

再生細骨材を使用した高流動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

白鳥 有平^{*1} 渡部 憲^{*2} 大津 直人^{*3}

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

by

Yuhei SHIRATORI^{*1}, Ken WATANABE^{*2} and Naoto OTSU^{*3}

(Received on Sep.27, 2016 and accepted on Jan.12, 2017)

Abstract

Recently, researches on recycled aggregate have been actively carried out in the concrete industry. In order to promote the recycling of concrete more extensively, it is necessary to develop new technology for effectively using recycled aggregate. As an example, research on ductile-fiber-reinforced cementitious composites (DFRCC) using recycled fine aggregate 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 fracture. However, due to workability-related defects and so on, there are only a limited number of examples of construction using DFRCC. Therefore, this study focused on high-fluidity concrete, and examined the material properties of high-fluidity DFRCC (HFDFRCC) using recycled fine aggregate (R-HFDFRCC). However, research on the long-term properties of RC members made of R-HFDFRCC has not been carried out. To apply R-HFDFRCC to RC structures, tests of RC members made of R-HFDFRCC are necessary to confirm the effects of its changes over time. In the present study, we first carried out four-point loading tests on RC beam specimens made of R-HFDFRCC. Then we investigated the fracture behavior of these specimens with the finite element method (FEM). It is concluded that both the experimental and theoretical maximum loads for RC beam specimens made of R-HFDFRCC increase with increase of test age.

Keywords: Recycled fine aggregate, Ductile-fiber-reinforced cementitious composites, High-fluidity, 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。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²⁾、その数は未だ少ないのが現状である。この理由としては、施工性の問題や、他の材料と比較してコストが高い等の問題が挙げられる。今後、

DFRCC の利用を推進していくためには、既存材料の改良を含む新しい材料の開発が必要であると考えられる。

ところで、現在、生産活動を実施するにあたり地球環境に対する取り組みは重要な課題であり、コンクリートの分野においても、解体コンクリート塊から取り出した再生骨材を使用して再びコンクリートを製造する、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る。

このような背景から、筆者らの一部ら³⁾は、DFRCC のワーカビリティの改善および再生細骨材の用途拡大を目的に、混和材としてフライアッシュ、細骨材として再生細骨材を使用した高流動 DFRCC(以下、HFDFRCC と略記)の材料特性について検討を行った。その結果、再生細骨材を使用した HFDFRCC は十分な曲げ靱性およびひび割れ分散性を有していること等を明らかにしている。

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、再生細骨材を使用した

*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

*2 工学部建築学科教授

*3 株式会社スガテック

HFD FRCC 製 RC 部材のせん断耐力を適切に評価できるせん断耐力算定式について検討を行っておくことが重要である。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、再生細骨材を使用した HFD FRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験を行い、適切な強度管理の基、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ない情報を得ることにより、再生細骨材を使用した HFD FRCC 製 RC 梁のせん断耐力発現機構についても検討しておく必要がある。また、再生細骨材を使用した HFD FRCC にはフライアッシュを使用しており、一般的に、フライアッシュを使用したコンクリートは、長期的な強度の増進が大きいと、強度管理材齢を 56 および 91 日のような長期材齢としている⁴⁾。そのため、再生細骨材を使用した HFD FRCC 製 RC 部材の破壊挙動に関する長期材齢での検討が重要である。

そこで、本研究では、材齢の相違が再生細骨材を使用した HFD FRCC 製 RC 梁のせん断耐力に及ぼす影響を検討するため、材齢を 28, 56 および 91 日相当とし、再生細骨材を使用した HFD FRCC 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、再生細骨材を使用した HFD FRCC 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、再生細骨材を使用した HFD FRCC 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

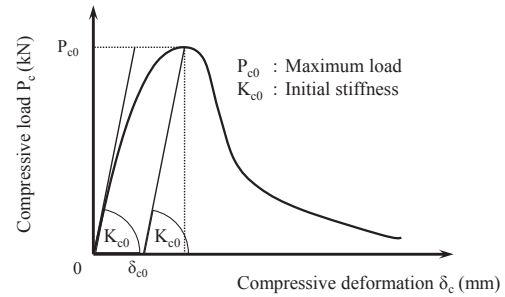
本研究では Table 1 に示す、材齢を 28, 56 および 91 日相当とした HFD FRCC の材料試験および HFD FRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験を実施した。HFD FRCC の種類は、天然細骨材 {N, 砕砂(最大骨材寸法:2.5mm, 表乾密度:2.66g/cm³, 吸水率:1.01%, 粗粒率:2.86)と山砂(最大骨材寸法:1.2mm, 表乾密度:2.59 g/cm³, 吸水率:1.50 %, 粗粒率:1.40)を質量比 2:8 で混合使用}を使用した HFD FRCC(N-HFD FRCC)および再生細骨材 {R, 中目(最大骨材寸法:2.5mm, 表乾密度:2.57g/cm³, 吸水率:2.89%, 粗粒率:2.61)と細目(最大骨材寸法:0.6mm, 表乾密度:2.53g/cm³, 吸水率:4.46%, 粗粒率:1.16)を質量比 4:6 で混合使用}を使用した HFD FRCC(R-HFD FRCC)とした。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を使用し、HFD FRCC の水結合材比(W/B)は 50%とした。繊維は PVA 繊維(径:0.2mm, 長さ:18mm, 弾性係数:27kN/mm², 引張強度:975N/mm²)を使用し、繊維体積混入率(V_f)を 3.0%とした。混和材料は高性能 AE 減水剤、分離低減剤、およびフライアッシュ II 種(密度:2.30g/cm³, セメント置換率 20%で使用)を使用した。

