

論文 再生骨材を使用した高靱性コンクリート製RC梁の破壊挙動

中村 允哉^{*1}・渡部 憲^{*2}・白都 滋^{*3}・山田 友也^{*4}

要旨：本研究では再生骨材を使用した高靱性コンクリートの構造物への適用性を検討するため、再生骨材を使用した高靱性コンクリート製RC梁試験体の載荷実験を行った。また、1軸圧縮試験、3等分点曲げ試験および鉄筋の引抜き試験結果から構築した高靱性コンクリートの材料モデルを有限要素法解析汎用コードに導入し、再生骨材を使用した高靱性コンクリート製RC梁試験体の塑性変形挙動について解析的に検討を行った。その結果、RC梁試験体に再生骨材を使用した高靱性コンクリートを適用した場合においても、砕石および天然細骨材を使用した高靱性コンクリートと同様のせん断補強効果が得られた。

キーワード：高靱性コンクリート、高靱性セメント複合材料、RC梁、再生骨材、FEM

1. はじめに

近年、コンクリートの分野では、天然骨材採取に伴う環境破壊や天然骨材資源の枯渇問題から、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されている。今後、コンクリートのリサイクルを更に積極的に推し進めるためにも、再生骨材の新たな有効利用技術を開発していく必要があり、その一例として、再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)に関する研究なども報告されている¹⁾。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料で、曲げ応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性が大幅に向上した材料²⁾であり、構造物の性能や耐久性の大幅な向上が見込めるほか、高性能な補修用材料、衝撃緩衝材料など、新しい各種の用途が期待されている。しかし、実際にDFRCCを使用した施工例は報告されているものの³⁾、その数は未だ少ないのが現状である。この理由としては、他の材料と比較してコストが高い、大量供給を行うシステムが確立されていないといった施工上の問題点が挙げられるほか、マトリックスとして主にモルタルを使用しているため、一般的なコンクリートと比較して水和熱や乾燥収縮による影響が大きく、構造体として強度を十分に発現できないといった材料特性上の問題点も考えられる。そのため、既存の繊維補強コンクリートに用いられる材料、調合にてDFRCCの性能を達成できれば、上記の問題点の改善を含む、多くの付加価値を持つ有用な材料になり得ると考えられる。

このような背景から、堀越ら⁴⁾はPVA繊維を用いた高靱性コンクリート(以下、DFRCと略記)に関する研究を実施し、粗骨材混入、繊維径および繊維体積混入率、単位水量および単位セメント量の変化が及ぼす曲げ靱性への影響を明らかにしている。筆者らもこれまでに水結合

材比、繊維種類、繊維体積混入率、繊維体積混合比を変動因子とし、再生骨材を使用したDFRCの材料特性について検討してきた⁵⁾。

上記のような材料を鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)構造物に効果的に適用しようとする場合、その補強効果を確認するため、信頼できる最低限の実験的な検証を行う必要がある。さらに、限定された実験的知見を物理的な解釈に基づいて適用範囲を拡大し、一般化することが重要である。このためには、材料挙動のモデル化や構成則の確立とともに、これらを組み込んだ解析的手法の妥当性を確認し、この手法を適用して実験データを補完できる情報を得る努力が必要である。

よって本研究では、再生骨材を使用したDFRCの構造物への適用性を検討するため、再生骨材を使用したDFRC製RC梁試験体の載荷実験を行った。また、1軸圧縮試験、3等分点曲げ試験、鉄筋の引抜き試験などの材料試験を行い、DFRCの材料モデルを特徴づける破壊力学パラメータを抽出した。さらに、これらの材料モデルを有限要素法(以下、FEMと略記)解析汎用コードに導入し、再生骨材を使用したDFRC製RC梁試験体の塑性変形挙動について解析的に検討を行った。

2. 実験方法

本研究では表-1に示す、骨材種類、粗骨材の有無、繊維の有無を変動因子としたコンクリート、DFRCおよびDFRCCの材料試験およびRC梁試験体の載荷実験を実施した。使用材料は、最大寸法10mmの砕石(表乾密度：2.71g/cm³、吸水率：0.69%)および天然細骨材(砕砂(表乾密度：2.66g/cm³、吸水率：1.33%)と山砂(表乾密度：2.57g/cm³、吸水率：2.78%)を質量比7:3で混合使用)を使用したコンクリート(N-C)、最大寸法10mmの再生粗骨材

*1 東海大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東海大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

*3 東急建設(株) 設計本部構造設計部 Ph.D. (正会員)

*4 東海大学 工学部建築学科 (非会員)

