

# 論文 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

赤松 克哉<sup>\*1</sup>・貞末 和史<sup>\*2</sup>・南 宏一<sup>\*3</sup>

要旨：従来型の SRC 構造に変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。本研究では基礎梁を鉄筋コンクリート構造、柱を鉄骨コンクリート構造とした非埋込み形柱脚の力学特性を調べるための実験を行った。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、それぞれの柱脚に関して、圧縮軸力比を変数とし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。

キーワード：合成構造，非埋込み形柱脚，終局曲げ耐力

## 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、( ) 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、( ) 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、( ) 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<sup>1)</sup>。今後、この構造システムの確立に

向けて、本研究では、考案した柱脚構法の力学特性を調べる実験を行って検討する。

## 2. 柱脚構法の概要

SC 構造における最下層階の柱の形式は、基礎梁を SC 部材あるいは RC 部材にするか、さらに、柱鉄骨を基礎梁内に埋込むか埋込まないかによって図 - 2 に示す 4 種類に大別できると考えられ、形式によって、構造性能、施工方法やコストが大きく異なると予測されるが、本研究では、施工、コストの両面において最も合理化が期待できる「基礎梁を RC 部材とした非埋込み形柱脚」を対象とする。従来型の SRC 構造における非埋込み形柱脚では、SRC 柱と RC 基礎梁の接続に鉄筋とアンカーボルトを併用して用いることが一般的であった。しかしながら、SC 構造における柱脚にアンカーボルトを用いた場合、鋼構造の露出型柱脚と同様、アンカーボルト塑性化後の履歴特性がスリップ性状を示し、エネルギー吸収能力が大きく低下すると予測される。そこで、図 - 3 に示すよう

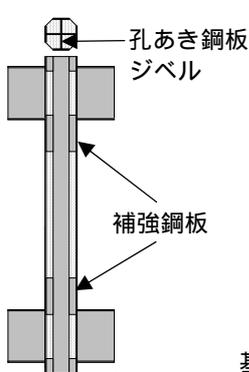


図 - 1 一般階の柱

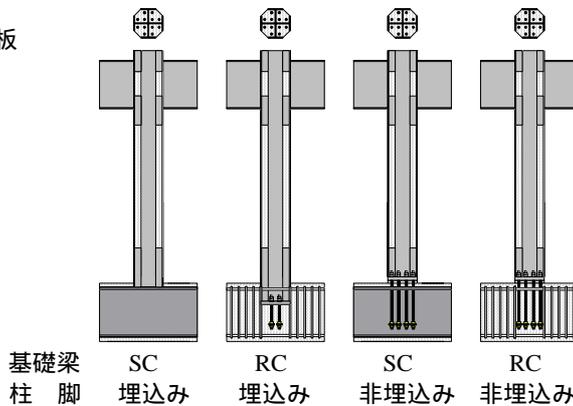


図 - 2 柱脚の形式

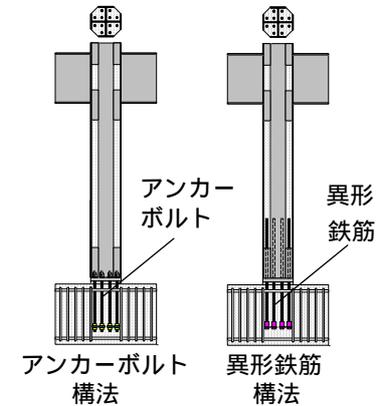


図 - 3 柱脚を有する最下層階の柱

\*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 (正会員)

に柱と基礎梁を接続する鋼材（以降、柱脚接合筋と称す）にアンカーボルトの代わりに異形鉄筋を用いて SC 柱と RC 基礎梁を接続する構法についても検討する。

### 3. 実験概要

#### 3.1 試験体

試験体は、一般階の柱を想定した試験体 1 体、柱脚を有する最下層階の柱を想定した試験体 6 体の計 7 体とした。試験体形状を図 - 4, 5 に示す。試験体は片持ち柱型で、頂部にピンを設けて荷重装置と接続する。柱脚を有する試験体は、軸力の大きさ、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の異形鉄筋に厚紙を巻き、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。一般階の柱を想定した試験体は、柱脚を有する試験体と同一断面の鉄骨を用いた。試験体計画を表 - 1 に示す。

