

論文 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

渡部 憲^{*1}・佐藤 史康^{*2}・三浦 康彰^{*3}・渋谷 恒太^{*4}

要旨：本研究では、細骨材として再生細骨材、天然細骨材およびシラスを使用した高靱性セメント複合材料の3等分点曲げ試験を実施し、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）」の付属書（参考）に示された手法により算出した引張応力ー引張ひずみ関係をベースとした引張軟化挙動を、3等分点曲げ試験を対象とした2次元非線形有限要素解析に導入し、その適用性について検討を行った。その結果、解析において本研究で示した手法により高靱性セメント複合材料の引張軟化挙動を導入すれば、要素寸法依存性がほぼ解消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、シラス、引張軟化挙動、有限要素法

1. はじめに

最近、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¹⁻⁶⁾。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⁴⁾であり、構造物のエネルギー吸収デバイスとして適用しようという試みも報告されている³⁾。

ところで、現在、地球環境問題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、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。また、武若ら⁷⁾は、南九州に大量に存在するシラスをコンクリート用細骨材の代替材料とし、その適用性について一連の検討を行い、シラスコンクリートの調合、強度特性等を明らかとし、橋脚基礎コンクリートへの適用事例も報告している。このような背景の中、筆者らもこれまでに、細骨材として再生細骨材およびシラスを使用したDFRCCの材料特性について検討を実施した^{8,9)}。

上記のような材料を鉄筋コンクリート（以下、RCと略記）構造物に適用した場合の補強効果を確認する手法として、有限要素法（以下、FEMと略記）が挙げられるが、RC構造物の崩壊に至る非線形挙動の解析を行う場合、DFRCCの破壊挙動を明確にしておく必要がある。筆者らの一人も、これまでにRC部材を対象としたFEM解析を実施してきた^{例えば、10)}。RC部材の崩壊に至るまでの過程について検討する場合、各材料の特徴を概ね表現できる範囲内で構成則を単純化してFEM解析に使用することにより、比較的安定した解を得やすい。

文献⁵⁾付属書（参考）および文献⁶⁾では、100×100×400

mm角柱試験体を用いた3等分点曲げ試験により、簡便にDFRCCの引張応力ー引張ひずみ関係を推定する手法が示されており、RC部材にDFRCCを適用した場合の補強効果をFEM解析により確認する場合、非常に有用であると思われる。

しかし、本手法で得られる引張応力ー引張ひずみ関係は、引張強度に到達した後、引張終局ひずみまで引張強度を保つというモデルで、その後の軟化挙動や細骨材として再生細骨材およびシラスを使用したDFRCCへの適用性については不明である。

そこで本研究では、まず、細骨材として再生細骨材、天然細骨材およびシラスを使用したDFRCCの3等分点曲げ試験を実施した。次に、文献⁵⁾付属書（参考）に示された手法により、実験結果から算出した引張応力ー引張ひずみ関係に、最終的に引張応力が0N/mm²となるまでの軟化挙動を加えた引張軟化挙動を3等分点曲げ試験を対象としたFEMに導入した。さらに、実験およびFEM解析により得られた荷重ーたわみ関係を比較することにより、引張軟化挙動の適用性について検討を行った。

2. 実験方法

実験概要の一覧を表-1に示す。試験項目は、圧縮、

表-1 実験概要

試験体名	細骨材種類	セメント種類	水セメント比 W/C (%)	練混ぜ時間 (分)	細骨材セメント比 S/C	繊維体積混入率 V _f (%)
R-OP-40-6M	R	OP	40	6	0.40	3.0
R-OP-50-6M			50	8	0.65	
R-OP-50-8M			60	6	0.90	
R-OP-60-6M			50	8	0.65	
N-OP-50-8M	N					
SH-WH-50-8M	SH	WH			0.60	

*1 東海大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

*2 東海大学大学院 工学研究科建築学専攻 (正会員)

*3 東海大学 工学部建築学科 (非会員)

*4 東海大学 工学部建築学科 (正会員)

