

論文 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領域長さ

高橋 龍市^{*1}・渡部 憲^{*2}

要旨：本研究では、水セメント比および試験体寸法の異なる、高品質および中品質再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の1軸圧縮試験を行い、高靱性セメント複合材料の圧縮破壊領域長さについて検討を行った。その結果、試験体高さ400mmにおいて、各評価方法より得られた高靱性セメント複合材料の圧縮破壊領域長さは、骨材種類の相違に係わらず、水セメント比の増加に伴い増大する等の知見が得られた。

キーワード：高靱性セメント複合材料, 再生細骨材, 圧縮破壊領域長さ, 圧縮試験

1. はじめに

圧縮応力下にあるコンクリートの破壊は、特定の領域に集中して進行し、その他の領域では除荷現象が起きていることが知られている。このような現象が、鉄筋コンクリート(以下、RCと略記)構造物全体の破壊挙動にも影響を及ぼすため、これまでも数多くの研究が実施されている。例えば、中村ら^{1,2)}やTorsakら³⁾の研究では、異形加工したアクリル製角棒にひずみゲージを貼り付けたもの(以下、アクリルバーと略記)を試験体内部に埋設し、圧縮応力下にあるコンクリート試験体内部の局所的なひずみを測定することにより、圧縮破壊領域長さ(以下、 L_p と略記)の評価を試みている(以下、アクリルバー法と略記)。また、伊藤ら⁴⁾は、短繊維補強コンクリートの L_p の評価を試みている。

ところで、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おく必要があり、筆者らの一人らもこれまでに、高靱性セメント複合材料⁵⁾(以下、DFRCCと略記)への、再生細骨材の適用性を検討してきた⁶⁾。DFRCCとは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料であり、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⁵⁾。

このような材料をRC構造物に適用しようとする場合、圧縮応力下にあるDFRCCについても、前述のような現象を解明しておくことは有用である。既報⁷⁾では、アクリルバー法を用いて、圧縮応力下にある、天然細骨材を使用したDFRCC(以下、NDFRCCと略記)の L_p の評価方法等に関する検討を行った。

そこで本研究では、アクリルバー法を用いて、再生細骨材を使用したDFRCC(以下、RDFRCCと略記)の1軸圧縮試験を行い、 L_p に与える水セメント比(W/C)、試験体寸法および骨材種類の影響について検討を行った。具体

的には、まず、既報⁷⁾に示されたDFRCCの L_p を評価する手法により、圧縮強度(F_c)の相違するRDFRCCの L_p を明らかにする。次に、RDFRCCの L_p - F_c 関係を近似式とともに示す。最後に、NDFRCCとRDFRCCの L_p - F_c 関係を比較し、DFRCCの L_p に与える骨材種類の影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究では、表-1に示すRDFRCCの1軸圧縮試験を行った。RDFRCCは、高品質再生細骨材を使用したRHDFRCCおよび中品質再生細骨材を使用したRMDFRCCの2種類とした。使用した細骨材は、高品質再生細骨材(表乾密度:2.62g/cm³, 吸水率:2.28%, 最大寸法:5.0mm, JIS A 5021⁸⁾に規定されている再生細骨材H相当の品質)および中品質再生細骨材(表乾密度:2.44g/cm³, 吸水率:6.69%, 最大寸法:5.0mm, JIS A 5022⁹⁾に規定されている再生細骨材M相当の品質)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)を使用した。使用繊維はPVA繊維(径:0.2mm, 長さ:18mm, 弾性係数:27kN/mm², 引張強度:975N/mm²)とし、繊維体積混入率(V_f)を3.0%とした。W/Cは、40, 50および60%とし

表-1 試験体の一覧

試験体名	水セメント比 (W/C) (%)	細骨材セメント比 (S/C) (%)	使用 細骨材 種類	試験体寸法		繊維体積 混入率 (V _f) (%)
				直径 (φ) (mm)	高さ (h) (mm)	
RH-D40-200-T	40	40	高品質 再生 細骨材	100	200	3.0
RH-D40-400-T					400	
RH-D50-200-T	50	65			200	
RH-D50-400-T					400	
RH-D60-200-T	60	90			200	
RH-D60-400-T					400	
RM-D40-200-T	40	40	中品質 再生 細骨材		200	
RM-D40-400-T					400	
RM-D50-200-T	50	65			200	
RM-D50-400-T					400	
RM-D60-200-T	60	90			200	
RM-D60-400-T					400	

*1 東海大学 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)