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  $30\text{N/mm}^2$  とし、柱脚を有する試験体に関しては、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

表 - 3 コンクリートの材料強度

使用箇所	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	割裂強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{N/mm}^2$ )
柱	42.6	3.02	30612
基礎梁	31.9	1.89	28819
無収縮モルタル	76.6	5.21	30722

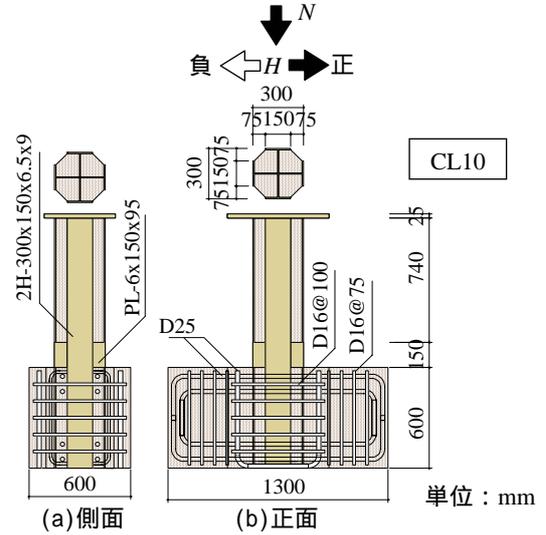


図 - 4 試験体形状（一般階の柱）

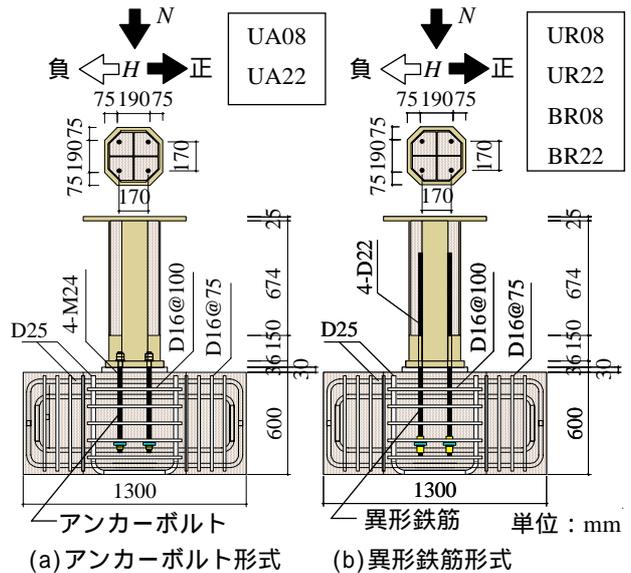


図 - 5 試験体形状（柱脚を有する最下層階の柱）

表 - 2 鋼材の材料強度

使用箇所	降伏強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	伸び (%)	ヤング係数 ( $\times 10^3 \text{N/mm}^2$ )
PL-9(SN400B) フランジ	292	426	26.9	197
PL-6.5(SN400B) ウェブ	315	426	26.9	204
PL-6(SS400) 補強鋼板	334	455	29.0	-
PL-36(SN490B) ベースプレート	342	536	26.0	-
M24(ABR490B) アンカーボルト	339	519	28.6	208
D22(SD345) 異形鉄筋	380	556	24.0	197
D25(SD345) 主筋	390	560	17.0	174
D16(SD345) あばら筋	365	515	13.6	172

表 - 1 試験体計画

試験体名	圧縮軸力 $N$ (kN)	軸力比	柱断面		柱脚断面		柱脚接合筋			柱鉄骨 サイズ
			$clN_{cu}$ (kN)	$clN_{tu}$ (kN)	$cbN_{cu}$ (kN)	$cbN_{tu}$ (kN)	アンカーボルト	接続鉄筋	付着	
UA08	724	$cbn=0.08$	7350	-3798	8518	-525	4-M24 (ABR490)	-	アンボンダ	2H- 300×150×6.5×9 (SN400B)
UA22	1887	$cbn=0.22$								
UR08	724	$cbn=0.08$								
UR22	1887	$cbn=0.22$								
BR08	724	$cbn=0.08$								
BR22	1887	$cbn=0.22$								
CL10	724	$cln=0.10$	-	-	-	-	-	-	-	

