

# 論文 リサイクル可能な RC 柱の弾塑性性状

江崎文也\*

**要旨:**解体後も再利用が可能な RC 構造を開発する目的で、鉄筋とブロックとの付着が作用しないように計画した RC プレキャストブロック柱を提案し、中心圧縮実験および一定軸力下の正負繰り返し水平力加力実験から、鉄筋とコンクリートブロックとの付着が生じない RC 柱の弾塑性性状を検討し、比較的安定した履歴性状が得られることを示した。

**キーワード:** リサイクル, RC 柱, RC ブロック, プレキャスト, アーチ機構

## 1. 序

鉄筋コンクリート構造は、耐火性および耐久性に優れ、鉄骨構造と比べても安価で経済的であるとの理由から、広く使用されている。しかし、施工が煩雑なことのほかに、取り壊しが容易でない。また取り壊し後の構造材料は粗大ゴミとして廃棄され、その処理は近年社会問題としてクローズアップされるようになってきている。このような社会情勢を考慮すると、今後、工場加工した構造部材を現場で簡単に施工することができるのと同時に、取り替えも容易にできるリサイクル可能な新しい RC 構造の開発が要求されると予想される。

本研究は、この新しい RC 構造の可能性を検討するため、正方形断面ブロックより構成された柱の圧縮実験を行い、その鉛直剛性を検討するとともに、せん断スパン比  $MIQD=1$  および  $2$  の柱について、一定軸力下の繰り返し水平加力実験を行い、その力学的性状について検討を行ったものである。

## 2. 実験概要

### 2.2 試験体

表-1 に試験体一覧、表-2 には使用した材料の力学的性質を示す。ブロックの寸法は、運搬および施工等を考慮し、柱幅と同厚とした。

図-1 に、中心軸圧縮用の試験体形状および配筋を示す。ブロック柱については、図中に示すよ

うに、断面中央に円形鋼管を両端に配置して一体打ちしたブロックにコンクリート充填鋼管のシヤーキーを挿入し、シヤーキーを挿入する穴の深さより 5mm 長いシヤーキーの挿入によって生じたブロック間の隙間に、圧縮強度 80MPa の補強補修用モルタルを充填して接合した。

図-2 に、水平加力実験用の試験体形状および配筋を示す。せん断スパン比  $MIQD=1$  の試験体は、中心圧縮用試験体と同様な方法で各ブロックを接合し、主筋穴に通した端部ネジ付き鉄筋を締め付けて試験体部分を作製した。取り外しが容易にできるように、ブロック接合面はビニール塗料を塗り、モルタルとの接合面が容易に剥離するように計画した。せん断スパン比  $MIQD=2$  の試験体は、各ブロックの中央に設けた機械式継手にて接合した。 $MIQD=1$  の場合と同様に、ブロック間の隙間に圧縮強度 80MPa の補強補修用モルタルを充填して試験体を作製した。いずれの試験体とも所定の軸力を載荷した後、端部ナットを加力スタブに接触させ、鉄筋の伸びを拘束する定着装置を加力スタブに取り付けて、試験体と加力スタブとを接合した。

軸方向力は、 $\sigma_c/\sigma_b$  ( $\sigma_c = N/A$ , ただし、 $N$ : 軸方向力、 $A$ : 柱断面積、 $\sigma_b$ : コンクリート圧縮強度) = 0.3 および 0.15 の 2 種類を計画し、 $MIQD=1$  の場合、前者は、主筋は降伏せずコンクリートストラットが降伏するせん断破壊先行、後者は、主筋の降伏近傍となるように計画したものであ

