

論文 収縮ひずみ低減対策が再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート製RC梁のせん断耐力に及ぼす影響

安西 拓巳^{*1}・渡部 憲^{*2}

要旨：本研究では、単位膨張材量の相違する高流動高靱性コンクリート製RC梁試験体の載荷試験および同試験を対象とした非線形有限要素法解析を実施し、膨張材が再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート製RC梁試験体のせん断耐力に及ぼす影響について検討した。その結果、水結合材比を50%とした再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート製RC梁試験体の最大荷重は単位膨張材量の増加に伴い上昇し、膨張材不使用とした場合と比較して、単位膨張材量を40kg/m³とした場合で11.9%、単位膨張材量を80kg/m³とした場合で19.0%上昇する等の知見が得られた。

キーワード：再生骨材、高靱性コンクリート、高流動、収縮ひずみ、RC梁、FEM

1. はじめに

これまでに、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⁾。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⁾、その数は未だに少ないのが現状である。その理由として、施工性の問題や、他の材料と比較してコストが高い、マトリックスとして主にモルタルやセメントペースト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い等の問題が挙げられる。今後、DFRCCの利用を推進するためには、既存の材料の改良を含む新しい材料の開発が必要と考える。

ところで現在、生産活動を実施するにあたり、地球環境問題に対する取り組みは重要な課題である。コンクリートの分野においても、再生骨材コンクリートの研究が活発に実施されている^{例えば、3)}。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。

以上のような背景から、DFRCCの流動性の改善、収縮ひずみの低減および再生骨材の用途拡大を目指して、筆者らは、混和材としてフライアッシュおよび膨張材、骨材として再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(以下、R-HFDFRCと略記)について検討を行っている^{例えば、4)}。既報⁴⁾では、乾燥材齢56日までのR-HFDFRCの乾燥収縮特性等について報告した。

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、R-HFDFRC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、圧縮強度、引張鉄筋比、せん断補強筋比、せん断スパン比および繊維の補強効果によって考慮可能となるR-HFDFRCの引張強度(せん断耐力向上に寄与)等を検討項目とした、R-HFDFRC製RC部材の載荷試験を行い、データを蓄積する必要がある。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、R-HFDFRC製RC部材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。

以上より、本研究では、既報⁴⁾に引き続き、R-HFDFRCの乾燥材齢1年までの乾燥収縮特性について検討を行った。また、膨張材量の相違がR-HFDFRC製RC梁のせん断耐力に及ぼす影響を検討するため、膨張材量の異なるR-HFDFRC製RC梁試験体の載荷試験を行った。同時に、1軸圧縮試験、3等分点曲げ試験等の材料試験を行い、R-HFDFRCの材料構成則を構築し、さらに、これらの材料構成則を有限要素法(以下、FEMと略記)解析汎用コードに導入し、R-HFDFRC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. R-HFDFRCの使用材料および配(調)合の概略

(1) 使用材料

使用した再生骨材の物性を表-1に示す。なお、表中のR1は既報⁴⁾に、R2は、後述、4章で比較対象として用いる既報⁵⁾に使用した再生骨材である。再生骨材の中目と細目の混合割合(質量比)は4:6である。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、繊維はPVA繊維(V、径:0.2mm、長さ:18mm、弾性係数:27kN/mm²、引張強度:975N/mm²)および鋼繊維(S、径:0.55mm、長さ:30mm、弾性係数:210kN/mm²、引張強度:1145N/mm²)を使用した。混和材料は高性能AE減水剤、分離低減剤、フライアッシュⅡ種(密度:2.28~2.30g/cm³)、膨張材(EX)および収縮低減剤(SRA)を使用し

*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻 (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)

た。EXはコンクリートに一般的に使用されている⁹⁾石灰系(LB, 密度:3.14g/cm³)およびカルシウム・サルフォ・アルミネート系(CSA, 密度:2.93g/cm³)の2種類を, 単独または混合使用した。SRAはポリオキシエチレンアルキルエーテル系(密度:1.01g/cm³)を使用した。

