

論文 鉄筋再生コンクリートはりの力学特性に関する実験的検討

十河 勝*¹ 曾我部 貴久*¹ 丸山 一平*² 佐藤 良一*³

要旨：再生骨材を用いた鉄筋コンクリート部材の力学特性を再生骨材の種類と組み合わせ、養生条件、水セメント比、膨張材の混和の有無および有効高さをパラメータとして鉄筋コンクリートはりを作製し、RC はり曲げおよびせん断特性について実験的に検討した。

その結果、再生骨材を用いた RC 部材は通常の骨材を用いた RC 部材よりもひび割れ幅およびたわみが大きく、公称せん断強度が低下するといった傾向が見られた。この傾向は特に細骨材として再生骨材を使用した場合に顕著であった。しかし、水セメント比の低減および膨張材の混和によって、再生 RC 部材の力学特性を改善することができる。

キーワード：再生骨材，RC はり部材，力学特性，水セメント比，膨張材

1. はじめに

近年、構造物の老朽化などにより既存の構造物が解体され、その再利用、特に構造用材料としての利用技術が強く求められている。そのため、再生骨材を使用した研究も増加しつつある。これまで、再生骨材を用いた鉄筋コンクリート(以下RC)部材の力学特性は通常の骨材を用いた場合に比べ、曲げ・せん断性状ともに低下することが明らかとなっている^{1) 2)}。しかし、再生骨材を用いたコンクリートの力学特性の改善を目的とした研究は少ない。そこで本研究では水セメント比の低減、膨張材(石灰系、30kg/m³使用)の混和によるRC部材の力学特性の改善効果および再生RCにおけるせん断補強筋の効果について実験的に検討した。また、既往の研究と比較し、

再生骨材の品質、養生条件の相違による影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用骨材および配合

本研究で使用した骨材の品質を表 - 1 に示す^{1) 2)}。本研究で用いた再生骨材(現場再生骨材)は、コンクリート廃材をジョークラッシャーにより一次破碎し、インパクトクラッシャーにより二次破碎した後、不純物を取り除いて製造した再生骨材である。既往の研究で使用した再生骨材と本研究で用いた再生骨材の品質はほぼ同等であった。すべての再生骨材は粗骨材・細骨材ともにJISによる規格を満足していない。表 - 2 に骨材の組み合わせによる配合の一覧を示す。

表 - 1 使用骨材の品質

粗骨材	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率	細骨材	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)	粗粒率
JIS A 5308		2.5	3.0		JIS A 5308		2.5	3.5	
碎石 1	2.69	2.68	0.61	6.56	陸砂	2.60	2.56	1.44	2.64
碎石 2	2.70	2.56	2.55	6.59	川砂 1	2.60	2.54	2.28	2.91
碎石 3	2.66	2.64	0.69	6.73	川砂 2	2.63	2.56	2.63	2.97
現場再生粗骨材 1	2.46	2.32	6.18	6.37	現場再生細骨材 1	2.23	1.98	12.51	2.66
現場再生粗骨材 2	2.45	2.32	5.57	6.65	現場再生細骨材 2	2.30	2.07	11.21	2.90
再生粗骨材 (CR45)	2.42	2.28	5.96	6.67	再生細骨材 (FR45)	2.32	2.11	9.94	3.17
再生粗骨材 (CR60)	2.37	2.23	6.27	6.59	再生細骨材 (FR60)	2.34	2.14	9.11	3.24

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)
 *2 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻助手 博(工) (正会員)
 *3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

2.2 供試体の作製

コンクリートの圧縮強度およびヤング係数試験用に $10 \times 20\text{cm}$ ，割裂引張試験用に $15 \times 20\text{cm}$ の供試体を作製した。さらに曲げ破壊型の RC はりとせん断破壊型の RC はりを各配合について作製した。表 - 3 に供試体寸法および概要を示す。せん断供試体についてはせん断スパン比($a/d=3.1$)を一定とし，せん断補強筋(D6)を有する RC はり供試体も作製した。

2.3 測定方法および載荷方法

圧縮強度および割裂引張強度はそれぞれ JIS A 1108 および JIS A 1113 に従い測定した。

RC 曲げ供試体についてはスパン中央に，RC せん断供試体については支点，せん断スパン中央，載荷点位置の鉄筋の上下面にひずみゲージを貼付し，鉄筋ひずみを測定した。

