

論文 高靱性セメント複合材料の圧縮軟化挙動

渡部 憲*1・佐藤 史康*2・中村 允哉*2・加藤 浩文*2

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1軸圧縮試験を行い、圧縮軟化挙動に与える細骨材種類および水セメント比の影響について検討を行った。また、実験により得られた圧縮軟化挙動を2直線圧縮軟化挙動で近似し、その際に必要となる材料定数の定式化を試みた。その結果、本研究の範囲において、水セメント比が変動した場合についても、各種細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の圧縮強度を与えることにより、2直線近似圧縮軟化挙動を定めることができ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, 圧縮試験, 再生細骨材, シラス, 圧縮軟化挙動

1. はじめに

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。このような背景の中、武若¹⁾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。筆者らもこれまでに、高靱性セメント複合材料（以下、DFRCCと略記）²⁻⁵⁾の細骨材として、再生細骨材およびシラスを使用した場合の材料特性について検討を実施した⁶⁻⁸⁾。

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。筆者らの一人らも、これまでにRC部材を対象としたFEM解析を実施してきた^{例えは⁹⁾}。RC部材の崩壊に至るまでの過程について検討する場合、各材料の応力-ひずみ関係の形状等に関する特徴を概ね表現できる範囲内で構成則を単純化（例えば、4直線モデルを2直線モデルに単純化する等）してFEM解析に使用することにより、非線形解析解の収束性が高まる場合もあるため、簡易な材料構成則の検討が必要である。細骨材として再生細骨材およびシラスを使用したDFRCCの引張軟化挙動については、文献⁸⁾に示したが、圧縮軟化挙動については、十分な検討を行っていない。

そこで本研究では、細骨材として天然細骨材、再生細骨材およびシラスを使用したDFRCCの1軸圧縮試験を行い、圧縮軟化挙動に与える細骨材種類および水セメント比の影響について検討を行った。また、以前から指摘

されている1軸圧縮試験時の載荷盤の拘束による影響¹⁰⁾についても検討を行った。さらに、実験により得られたDFRCCの圧縮軟化挙動を2直線圧縮軟化挙動で近似し、その際に必要となる材料定数の定式化を試みた。

2. 実験方法

実験概要の一覧を表-1に示す。練混ぜには50ℓ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) 砕砂（表乾密度：2.68g/cm³、吸水率：1.36%）と山砂（表乾密度：2.58g/cm³、吸水率：2.69%）を質量比7：3で混合した天然細骨材（N、粗粒率：2.33）および普通ポルトランドセメント（OP、密度：3.16g/cm³）を使用したNDFRCC、2) 再生細骨材（R、表乾密度：2.51g/cm³、吸水率：3.73%、粗粒率：2.74）およびOPを使用したRDFRCC、3) シラス（SH、表乾密度：2.09g/cm³、吸水率：6.94%、粗粒率：1.33）および白色セメント（WH、密度：3.05g/cm³）を使用したSHDFRCCの3種類である。

水セメント比（W/C）は、40、50および60%とし、練

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 (%)	細骨材セメント比 S/C	テフロンシートの有・無	繊維体積混入率V _f (%)		
N-OP-40	N	OP	40	0.40	無	3.0		
N-OP-50			50	0.65				
N-OP-60			60	0.90				
N-OP-40TS			40	0.40				
N-OP-50TS			50	0.65				
N-OP-60TS			60	0.90				
R-OP-40TS			R	OP			40	0.40
R-OP-50TS							50	0.65
R-OP-60TS							60	0.90
SH-WH-40TS	SH	WH	40	0.25	有	3.0		
SH-WH-50TS			50	0.60				
SH-WH-60TS			60	0.80				

*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）

混ぜ時間を、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分、続い

て、繊維を2分間で混入、最後に、0.5分練混ぜて終了。）とした。使用繊維はPVA繊維（径：0.20mm、長さ：18mm、ヤング係数：27kN/mm²、引張強度：975N/mm²）で、繊維体積混入率（V_f）を3%とした。V_f=3%と固定した理由は、筆者らのこれまでの研究^{例えぼ⁷⁾}から、本研究で使用しているPVA繊維や細骨材では、V_f=3%以上としなければ十分な破壊靱性を確保できないこと、また、V_f=4%では更なるコスト高となる等による。

