

再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料製 RC 梁の破壊挙動に関する基礎的研究

大津 直人^{*1} 渡部 憲^{*2} 佐藤 勉^{*1}

Fundamental Study on the Fracture Behavior of RC Beam Made of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites Using Recycled Fine Aggregate

by

Naoto OHTSU^{*1}, Ken WATANABE^{*2} and Tsutomu SATO^{*1}

(Received on Sep. 30, 2014 and accepted on Nov. 13, 2014)

Abstract

Recently, researches on recycled aggregates have actively been carried out in concrete industries. In order to promote the recycle of concrete more extensively, it is necessary to develop new technology for effective use of recycled aggregates. As an example, research on ductile-fiber-reinforced cementitious composites (DFRCC) using recycled fine aggregates has been reported. DFRCCs are composites of cementitious material reinforced with fibers, which have multiple cracking characteristics and much improved toughness during bending, tension and compression fractures. For applying DFRCC to RC structures, the tests of RC members made of DFRCC are necessary to confirm its reinforcement effect. In the present study, we first implemented the 4-point RC beam bending test on DFRCC using recycled fine aggregate. Then we investigated the fracture behavior of the RC beams with the finite element method (FEM). This paper presents the conclusion that the load-displacement relationship for RC beam specimens made of DFRCC obtained from FEM were in fair agreement with experimental ones.

Keywords: Recycled fine aggregate, Ductile-fiber-reinforced cementitious composites, RC beam

1. はじめに

近年、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料(以下、DFRCC と略記)が開発されている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である¹⁾。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。

このような材料を鉄筋コンクリート(以下、RC と略記)構造物に適用しようとする場合、DFRCC 製 RC 部材の耐力を適切に評価できる耐力算定式を構築しておくことが重要である。そのため、DFRCC 製 RC 梁のせん断耐力算定式が、建築・土木分野における研究により複数提案されている。例えば、土木学会の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²⁾では、コンクリート

標準示方書³⁾に示されている、RC 梁を対象としたせん断耐力算定式に、補強用繊維が負担する設計せん断力を加算する方式を採用している。また、永井ら⁴⁾や細矢ら⁵⁾は、DFRCC 製 RC 梁の構造性能に関する研究を行っており、日本建築学会の終局強度型耐震設計指針⁶⁾の RC 梁を対象としたせん断耐力算定式をベースに、DFRCC 製 RC 梁のせん断耐力算定式を提案している。

ところで、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おく必要があり、その一例として、DFRCC への再生細骨材の適用性に関する研究なども報告されている⁷⁾。

このような背景から、筆者らは、現在、再生細骨材を使用した DFRCC(以下、RDFRCC と略記)製 RC 梁のせん断耐力算定式の構築を目指している。そのためには、RC 梁のせん断耐力に影響を及ぼすとされる圧縮強度、引張鉄筋比、せん断補強筋比およびせん断スパン比等を検討項目とした、RDFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験を行い、実験データを蓄積していく必要がある。それと同時に、解析的手法を用いて、内部応力状態等の実験では得られ

^{*1} 工学研究科建築学専攻修士課程

^{*2} 工学部建築学科教授

Table 1 Outline of RC beam specimens

Specimen	Main reinforcement				DFRCC		
	Ratio (P_t) (%)	Young's modulus (kN/mm^2)	Yield strength σ_y (N/mm^2)	Yield point strain ϵ ($\times 10^{-6}$)	Water- cement ratio (W/C) (%)	Sand- cement ratio (S/C) (%)	Fiber volume fraction (V_f) (vol.%)
R-DFRCC-40	5.88	209	505	2710	40	40	3
R-DFRCC-50					50	65	
R-DFRCC-60					60	90	
N-DFRCC-50					50	65	

