

# 論文 重ね継手接合部を持つ再生コンクリートを用いたハーフ PCa 骨組に関する弾塑性解析

西浦 範昭\*<sup>1</sup>・宮下 剛士\*<sup>1</sup>・田中 礼治\*<sup>2</sup>

要旨：コンクリート系構造物の解体時に発生するコンクリート塊の再利用に関して、用途拡大をはかる一つの方法として、再生コンクリートとして RC 建物の上部構造へ利用する方法が考えられる。本報では上部構造をハーフ PCa 構造として、外殻部を普通コンクリートで造ったハーフ PCa 部材の後打ち部に再生コンクリートを用い、部材の接合を重ね継手で接合した 1 層 1 スパン骨組試験体の水平加力実験を行い、実験で得られた結果と材端バネ法による弾塑性解析を行った結果とを比較検討し、実用化に向けた設計方法の妥当性を確認した。

キーワード：再生コンクリート，ハーフ PCa 骨組，重ね継手，弾塑性解析

## 1. 目的

前報の「重ね継手接合部を持つ再生コンクリートを用いたハーフ PCa 骨組に関する実験研究」<sup>1)</sup>(以下、骨組実験という)に引き続き、本報ではコンクリート塊の有効利用のため、再生コンクリートとして再生骨材を建築物の上部構造へ適用する可能性を追求している。本報では低品質な再生粗骨材を用いた再生コンクリートを使用しているが、その場合、例えばヤング係数が小さいなど普通コンクリートに比べ材料的性能に関し課題が残り、部材の剛性低下などに対して懸念が残る。そこで、文献2)において再生コンクリートをハーフ PCa 部材の後打ち部に用い普通コンクリートで造られた外殻部と複合的に用いることで再生コンクリートが保有している材料的課題を補い得ることを検証した。また、文献3)では、実際にハーフ PCa 部材として利用することを前提として、施工の容易性から主筋とせん断補強筋を内蔵している構造形態とし、部材の接合には力学的にも自由度の高い重ね継手で接合し、重ね継手接合部を持つ再生コンクリートを用いたハーフ PCa 部材の耐

震性能を究明した。そこで、前報の骨組実験では、文献3)より耐震性能を保有していると確認されたハーフ PCa 部材(はり部材に関しては U 型断面、柱部材に関しては口型断面)を重ね継手で接合し、1 層 1 スパン骨組として水平加力実験を行い、部材同様に骨組としても十分な耐震性能を保有していることを確認した。本報では、さらに検討を加え前報の骨組実験で得られた実験結果と、材端バネ法による骨組の弾塑性解析との比較検討を行い、実用化に向けた設計方法の妥当性を確認することを目的としている。

## 2. 試験体概要

### 2.1 試験体種別

試験体種別を表 - 1 に示す。試験体は、ハーフ PCa 骨組の試験体 1 体と、一体打ち骨組の試験体 1 体の計 2 体である。ハーフ PCa 骨組のはり部材に U 型ハーフ PCa はり部材を用い、柱部材に口型ハーフ PCa 柱部材を用いた 1 層 1 スパン骨組である。U 型ハーフ PCa はり部材は外殻部に下端主筋とせん断補強筋を内蔵している。口型ハーフ PCa 柱部材は外殻部に主

\*1 西松建設 技術研究所技術研究部建築技術研究課(正会員)

\*2 東北工業大学教授 工学部建築学科 工博(正会員)

表 - 1 試験体種別

試験体名	種別	外殻部 コンクリート	後打ち部 コンクリート	重ね 継手筋	PCa 主筋	備 考
FRPC-295	ハーフ PCa	普通 $f_c=38.8$ N/mm <sup>2</sup>	再生 $f_c=36.4$ N/mm <sup>2</sup>	SD 295	SD 295	はり試験区間 1250mm 柱試験区間1000mm B×D=250×250mm はりせん断スパン比 2.5 柱せん断スパン比2.0
FN-295	一体 打ち	普通 $f_c=37.1$ N/mm <sup>2</sup>		SD295		