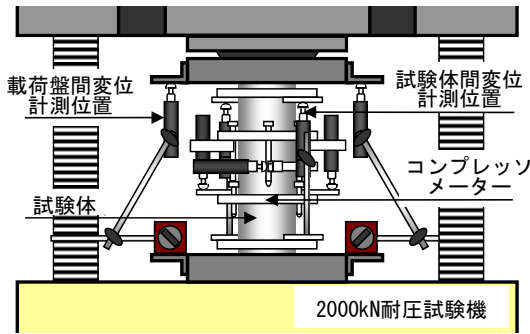


図-1 1軸圧縮荷重

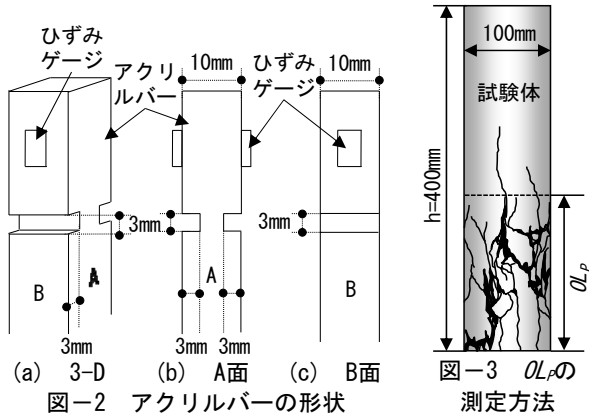


図-2 アクリルバーの形状

図-3 OLP の測定方法

た。試験体寸法は、直径(ϕ)を100mm、高さ(h)を200および400mmとした。アクリルバーを埋設した試験体(以下、アクリルバー有り試験体と略記)をW/C=40および60%では $h=400$ mmに各1体、W/C=50%では $h=200$ および400mmに各1体用意した。アクリルバーを埋設していない試験体(以下、アクリルバー無し試験体と略記)を各要因3体用意した。荷重は、2000kN耐圧試験機を使用し、2枚のテフロンシート(厚さ0.1mm)の間にシリコンオイルを塗布したものを鋼製荷重盤と試験体上下間に挿入して行った。この理由は、以前から指摘されている1軸圧縮試験時の荷重盤の拘束による影響¹⁰⁾を軽減させるためである。1軸圧縮荷重の概要を図-1に示す。測定項目は、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、試験体間変位、荷重盤間変位およびアクリルバーによる試験体高さ方向各部位の内部のひずみ(ε_{li})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。アクリルバーは、長さを $h=200$ mm用では180mm、 $h=400$ mm用では380mmとし、図-2に示す溝を設けることにより、 $h=200$ mm用では長さ方向に6分割、 $h=400$ mm用では10分割した。そして、各分割区間にひずみゲージを貼り付け、防水処理後、上下端面から10mmの隙間を設け、試験体中央部にアクリルバーを設置し、 ε_{li} を測定できるようにした。試験体は打設後2日で脱型、試験時(材齢28日)まで標準養生を行った。

2.2 圧縮破壊領域長さの評価方法

本研究では、既報⁷⁾に示された以下のような2種類の手法により、RDFRCCの L_P を評価した。

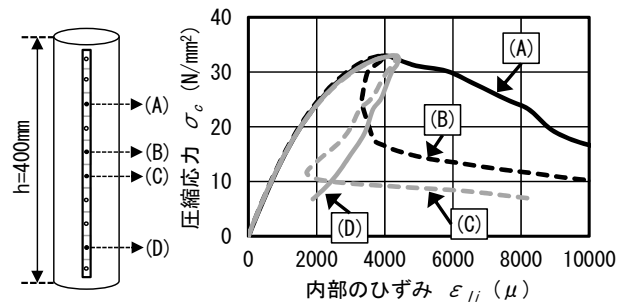


図-4 圧縮応力-内部のひずみ関係

(1) 圧縮試験後に試験体外部に発生した、巨視的なひび割れ領域の長さを OL_P とした(試験体全周を確認し、試験体の高さ方向に、ひび割れが5本以上入っている領域の長さを計測)。一例として、図-3に破壊状況のスケッチ($h=400$ mm)を示す。