Table 2 Material properties of DFRCC

Specimen	Compression			Bending			Pull-out	
	Comp- ressive strength σ_B (N/mm^2)	Young's modulus E (kN/mm^2)	Comp- ressive fracture energy G_{fc} (N/mm)	Bending strength (N/mm^2)	Tensile strength F_{tb} (N/mm^2)	Ultimate tensile strain ϵ_{ub}	Bond strength (N/mm^2)	Slip of bond strength S_b (mm)
R-DFRCC-40	51.9	20.4	64.7	7.50	2.86	0.007	16.9	0.22
R-DFRCC-50	38.4	16.2	52.6	6.34	2.27	0.022	13.3	0.40
R-DFRCC-60	29.3	14.3	46.5	6.60	2.33	0.049	10.4	0.47
N-DFRCC-50	38.8	15.7	52.8	6.12	2.19	0.024	14.1	0.31

ない情報を得ることにより, RDRFCC 製 RC 梁の耐力発現機構についても検討しておく必要がある. 筆者らの一部らもこれまでに, 通常, コンクリートではせん断破壊する RC 梁に, RDRFCC を適用することで, せん断補強筋を使用していないに関わらず, 主筋が降伏し, 曲げ破壊に至り, せん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⁸⁾. また, 引張鉄筋比の相違が RDRFCC 製 RC 梁の破壊挙動に及ぼす影響についても検討を行っており, 引張鉄筋比を既報⁸⁾より増大させた場合, 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, 破壊する等の知見が得られた⁹⁾. しかし, これまでに RDRFCC の圧縮強度の相違が RDRFCC 製 RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響については検討されていない.

そこで, 本研究では, 圧縮強度の相違が RDRFCC 製 RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響を検討するため, 水セメント比(以下, W/C と略記)の異なる RDRFCC 製 RC 梁試験体の載荷試験を行った. 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, RDRFCC 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, RDRFCC 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. 実験概要

本研究では Table 1 に示す, W/C を検討項目とした DFRCC の材料試験および DFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験を実施した. DFRCC 製 RC 梁試験体は, 文献^{2,4)}を参考にして主筋を D-16(SD490), 引張鉄筋比(P_t)=5.88%とし, W/C の相違に係わらずせん断破壊することを目指した試験体である. DFRCC の種類は, 天然細骨材(N, 砕砂(表乾密度:2.69g/cm³, 吸水率:1.03%)と山砂(表乾密度:2.58g/cm³, 吸水率:2.56%)を質量比 7:3 で混合使用)を使用した DFRCC(N-DFRCC)および再生細骨材(R, 表乾密

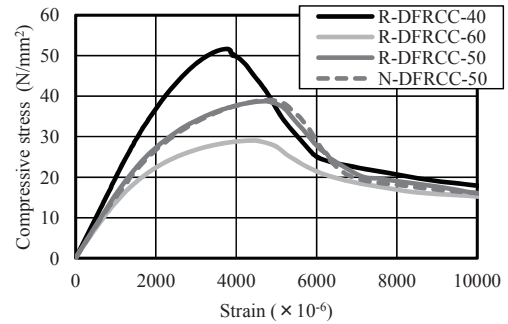


Fig.1 Compressive stress-Strain relationship

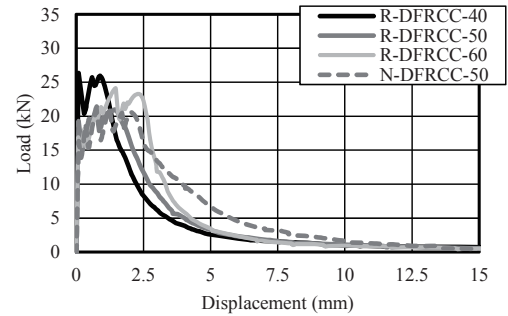


Fig.2 Load-Displacement relationship

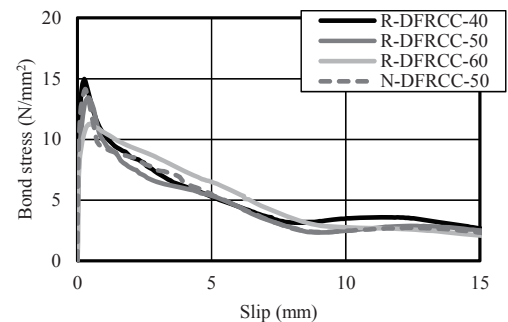


Fig.3 Bond stress-Slip relationship

度:2.54g/cm³, 吸水率:4.12%)を使用した DFRCC (R-DFRCC)とした. R-DFRCC の W/C は 40, 50 および 60%とした. なお, N-DFRCC は比較対象として W/C を 50%のみとした. DFRCC に使用した繊維は PVA 繊維(長:18mm, 径:0.2mm, 弾性係数:27kN/mm², 引張強度:975N/mm²)であり, 繊維体積混入率(V_f)を 3%とした.