注) 圧縮を + としている。

軸力比

$cbN_{cu}$  と  $cbN_{tu}$ : 柱脚断面の圧縮強度と引張強度。

$cbn = N / cbN_{cu}$

$clN_{cu}$  と  $clN_{tu}$ : 柱断面の圧縮強度と引張強度。

$cln = N / clN_{cu}$

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、写真-1、図-6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。



写真-1 柱鉄骨

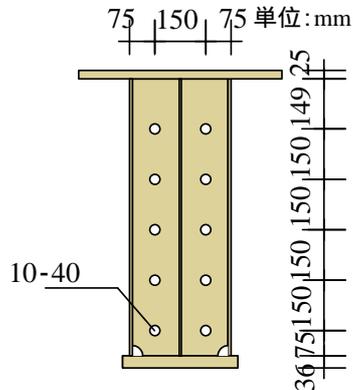


図-6 孔あき位置

### 3.2 荷重方法

荷重は図-7に示す2軸荷重装置を使用し、所定の一定圧縮軸力 $N$ 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荷重を行う。荷重履歴は、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.で正負繰り返し荷重を2回行った後、その後 $\pm 0.50\%$ rad.ごとの漸増正負繰り返し荷重を $R=\pm 5.00\%$ rad.まで2回ずつ繰り返して終了した。

変位計の取り付け位置を図-8に示す。変位計は図-8のように基礎梁に固定した治具に取り付けた。変位の計測は、柱頭および柱脚に取り付けた変位計により、柱頭ピン位置中心の水平変位 $\delta_{UC}$ 、軸方向変位 $\delta_{VC}$ 、回転角 $\theta_C$ および柱脚ベースプレート位置の水平変位 $\delta_{UB}$ 、軸方向変位 $\delta_{VB}$ 、回転角 $\theta_B$ を計測した。なお、柱脚の変位はベースプレートに溶接した測定用ボルトにより変位を計測している。

