

# 論文 鉄骨コンクリート構造露出型柱脚の復元力特性に関する研究

貞末 和史\*1・赤松 克哉\*2・南 宏一\*3

**要旨：**本研究では、鉄骨コンクリート構造における柱脚の設計法に着目し、鉄骨コンクリート柱と鉄筋コンクリート基礎梁を接合するアンカーボルトあるいは鉄筋を十字形鉄骨の内部のみに配した露出型柱脚について、復元力特性の評価方法を提案した。提案したモデルは、十字形鉄骨の内部にコンクリートが充填されていることで、アンカーボルトあるいは鉄筋が圧縮力に抵抗することを考慮したものであり、実験との比較を行って提案モデルは概ね妥当であることを示した。

**キーワード：**合成構造, 鉄骨コンクリート, 露出型柱脚, 復元力特性

## 1. はじめに

鉄骨とコンクリートを組み合わせた合成構造として、鉄骨コンクリート (SC) 構造の開発が進められている。この構造の柱部材は、**図-1**に示すようにかぶりコンクリートを有しておらず、柱上下端の鉄骨が補強鋼板によって閉断面となっていることに特徴があり、従来型の鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) 構造やコンクリート充填鋼管 (CFT) 構造と同等の構造特性を有していることが実験で確認され、終局耐力の評価方法が提案されている<sup>1)</sup>。

さらに、著者らは SC 構造における柱脚の設計に着目し、**図-2**に示すように柱と基礎梁をアンカーボルトあるいは鉄筋 (以後、アンカーボルトと鉄筋を総称して柱脚接合筋と呼ぶ) を用いて接合する露出型柱脚の構造特性を明らかにするための実験を行って、終局曲げ耐力は累加強度に基づく方法によって妥当に評価できることを確認した<sup>2),3)</sup>。なお、既報で用いた試験体では、柱脚接合筋は鉄骨フランジの内側のみに配置されているが、この場合、フランジの内側に充填されたコンクリートの存在によって、柱脚接合筋は圧縮力を負担できることが確認され、アンカーボルトがベースプレートに先行して降伏する鋼構造露出型柱脚に見られるようなスリップ形の復元力特性が改善されることが明らかとなった。

本論では、柱脚接合筋が柱鉄骨の内側のみに配されている SC 構造露出型柱脚を対象とした復元力特性の評価方法を提案し、既報<sup>2),3)</sup>の実験および本論で新たに行なった実験と提案式による計算値を比較して検証する。

## 2. 復元力特性モデル

アンカーボルトがベースプレートに先行して降伏する鋼構造露出型柱脚の復元力特性の評価方法<sup>4),5)</sup>を参考にして、柱脚接合筋がベースプレートに先行して降伏する SC 構造露出型柱脚の復元力特性の評価式を構築する。ただし、SC 構造露出型柱脚では、柱脚接合筋が圧縮力に抵抗することで、鋼構造露出型柱脚に見られる除荷および再載荷時の荷重変形関係におけるスリップ性状が改善されることを考慮できるモデルとする。また、柱脚接合筋に鉄筋を用いた場合、柱側への定着長さが短いと鉄筋が引張力を受けて降伏する前に付着割裂破壊を生じることがあるが<sup>3)</sup>、提案するモデルでは、鉄筋の付着割裂破壊に対して鉄筋の降伏が先行することを条件とし、さらに、柱脚接合筋の降伏に対して、基礎梁コンクリートのコーン状破壊等が先行しないことを条件とする。

柱脚接合筋にアンカーボルトを用いた場合を例として SC 構造露出型柱脚の抵抗機構を**図-3**に示す。柱脚接合筋は圧縮力を負担せず、また、柱断面の内側に配置されることで**図-3(a)**に示されるように曲げ圧縮側の柱脚接合筋も引張抵抗することを考慮すると、柱脚に作用する曲げモーメント  $M$  と回転角  $\theta$  の関係は、アンカーボルトの伸び縮みによって**図-4(a)**の点線で示される履歴挙動を示し、さらに、ベースプレートやベースプレート下部コンクリートの付加弾性変形 (**図-4(b)**参照) を考慮すると、**図-4(a)**の実線で示される 0→19 の履歴挙動を示すことが知られている<sup>4),5)</sup>。**図-3(b)**に示されるように柱脚接合筋が圧縮力に抵抗する場合も 0→1→2→3→4→19 の

