレートの下側をリブにより補強した非埋込み型 CES 柱脚の構造性能に関する研究

合成構造
軸力

静的載荷実験
繊維補強コンクリート

復元力特性
リブ

1220037
指導教員

岡崎 風太*1
鈴木 卓

1. はじめに

内蔵鉄骨および繊維補強コンクリート（FRC）から構成される CES（Concrete Encased Steel）構造は優れた耐震性を有しつつ、鉄筋の省略による施工の簡略化を実現した新たな構造形式である¹⁾。

CES 構造の柱脚には、鉄骨を基礎に埋め込んだ埋込み型柱脚および鉄骨をアンカーボルト（以下、AB）とベースプレート（以下、BP）で固定した非埋込み型柱脚の 2 つの柱脚形式が考えられる。非埋込み型 CES 柱脚は AB の配置および BP の形状に高い自由度から高い耐震性と優れた施工性を両立した耐震要素となる可能性がある。西野らは柱断面の外側に AB を配置して CES 露出柱脚の研究を実施した²⁾。その結果、CES 露出柱脚の破壊性状および復元力特性等が確認された。一方、当該研究で使用された BP は形状および厚さが大きく、施工性改善の余地が示された。

そこで本研究では、柱断面の内側に AB を配置させることで BP の形状を小さくし、BP 下にリブを配置させることで BP 厚さを薄くした非埋込み型 CES 柱脚の静的載荷実験を実施した。本論では、リブの有無を変数とした試験体の破壊性状、復元力特性および BP フランジの応力推移の検討結果を述べるとともに当該試験体の耐力評価法の検討結果を示す。

2. 静的載荷実験

2.1 試験体

試験体は実大の約 1/3 スケールのもので 3 体である。図 1 に試験体の形状および断面を表 1 に試験体概要を示す。柱のコンクリート断面 $b \times d$ は 300mm 角、内蔵鉄骨は BH-200×150×6×9 である。この柱断面は柱軸力比 $N/N_0=0.2$ の際に鉄骨および CES 柱全体の曲げ耐力の比率が 0.42 程度となるように設定したものである³⁾。BP 上面から加力位置までの高さは 600mm である。BP は PL-32×350×350、AB は 8-M24 である。スタブには基礎構造を模擬した主筋およびせん断補強筋を、AB 周辺には縦筋および帯筋をそれぞれ配した。

実験変数は軸力の載荷方法および BP 下面のリブの有無である。試験体 N0 および A0 は軸力比 N/N_0 （ N ：作用軸力、 N_0 ：軸圧縮耐力で式(1) 式(2)より算出³⁾）を 0.0 とし、試験体 A1 は軸

