

論文 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

赤松 克哉^{*1}・貞末 和史^{*2}・南 宏一^{*3}

要旨：従来型の鉄骨鉄筋コンクリート構造に代わる新たな合成構造として、十字型鉄骨の内部のみにコンクリートを充填した鉄骨コンクリート構造の開発が進められている。本研究では、変動軸力下および無軸力下において鉄骨コンクリート構造の柱脚に繰返し曲げモーメントを作用させる実験を行い、終局曲げモーメントはアンカーボルトあるいは異形鉄筋とベースプレート下部のコンクリートの累加強度によって評価できることを確認した。さらに、アンカーボルトあるいは異形鉄筋の材軸方向におけるひずみ度分布をモデル化して構築した曲げ剛性評価式を用いることで、柱脚の回転剛性を妥当に評価できることを確認した。

キーワード：合成構造、露出型柱脚、終局曲げ耐力、変動軸力、曲げ剛性

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）構造や鋼とコンクリートを組み合わせた合成構造が優れた力学特性を有していることは、これまでの研究や地震災害の経験により実証されている。しかしながら、昨今の建設コスト状況を反映して、中高層建築の構造形式には鉄筋コンクリート（RC）構造が多用されている。これらを背景として、SRC、RC 構造と対比させる新型構造として、鉄骨コンクリート（SC）構造の開発が進められている。この構造システムにおける一般階の柱は、単に SRC 部材から鉄筋を抜いた構造とするのではなく、図-1 に示すように、i) かぶりコンクリートを有さず剥離による耐力低下を防ぐ、ii) 鉄骨ウェブに孔あき鋼板ジベルを設け鉄骨とコンクリートの一体性を図る、iii) 柱上下端の鉄骨は補強鋼板により閉鎖箱型断面を形成し材端コンクリートを拘束する、等の特徴を有することで力学特性の向上を図っており、従来型の SRC 構造に劣らない構造性能を有していることが確認されている¹⁾。本研究では図-2 に示すような

基礎梁を RC 構造、柱を SC 構造とした露出型柱脚の力学特性を調べるための実験を行う。柱と基礎梁を接続する方法としては、アンカーボルトおよび異形鉄筋を用いた構法を考案しており、既往の研究²⁾では圧縮軸力比を変数として一定圧縮軸力下において柱脚に繰返し曲げモーメントを作用させる実験を行い、終局曲げモーメントはアンカーボルトあるいは異形鉄筋とベースプレート下部のコンクリートの累加強度によって評価できることを確認した。今後の SC 構造の設計法の確立に向けて、本研究では、変動軸力下と無軸力下における露出型柱脚の力学特性を調べるための実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、露出型柱脚を有する最下層階の柱を想定した試験体 6 体とした。試験体形状を図-3 に示す。試験体は片持ち柱形で、頂部にピンを設けて載荷装置と接続する。柱脚接合筋の種類（アンカーボルトおよび異形鉄筋）、基礎梁内における異形鉄筋の付着の有無（ボンダタイプおよびアンボンダタイプ）を実験変数として計画した。アンボンダタイプは基礎梁内に埋め込まれた部分に厚紙を巻き、その上にビニールテープを巻き付けコンクリートとの付着を除いている。試験体計画を表-1 に示す。シリーズ I では、建物 1 階最下層階における側柱を想定した変動軸力を受ける試験体、シリーズ II では、軸力を与えない試験体とした。

鋼材とコンクリートの材料強度を表-2、表-3 にそれぞれ示す。各試験体とも柱鉄骨には 2H-300×150×6.5×9 の充腹形 H 形鋼（SN400B）による十字型鉄骨を用いており、柱と基礎梁コンクリートの設計基準強度 F_c は