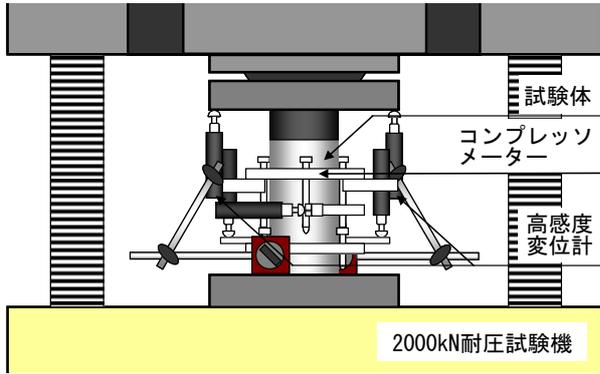
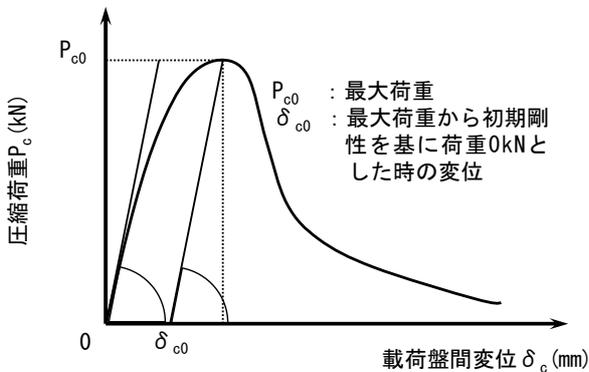


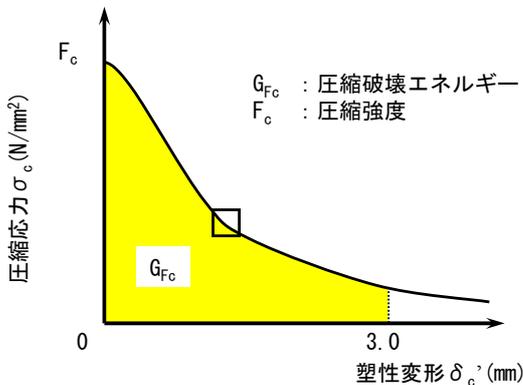
図-1 1軸圧縮載荷

載荷盤の拘束は、鋼製載荷盤で試験体を直接載荷したもの（テフロン無し）および2枚のテフロンシート（厚0.1mm）の間にシリコンオイルを塗布し、鋼製載荷盤と試験体の上下間に挿入したもの（テフロン有り）の2種類とした。

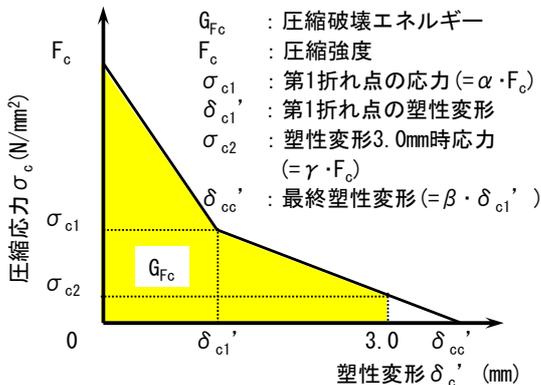
載荷は、2000kN耐圧試験機を使用した。試験体は100φ×200mmの円柱とし、各要因3体製作した。1軸圧縮載荷の概要を図-1に示す。計測項目は、荷重、コンプレッションメーターによる試験体中央部の縦・横ひずみおよび載荷盤間変位とした。載荷速度は、応力上昇域では応力増分を毎秒0.2N/mm²（ただし、試験体が急激な変形を始めた時点で、載荷速度の調整を停止）、応力下降域では載荷盤間変位増分を毎分0.4mmとなるように制御した。なお、本実験対象の試験体はPVA繊維を混入しているため、最大荷重以降も安定した載荷が可能であった。試験体は打設後1日で脱型し、試験時（材齢28日）まで標準養生とした。