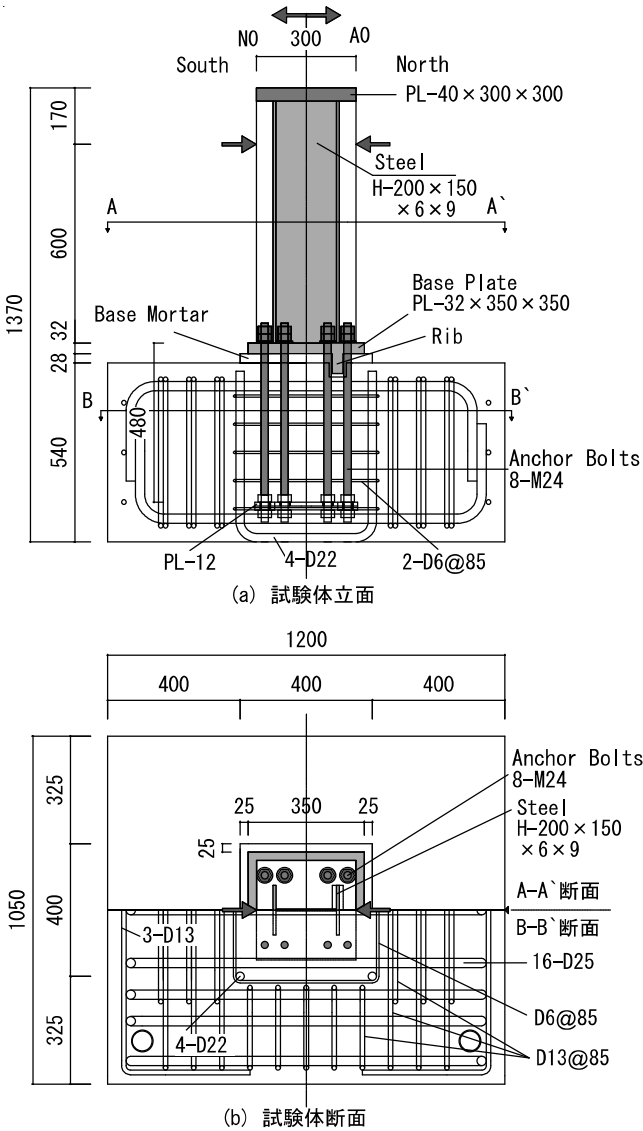


図 1 試験体形状および寸法

試験体		N0	A0	A1
実験変数	軸力比 N/N_0	0	0	0.1
	軸力 N (kN)	0	0	550
	断面 $b \times d$ (mm)	300×300		
	せん断スパン比 $M/(Q_c D)$	2.0 ($M/Q=600$)		
柱	鉄骨断面	BH-200×150×6×9 (SS400)		
	モルタル厚 (mm)	28		
柱脚	ベースプレート	PL-32×350×350 (SS400)		
	アンカーボルト	8-M24 (ABR490)		
	定着長さ l_b (mm)	480		

力比 0.1 として一定軸力を作用させる試験体である。また、試験体 N0 は BP 下面にリブは取り付けしておらず、試

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)	ひずみ (μ)
N0	柱	62.2	33.4	2922
	モルタル	54.6	22.5	3751
	スタブ	39.0	27.9	2456
A0	柱	61.5	35.3	2636
	モルタル	54.5	23.7	3698
	スタブ	45.0	33.9	2208
A1	柱	60.5	36.3	2566
	モルタル	51.8	22.5	3559
	スタブ	44.1	32.7	2383

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)	314	457	210
鉄骨フランジ(9mm)	298	445	206
ベースプレート PL-32	317	465	214
アンカーボルト M24	377	536	234

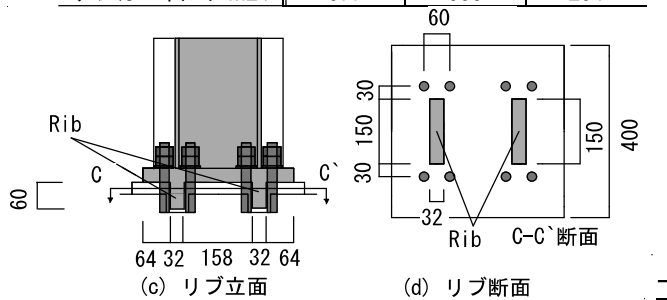


図 2 リブの形状および断面

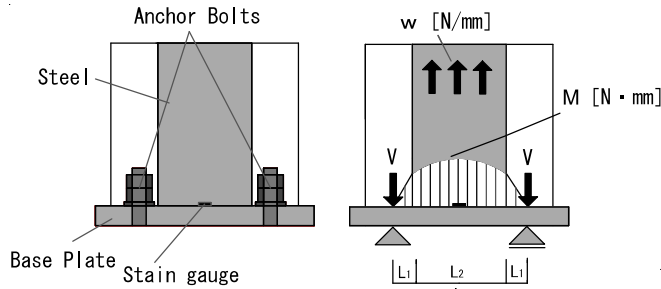


図 3 曲げモーメント分布

験体 A0 および A1 は BP 下面にリブが取り付けられている。

$$N_0 = cA_c \sigma_B + sA_s \sigma_y \quad (1)$$

$$c_u = 0.85 - 2.5 s_p c \quad (2)$$

ここで、 σ_B :コンクリートの圧縮強度、 sA :鉄骨断面積、 σ_y :鉄骨の降伏強度、 $s_p c$:圧縮鉄筋比である。

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、基礎に相当するスタブには普通コンクリートを、柱には繊維補強コンクリートを使用した。柱に使用した繊維は、標準長さ 30mm、直径 0.66mm のビニロンファイバー（以下、RF4000）であり、体積混入率は 1.0% である。