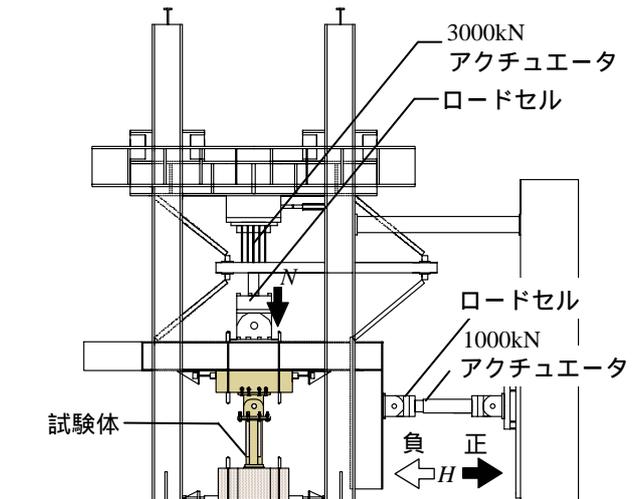


図-7 荷重装置

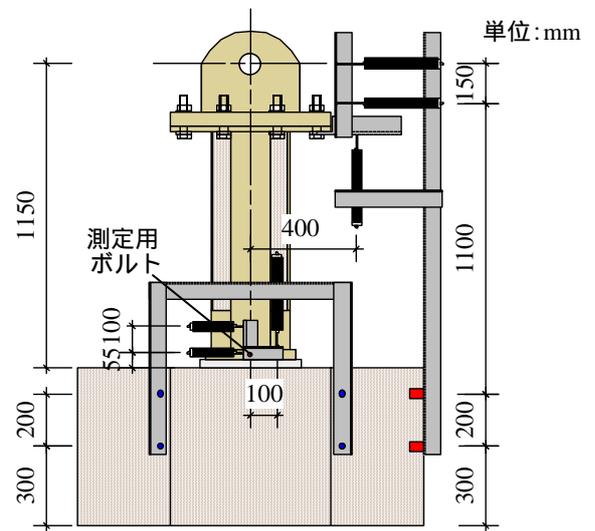
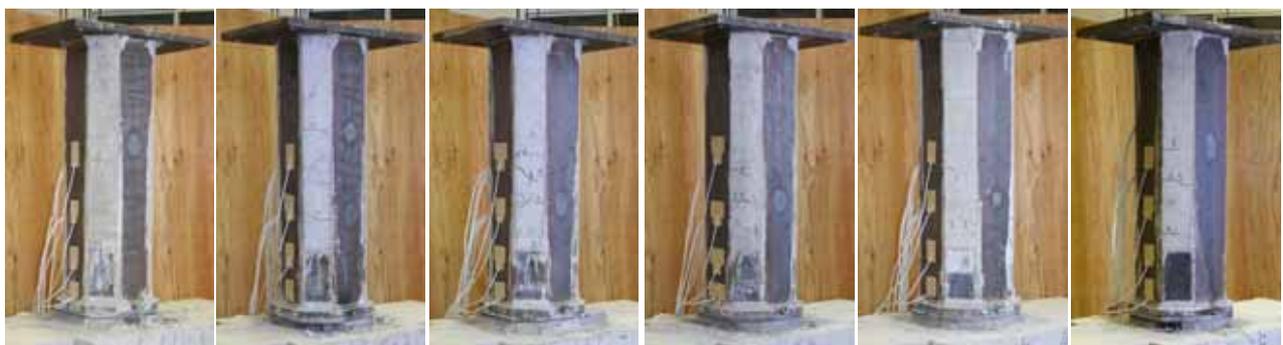


図-8 変位計取り付け位置

### 3.3 破壊性状

最終破壊状況を写真-2に示す。

柱脚を有する最下層階の柱に関して、低圧縮軸力下の試験体、高圧縮軸力下の試験体ともに、鉄骨に囲まれた



(a)UA08

(b)BR08

(c)UR08

(d)UA22

(e)BR22

(f)UR22

写真-2 最終破壊状況

部分のコンクリートに大きな損傷は生じていなかったが、鉄骨フランジは圧縮降伏していることが確認された。また柱脚接合筋は、低圧縮軸力下の試験体(UA08, UR08, BR08)では引張降伏しており、高圧縮軸力下の試験体(UA22, UR22, BR22)では引張降伏および圧縮降伏していることが確認された。

$R=5.0\%$ rad.までの柱脚回転角 $\theta_B$ と柱頭部材角 $R$ の関係、柱脚水平変位 $\delta_{UB}$ と $R$ の関係を図-9にそれぞれ示す。両軸力下において、いずれの試験体ともベースプレート下部モルタルは圧壊を生じていた。また、図-9(a)に示すように、いずれの試験体とも $\theta_B$ は $R$ とほぼ同等になっていることからベースプレート位置における回転が卓越しているものと推察される。

軸力の違いで比較すると、低圧縮軸力下の $\theta_B$ は高圧縮軸力下の $\theta_B$ のよりやや大きく、図-9(b)をみると $\delta_{UB}$ は高圧縮軸力のほうが低圧縮軸力より大きくなっている。

一般階の柱では、柱脚部の鉄骨フランジが引張側・圧縮側共に降伏し、鉄骨ウェブは柱脚部において材軸方向で降伏ひずみ度に達しており、柱脚部において曲げ破壊を生じたものと推察される。最終的には、補強鋼板上端位置において圧縮側フランジが局部座屈を生じ、座屈を生じている近傍はコンクリートが圧壊を生じていた。

### 3.4 ひずみ度分布

低圧縮軸力下における軸力導入時, $R=0.50\%$ rad.時および

$R=1.00\%$ rad.時の柱脚接合筋と柱鉄骨の材軸方向のひずみ度 $\varepsilon$ の分布を図-10に示す。なお、柱脚接合筋が伸びる側を正としている。