2.1 材料試験

本研究では DFRCC 製 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, DFRCC の 1 軸圧縮試験, 3 等分点曲げ試験, 引抜き試験および鉄筋の引張試験を実施した.

試験体は, 1 軸圧縮試験では $\phi 100 \times 200$ mm の円柱試験体, 3 等分点曲げ試験では $100 \times 100 \times 400$ mm の角柱試験体, 引抜き試験では D-16(SD490)の鉄筋を挿入した $100 \times 100 \times 100$ mm の角柱試験体, 鉄筋の引張試験では D16(SD490), 平行部長さを公称直径の 10 倍以上とした棒状試験体とし, 各検討項目につき 3 体製作した. DFRCC 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, コンプレッソ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

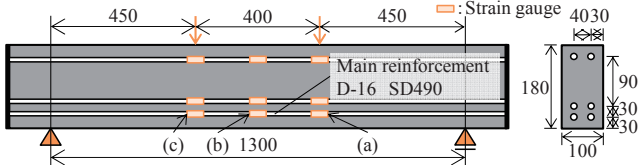


Fig.4 Typical details of specimens

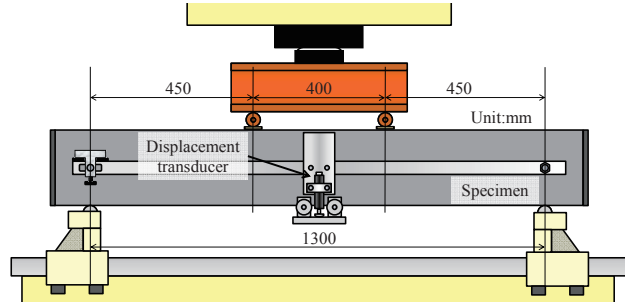


Fig.5 RC beam 4-points bending test

変位計による荷重盤間変位とし、圧縮破壊エネルギー(以下、 G_{Fc} と略記)は文献⁷⁾を参考に算出した。

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($F_{t,b}$)および引張終局ひずみ($\epsilon_{tu,b}$)は文献¹⁰⁾付属書(参考)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。

鉄筋の引張試験では、試験方法を文献¹²⁾に準じ、計測項目を荷重、試験体中央部の縦・横ひずみおよび伸び量とした。

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。

各種材料試験により得られた鉄筋および DFRCC の材料特性一覧を Table 1 および Table 2 に示す。また、1軸圧縮試験により得られた DFRCC の圧縮応力-縦ひずみ関係を Fig.1 に、3等分点曲げ試験により得られた DFRCC の荷重-変位関係を Fig.2 に、引抜き試験により得られた DFRCC の付着強度-すべり関係を Fig.3 に、それぞれ示す。なお、Fig.1~Fig.3 には、代表的な値を示している。

2.2 RC 梁載荷試験

DFRCC 製 RC 梁試験体の概要を Fig.4 に、載荷試験の概要を Fig.5 にそれぞれ示す。DFRCC 製 RC 梁試験体は、主筋を D-16(SD490)、引張鉄筋比(P_t)=5.88%とした、梁せい(D)180mm×梁幅(b)100mm×梁長さ 1500mm の試験体である。また、支点間距離(L)を 1300mm、せん断スパン長(a)を 450mm、荷重点間距離を 400mm とし、主筋は試験体両端の定着鋼板(厚さ 6mm)に溶接した。DFRCC 製 RC 梁試験体は打設後 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。