2.1 材料試験

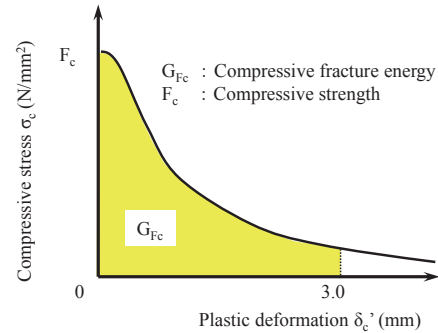
本研究では、HFD FRCC 製 RC 梁試験体の強度管理、並びに材料モデルを特徴づける破壊力学パラメータを抽

Table 1 Outline of RC beam specimens.

Specimen	Main reinforcement				HFD FRCC			
	Ratio (P _j) (%)	Young's modulus (kN/mm ²)	Yield strength σ _y (N/mm ²)	Yield point strain ε (×10 ⁻⁶)	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Fiber volume fraction (V _f) (vol.%)	Replacement ratio of fly ash (%)
R-HFD FRCC-28D	5.88	197	511	2607	50	65	3.0	20
R-HFD FRCC-56D								
R-HFD FRCC-91D								
N-HFD FRCC-56D								



(a) Compressive load-compressive deformation relationship



(b) Compressive stress-plastic deformation relationship

Fig.1 Estimation procedure of compression softening curve.

出するため、HFD FRCC 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 100φ×200mm の円柱試験体、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(SD490)の鉄筋を挿入した 100×100×100mm の角柱試験体、鉄筋の引張試験では D-16(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 6 体製作した。HFD FRCC 試験体は打込み後 2 日で脱型し、養生室内の積算温度が 840°DD, 1680°DD および 2730°DD {材齢 28 日(28D), 56 日(56D)および 91 日(91D)に相当}となるまで湿布養生とした。

1 軸圧縮試験は、試験方法を文献⁵⁾に準じ、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変位計による載荷盤間変位とした。

Fig.1 に、圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})の評価方法について示す。評価方法は、文献^{5, 6)}に示す以下の手法により算出した。

まず、実験により得られた圧縮荷重(P_c)ー載荷盤間変位(δ_c)関係(Fig.1(a))を圧縮応力(σ_c)ー塑性変形(δ'_c)関係

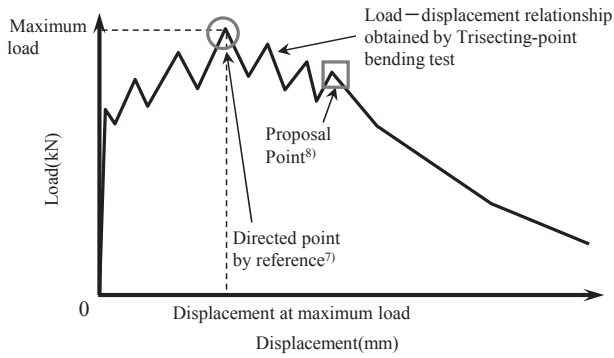


Fig.2 Image of load-displacement relationship.

Table 2 Material properties of HFDFRCC.

Specimen	Compression			Bending			Pull-out	
	Compressive strength (F_c) (N/mm ²)	Young's modulus (E) (kN/mm ²)	Compressive fracture energy (G_{fc}) (N/mm)	Bending strength (F_{tb}) (N/mm ²)	Tensile strength (F_{tb}) (N/mm ²)	Ultimate tensile strain ($\epsilon_{tu,b}$)	Bond strength (τ_{max}) (N/mm ²)	Slip of bond strength (S_b) (mm)
R-HFDFRCC-28D	29.3	13.9	49.8	6.27	2.05	0.0289	12.9	0.449
R-HFDFRCC-56D	35.4	15.9	59.7	6.52	2.25	0.0302	15.8	0.357
R-HFDFRCC-91D	45.5	17.1	67.4	6.43	2.25	0.0315	14.7	0.273
N-HFDFRCC-56D	38.3	15.4	49.2	5.42	1.88	0.0260	12.8	0.353

(Fig.1(b))に変換する．次に， $\sigma_c - \delta_c$ 関係から δ_c が 3.0mm までの面積を求める．本研究ではこれを G_{Fc} として評価した．