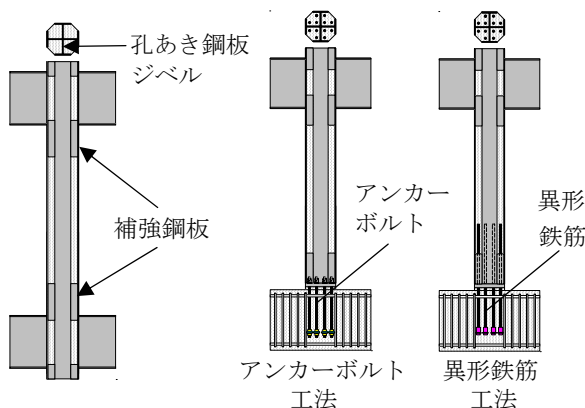


図-1 一般階の柱

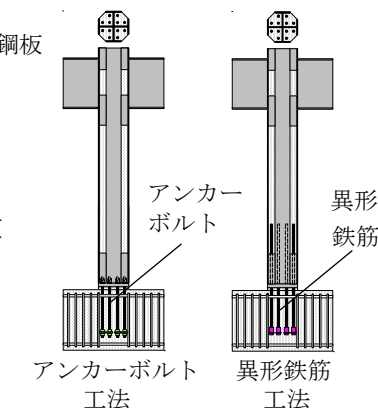


図-2 柱脚を有する最下層階の柱

*1 広島工業大学大学院 工学系研究科建設工学専攻博士前期課程（正会員）

*2 広島工業大学 工学部建築工学科准教授 博士(工学)（正会員）

*3 福山大学 名誉教授 工博（名誉会員）

表一1 試験体計画

試験体名	圧縮軸力 N (kN)	軸力比	柱脚断面		柱脚接合筋			柱鉄骨 サイズ	シリーズ	
			cbN_{cu} (kN)	cbN_{tu} (kN)	アンカー ボルト	異形 鉄筋	付着			
UA37V	774～3000	$cbn=0.10\sim0.37$	8086	-536	4-M24 (ABR490)	—	アンボンド	2H- 300×150×6.5×9 (SN400B)	I	
UA00C	0	$cbn=0$	8222	-517					II	
UR37V	774～3000	$cbn=0.09\sim0.37$	8151	-600	—	4-D22 (SD345)			ボンド	I
UR00C	0	$cbn=0$	8314	-609						II
BR37V	774～3000	$cbn=0.09\sim0.37$	8151	-600			I			
BR00C	0	$cbn=0$	8314	-609			II			

軸力比

$$cbn = N / cbN_{cu}$$

表-2 鋼材の材料強度

使用箇所	シリーズⅠ				シリーズⅡ			
	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 ×10 ³ (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 ×10 ³ (N/mm ²)
PL-9(SN400B) フランジ	292	426	26.9	244	292	426	26.9	244
PL-6.5(SN400B) ウェブ	315	426	26.9	204	315	426	26.9	204
PL-6(SS400) 補強鋼板	334	455	29.0	—	334	455	29.0	—
PL-36(SN490B) ベースプレート	342	536	26.0	—	342	536	26.0	—
M24(ABR490B) アンカーボルト	346	521	24.7	198	334	523	29.1	201
D22(SD345) 異形鉄筋	388	564	22.4	191	394	570	23.5	192
D25(SD345) 主筋	356	541	22.5	208	362	563	18.5	196
D16(SD345) あばら筋	364	543	20.4	177	368	552	17.5	181

表-3 コンクリートの材料強度

使用箇所	シリーズⅠ			シリーズⅡ		
	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ³ (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ×10 ³ (N/mm ²)
柱	33.1	3.17	29.3	30.3	2.76	29.7
基礎梁	38.9	3.28	30.1	31.4	2.64	30.1
無収縮モルタル	72.4	4.90	30.5	73.8	4.87	28.4

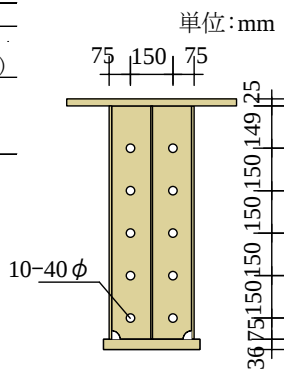


図-4 孔あき位置

30N/mm²とし、ベースプレート下面と基礎梁上面の間に30mmのグラウト幅を設け、無収縮モルタルを充填した。柱脚接合筋の基礎梁への定着長さは480mmとし、ベースプレートは柱鉄骨と柱脚接合筋の引張力によって生じる曲げモーメントに対して曲げ降伏しない厚さ(36mm)とした。補強鋼板(厚さ6mm)は十字型鉄骨フランジに隅肉溶接した。鉄骨とコンクリートの一体性を図るために設ける孔あき鋼板ジベルとして、図-4に示すように柱全長に150mm間隔で鉄骨ウェブ部分に40φの孔を開けた。