(2) 配(調)合の概略

本研究および既報^{4),5)}におけるR-HFDFRCの配(調)合の概略を表-2に示す。R-HFDFRCは水結合材比(W/B)を40および50%, 細骨材率を85%, 目標スランプフローを65cmとした。繊維はVとSを混合使用し, 繊維体積混入率を3%, VとSの繊維体積混合比(V:S)を7:3とした。フライアッシュのセメント置換率(EXを使用した場合はEX量を加える)は20%とした。EXは単位量で使用し, 単位EX量を0, 40および80kg/m³, EX混合比(LB:CSA)を10:0, 0:10および5:5とした。SRAは水置換で使用し, 使用量を結合材質量に対して0または2%とした。

3. R-HFDFRCの乾燥収縮特性

既報⁴⁾に引き続き, 表-2に示すR-HFDFRCの乾燥収縮試験を行った(表中の○印)。なお, 再生骨材は表-1中のR1を使用した。

3.1 実験概要

乾燥収縮試験は, 以下に示す手法⁴⁾により行った。試験体は100×100×400mmの角柱試験体とし, 各要因2体製作した。計測項目は, 試験体内部の中央に設置した検長100mmの埋込み型ひずみゲージによる試験体長手方向のひずみおよび熱電対による試験体温度とした。型枠の内側と試験体との摩擦抵抗低減のため, 型枠の内側にはテフロンシート(厚さ:0.1mm)を2枚重ねて敷設し, その間にシリコンオイルを塗布した。試験体は打込み後2日(湿布養生)で脱型した。その後, 標準養生とし, 材齢7日で恒温恒湿室内(20℃, 60%RH)での空中養生とした。各計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。

3.2 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験により得られたR-HFDFRCの各乾燥材齢における乾燥収縮ひずみの一覧を表-3に, 乾燥収縮ひずみの経時変化を図-1に示す。なお, 乾燥収縮ひずみは, 乾燥開始時を初期値としたひずみである。

表-3および図-1によれば, 乾燥材齢半年(182日)におけるR-HFDFRCの乾燥収縮ひずみは, R-EX0と比較して, EXを単独使用することで545~676μ(17.4~21.6%), EXおよびSRAを同時使用することで1322~1445μ(42.3~46.2%)低減できることがわかった。また, 乾燥材齢1年(365日)におけるR-HFDFRCの乾燥収縮ひずみは, R-EX0と比較して, EXを単独使用することで527~651μ(15.7~19.4%), EXおよびSRAを同時使用することで1389~1512μ(41.3~45.0%)低減できることがわかった。なお,

表-1 再生骨材の物性一覧

骨材種類	最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率
R1 ⁴⁾	粗骨材	10	2.53	2.44	3.68
	細骨材	中目	2.55	2.46	3.75
	細目	0.6	2.53	2.43	4.43
R2 ⁵⁾	粗骨材	10	2.59	2.50	3.48
	細骨材	中目	2.60	2.53	2.70
	細目	0.6	2.58	2.50	3.12
R3	粗骨材	10	2.54	2.45	3.71
	細骨材	中目	2.55	2.46	3.73
	細目	0.6	2.55	2.44	4.34

表-2 R-HFDFRCの配(調)合の概略^{4),5)}

試験体名	使用骨材	水結合材比 W/B (%)	細骨材結合材比 S/B (%)	細骨材率 s/a (vol.%)	纖維體積混入率 V _f (%)	單位膨張材量 EX (kg/m ³)	膨張材混合比 (LB:CSA)	收縮低減劑使用率 (Bwt.%)	乾燥收縮試驗	
R-EX0 (W/B=40%)	再生骨材	40	40	85	3	0	0:0	0	—	
R-EX0		50	65				80	0	0	○
R-EX0-SRA2									2	○
R-EX40-10:0						40		10:0	0	—
R-EX80-10:0						0		○		
R-EX80-0:10								0:10		○
R-EX80-5:5								5:5		○
R-EX80-10:0-SRA2								10:0		○
R-EX80-0:10-SRA2						0:10		2	○	