\*九州共立大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

る。M/QD=2の場合は、両試験体とも、主筋は降伏せずコンクリートストラットが降伏するせん断破壊先行となるように計画した。

## 2.2 荷重方法・荷重プログラム及び測定装置

中心軸圧縮実験は、図-1に示す方法で漸増単調荷重により実施し、軸方向の変形を感度1000 $\mu$ /mmの変位計にて測定した。水平加力実験に関しては、一定軸力下の繰り返し水平加力が可能な図-3の加力装置を用いて行い、図-4に示すように、上下スタブ間の相対水平変形および鉛直変形を、それぞれ200 $\mu$ /mmおよび500 $\mu$ /mmの変位計にて測定した。加力は、図-5に示すような荷重プログラムで行った。

表-1 試験体一覧

試験体名	帯筋配筋	$\sigma_c/\sigma_B$
中心圧縮	6 $\phi$ @25mm( $p_w=1.13\%$ )	-
BH-1-0.3	6 $\phi$ @15mm( $p_w=1.88\%$ )	0.3
BH-1-0.15	6 $\phi$ @25mm( $p_w=1.13\%$ )	0.15
BH-2-0.3	6 $\phi$ @40mm( $p_w=0.62\%$ )	0.3
BH-2-0.15	6 $\phi$ @50mm( $p_w=0.50\%$ )	0.15

共通事項：主筋4-9.2 $\phi$  ( $p_s=0.65\%$ )、ただし、中心圧縮は4-D13  
 $p_w$ ：帯筋比、 $p_s$ ：主筋比、 $\sigma_c$ ：軸方向応力度(=N/A、ただし、N：軸方向力、A：柱断面積)、 $\sigma_B$ ：コンクリート圧縮強度

表-2 使用材料の力学的性質

### (1)鉄筋および鉄骨

種別	a	$\sigma_y$	$\sigma_u$	$E_s$	伸び(%)
6 $\phi$	0.26	364	478	215	18.5
D13	1.24	362	592	182	20.7
9.2 $\phi$	0.66	1417	1466	195	8.6
鋼管	0.60	333	-	185	-
6 $\phi$ *	0.25	408	459	206	13.7
9.2 $\phi$ *	0.65	1440	1510	204	9.1

a：断面積(cm<sup>2</sup>)、 $\sigma_y$ ：降伏点(MPa)、 $\sigma_u$ ：引張強度(MPa)、 $E_s$ ：ヤング係数(GPa)

\*印は、M/QD=2で使用

### (2)コンクリート

試験体名	$\sigma_B$	$\epsilon_B$	$E_c$
中心圧縮	22.8	0.00251	23.2
BH-1-0.3	24.4	0.00223	23.9
BH-1-0.15	24.4	0.00223	23.9
BH-2-0.3	23.4	0.00289	21.8
BH-2-0.15	23.4	0.00289	21.8

$\sigma_B$ ：シリンダー圧縮強度(MPa)、 $\epsilon_B$ ：圧縮強度時ひずみ、 $E_c$ ：ヤング係数(GPa)