表一 試験概要

試験体名	水結合材比 W/B	細骨材セメント比 S/C	細骨材率 s/a	繊維体積混入率 V_f	繊維体積混合比 V_m	SP	GF	SF
	wt. %	wt. %	Vol. %	Vol. %	V:S			
N-C-S	50	70	70	0	-	0.6	-	1.0
N-DFRC-S		100	100	3	7:3			2.2
N-DFRC-S		70	70	0	-			2.5
R-C-S		70	70	0	-			1.0
R-DFRC-S		100	100	3	7:3			2.2
R-DFRC-S		69	69	3	7:3			2.5
R-C-B		70	70	0	-			1.0
R-DFRC-B		69	69	3	7:3			2.5

粗骨材(G) N: 砕石, R: 再生粗骨材
 細骨材(S) N: 天然細骨材(砕砂と山砂を質量比7:3で混合)
 R: 再生細骨材
 セメント(C) 普通ポルトランドセメント
 混和剤 SP: 高性能AE減水剤
 混和材 GF: 分離低減材, SF: シリカフューム
 繊維 V: PVA繊維, S: 鋼繊維

表二 材料特性

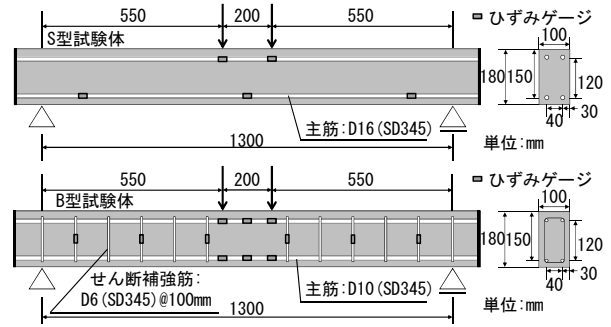
(a) コンクリート, DFRCおよびDFRCC

試験体名	圧縮		曲げ					引抜き		
	圧縮強度	ヤング係数	圧縮破壊エネルギー	曲げ強度	破壊エネルギー	ひび割れ	引張強度	引張終局ひずみ	付着強度	付着強度時すべり
	N/mm ²	kN/mm ²	N/mm	N/mm ²	N/mm	本	N/mm ²	%	N/mm ²	mm
N-C-S	48.7	18.3	-	4.02	0.04	1	-	-	-	-
R-C-S	49.5	20.2	-	3.43	0.05	1	-	-	-	-
N-DFRC-S	45.0	19.3	53.7	7.09	-	5	2.67	0.77	19.0	0.46
R-DFRC-S	46.8	19.3	57.5	6.04	-	4	2.29	0.51	15.7	0.47
N-DFRC-S	47.7	19.0	51.6	5.04	-	6	1.89	0.91	20.1	0.46
R-DFRC-S	48.0	18.8	59.5	6.34	-	7	2.40	0.79	18.7	0.47
R-C-B	53.7	20.1	-	3.08	0.04	1	-	-	-	-
R-DFRC-B	46.9	19.4	65.4	5.48	-	7	2.03	0.84	21.1	0.33

(b) 鉄筋

試験体	主筋				せん断補強筋			
	引張鉄筋比	ヤング係数	降伏強度	引張強度	せん断補強筋比	ヤング係数	降伏強度	引張強度
	%	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	%	kN/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
S型試験体	2.64	194	352	520	0	-	-	-
B型試験体	0.95	197	359	508	0.63	203	411	589

(表乾密度: 2.60g/cm³, 吸水率: 1.84%)および再生細骨材(表乾密度: 2.52g/cm³, 吸水率: 3.77%)を使用したコンクリート(R-C), 天然および再生細骨材を使用したDFRCC(N-DFRCC, R-DFRCC), 砕石および再生粗骨材を使用したDFRC(N-DFRC, R-DFRC)とした。調合は水結合材比(W/B)を50%, 細骨材率(s/a)を70および100とした。既報⁵⁾の実験結果より, 繊維はPVA繊維(長: 18mm, 径: 0.2mm, 弾性係数: 27kN/mm², 引張強度: 975N/mm²)と鋼繊維(長: 30mm, 径: 0.55mm, 弾性係数: 210kN/mm², 引張強度: 1080N/mm²)の混合使用が妥当と判断し, 繊維体積混入率(V_f)を3%, PVA繊維(V)と鋼繊維(S)の繊維体積混合比(V_m)をV7:S3とした。練混ぜには50ℓパン型ミキサーを使用し, DFRCおよびDFRCCの練混ぜ時間はそれぞれ9.5分および6.5分(ミキサーに細骨材, シリカフュームおよびセメントを投入し0.5分の空練り後, 水を加えて2.0分練混ぜる。続いて粗骨材を3.0分間(DFRCCでは省略), 繊維を3.0分間で混入し, 最後に1.0分練混ぜて終了)とした。DFRCおよびDFRCCの目標スランプ値は21cmとし, いずれも材料の分離が発生



