

論文 セン断補強筋の無い高靱性コンクリート製RC梁の破壊性状

佐藤 勉^{*1}・渡部 憲^{*2}・中村 允哉^{*3}

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、セン断補強筋の無い、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、有限要素法解析汎用コードを使用し、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、引張鉄筋比を5.88%とした場合、主筋が降伏してまもなく最大荷重をむかえ、その直後に急激な耐力低下を伴い、破壊すること等の知見が得られた。

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、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回るひび割れ分散性や、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性を有する繊維補強セメント系材料である²⁾。この材料は、一般的なコンクリートの脆性的な性質を克服していることから、コンクリート系構造要素の性能や耐久性の大幅な向上が見込めるほか、従来のセメント系材料に変わる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という問題点、また、大量供給を行うシステムが確立されていないという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、構造体としての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が考えられる。そのため、モルタルではなく、粗骨材を使用したコンクリートをベースとした調査に繊維を混入することにより、DFRCCの性能を達成する材料が開発できれば、上記の問題点の改善を含む、多くの付加価値をもつ有用な材料になり得る。

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)に関する研究を行っており、粗骨材混入、繊維径および繊維混入率、

単位水量および単位セメント量の変化が曲げ靱性に及ぼす影響を明らかにしている。筆者らの一部らもこれまでに骨材種類、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⁾。また、再生骨材を使用したDFRCを、鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)のコンクリート部分に適用したRC梁の破壊挙動に関する研究では、通常、コンクリートではセン断破壊するRC梁試験体に、再生骨材を使用したDFRCを適用することで、セン断補強筋を使用していないにも関わらず、主筋が降伏し、曲げ破壊に至り、セン断および曲げ補強効果を期待できる等の知見が得られた⁶⁾。

このような材料をRC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、実験データを補完できる情報を得る努力が必要である。

そこで本研究では、引張鉄筋比の相違がDFRCCおよびDFRC製RC梁の破壊挙動に及ぼす影響を検討するため、引張鉄筋比を既報⁶⁾より増大させた、天然および再生骨材を使用したDFRCCおよび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等分点曲げ試験などの材料試験を行い、DFRCCおよび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、DFRCCおよびDFRCを使用した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。

*1 東海大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東海大学 工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)大林組 修士(工学) (正会員)

表-1 コンクリート, DFRCCおよびDFRCの調合

試験体名	調合							スランプ試験結果 (cm)
	水結合材比 (%)	細骨材率 (vol. %)	細骨材セメント比 (%)	繊維体積混入率 (vol. %)	繊維体積混合比 (V:S)	高性能AE減水剤 (Cwt. %)	分離低減剤 (Cwt. %)	
N-C-SS	50	70	70	0	—	0.6	1.0	28.0
N-DFRCC-SS		100	100	3	7:3		2.2	25.5
N-DFRC-SS		70	70	0	—		2.5	22.0
R-C-SS				0	—		1.0	28.0
R-DFRCC-SS		100	100	3	7:3		2.2	25.5
R-DFRC-SS		70	70	3	7:3		2.5	24.0

表-2 コンクリート, DFRCCおよびDFRCの材料特性

試験体名	圧縮			曲げ			
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	圧縮破壊エネルギー (N/mm)	曲げ強度 (N/mm ²)	ひび割れ (本)	引張強度 (N/mm ²)	引張終局ひずみ (%)
N-C-SS	53.2	21.0	—	4.11	1	—	—
N-DFRCC-SS	56.8	20.5	64.9	8.60	5	3.25	0.78
N-DFRC-SS	51.1	19.7	67.0	8.60	5	3.25	0.87
R-C-SS	58.4	20.6	—	4.63	1	—	—
R-DFRCC-SS	48.1	19.8	62.9	9.20	6	3.43	1.05
R-DFRC-SS	46.9	18.1	60.4	7.30	4	2.72	1.05