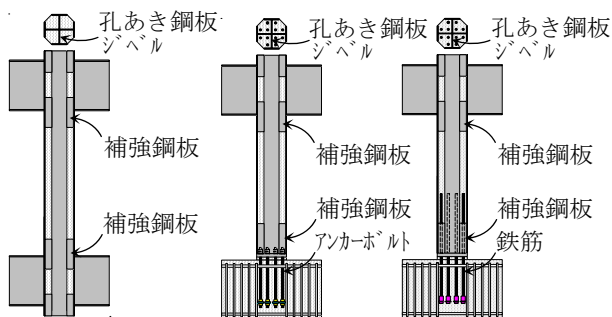


図-1 柱

図-2 露出型柱脚

\*1 広島工業大学 工学部建築工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*2 広島工業大学大学院 工学系研究科建設工学専攻 (学生会員)

\*3 福山大学 名誉教授 工博 (名誉会員)

骨格線は同様に評価できると考えられる。図-4(a)の実線における各特性点の曲げモーメントを以下に示す。

$$M_n = N(d_c - d_t) \quad (1)$$

$$M_y = \sigma_y \cdot A_t \left\{ \frac{d_c^2 + (d_c - 2d_t)^2}{d_c} \right\} \quad (2)$$

(ただし,  $M_y \leq M_u$ )

$$M_u = jM_u + cM_u \quad (3)$$

ここに,  $M_n$  はベースプレートと基礎梁が部分離間する時の曲げモーメントで,  $N$  は軸力(圧縮を正とする),  $d_c$  は曲げ引張側柱脚接合筋からコンクリート部分の圧縮合力点位置までの距離である。 $M_y$  は曲げ引張側柱脚接合筋が引張降伏する時の曲げモーメントで,  $\sigma_y$ ,  $A_t$  および  $d_t$  は柱脚接合筋の降伏応力度, 断面積(曲げ引張側あるいは曲げ圧縮側の片側のみ)および柱断面図心からの距離である。 $M_u$  は柱脚接合筋の終局曲げモーメント  $jM_u$  とベースプレート下部コンクリートの終局曲げモーメント  $cM_u$  を一般化累加して求める柱脚の終局曲げモーメント<sup>3)</sup>である。

なお, 鋼構造のように比較的低下圧縮軸力下で設計が行なわれる場合は, 圧縮合力点位置が圧縮側フランジ外縁にあるとすれば,  $M_n$ ,  $M_y$  を妥当に評価できることが知られているが<sup>5), 6)</sup>, 本論で対象とする試験体<sup>2), 3)</sup>ではベースプレートが厚く, 張り出し長さも短く, 弾性変形が極めて微小となるような形状であるため, 軸力のない場合の圧縮合力点位置は図-3(a)に示されるように圧縮側ベースプレート外縁にあるとする。ただし, SC 構造では CFT 構造と同様に高圧縮軸力を受ける場合を想定して, 軸力を受ける場合は, 圧縮合力点位置が柱図心側に移動することを考慮できる下式を用いて評価する。

$$d_c = \frac{M_u + N \cdot d_t}{\sigma_y \cdot A_t + N} \quad (4)$$

(ただし,  $d_c > 0, N > 0$ )

(4)式は高圧縮軸力を受ける鋼構造露出型柱脚に対して誘導された  $d_c$  の算定式<sup>5)</sup>を基にしており, 曲げ圧縮側の柱脚接合筋の影響を考慮していないが, 中立軸が曲げ圧縮側の柱脚接合筋の近傍にある場合は曲げ圧縮側の柱脚接合筋の負担軸力は小さく, コンクリートの圧縮合力点位置に与える影響は小さいと考えられる。また, 中立軸が曲げ引張側の柱脚接合筋の近傍となるような高圧縮軸力下でも, コンクリート部分の負担圧縮軸力に対して柱脚接合筋の負担圧縮軸力は小さく, コンクリートの圧縮合力点位置に与える影響は小さいと考えられるため,  $d_c$  の算定では曲げ圧縮側の柱脚接合筋の影響は無視した。

$M-\theta_B$  関係の骨格線の計算に必要な剛性  $K_A$ ,  $K_B$  および  $K_C$  の評価は, 文献<sup>5)</sup>に示される評価式を基にして, アンカーボルトの初期張力による影響を無視し, 曲げ圧縮側の柱脚接合筋が引張あるいは圧縮抵抗する場合があることを考慮した下式を用いる。