図一 試験体概要

しないように分離低減材の混入量を調整した。なお, その際, 繊維の偏り等は見受けられなかった。

2.1 材料試験

表二(a)に, 強度管理用試験体により得られた各材料特性を示す。本研究ではRC梁試験体に対する強度管理, 並びに材料モデルを特徴づける破壊力学パラメータを抽出するため, コンクリート, DFRCおよびDFRCCの1軸圧縮試験, コンクリートの切欠き梁3点曲げ試験, DFRCおよびDFRCCの3等分点曲げ試験, DFRCおよびDFRCCの引抜き試験を実施した。試験体は, 1軸圧縮試験ではφ100×200mmの円柱試験体, 切欠き梁3点曲げ試験および3等分点曲げ試験では100×100×400mmの角柱試験体, 引抜き試験ではD-16およびD-10の鉄筋を挿入した100×100×100mmの角柱試験体とし, 各要因につき3体製作した。試験体は打設後2日で脱型し, 養生室内の積算温度で840DDとなるまで湿布養生とした。

1軸圧縮試験では, 計測項目を荷重, コンプレッションメーターによる試験体中央部の縦・横ひずみおよび高感度変位計による載荷盤間変位とし, 圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})は文献¹⁾を参考に算出した。

DFRCおよびDFRCCの3等分点曲げ試験では, 計測項目を荷重, 高感度変位計によるスパン中央部の変位, パイ型変位計による曲率とし, 引張強度(f_{tb})および引張終局ひずみ(ϵ_{mb})は文献⁶⁾付録書(参考)に準じて算出した。また, コンクリートの切欠き梁3点曲げ試験では, 計測項目を荷重, 高感度変位計によるスパン中央部の変位, クリップゲージによる切欠き口の開口変位とし, 破壊エネルギー(G_F)は文献⁷⁾に準じて算出した。

引抜き試験では, 試験方法を文献⁸⁾に準じ, 計測項目を荷重, 高感度変位計による鉄筋のすべり量とした。

なお, 各試験における計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。

2.2 RC梁載荷試験

図一に試験体概要を示す。試験体は, 主筋をD-16 (SD345)とし, コンクリート製RC梁試験体においてせん断破壊するS型試験体, 主筋をD-10 (SD345), せん断補強筋をD-6 (SD345)とし, コンクリート製RC梁試験体に

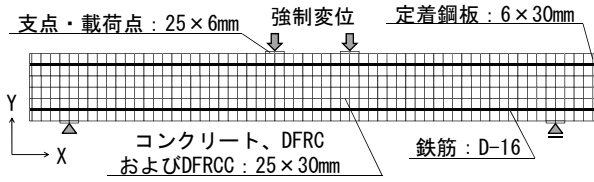


図-2 要素分割図

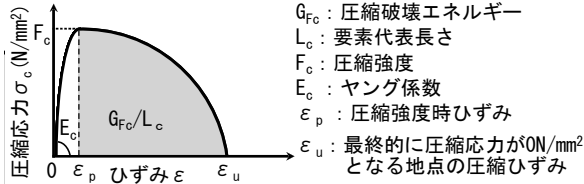


図-3 圧縮側構成則

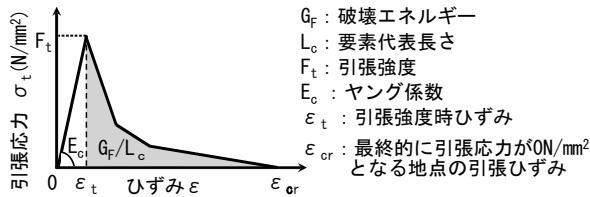


図-4 引張側構成則(コンクリート)

において曲げ破壊するB型試験体の2種類とした。各寸法は、梁せい(D)180mm×梁幅(b)100mm、支点間距離(L)を1300mm、せん断スパン長(a)を550mm、荷重点間距離を200mmとし、主筋は試験体両端の定着鋼板(厚さ6mm)に溶接した。試験体は打設後2日で脱型し、養生室内の積算温度で840DDとなるまで湿布養生とした。荷重は1000kN万能試験機を使用し、支点および荷重点は前掲図-1に示す通りとした。計測項目は、荷重、高感度変位計によるスパン中央部の変位、ひずみゲージによる主筋およびせん断補強筋のひずみとし、各計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。