2.2 リブおよびベースプレートの設計

図 2 にリブの形状および断面を図 3 に試験体側面の引張側 BP に想定される荷重および曲げモーメントを示す。同図は BP を両端 AB を支点とした単純梁に変換している。荷重は想定している鉄骨フランジの引張降伏応力 σ_y × 鉄骨フランジ厚さ t_f で算出した。この単純梁では両支

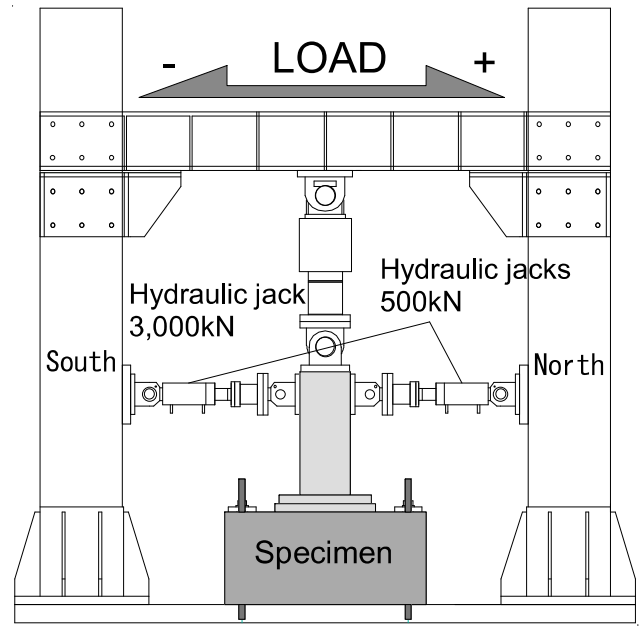


図 4 荷重装置

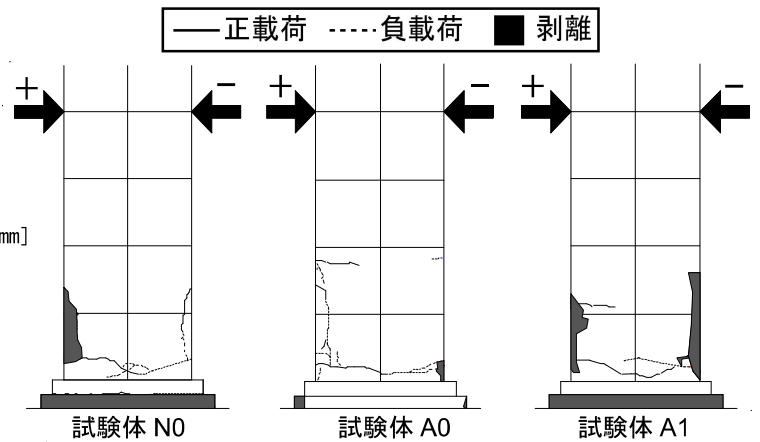


図 5 最終破壊性状

点間の中心曲げモーメントが最大値 M_{max} となる。また、BP の降伏曲げモーメント bM_y は式(3)より算出した⁴⁾。

$$bM_y = Z bF_y (1.5/1.3) \quad (3)$$

ここで、 Z :BP の断面係数、 bF_y :BP の降伏強度である。

リブ無し試験体 N0 では、 bM_y/M_{max} が 0.65 となり BP の降伏が想定される。一方で、BP とリブの厚さは 32mm、リブのせいは 150mm とした。リブ有り試験体 A0 および A1 では、 bM_y/M_{max} が 1.37 と BP が降伏しないようにリブの埋込み深さを 60mm とした。