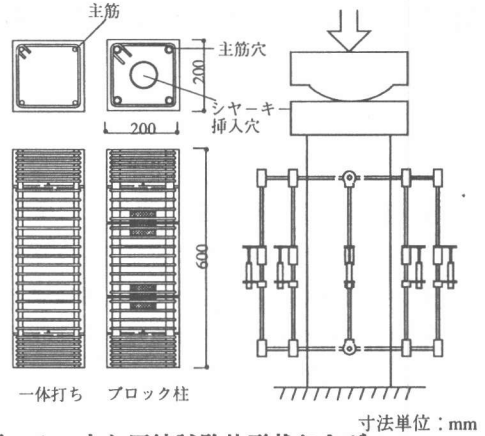


図-1 中心圧縮試験体形状および加力・測定方法

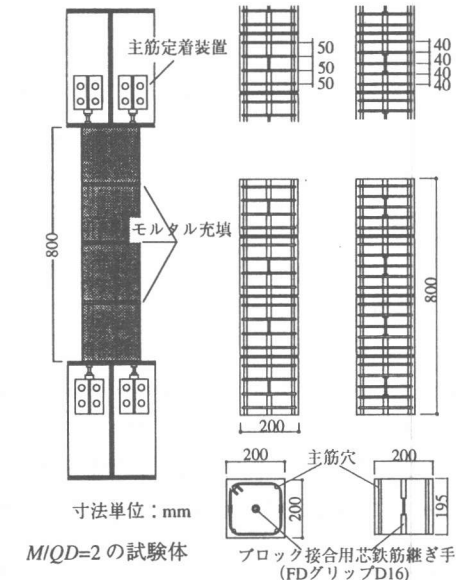
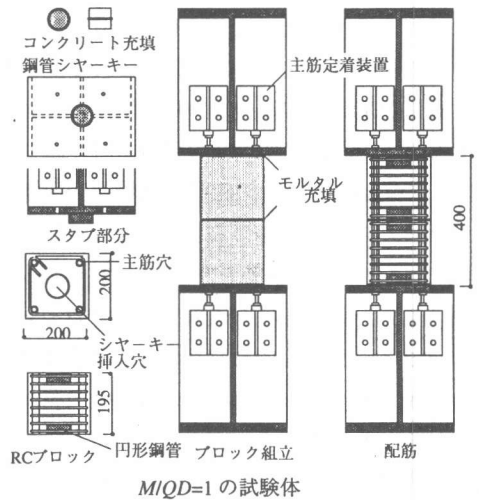


図-2 試験体形状・配筋およびゲージ貼付位置

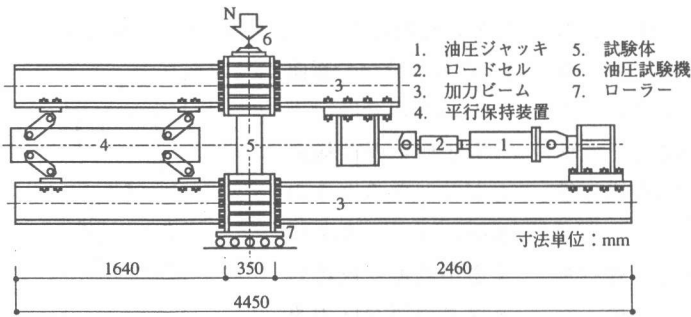


図-3 加力装置

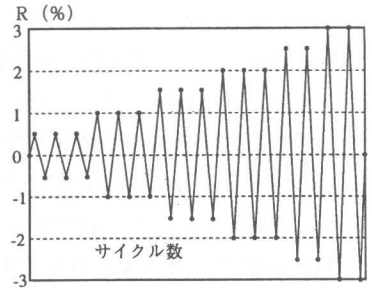


図-5 載荷プログラム

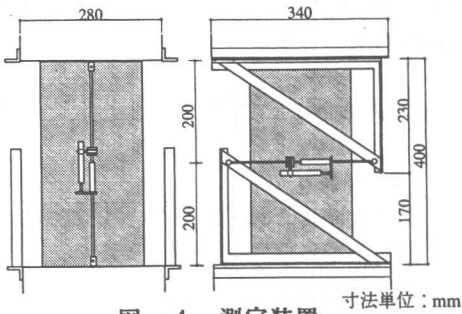


図-4 測定装置

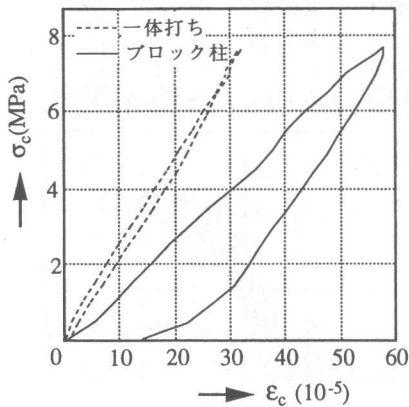


図-6 中心圧縮実験によるコンクリート圧縮応力 $\sigma_c$ と平均ひずみ $\epsilon_c$ との関係

### 3. 実験結果

図-6に、中心軸圧縮実験結果を示す。一体打ちは、鉄筋負担力を除いたコンクリート圧縮応力 $\sigma_c$ と測定間平均ひずみ $\epsilon_c$ との関係を示す。ブロック柱については、主筋穴面積を控除したコンクリート圧縮応力と測定間平均ひずみ関係を示す。この図によれば、一体打ちに比べてブロック柱の軸剛性が小さく、モルタルの乾燥収縮に伴う接合部分の変形の影響が考えられる。