(2) 中村らの手法²⁾をベースとし、以下の手順で L_P を評価した(NIL_P)。1)実験より得られた各部位の圧縮応力(σ_c)- ε_{li} 関係を、局所化領域と除荷領域の σ_c - ε_{li} 関係に区別する。 F_c 以降、 ε_{li} が増加する場合は局所化領域(図-4中の(A))、 ε_{li} が減少する場合は除荷領域(図-4中の(D))の σ_c - ε_{li} 関係である。なお筆者らは、図-4中の(B)および(C)のような場合、 F_c 以降、 F_c の30%時の ε_{li} が、 F_c 時の ε_{li} より大きいもの(図-4中の(B))を局所化領域、小さいもの(図-4中の(C))を除荷領域の σ_c - ε_{li} 関係とした。2)局所化領域と除荷領域に区別された σ_c - ε_{li} 関係をそれぞれ平均し、文献²⁾に示されている式(1)および(2)を用いて NIL_P を算出した。

$$\varepsilon_{av} = f \cdot \varepsilon + (1-f) \varepsilon_u \quad (1)$$

$$NIL_P = h \cdot f \quad (2)$$

ここに、 ε_{av} : 平均ひずみ(試験体全長の平均縦ひずみ)、 ε : 局所化領域のひずみ、 ε_u : 除荷領域のひずみ、 f : 局所化領域の試験体全長に対する容積比(断面一定の場合、 NIL_P/h)であり、一定値に収束するとされる。

3. 結果と考察

3.1 各種材料特性

図-5に、 h の異なるRDFRCC試験体より得られた F_c -W/C関係を示す。なお、図-5中には、既報⁷⁾のNDFRCC試験体の結果も示してある。また、図-5中の F_c は、アクリルバー無し試験体より得られた値(試験体3体の平均値)である。図-5によれば、DFRCCの F_c は、骨材種類および h の相違に係わらず、W/Cの増加に伴い低下しており、DFRCCの F_c に関する一般的な傾向(例えば、¹¹⁾)と合致する。骨材種類の相違に注目すると、同一 h およびW/Cの場合、RHDFRCCの F_c は、NDFRCCと概ね同程度となり、RMDFRCCの F_c は、NDFRCCと比較して若干低くなっている。