せん断破壊したRC梁試験体の耐力は、文献⁹⁾に示されている以下の算定式により算出した耐力で評価した。

$$Q_{bu} = \left\{ \frac{0.053P_t^{0.23}(18+\sigma_B)}{M/(Qd)+0.12} + 0.85\sqrt{P_w\sigma_{wy}} \right\} bj \quad (1)$$

ここに、 Q_{bu} :せん断耐力(N)、 P_t :引張鉄筋比(%), σ_B :コンクリートの圧縮強度(N/mm²), $M/(Qd)$:せん断スパン比、 P_w :せん断補強筋比(%), σ_{wy} :せん断補強筋の降伏強度(N/mm²), d :梁の有効せい(mm), b :梁幅(mm), j :応力中心間距離(mm)である。

曲げ破壊したRC梁試験体の耐力は、コンクリート製RC梁試験体では、文献⁹⁾に示されている以下の算定式により算出した耐力で評価した。

$$M_u = \sigma_y a_c (x_n - d_c) + \sigma_y a_t (d - x_n) + \beta_1 k_1 \sigma_B b (1 - k_1/2) x_n^2 \quad (2)$$

$$P_u = 2M_u/a \quad (3)$$

ここに、 M_u :終局曲げモーメント(N・mm), a_c , a_t :圧縮および引張側主筋断面積(mm²), σ_y :主筋降伏強度(N/mm²), d_c :圧縮側主筋中心から梁上端までの距離(mm), d :梁の有効せい(mm), σ_B :コンクリートの圧縮

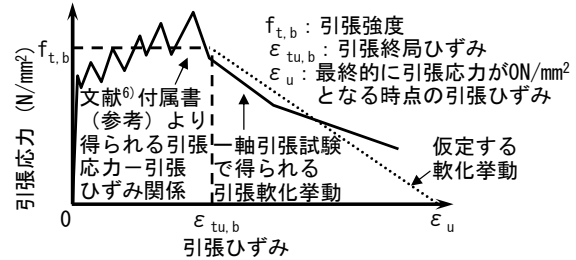


図-5 引張側構成則(DFRCおよびDFRC)

強度(N/mm²), x_n :中立軸位置(mm), k_1 , β_1 :コンクリートの応力度分布に関する係数, b :梁幅(mm), P_u :曲げ耐力(N), a :せん断スパン長(mm)である。なお、DFRCおよびDFRC製RC梁試験体では、式(2)をベースとし、終局時の梁断面において、DFRCおよびDFRCの引張降伏応力が中立軸以下で一様に作用していると仮定し、算出した耐力で評価した。

3. 解析概要

3.1 試験体のモデル化および解析方法

本研究ではRC梁試験体の荷重試験を対象とした2次元非線形FEM解析を実施した。試験体はコンクリート、DFRCおよびDFRCを25×30mm、定着鋼板を6×30mm、支点・荷重点を25×6mmの長方形要素で分割した。図-2に要素分割を示す。各要素は4節点アイソパラメトリック要素(平面応力状態を仮定)とした。主筋はトラス要素として主筋とコンクリートの間に界面要素を設け、せん断補強筋は埋め込み鉄筋要素とした。

解析方法は、最初に自重を加え、次に前掲図-2のような変位を漸増的に加えることとした。なお、解析コードは汎用構造解析プログラムDIANA8.1.2¹⁰⁾を使用し、非線形反復計算法はNewton-Raphson法を採用した。

3.2 材料構成則

コンクリート、DFRCおよびDFRCの破壊現象を扱うため、圧縮側および引張側に全ひずみに基づく構成則モデルを適用し、ひび割れは、ひび割れ回転を考慮した分布ひび割れモデルとした。

圧縮側の応力-ひずみ関係は図-3に示すParabolicで表し、下降域で囲まれる面積は G_{F_c} /要素代表長さ(L_c)とした。なお、 G_{F_c} はコンクリートでは中村らの提案式¹¹⁾から算出した値、DFRCおよびDFRCでは前掲表-2(a)の材料試験結果とし、 L_c は要素面積と等価な面積をもつ円の直径とした。また、Vecchio¹²⁾らが提案している横拘束による圧縮強度の増大、Collins¹³⁾らが提案しているひび割れたコンクリートの圧縮強度低減を考慮した。なお、同一のW/Bでは、使用骨材の密度、吸水率等の影響により、再生細・粗骨材を使用したRシリーズは天然細骨材および砕石を使用したNシリーズと比較して圧縮強度が低くなると考えられるが、前掲表-2(a)の材料試験