2.3 荷重計画

図 4 に荷重装置を示す。試験体の下スタブはアンカーボルトを用いて荷重フレームに固定し、上部プレートは高力ボルトを用いて鉛直オイルジャッキ（最大容量：3,000kN）に固定した。実験は鉛直オイルジャッキによって所定の軸力 N を作用させつつ、荷重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）によって水平力を荷重した。水平力荷重は、試験体頂部の水

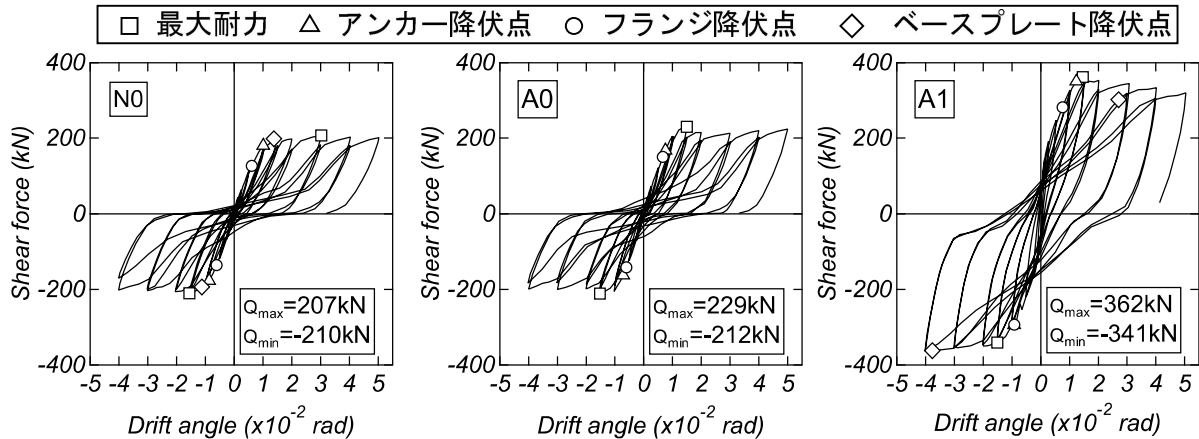


図6 せん断力-変形角関係

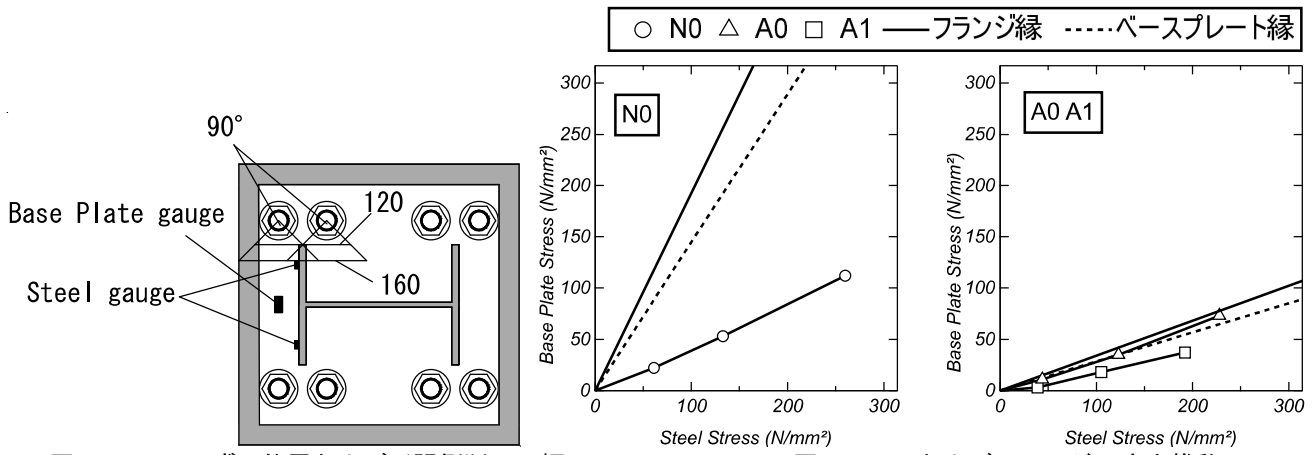


図7 BPのひずみ位置および引張側断面の幅

図8 BPおよびフランジの応力推移

平変位 δ を柱脚から試験体頂部までの高さ h で除した相対部材角 $R (= \delta/h)$ による変位制御とした。加力プログラムは $R=1/800\text{rad}$, $1/400\text{rad}$ および $R=1/200\text{rad}$ を1サイクル行った後、 $1/100$, $1/67$, $1/50$, $1/33$, $1/25\text{rad}$ を2サイクルおよび $R=1/20\text{rad}$ の正載荷側のみとした。