表-3 各乾燥材齢における乾燥収縮ひずみ一覧

試験体名	各乾燥材齢における乾燥収縮ひずみ(μ)				
	28日 ⁴⁾	56日 ⁴⁾	91日	182日	365日
R-EX0	-1521	-2266	-2706	-3129	-3364
R-EX0-SRA2	-969	-1500	-1824	-2105	-2258
R-EX80-10:0	-1150	-1679	-2021	-2453	-2717
R-EX80-0:10	-1385	-1883	-2187	-2584	-2838
R-EX80-5:5	-1264	-1768	-2072	-2455	-2713
R-EX80-10:0-SRA2	-795	-1191	-1445	-1684	-1852
R-EX80-0:10-SRA2	-904	-1349	-1538	-1807	-1976

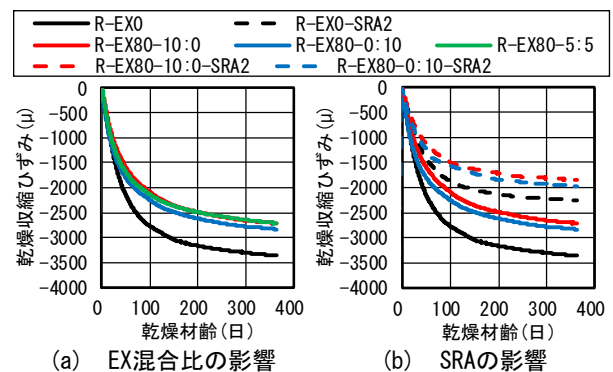


図-1 乾燥収縮ひずみの経時変化

R-EX0と比較して最も乾燥収縮ひずみを低減できたのは, EX(LB)およびSRAを同時使用したR-EX80-10:0-SRA2であった。

4. R-HFDFRC製RC梁試験体の載荷試験

本研究では, 表-4に示す, R-HFDFRCの材料試験, R-HFDFRC製RC梁試験体の載荷試験および同試験を対象とした3次元非線形FEM解析を行った。なお, 表中の*印の試験体は比較対象であり, 本研究と同様の配筋および載荷条件とした, R-HFDFRC製RC梁試験体の載荷試験および解析から得られた既報の結果⁵⁾である。

4.1 実験概要

(1) 材料試験

本研究では, R-HFDFRC製RC梁試験体の強度管理,

表-4 R-HFDFRC製RC梁試験体の概要

試験体名	R-HFDFRC		主筋(D-16, SD490)			
	使用 骨材	配(調)合種類 (表-2参照)	引張 鉄筋比 (%)	降伏 強度 (N/mm ²)	降伏 ひずみ (μ)	ヤング 係数 (kN/mm ²)
R-HFC-40* ⁵⁾	R2 ⁵⁾	R-EX0(W/B=40%)	5.88	511	2607	197
R-HFC-50* ⁵⁾		R-EX0				
R-HFC-50-EX40	R3	R-EX40-10:0		584	3094	196
R-HFC-50-EX80		R-EX80-10:0				

表-5 R-HFDFRCの材料特性一覧

試験体名	圧縮			曲げ			引抜き	
	圧縮 強度 F _c (N/mm ²)	ヤング 係数 E _c (kN/mm ²)	圧縮破 壊エネ ルギー G _{FC} (N/mm)	曲げ 強度 (N/mm ²)	引張 強度 F _{t,b} (N/mm ²)	引張 終局 ひずみ ε _{tu,b}	付着 強度 τ _{max} (N/mm ²)	付着 強度時す べり S _u (mm)
R-HFC-40* ⁵⁾	52.9	20.2	79.0	8.84	2.69	0.0170	16.2	0.292
R-HFC-50* ⁵⁾	39.8	16.7	71.4	8.51	2.78	0.0160	13.7	0.444
R-HFC-50-EX40	40.3	16.8	55.7	7.75	2.53	0.0232	15.7	0.448
R-HFC-50-EX80	41.1	17.0	58.0	7.83	2.67	0.0217	16.3	0.565