割裂および3等分点曲げ試験である。練混ぜには500パン型ミキサーを使用し、目標フロー値（180mm）は試し練りにより決定した。

DFRCCの種類は、1) 再生細骨材（R，表乾密度：2.5 g/cm^3 ，吸水率：4.99%，粗粒率：2.55）および普通ポルトランドセメント（OP，密度：3.16 g/cm^3 ）を使用したRDFRCC，2) 砕砂（表乾密度：2.70 g/cm^3 ，吸水率：1.03%）と山砂（表乾密度：2.58 g/cm^3 ，吸水率：2.27%）を質量比7：3で混合した天然細骨材（N，粗粒率：2.55）およびOPを使用したNDFRCC，3) 白色セメント（WH，密度：3.05 g/cm^3 ）およびシラス（SH，表乾密度：2.07 g/cm^3 ，吸水率：5.39%，粗粒率：1.32）を使用したSHDFRCCの3種類である。

水セメント比（W/C）は、RDFRCCでは40，50および60%，NDFRCCおよびSHDFRCCでは50%とした。練混ぜ時間は、6分（ミキサーに細骨材およびセメントを投入し空練り0.5分，その後，水を加え練混ぜ3.0分，続いて，繊維を2.0分間で混入，最後に，0.5分練混ぜて終了。）および8分（繊維を4.0分間で混入）とした。使用繊維はPVA繊維（径：0.20mm，長さ：18mm，ヤング係数：27 kN/mm^2 ，引張強度：975 N/mm^2 ）で，繊維体積混入率（ V_f ）を3%とした。

2.1 圧縮および割裂試験

載荷は、2000kN耐圧試験機を使用した。試験体は100

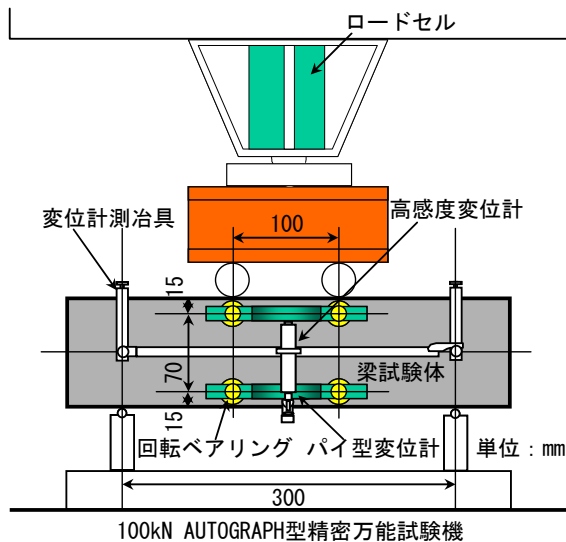


図-1 3等分点曲げ載荷

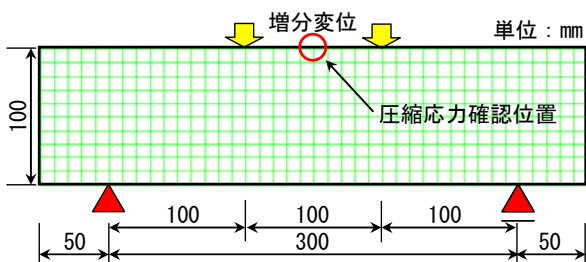


図-2 試験体のモデル化

$\phi \times 200\text{mm}$ の円柱とし，各要因3体製作した。圧縮試験はJIS A 1108に準じて行い，計測項目は，荷重およびコンプレッションメーターによる試験体中央部の縦・横ひずみとした。割裂試験はJIS A 1113に準じて行い，計測項目は，初期ひび割れ発生荷重（目視により，ひび割れが確認できた時点）とした。試験体は打設後1日で脱型し，試験時（材齢28日）まで標準養生とした。

2.2 3等分点曲げ試験

3等分点曲げ載荷の概要を図-1に示す。載荷は，100 kNのAUTOGRAPH型精密万能試験機を用いて行い，クロスヘッド速度を制御した。クロスヘッド速度は，0.2 mm/分とした。試験体は100×100×400mmの角柱とし，各要因3体製作した。3等分点曲げ試験は，文献⁵⁾付属書（参考）に準じて行い，計測項目は，荷重，スパン中央部のたわみおよび曲率とした。試験体は打設後1日で脱型し，試験時（材齢28日）まで標準養生とした。