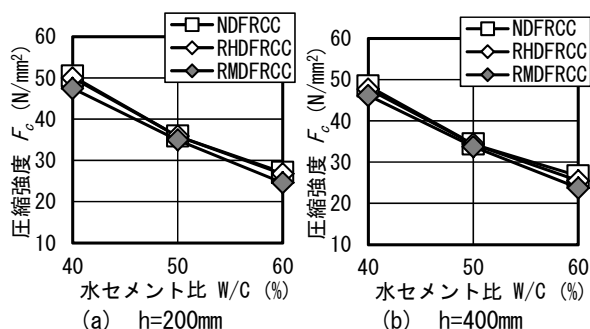


図-5 圧縮強度－水セメント比関係

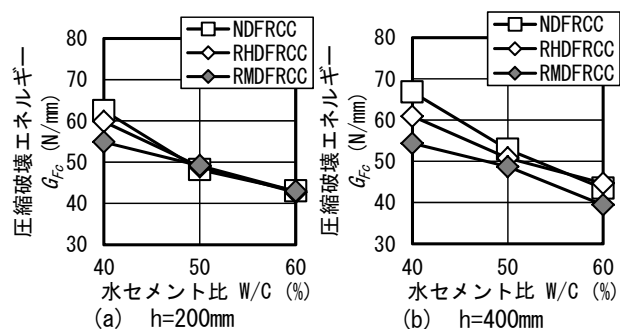


図-6 圧縮破壊エネルギー－水セメント比関係

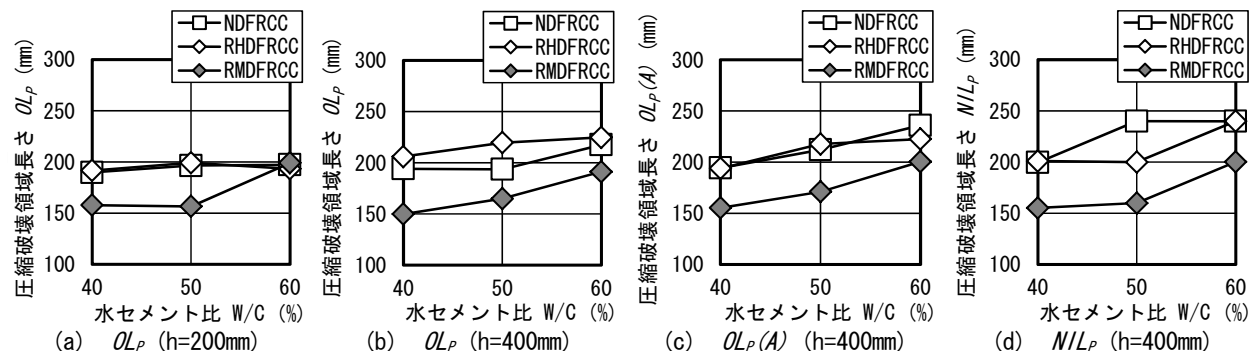


図-7 圧縮破壊領域長さ－水セメント比関係

図-6に、 h の異なるRDFRCC試験体より得られた圧縮破壊エネルギー(G_{F_c})－ W/C 関係を示す。 G_{F_c} は、文献¹²⁾に示す手法により評価した。なお、図-6中には、既報⁷⁾のNDFRCC試験体の結果も示してある。また、図-6中の G_{F_c} は、アクリルバー無し試験体より得られた値(試験体3体の平均値)である。図-6によれば、DFRCCの G_{F_c} は、骨材種類および h の相違に係わらず、 W/C の増加に伴い低下しており、DFRCCの G_{F_c} に関する一般的な傾向^{例えは、11)}と合致する。

ここで、骨材種類の相違に注目すると、図-6(a)の $h=200\text{mm}$ の結果によれば、 $W/C=40\%$ における G_{F_c} の値は、NDFRCC>RHDFRCC>RMDFRCCとなっている。しかし、 $W/C=50$ および 60% では、このような傾向が不明瞭である。

次に、図-6(b)の $h=400\text{mm}$ の結果によれば、RHDFRCCの G_{F_c} は、 $W/C=40$ および 50% において、NDFRCCと比較して若干低くなっている。しかし、 $W/C=60\%$ では、このような傾向が不明瞭となっている。一方、RMDFRCCの G_{F_c} は、 W/C の相違に係わらず、NDFRCCおよびRHDFRCCと比較して低くなり、NDFRCCと比較して8～19%程度低い値となった。

図-7に、RDFRCC試験体より得られた L_P － W/C 関係を示す。図-7中の OL_P は、アクリルバー無し試験体より得られた値(試験体3体の平均値)であり、 $OL_P(A)$ は、アクリルバー有り試験体より得られた値である。なお、図-7中には、既報⁷⁾のNDFRCC試験体の結果も示してある。また、図-7(a)($h=200\text{mm}$)では、NDFRCCと

RHDFRCCの $W/C=40, 50, 60\%$ およびRMDFRCCの $W/C=60\%$ において、ほぼ全ての試験体で試験体全長が破壊していたため、 OL_P は各試験体の実測 $h=196\sim 200\text{mm}$ となっている。

まず、図-7(a)($h=200\text{mm}$)の OL_P の結果によれば、NDFRCCおよびRHDFRCCの OL_P は、 W/C の相違に係わらず 200mm 程度となっている。この理由は、前述の通りである。一方、RMDFRCCの OL_P は、 $W/C=40$ および 50% では、 160mm 程度であるが、 $W/C=60\%$ では、 200mm 程度に増大している。

次に、図-7(b)($h=400\text{mm}$)の OL_P の結果によれば、骨材種類の相違に係わらず、 $W/C=40\sim 60\%$ の範囲において、 W/C の増加に伴い OL_P は増大する傾向を示している。また、同一 W/C の場合、RHDFRCCの OL_P は、NDFRCCと比較して若干高くなっている。一方、RMDFRCCの OL_P は、NDFRCCと比較して12～23%程度低い値を示している。

続いて、図-7(c)($h=400\text{mm}$)の $OL_P(A)$ の結果によれば、前述の OL_P の結果と同様に骨材種類の相違に係わらず、 $W/C=40\sim 60\%$ の範囲において、 W/C の増加に伴い $OL_P(A)$ は増大する傾向を示している。また、同一 W/C の場合、RHDFRCCの $OL_P(A)$ は、 $W/C=60\%$ では、NDFRCCと比較して低くなっているものの、 $W/C=40$ および 50% では、NDFRCCと概ね同程度となっている。一方、RMDFRCCの $OL_P(A)$ は、NDFRCCと比較して15～20%程度低い値を示している。