付着の有無で比較するとアンボンドタイプにすることで柱脚接合筋は基礎梁内において一様なひずみ度分布となることがわかる。それに対し、ボンドタイプは基礎梁と柱の境界部分でひずみ度が大きくなっていることが分かる。また、異形鉄筋は柱まで伸びており、柱内部はボンドとなっているため、付着の有無に関わらず柱との境界部分においてひずみ度が大きくなっている。

柱鉄骨は端部に補強鋼板を取付けているため大きなひずみ度は生じず、ほぼ一様なひずみ度分布を示している。

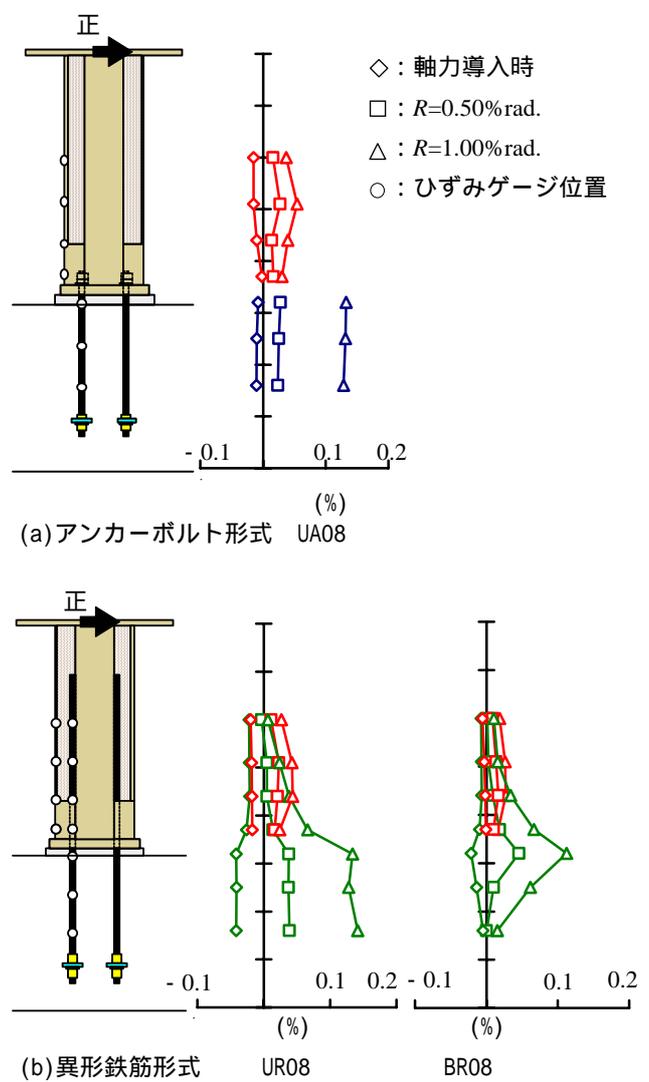


図-10 材軸方向のひずみ度分布

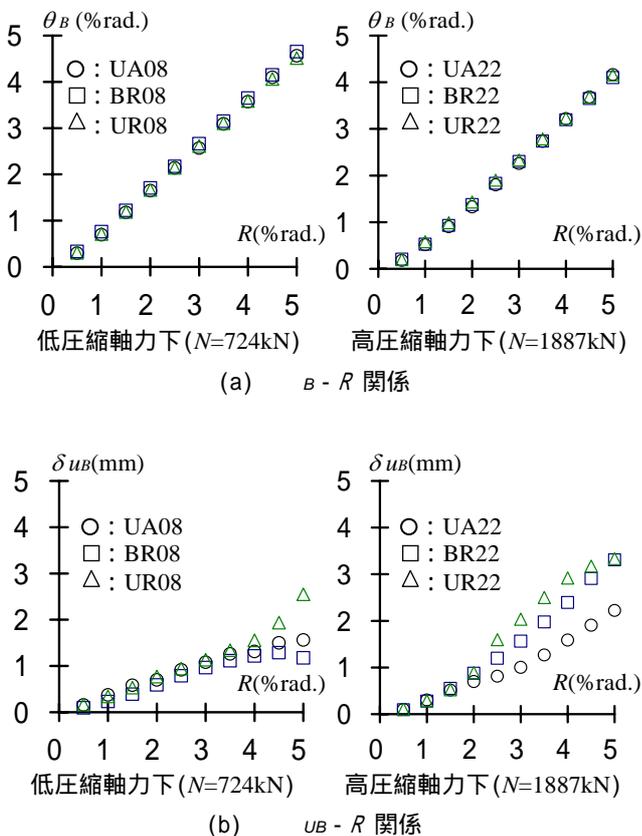


図-9 柱脚変位と柱頭部材角の関係

### 3.5 荷重-変形関係

各試験体について, $R=0.50\%$ rad.までの初期剛性の比較を図-11に示す。縦軸は柱脚に作用する曲げモーメント $M$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ )、横軸は柱部材角 $R$ ( $\%$ rad.)としている。 $M$ は軸力の作用による転倒曲げモーメントを考慮している。

低圧縮軸力下の試験体について比較すると、一般階の柱試験体に対して、柱脚を有する最下層階の柱試験体は初期剛性が低下していた。

同一形状の試験体について比較すると、高圧縮軸力を受けている場合は初期剛性が大きくなっていった。