2. 実験概要

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, DFRCCおよびDFRCの材料試験およびRC梁試験体の載荷試験を実施した。RC梁試験体は, 文献^{7,8)}を参考にして主筋をD-16(SD345), 引張鉄筋比(P_t)=5.88%とし, 繊維混入の有無に関わらずせん断破壊することを目指したSS型試験体である。コンクリート, DFRCCおよびDFRCの種類は, 以下の通りである。最大寸法10mmの砕石(NG, 表乾密度:2.72g/cm³, 吸水率:0.77%)および天然細骨材(NS, 砕砂(表乾密度:2.69g/cm³, 吸水率:2.53%)と山砂(表乾密度:2.57g/cm³, 吸水率:2.47%)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(RG, 表乾密度:2.61g/cm³, 吸水率:2.66%)および再生細骨材(RS, 表乾密度:2.60g/cm³, 吸水率:2.82%)を使用したコンクリート(R-C), NSおよびRSを使用したDFRC C(N-DFRCC, R-DFRCC), NGとNSおよびRGとRSを使用したDFRC(N-DFRC, R-DFRC)である。セメントには, 普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を使用した。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。繊維は, PVA繊維(長さ:18mm, 径:0.2mm, 弾性係数:27kN/mm², 引張強度:975N/mm²)と鋼繊維(長さ:30mm, 径:0.55mm, 弾性係数:210kN/mm², 引張強度:1080N/mm²)を混合使用し, 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7:3とした。

2.1 材料試験

表-2に, 強度管理用試験体より得られたコンクリート, DFRCCおよびDFRCの各材料特性を示す。なお, 各

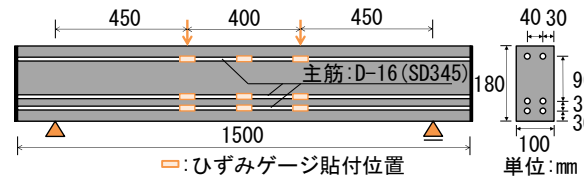


図-1 RC梁試験体概要

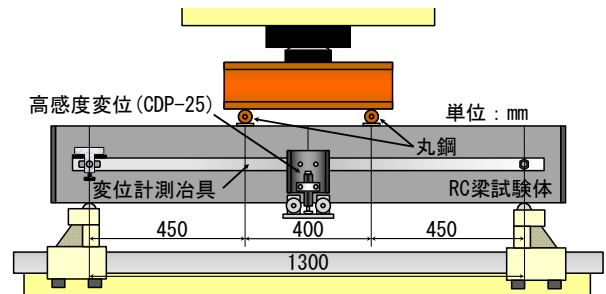


図-2 RC梁4点曲げ試験

RC梁試験体に使用した主筋D-16(SD345)の降伏強度は367N/mm², ヤング係数は202kN/mm²であった。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, DFRCCおよびDFRCの1軸圧縮試験, コンクリートの切欠き梁3点曲げ試験, DFRCCおよびDFRCの3等分点曲げ試験, 鉄筋の引張試験, DFRCCおよびDFRC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840°DD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(以下, G_F と略記)は文献¹⁾を参考に算出した。

DFRCCおよびDFRC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($\epsilon_{u,b}$)は文献⁹⁾付属書(参考)に準じて算出した。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(以下, G_F と略記)については文献¹⁰⁾に準じて算出した。

引抜き試験では, 試験方法を文献¹¹⁾に準じ, 計測項目を荷重, 鉄筋のすべり量とした。

なお, 各試験の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-1にRC梁試験体概要, 図-2に載荷試験概要を示