さらに、図-7(d)($h=400\text{mm}$)の N/L_P の結果によれば、

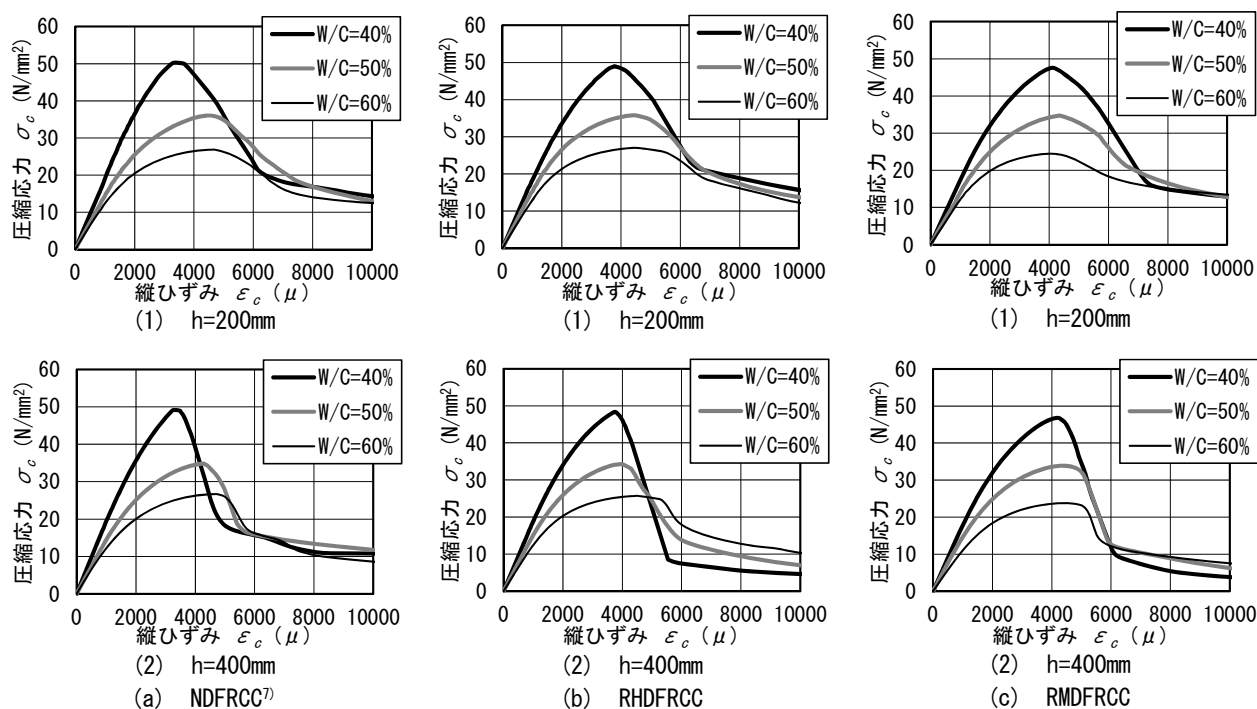


図-8 圧縮応力-縦ひずみ関係

前述の OL_P および $OL_P(A)$ の結果と同様に骨材種類の相違に係わらず、 $W/C=40\sim60\%$ の範囲において、 W/C の増加に伴い NIL_P は増大する傾向を示している。また、同一 W/C の場合、RHDFRCCの NIL_P は、 $W/C=50\%$ では、NDFRCCと比較して低くなっているものの、 $W/C=40$ および 60% では、NDFRCCとほぼ同値となっている。一方、RMDFRCCの NIL_P は、NDFRCCと比較して16～33%程度低い値を示している。

以上より、 $W/C=40\sim60\%$ の範囲において、各評価方法より得られたDFRCCの L_P ($h=400\text{mm}$)は、骨材種類の相違に係わらず、 W/C の増加に伴い増大する。また、同一 W/C の場合、各評価方法より得られたRMDFRCCの L_P ($h=400\text{mm}$)は、NDFRCCと比較して12～33%程度低い値となる。なお、同一 W/C の場合、RHDFRCCの L_P ($h=400\text{mm}$)は、NDFRCCと比較して概ね同程度となると考えられるが、各評価方法より得られた L_P の傾向に若干の相違がある。

3.2 圧縮応力-縦ひずみ関係

図-8に、 W/C の異なるアクリルバー無しDFRCC試験体より得られた σ_c -縦ひずみ(ε_c)関係を、骨材種類および h 別に示す(図-8(a)は既報⁷⁾のNDFRCC試験体の結果、図-8(b)はRHDFRCC試験体の結果、図-8(c)はRMDFRCC試験体の結果である)。なお、 ε_c は試験体両脇に設置した変位計より得られた平均縦ひずみである。また、各 σ_c - ε_c 関係は、試験体3体中の代表的な値である。図-8によれば、 $h=200\text{mm}$ の結果では、骨材種類の相違に係わらず、 F_c 以降、急激に σ_c が低下する際の負勾配は、 W/C の増加に伴い、緩やかとなる傾向にある。しか