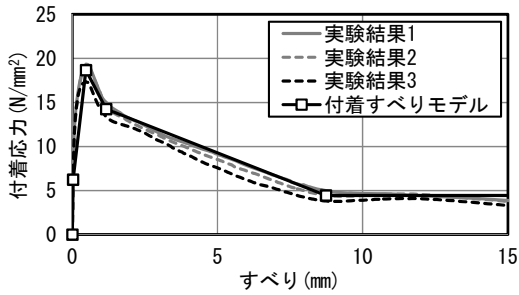


図-6 付着応力-すべり関係の一例(R-DFRC-S)

結果では、いずれもNシリーズと比較してRシリーズの圧縮強度が若干高くなっている。これは、フレッシュ時における各材料の空気量(例えば、N-DFRC-Sでは2.6%、R-DFRC-Sでは1.8%)等が影響を及ぼしたと考えられるが、今後詳細に検討する必要があると考えている。

引張側の応力-ひずみ関係は、コンクリートでは図-4に示すように、上昇域は引張強度(F_t)までを線形弾性、下降域は文献¹⁴⁾に示されている3直線モデルを適用し、下降域で囲まれる面積は G_F/L_c とした。なお、 G_F は前掲表-2(a)に示した材料試験結果を使用した。また、DFRCおよびDFRCCでは図-5に示すように、渡部ら¹⁵⁾が提案している多直線モデルを適用した。

鉄筋の塑性基準は、von Mises基準を適用した。鉄筋の降伏強度およびヤング係数は表-2(b)に従い、応力-ひずみ関係をbi-linearモデルとした。なお、第2勾配の剛性はヤング係数の1/100とした。

梁主筋とコンクリート、DFRCおよびDFRCC間の付着は、コンクリートでは梁主筋との間にCEB-FIP Model Code 1990¹⁶⁾に示される付着すべりモデル(Confined concrete, Good bond conditions)を適用し、DFRCおよびDFRCCでは梁主筋との間に引抜き試験により得られた付着応力-すべり関係より構築した多直線モデルを適用した。図-6に、引抜き試験により得られた付着応力-すべり関係の一例(R-DFRC-S)を示す。本付着すべりモデルの各点における付着応力は実験結果の平均値とした。また、各点のすべりは実験により得られた付着応力-すべり関係の形状を考慮し、第1点を0mm、第2点を付着強度時すべり(S_u)の1/20、第3点を S_u 、第4点を S_u の2.5倍、第5点を第4点の7.5倍とした。

4. 結果と考察

4.1 RC梁載荷試験により得られた荷重-変位関係

図-7に、RC梁試験体(N-C-S、N-DFRCC-SおよびN-DFRC-S)の載荷試験により得られた荷重-変位関係を示す。なお、図中に示した丸印は各結果における主筋降伏時、三角形印は最大荷重時を示している(図-8および図-9も同様である)。図-7より、N-C-Sは主筋が降伏せず、最大荷重以降において荷重が急激に低下しているの

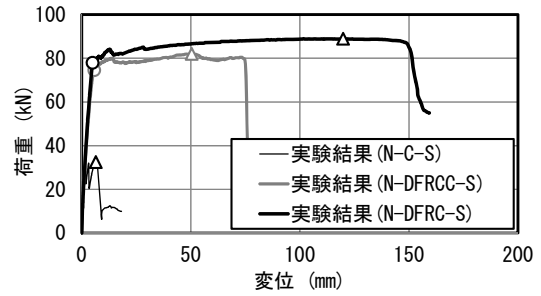
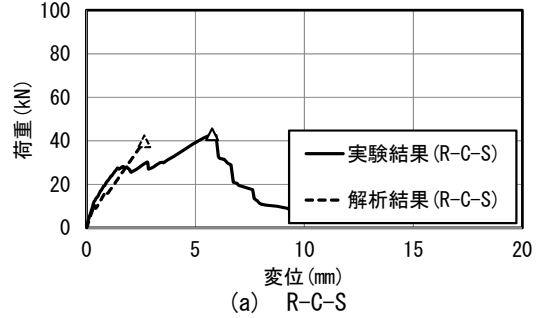
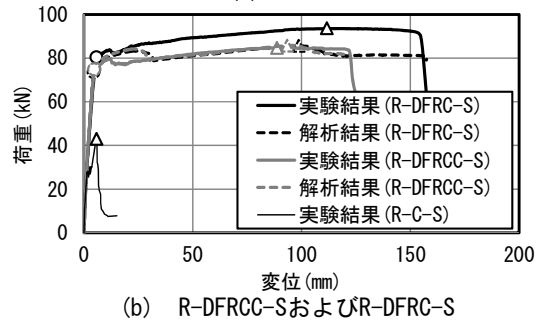