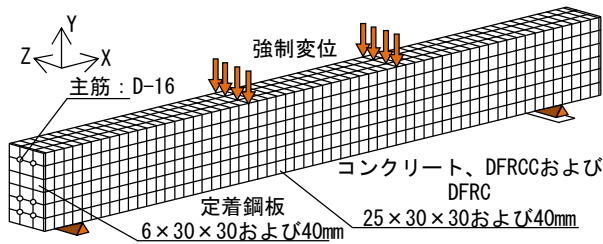


図-3 要素分割図

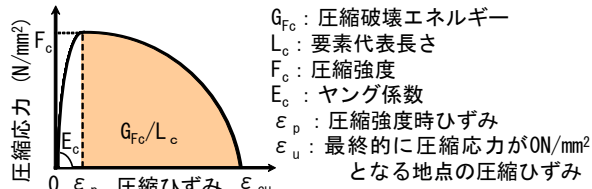


図-4 圧縮側構成則

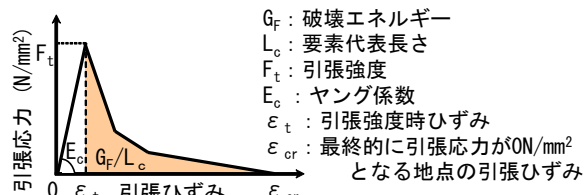


図-5 引張側構成則(コンクリート)

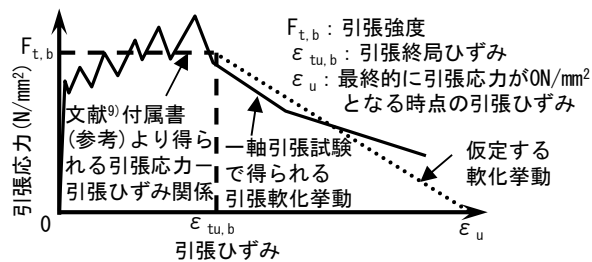


図-6 引張側構成則(DFRCCおよびDFRC)

す。RC梁試験体は、主筋をD-16(SD345)、引張鉄筋比(P_t)=5.88%としたSS型試験体である。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450mm、載荷点間距離を400mm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840°DDとなるまで湿布養生とした。載荷は、1000kN万能試験機を使用して行い、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。

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梁試験体の載荷試験を対象とした3次元非線形FEM解析を実施した。試験体はコンクリート、DFRCCおよびDFRCを25×30×30mmおよび40mm、定着鋼板を6×30×30mmおよび40mmの要素で分割した。図-3に、RC梁試験体の要素分割を示す。各要素は8節点アイソパラメトリックソリッド要素とし、主筋は付着すべり

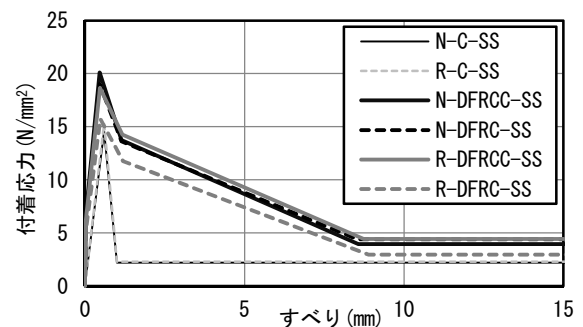


図-7 付着応力-すべり関係

埋め込み鉄筋要素とした。この要素を使用した場合、鉄筋はトラス要素としてモデル化され、ソリッド要素とトラス要素は界面要素によって結合される¹²⁾。なお、要素分割は、RC梁試験体の実測寸法を踏まえて行った。

解析方法は、最初に自重を加え、次に図-3中の矢印位置に強制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DIANA9.4.3¹²⁾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

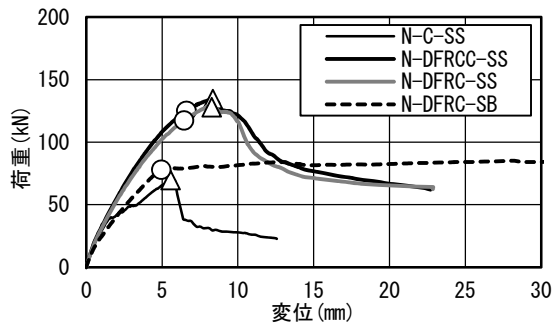
コンクリート、DFRCCおよびDFRCの破壊現象を扱うため、圧縮側および引張側に全ひずみに基づく構成則モデルを適用し、ひび割れは、ひび割れ回転を考慮した分布ひび割れモデルとした。