$jT$  および  $jC$ : 柱脚接合筋の引張力および圧縮力  
 $cC$ : コンクリート部分の圧縮合力

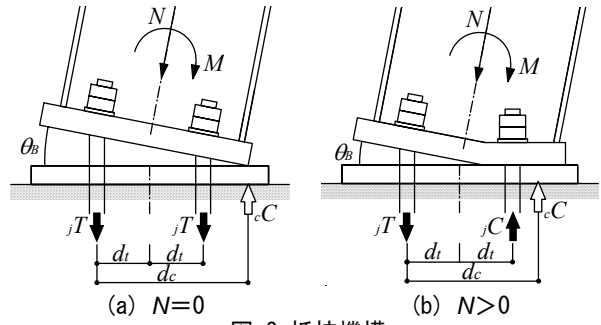
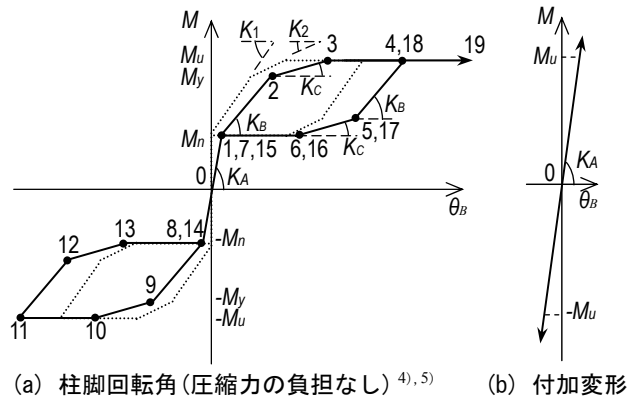
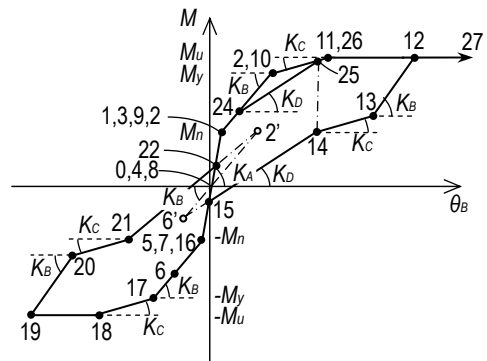


図-3 抵抗機構



(a) 柱脚回転角(圧縮力の負担なし)<sup>4), 5)</sup> (b) 付加変形



(c) 柱脚回転角(圧縮力の負担あり)

図-4 復元力特性モデル

$$K_A = \frac{1}{R-1} \left\{ 1 + \frac{N}{\sigma_y \cdot A_t} \frac{(d_c - d_t)d_c}{d_c^2 + (d_c - 2d_t)^2} \right\} K_1 \quad (5)$$

$$K_B = \frac{K_A \cdot K_1}{K_A + K_1} \quad (6)$$

$$K_C = \frac{K_A \cdot K_2}{K_A + K_2} \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{E \cdot A_t}{el} \{ d_c^2 + (d_c - 2d_t)^2 \} \quad (8)$$

$$K_2 = \frac{E \cdot A_t}{el} (d_c - 2d_t)^2 \quad (9)$$

ここに、 $R$  はベースプレートやベースプレート下部コンクリートの付加弾性変形に起因する弾性回転剛性補正係数、 $E$  および  $l$  は引張力を受ける柱脚接合筋のヤング係数および有効定着長さである。

$l$  に関しては、柱脚接合筋の種類および付着の有無に応じて材軸方向のひずみ度分布を図-5 に示すようにモデル化する。なお、柱脚接合筋に鉄筋を用いる柱脚に関しては、RC 基礎梁内への鉄筋の定着について、コンクリートとの付着を絶縁する場合と絶縁しない場合のそれぞれを想定している。

柱脚接合筋に鉄筋を用いる柱脚に関しては、コンクリートに埋込まれた鉄筋が引抜き力を受ける場合、鉄筋径の25倍程度まではほぼ図-5(b)、(c)に示されるようなひずみ度分布を示すことが報告されているため<sup>7)</sup>、コンクリートとの付着を有している鉄筋部分の  $cl$  と  $cbl$  に関しては頭打ちを設けて下式を用いて評価する。