図-7 荷重-変位関係(S型試験体, Nシリーズ)



(a) R-C-S



(b) R-DFRCC-SおよびR-DFRC-S

図-8 荷重-変位関係(S型試験体, Rシリーズ)

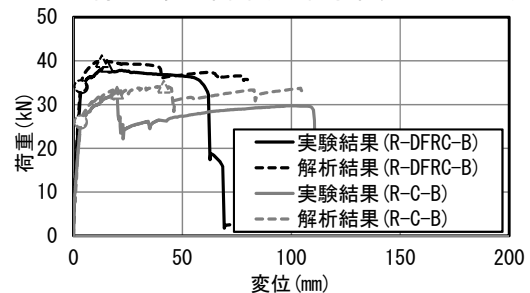


図-9 荷重-変位関係(B型試験体, Rシリーズ)

に対し、N-DFRCC-SおよびN-DFRC-Sでは主筋が降伏し、その後も荷重が徐々に増加しており、最大荷重および最大荷重時の変位が大幅に向上していることが分かる。これは、N-C-Sではせん断破壊で最大荷重が決定したのに対し、N-DFRC-SおよびN-DFRCC-Sでは、せん断補強筋を使用していないにもかかわらず、曲げ破壊で最大荷重が決定したためである。以上のことから、DFRCおよびDFRCCを適用することにより、RC梁のせん断補強効果が期待できる。なお、N-DFRCC-Sと比較してN-DFRC-Sは最大荷重が若干高くなっている。これは、粗骨材の噛み合い効果によるものと考えられるが、今後詳細に検討する必要があると思われる。

図-8に、RC梁試験体(R-C-S、R-DFRCC-SおよびR-DFRC-S)の載荷試験および同試験を対象とした解析に

より得られた荷重-変位関係を示す。図-8(b)の実験結果に着目すると、図-7と同様に、R-C-Sは主筋が降伏せず、最大荷重以降において荷重が急激に低下しているのに対し、R-DFRCC-SおよびR-DFRC-Sでは主筋が降伏し、その後も荷重が徐々に増加しており、最大荷重および最大荷重時の変位が大幅に向上していることが分かる。以上より、再生骨材を使用したDFRCおよびDFRCCを適用した場合においても、RC梁のせん断補強効果が期待できる。なお、図-7のN-DFRCC-Sと図-8(b)のR-DFRCC-S、図-7のN-DFRC-Sと図-8(b)のR-DFRC-Sをそれぞれ比較すると、同程度の最大荷重および同様の破壊形式を示している。以上より、本研究の範囲において、S型RC梁試験体にR-DFRCおよびR-DFRCCを適用した場合においても、N-DFRCおよびN-DFRCCと同様の補強効果が得られた。

図-8(a)の解析結果に着目すると、R-C-Sの解析結果は実験結果と比較して最大荷重時の変位がやや小さいものの、初期剛性および最大荷重は概ね対応している。図-8(b)の解析結果に着目すると、R-DFRCC-Sの解析結果は実験結果の荷重-変位関係の形状、主筋降伏時の荷重および変位、最大荷重および最大荷重時の変位と概ね対応している。また、R-DFRC-Sの解析結果は実験結果と比較して主筋降伏時の荷重、最大荷重および最大荷重時の変位がやや小さいものの、荷重-変位関係の形状は概ね対応している。

図-9に、RC梁試験体(R-C-BおよびR-DFRC-B)の荷重試験、および同試験を対象とした解析により得られた荷重-変位関係を示す。図-9より、実験結果に着目すると、R-C-Bと比較し、R-DFRC-Bは最大荷重が向上していることが分かる。以上より、再生骨材を使用したDFRCを適用することにより、RC梁の曲げ補強効果が期待できる。なお、R-C-Bと比較し、R-DFRC-Bは早期に破壊に至っている。これは、R-DFRC-Bでは引張側主筋が破断して破壊に至ったためである。次に、解析結果に着目すると、R-C-Bの解析結果は実験結果と比較して最大荷重時の変位がやや大きいものの、荷重-変位関係の形状、主筋降伏時の荷重および変位、最大荷重は概ね対応している。また、R-DFRC-Bの解析結果は実験結果の荷重-変位関係の形状、主筋降伏時の荷重および変位、最大荷重および最大荷重時の変位と概ね対応している。