3 等分点曲げ試験は，試験方法を文献 ⁷⁾ に準じ，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た．

引張強度($F_{t,b}$)および引張終局ひずみ($\epsilon_{t,b}$)は文献 ⁷⁾ 附属書(参考)を基に，文献 ⁸⁾ に示す以下の手法により算出した(Fig.2 参照)．

3 等分点曲げ試験で得られた荷重－変位関係の中には，最大荷重以降もひび割れ分散を繰り返し，その後，荷重が再上昇することなく急激に低下し始める場合がある．このような場合，文献 ⁷⁾ 附属書(参考)に示される手法では，最大荷重時において $F_{t,b}$ および $\epsilon_{t,b}$ を算出するため， $\epsilon_{t,b}$ を過小評価している可能性がある．

そこで，本研究では，荷重が再上昇することなく急激に低下し始める地点(Fig.2 中の四角印位置)の曲げモーメントおよび曲率を用いて， $F_{t,b}$ および $\epsilon_{t,b}$ を算出した．

引抜き試験は，試験方法を文献 ⁹⁾ に準じ，計測項目を荷重，鉄筋のすべり量とした．

鉄筋の引張試験は，試験方法を文献 ¹⁰⁾ 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 HFDFRCC 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 HFDFRCC の圧縮応力－縦ひずみ関係を Fig.3 に，3 等分点曲げ試験により得られた HFDFRCC の荷重－変位関係を Fig.4 に，引抜き試験により得られた HFDFRCC の付着強度－すべり関係を Fig.5 に，それぞれ示す．

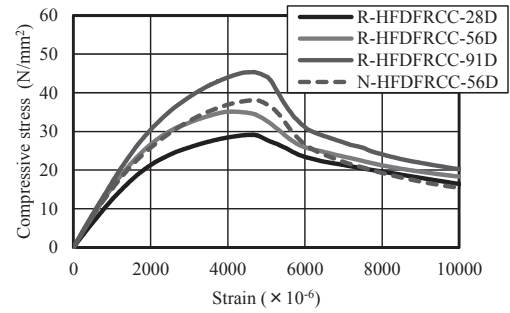


Fig.3 Compressive stress-strain relationship.

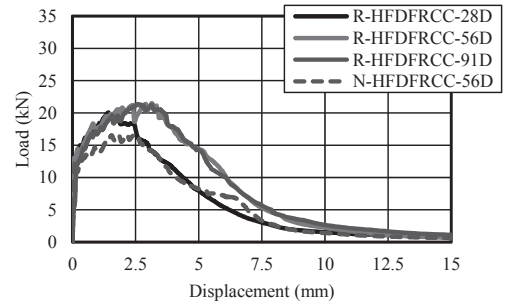


Fig.4 Load-displacement relationship.

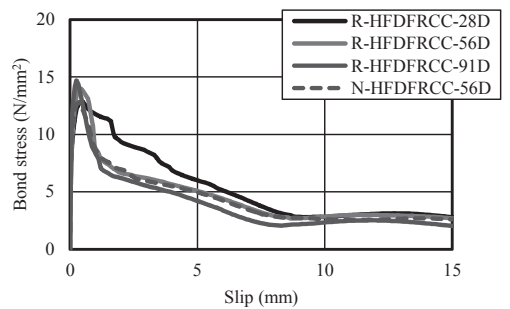


Fig.5 Bond stress-slip relationship.

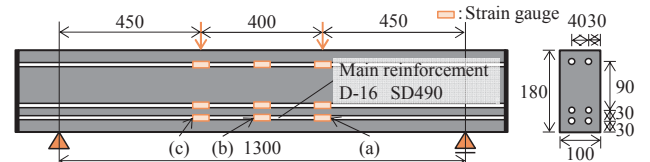


Fig.6 Typical details of specimens.

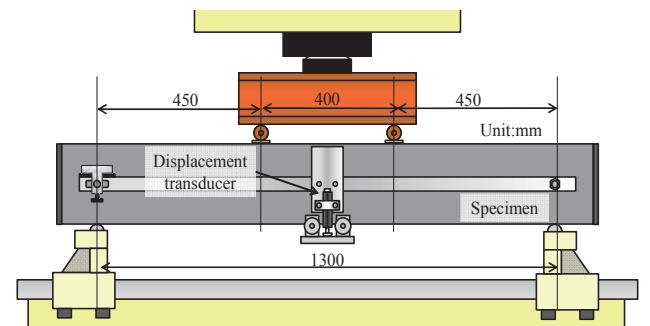


Fig.7 RC beam 4-points bending test.