アンカーボルト(アンボンド)の場合

$$el = cbl \quad (10)$$

鉄筋(アンボンド)の場合

$$el = \frac{1}{2} cl + cbl \quad (cl \leq 25rd) \quad (11)$$

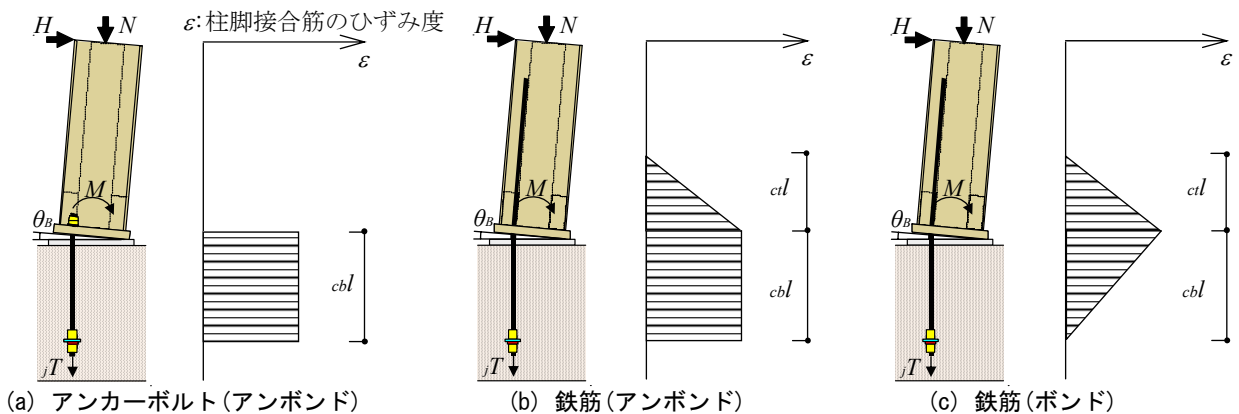


図-5 柱脚接合筋の有効定着長さ

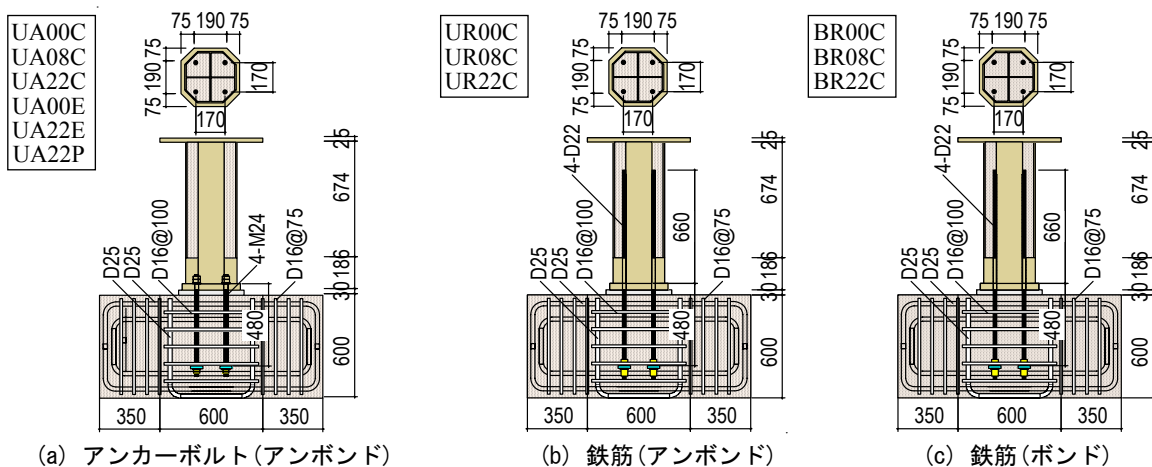


図-6 試験体形状

鉄筋(ボンド)の場合

$$el = \frac{1}{2} cl + \frac{1}{2} cbl \quad (cl \leq 25rd, cbl \leq 25rd) \quad (12)$$

ここに、 $cbl$  は基礎梁側への柱脚接合筋の定着長さ、 $cl$  は柱側への鉄筋の定着長さ、 $rd$  は鉄筋の直径である。

除荷および再載荷に関しては、作用する曲げモーメントが  $-M_f \leq M \leq M_f$  の弾性域であれば、図-4(c)の0→10の弾性挙動を示すものとする。それ以後、塑性化して10→12の履歴を辿った後に曲げモーメントが反転する場合、柱脚接合筋が圧縮力を負担することでスリップ性状が改善されることを考慮して、直前の反サイクルが弾性域にある場合は12→19の履歴を辿るものとする。さらに、再び曲げモーメントが反転して、直前の反サイクルまでに塑性域に達していれば19→27の履歴を辿るものとする。なお、14→15および21→22を指向する際の6'点および2'点に関しては、0-6'と5-6、0-2'と1-2がそれぞれ同じ長さと同勾配を有するものとして定まるものとする。