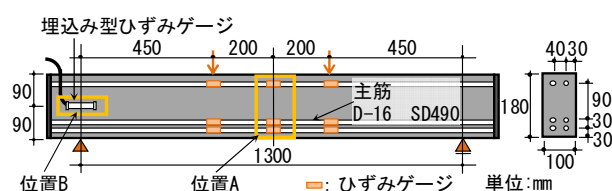


図-2 RC梁試験体

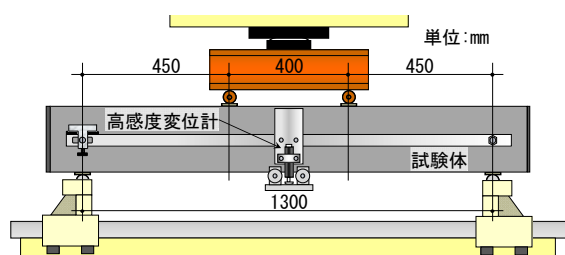


図-3 RC梁載荷試験

並びに材料構成則を特徴づける破壊力学パラメータを抽出するため、R-HFDFRC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の角柱試験体で、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た。試験体本数は、1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験では6体、引抜き試験および鉄筋の引張試験では3体とした。

1軸圧縮試験は試験方法を文献⁷⁾に準じて行い、計測項目を荷重、コンプレッソメータ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荷重盤間変位とした。なお、圧縮破壊エネルギー(G_{FC})は、文献^{7),8)}に示す手法により算出した(文献^{7),8)}中の、塑性変形が3.0mmまでの値)。

3等分点曲げ試験は試験方法を文献⁹⁾に準じて行い、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およびパイ型変位計による曲率とした。引張強度(F_{tb})

および引張終局ひずみ(ε_{tu,b})は文献⁹⁾付属書(参考)を基に、文献¹⁰⁾に示す手法により算出した。

引抜き試験は試験方法を文献¹¹⁾に準じて行い、計測項目を荷重および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¹²⁾に準じて行い、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。

各種材料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R-HFDFRCおよび鉄筋の材料特性一覧を表-4および表-5に示す。

なお、R-HFDFRCの膨張収縮特性を確認するため、自由膨張収縮試験を実施した。試験体および計測項目は、前掲、3.1に準じて行い、養生方法は、他の材料試験と同様とした。

(2) RC梁載荷試験

R-HFDFRC製RC梁試験体の概要を図-2に、載荷試験の概要を図-3に示す。R-HFDFRC製RC梁試験体は文献^{13),14)}を参考にして、主筋をD-16(SD490)、引張鉄筋比を5.88%とした、梁せい1800mm×梁幅100mm×梁長さ1500mmの試験体で、支点間距離を1300mm、せん断スパン長を450mm、荷重点間距離を400mmとし、主筋を試験体両端の定着鋼板(厚さ:6mm)に溶接した。載荷は1000kN万能試験機を使用して行い、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およびひずみゲージによる主筋のひずみとした。また、養生期間中に、ひずみゲージによる主筋のひずみ(図-2中の位置A)および試験体内部に設置した検長100mmの埋込み型ひずみゲージによるR-HFDFRCのひずみ(図-2中の位置B)を計測した。各計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。

(3) 試験体の養生

R-HFDFRCの材料試験用試験体およびR-HFDFRC製RC梁試験体は、打込み後2日で脱型し、積算温度が1680°DD(材齢56日に相当)となるまで、養生室内での湿布養生とした。