筋とせん断補強筋を内蔵している。使用主筋はSD295であり使用コンクリートは外殻部を普通コンクリートとし後打ち部に再生コンクリートを用いている。はり上端主筋は一本物として通し配筋とするが下端主筋は重ね継手により鉄筋を接合している。柱部材においては全主筋とも重ね継手で接合し、継手長さは全部材とも40dで共通である。重ね継手筋はSD295である。また、比較用として主筋にSD295を用いた一体打ち試験体を設けた。全試験体とも、はり降伏型の曲げ破壊型の骨組に設計している。外殻部の普通コンクリート強度と後打ち部に用いた再生コンクリート強度はほぼ同一強度のものである。

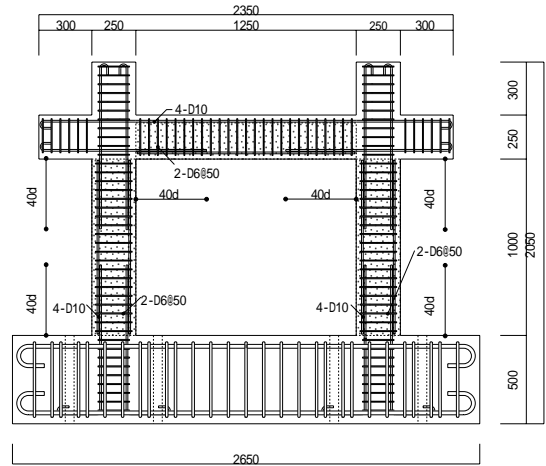
### 2.2 試験体の形状、寸法、および配筋

試験体の形状と寸法は全試験体とも共通である。形状と寸法を図 - 1 に示す。はりせい  $D=25\text{cm}$ 、はり幅  $B=25\text{cm}$ 、試験区間長さ  $l=125\text{cm}$ 、せん断スパン比 ( $a/D$ ) は2.5である。柱せい  $D=25\text{cm}$ 、柱幅  $B=25\text{cm}$ 、試験区間長さ  $l=100\text{cm}$ 、せん断スパン比 ( $a/D$ ) は2.0である。断面配筋の詳細を図 - 2 に示す。U型および口型ハーフ PCa 部材の外殻部の厚さは全て45mmである。主筋および重ね継手筋はSD295の4-D10、ハーフ PCa 内蔵のせん断補強筋および一体打ち試験体のせん断補強筋はSD345@50を用い全試験体とも共通である。外殻部の内部の表面には、図 - 3 に示すようなシャークコッターを設けた。

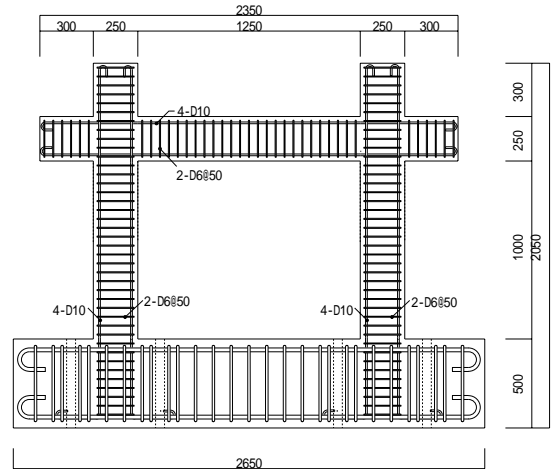
## 3. 使用材料

### 3.1 再生粗骨材

再生粗骨材は、実験室で製造した普通コンクリート ( $f_c=23.9\text{N/mm}^2$ ) をジョークラッシャー

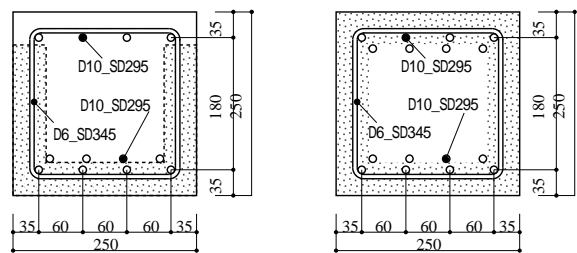


ハーフPCa試験体 (FRPC-295)



一体打ち試験体 (FN-295)