### 3. 実験概要

提案したSC構造露出型柱脚の復元力特性の評価方法の妥当性は実験との比較を行って検証する。本章では、

対象とする既報<sup>2),3)</sup>で行った実験の概要および本論において新たに行った実験について述べる。

### 3.1 既往の実験<sup>2),3)</sup>

試験体の形状を図-6に示す。試験体は片持ち柱型の形状であり、図-7に示されるように試験体の頂部にピンを設けて載荷装置と接続し、ピン位置に鉛直荷重 $N$ (=軸力)と水平力 $H$ を作用させることで柱脚に軸力 $N$ と曲げモーメント $M$ を与えている。実験変数は軸力の大きさ、柱脚接合筋の種類(アンカーボルトあるいは鉄筋)および鉄

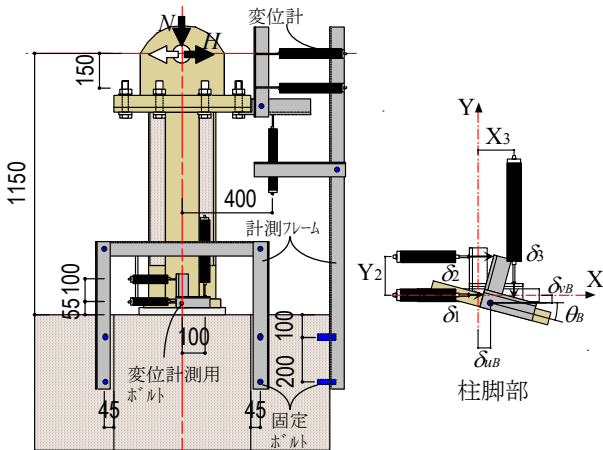


図-7 加力位置と変位計測 (単位:mm)

表-1 試験体計画

試験体	軸力 $N$ (kN)	柱脚接合筋			断面強度	
		鉄筋	アンカーボルト	付着	$N_{cu}$ (kN)	$N_{tu}$ (kN)
UA00C	0	-	4-M24	アン ボンド	3280	-501
UA08C	724	-	ABR490B		3329	-508
UA22C	1887	-	-		3890	-609
UR00C	0	4-D22	-	ボンド	3918	-589
UR08C	724				3890	-609
UR22C	1887				3918	-589
BR00C	0	SD345	-	ボンド	3890	-609
BR08C	724				3918	-589
BR22C	1887				3918	-589

注)  $N_{cu} = cN_{cu} + jN_{cu}$ ,  $N_{tu} = jN_{tu}$

ここに、 $cN_{cu}$ はコンクリート部分の圧縮耐力、 $jN_{cu}$ と $jN_{tu}$ は柱脚接合筋の圧縮耐力と引張耐力(ただし、アンカーボルトの $jN_{cu}$ は0)であり、各材料強度に基づいて計算された値である。

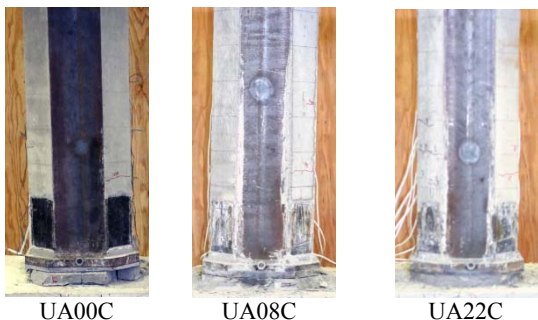


写真-1 最終破壊状況

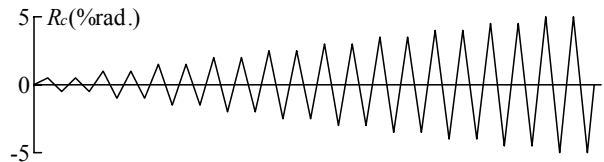


図-8 載荷履歴

筋の基礎梁内での付着の有無として計画されており、写真-1に示されるようにベースプレートより上部部分の柱の破壊に対して柱脚の破壊が先行した9体(表-1参照)を解析対象として選定した。

対象とする試験体は、各試験体とも柱鉄骨に2H-300×150×6.5×9の充腹型H形鋼による十字形鉄骨が用いられており、柱および基礎梁コンクリートの設計基準強度 $F_c$ は30N/mm<sup>2</sup>で、ベースプレート下面と基礎梁上面の間に30mmのグラウト幅が設けられ無収縮モルタルが充填されている。また、柱脚接合筋の下端には定着板が設けられ、基礎梁への定着長さ $cbl$ は480mmとなっている。ベースプレートは曲げ降伏しない厚さ(36mm)であり、補強鋼板(厚さ6mm)は十字形鉄骨に隅肉溶接されている。各材料強度は既報<sup>2),3)</sup>に示されている。