4.2 解析概要

(1) 試験体のモデル化および解析方法

R-HFDFRC製RC梁試験体の要素分割を図-4に示す。R-HFDFRC製RC梁試験体はR-HFDFRCを25×30×30および40mm、定着鋼板を6×30×30および40mm、支点・荷重点鋼板を25×6×30および40mmの要素で分割した。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。

解析方法は、最初に自重を加え、次に図-4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DIANA10.1¹⁵⁾を使用

し、非線形反復計算法はNewton-Raphson法とした。

(2) 材料構成則

R-HFDFRC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-HFDFRCの圧縮側の応力-ひずみ関係は図-5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。ヤング係数(E_c)、圧縮強度(F_c)および G_{Fc} は表-5の材料試験結果とし、 L_c は要素体積と等価な体積を持つ球の直径とした。また、Vecchio¹⁶⁾らが提案している横拘束による圧縮強度の増大、Collins¹⁷⁾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-HFDFRCの引張側の応力-ひずみ関係は図-6に示すように、3等分点曲げ試験結果(前掲、表-5)から導き出される、筆者らの一人¹⁰⁾が提案している多直線モデルを適用した。

R-HFDFRCと梁主筋の間には、引抜き試験結果(前掲、表-5)より構築した多直線モデルを適用した。本付

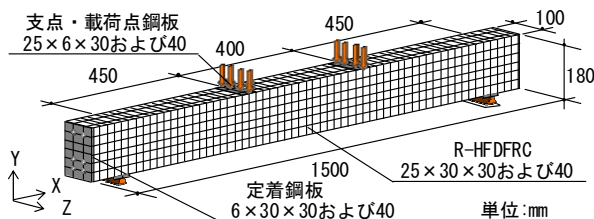


図-4 RC梁試験体の要素分割

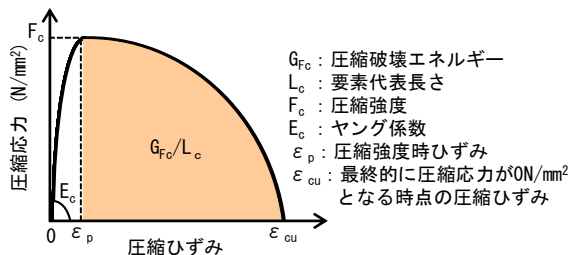


図-5 圧縮応力-ひずみ関係

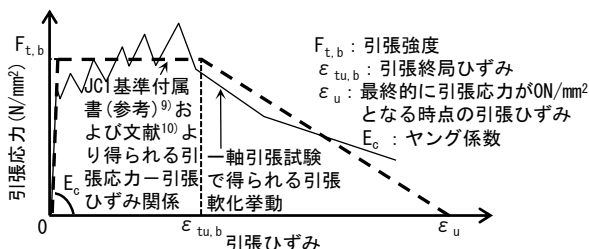


図-6 引張応力-ひずみ関係



写真-1 RC梁試験体の破壊状況の一例
(R-HFC-50-EX80)

表-6 R-HFDFRC製RC梁の
最大荷重一覧

試験体名	最大荷重 (kN)	
	載荷試験	解析
R-HFC-40* ⁵⁾	121	143
R-HFC-50* ⁵⁾	105	129
R-HFC-50-EX40	117	129
R-HFC-50-EX80	124	132

着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_{u0})の1/20、第2点を S_{u0} 、第3点を S_{u0} の2.5倍、第4点を第3点の7.5倍とした。

鉄筋の降伏基準はVon Mises基準とした。鉄筋の降伏強度およびヤング係数は表-4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。