柱脚接合筋の違いについて比較すると、柱脚接合筋をボンドタイプにすることで初期剛性が大きくなることが予測されたが、軸力の大きさに関わらず明瞭な差異は認められなかった。

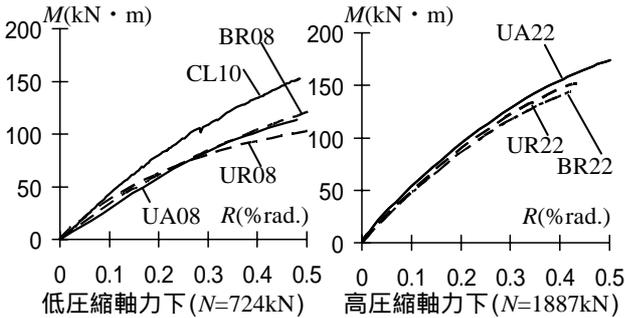


図 - 11 初期剛性の比較

各試験体の  $M-R$  関係の履歴曲線を図 - 12 に示す。

一般階の柱試験体 CL10 では、終局時には鉄骨フランジが座屈を生じたが、 $R=5.0\%$ rad.まで耐力低下がなく、履歴ループの形状は紡錘形に膨らみ、優れたエネルギー吸収能力を有することが確認された。

柱脚を有する最下層階の柱試験体に関して、低圧縮軸力下では、 $R=5.0\%$ rad.まで耐力低下を生じていないが、一般階の柱試験体のように履歴ループの形状が膨らむことはなく、スリップ性状を示している。アンカーボルト形式 UA08 は、アンカーボルト降伏先行型の鋼構造露出型柱脚のような履歴特性を示すことが予測されたが、鋼構造露出型柱脚よりは履歴ループがやや膨らんでいた。これは、柱鉄骨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に圧縮力が伝達されていることが影響していると考えられる。そのため、履歴ループの形状について柱脚接合筋の違いによる明瞭な違いは見られなかったが、ボンドタイプの異形鉄筋 BR08 を用いた場合はアンカーボルトを用いた場合より履歴ループがやや膨らみ、エネルギー吸収を期待できることが確認された。