変位の計測は図-7に示されるように変位計を取付け、これらの測定値に基づく幾何学的な関係より柱頭ピン中心とベースプレート中心の水平変位( $\delta_{uc}$ ,  $\delta_{ub}$ )、軸方向変位( $\delta_{vc}$ ,  $\delta_{vb}$ )および回転角( $\theta_{bc}$ ,  $\theta_b$ )が算定されている。

載荷は所定の軸力を導入後、試験体頂部のピンの位置に正負繰り返しの漸増水平載荷が行われている。載荷履歴は試験体頂部ピン位置での水平方向の変位制御によって、柱部材角 $R_c$ (柱頭ピン位置の水平変位 $\delta_{uc}$ /せん断スパン $l$ ) $=\pm 0.5\%$ rad.で正負繰り返し載荷が2回行われた後、直前の振幅に対して $\pm 0.5\%$ rad.  $R_c$ を漸増させる正負繰り返し載荷が $R_c = \pm 5.0\%$ rad.まで2回ずつ繰り返されている。載荷履歴を図-8に示す。

### 3.2 追加の実験

提案する復元力特性モデルでは、骨格曲線は明確な抵抗機構に基づいてモデル化しているものの、除荷および再載荷部分については、各特性点と抵抗機構の関係を明確にしていなかったため、種々の載荷履歴に対して妥当に対応するか不明である。そこで、既報<sup>2),3)</sup>で行った実験に加えて、載荷履歴を変数とした新たな実験を計画した。

試験体は図-6(a)に示されるアンカーボルトを用いた露出型柱脚と同一形状の試験体を3体製作し、載荷履歴と軸力の有無を変数とした。試験体計画を表-2、載荷履歴を図-9に示す。載荷履歴Eは負側の振幅を $\theta_b = -0.25\%$ rad.で一定とし、正側方向へは $\theta_b = 5.0\%$ rad.まで漸増載荷した。載荷履歴Pは $\theta_b = \pm 1.0\%$ rad.まで正負両方向対象に漸増載荷後、負側の振幅を $\theta_b = -1.0\%$ rad.で一定とし、正側方向へは $\theta_b = 5.0\%$ rad.まで漸増載荷を行った。既



表-2 試験体計画

試験体	軸力 $N$ (kN)	柱脚接合筋		断面強度		載荷履歴
		アンカーボルト	付着	$N_{cu}$ (kN)	$N_{tu}$ (kN)	
UA00E	0	4-M24 ABR490B	アン ボルト	7753	-528	E
UA18E	1400					P
UA18P						



(a) 載荷履歴 E



(b) 載荷履歴 P

図-9 載荷履歴

表-3 コンクリートの材料強度

	圧縮 ( $N/mm^2$ )	割裂強度 ( $N/mm^2$ )	ヤング係数 ( $N/mm^2$ )
柱	37.7	2.97	29437
基礎梁	33.8	3.24	34298
無収縮モルタル	74.3	5.03	29900

表-4 鋼材の材料強度

	降伏強度 ( $N/mm^2$ )	引張強度 ( $N/mm^2$ )	伸び (%)
鉄骨フランジ	292	426	26.9
鉄骨ウェブ	315	426	26.9
補強鋼板	334	455	29.0
ベースプレート	342	536	26.0
アンカーボルト	352	548	26.8

報<sup>2),3)</sup>の実験では正負両方向対称に振幅を漸増させているのに対して、本論で新たに行った実験では片側方向にシフトして振幅を漸増させる載荷履歴とした。試験体に用いた材料試験結果を表-3、表-4に示す。

載荷および変位の計測は3.1項と同様の方法によるが、変位制御は柱脚の回転角 $\theta_B$ で行った。

各試験体の最終破壊状況を写真-2に示す。いずれの試験体ともベースプレートより上部部分の損傷に対してベースプレート下面部分の損傷が大きく、ひずみゲージよりアンカーボルトが降伏していることが確認された。

軸力 $N$ と曲げモーメント $M$ の相関関係を図-10に示す。実線で示される柱脚断面の計算値は既報<sup>2),3)</sup>で示した $jMu$ と $cMu$ を一般化累加した値、点線で示される柱断面の計算値は鉄骨の終局曲げ耐力 $sMu$ と $cMu$ を一般化累加した値である。圧縮軸力下の試験体については、安全側の評価となっているが、実験値との対応は概ね良好であることがわかる。