4.2 ひび割れ発生状況

図-10に再生骨材を使用したRC梁試験体の荷重試験により得られたひび割れ発生状況、図-11に同試験を対象とした解析により得られたひび割れ発生状況(ひび割れひずみ)を示す。なお、図-10では荷重試験終了後のひび割れ発生状況を示している。また、図-11では解析結果における最大荷重時のひび割れ発生状況を示してお

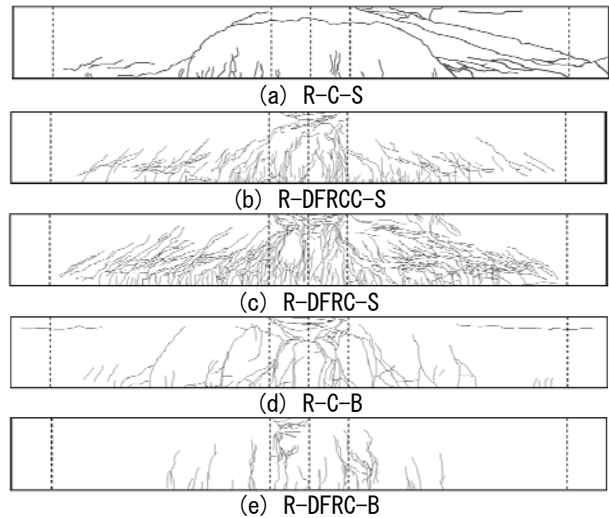


図-10 RC梁荷重試験により得られたひび割れ発生状況

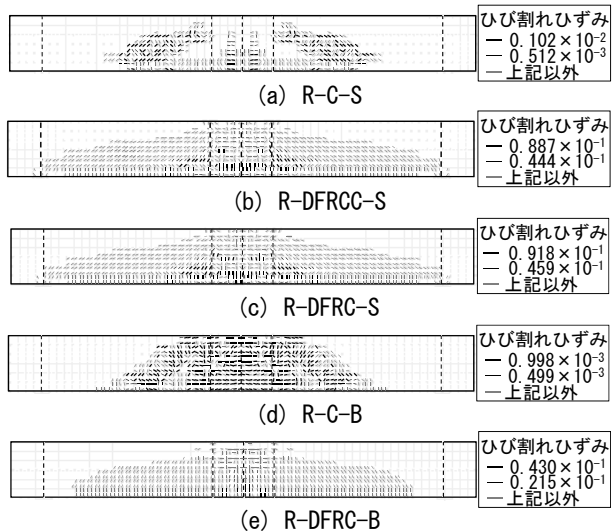


図-11 解析により得られたひび割れ発生状況

り、線の濃淡および太さはひび割れひずみの大きさ(図中に凡例を示す)、線の方法はひび割れひずみと直交の方向(ひび割れ方向)を示している。

まず、RC梁試験体の荷重試験により得られたひび割れ発生状況において、S型試験体に着目すると、R-C-S(図-10(a))ではせん断スパンに発生したせん断ひび割れが拡大・連結しており、破壊形式がせん断破壊であることが分かる他、せん断スパンの両側下部には付着割裂ひび割れが発生していることが分かる。しかし、R-DFRCC-S(図-10(b))およびR-DFRC-S(図-10(c))では、せん断スパンに微細なひび割れが多数発生したが、せん断破壊せず、曲げ破壊により最大荷重が決定しており、R-C-Sで見られた付着割裂ひび割れも見受けられなかった。また、B型試験体に着目すると、R-C-B(図-10(d))では、荷重の上昇に伴い試験体下端に複数の曲げひび割れが発生した。その後、数本のひび割れが拡大・進展し、主筋の降伏を伴って最大荷重を迎えた。一方、R-DFRC-B(図-10(e))では、荷重の上昇に伴い試験体下

表-3 RC梁載荷試験最大荷重と計算耐力の比較

試験体名	計算結果		実験結果		最大荷重/ 計算耐力
	計算 せん断 耐力	計算 曲げ 耐力*1	最大 荷重	破壊 形式	
	kN	kN	kN		
N-C-S	37.2	66.6	32.5	せん断	0.87
R-C-S	37.7	66.7	43.0	せん断	1.14
N-DFRCC-S	-	74.2(66.6)	82.0	曲げ	1.11(1.23)
R-DFRCC-S	-	76.1(66.4)	83.9	曲げ	1.10(1.26)
N-DFRC-S	-	75.6(61.0)	88.9	曲げ	1.18(1.46)
R-DFRC-S	-	75.9(66.6)	93.7	曲げ	1.23(1.41)
R-C-B	81.0	26.9	32.8	曲げ	1.22
R-DFRC-B	-	35.6(26.9)	38.2	曲げ	1.07(1.42)