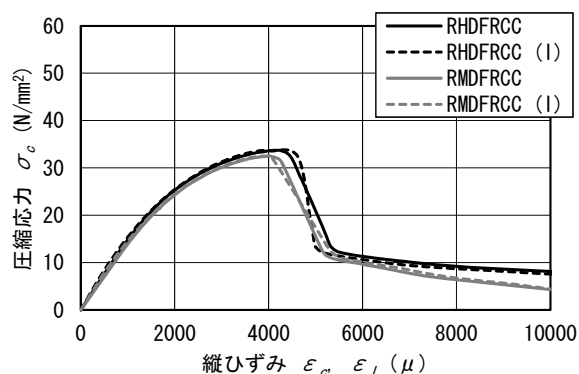


図-9 圧縮応力-縦ひずみ関係
($W/C=50\%$, $h=400\text{mm}$, アクリルバー有りRDFRCC)

し、 $h=400\text{mm}$ の結果では、このような傾向が、多少、不明瞭となる。また、同一 W/C の場合、骨材種類の相違に係わらず、 F_c 以降、急激に σ_c が低下する際の負勾配は、 $h=200\text{mm}$ の結果と比較して、 $h=400\text{mm}$ の結果が急勾配となっている。これは、試験体直径に対する h の比率の影響¹³⁾と思われる。

図-9に、一例として $W/C=50\%$, $h=400\text{mm}$, アクリルバー有りRDFRCC試験体より得られた σ_c - ε_c 関係および σ_c - ε_l 関係を示す。 ε_l は、試験体全長を平均化した縦ひずみであり、アクリルバーより得られた各部位の ε_{li} に、それぞれひずみゲージ上下溝間の距離を乗じ、同一 σ_c において和を取り、その後、 h で除した値である。なお、図-9中の実線で示したものが σ_c - ε_c 関係、破線で示したものが σ_c - ε_l 関係(図-9中の(I))である。図-9によれば、骨材種類の相違に係わらず、同一試験体から得られた σ_c - ε_c 関係と σ_c - ε_l 関係は、概ね一致している。なお、

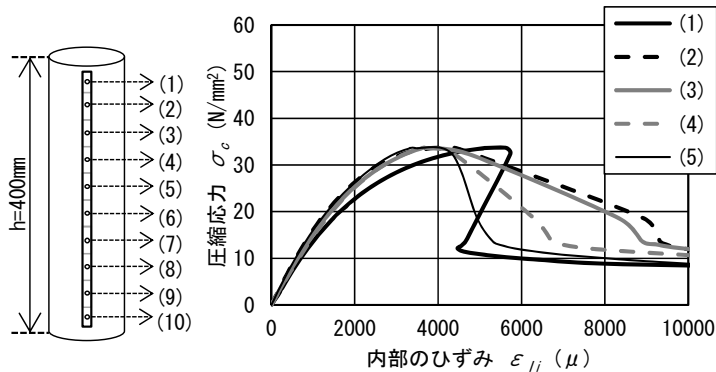


図-10 内部の
ひずみ計測位置

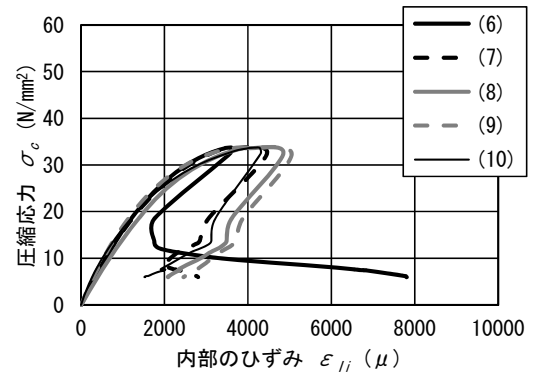


図-11 圧縮応力-内部のひずみ関係 (W/C=50%, h=400mm, アクリルバー有りRHDFRCC)

W/Cおよびhの異なるその他のアクリルバー有り試験体においても、同様の傾向が確認できた。

3.3 圧縮応力-内部のひずみ関係

図-10に、h=400mmアクリルバー有り試験体における ε_{li} の測定位置を示す。また、図-11に、一例として、W/C=50%, h=400mm, アクリルバー有りRHDFRCC試験体より得られた σ_c - ε_{li} 関係を ε_{li} の測定位置別に示す。なお、図-11中の凡例番号は、図-10の測定位置番号と対応している。