なお，一軸引張試験を実施していないため，本研究対象DFRCCの一軸引張応力下における初期ひび割れ発生後のひずみ硬化もしくは軟化特性は不明である。

3. 解析方法（基準解析）

3等分点曲げ試験結果を対象とした2次元非線形FEM解析では，試験体を，10，25および50mm正方形要素で分割した。要素分割の一例（10mm正方形要素）を図-2に示す。各要素は，4節点アイソパラメトリック要素とし，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。構成素材の構成則として，圧縮側は弾性，引張側は，文献⁵⁾付属書（参考）に準じて得られた引張応力-引張ひずみ関係（3等分点曲げ試験において，平面保持を仮定し，最大曲げモーメントが作用する断面の応力分布を，圧縮側は三角形分布，引張側は一様分布とする。そして，最大荷重時において，引張強度（ $f_{t,b}$ ）および引張終局ひずみ（ $\epsilon_{tu,b}$ ）を算出する。）を導入した。ただし，最終的に引張応力が0 N/mm^2 となる時点の引張ひずみ（ ϵ_u ）については，文献⁵⁾付属書（参考）に示されていないため， $\epsilon_{tu,b}$ の3倍とした。なお， ϵ_u を定義する理由は，DFRCCを適用したRC部材の崩壊

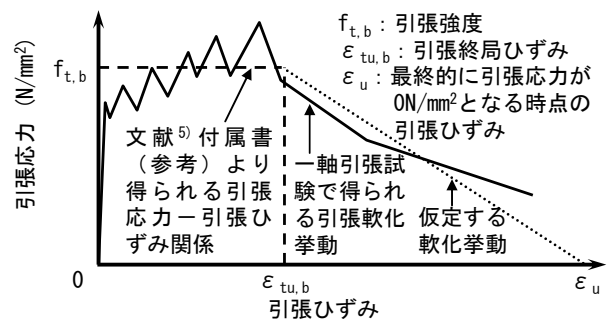
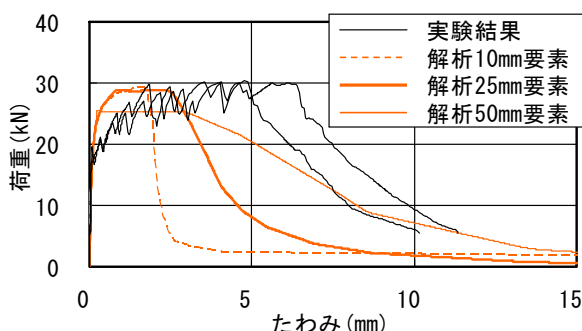