図-7に、せん断スパン比 $M/QD=1$ の試験体の水平力 $R$ と上下スタブ間の相対水平変形を柱の内法高さで除した部材角 $R$ との関係および終局ひび割れ状況を示す。いずれの試験体とも $R$ の増大とともに $Q$ が増大し、水平力の低下はほとんどみられず、安定した履歴性状を示した。主筋とコンクリートとの付着がないので、エネルギー吸収性能の少ない性状を示している。図中にはアーチ機構に基づく水平耐力計算値 $Q_u$ を示した。いずれも計算値を超える耐力に達している。図-8に、鉛直方向平均ひずみ $\epsilon_v$ と部材角 $R$ との関係を示す。 $R$ が0近傍では、正負繰り返し変形を受けるにしたがって徐々に鉛直方向の縮みが増加している。しかし、部材角 $R$ の増大とともに鉛直方向に伸びる傾向は維持されており、端部のカバーコンクリートの剥落が一部にみられるものの、せん断破壊などの脆性破壊現象がみられないことから、水平力の低下もほとんどなかったものと考えられる。

図-9に、せん断スパン比 $M/QD=2$ の試験体の水平力 $Q$ と部材角 $R$ との関係および終局ひび割れ状況を示す。端部のカバーコンクリートの剥落は、上端および下端のブロックのみに見られ、中央部分のブロックにはひび割れが生じていない。両試験体とも主筋の付着がないので、付着割裂ひび割れは生じていない。いずれの試験体とも $R$ の増大とともに $Q$ が増大し、水平力の低下はほとんど見られず、安定した履歴性状を示した。試験体BH-2-0.15の場合、水平力が水平耐力算定値 $Q_u$ まで達していない。これは、比較的初期の段階での端部コンクリートの圧壊に起

因しているものと考えられる。図-10に、鉛直方向平均ひずみ $\epsilon_v$ と部材角 $R$ との関係を示す。 $R$ が0近傍では正負繰り返し変形を受けるにしがって鉛直方向の縮みが増加しているが、部材角 $R$ の増加とともに鉛直方向に伸びる傾向は維持されており、安定した性状を示した。

図-8および図-10の各図中に、一体打ちと考えた場合の軸力 $N$ による軸ひずみの値 $\epsilon_0$ を示したが、いずれのせん断スパン比の試験体とも $\epsilon_0$ より大きな軸縮みを生じているのは、上下スタブと試験体との接合面に生じた隙間およびブロック接合部モルタルの乾燥収縮によるものと考えられる。

#### 4. 荷重変形解析

ブロック部分の変形はわずかと考え、図-11に示すように、水平変形はスタブと柱との境界

部分の回転角によって生じるものと仮定する。

1) 境界部分が全断面  
圧縮の場合

引張側の垂直縁応力が0となるときの水平力 $Q_{cr}$ は、軸力による平均軸圧縮応力と同じ引張縁応力を生じさせる曲げモーメント $M_{cr}$ を用いて、式(1)で与えられる。

$$Q_{cr} = \frac{2}{h} M_{cr} = \frac{2}{h} \frac{N}{A} Z \quad (1)$$

ここで、

$N$ : 柱軸力

$A$ : 柱断面積 ( $=b_c D_c$ ,  $b_c$ : 柱幅,  $D_c$ : 柱せい)

$Z$ : 断面係数 ( $=b_c D_c^2/6$ )