*1: ()内はDFRC, DFRCCの引張応力を考慮せず, 式(2)および(3)により算出した曲げ耐力を示している。

端に複数の曲げひび割れが発生した。その後、複数のひび割れが徐々に進展し、鉄筋の降伏を伴って最大荷重を迎えた。なお、この際、R-C-Bのように数本のひび割れのみが拡大・進展することはなかった。

次に、解析により得られたひび割れ発生状況に着目すると、いずれもRC梁試験体の載荷試験により得られたひび割れ発生状況と概ね対応している。

4.3 RC梁載荷試験最大荷重と各計算耐力の比較

表-3に、RC梁試験体の載荷試験により得られた最大荷重と、各算定式により算出した耐力(以下、計算せん断耐力、計算曲げ耐力と略記)の比較を示す。まず、せん断破壊した試験体に着目すると、R-C-Sは最大荷重/計算耐力が1.14となったが、N-C-Sは0.87となり、計算耐力が最大荷重を上回った。これは、打設時において片側の引張側主筋位置にずれが生じ、側面のかぶり厚さが確保できなかったため、載荷試験において当該引張側主筋に沿う付着割裂ひび割れの拡大・進展を助長し、最大荷重に影響を及ぼしたと考えられる。次に、曲げ破壊した試験体に着目すると、R-C-Bは最大荷重/計算耐力が1.22となった。また、N-DFRCC-S, R-DFRCC-S, N-DFRC-S, R-DFRC-SおよびR-DFRC-Bにおいて、計算曲げ耐力を式(2)および(3)により算出した場合では、最大荷重/計算耐力が1.23~1.46となった。一方、式(2)をベースとし、DFRCおよびDFRCCの引張降伏応力を考慮して算出した場合では、最大荷重/計算耐力が1.07~1.23となり、若干の改善が見られた。ただし、検討本数が少量のため、今後も検討を重ねる必要があると思われる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 本研究の範囲において、RC梁試験体に再生骨材を使用したDFRCおよびDFRCCを適用した場合においても、天然細骨材および砕石を使用したDFRCおよびDFRCCと同様のせん断補強効果が得られた。
- 2) 再生骨材を使用したDFRCおよびDFRCC製RC梁試験体の載荷試験を対象とした2次元非線形FEM解析では、いずれも載荷試験により得られた荷重-変

位関係の形状と概ね対応した。

参考文献

- 1) 渡部憲, 大岡督尚, 白都滋, 加藤雄介: 再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の圧縮破壊挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.485-490, 2006
- 2) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会: 高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う, 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.3, 2002.1
- 3) 高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会: 高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.74-85, 2009.3
- 4) 堀越哲郎, 斎藤忠, V.C.Li: PVA繊維を用いた高靱性コンクリートに関する研究, 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.55-60, 2003.12
- 5) 中村允哉, 渡部憲: 再生骨材を使用した高靱性コンクリートの材料特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.335-340, 2011
- 6) JCI標準: 繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法 (JCI-S-003-2007), コンクリート工学協会, 8pp., 2007
- 7) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.401-404, 2001.5
- 8) JSTM C 2101: 引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法
- 9) 日本建築学会関東支部: 鉄筋コンクリート構造の設計 学びやすい構造設計, 日本建築学会関東支部, pp.275-290, 2002.1
- 10) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics (DIANA version-8): DIANA finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research.
- 11) Nakamura.H, Higai.T: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures, subjected to Seismic Loads, pp.259-272, 1999.10
- 12) Selby,R.G., and Vecchio.F.J.: Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02. Univ.Toront, 1993.
- 13) Vecchio.F.J., and Collins,M.P.: Compression Response of Cracked Reinforced Concrete,ASCE, pp.3590-3610, 1993.12
- 14) 大岡督尚, 橘高義典, 渡部憲: コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第529号, pp.1-6, 2000.3
- 15) 渡部憲, 佐藤史康, 三浦康彰, 渋谷恒太: 各種細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の引張軟化挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.287-292, 2010
- 16) CEB: CEB- FEP MODEL CODE1990, Thomas Telford, pp.33-58, 82-86, 1993