4.3 結果と考察

写真-1に、載荷試験後のRC梁試験体の破壊状況の一例(R-HFC-50-EX80)を示す。また、表-6に、R-HFDFRC製RC梁試験体の載荷試験および解析により得られた最大荷重の一覧を、図-7に、荷重-変位関係を示す。なお、図-7中の各結果における印は最大荷重時を示している。写真-1のR-HFC-50-EX80の結果と同様に、いずれの載荷試験結果においても主筋が降伏せずに最大荷重を迎え、せん断破壊したことを確認している。また、いずれの解析結果においても主筋が降伏せずに最大荷重を迎えたことを確認しており、載荷試験時の破壊モードを再現できている。

まず、表-6および図-7の載荷試験結果によれば、R-HFDFRC製RC梁試験体の最大荷重は単位EX量の増加に伴い上昇しており、R-HFC-50*と比較して、R-HFC-50-EX40で11.9%、R-HFC-50-EX80で19.0%上昇することがわかった。また、R-HFC-50-EX80の最大荷重(124kN)は、既報⁵⁾のR-HFC-40*(W/B=40%, EX不使用)の最大荷重(121kN)と同程度以上まで上昇することがわかった。

次に、表-6および図-7の解析結果によれば、単位EX量の相違に係らず、解析により得られた最大荷重>載荷試験により得られた最大荷重となっている。解析では、R-HFC-50-EX40の最大荷重はR-HFC-50*と同値となり、R-HFC-50-EX80の最大荷重はR-HFC-50*と比較して若干上昇(2.51%)する傾向が確認できたが、載荷試験時の上昇(19.0%)と比較して小さい。

RC部材のせん断耐力はコンクリートの体積変化に影響を受けて変化し、EXを使用したコンクリートを用いて収縮を低減し、さらにはケミカルプレストレスを導入することによって改善・向上することが知られてい

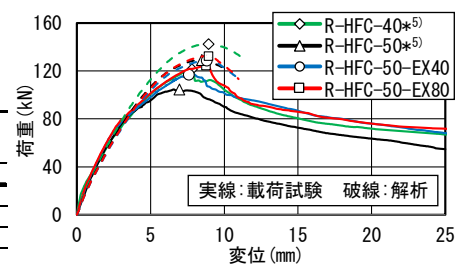


図-7 荷重-変位関係

る 例 えば、⁶⁾。EXの使用によるプレストレスが、今回の荷
荷試験結果に影響を及ぼしたものと考えられる。

4.4 パラメータ解析

本研究と同様の配筋および荷荷条件とした、せん断破
壊する各種DFRCC製RC梁試験体の荷荷試験および解析
により得られた既報の結果^{5),18)}を確認した。その結果、
解析により得られた最大荷重は、荷荷試験により得られ
た最大荷重と比較して平均で13.3%大きくなることがわ
かった。そこで、本研究では、解析により得られる最大
荷重は荷荷試験により得られる最大荷重と比較して
13.3%大きくなると仮定し、解析時の目標最大荷重をR-
HFC-50-EX40で133kN、R-HFC-50-EX80で141kNと設定
する。以下、前掲、表-5に示す材料特性を基本とし、
R-HFDFRC製RC梁試験体のパラメータ解析を行った。

(1) プレストレスによる影響の検証

ここでは、膨張ひずみを初期ひずみとして導入したパ
ラメータ解析を行った。解析方法は、最初に図-4中の
R-HFDFRC要素に初期ひずみ(後掲、図-9中の自由膨張
収縮試験体の膨張ひずみを参考に設定)を与え、以降は
前掲、4.2と同様とした。なお、R-HFDFRCのクリープ
や自己収縮等は考慮していない。図-8に、パラメータ
解析により得られた最大荷重-膨張ひずみ関係を示す。

図-8によれば、最大荷重は膨張ひずみの増加に伴い
上昇し、目標最大荷重の得られる膨張ひずみはR-HFC-
50-EX40で149 μ 、R-HFC-50-EX80で393 μ となった。