載荷は曲げ，せん断供試体に拘わらず 2 点載荷とした。RC はりのたわみおよび曲率は支点，載荷点，スパン中央に変位計(精度 $1/1000\text{mm}$)を設置することにより測定した。RC 曲げ供試体においてひび割れ幅は引張鉄筋位置と同じ高さに型変位計(標点距離 100mm ，精度 $1/1000\text{mm}$)を設置し測定した。載荷方法は曲げ供試体の場合，

表 - 2 骨材の組み合わせによる配合の一覧

記号	粗骨材	細骨材
VC1	砕石 1	陸砂
VC2	砕石 2	川砂 1
VC3	砕石 3	川砂 2
CRC1	現場再生粗骨材 1	陸砂
CRC2	CR45	川砂 1
CRC3	CR60	川砂 1
FRC60	砕石 3	FR60
CFRC1	現場再生粗骨材 1	現場再生細骨材 1
CFRC2	現場再生粗骨材 2	現場再生細骨材 2
CFRC3	CR45:CR60=2:1で混合(質量比)	FR45:FR60=2:1で混合(質量比)

ひび割れ発生までに 2 回，ひび割れ発生後は鉄筋応力が $50\text{N}/\text{mm}^2$ 増加ごとに除荷，引張鉄筋降伏後は鉄筋降伏時のたわみを y とし， $2y$ ごとに除荷しつつ載荷した。RC せん断供試体については土木学会式³⁾による計算により求めた斜めひび割れ発生荷重の約 20，40，60，80%の荷重で除荷しつつ載荷を行なった。

3. 結果と考察

3.1 コンクリートの諸物性

材齢 28 日標準養生におけるコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係，ヤング係数とセメント水比の関係を図 - 1，図 - 2 に示す。圧縮強度は，再生骨材を粗骨材として用いた場合，

表 - 3 供試体の概要

供試体	全長 (mm)	高さ (mm)	幅 (mm)	等曲げ区間 (mm)	せん断スパン (mm)	有効高さ (mm)	引張鉄筋	引張鉄筋比 (%)	せん断補強筋比 (%)
曲げ供試体	2800	200	150	800	700	160	2D13	1.06	-
せん断供試体	1800	200	150	200	500	160	2D19	2.39	-
	1800	200	150	200	500	160	2D25	4.22	0.53
	3000	400	150	400	1050	335	4D25	4.03	-
	3000	400	150	400	1050	335	4D25	4.03	0.26