$h$ : 柱内法高

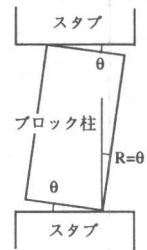


図-11 ブロック柱  
変形模式図

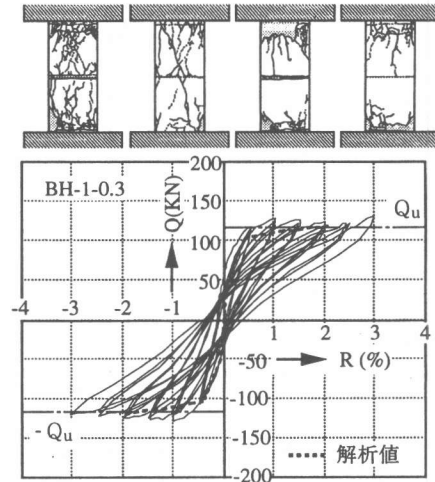
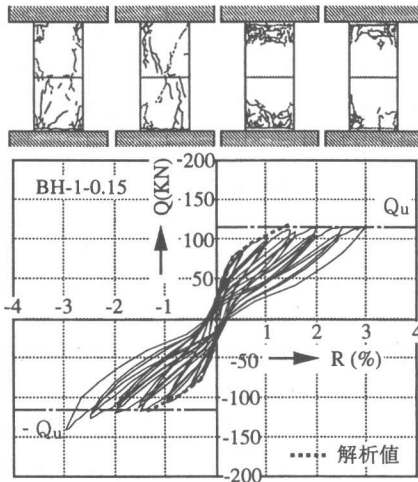


図-7  $MIQD=1$ の各試験体の水平力 $Q$ -部材角 $R$ 関係および終局ひび割れ状況

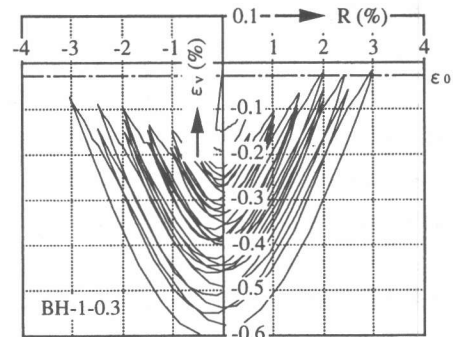
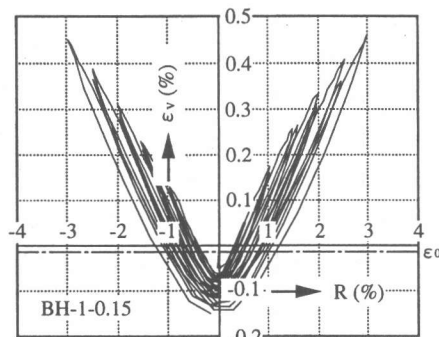


図-8  $MIQD=1$ の各試験体の平均鉛直ひずみ $\epsilon_v$ と部材角 $R$ との関係

引張縁応力が0のときの圧縮縁応力は $2N/A$ となり、式(2)のコンクリート応力-ひずみ関係を用いると、圧縮ひずみ $\varepsilon_{cr}$ が式(3)で与えられる。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_B} = \left\{ 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

ここで、

$\sigma_c$ : 圧縮応力度

$\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度

$\varepsilon_c$ : 圧縮ひずみ度

$\varepsilon_0$ : コンクリート圧縮強度時ひずみ度

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_B} \right)} \right\} \quad (3)$$

ここで、

$$\sigma_{cr} = 2N/A$$

コンクリート圧縮ひずみが柱高全長にわたっ

て直線的に変化しているとすれば、圧縮応力による縮み量 $\delta_{cr}$ が式(4)で与えられ、式(4)を用いると、材端の回転角 $\theta_{cr}$ が式(5)で与えられる。

$$\delta_{cr} = \frac{\varepsilon_{cr} h}{2} \quad (4)$$

$$\theta_{cr} = \frac{\delta_{cr}}{D} = \frac{h}{2D} \varepsilon_{cr} \quad (5)$$