2.2 RC 梁載荷試験

HFDFRCC 製 RC 梁試験体の概要を Fig.6 に，載荷試験の概要を Fig.7 にそれぞれ示す．HFDFRCC 製 RC 梁試験体は，文献 ^{11, 12)} を参考にして主筋を 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, 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。HFD FRCC 製 RC 梁試験体は打込み後 2 日で脱型し, 養生室内の積算温度で 840°DD, 1680°DD および 2730°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 HFD FRCC 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で評価した。

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

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 $0.82 P_l^{0.23}$ とした, F_c : 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 R-HFD FRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験を対象とした 3 次元非線形 FEM 解析を行った。R-HFD FRCC 製 RC 梁試験体は, R-HFD FRCC 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。R-HFD FRCC 製 RC 梁試験体の要素分割を Fig.8 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⁾。

解析方法は, 最初に自重を加え, 次に Fig.8 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 DIANA9.4.4¹⁴⁾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

R-HFD FRCC 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。

R-HFD FRCC の圧縮側応力-ひずみ関係は Fig.9 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。

R-HFD FRCC の引張側の応力-ひずみ関係は, Fig.10

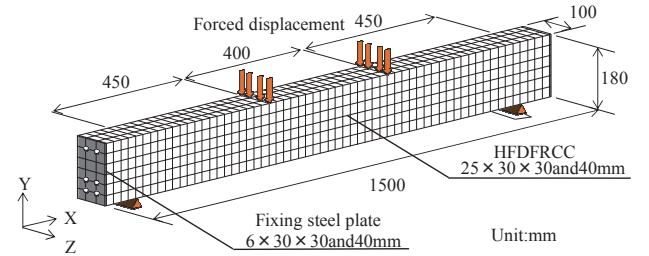


Fig.8 FEM mesh division of RC beam specimen.

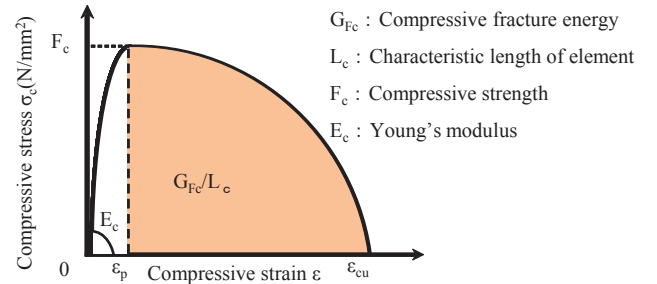


Fig.9 Compression model.

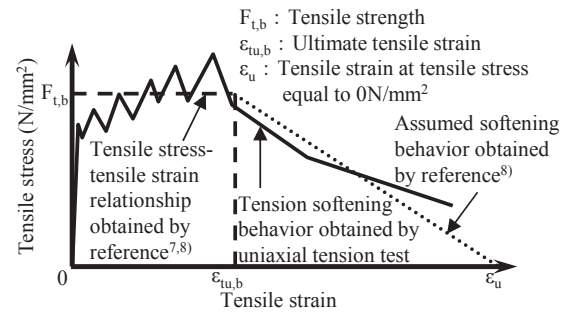


Fig.10 Tension model.

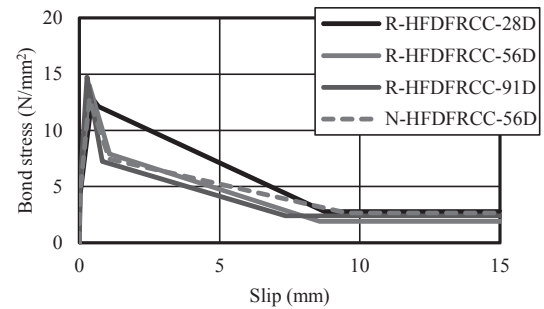


Fig.11 Bond stress-Slip relationship.

に示すように, 筆者らの一人ら⁸⁾が提案している多直線モデルを適用した。

R-HFD FRCC と梁主筋の間には, 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 HFD FRCC 間に適用した付着応力-すべり関係を Fig.11 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．

4. 結果と考察

4.1 HFDFRCC 製 RC 梁載荷試験により得られた荷重－変位関係

Fig.12 に，HFDFRCC 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，Fig.12 中には，本報と同様の配筋条件とした既報¹⁷⁾の R-DFRCC 製 RC 梁試験体 (R-DFRCC-60-28D) の結果も示してある (R-DFRCC-60-28D の載荷材齢:28D 相当，使用した R-DFRCC の W/C は 60%)．また，図中の各結果における印は最大荷重時を示している (Fig.13 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 (後掲，Fig.14 参照)．各実験結果の最大荷重は，R-HFDFRCC-28D で 90.0kN，R-HFDFRCC-56D で 96.3kN，R-HFDFRCC-91D で 103kN，N-HFDFRCC-56D で 102kN となり，R-HFDFRCC-56D の最大荷重は，R-HFDFRCC-28D の最大荷重に対して 7.0% 上昇した．また，R-HFDFRCC-91D の最大荷重は R-HFDFRCC-28D の最大荷重に対して 14.4% 上昇した．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 R-HFDFRCC の F_c (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-HFDFRCC-28D で 40.6kN，R-HFDFRCC-56D で 45.9kN，R-HFDFRCC-91D で 54.5kN となり，R-HFDFRCC-56D の計算せん断耐力は，R-HFDFRCC-28D の計算せん断耐力に対して 13.1% 上昇し，R-HFDFRCC-91D の計算せん断耐力は，R-HFDFRCC-28D の計算せん断耐力に対して 34.2% 上昇した．即ち，材齢による F_c の相違が R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響は，一般的なコンクリートを使用した場合と比較して小さい．既報¹⁷⁾の各種材料試験により得られた R-DFRCC-60-28D の材料特性一覧を Table3 に示す．R-DFRCC-60-28D の F_c は，29.3N/mm² であり，本材料試験により得られた R-HFDFRCC-28D の F_c と同値である．しかし，R-DFRCC-60-28D の最大荷重 (105kN) は，R-HFDFRCC-28D の最大荷重 (90.0kN) と比較して高くなっている．前掲，Table2 および Table3 によれば F_c 以外の各種材料特性は，R-HFDFRCC-28D と