2.2 載荷方法

載荷は図-5 に示す 2 軸載荷装置を使用し、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を行う。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り、柱部材角 R (柱頭ピン位置の水平変位/せん断スパン) = $\pm 0.50\%$ rad. で正負繰り返し載荷を 2 回行った後、その後 $\pm 0.50\%$ rad. ほどの漸増正負繰り返し載荷を $R = \pm 5.00\%$ rad. まで 2 回ずつ繰り返して終了した。

シリーズ I の試験体は最下層階側柱を想定して軸力が変動することを考慮した載荷実験を行った。変動軸力は文献²⁾で行なった一定圧縮下の実験の軸力 $N=1887\text{kN}$ を長期軸力 N_0 とし、軸力の最大圧縮軸力 N_{max} を載荷装

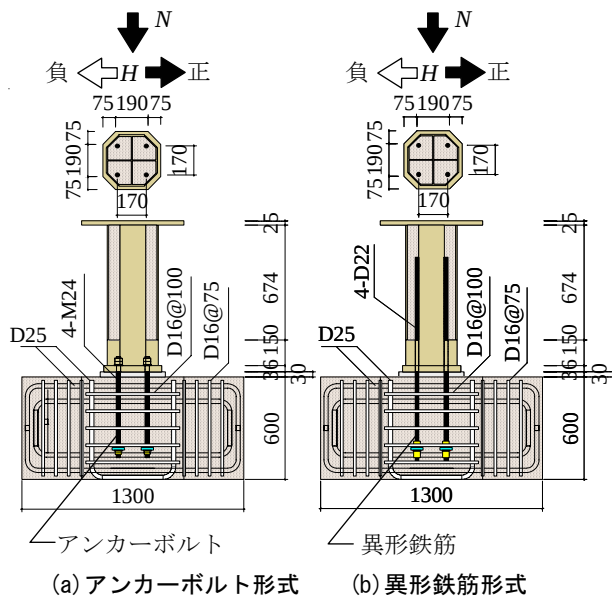


図-3 試験体形状

置の最大出力 3000kN とし、軸力の変動量を正負で同等にするよう最小軸力 N_{min} を 774kN とした。水平力 H の正側載荷では 3000kN の圧縮軸力を、水平力 H の負側載荷では 774kN の圧縮力軸力を水平力除荷完了時に軸力を調整した。実構造物における柱の軸力変動は作用するせん断力と常に連動することが推察されるが、本実験では水平力載荷中は軸力を一定としており、水平力の正負の

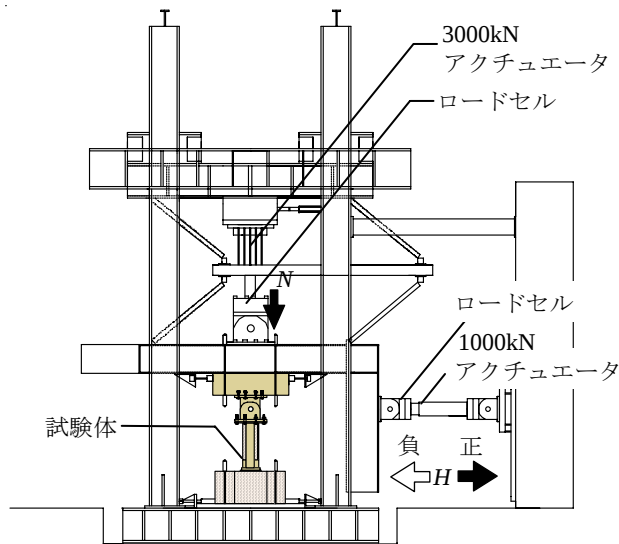


図-5 載荷装置

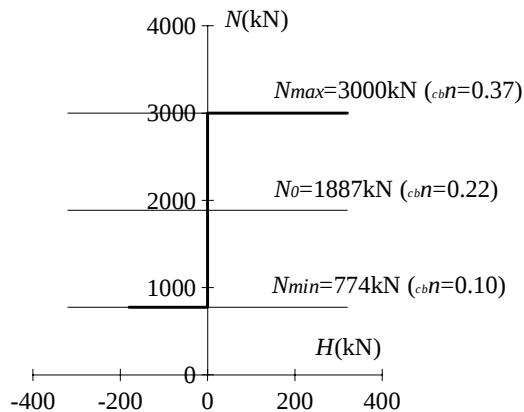


図-6 軸力載荷

載荷で作用軸力が異なる変動軸力とした。実構造物より厳しい載荷条件下にあると考えており、載荷の簡便さから図-6に示すような軸力載荷とした。

さらに、シリーズⅡの試験体では基礎的研究として無軸力下における載荷実験を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