2) 引張側が浮き上がる場合

圧縮側コンクリート応力分布としてACI規準に用いている仮定を用いると、式(6)が得られる。

$$N + T = k_1 k_3 \sigma_B x_n b_c \quad (6)$$

ここで、

$$k_1 = k_3 = 0.85$$

$x_n$ : 圧縮縁から中立軸までの距離

$T$ : 鉄筋の引張力

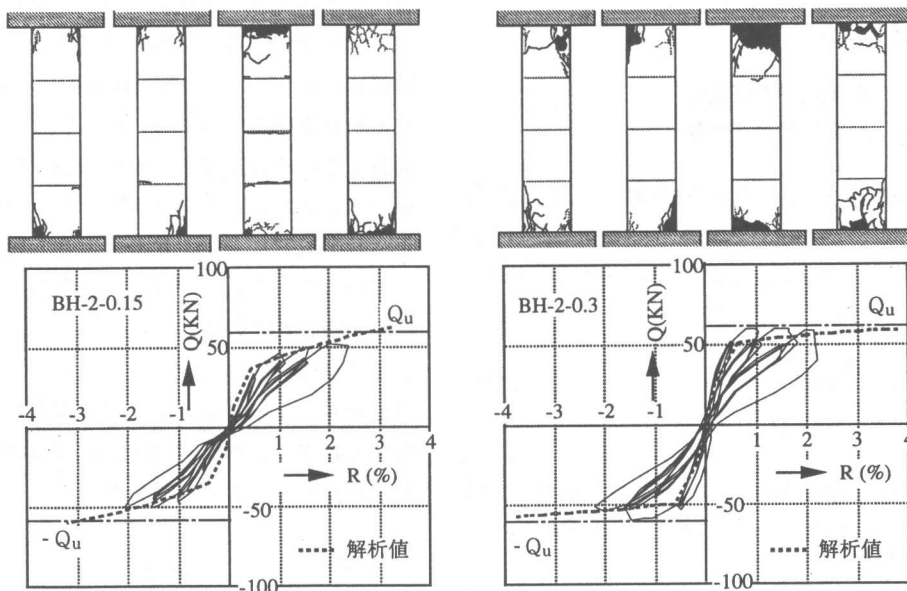


図-9 MIQD=2の各試験体の水平力 $Q$ -部材角 $R$ 関係および終局ひび割れ状況

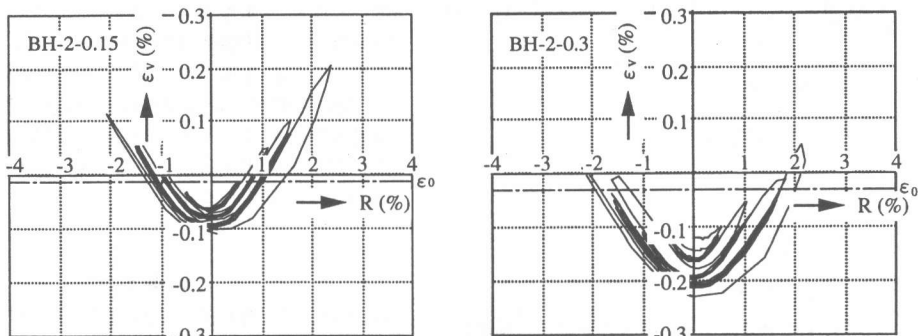


図-10 MIQD=2の各試験体の平均鉛直ひずみ $\varepsilon_v$ と部材角 $R$ との関係

(6)式の  $T$  は、部材材長の伸びに起因する鉄筋の引張力による付加軸力を示している。

材端モーメントは、式(7)で与えられる。

$$M = (N+T) \left( \frac{D}{2} - \frac{k_1}{2} x_n \right) \quad (7)$$

鉄筋とコンクリートとの付着がないので、鉄筋は全長にわたって同じひずみであると考えられる。したがって、式(6)および式(7)の  $T$  は、材端の回転角  $\theta$  が与えられると、式(8)で与えられる  $\varepsilon_s$  を用いて、式(9)で求められる。