せん断破壊した DFRCC 製 RC 梁試験体の耐力は、文献¹³⁾に示されている以下の算定式により算出した耐力

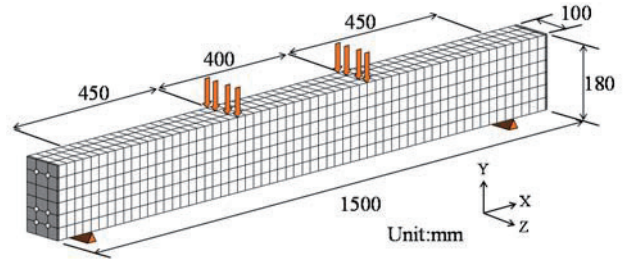


Fig.6 FEM mesh division of RC beam specimen

で評価した。

$$Q_{bu} = \left\{ \frac{0.092k_u k_p (18 + \sigma_B)}{M/(Qd) + 0.12} + 0.85\sqrt{P_w \sigma_{wy}} \right\} bj \quad (1)$$

ここに、 Q_{bu} :せん断耐力(N)、 k_u :梁断面寸法による補正係数で 1.0 とした、 k_p :引張鉄筋比による補正係数で $0.82P_t^{0.23}$ とした、 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。

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 DFRCC 製 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。DFRCC 製 RC 梁試験体は、DFRCC 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。DFRCC 製 RC 梁試験体の要素分割を Fig.6 に示す。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り結合される¹⁴⁾。なお、要素分割は、DFRCC 製 RC 梁試験体の計画寸法で行った。

解析方法は、最初に自重を加え、次に Fig.6 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 DIANA9.4.3¹⁴⁾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

DFRCC 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。

DFRCC の圧縮側応力-ひずみ関係は Fig.7 に示す Parabolic で表し、応力下降域で囲まれる面積は G_{Fc} /要素代表長さ(L_c)とした。 G_{Fc} は Table 2 の材料試験結果とし、 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、Vecchio¹⁵⁾らが提案している横拘束による圧縮強度の増大、Collins¹⁶⁾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。

DFRCC の引張側の応力-ひずみ関係は、Fig.8 に示すように、筆者らの一人ら¹⁷⁾が提案している多直線モデルを適用した。

DFRCC と梁主筋の間には、引抜き試験により得られた

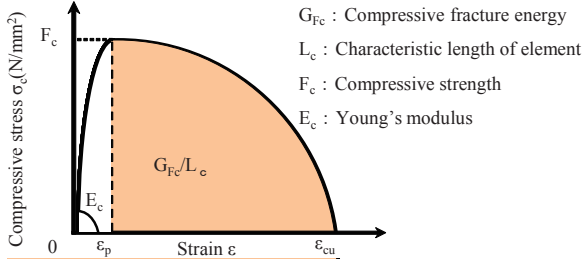


Fig.7 Compression model

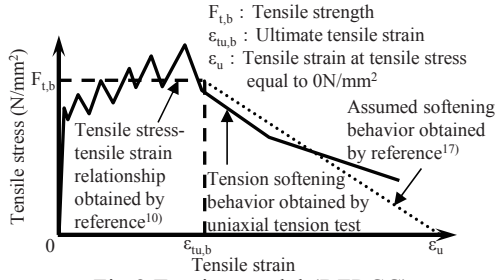


Fig.8 Tension model (DFRCC)