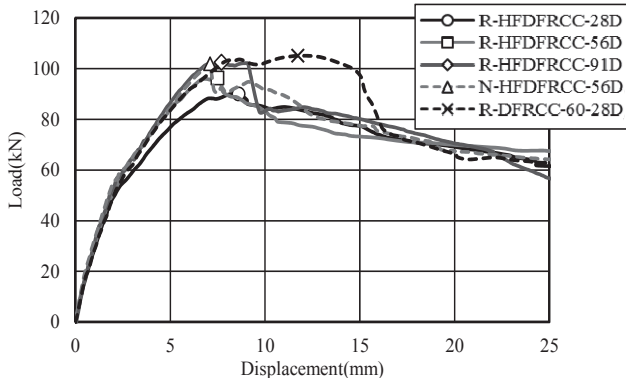


Fig.12 Load-Displacement relationship.

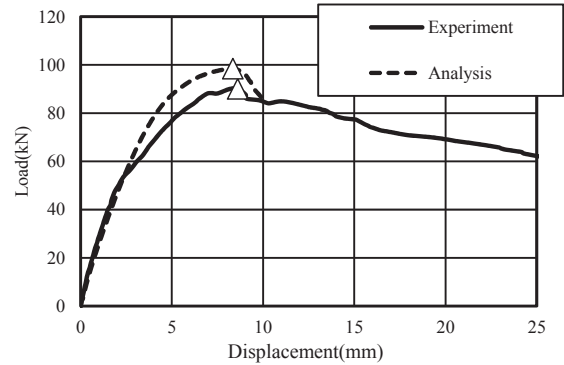
R-DFRCC-60-28D で異なっている．これらの値の相違が，DFRCC 製 RC 梁の最大荷重に影響を及ぼしたものと思われる．

Fig.13 に，R-HFDFRCC 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．

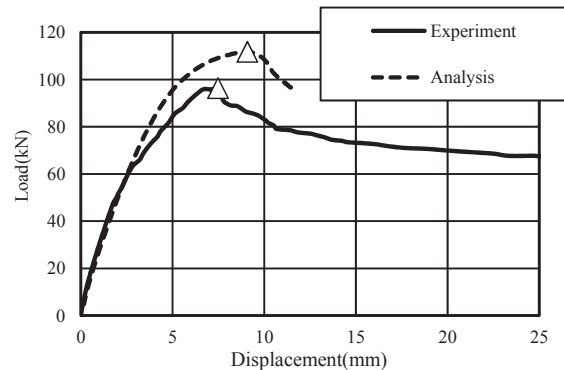
各解析結果の最大荷重は，R-HFDFRCC-28D で 98.4kN，R-HFDFRCC-56D で 112kN，R-HFDFRCC-91D で 117kN

Table 3 Material properties of DFRCC.

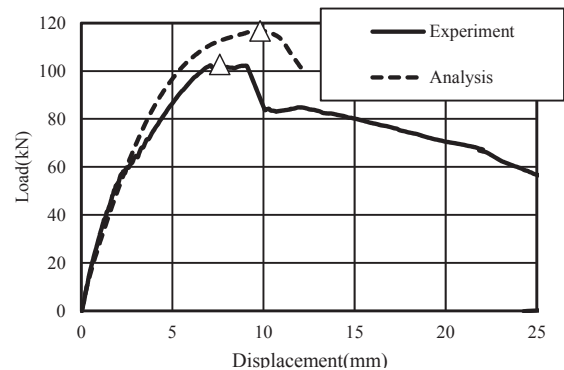
Specimen	Compression			Bending			Pull-out	
	Compressive strength (F_c) (N/mm ²)	Young's modulus (E) (kN/mm ²)	Compressive fracture energy (G_{fc}) (N/mm)	Bending strength (F_{tb}) (N/mm ²)	Tensile strength (F_{tb}) (N/mm ²)	Ultimate tensile strain ($\epsilon_{u,b}$)	Bond strength (τ_{max}) (N/mm ²)	Slip of bond strength (S_u) (mm)
R-DFRCC-60-28D	29.3	14.3	46.5	6.60	2.33	0.0490	10.4	0.470



(a) R-HFDFRCC-28D



(b) R-HFDFRCC-56D



(c) R-HFDFRCC-91D

Fig.13 Load-Displacement relationship (Experiment, Reference analysis).