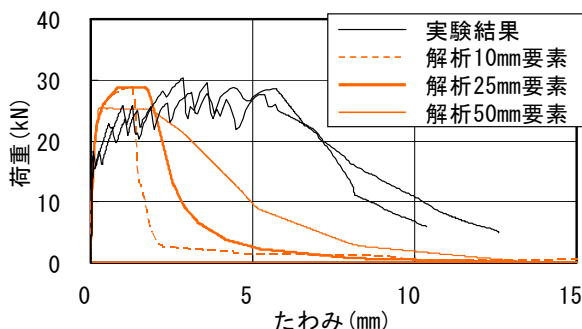
図-3 引張軟化挙動

表-2 材料特性一覧

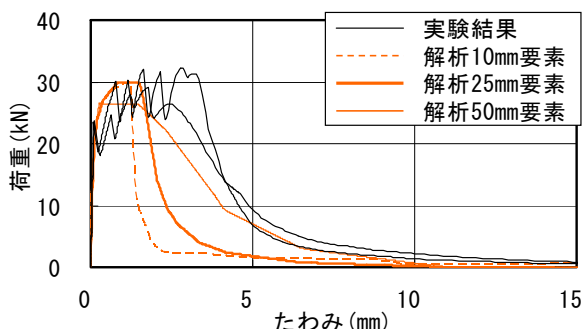
試験体名	圧縮				割裂	曲げ			
	単位容積 質量 (g/cm ³)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比	圧縮強度 (N/mm ²)	初期ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	純曲げ区間内 ひび割れ本数	引張強度 $f_{t,b}$ (N/mm ²)	引張終局 ひずみ $\epsilon_{t,u,b}$
R-OP-40-6M	2.06	18.3	0.232	48.9	3.24	8.87	4.8	3.19	0.0282
R-OP-50-6M	2.01	15.5	0.221	35.7	2.34	8.24	4.3	2.99	0.0237
R-OP-50-8M	2.00	15.2	0.235	34.8	2.39	9.03	7.8	3.21	0.0421
R-OP-60-6M	1.96	12.8	0.243	24.7	2.08	8.41	5.7	3.04	0.0318
N-OP-50-8M	2.01	14.5	0.238	32.3	2.61	8.83	7.8	3.21	0.0253
SH-WH-50-8M	1.91	15.1	0.214	35.6	3.33	9.11	4.0	3.35	0.0199



(a) R-OP-50-8M



(b) N-OP-50-8M



(c) SH-WH-50-8M

図-4 荷重-たわみ関係 (実験, 基準解析)

に至るまでの過程について、FEM解析により検討することを視野に入れているためである。

解析に使用した引張軟化挙動を図-3に示す。

4. 結果と考察

4.1 材料特性

表-2に、実験により得られた各種細骨材を使用したDFRCCの材料特性一覧を示す。

まず、RDFRCC (練混ぜ時間6分) の結果について注目すると、圧縮強度はW/Cの増加に伴い低下している。

しかし、曲げ強度はW/C=40から50%となると低下するものの、W/C=50から60%となると増加している。純曲げ区間内のひび割れ本数も同様に、W/C=40から50%となると減少するものの、W/C=50から60%となると増加している。

次に、R-OP-50-6MとR-OP-50-8Mを比較すると、圧縮強度は練混ぜ時間が長くなると低下するが、曲げ強度および純曲げ区間内のひび割れ本数は増加する。これは、練混ぜ時間が長くなると、繊維による空気連行が助長され、圧縮強度は低下するが、繊維分散性が改善され、曲げ性能が向上するものと考えられる。

なお、使用細骨材の影響については、圧縮強度および曲げ強度はSH-WH-50-8M > R-OP-50-8M > N-OP-50-8Mとなり、純曲げ区間内のひび割れ本数はR-OP-50-8M = N-OP-50-8M > SH-WH-50-8Mである。

4.2 荷重-たわみ関係

(1) 基準解析

図-4に、骨材種類の相違するDFRCC (W/C=50%, 練混ぜ時間8分) の3等分点曲げ実験および基準解析により得られた荷重 (P) -たわみ (δ) 関係を示す。なお、実験結果について、純曲げ区間外で破壊した結果は省いてある (後述の、P- δ 関係に関する図についても同様である)。

図-4によれば、骨材種類に係わらず、FEM要素寸法の影響が顕著に現れている。最大荷重については、10および25mm要素の解析結果では、実験結果と同程度であるが、50mm要素の解析結果では、実験結果と比較してかなり低めの値となっている。また、荷重が再上昇することなく急激に低下し始める時点 (以下、軟化開始時と略記、後掲、図-6参照) のたわみについては、いずれの要素寸法においても、解析結果は実験結果と比較してかなり小さくなっている。そして、要素寸法により、その値が相違している。さらに、解析結果における軟化開始時以降のP- δ 関係の負勾配については、要素寸法により大きく相違している。