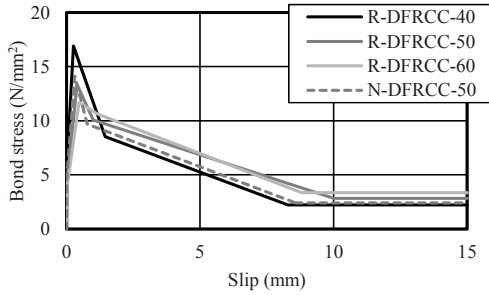


Fig.9 Bond stress-Slip relationship

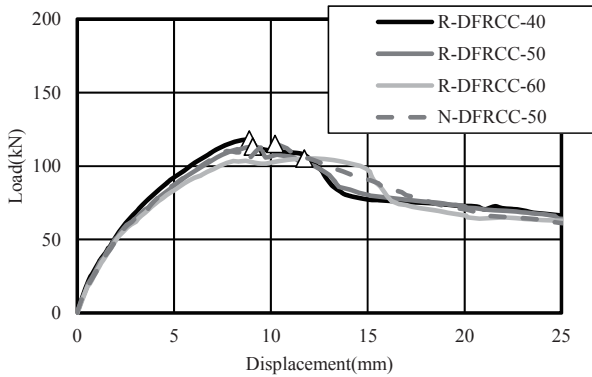
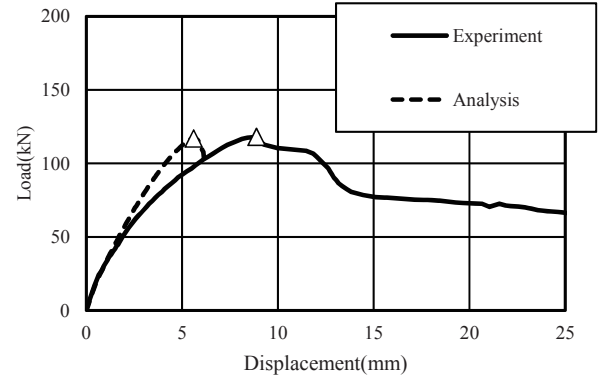


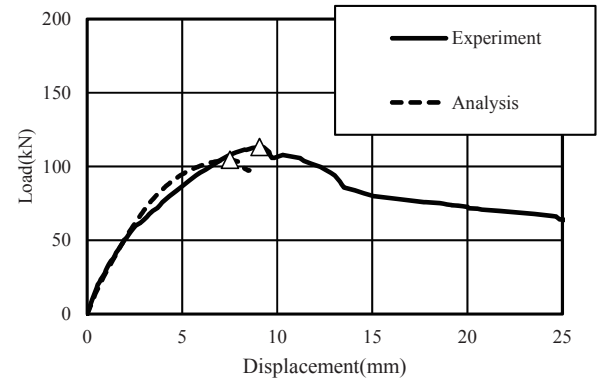
Fig.10 Load-Displacement relationship

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点を付着強度時すべり (S_u) の 1/20、第2点を S_u 、第3点を S_u の 2.5 倍、第4点を第3点の 7.5 倍とした。梁主筋と DFRCC 間に適用した付着応力-すべり関係を Fig.9 に示す。

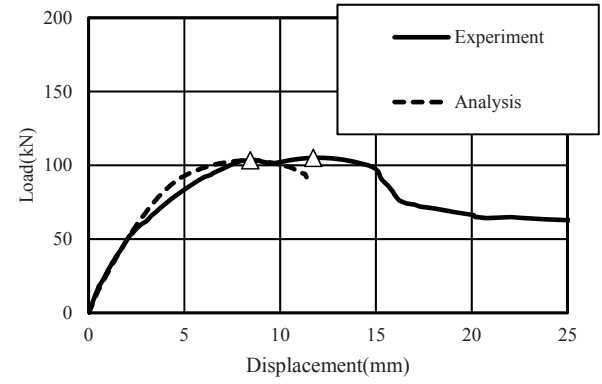
鉄筋の降伏基準は、Von Mises 基準を適用した。鉄筋の降伏強度およびヤング係数は Table 1 に従い、応力-ひずみ関係を bi-linear モデルとした。なお、第2勾配の剛性はヤング係数の 1/100 とした。



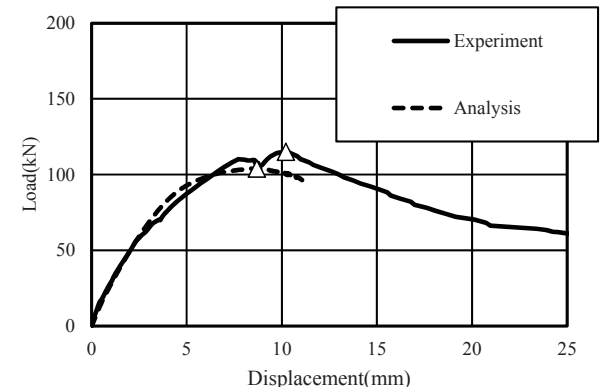
(a) R-DFRCC-40



(b) R-DFRCC-50



(c) R-DFRCC-60



(d) N-DFRCC-50

Fig.11 Load-Displacement relationship
 (Experiment, Reference analysis)