まず、図-11によれば、測定位置(2)~(5)より得られた σ_c - ε_{li} 関係は、 F_c 以降、 ε_{li} が増加しているため、2.2節(2)の手法で区別すると、いずれの σ_c - ε_{li} 関係も、局所化領域の σ_c - ε_{li} 関係に区別される。また、測定位置(8)~(10)より得られた σ_c - ε_{li} 関係は、 F_c 以降、 ε_{li} が減少しているため、2.2節(2)の手法で区別すると、いずれの σ_c - ε_{li} 関係も、除荷領域の σ_c - ε_{li} 関係に区別される。さらに、測定位置(1)、(6)および(7)より得られた σ_c - ε_{li} 関係は、 F_c 以降、 ε_{li} が一旦減少し、その後、増加に転じている。これらを、2.2節(2)の手法で区別すると、測定位置(1)より得られた σ_c - ε_{li} 関係は局所化領域、測定位置(6)および(7)より得られた σ_c - ε_{li} 関係は除荷領域の σ_c - ε_{li} 関係に、それぞれ区別される。以上のことは、 σ_c - ε_{li} 関係から判断される定性的な傾向として、試験体高さ方向の半分程度(200mm程度)が破壊したことを意味しており、同一試験体から得られた $OL_P(A)=220$ mmと比較して20mm程度の差があるものの、切欠き間隔(40mm)を踏まえると、概ね合致していると言える。

即ち、骨材種類の相違に係わらず、アクリルバー有り試験体の σ_c - ε_{li} 関係から判断される定性的な L_P は、概ね $OL_P(A)$ と合致する。なお、W/C, hおよび骨材種類の異なるその他のアクリルバー有り試験体においても、同様の傾向が確認できた。

3.4 圧縮破壊領域長さ

図-12に、骨材種類の異なるDFRCC試験体より得られた L_P - F_c 関係(h=400mm)を示す。なお、図-12(a)

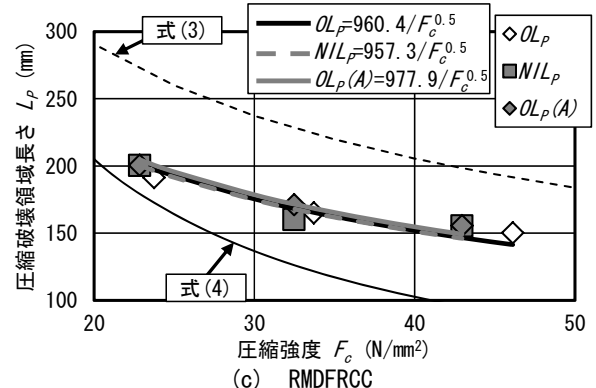
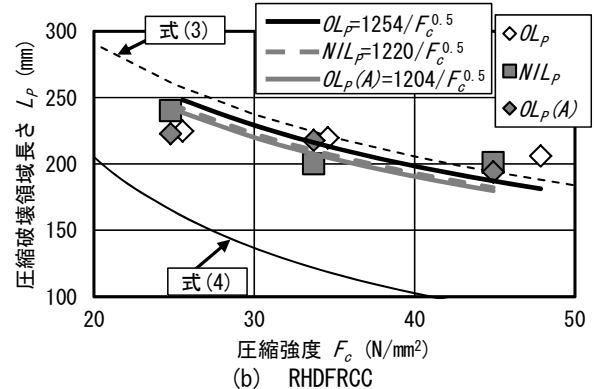
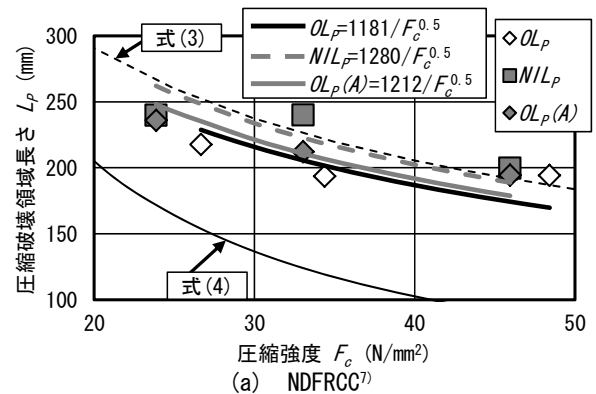


図-12 圧縮破壊領域長さ-圧縮強度関係 (h=400mm)

は、既報⁷⁾のNDFRCC試験体の結果である。また、図-12中の細破線は、Nakamuraらの文献¹⁾で提案されている式(3)($\phi=150$ mm, h=450mmのコンクリート試験体より得られた式)を用いて算出した L_P - F_c 関係、細実線