圧縮側の応力-ひずみ関係は図-4に示すParabolicで表し、応力下降域で囲まれる面積は G_{FC}/L_c とした。なお、コンクリートの G_{FC} は、表-2に示す圧縮強度(F_c)を用いて、中村らの提案式¹³⁾から算出した。DFRCCおよびDFRCの G_{FC} は表-2の材料試験結果とした。 L_c は要素体積と等価な体積をもつ球の直径とした。また、Vecchio¹⁴⁾らが提案している横拘束による圧縮強度の増大、Collins¹⁵⁾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、圧縮強度低減係数の算出式は、材料種類に関わらず同様である。

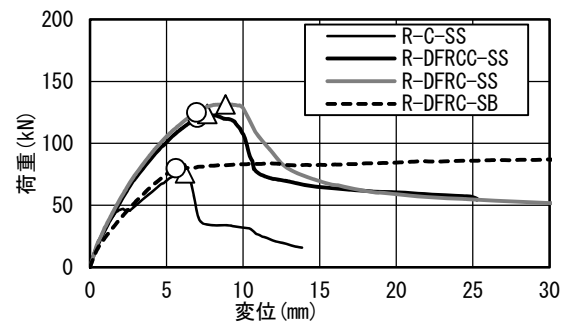
引張側の応力-ひずみ関係は、コンクリートでは図-5に示すように、応力上昇域は引張強度(F_t)¹⁶⁾までを線形弾性、応力下降域は文献¹⁷⁾に示されている3直線モデルを適用し、応力下降域で囲まれる面積は G_F/L_c とした。また、DFRCCおよびDFRCでは図-6に示すように、筆者らの一部¹⁸⁾が提案する多直線モデルを適用した。

鉄筋の降伏基準は、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-1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。

図-7に、梁主筋とコンクリート、DFRCCおよびDFRC間の付着応力-すべり関係を示す。コンクリートでは、CEB-FIP Model Code 1990¹⁹⁾に示される付着すべりモデル(Unconfined concrete, Good bond conditions)を適用



(a) 荷重－変位関係 (Nシリーズ)



(b) 荷重－変位関係 (Rシリーズ)

図－8 荷重－変位関係

した。ただし、付着強度までの応力上昇域は線形弾性とした。DFRCCおよびDFRCでは、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。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 荷重－変位関係

図－8に、RC梁試験体の載荷試験により得られた荷重－変位関係を示す。なお、図中の各結果における丸印は主筋降伏時、三角印は最大荷重時を示している(図－9および図－10も同様である)。また、文献⁶⁾に示されている試験結果も併せて示す(載荷点間距離を200mm、主筋をD-16(SD345)、引張鉄筋比を2.64%、せん断補強筋比を0%とし、N-DFRCおよびR-DFRCを使用したSB型試験体の結果：図中のN-DFRC-SBおよびR-DFRC-SB)。なお、SB型試験体は、コンクリートを使用したRC梁試験体においてせん断破壊するよう設計した試験体である。

天然骨材を使用したNシリーズの結果(図－8(a))に注目すると、N-C-SSでは主筋が降伏せずに最大荷重(70.1kN)をむかえ、せん断破壊に至った。一方、N-DFRCC-SSおよびN-DFRC-SSでは、主筋が降伏してまもなく最大荷重をむかえ、その直後に急激な耐力低下を伴い、破壊に至った。最大荷重は、N-DFRCC-SSで134kN、N-DFRC-SSで128kNとなっており、N-C-SSの最大荷重を大幅に上回った。N-DFRC-SBでは、主筋が降伏した後も徐々に荷重が上昇し、最終的には、変位120mm程度の時点で最大荷重(88.9kN)をむかえた。図－8(b)の再生骨材を使用したRシリーズにおいても、Nシリーズと同様の傾向を示しており、最大荷重は、R-C-SSで75.9kN、R-DFRCC-SSで124kN、R-DFRC-SSで132kNであった。R-DFRC-SBは、変位110mm程度の時点で最大荷重(93.7kN)をむかえた。なお、N-DFRCC-SS、R-DFRCC-SS、N-DFRC-