ここで、養生期間中に計測したR-HFDFRC製RC梁試
験体の主筋のひずみ(図-2中の位置A、主筋6本の平均
値)、R-HFDFRCの図-2中の位置Bでのひずみおよび自
由膨張収縮試験体のひずみの経時変化を図-9に示す。

図-9によれば、主筋の引張ひずみは単位EX量の相違
に係らず、荷荷試験材齢時にはほぼ0 μ となっている。
なお、主筋のひずみは荷荷試験材齢時から前1日の平均
で、R-HFC-50-EX40で圧縮側に7 μ 、R-HFC-50-EX80で圧
縮側に3 μ であった。これは若材齢クリープによる応力
緩和や自己収縮の影響等であると考えているが、主筋の
拘束に伴うR-HFDFRCへのプレストレスは、主筋のひず
みから判断すると荷荷試験材齢時には小さかった。

次に、R-HFDFRCのひずみに注目すると、自由膨張収
縮試験体の膨張ひずみは単位EX量の相違に係らず荷荷
試験材齢時においても高い値を示している。一方、
図-2中の位置Bでのひずみは材齢1日程度で膨張側に最
大となり、その後、材齢の経過に伴い減少し、荷荷試験
材齢時にはR-HFC-50-EX40でほぼ0 μ 、R-HFC-50-EX80で
収縮側に転じている。このことから、RC梁試験体内部
のR-HFDFRCの材料特性は、硬化過程において膨張が主
筋により拘束されたことによる組織の緻密化で、前掲、
表-5に示す材料特性から変化している可能性がある。

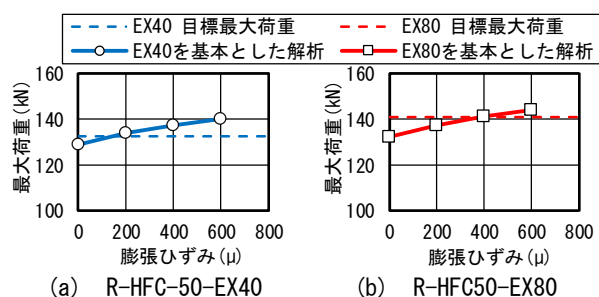


図-8 最大荷重-膨張ひずみ関係

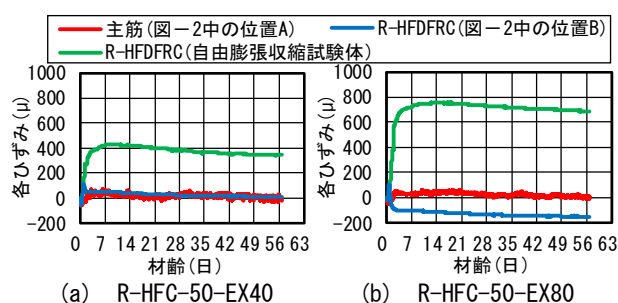


図-9 養生期間中の各ひずみの経時変化

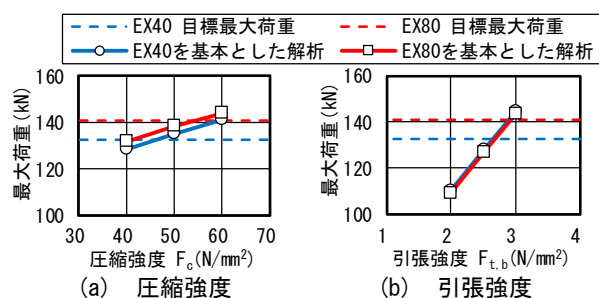


図-10 最大荷重- F_c 、 F_{tb} 関係

文献¹⁹⁾によれば、EXを使用したコンクリートの F_c はEX
を使用していない場合と比較して低下するが、膨張を一
軸拘束することで同程度となり、三軸拘束することで増
加することが示されている。