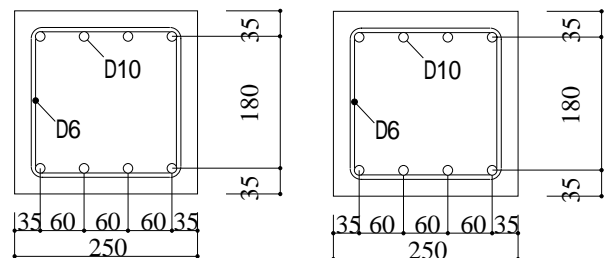
図 - 1 試験体の形状と寸法



はり部材

柱部材

ハーフPCa試験体 (FRPC-295)



はり部材

柱部材

一体打ち試験体 (FN-295)

図 - 2 断面配筋の詳細

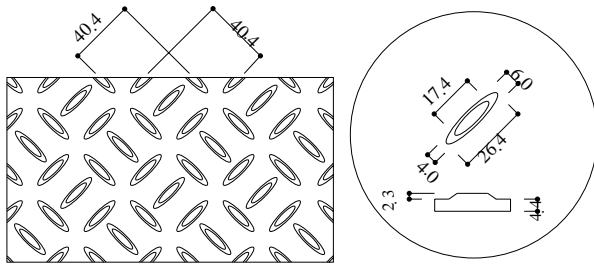


図 - 3 シヤーコッターの詳細図

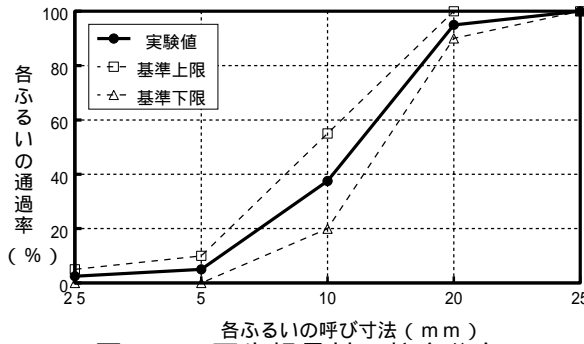


図 - 4 再生粗骨材の粒度分布

表 - 2 再生粗骨材の材料試験の結果

項目	測定値
表乾比重	2.34
絶乾比重	2.18
吸水率 (%)	7.40
洗い損失量 (%)	0.02

表 - 3 再生骨材暫定品質基準(案)

項目	再生粗骨材		
	1種	2種	3種
吸水率 (%)	3以下	3を超え5以下	5を超え7以下
洗い損失量 (%)	1.5以下		

を用い破碎し製造した。製造した再生粗骨材を「再生骨材の暫定品質基準(案)」<sup>4)</sup>(以下、基準(案))に示されている粒度曲線の上限值と下限値の平均値に近づけるよう粒度分布の調整を行った。実験に用いた再生粗骨材の粒度分布を図 - 4 に示す。また、使用した再生粗骨材の材料試験の結果を表 - 2 に示す。基準(案)に示されている再生粗骨材の品質基準を表 - 3 に示す。表 - 2 および表 - 3 より、本実験で使用した再生粗骨材は吸水率が大きく3種にも適合しない低品質なものであった。なお、細骨材には川砂を用いた。

### 3.2 再生コンクリートおよび普通コンクリート

後打ち部の再生コンクリートおよび外殻部と一体打ちの普通コンクリートとも早強ポルトランドセメントを用いた。再生コンクリートの調合表を表 - 4 に示す。普通コンクリートは通常のレディーミクストコンクリートを用いた。コンクリートの性質を表 - 5 に示す。後打ち部の再生コンクリートは圧縮強度が  $\sigma_b=36.4$  N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は  $E_c=2.45 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup> であり、外殻部の普通コンクリートの圧縮強度は  $\sigma_b=38.8$  N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は  $E_c=3.49 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup> であった。再生と普通コンクリートの強度はほぼ同一であった。ヤング係数は再生コンクリートの方が小さかった。また、一体打ち試験体のコンクリートは、圧縮強度が  $\sigma_b=37.1$  N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は  $E_c=3.32 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup> であった。

表 - 4 再生コンクリートの調合表

W/C	スラブ <sup>o</sup>	Air	s/a	単位質量 [kg/m <sup>3</sup> ]				
				W	C	S	G	減水剤
[%]	[cm]	[%]	[%]	W	C	S	G	減水剤
45	18	3.0	42	181	411	693	895	4.52