となっており，前述の各実験結果の最大荷重と比較して若干高くなっている．しかし，材齢の経過に伴い，R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重が増大する傾向を，本解析においても概ね評価できている．

4.2 下端下段主筋のひずみ

Fig.14 に，R-HFDFRCC 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.6 中の(a)，(b)および(c)}の荷重－ひずみ関係を示す．材齢の相違に係らず，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 R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験結果を，概ね評価できる．

4.3 ひび割れ発生状況

Fig.15 に R-HFDFRCC 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.16 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，Fig.15 では最大荷重時のひび割れ発

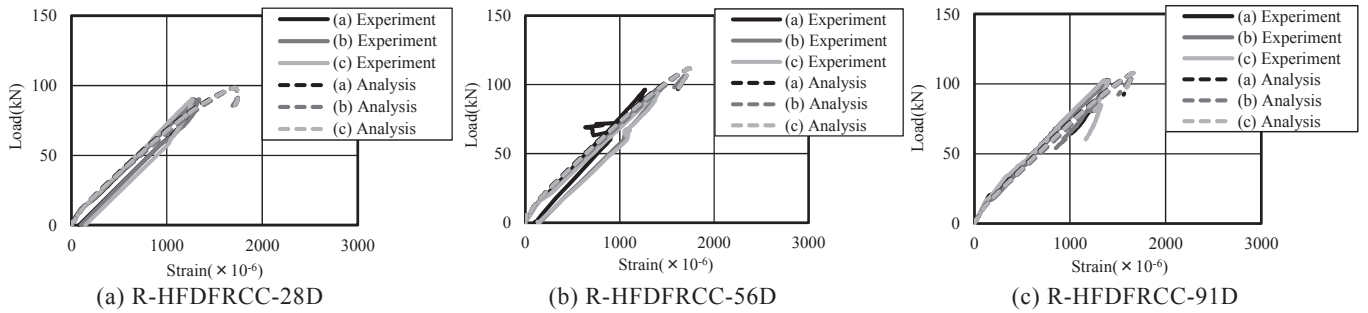


Fig.14 Load-Strain relationship
(Experiment, Analysis).

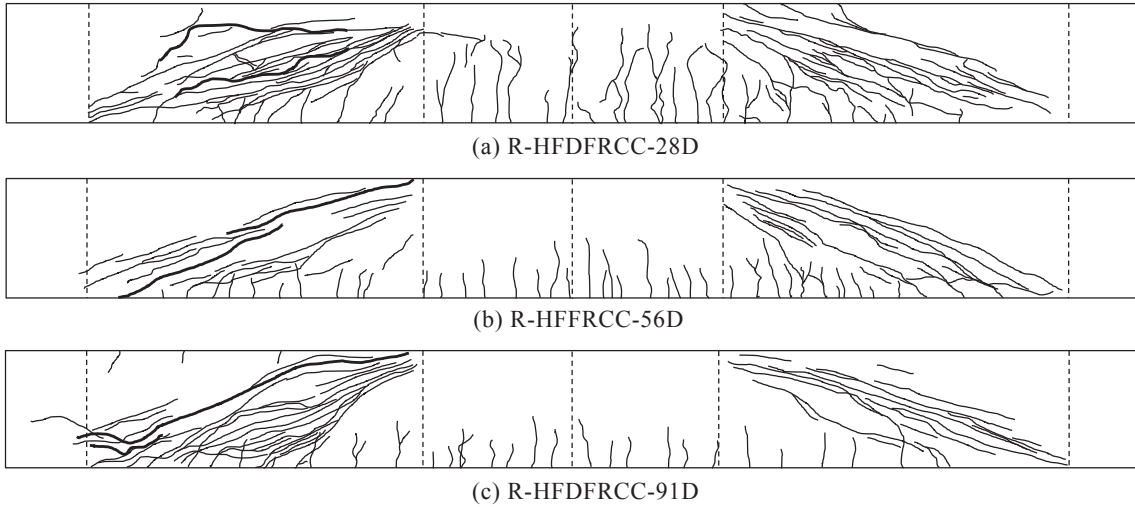


Fig.15 Crack pattern (Experiment).