最終破壊状況を写真-1に示す。

シリーズⅠの試験体 UA37V, BR37V, UR37V はいずれもベースプレート下部コンクリート（無収縮モルタル部分）は圧壊を生じ、柱脚接合筋は最大耐力時には曲げ引張側で引張降伏していた。柱のコンクリートは正荷重時に曲げ圧縮を受ける側でコンクリートが大きく損傷し、異形鉄筋形式 UR37V, BR37V においては鉄骨柱内に埋め込まれた異形鉄筋が目視されるほど損傷していた。また、鉄骨フランジは圧縮降伏しており補強鋼板上端の位置で局部座屈を生じていた。一方、負荷重時に曲げ圧縮を受ける側ではいずれも柱のコンクリートの損傷は小さく鉄骨フランジも圧縮降伏していないことが確認された。

シリーズⅡの試験体 UA00C, UR00C, BR00C はいずれもベースプレート下部コンクリート（無収縮モルタル部分）は圧壊を生じ、柱脚接合筋は最大耐力時には曲げ引張側で引張降伏していた。しかし、柱のコンクリートの損傷は小さく、鉄骨フランジは引張・圧縮共に降伏していないことが確認された。

3.2 ひずみ度分布

各試験体について、柱脚接合筋と柱鉄骨の材軸方向におけるひずみ度 ε の分布を図-7に示す。シリーズⅠでは軸力 N_{max} 時、 $R=0.20\%rad$.および $R=0.25\%rad$.時の正載荷時に曲げ引張を受ける側の ε の分布を、シリーズⅡでは $R=0.20\%rad$.および $R=0.25\%rad$.時の正載荷時に曲げ引張を受ける側の ε の分布をそれぞれ示す。