表 - 5 コンクリートの性質

コンクリート種別	部位	圧縮強度 $\sigma_b$ (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度時ひずみ $\epsilon_b$ (%)	ヤング係数 $E_c$ (N/mm <sup>2</sup> )
再生	後打ち	36.4	0.223	$2.45 \times 10^4$
普通	外殻	38.8	0.179	$3.49 \times 10^4$
	一体打	37.1	0.186	$3.32 \times 10^4$

### 3.3 鉄筋

鉄筋の機械的性質を表 - 6 に示す。主筋はSD295の D10を、せん断補強筋は全試験体ともSD345の D6を用いた。主筋は全て明確な降伏点を有するものであった。せん断補強筋 D6は明確な降伏点を持たないものであった。

### 4. 加力および変位測定方法

加力装置を図 - 5 に示す。加力の方法は、まず、軸力を载荷し、次いで水平荷重を载荷した。

表 - 6 使用鉄筋の機械的性質

鉄筋種別	鉄筋径	鉄筋強度	降伏耐力 $y$ (N/mm <sup>2</sup> )	降伏点ひずみ $y$ (%)	ヤング係数 $E_y$ (N/mm <sup>2</sup> )
主筋	D10	SD295	351	0.186	$1.90 \times 10^5$
あばら筋	D6	SD345	404	0.232	$1.76 \times 10^5$

実験中は軸力(1/8  $\sigma$ )を一定に保持した。加力は変位制御とし、正負1回ごとに繰り返し、(R=)3.0/100rad.までは0.5/100rad.ごとに、それ以後は1.0/100rad.ごとに制御した。変位測定方法を図 - 6 に示す。試験体の層間変位を変位計(1/100mm 精度)で測定した。主筋とあばら筋のひずみをワイヤーストレインゲージ(検長2mm)で測定した。

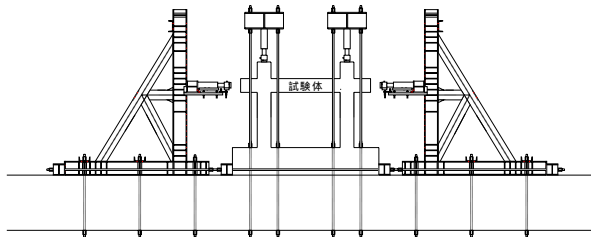


図 - 5 加力装置

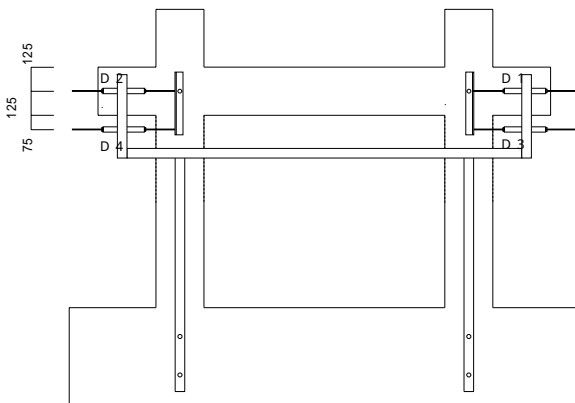


図 - 6 変形測定方法

## 5. 実験および解析結果

### 5.1 実験結果の比較

各試験体の実験結果を表 - 7 に示す。表には各試験体の最大荷重, 最大荷重時部材角, および破壊形式を示した。最大荷重と最大荷重時部材角は正負荷重時の平均値である。全試験体とも主筋の降伏が確認された。

図 - 7 にハーフ PCa 試験体(FRPC-295)と一

表 - 7 実験結果一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	最大荷重時部材角 (1/100rad.)	破壊形式
FRPC-295	165.6	2.4	F C
FN-295	165.4	1.8	