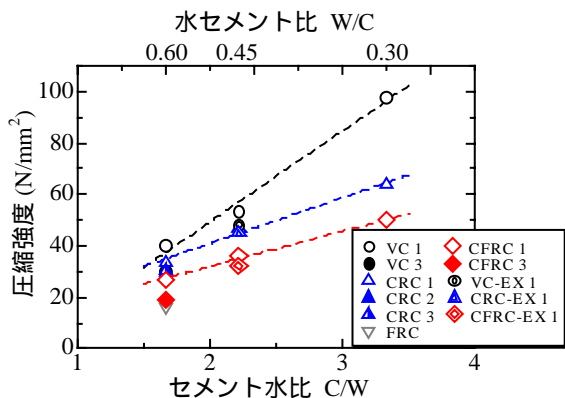


図 - 1 圧縮強度とセメント水比の関係

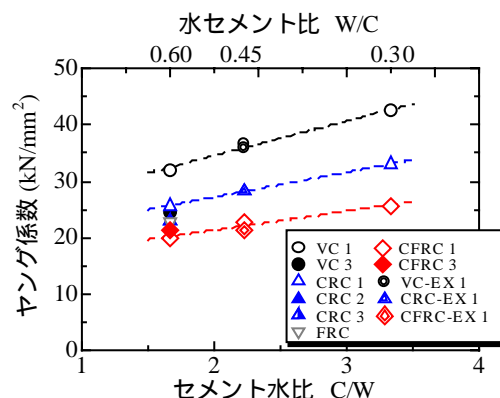


図 - 2 ヤング係数とセメント水比の関係

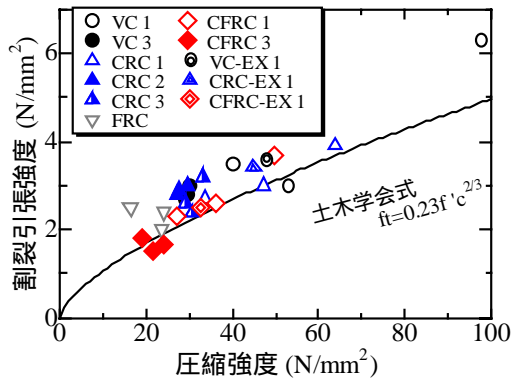


図 - 3 圧縮強度と割裂引張強度の関係

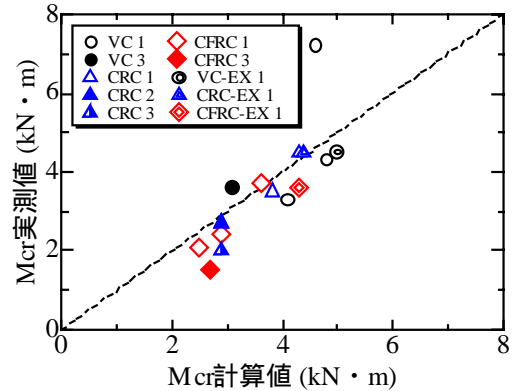


図 - 4 ひび割れ発生モーメントの実測値と計算値の比較

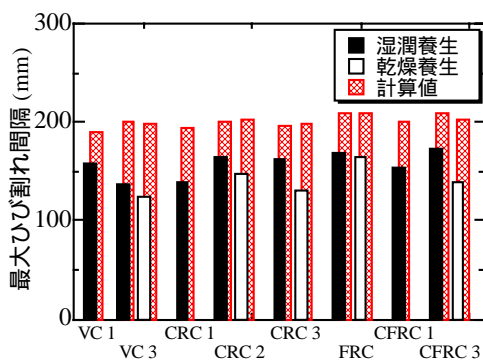


図 - 5 最大ひび割れ間隔
(養生・骨材の組み合わせによる比較)

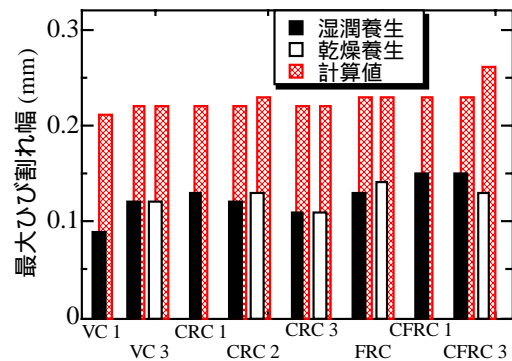


図 - 6 最大ひび割れ幅
(養生・骨材の組み合わせによる比較)

VC 1 の 70~90% の範囲に、粗骨材・細骨材として用いた場合は VC 1 の 50~70% の範囲の値となった。しかし、図に示すように強度の増加勾配は通常のコンクリートと比較して小さいものの、いずれの骨材の組み合わせであってもセメント水比が大きくなるにつれて線形の関係で増加することが認められる。CRC 1 と CFRC 1 の比較では強度に違いは見られるが強度増加率に関してはほとんど変わらない。ヤング係数は、水セメント比に拘わらず、再生粗骨材を用いた場合、通常の骨材を用いた場合の約 80%、粗骨材・細骨材に用いた場合は、約 60% の値となった。セメント水比の増加によるヤング係数の増加勾配は骨材の組み合わせに拘わらず、通常の骨材を用いた場合とほぼ同様であった。図 - 3 に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。図中の曲線は土木学会式による圧縮強度と引張強度の関係式である。再生骨材を用いた場合であっても土

木学会式とほぼ一致していることが認められる。このことから、再生コンクリートであっても、通常のコンクリートと同様に土木学会式を用いることにより圧縮強度から引張強度の推定ができる。また、膨張材の混和による強度特性への影響はほとんど見られなかった。

3.2 RC はりの曲げ性状

3.2.1 ひび割れ発生モーメント

図 - 4 にひび割れ発生モーメントの実測値と計算値の比較を示す。計算値は割裂引張強度を用いて、RC はり載荷前の収縮・膨張による拘束応力を考慮して算出した値である。再生骨材を用いることにより、ひび割れ発生モーメントは低下していることがわかる。全体的に実測値は計算値よりも小さな値を示しているが、割裂引張強度を用いた計算値は実測値の ±20% 程度の値を示しており、膨張材の混和による載荷前の拘束応力の影響も計算によっておおむね表現で