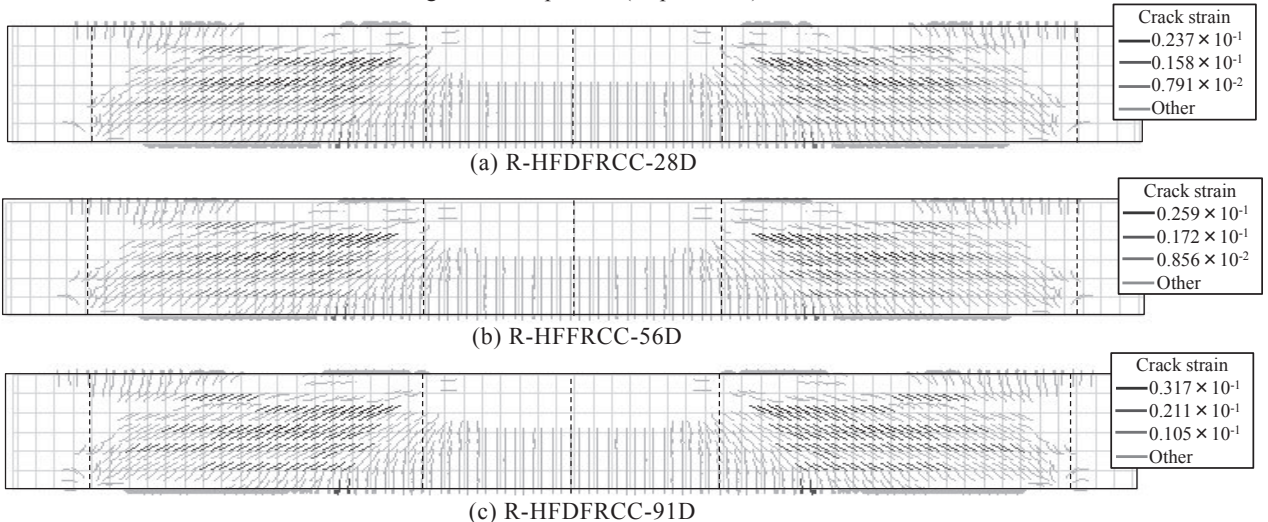


Fig.16 Crack pattern (Analysis).

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.16 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、短線の方向は、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、R-HFDFRCC 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、R-HFDFRCC 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。

4.4 各種材料特性が R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重及ぼす影響

前述 4.1 を踏まえ、 G_{Fc} 、 $F_{t,b}$ 、 $\epsilon_{tu,b}$ 、および付着強度(τ_{max})が R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重に及ぼす影響について、解析的に検討を行った。

解析要因の一覧を Table 4 に示す。解析では R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体(R-HFDFRCC-28D)を対象とした解析を基準として、 G_{Fc} 、 $F_{t,b}$ 、 $\epsilon_{tu,b}$ および τ_{max} をパラメータとした。まず、 G_{Fc} をパラメータとした解析を Case-1 および Case-2 とした。次に、 $F_{t,b}$ をパラメータとした解析を Case-3 および Case-4 とした。続いて、 $\epsilon_{tu,b}$ をパラメータとした解析を Case-5 および Case-6 とした。さらに、 τ_{max} をパラメータとした解析を Case-7 および Case-8 とした。

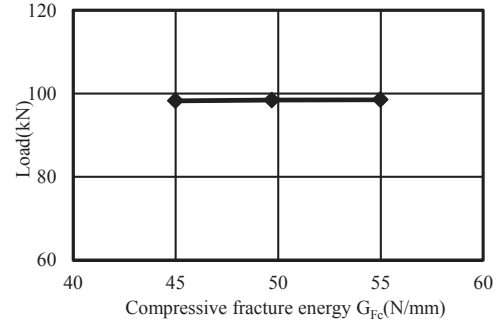
Fig.17 に、解析により得られた最大荷重— G_{Fc} 、 $F_{t,b}$ 、 $\epsilon_{tu,b}$ および τ_{max} の関係を示す。

まず、Fig.17(a)によれば、最大荷重は、 G_{Fc} が 45.0~55.0 N/mm の範囲において、 G_{Fc} の相違に係らず同程度となっている。

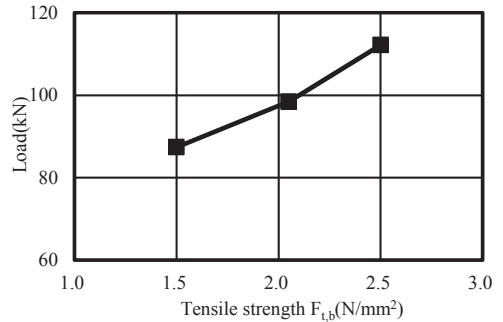
次に、Fig.17(b)によれば、最大荷重は $F_{t,b}$ 1.5~2.