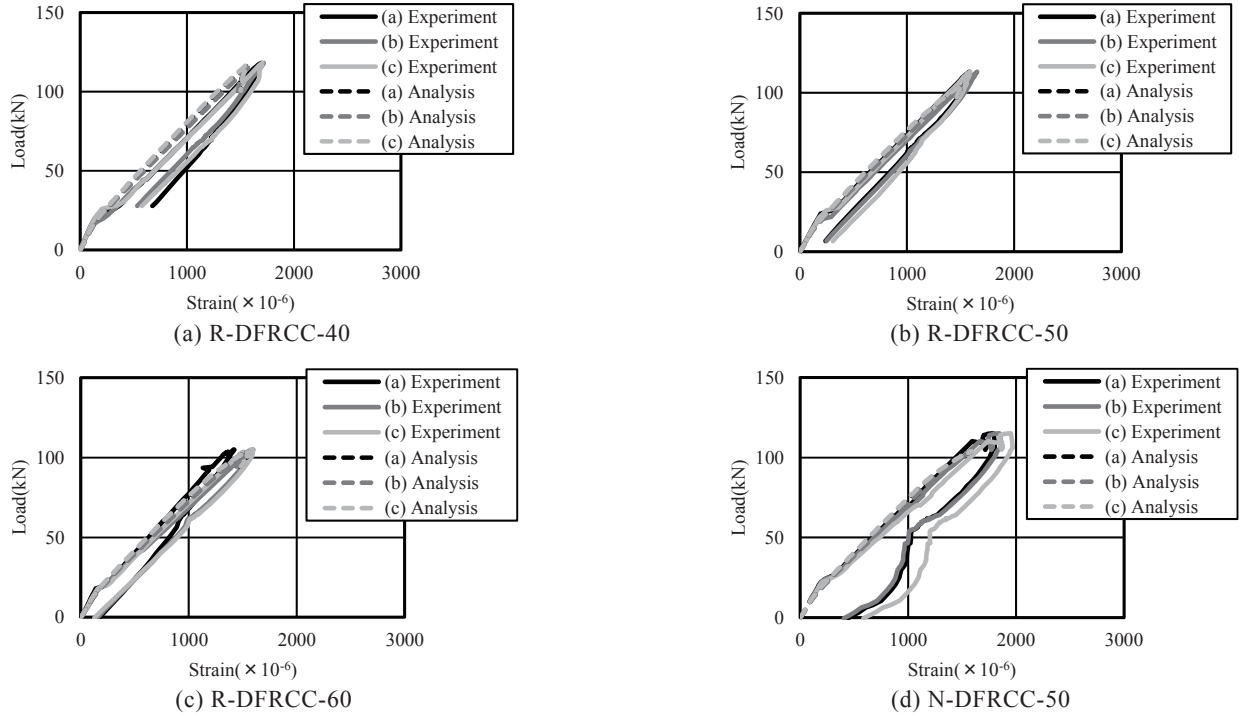


Fig.12 Load-Strain relationship
(Experiment, Analysis)

4. 結果と考察

4.1 DFRCC 製 RC 梁載荷試験により得られた荷重－変位関係

Fig.10 に、DFRCC 製 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三角印は最大荷重時を示している(Fig.11 も同様である)。いずれの実験結果においても、主筋が降伏せずに最大荷重をむかえ、せん断破壊に至った。各実験結果の最大荷重は、R-DFRCC-40 で 118kN、R-DFRCC-50 で 113kN、R-DFRCC-60 で 105kN、N-DFRCC-50 で 115kN となった。