きている。また、膨張材の混和によってひび割れ発生モーメントは増加した。

3.2.2 ひび割れ間隔，ひび割れ幅

図 - 5，図 - 6 に骨材の組み合わせ，養生条件が異なる場合，図 - 7，図 - 8 にW/C，骨材の組み合わせおよび膨張材の混和による鉄筋応力度が 200N/mm^2 の時の最大ひび割れ間隔および最大ひび割れ幅を示す。図中の計算値は土木学会式³⁾による値である。図 - 5，図 - 6 からひび割れ間隔に関しては乾燥を受けた場合に小さくなる傾向が見られる。また，各骨材の組み合わせの平均値を比較すれば，再生コンクリートの場合，最大ひび割れ間隔・幅ともに大きくなる傾向が見られる。図 - 7，図 - 8 からW/Cを低減することでひび割れ間隔は大きく，ひび割れ幅は小さくなる傾向が見られる。最大ひび割れ幅は再生骨材，特に再生細骨材を用いたときに大きくなる傾向にある。これは再生コンクリートの付着の効果が通常のコンクリートに比べ小さくなるためである。しかし，再生骨材を用いた

場合であっても土木学会式の計算値よりは 0.1mm 程度小さく，ひび割れ幅が問題となるほどには大きくなる。ない。

3.2.3 使用状態におけるたわみ

図 - 9 に骨材の組み合わせ，養生条件が異なる場合，図 - 10 にW/C，骨材の組み合わせおよび膨張材の混和による鉄筋応力度が 200N/mm^2 の時のRCはりスパン中央のたわみを示す。図中の計算値はRCはり載荷前の収縮・膨張が鉄筋により拘束されることによって生じる応力の影響を考慮して算出した値である⁴⁾。図 - 9 から乾燥によりたわみが大きくなる傾向が見られる。これは載荷前に乾燥によりコンクリートが収縮し，鉄筋に拘束されることによって蓄積された鉄筋応力(引張)と部材上縁のコンクリート応力(圧縮)で構成される曲率に相当するたわみが載荷後のたわみに加算されるという考え方⁴⁾により説明することができる。また，図 - 10 より再生細骨材を用いた場合，特にたわみが大きくなる。この主たる原因としては，再生コンクリートのヤ

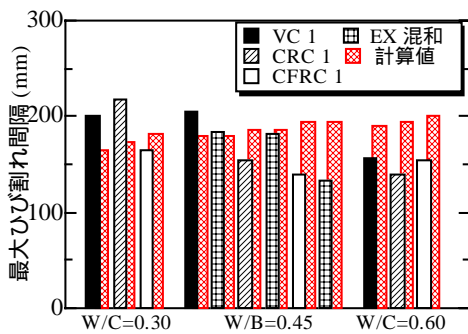


図 - 7 最大ひび割れ間隔

(骨材の組み合わせ・W/C による比較)

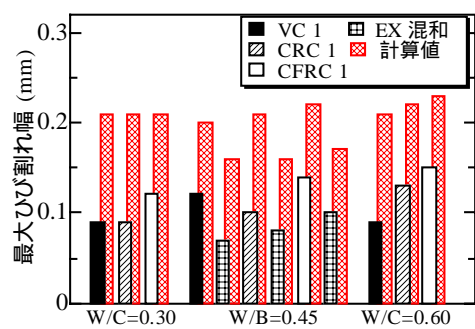


図 - 8 最大ひび割れ幅

(骨材の組み合わせ・W/C による比較)

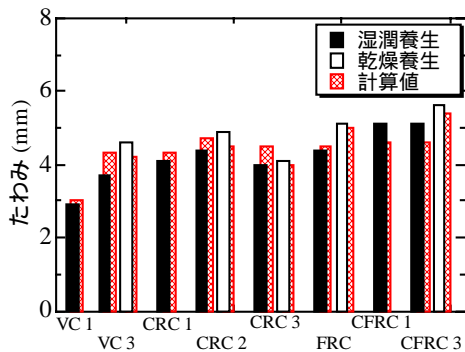


図 - 9 たわみ

(養生・骨材の組み合わせによる比較)