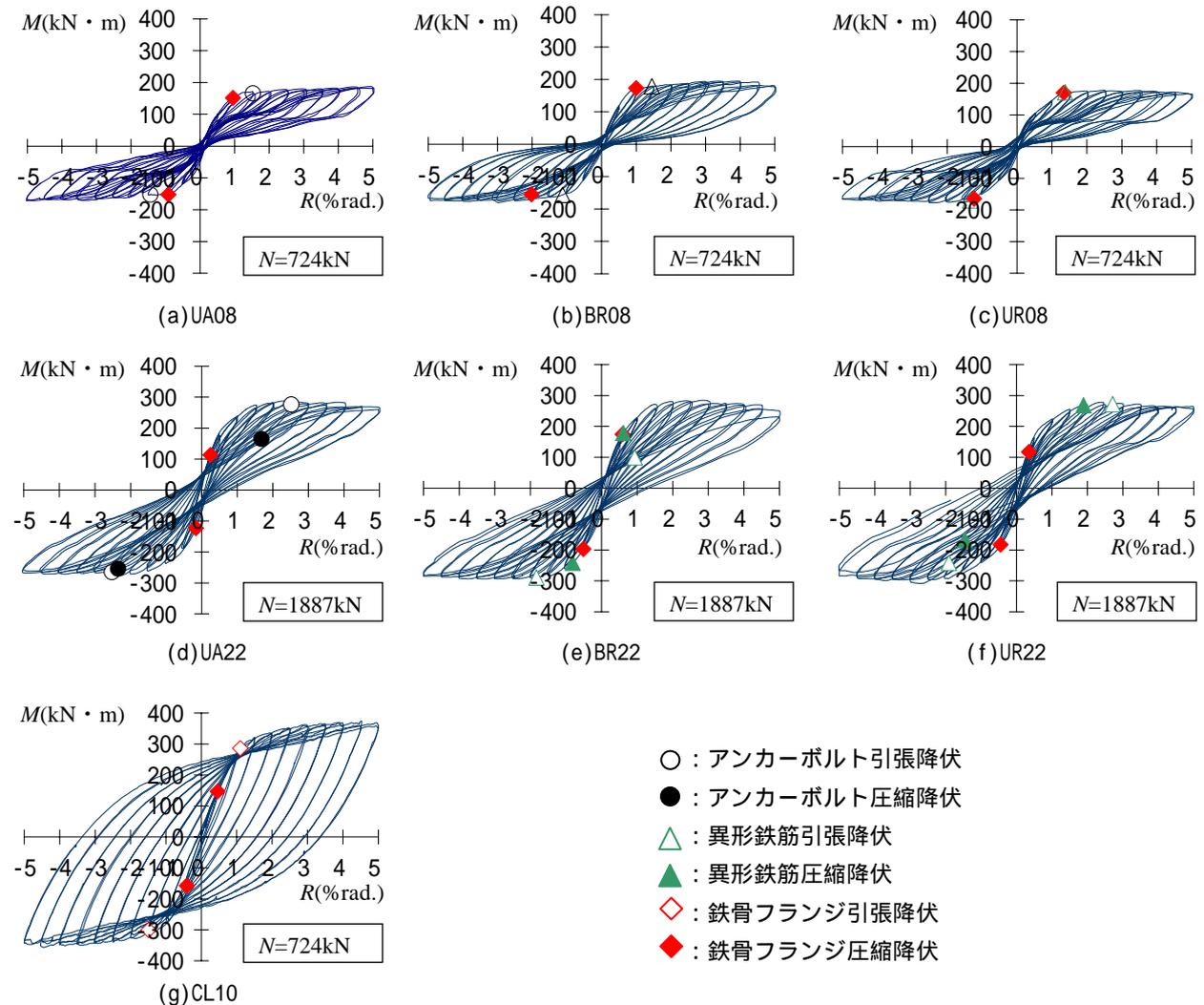


図 - 12 履歴曲線

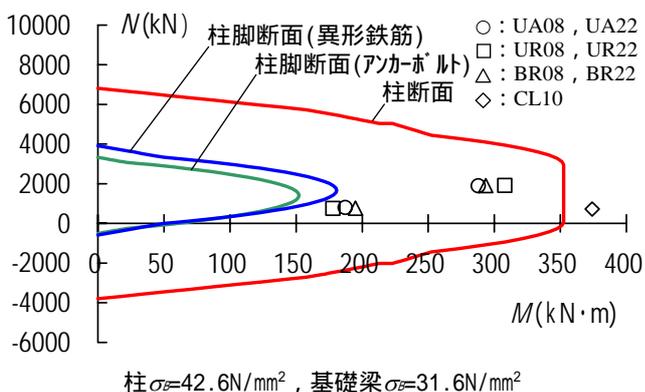
高圧縮軸力下では、低圧縮軸力下と比較して最大耐力は大きくなっているが、最大耐力以降、若干耐力低下を生じ、履歴ループの形状について柱脚接合筋の違いによる顕著な差異は見られなかった。本実験で用いた試験体の柱脚接合筋量では、圧縮軸力が大きくなるほど柱脚接合筋が履歴特性に与える影響が少なくなるものと推察される。

#### 4. 終局曲げ耐力の評価

図 - 13, 14 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  $sMu$  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、単純累加して柱断面の終局曲げ耐力  $clMu$  を算定した。アンカーボルト、異形鉄筋を用いた柱脚断面は、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、単純累加して各柱脚断面の終局曲げ耐力  $cbMu$  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。

図 - 13 は、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  $\sigma_b$  は表 - 2 に示した柱と基礎梁の材料試験結果を用いている。この場合、計算値は実験値を大きく過少評価する結果となった。図 - 10(a) をみるとアンカーボルトは圧縮ひずみ度を生じており、アンカーボルトに圧縮力が伝達されていると考えられるので、アンカーボルト・異形鉄筋共に引張力と圧縮力を負担すると仮定し、柱の  $\sigma_b$  は鉄骨がコンクリートを拘束する効果<sup>2)</sup>を考慮した値、柱脚の  $\sigma_b$  はモルタルの材料試験結果を用いて再計算した。