(2) 材料特性の変化による影響の検証

既報^{5),18)}では、各種DFRCC製RC梁試験体の最大荷重
に大きく影響を及ぼしている各種DFRCCの材料特性は
 F_c および F_{tb} であることを、パラメータ解析によって示
している。ここでは、前掲、4.2の解析方法を基本とし、
 F_c および F_{tb} を変化させたパラメータ解析を行った。
図-10に、パラメータ解析により得られた最大荷重- F_c 、
 F_{tb} 関係を示す。

まず、図-10(a)によれば、 F_c を変化させた場合、目
標最大荷重の得られる F_c はR-HFC-50-EX40で46.1N/
mm²、R-HFC-50-EX80で54.6N/mm²となった。なお、R-
HFC-50-EX80の目標最大荷重時の F_c である54.6N/mm²
は、前掲、表-5に示すR-HFC-40*の F_c (52.9N/mm²)と同
程度となっている。

次に、図-10(b)によれば、 F_{tb} を変化させた場合、目
標最大荷重の得られる F_{tb} はR-HFC-50-EX40で2.64N/
mm²、R-HFC-50-EX80で2.93N/mm²となった。

以上、本研究の範囲において単位EX量の増加に伴うR-HFDFRC製RC梁試験体の最大荷重の上昇は、一因として、硬化過程において膨張が主筋により拘束されたことによる梁試験体内部のR-HFDFRCの材料特性の変化によるものと考えられることが、パラメータ解析等により示唆された。今後、梁試験体内部のR-HFDFRCの材料特性の変化について、詳細な検討を行う予定である。

5. まとめ

本研究の範囲において、得られた知見を以下に示す。

- 1) R-HFDFRCの乾燥収縮ひずみは膨張材や収縮低減剤を単独または同時使用することで、膨張材および収縮低減剤不使用とした場合と比較して、乾燥材齢半年で $545\sim 1445\mu(17.4\sim 46.2\%)$ 、乾燥材齢1年で $527\sim 1512\mu(15.7\sim 45.0\%)$ 低減できる。
- 2) 水結合材比を50%としたR-HFDFRC製RC梁試験体の最大荷重は単位膨張材量の増加に伴い上昇し、膨張材不使用とした場合と比較して、単位膨張材量を 40kg/m^3 とした場合で11.9%、単位膨張材量を 80kg/m^3 とした場合で19.0%上昇する。
- 3) 水結合材比を50%、単位膨張材量を 80kg/m^3 としたR-HFDFRC製RC梁試験体の最大荷重(124kN)は、水結合材比を40%、膨張材不使用とした場合(121kN)と同程度以上まで上昇する。

謝辞

本研究の一部はJSPS科研費(課題番号：18K04442、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学協会、pp.1-10, 37-42, 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) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)、211pp., 2014.10
- 4) 安西拓巳、渡部憲：再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの収縮ひずみ低減、コンクリート工学年次論文集、Vol.42, No.1, pp.173-178, 2020.7
- 5) 白鳥有平、渡部憲：水結合材比の相違する再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート製RC梁のせん断耐力に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.40, No.1, pp.309-314, 2018.6
- 6) 日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用したコンクリートに関する技術の現状、pp.99-129, 196-235, 2013.7
- 7) 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, 2006.7
- 8) 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
- 9) JCI規準：繊維補強セメント複合材料の曲げモーメントー曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2007)、コンクリート工学協会、pp.1-8, 2007
- 10) 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
- 11) 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
- 12) 日本工業規格：金属材料引張試験方法(JIS Z 2241), 2011
- 13) 永井寛、高稻宜和、関田徹志、丸田誠：高靱性繊維補強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
- 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, 2002.1
- 15) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research., 2016
- 16) Selby, R. G. and Vecchio, F. J. : Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tec. 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) 白鳥有平、渡部憲：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梁のせん断耐力に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.1, pp.241-246, 2017.7
- 19) 辻幸和、丸山久一：膨張コンクリートの力学特性に及ぼす拘束方法の影響に関する基礎研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.341-344, 1984