シリーズⅡの試験体について、アンボンドタイプの試験体 UA00C, UR00C は基礎梁内において一様なひずみ



UA37V

BR37V

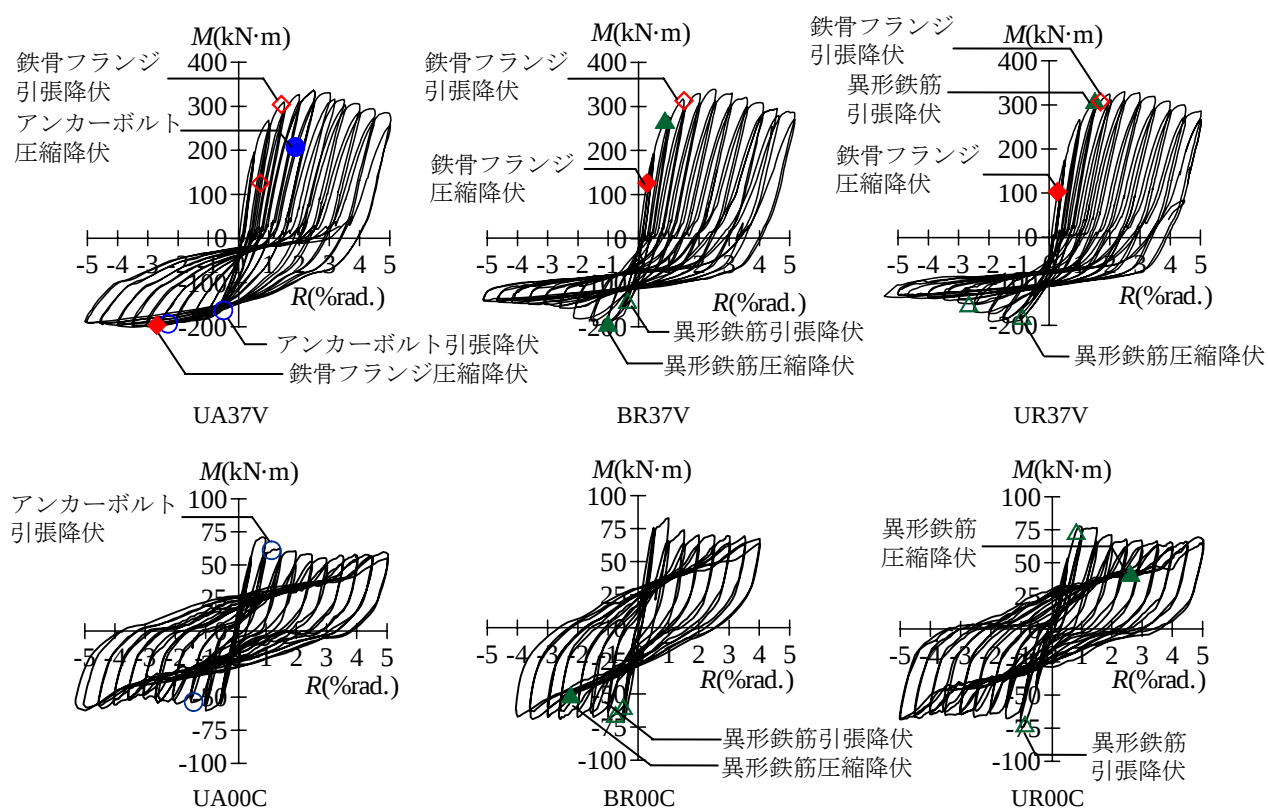
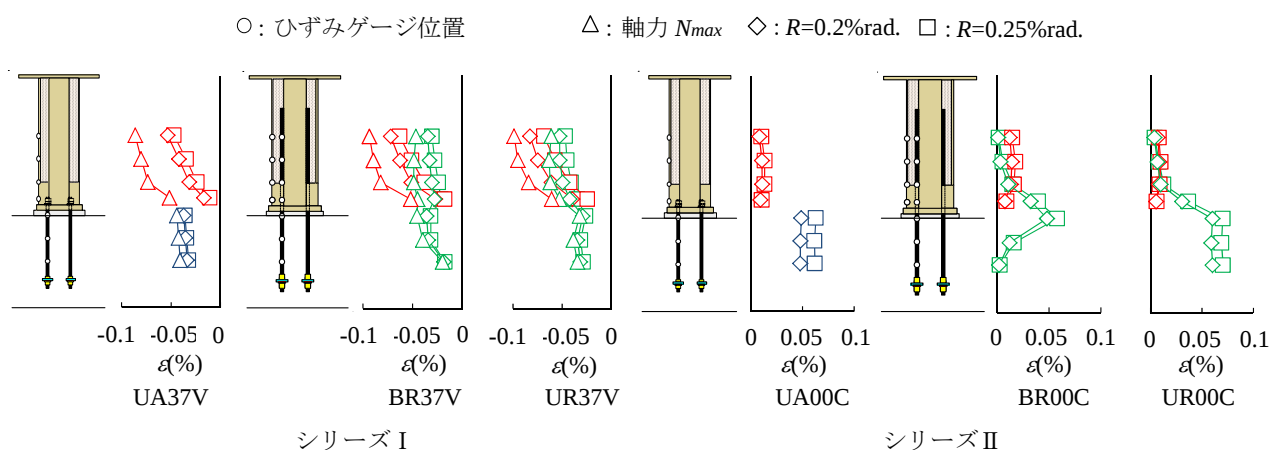
UR37V

UA00C

BR00C

UR00C

写真-1 最終破壊状況



度を示していた。ボンドタイプの試験体 BR00C は基礎梁と柱の境目でひずみ度が大きくなっていた。

柱鉄骨はどの試験体もほぼ様なひずみ度を示しており、補強鋼板を取り付けている位置ではひずみ度が小さかった。

シリーズⅠの試験体について、軸力が作用することで柱脚接合筋は圧縮ひずみを示しており、柱に充填されたコンクリートによって柱脚接合筋に圧縮力が伝達されていることが確認された。柱鉄骨も軸力が導入されることで圧縮ひずみを示していたが、補強鋼板を取り付けた位置では取り付けていない位置と比べて圧縮ひずみ度は小さかった。また、 $R=0.20\text{rad}$.および $R=0.25\text{rad}$.時では