ここで、一般的なコンクリートを使用した RC 梁のせん断耐力を算出する場合に用いられる式(1)に、本材料試験で得られた DFRCC の圧縮強度(前掲、Table 2)を代入し、せん断耐力を算出すると、計算せん断耐力は R-DFRCC-40 で 59.7kN、R-DFRCC-50 で 48.2kN、RDFRCC-60 で 40.4kN、N-DFRCC-50 で 48.6kN となり、実験結果の最大荷重は計算せん断耐力に対して、それぞれ 1.98 倍、2.34 倍、2.56 倍、2.37 倍となった。既報⁹⁾では、本報と同様の実験条件で、圧縮強度 53.2N/mm² のコンクリート製 RC 梁試験体の載荷試験を行っており、最大荷重が 70.1kN であった(せん断破壊)。このコンクリートと同程度の圧縮強度を有する RDFRCC 製 RC 梁試験体(R-DFRCC-40)の最大荷重は、前述の通り 118kN である。即ち、RC 梁試験体に RDFRCC を適用することにより、RC 梁試験体のせん断耐力は大幅に増大する。

Fig.11 に、DFRCC 製 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。なお、本解析では、非線形反復計算法として Newton- Raphson 法を採用しているが、最大荷重以降、

変位が増大し、非線形性が強くなると解析は容易に発散した(各解析において、最大荷重以降、変位が数 mm 進展した時点)。そのため、図中には、解析が発散する直前までの結果を示している。

各解析結果の最大荷重時の変位は、実験結果と比較して若干小さくなっている。しかし、各解析結果の最大荷重は、R-DFRCC-40 で 117kN、R-DFRCC-50 で 105kN、R-DFRCC-60 で 103kN、N-DFRCC-50 で 104kN となっており、前述の各実験結果の最大荷重と概ね近似している。

4.2 下端下段主筋のひずみ

Fig.12 に、DFRCC 製 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、下端下段主筋(Fig.4 中の(a)、(b)および(c))の荷重－ひずみ関係を示す。W/C に係わらず、各解析結果の荷重－ひずみ関係の形状は、実験結果と概ね近似している。また、実験結果と同様に、解析においても主筋が降伏していないことが確認できる。

即ち、本解析手法により、主筋が降伏せずに最大荷重をむかえ、せん断破壊に至る DFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験結果を、概ね評価できる。

なお、各実験結果のひずみは、下端下段主筋 2 本(梁幅方向に配筋した 2 本)の、同一位置(Fig.4 中の(a)、(b)および(c))で計測された値の平均値としている。梁幅方向に配筋した 2 本の主筋のひずみをそれぞれ確認したところ、いずれの位置においても主筋の降伏は確認できなかった。

4.3 ひび割れ発生状況

Fig.13 に DFRCC 製 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、Fig.14 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

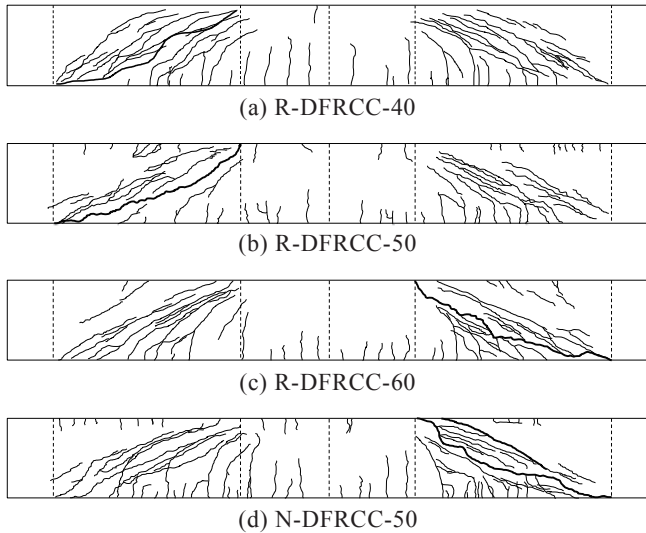


Fig.13 Crack pattern (Experiment)