F C : 主筋降伏後のコンクリート圧壊による曲げ破壊

体打ち試験体(FN-295)のQ - R曲線をそれぞれ比較して示す。図 - 7におけるQは、水平せん断力であり、Rは層間部材角である。層間部材角 R = 2.0/100rad.程度まではハーフ PCa 試験体と一体打ち試験体の履歴曲線はよく近似している。しかし、R > 2.0/100rad.と層間部材角の大きい範囲ではハーフ PCa 試験体の履歴曲線は一体打ち試験体のものより逆 S 傾向が強くなる性状が認められた。但し、全試験体とも主筋の降伏後は大きな荷重の増大があまり見られず変形が増大してもほぼ一定の荷重を維持し、最大荷重に達した後の耐力低下も緩やかな靱性に富んだ典型的な曲げ破壊型の履歴ループを示した。以上より、再生コンクリートを用いたハーフ PCa 部材を重ね継手で接合した骨組でも、一体打ちと同様な傾向を示し実用的な層間部材角 R = 2.0/100rad.程度の範囲までは履歴ループに与える影響は小さいことが認められた。

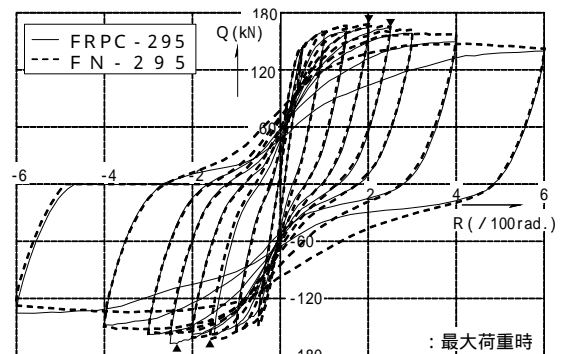


図 - 7 Q - R 曲線の比較

### 5.2 解析結果の比較

通常用いられている材端パネ法による弾塑性解析を行い、実験から得られた骨組の力学的特性と解析結果との比較検討を行う。ここでの目

的は、本実験のような型式の試験体の解析的評価が汎用法によりどの程度評価できるのか、まず、その妥当性を確認するものとする。なお、剛塑性バネの履歴ルールの妥当性は、文献3)の部材実験結果との比較により確認している。

(1) 試験体のモデル化と解析方法

試験体のモデル化を図 - 8 に示す。柱脚固定とし、柱・はり接合部分はせん断変形を考慮し、はり・柱部材端には武田モデルの剛塑性バネを用いた。解析は、柱頭に初期条件として  $b/8$  の軸応力度を加え、水平加力を荷重増分で行った。変位の繰り返しは、実験の繰り返し変位に合わせて各1回ずつ正負くり返し加力を変位制御で行った。また、ハーフ PCa 試験体の解析用コンクリート強度は、柱およびはり断面における PCa 部分と後打ち部分の面積比による平均のコンクリート強度とした。

(2) 剛塑性バネの履歴ルール

剛塑性バネのスケルトンカーブは図 - 9 に示すように、原部材の変形量から弾性材の変形量を差し引いたものとした。図 - 9 の各点および剛性は式(1) ~ (8)とした。なお、(2)式ははりの(3)式は柱の降伏モーメントの算定式である。

- ・ ひびわれモーメント:  
 $M_c = 1.8 \cdot b \cdot Z_e + ND/6 \dots (1)^5$
- ・ 降伏モーメント:  
 $M_u = 0.9 \cdot a_t \cdot f_y \cdot d \dots (2)^5$   
 $M_u = (d_1 - d_{c1}) a_t f_y D + ND$   
 $(g_1 - (k_2 N / k_1 k_3 b D) \cdot b) \dots (3)^5$
- ・ 剛性低下率:  
 $\gamma = (0.043 + 1.64 n p t + 0.043 a / D + 0.33 \cdot o) \times (d / D)^2 \dots (4)^5$
- ・ 初期剛性:  
 $S_1 = \dots (5)$
- ・ 降伏時剛性:  
 $S_2 = K_0 / (1 / \gamma - 1) \dots (6)$
- ・ ひびわれモーメントと降伏モーメントを結ぶ剛性:  
 $S_3 = (M_y - M_c) / M_y \times S_2 \dots (7)$
- ・ 降伏モーメント後の剛性:  
 $S_4 = K_0 / (1 / (3/100 \cdot \gamma) - 1) \dots (8)$