シリーズⅡと同様のひずみ度を示していた。

3.3 荷重一変位関係

各試験体の M - R 関係の履歴曲線を図-8 に示す。縦軸は柱脚に作用する曲げモーメント M 、横軸は柱部材角 R としている。

シリーズⅠについて、正載荷側ではどの試験体も $R=2.0\%$ rad. 付近で最大耐力に達し、それ以降は緩やかに耐力は低下していた。

負荷荷側では、柱脚接合筋にアンカーボルトを使用した試験体 UA37V は $R=-5.0\%$ rad.まで耐力は上昇したが、異形鉄筋を使用した試験体 UR37V, BR37Vは $R=-2.0\%$ rad.付近で最大耐力に達し、その後耐力は大きく低下してい

った。これは、写真－1 に示されるように柱コンクリートが大きく損傷し、異形鉄筋が付着劣化を生じて曲げ引張に抵抗できなくなることが影響していると推察される。一方、アンカーボルトを使用した試験体はベースプレートとアンカーボルトのナットにより曲げに抵抗するため写真－1 のように柱のコンクリートが損傷しても耐力低下を生じなかったものと推察される。

柱脚接合筋の違いで比較した場合、アンカーボルトを使用した試験体は異形鉄筋を使用した試験体より最大耐力以降の耐力低下が小さく履歴ループは膨らみ、エネルギー吸収能力が大きいことが確認された。

異形鉄筋の付着の有無で比較をすると、最大耐力はほぼ同じとなり、履歴ループの形状に大きな違いは見られなかった。

シリーズⅡについて、BR00C の試験体は $R=-4.0\%$ rad. 以降において、载荷装置の制御に不備があり、所定の変形量を超えてしまったため $R=4.0\%$ rad. までしか計測できなかった。

いずれの試験体も $R=1.0\%$ rad. 付近で最大耐力に達し、その後緩やかに耐力低下していったが、UA00C, UR00C は $R=4.0\%$ rad. あたりから再び耐力が上昇した。これは柱脚接合筋のひずみ硬化による影響と推察される。

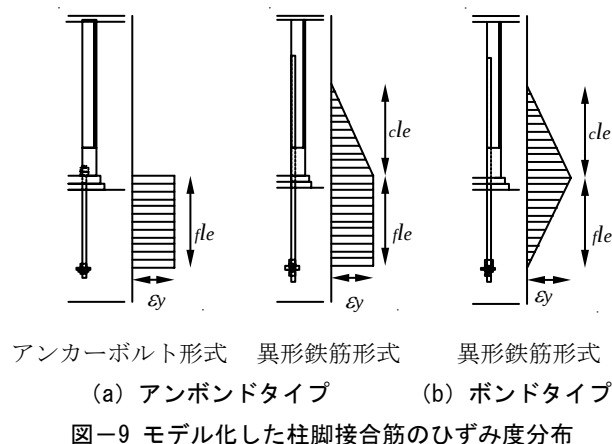
柱脚接合筋の違いで比較をすると、履歴の形状に大きな違いは見られなかったが、異形鉄筋を使用した試験体のほうが最大耐力は大きくなった。

異形鉄筋の付着の有無で比較をすると、ボンドタイプの試験体のほうが若干履歴ループが膨らんでいた。

4. 初期剛性の評価

本研究では、図－7 に示した柱脚接合筋のひずみ度分布を図－9 に示すようにモデル化することで柱脚接合筋の伸び量を算出し曲げ剛性を求めるものとした。

アンボンドタイプの試験体は、柱脚接合筋のひずみ度は基礎梁内で一様なひずみ度分布を示すので図－9 (a) のようなモデルになる。



一方、ボンドタイプの試験体は、柱脚接合筋のひずみ度分布は柱脚部で最大となり、ひずみは三角形分布を示すため図－9 (b) のようになる。

また、柱脚接合筋に異形鉄筋を使用した試験体は柱内にも鉄筋が存在し、柱内の異形鉄筋のひずみ度は三角形分布を示す。

降伏時におけるアンカーボルト、異形鉄筋（ボンド、アンボンド）の伸び量 $UA\delta$, $BR\delta$, $UR\delta$ はそれぞれ次のような式になる。