$$\varepsilon_s = \frac{(D_c - 2x_n)}{h} \theta \quad (8)$$

ここで、 $(\varepsilon_s \leq \varepsilon_y)$

$\varepsilon_y$ : 鉄筋の降伏ひずみ

$$T = \varepsilon_s E_s A_s \quad (9)$$

ここで、

$A_s$ : 引張鉄筋の断面積

$E_s$ : 鉄筋のヤング係数

せん断力  $Q$  は、式(7)の  $M$  を用いて式(10)で与えられるので、式(5)で求めた  $\theta_{cr}$  から以降は、式(10)よりせん断力  $Q$  と部材角  $R$  の関係を求めることができる。

$$Q = \frac{2}{h} M \quad (10)$$

$$(Q \leq Q_{su})$$

ここで、

$Q_{su}$ : せん断破壊できる水平耐力で、式(11)および式(12)で与えられる<sup>1)</sup>。

$N \leq N_0$  のとき

$$Q_{su} = \frac{c N_u}{2} \lambda \left\{ \sqrt{1 + \frac{4}{\lambda^2} \left( \frac{2_r N_u + N}{c N_u} \right) \left( 1 - \frac{2_r N_u + N}{c N_u} \right)} - 1 \right\} \quad (11)$$

$N > N_0$  のとき

$$Q_{su} = \frac{c N_u}{2} (\sqrt{\lambda^2 + 1} - \lambda) \quad (12)$$

ここで、

$$\lambda = \frac{h}{D_c}$$

$$c N_u = b_c D_c \sigma_B$$

$$r N_u = A_s \sigma_y, \quad (\sigma_y: \text{引張鉄筋降伏点強度})$$

$$N_0 = \frac{c N_u}{2} - 2_r N_u$$

上述した各式によって求めた水平力  $Q$  と部材角  $R$  との関係を、破線で図-7および図-9に示す。解析した結果は、ほぼ実験値と一致していることから、上述の解析によって本構造形式柱の  $Q$ - $R$  関係をおよそ予測できると考えられる。

## 5. 結論

リサイクル可能な RC 構造の可能性を検討するために行った RC 正方形断面ブロック柱の一定軸力下の繰り返し水平加力実験の結果、以下のことがわかった。

- 1) 比較的大変形時まで耐力の低下はほとんどなく、安定した履歴性状を示すとともに、載荷終了後ブロックの取り外しも容易にでき、初期の目的を達成することができた。しかし、せん断スパン比  $M/QD=2$  の試験体では、上下ブロック端部にコンクリートの軸圧壊が生じたことから、柱の靱性を向上するためにはコンクリートを横拘束するための補強としての帯筋を配筋する必要があるものと考えられる。また、一体打ちに比べ軸力載荷によってかなり大きな軸縮みを生じていることから、ブロックの接合に改良すべき点が残されている。
- 2) 水平変形がスタブとブロック柱との境界部分の回転角によって生じるものと考えたモデルを用いた解析は、本構造形式柱の水平荷重と部材角との関係をおよそ予測できる。

## 謝辞

本実験は、平成6~9年度本校特別研究助成により行われた。試験体製作および実験の実施にあたっては、平成6、7年度本研究室卒業生の協力を得た。加力装置および試験体製作にあたっては、技能員栗山哲生、青木治、生野千力の各氏にお世話になった。また、加力装置および試験体に用いたPC鋼棒および機械式鉄筋継手は、それぞれ、高周波熱錬株式会社および東海鋼業株式会社よりご提供頂いた。ここに、関係各位に感謝致します。

## 参考文献

- 1) 加藤 勉・称原良一：鉄骨鉄筋コンクリート部材の耐力，日本建築学会論文報告集，第266号，pp.19-29，1978.4