【記号の説明】

$b$ : 実験時コンクリート強度  $Z_e$ : 鉄筋を考慮した断面係数  $N$ : 軸力  $D$ : 断面せい  $a_t$ : 引張鉄筋断面積  $f_y$ : 鉄筋降伏耐力  $d$ : 有効せい  $d_1, d_{c1}$ :  $d_1, d_{c1} / D$   $g_1$ :  $g / D$   $k_1, k_2, k_3$ : 圧縮応力ブロック形状係数  $n$ : ヤング係数比  $p t$ : 引張鉄筋比  $a / D$ : せん断スパン比  $o$ : 軸力比

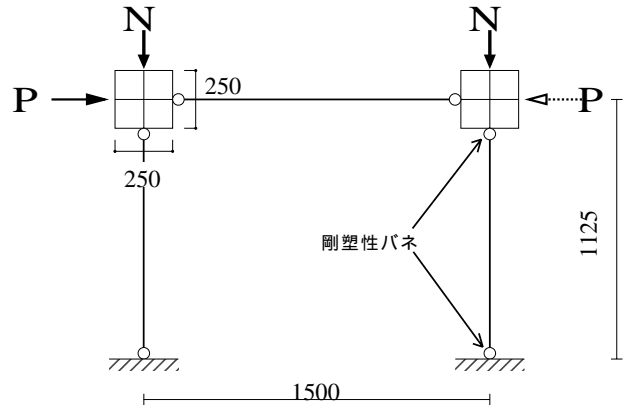


図 - 8 骨組のモデル化

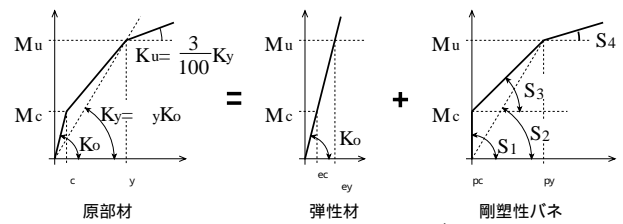


図 - 9 スケルトンカーブの仮定

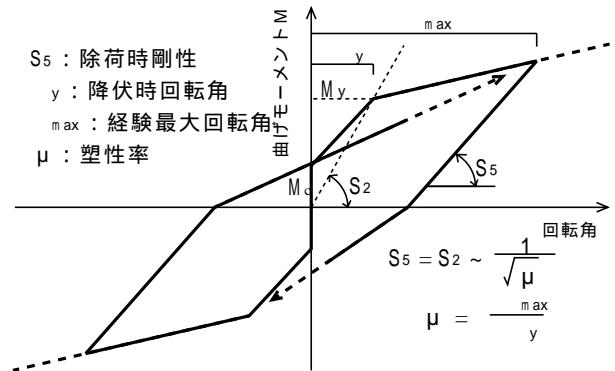


図 - 10 剛塑性バネの

正負くり返しにおける履歴ルール

剛塑性バネの正負くり返しにおける履歴ルールは、通常用いられている武田モデルを用いて図 - 10 に示した。くり返しにおける履歴ルールは、除荷時に、塑性率 ( $\mu$ ) による除荷剛性の低下を考慮し、載荷時は経験最大変位を目指す最大変位指向型である。

(3) 解析結果と実験結果との比較

解析結果と実験結果の骨組の履歴ループの比較として、ハーフ PCa 試験体 (FRPC-295) のものを図 - 11 に示した。図から分かるように、解析結果の履歴ループは、実験結果の履歴ループに比べ荷重の小さい履歴ループを示したが全体的な傾向としてはほぼ追跡できることが認め

られた。しかし、実験値の2.0/100rad.を超えた所からの逆S傾向は、解析では評価できていない。また、最大荷重の正負平均のものを解析値と実験値で比較して図-12に示した。図より、解析値の最大荷重は、実験結果の最大値より約1割ほど小さく、安全側に評価できることが認められた。また、等価粘性減衰定数の解析値と実験値の比較を図-13の定義をもとに図-14に比較して示した。図から分かるように解析結果と実験結果とも部材角の増加とともに $h_{eq}$ の値が増加する右上がりの傾向を示し、実験値とほぼ同様の傾向を示した。解析値と実験値の相関は近似していた。

## 6. まとめ

再生コンクリートを用いた重ね継手接合されたハーフ PCa 骨組に対し、水平加力実験および材端バネ法による弾塑性解析を行い、実験値と比較検討した結果、本解析結果の範囲内で次のことが認められた。