即ち、基準解析手法では、要素寸法依存性が顕著に現れることが分かった。

(2) 要素寸法依存性に関する検討

3等分点曲げ試験時のひび割れ発生状況の一例を写真-1に示す。



(a) 最大荷重時



(b) 最終破壊時

写真-1 ひび割れ発生状況

最大荷重時には、ひび割れは純曲げ区間内に一様に分散しているが、最終的には、1本のひび割れに破壊が集中する。このことから、前掲、図-3の引張軟化挙動において、 $\epsilon_{tu,b}$ までは要素寸法に依存しない領域（ひび割れ分散領域）、 $\epsilon_{tu,b}$ 以降、 ϵ_u までを要素寸法に依存する領域（ひび割れ局所化領域）と考える。そして、 ϵ_u を定める以下の式を提案する。

$$\epsilon_u = \epsilon_{tu,b} + \alpha(\epsilon_{tu,b} \times 100 / L) \quad (1)$$

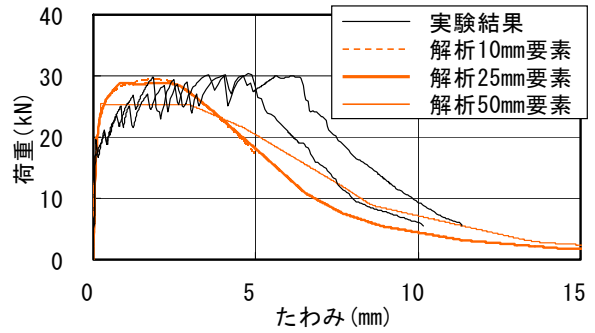
ここに、 α は材料定数、 L は要素代表長さで、要素寸法 (mm) とする。なお、100は、使用したパイ型変位計の標点距離 (mm) である。

図-5に、骨材種類の相違するDFRCC (W/C=50%, 練混ぜ時間8分) の3等分点曲げ実験および解析 ($\alpha = 1.0$) により得られたP- δ 関係を示す。

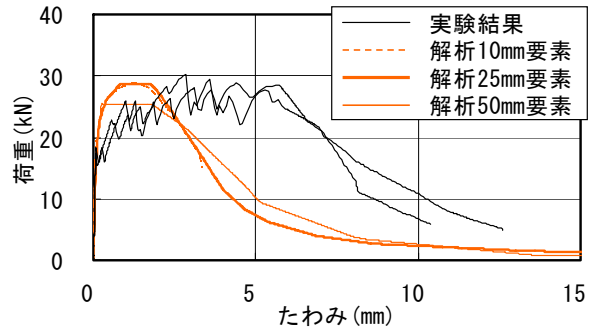
図-5によれば、骨材種類に係わらず、最大荷重については、前掲、図-4の傾向と変わらない。また、軟化開始時のたわみについては、いずれの要素寸法においても、解析結果は実験結果と比較してかなり小さくなっている。これは、算出された $\epsilon_{tu,b}$ に起因するものと思われる。しかし、解析結果における軟化開始時のたわみや軟化開始時以降のP- δ 関係の負勾配については、要素寸法依存性がほぼ解消されている。

以上より、FEM解析において、本研究で示した手法によりDFRCCの引張軟化挙動を導入すれば、要素寸法依存性がほぼ解消する。

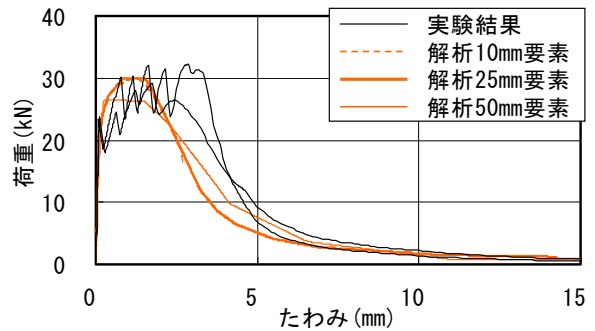
ここで、R-OP-50-8Mを対象とした解析結果について、前掲、図-2の丸印部分の最大圧縮応力を確認し



(a) R-OP-50-8M



(b) N-OP-50-8M



(c) SH-WH-50-8M

図-5 荷重-たわみ関係

(実験、要素寸法依存性に関する解析)