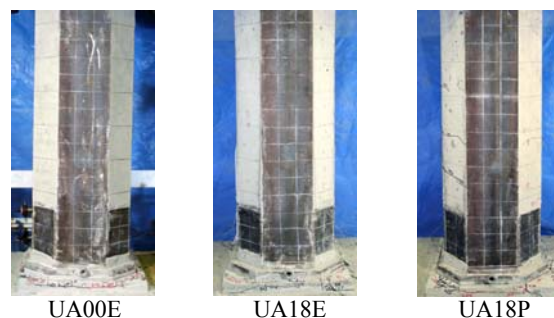


写真-2 最終破壊状況

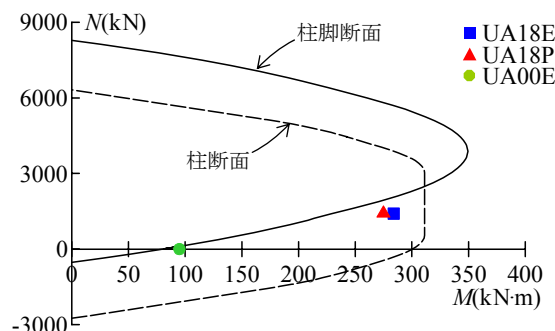


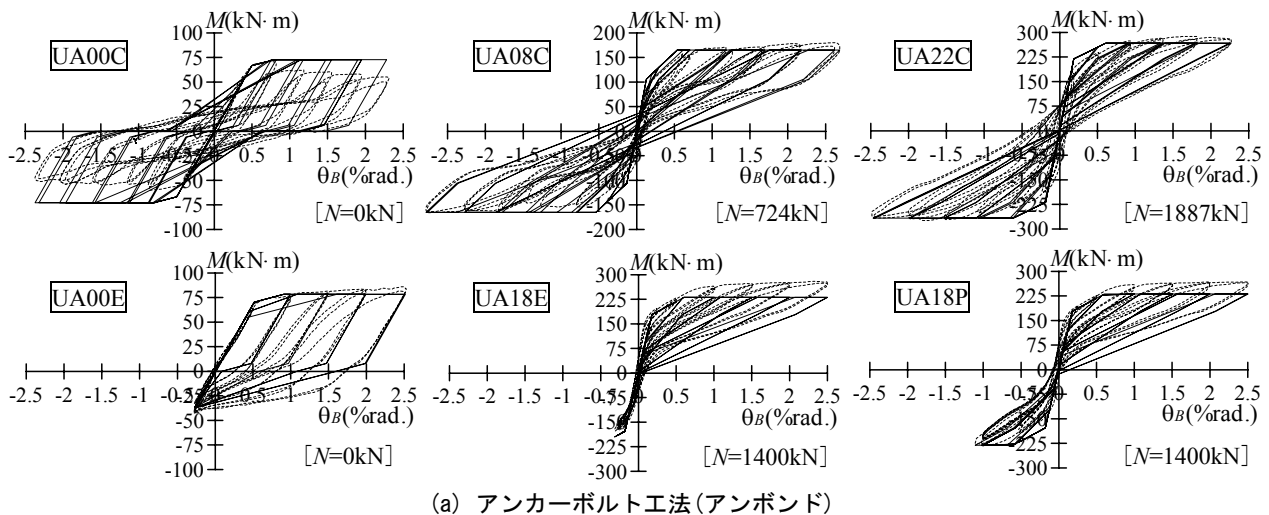
図-10 M-N 相関関係

#### 4. 復元力特性の計算値と実験値の比較

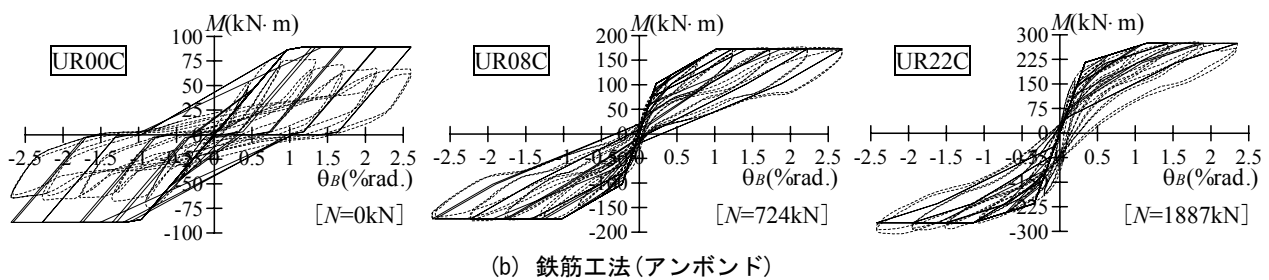
実験値を点線、計算値を実線とした $M-\theta_B$ 関係を図-11に示す。実験値と計算値との比較は $\theta_B = \pm 2.5\%$ の範囲における $M-\theta_B$ 関係を示した。初期剛性の評価に関する弾性回転剛性補正係数 $R$ は、鋼構造接合部設計指針<sup>8)</sup>やコンクリート充填鋼管構造設計施工指針<sup>6)</sup>では2.0とされているが、 $R$ はベースプレートやベースプレート下部コンクリートの付加弾性変形に起因するものであるため、本来は使用材料や形状によって異なる値である。本論では、各試験体について、 $\theta_B = 0.25\%$ での実験値と計算値が一致する値として $R$ を同定すると1.09~1.97となり、平均値は $R = 1.60$ となった。図-11では全て $R = 1.60$ として計算した値を示した。