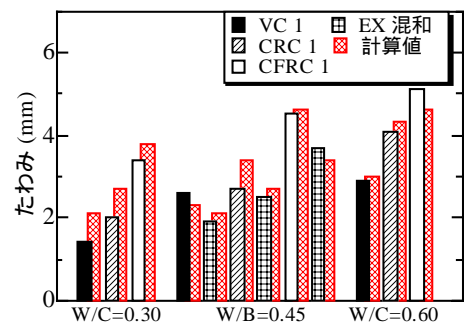


図 - 10 たわみ

(骨材の組み合わせ・W/C による比較)

ング係数が小さいことが考えられる。膨張材の混和により、普通、再生コンクリートに拘わらずたわみが小さくなっている。これは先に述べた収縮の場合と逆の作用が働いているためである。しかし、再生骨材を用いた場合、収縮・膨張が生じる場合であっても計算によって、たわみの予測は可能であると考えられる。

3.3 RC はりのせん断性状

3.3.1 変形状

図 - 11 に RC はりの荷重-たわみの関係の一例を示す。図より、骨材の組み合わせ、膨張材の混和の有無に関係なく斜めひび割れが発生した後、若干のアーチアクションを起こし、その後破壊に至っていることがわかる。

3.3.2 せん断耐力

図 - 12 に斜めひび割れ発生時公称せん断応力(公称せん断強度: c)の実測値と計算値の比較を示す。図中の計算値は以下に示す土木学会式により求めた。なお膨張材を混和した RC はりについては膨張材の効果を軸力と仮定し、式(1)の M_0/M_d によって考慮した。

$$c = 0.2 \left(1 + \frac{M_0}{M_d} \right)^3 \sqrt{f'_c} \sqrt[3]{100 P_v} \sqrt[4]{1/d} \quad (1)$$

f'_c : 圧縮強度 P_v : 鉄筋比

d : 有効高さ

M_d : 終局限界状態に対する荷重を用いて求めた設計曲げモーメント

M_0 : 引張縁に軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要な曲げモーメント

図 - 12 から再生RCはりの公称せん断強度は通常のRCはりの値よりも 10~20%程度小さな値となった。再生骨材の使用による公称せん断強度の低下の原因として、骨材のかみ合わせの効果が小さいことが考えられる。しかし、再生骨材を用いた場合であっても式(1)の計算値よりは大きな値となった。せん断強度の大きさの視点からみれば、養生条件の相違による影響は明確には認められなかった。また、膨張材の混和により、骨材の組み合わせに拘わらず約 10%の公称せん断強度の増加が見られた。これは軸力の

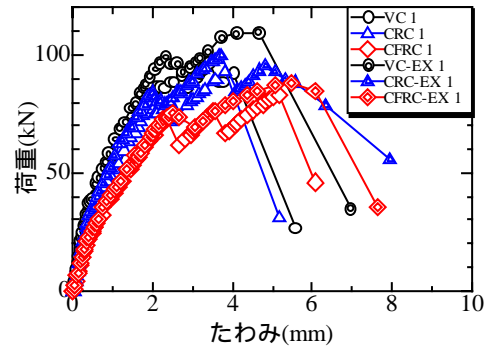


図 - 11 荷重-たわみ関係 (W/B=0.45)
(骨材の組み合わせ・膨張材の有無による影響)

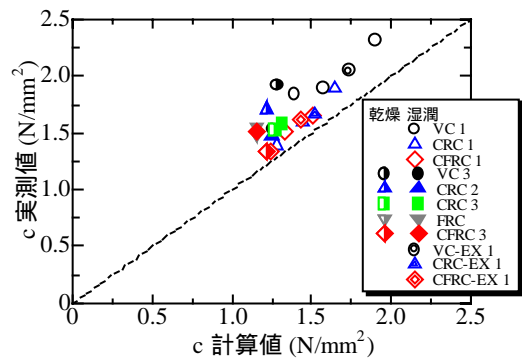


図 - 12 公称せん断強度の
実測値と計算値の比較

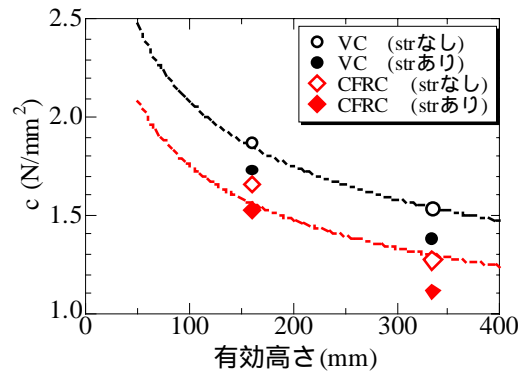


図 - 13 寸法効果

効果により、せん断抵抗する圧縮部が大きくなること、ひび割れ幅が小さくなることによるかみ合わせの効果が増加したため、せん断抵抗が増加したと考えられる。図 - 13 に公称せん断強度に及ぼす寸法効果の影響を示す。図中の破線は式(1)で鉄筋比 4.0 圧縮強度 30, 50N/mm²とした場合の曲線である。再生コンクリートのせん断強度に及ぼす寸法効果の影響は式(1)による傾きよりも若干大きくなっている。しかし、データ数が少ないためバラツキの範囲内であるとも