(a) 圧縮荷重-載荷盤間変位関係



(b) 圧縮応力-塑性変形関係



(c) 2直線近似圧縮応力-塑性変形関係

図-2 圧縮軟化挙動の評価方法

図-2に、圧縮軟化挙動の評価方法について示す¹¹⁾。

まず、実験により得られた圧縮荷重（P_c）-載荷盤間変位（δ_{c0}）関係（図-2(a)）を圧縮応力（σ_c）-塑性変形（δ_{c'}）関係（図-2(b)）に変換する。次に、σ_c-δ_{c'}関係からδ_{c'}=3.0mmまでの面積を求める。本研究では、これを圧縮破壊エネルギー（G_{Fc}）とする。なお、δ_{c'}=3.0mmと定めた理由は、σ_c-δ_{c'}関係において、十分にσ_cが低下する領域までを含む値としてG_{Fc}を定義するためである。最後に、実験で得られたσ_c-δ_{c'}関係は、図-2(c)に示すように2直線で近似できると仮定し、式(1)の係数α、β、γおよびδ_{c1'}を定める。なお、γはα、βおよびδ_{c1'}を使用することにより、式(2)で表される。式(1)、式(2)中のδ_{c'}は3.0mmである。

$$G_{F_c} = 0.5(1.0 + \alpha \cdot \beta - \beta \cdot \gamma) F_c \cdot \delta_{c1}' + 0.5 \delta_{c1}' \cdot \gamma \cdot F_c \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{\alpha(\beta \cdot \delta_{c1}' - \delta_{c1}')}{(\beta - 1.0)\delta_{c1}'} \quad (2)$$

近似手順の詳細は、1) 実験で得られたσ_c-δ_{c'}関係のσ_cの低下勾配が大きく変化する箇所A（図-2(b)中の四角印）を境に、実験データを2分割する。2) δ_{c'}

表-2 材料特性一覧

試験体名	単位容積質量 (g/cm ³)	ヤング係数E (kN/mm ²)	圧縮強度F _c (N/mm ²)	圧縮破壊エネルギーG _{Fc} (N/mm)	圧縮強度時縦ひずみε (μ)
N-OP-40	2.10	20.8	55.7	60.5	3573
N-OP-50	2.04	16.2	40.7	48.0	4430
N-OP-60	1.99	13.4	26.3	39.2	4472
N-OP-40TS	2.11	20.9	52.2	54.1	3303
N-OP-50TS	2.03	15.6	34.6	44.5	3681
N-OP-60TS	1.99	13.4	25.7	41.4	4064
R-OP-40TS	2.05	19.6	45.8	51.5	3447
R-OP-50TS	2.00	15.5	34.7	41.3	3878
R-OP-60TS	1.97	14.5	24.9	37.2	4346
SH-WH-40TS	1.96	16.4	45.3	59.2	3909
SH-WH-50TS	1.89	14.7	33.5	47.8	3599
SH-WH-60TS	1.85	12.3	24.7	42.3	3395