$$UA\delta = \varepsilon_y \cdot f_l e \quad (1)$$

$$BR\delta = \frac{1}{2} \varepsilon_y \cdot f_l e + \frac{1}{2} \varepsilon_y \cdot c_l e = \frac{1}{2} \varepsilon_y (f_l e + c_l e) \quad (2)$$

$$UR\delta = \varepsilon_y \cdot f_l e + \frac{1}{2} \varepsilon_y \cdot c_l e = \frac{1}{2} \varepsilon_y (2f_l e + c_l e) \quad (3)$$

ここに、 ε_y は降伏ひずみ度、 $f_l e$ は基礎梁内への柱脚接合筋の埋め込み長さで $f_l e = 20d$, $c_l e$ は柱内への柱脚接合筋の埋め込み長さで $c_l e = 20d$ とする。 d は柱脚接合筋径である。

式 (1)、式 (2)、式 (3) からアンカーボルト形式、異形鉄筋形式（ボンド、アンボンド）の曲げ剛性 $UA K$, $BR K$, $UR K$ はそれぞれ以下のような式になる。

$$UA K = \frac{n \cdot E \cdot A \cdot d_t^2}{f_l e} \quad (4)$$

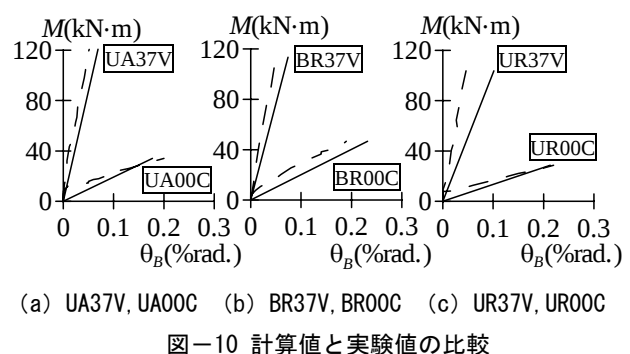
$$BR K = \frac{2 \cdot n \cdot E \cdot A \cdot d_t^2}{(f_l e + c_l e)} \quad (5)$$

$$UR K = \frac{2 \cdot n \cdot E \cdot A \cdot d_t^2}{(2f_l e + c_l e)} \quad (6)$$

ここに、 n は引張側柱脚接合筋の本数、 E は柱脚接合筋のヤング係数、 A は柱脚接合筋の断面積、 d_t はベースプレートの曲げ圧縮側外縁から曲げ引張側柱脚接合筋の重心までの距離である。

式 (4)、式 (5)、式 (6) を用いて計算した結果と実験値の比較を図－10 に示す。縦軸は柱脚に作用する曲げモーメント M 、横軸はベースプレートの回転角 θ_B である。破線が実験値、実線が計算値である。

いずれの試験体も計算値と比較して実験値がやや高めであるが概ね対応していることから初期剛性は式 (4)、式 (5)、式 (6) により評価できることが確認された。



5. 終局曲げ耐力

図-11、図-12に軸力 N と終局曲げ耐力 M の相関関係を示す。柱断面は十字型鉄骨の終局曲げ耐力 aMu と八角形断面のコンクリートの終局曲げ耐力 cMu をそれぞれ求め、一般化累加して柱断面の終局曲げ耐力 $caMu$ を算定した。柱脚断面は、アンカーボルトの終局曲げ耐力 aMu と cMu 、異形鉄筋の終局曲げ耐力 rMu と cMu をそれぞれ求め、一般化累加して各柱脚断面の終局曲げ耐力 $caMu$ を算定した。なお、実験値は軸力の作用による転倒曲げモーメントを考慮した曲げモーメントの最大値である。

終局曲げ耐力の計算において、アンカーボルトは引張力のみを負担、異形鉄筋は引張力と圧縮力を負担すると仮定し、コンクリートの圧縮強度 σ_c は表-3に示した柱と基礎梁の材料試験結果を用いて計算したものが点線で示した曲線になる。