考えられる。図 - 14 にせん断補強筋を有するRCはりの破壊の要因となった主たる斜めひび割れが跨ぐせん断補強筋のせん断分担力を示す⁵⁾。図中の V_s はせん断補強筋の分担力、 V_c はコンクリートの分担力を示している。再生骨材を用いた場合でも計算値にほぼ一致するせん断力からせん断補強筋の受けもつせん断力が増加し、トラス理論による値に平行に増加していることがわかる。このことから、再生骨材を用いた場合であっても通常のコンクリートと同様にせん断補強筋によるせん断抵抗効果が得られると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲内で以下の結論が得られた。

- (1) 再生コンクリートの強度特性は通常のコンクリートに比べて低下した。特に細骨材として再生骨材を用いた場合に通常のコンクリートの50~70%と低下が著しい。しかし、セメント水比の増加による強度増加率には線形の関係があり性能向上が図れることが認められた。
- (2) 鉄筋応力度が 200N/mm^2 における再生骨材を用いたRCはりの最大ひび割れ幅は再生骨材の使用によって通常のRCはりよりも大きくなる傾向がある。しかし、土木学会式により得られる計算値の値より 0.1mm 程度小さい。また、膨張材の混和によるひび割れ幅抑制効果は認められ、20~30%程度小さくなった。
- (3) 鉄筋応力度が 200N/mm^2 におけるRCはりのたわみは再生骨材を使用すると大きくなる。また、膨張材によるたわみの抑制効果は通常のコンクリートで約 25%、再生コンクリートで5~15%程度であった。また、それらの傾向は計算により予測可能である。
- (4) 再生骨材を用いた RC はりの斜めひび割れ発生時せん断強度は通常の RC はりの 10~20%程度小さくなった。養生条件の相違による公称せん断強度への影響は明確には認められなかった。また、膨張材の混和により配合に関係なく、斜めひび割れ発生時せん断強度は約 10%大きくな

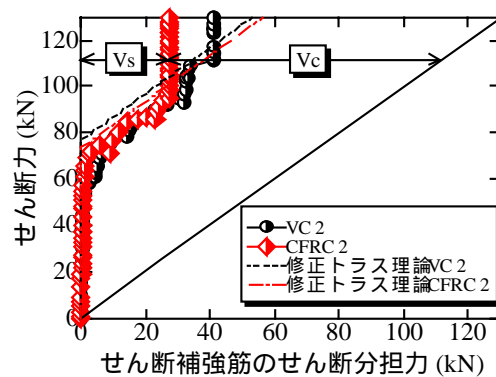


図 - 14 せん断分担力(d=335mm)

り、膨張材の効果は軸力の影響として考慮することで計算により予測が可能である。

- (5) 再生骨材を用いたせん断補強筋を有するRCはりのせん断挙動はトラス理論によって推定することが可能である。

謝辞

本研究の一部は(社)中国建設弘済会の助成金を受けて行なわれたものである。また、せん断実験の一部は土木学会の電力施設解体コンクリート利用検討小委員会活動(長瀧重義委員長)の一環として行なわれたものである。関係各位に感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 佐藤良一ほか:高品質再生粗骨材を用いた RC 部材の力学特性,セメントコンクリート論文集, No.52, pp430-437, 1998
- 2) 佐藤良一ほか:低品質再生粗骨材を用いた RC 部材の力学特性,セメントコンクリート論文集, No.53, pp573-580, 1999
- 3) 土木学会標準示方書(構造性能照査編),2002 年版,2002
- 4) 正木聡ほか:コンクリートの低収縮化による RC 部材の曲げ性能の向上,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp757-762, 2001
- 5) 早川智浩ほか:高強度コンクリートの収縮がせん断補強筋のひずみ挙動に及ぼす影響,コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp589-594, 2000