5(N/mm²)の範囲において、 $F_{t,b}$ の増加に伴い増大している。 $F_{t,b}$ を 1.5~2.5(N/mm²)と 1.0(N/mm²)変化させたとき、最大荷重は、24.8kN 増大した。

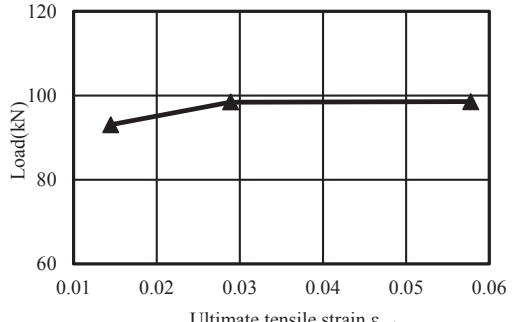
さらに、Fig.17(c)によれば、 $\epsilon_{tu,b}$ が 0.0145~0.0289 に増加すると、最大荷重は増大している。しかし、 $\epsilon_{tu,b}$ が 0.0289~0.0578 に増大しても、最大荷重の増大は確認できない。なお、 $\epsilon_{tu,b}$ を 0.0145~0.0289 と倍近く変化させても、最



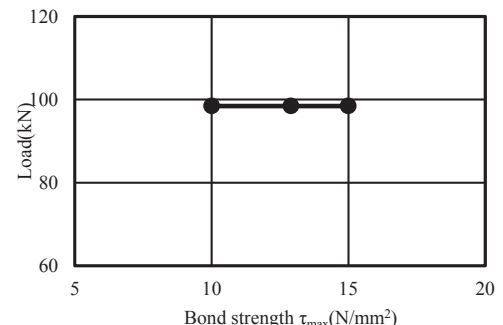
(a) Compressive fracture energy



(b) Tensile strength



(c) Ultimate tensile strain



(d) Bond strength

Fig.17 Load-Ultimate tensile strain, Tensile strength, Compressive fracture energy and Bond strength.

Table 4 Analysis factor.

Specimen	Compression			Bending		Pull-out	
	Compressive strength (F_c) (N/mm ²)	Young's modulus (E) (kN/mm ²)	Compressive fracture energy (G_{Fc}) (N/mm)	Tensile strength ($F_{t,b}$) (N/mm ²)	Ultimate tensile strain ($\epsilon_{tu,b}$)	Bond strength (τ_{max}) (N/mm ²)	Slip of bond strength (S_b) (mm)
R-HFDFRCC-28D			49.8				
Case-1			45.0	2.05			
Case-2			55.0		0.0289		
Case-3				1.50		12.9	
Case-4				2.50			
Case-5	29.3	13.9	49.8		0.0145		
Case-6					0.0578		
Case-7				2.05		10.0	
Case-8					0.0289	15.0	

大荷重は、5.74kN 程度の上昇であった。

そして、Fig.17(d)によれば、最大荷重は、 $\tau_{\max}$ が 10.0 ~ 15.0(N/mm²)の範囲において、 $\tau_{\max}$ の相違に係らず同程度となっている。

以上より、本研究の範囲において、R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重に影響を及ぼしている R-HFDFRCC の材料特性は、 F_c の他、 $\varepsilon_{tu,b}$ と $F_{t,b}$ であり、特に、 $F_{t,b}$ の影響が大きいことが解析的に明らかとなった。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 材齢の経過に伴い、R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重は増大することがわかった。
- 2) 材齢の経過に伴い、R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重が増大する傾向を、本解析においても概ね評価できた。
- 3) 本解析の手法により、主筋が降伏せずに最大荷重を迎え、せん断破壊に至る R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験結果を、概ね評価できる。
- 4) R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の最大荷重に影響を及ぼしている R-HFDFRCC の材料特性は、圧縮強度の他、引張終局ひずみと引張強度であり、特に、引張強度の影響が大きいことが解析的に明らかとなった。

今後は、R-HFDFRCC 製 RC 梁試験体の載荷試験結果に対する、文献¹¹⁾に示されている複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料製 RC 梁に関するせん断耐力算定式等の適用性について検討を行う予定である。

謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た、元東海大学学生の大塚脩人君、浅野翔太君、木村優希君に謝意を表します。なお、本研究の一部は JSPS 科研費(課題番号：15K060307、代表者：渡部憲)の助成を受けて行われたものである。

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会、pp.3 (2002.1).
- 2) 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).
- 3) 大津直人、渡部憲：再生細骨材を使用した高流動繊維補強モルタルに関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.38, No.1 (2016.7).
- 4) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・設計指針・同解説、日本建築学会、204pp., (2007.10).
- 5) 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).
- 6) 渡部憲、大岡督尚、白井伸明、森泉和人：各種コンクリートの圧縮軟化挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.22, No.2, pp.493-498(2000.6).
- 7) 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).
- 8) 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 (2010.7).
- 9) 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).
- 10) 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).
- 11) 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、pp.30-32(2007).
- 12) 永井覚、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 (2001.9).
- 13) 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).
- 14) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics (DIANA version-9) : DIANA finite Element Analysis Users Manual, TNO Building and Construction Research.
- 15) Selby,R.G., and Vecchio.F.J. : Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02. Univ.Toront (1993).
- 16) Vecchio.F.J., and Collins,M.P. : Compression Response of Cracked Reinforced Concrete,ASCE, pp.3590-3610 (1993).
- 17) 大津直人、渡部憲、佐藤勉：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、東海大学紀要工学部、Vol.54, No.2, pp.31-38(2014.11).