シリーズⅡでは計算値と実験値との対応は極めて良好であったが、シリーズⅠでは計算値は実験値を大きく過小評価していた。

柱鉄骨にコンクリートが充填されていることでアン

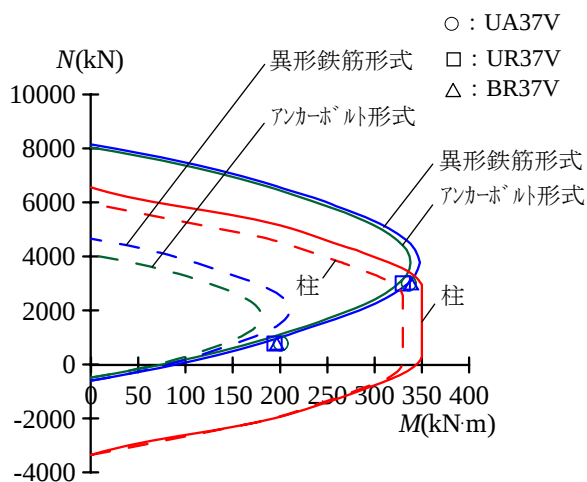


図-11 M-N 相関曲線(シリーズⅠ)

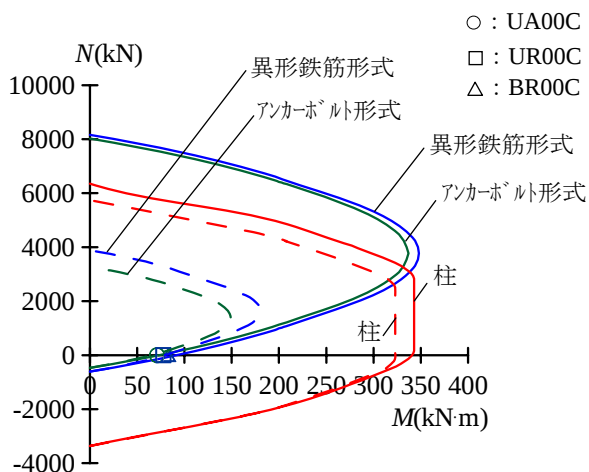


図-12 M-N 相関曲線(シリーズⅡ)

カーボルトに圧縮力が伝達されていると考えられ、図-7のひずみ度分布を見てみると高軸力を受ける試験体の柱脚接合筋は圧縮ひずみ度を示していたことから、アンカーボルトも異形鉄筋と同様、引張力と圧縮力を負担すると仮定し、柱の σ_b は鉄骨がコンクリートを拘束する効果³⁾を考慮した値、ベースプレート下部では基礎梁コンクリートより無収縮モルタルの方が損傷が大きかったことから柱脚断面の σ_b を表-3に示した無収縮モルタルの材料試験結果を用いて再計算すると実線で示した曲線となり、計算値は実験値との対応が良好となった。

シリーズⅡにおいても同様に計算するとこちらも実験値との対応が良好であった。累加強度によって終局曲げ耐力を妥当に評価できることが確認された。

6. まとめ

水平力の載荷方向によって軸力の大きさが異なる変動軸力下および無軸力下で正負繰返し曲げを受ける SC 構造露出型柱脚の実験を行い以下に示す結論が得られた。

- 1) いずれの試験体もベースプレート下部における損傷が卓越する破壊形式となり、高軸力が作用した時は柱のコンクリートも大きく損傷した。
- 2) 初期剛性は、柱脚接合筋のひずみ度分布をモデル化して構築した曲げ剛性評価式により評価できる。
- 3) 履歴曲線に関して、正負で軸力が異なる場合、柱脚接合筋にアンカーボルトを使用するほうが履歴ループは膨らみエネルギー吸収能力が高く、軸力が無い場合は異形鉄筋形式のボンドタイプが履歴ループが膨らみエネルギー吸収能力が高い。
- 4) 終局曲げ耐力は累加強度によって妥当に評価できる。

謝辞

本研究は、(社)日本鉄鋼連盟「2009 年度鋼構造研究・教育助成事業」を受けて実施されました。ここに記して謝意を表します。

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集第 33 巻, pp.1189-1194, 2011.6
- 3) 坂田 学, 堺 純一, 田中照久, 檜垣直也: 十字鉄骨を内蔵した鉄骨鉄筋コンクリート部材のコンクリートの拘束効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1129-1134, 2010.7