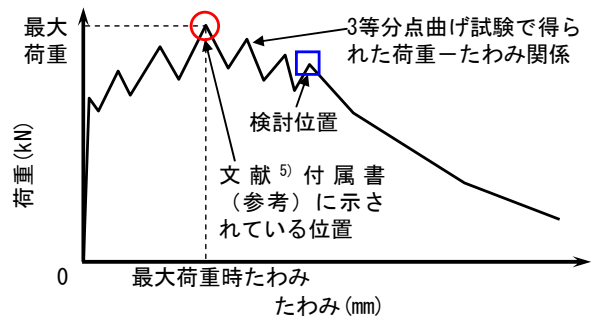
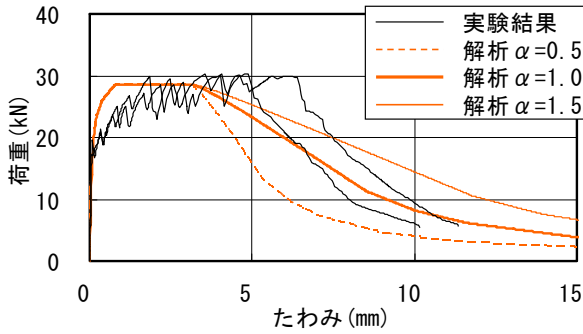


図-6 荷重-たわみ関係のイメージ

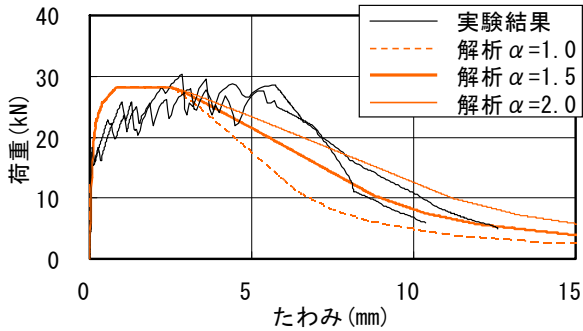
た。その結果、10mm要素では43.9N/mm²、25mm要素では22.9N/mm²、50mm要素では9.99N/mm²であり、10mm要素では、R-OP-50-8Mの圧縮強度 (34.8N/mm²) を超えていた。N-OP-50-8MおよびSH-OP-50-8Mについても、同様のことが確認できたため、今後の検討には25mm要素を使用する。

表-3 引張強度および引張終局ひずみ

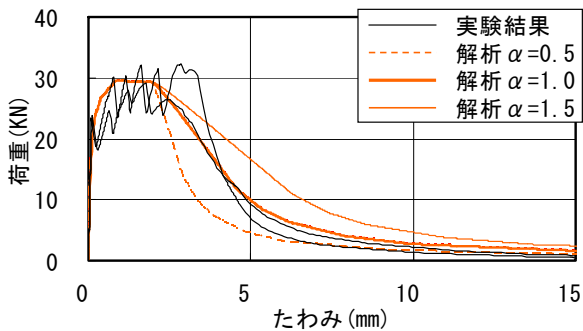
試験体名	最大荷重時で算出		軟化開始時で算出	
	引張強度 $f_{t,b}$	引張終局ひずみ $\epsilon_{tu,b}$	引張強度 $f_{t,b}$	引張終局ひずみ $\epsilon_{tu,b}$
	(N/mm^2)		(N/mm^2)	
R-OP-40-6M	3.19	0.0282	3.15	0.0449
R-OP-50-6M	2.99	0.0237	2.93	0.0404
R-OP-50-8M	3.21	0.0421	3.19	0.0550
R-OP-60-6M	3.04	0.0318	2.99	0.0491
N-OP-50-8M	3.21	0.0253	3.15	0.0409
SH-WH-50-8M	3.35	0.0199	3.29	0.0287



(a) R-OP-50-8M



(b) N-OP-50-8M



(c) SH-WH-50-8M

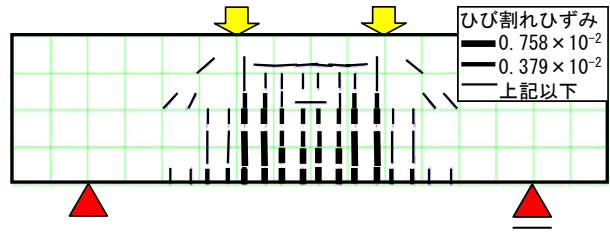
図-7 荷重-たわみ関係

(実験, 引張終局ひずみおよび α に関する解析)