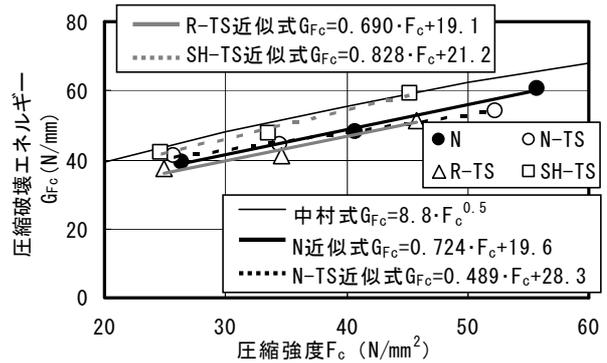


図-5 圧縮破壊エネルギー—圧縮強度関係

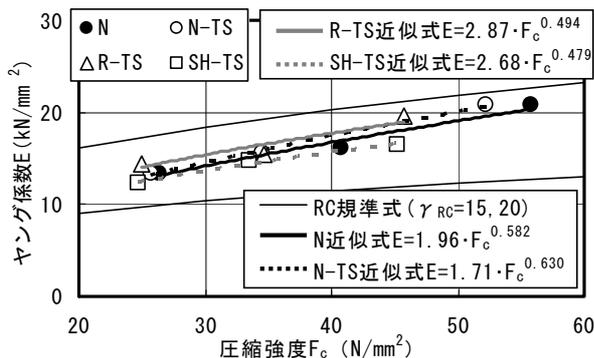


図-3 ヤング係数—圧縮強度関係

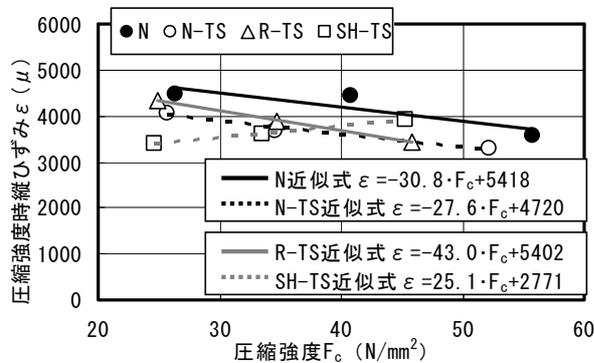


図-4 圧縮強度時縦ひずみ—圧縮強度関係

=0.0mm～Aの変形までの実験データおよびδ_c' =Aの変形～3.0mmまでの実験データをそれぞれ直線近似する(以下、直線1、直線2と略記)。なお、直線1の切片はF_cとする。3) 直線1と直線2の交点および直線2とδ_c'軸との交点を求め、各材料定数の初期値を算出する。4) 最後に、実験で得られたσ_c—δ_c'関係と2直線近似σ_c—δ_c'関係のG_{Fc}が一致するように、非線形最小二乗法(マルカート法)を用いて、各材料定数を決定する。

3. 結果と考察

3.1 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。

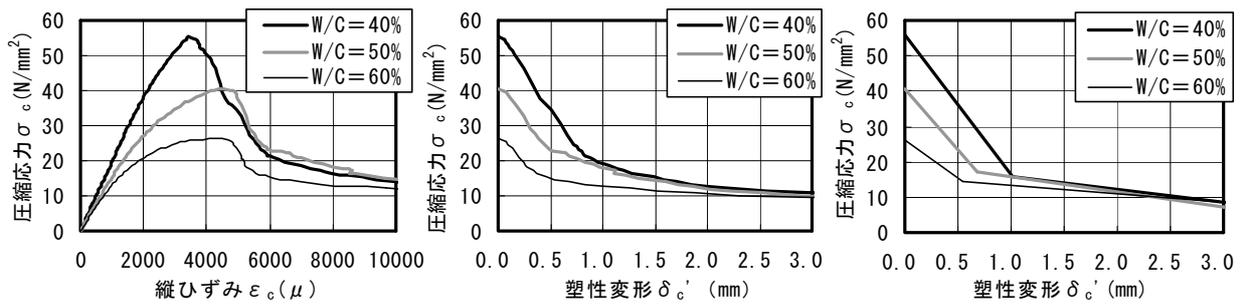
まず、ヤング係数(E)、圧縮強度(F_c)および圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})は、いずれの細骨材を使用した場合においても、W/Cの増加に伴い低下する傾向にある。しかし、圧縮強度時縦ひずみ(ε)は、NDFRCCおよびRDFRCCでは、W/Cの増加に伴い増大しているものの、SHDFRCCでは低下している。

次に、NDFRCCについて、テフロンシートの有・無の影響に注目すると、F_cはいずれのW/Cにおいても、(テフロン有り) < (テフロン無し) となっている。しかし、G_{Fc}は、W/C=40および50%では(テフロン有り) < (テフロン無し) となっているものの、W/C=60%では(テフロン有り) > (テフロン無し) となっている。これは、DFRCCの場合、テフロン挿入により拘束効果を失い、いずれのW/CにおいてもF_cは低下する。しかし、後掲の図-6および7に示すように、F_c直後のσ_cの低下勾配は、W/C=40%では不明瞭だが、その他のW/Cでは(テフロン無し)と比較して(テフロン有り)は延性的となる。また、W/C=40, 50%の場合と比較して、W/C=60%でのF_cとσ_{c1}の差は小さい。これらのこと等がW/C=60%のδ_c' =3.0mmまでのG_{Fc}において、(テフロン有り) > (テフロン無し) という結果を導いたと考える。