3. 実験結果

3.1 破壊性状および履歴特性

図5に各試験体の実験後の最終破壊状況を、図6に各試験体のせん断力-変形角関係を示す。図6では、ABの初期降伏点を△印、鉄骨フランジの初期降伏点を○印、BPの初期降伏点を◇印、最大耐力点を□印でそれぞれ示している。

軸力比 0.0 の試験体 N0 および A0 では、 $R=1/100\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて AB および鉄骨フランジの引張降伏がそれぞれ確認され、直後の $1/67\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて剛性低下が確認された。また、試験体 N0 では $R=1/67\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて BP の引張降伏が確認された。両試験体ともに BP 外側の敷モルタルの剥離および BP の浮き上がりが顕著であったことから、両試験体の破壊モードは柱脚曲げ降伏型と判断される。

軸力比 0.1 の試験体 A1 では、 $R=1/100\text{rad}$ の載荷サイク

ルにおいて鉄骨フランジの引張降伏および $R=1/67\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて AB の引張降伏が確認された。また、 $R=1/33\text{rad}$ の載荷サイクルにおいて BP の引張降伏が確認された。最終的に BP 外側の敷モルタルの剥離および BP の浮き上がりが顕著であったことから、当該試験体の破壊モードは柱脚曲げ降伏型と判断される。

試験体 N0 および A0 では、AB の引張降伏に伴い試験体はスリップ型の履歴性状を示す傾向が確認された。また、試験体 A1 は試験体 N0 および A0 と比べて履歴面積が大きく、軸力比 0.1 の差による影響が確認された。リブ有り試験体 A0 の最大耐力はリブ無し試験体 N0 のものと比べて、正側では 11% の耐力増加が確認されたものの負側では同程度の値を示す傾向が確認された。

3.2 ベースプレートおよび鉄骨フランジの応力推移

図7にBPおよび鉄骨フランジに取り付けたひずみゲージ取り付け位置を、ABの引張側断面の幅位置を、図8に各試験体のBPおよび鉄骨フランジの応力推移を示す。

各試験体ともに応力推移はほぼ直線を示している。試験体 A0 の応力推移の傾きは試験体 N0 と比べて低く、リブ補強の影響が伺える。また、試験体 A1 の応力推移の傾きは試験体 A0 と比べて低く、軸力比による影響が確認された。

図3に示すひずみゲージ位置からBP-フランジの応力の理論値は式(4)である。荷重はフランジの引張降伏応力 σ_y ×鉄骨フランジ厚さ t_f で算出した。式(5)よりBPのひずみゲージ位置に作用する曲げモーメントを算出した。

$$\sigma = M/Z(1.5/1.3) \tag{4}$$

$$M = (L_1 + L_2/2)V - w(L_2^2/8) \tag{5}$$

ここで、 M :ひずみゲージ位置の曲げモーメント、 V :ABの引張力、 w :フランジの引張力である。断面の幅は45°方向に伝達されるABの引張力⁴⁾が、ABからフランジ縁(120mm)およびBP縁(160mm)まで作用すると仮定して算出した。

リブ無し試験体N0では、実験値および両理論値の推移は対応していない。本論では図3に示す試験体奥行き方向を対象にBPの設計を行った。しかし、試験体せい方向にもBPの応力伝達の可能性があり、今後の課題である。一方、リブ有り試験体A0とA1では、実験値と幅をBP縁と仮定した理論値(破線)の推移の傾きは概ね対応している。