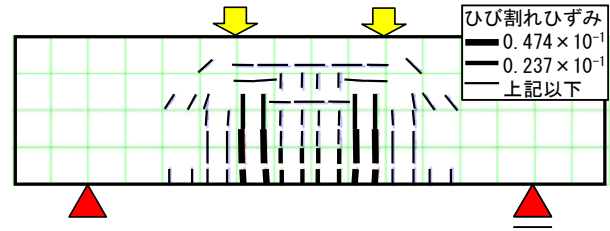
(3) 引張終局ひずみおよび α に関する検討

3等分点曲げ試験で得られたP- δ 関係の中には,最大荷重以降もひび割れ分散を繰り返す,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(図-6参照)。このような場合,文献⁹⁾付属書(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 $\epsilon_{tu,b}$ を算出するため, $\epsilon_{tu,b}$ を過小評価している可能性がある。

そこで,軟化開始時(図-6の四角印位置)において



(a) 最大荷重時



(b) 軟化開始時

図-8 ひび割れ発生状況(引張終局ひずみおよび α に関する解析, R-OP-50-8M ($\alpha=1.0$))

$f_{t,b}$ および $\epsilon_{tu,b}$ を再算出し(表-3参照),解析に使用することとした。また, α の値についても変動させた。

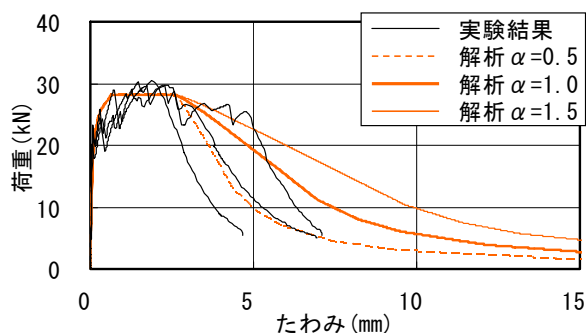
図-7に,骨材種類の相違するDFRCC(W/C=50%,練混ぜ時間8分)の3等分点曲げ実験および解析により得られたP- δ 関係を示す。

前掲,図-5の解析結果(25mm要素)と比較して,図-7の解析結果($\alpha=1.0$)における,軟化開始時のたわみは,骨材種類に係わらず増大しているものの,図-7の解析結果における軟化開始時のたわみは, α に係わらず実験結果を過小評価している。しかし,R-OP-50-8M(図-7(a)参照)では $\alpha=1.0$,N-OP-50-8M(図-7(b)参照)では $\alpha=2.0$,SH-WH-50-8M(図-7(c)参照)では $\alpha=1.0$ とすることにより,実験で得られたP- δ 関係の形状を概ね近似できる。

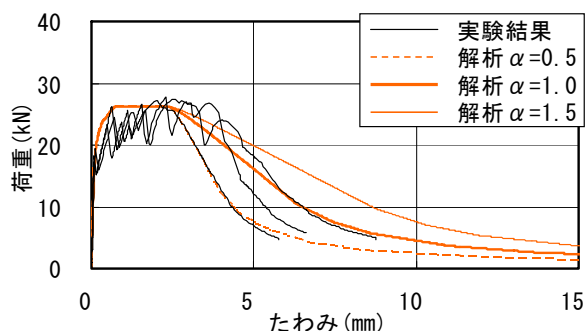
図-8に,一例として,R-OP-50-8Mの解析($\alpha=1.0$)により得られた最大荷重時および軟化開始時のひび割れ発生状況(ひび割れひずみ)を示す。なお,図中の黒短線はひび割れ発生位置であり,線の太さはひび割れひずみの大きさ(図中にその凡例を示す),線の方向はひび割れひずみと直交の方向(ひび割れ方向)を示す。