SSおよびR-DFRC-SSの結果をそれぞれ比較すると、同程度の最大荷重および類似の荷重－変位関係性状を示している。以上より、本研究の範囲において、骨材種類に関わらずSS型RC梁試験体にDFRCを適用した場合、DFRCCを適用した場合と同程度の補強効果が得られた。

なお、RC梁試験体の最大荷重は、一般にコンクリートの F_c の影響を受ける。表－2によれば、強度管理用試験体より得られた F_c は、 $N-C-SS < R-C-SS$ 、 $N-DFRCC-SS > R-DFRCC-SS$ 、 $N-DFRC-SS > R-DFRC-SS$ となっている。しかし、本研究で得られたRC梁試験体の最大荷重は、 F_c の大小関係に合致していない結果(R-DFRC-SS)もある。再生骨材使用の影響、フレッシュ時の空気量、打込み時の締め固め状況の相違、養生室内の温度が一樣でなかったこと(ただし、養生室内の温度計測は一カ所のみ)等が、強度管理用試験体およびRC梁試験体の強度発現に影響を与えたものと思われる。今後、R-DFRC-SSについては追実験が必要である。

4.2 RC梁試験体を対象とした解析結果および考察

図－9および図－10にRC梁試験体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。まず、N-C-SSおよびR-C-SSの結果に注目すると、いずれの実験結果においても主筋が降伏せず、せん断破壊に至っており、解析結果においても、このような現象を評価できている。また、実験および解析により得られた最大荷重の値は概ね近似している。しかし、最大荷重時の変位については、実験結果と比較して解析結果の値が小さくなっている。これは、実験では変位3mm付近から付着割裂ひび割れが生じ、拡大・進展したことが確認されているが、本解析手法では付着割裂ひび割れを模擬できないことに起因する。N-DFRCC-SS、R-DFRCC-SS、N-DFRC-SSおよびR-DFRC-SSの結果に注目すると、R-DFRC-SSの結果を除き、いずれの実験結果も主筋降伏後、まもなく最大荷重をむかえ、その直後に急激な耐力低下を伴い、破壊に至っており、解析結果においても、このような現象を、概ね評価できている。しかし、解析で得られた最大荷重および最大荷重時の変位

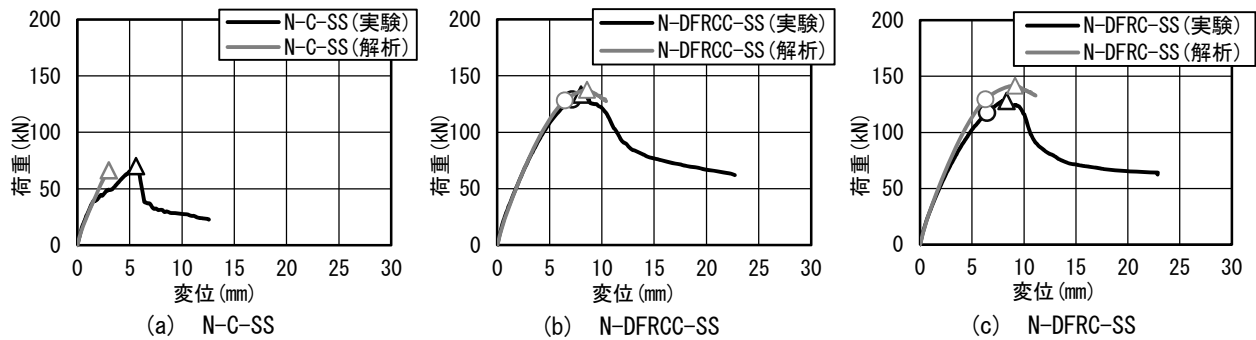


図-9 荷重－変位関係(Nシリーズ)