図-3および4に、各種細骨材を使用したDFRCCのE—F_c関係およびε—F_c関係を示す。なお、図-3中にはRC規準式¹²⁾(気乾単位体積重量γ_{RC}=15および20kN/mm³)から得られたE—F_c関係も示してある。

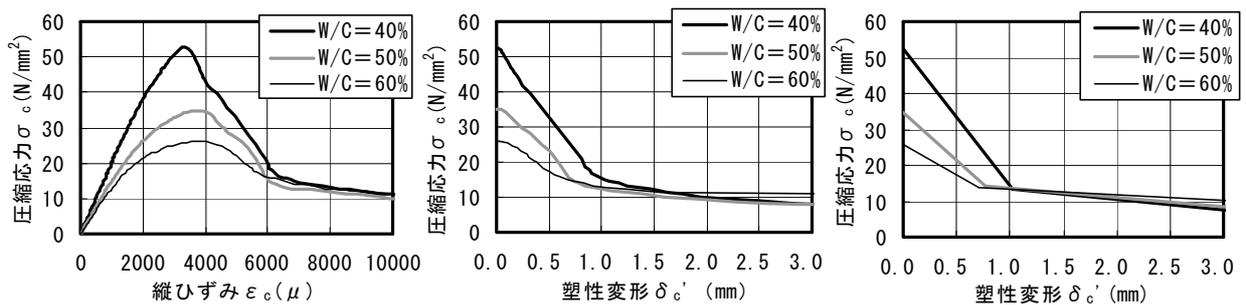
まず、図-3によれば、いずれの細骨材を使用した場合においても、また、いずれの拘束条件(テフロンシートの有・無)においても、各DFRCCのE—F_c関係は、RC規準式¹²⁾(γ_{RC}=15～20kN/mm³)の範囲内である。各DFRCCのE—F_c関係を累乗近似すると、図-3に示す近似式が得られる。

次に、図-4によれば、εは、NDFRCCおよびRDFRCCでは、F_cの増加に伴い低下しているものの、SHDFRCCでは増大している。筆者らの一人らの過去の研究によ



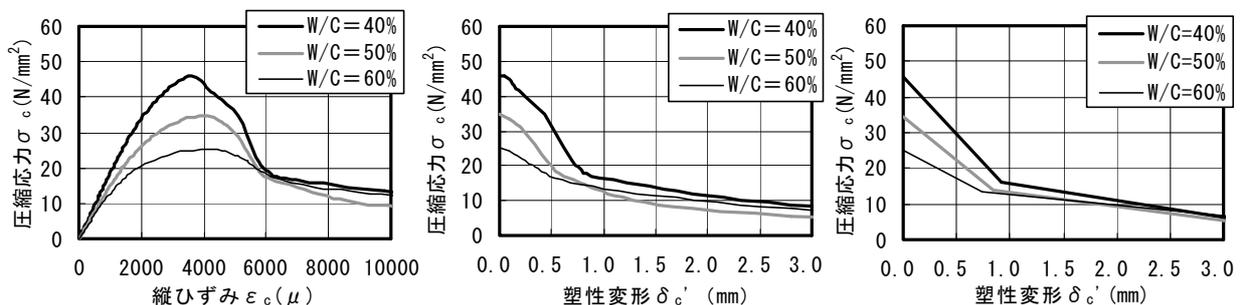
(a) 圧縮応力-縦ひずみ関係 (b) 圧縮応力-塑性変形関係 (c) 2直線近似圧縮応力-塑性変形関係

図-6 圧縮応力-縦ひずみ, 塑性変形関係 (NDFRCC, テフロン無し)



(a) 圧縮応力-縦ひずみ関係 (b) 圧縮応力-塑性変形関係 (c) 2直線近似圧縮応力-塑性変形関係

図-7 圧縮応力-縦ひずみ, 塑性変形関係 (NDFRCC, テフロン有り)