初期剛性の実験値と計算値が一致する $R$ の値に1.09~1.97の幅があるのに対して、図-11に示した計算値は全て $R = 1.60$ として算定しているため、初期剛性および除荷剛性の実験値と計算値に差異を生じている試験体がある。また、実験で最大耐力以降に耐力低下を生じている試験体についても実験値と計算値の差異が大きくなっている試験体がある。耐力低下を生じている実験は、アンカーボルト直上の局所的なコンクリートの支圧破壊の進行および鉄筋とコンクリートの付着力の喪失によって、繰返し載荷時に柱脚接合筋に圧縮力が伝達されにくくなるものが影響していると考えられる。

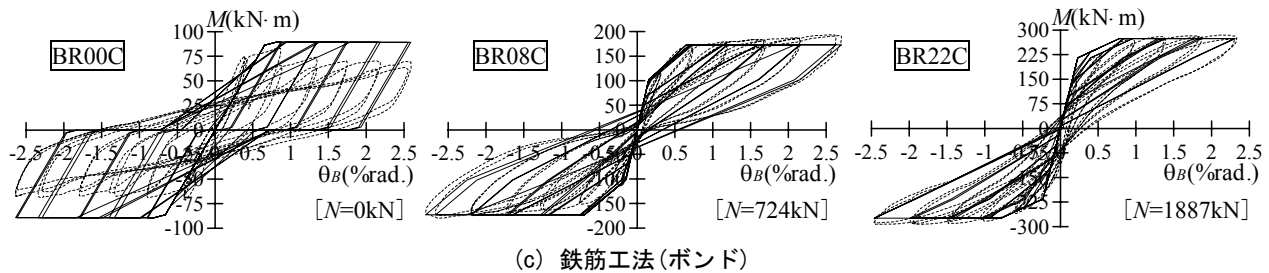
$R$ の値の評価と最大耐力以降の耐力低下を生じる場合について課題が残されるが、大局的には実験値と計算値の対応は良好である。



(a) アンカーボルト工法(アンボンド)



(b) 鉄筋工法(アンボンド)



(c) 鉄筋工法(ボンド)

図-11 M- $\theta_B$ 関係

## 5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

- 1) アンカーボルトあるいは鉄筋を十字形鉄骨の内部のみに配した鉄骨コンクリート構造露出型柱脚の復元力特性の評価方法を提案した。
- 2) 提案した復元力特性の評価方法による計算値と、既往の研究における実験値および本論において新たに行った実験値との対応は概ね良好である。

## 参考文献

- 1) 福原実苗, 藤井英希, 南宏一: 新形式の鉄骨コンクリート柱の開発研究, 構造工学論文集, Vol.54B, pp.471-478, 2008.3
- 2) 赤松克哉, 貞末和史, 南宏一: 鉄骨コンクリート構造非埋込み形柱脚の力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No.2, pp.1189-1194, 2011.7
- 3) 赤松克哉, 貞末和史, 南宏一: 変動軸力下における鉄骨コンクリート構造露出型柱脚の力学特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.34, No.2, pp.1207-1212, 2012.6
- 4) 秋山宏: 鉄骨柱脚の耐震設計, 技報堂, pp.20-30, 1985.3
- 5) 玉井宏章, 山西央郎, 白木剛, 高松隆夫, 松尾彰: アンカーボルト初期張力や柱軸力の効果を考慮した平面露出柱脚簡易解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第628号, pp.991-997, 2008.6
- 6) 日本建築学会: コンクリート充填鋼管構造設計施工指針, 2008.10
- 7) Ronald A. Cook, Jacob Kunz, Werner Fuchs, and Robert C. Konz: Behavior and Design of Single Adhesive Anchors under Tensile Load in Uncracked Concrete, ACI Structural Journal, Vol.95, No.1, pp.9-26, 1998.1
- 8) 日本建築学会: 鋼構造接合部設計指針, 2008.10