4. 終局耐力計算

CES柱および露出柱脚の曲げ耐力は一般化累加強度理論を用いて算出した³⁾。柱のコンクリート強度は式(2)に示す低減係数を、柱脚にあたるスタブコンクリート強度には低減係数0.85をそれぞれ乗じている。鉄骨ウェブの曲げ耐力は精算値である。柱脚のABは引張力のみ負担するものとして計算した。露出柱脚のせん断耐力は式(6)~(8)を用いた⁴⁾。

$$Q_u = \max \{ Q_{fu}, Q_{bu} \} \tag{6}$$

$$Q_{fu} = 0.5(N + {}_bT_Y) \tag{7}$$

$$Q_{bu} = n_t a_b F_{bu} / \sqrt{3} \tag{8}$$

ここで、 ${}_bT_Y$:引張側ABの降伏張力、 n_t :引張側ABの本数、 a_b :ABの断面積、 F_{bu} :ABの引張強度である。

表4に終局耐力の計算値と実験によって得られた最大耐力の一覧を示す。図9に終局耐力計算の軸力-せん断力相関関係を示す。

全ての試験体において柱曲げ耐力の計算値が最も低い。しかし、実験における全ての試験体の破壊モードは柱脚曲げ降伏型と判断されており、実験結果と終局耐力計算が対応していない。また、実験の最大耐力および柱脚曲げ耐力の計算値の比率は試験体N0および試験体A0では実験値が計算値を下回った。これは実験において敷モルタルの剥離によりスタブコンクリートからの圧縮反力が減少した可能性がある。これらのことから、柱脚曲げ耐力の評価法は敷モルタルの破壊性状も含めた再検討が必要である。

表4 計算結果および実験結果

単位 (kN)	N0	A0	A1
実験値	210	229	362
(a) 柱曲げ耐力	226	224	310
(b) 柱脚曲げ耐力	241	248	325
(c) 柱脚せん断耐力	283	283	558
実験値/min{(a), (b), (c)}	0.93	1.02	1.17

— 柱曲げ耐力 柱脚曲げ耐力 - 柱脚せん断耐力 — 導入軸力
○ N0 実験最大耐力 □ A0 実験最大耐力 △ A1 実験最大耐力

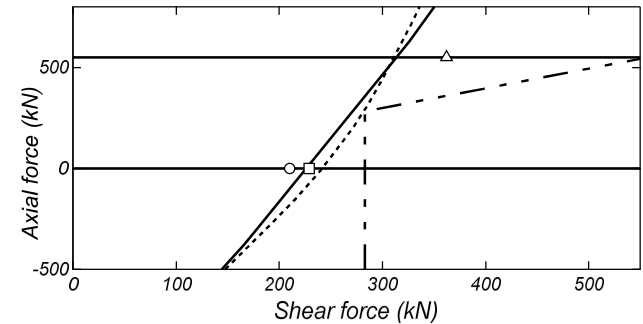


図9 軸力-せん断力相関関係

5. まとめ

本研究では、BP下にリブ補強を施した非埋込み型CES柱脚の静的載荷実験を実施し、当該部材の構造性能を検討した。本論より得られた知見を以下に示す。

- 1) リブ有り試験体の最大耐力はリブ無し試験体のものと比べて、正側では11%の耐力増加が確認されたものの、負側では同程度の値を示す傾向が確認された。
- 2) リブ有り試験体のBPの応力推移の傾きはリブ無し試験体のものと比べて低く、リブ補強の影響が確認された。
- 3) ベースプレート-フランジ応力推移の実験値と理論値は、リブ無し試験体では対応していないものの、リブ有り試験体では対応する傾向が認められた。

参考文献

- 1) 藤本利昭, 六田莉那子, 大崎広貴: CES部材に適用する繊維補強コンクリートの構造性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.729, pp.1945-1953, 2016.11
- 2) 西野天駿, 鈴木卓: 軸力比の異なるCES露出柱脚の構造性能に関する研究, 日本建築学会四国支部研究報告集, 第22号, pp.5-8, 2022.5
- 3) 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
- 4) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2015.6

*1 高知工科大学
システム工学群 建築・都市デザイン専攻