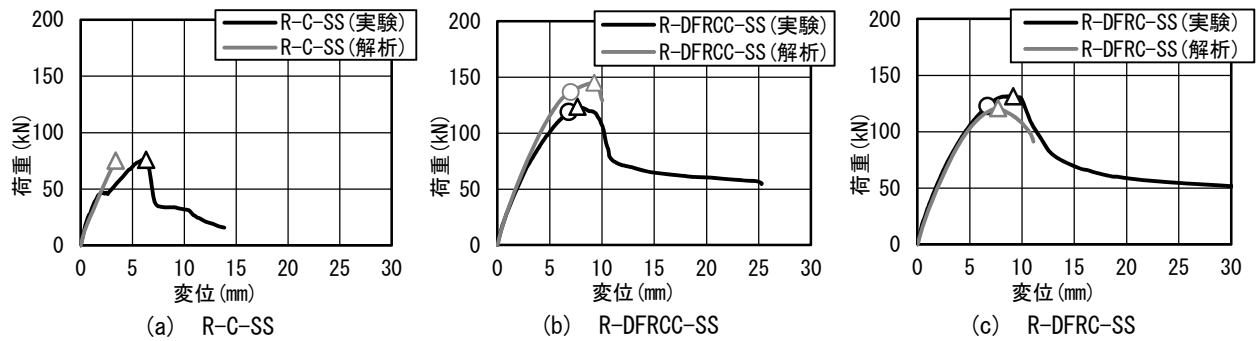


図-10 荷重－変位関係(Rシリーズ)

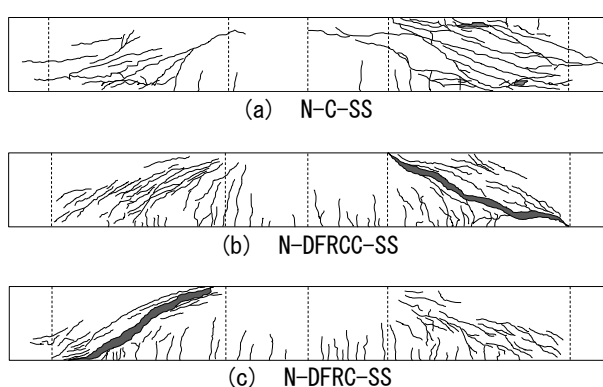


図-11 RC梁載荷試験により得られたひび割れ発生状況

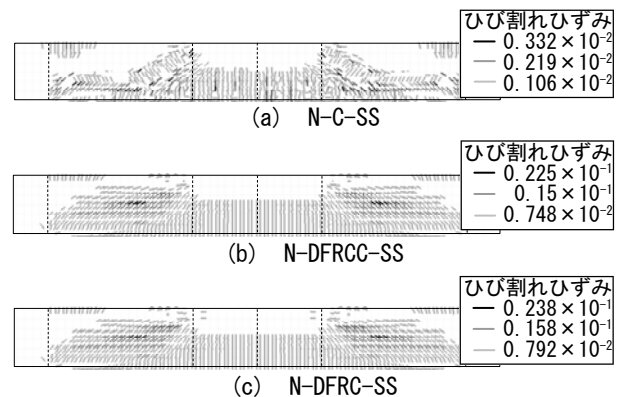


図-12 解析により得られたひび割れ発生状況

は、実験結果と比較して、若干、大きめの値となっている。なお、R-DFRC-SSの解析結果において、主筋が降伏せず、最大荷重が実験結果と比較して若干小さくなっている。前述の通り、R-DFRC-SSについては追実験が必要である。

4.3 ひび割れ発生状況

図-11に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、図-12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)の一例を示す。なお、図-11では載荷試験終了後のひび割れ発生状況を示しており、(b)および(c)中の灰色塗潰し部分は、最終的に、ひび割れが大きく開口した箇所を示している。図-12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り、短線の方法は、ひび割れひずみと直交方向(ひび割れ方向)を示している。