は、伊藤らの文献⁴⁾で提案されている式(4)($\phi=100$, 150 および200mm, $h=400$ mmのコンクリートおよび短繊維補強コンクリート試験体より得られた式)を用いて算出した L_P - F_c 関係である。さらに、図-12中には、各評価方法より得られた L_P - F_c 関係に対して、式(3)をベースに近似した結果も示してある。

$$L_P = \frac{1300}{\sqrt{F_c}} \quad (3)$$

$$L_P = \frac{4100}{F_c} \cdot \beta_{LP} \quad (4)$$

ここに、 β_{LP} ：試験体直径の影響、繊維混入率の影響を考慮する係数であり、本研究では1.0である。

図-12によれば、まず、NDFRCCおよびRHDFRCCの結果に注目すると、いずれの評価方法より得られた L_P も、骨材種類の相違に係わらず、式(3)の曲線に近似している。一方、RMDFRCCの結果に注目すると、いずれの評価方法より得られた L_P も、式(3)にRMDFRCCの F_c を代入して得られた L_P と比較して、低い値を示している。また、いずれの評価方法より得られた L_P も、式(4)にRMDFRCCの F_c を代入して得られた L_P と比較して、高い値を示している。なお、図12中の各評価方法より得られた、RHDFRCCとNDFRCCの L_P - F_c 関係に関する、式(3)をベースに近似した場合の係数を比較(RHDFRCC/NDFRCCを算出)すると、 OL_P では1.062、 $OL_P(A)$ では0.9936、 NIL_P では0.9533となり、同一評価方法において、同程度の値となった。一方、図12中のRMDFRCCとNDFRCCの L_P - F_c 関係に関する、式(3)をベースに近似した場合の係数を比較(RMDFRCC/NDFRCCを算出)すると、 OL_P では0.8131、 $OL_P(A)$ では0.8068、 NIL_P では0.7478となり、同一評価方法において、RMDFRCCの L_P - F_c 関係に関する近似式の係数は、NDFRCCと比較して低い値となった。

4. まとめ

本研究で得られた知見を、以下にまとめる。

- 1) $h=400$ mm試験体より得られたRMDFRCCの G_{Fc} は、W/Cの相違に係わらず、NDFRCCおよびRHDFRCCと比較して低くなり、NDFRCCと比較して8～19%程度低い値となる。
- 2) 各評価方法より得られたDFRCCの L_P ($h=400$ mm)は、骨材種類の相違に係わらず、W/Cの増加に伴い増大する。
- 3) 各評価方法より得られたRMDFRCCの L_P ($h=400$ mm)は、同一W/Cの場合、NDFRCCと比較して12～33%程度低い値となる。

今後、 ϕ がDFRCC試験体の L_P に与える影響について

検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 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, Oct.1999
- 2) 平井圭, 中村光, 檜貝勇: コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.339-344, 1995.6
- 3) Torsak,L.,Watanabe,K.,Matsuo,M.,Niwa,J.: Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, JSCE, No.669/V-50,pp.309-321, Feb.2001
- 4) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘, 岸添拓, 石川靖晃, 久保全弘: 短繊維補強コンクリートの圧縮破壊性状に関する実験的研究, 土木学会論文集E, Vol.62, No.2, pp.341-355, 2006.5
- 5) 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.128, 2002.1
- 6) 渡部憲, 大岡督尚, 白都滋: 再生細骨材を用いた繊維補強セメント複合材料の材料特性, コンクリート工学, テクニカルレポート, Vol.44, No.3, pp.11-18, 2006.3
- 7) 松木雄一郎, 渡部憲, 高橋龍市, 田口皓也: 高靱性セメント複合材料の圧縮破壊領域長さ, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.349-354, 2013.7
- 8) JIS規格: コンクリート用再生骨材H(JIS A 5021), 日本規格協会, pp.185-187, 2005.3
- 9) JIS規格: 再生骨材Mを用いたコンクリート(JIS A 5022), 日本規格協会, pp.315-327, 2007.3
- 10) RILEM TC 148-SSC:Report of the Round Robin Test carried out by RILEM TC 148-SSC, Materials and Structures/ Materiaux et Constructions, Vol.30, pp.195-209, May.1997
- 11) 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, 2006.7
- 12) 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
- 13) 金子佳生, 三橋博三, 桐越一紀, 下川博之: 繊維補強セメント系複合材料の圧縮軟化特性—繊維混入率と試験体寸法をパラメータとした圧縮試験と数値解析—, 日本建築学会構造系論文集, 第592号, pp.19-26, 2005.6