その結果が図 - 14 になる。この場合、計算値は実験値との対応が極めて良好であることがわかる。十字型鉄骨に囲まれたコンクリートは、拘束効果によってコンクリート強度が上昇することが近年行なわれた実験的研究によって明らかにされている<sup>2)</sup>。

また、本実験で用いた試験体は、柱断面のサイズに対



柱  $\sigma_b=42.6\text{N/mm}^2$ , 基礎梁  $\sigma_b=31.6\text{N/mm}^2$

図 - 13 M-N 相関関係

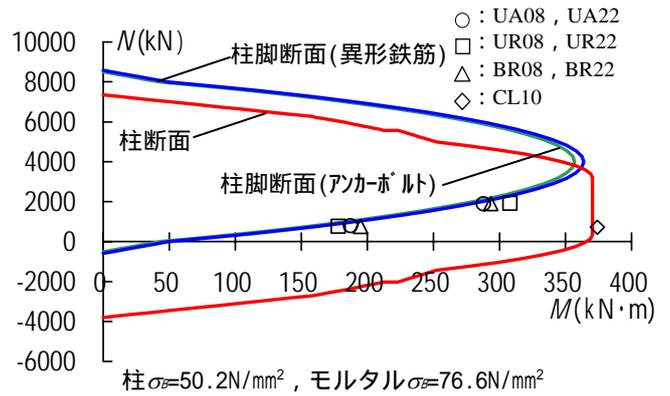


図 - 14 M-N 相関関係

して基礎梁のサイズが大きく、基礎梁のコンクリートは支圧を受けてモルタルより圧縮強度が大きくなっているものと推察される。

適切な材料強度を用い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。

#### 5. まとめ

一定圧縮軸力下で繰返し曲げを受ける SC 構造における一般階の柱と柱脚を有する最下層階の柱の実験を行い、以下の結論が得られた。

- 1) 本実験で用いた柱脚を有する最下層階の柱試験体は、いずれ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った。
- 2) 初期剛性に関しては、柱脚接合筋の種類および異形鉄筋の付着の有無によって明瞭な差異は見られない。
- 3) 履歴曲線に関しては、低圧縮軸力下では、異形鉄筋のボンドタイプを用いた方が履歴ループはやや膨らみ、高圧縮軸力下では、柱脚接合筋の違いによる差異は見られない。
- 4) 終局曲げ耐力は適切な材料強度を用いた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) 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