まず、RC梁試験体の載荷試験により得られたひび割

れ発生状況において、N-C-SS(図-11(a))に着目すると、梁下部に曲げひび割れが数本発生し、その後、荷重の上昇に伴い、せん断スパンに発生した斜めひび割れが拡大・連結し、せん断破壊に至っている。また、主筋に沿う付着割裂ひび割れも発生している。次に、N-DFRC C-SS(図-11(b)), N-DFRC-SS(図-11(c))では、梁下部に曲げひび割れが多数発生し、その後、荷重の上昇に伴い、せん断スパンに発生した多数の微細なひび割れが拡大するが、主筋の降伏が先行し、その後、斜めひび割れが大きく開き、破壊に至った。なお、主筋に沿う付着割裂ひび割れも発生しているが、拡大・進展することはない。

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、まず、曲げが卓越する区間(載荷点間の梁下端)において、N-C-SS(図-12(a))では、数カ所で 0.30×10^{-2} を超える(黒色線)大きさのひび割れひずみが確認でき

る。実験結果(図-11(a))においても、当該区間のひび割れは数本程度である。一方、N-DFRCC-SS(図-12(b)), N-DFRC-SS(図-12(c))では、一様に 0.75×10^{-2} ～ 0.80×10^{-2} 程度(薄灰色線)の大きさのひび割れひずみが確認できる。実験結果(図-11(b), (c))においても、当該区間に多数のひび割れが発生している。次に、せん断スパンにおいて、N-C-SS(図-12(a))では、 0.30×10^{-2} (黒色線)を超える大きさのひび割れひずみが、支点と載荷点を結ぶ方向に連なるように発生している。実験結果(図-11(a))においても、せん断スパンに発生した斜めひび割れが拡大・連結し、せん断破壊に至っている。一方、N-DFRCC-SS(図-12(b)), N-DFRC-SS(図-12(c))では、支点と載荷点を結ぶ方向に、 0.75×10^{-2} 程度(薄灰色線)～ 0.15×10^{-1} 程度(灰色線)の大きさのひび割れひずみが広く分布し、一部で 0.20×10^{-1} を超える(黒色線)大きさのひび割れひずみが発生している。実験結果(図-11(b), (c))においても、せん断スパンに多数の微細なひび割れが発生し、一部のひび割れが拡大している。

以上、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解析により得られたひび割れ発生状況は、概ね対応していると思われる。しかし、本解析ではひび割れを分布ひび割れモデルとしているため、ひび割れ幅やひび割れ本数を明確に示すことが出来ない。今後、ひび割れを離散化した場合について、検討の必要がある。

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梁試験体に天然または再生骨材を使用したDFRCCおよびDFRCを適用し、引張鉄筋比を5.88%とした場合、主筋が降伏してまもなく最大荷重をむかえ、その直後に急激な耐力低下を伴い、破壊することが分かった。
- 2) 本解析手法により、主筋降伏後、まもなく最大荷重をむかえ、その直後に急激な耐力低下を伴い、破壊に至るDFRCCおよびDFRC製RC梁試験体の載荷試験結果を、概ね評価できる。

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) 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製RC梁の破壊挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.358-363，2012
- 7) 土木学会：複数ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)，2007
- 8) 永井覚，関田徹志，高稲宜和，丸田誠：高靱性セメント複合材料を用いた梁部材の曲げせん断性状その2 実験結果の考察，日本建築学会学術講演梗概集(関東)，pp.313-314，2001.9
- 9) JCI規準：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
- 10) 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
- 11) 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
- 12) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics (DIANA version-9): DIANA finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research.
- 13) 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
- 14) Selby,R.G., and Vecchio.F.J.：Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02. Univ.Toront, 1993.
- 15) Vecchio.F.J., and Collins,M.P.：Compression Response of Cracked Reinforced Concrete,ASCE, pp.3590-3610, 1993.12
- 16) ACI committee 318：Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318M-83), American Concrete Institute, Detroit, 1983
- 17) 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
- 18) 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
- 19) CEB：CEB- FEP MODEL CODE1990, Thomas Telford, pp.33-58, 82-86, 1993