示す。なお、Fig.13 では最大荷重時のひび割れ発生状況を示しており、図中の太線は、最終的に、ひび割れが大きく開口した箇所を示している。Fig.14 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、短線の間隔は、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、DFRCC 製 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着目すると、いずれの実験結果においても、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の一部が拡大・連結し、せん断破壊に至った。

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、いずれの解析結果においても、実験結果と同様に、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の一部が拡大・連結し(図中の黒線)、最大荷重をむかえている。

以上、DFRCC 製 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。

なお、DFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験では、最終的に、左右いずれかのひび割れが大きく開口した。しかし、解析では、最大荷重以降、変位が数 mm 進展した時点で発散したため、このような現象を再現できていない。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) W/C を 40~60% とした RDFRCC 製 RC 梁試験体のせん断耐力が明らかとなった。
- 2) 本研究の範囲において、RC 梁試験体に RDFRCC を適用することにより、RC 梁試験体のせん断耐力が大幅に増大する。
- 3) 本解析手法により、主筋が降伏せずに最大荷重をむかえ、せん断破壊に至る RDFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験結果を、概ね評価できる。

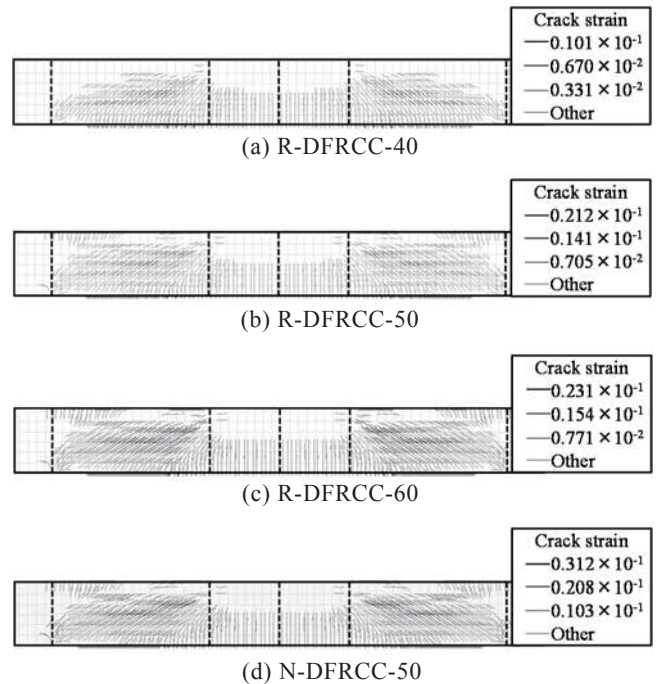


Fig.14 Crack pattern (Analysis)

今後は、本実験結果を踏まえ、主筋のひずみ計測位置を増やすこと等により、DFRCC 製 RC 梁試験体における破壊の局所化について検討を進める。また、非線形反復計算法として修正 Newton-Raphson 法を用いる等、更なる解析的検討を行う。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料指針作成小委員
- 3) 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)、土木学会 (2007).
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編、土木学会 (2002).
- 5) 永井寛、閑田徹志、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).
- 6) 細谷博、福山洋、岸本剛、河野政典：高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた梁の構造実験、日本建築学会技術報告集、Vol.16, No.32, pp.133-138 (2010).
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、日本建築学会、pp.106-121 (1990).
- 8) 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).
- 9) 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).
- 10) 佐藤勉, 渡部憲, 中村充哉: せん断補強筋の無い高靱性コンクリート製 RC 梁の破壊性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.418-423 (2014).
- 11) 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).
- 12) 建材試験センター規格: 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(JSTM C 2101), 建材試験センター (2005).
- 13) JIS 規格: 金属材料引張試験方法(JIS Z 2241), 日本規格協会, pp.502-546 (2012).
- 14) 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).
- 15) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics (DIANA version-8): DIANA finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research.
- 16) Selby,R.G., and Vecchio.F.J. : Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02. Univ.Toront (1993).
- 17) Vecchio.F.J., and Collins,M.P. : Compression Response of Cracked Reinforced Concrete,ASCE, pp.3590-3610 (1993).
- 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).