最大荷重時(図-8(a)参照)では,純曲げ区間内の梁下端に,同程度の大きさのひび割れが一樣に発生している。しかし,軟化開始時(図-8(b)参照)では,載荷点位置の梁下端に,大きなひび割れが集中している。これは,前掲,写真-1(a)の実験におけるひび割れ発生状況と概ね一致している。なお,解析においてひび割れの集中が起こる原因として,非線形解析による計算誤差,一様でない応力の存在等が考えられる。

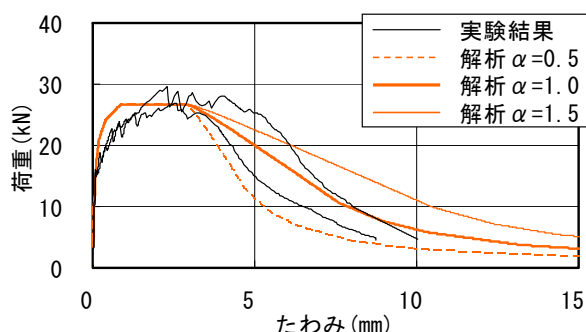
図-9に,W/Cの相違するRDFRCC(練混ぜ時間6分)の3等分点曲げ実験および解析により得られたP- δ 関係を示す。



(a) R-OP-40-6M



(b) R-OP-50-6M



(c) R-OP-60-6M

図-9 荷重-たわみ関係

(実験, 引張終局ひずみおよび α に関する解析)

W/Cおよび α に係わらず, 図-9の解析結果における軟化開始時のたわみは, 実験結果を過小評価している。しかし, R-OP-40-6M (図-9(a)参照)では $\alpha=0.5$, R-OP-50-6M (図-9(b)参照)では $\alpha=1.0$, R-OP-60-6M (図-9(c)参照)では $\alpha=1.0$ とすることにより, 実験で得られたP- δ 関係の形状を概ね近似できる。

以上より, 本研究で提案した ϵ_u を定める式(1)において, α を適切に定めることにより, 実験で得られたP- δ 関係の形状を概ね近似できる。

なお, より正確な α については, 今後, 検討していく予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を, 以下にまとめる。

(1) 2次元非線形有限要素解析において, 本研究で示し

た手法により高靱性セメント複合材料の引張軟化挙動を導入すれば, 要素寸法依存性がほぼ解消する。

(2) 本研究で提案した引張軟化挙動における, 最終的に引張応力が $0\text{N}/\text{mm}^2$ となる時点の引張ひずみを定める式において, 材料定数 α を適切に定めることにより, 3等分点曲げ実験で得られた荷重-たわみ関係の形状を概ね近似できる。

今後は, 各種細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の正確な材料定数 α について, 詳細に検討していく予定である。

謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た, 東海大学学生の梅田浩二君に謝意を表します。

参考文献

- 1) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W. : Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC2), pp.1-23, 1996
- 2) Li, V. C. : From Micromechanics to Structural Engineering -The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, Vol.10, No.2, pp.37-48, 1993.7
- 3) (財)日本建築センター: 日米共同構造実験研究「高知能建築構造システムの開発」平成11年度報告書, 2000.3
- 4) 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, 128pp., 2002.1
- 5) JCI標準: 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
- 6) 清水克将, 金久保利之, 閑田徹志, 永井覚: 曲げ試験によるPVA-ECCの引張性能評価, 日本建築学会構造系論文集, No.604, pp.31-36, 2006.6
- 7) 武若耕司: シラスコンクリートの特徴とその実用化の現状, コンクリート工学, Vol.42, No.3, pp.38-47, 2004.3
- 8) 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, Vol.44, No.1, pp.11-18, 2006.3
- 9) 渡部憲, 加藤雄介: 細骨材としてシラスを使用した高靱性セメント複合材料の材料特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, No.1, pp.375-380, 2008.7
- 10) 渡部憲, 白井伸明, 大岡督尚, 白都滋, 藤田敬: 高靱性ビニロン繊維補強モルタル耐震壁の弾塑性挙動に関する基礎的研究, 日本建築学会構造系論文集, No.559, pp.211-218, 2002.9