- (1)汎用法による弾塑性解析の結果、履歴ループは実験結果とほぼ同傾向を示し最大荷重は安全側を示した。また、等価粘性減衰定数もほぼ実験値と同程度であった。
- (2)本実験のように重ね継手長さが十分な場合、一体打ち部材と同様にくり返し履歴ループに武田モデルが利用でき、骨組の設計に適用できる可能性が認められた。
- (3)以上のことから、低品質な再生粗骨材を用いた再生コンクリートであっても本研究範囲内であれば架構部材として上部構造へ利用できる適用性を確認できた。
- (4)実用範囲を超えた大変形時のスリップ傾向のモデル化は今後の課題として残っている。

### 【参考文献】

- 1) 三浦誠司, 宮下剛士, 西浦範昭, 田中礼治: 重ね継手接合部を持つ再生コンクリートを用いたハーフ PCa 骨組に関する実験研究: Vol. 23, No. 3, 2001, pp. 703~708
- 2) 西浦範昭, 笠松照親, 宮下剛士, 田中礼治: 再生コンクリートを用いたハーフ PCa はり部材に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 22, No. 2, 2000, pp. 1189~1194
- 3) 西浦範昭, 笠松照親, 宮下剛士, 田中礼治: 重ね継手接合部を持つ再生コンクリートを用いたハーフ PCa 部材に関する実験研究: Vol. 23, No. 3, 2001, pp. 625~630
- 4) (財)国土開発技術研究センター: 建設副産物の発生抑制・再生利用技術の開発報告書, 平成9年度
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1988

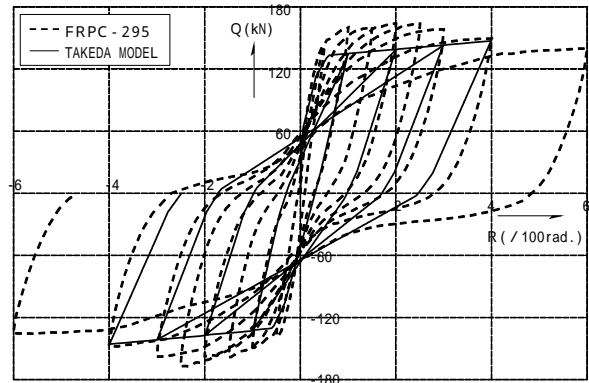


図-11 履歴ループの比較

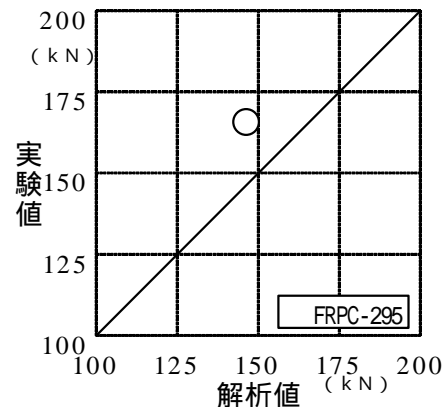


図-12 最大荷重の比較

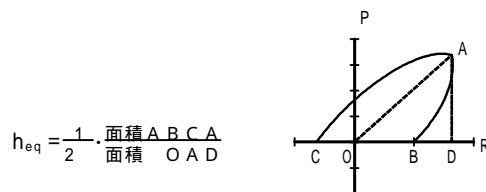


図-13 等価粘性減衰定数の定義

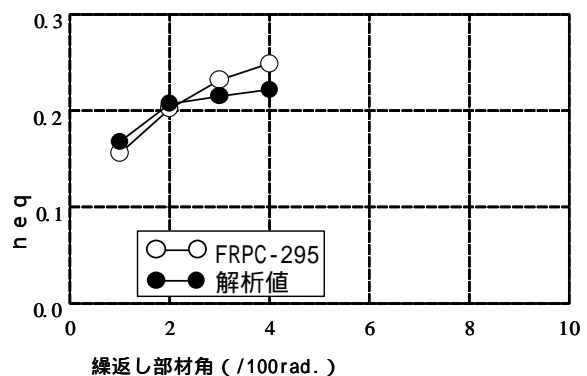


図-14 等価粘性減衰定数の比較