(a) 圧縮応力-縦ひずみ関係 (b) 圧縮応力-塑性変形関係 (c) 2直線近似圧縮応力-塑性変形関係

図-8 圧縮応力-縦ひずみ, 塑性変形関係 (RDFRCC, テフロン有り)

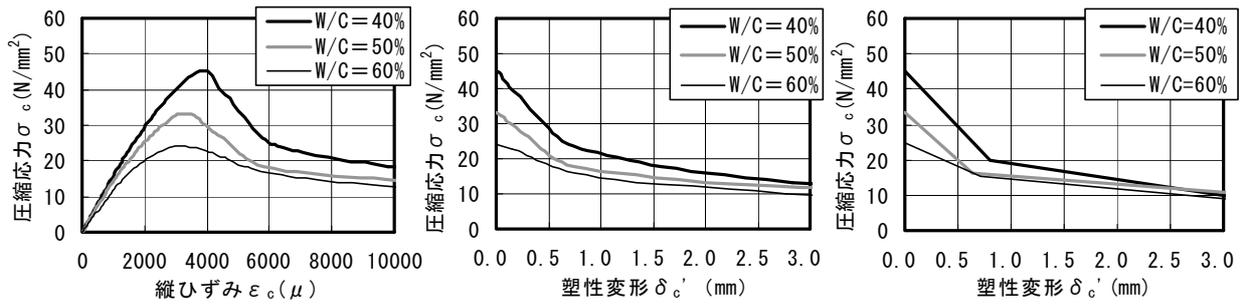
れば¹¹⁾, 軽量および普通コンクリートの ϵ は, F_c の増加に伴い増大する傾向を示していたことから, この結果は, 高靱性化したことによる影響であると考えられる。このように, 細骨材種類により $\epsilon - F_c$ 関係の傾向は相違しているものの, 各DFRCCの $\epsilon - F_c$ 関係を直線近似すると, 図-4に示す近似式が得られる。

図-5に, 各種細骨材を使用したDFRCCの $G_{Fc} - F_c$ 関係を示す。なお, 図-5中には中村等の提案式¹³⁾ (コンクリートに対して提案された式) から得られた $G_{Fc} - F_c$ 関係も示してある。同一 F_c において, 各種細骨材を使用したDFRCCの G_{Fc} は, 中村等の提案式¹³⁾ から得られた G_{Fc} と比較して小さくなっている。各DFRCCの $G_{Fc} - F_c$ 関係を直線近似すると, 図-5に示す近似式が得られる。

3.2 圧縮応力-縦ひずみ, 塑性変形関係

図-6~9に, 各種細骨材を使用したDFRCCの圧縮応力 (σ_c) - 縦ひずみ (ϵ_c) 関係, $\sigma_c - \delta_c'$ 関係および2直線近似 $\sigma_c - \delta_c'$ 関係を示す。なお, $\sigma_c - \epsilon_c$ 関係および $\sigma_c - \delta_c'$ 関係は代表的な値であり, 2直線近似 $\sigma_c - \delta_c'$ 関係については平均値を示している。

図-6(a)~9(a)によれば, 各DFRCCの $\sigma_c - \epsilon_c$ 関係は, いずれの細骨材を使用した場合においても, また, いずれの拘束条件 (テフロンシートの有・無) においても, F_c 以降, 急激な σ_c の低下を示し, $\epsilon_c = 6000 \mu$ 以降は, 緩やかに σ_c が低下していく。なお, F_c 以降の急激な σ_c の低下勾配は, W/Cの増加に伴う F_c の低下により緩やかとなる傾向にある (ただし, NDFRCC (テフロン無し) では載荷盤の拘束による影響により, 多少, 不明瞭となっている。)。このような傾向は, 図-6(b)~9(b)



(a) 圧縮応力-縦ひずみ関係 (b) 圧縮応力-塑性変形関係 (c) 2直線近似圧縮応力-塑性変形関係

図-9 圧縮応力-縦ひずみ, 塑性変形関係 (SHDFRCC, テフロン有り)

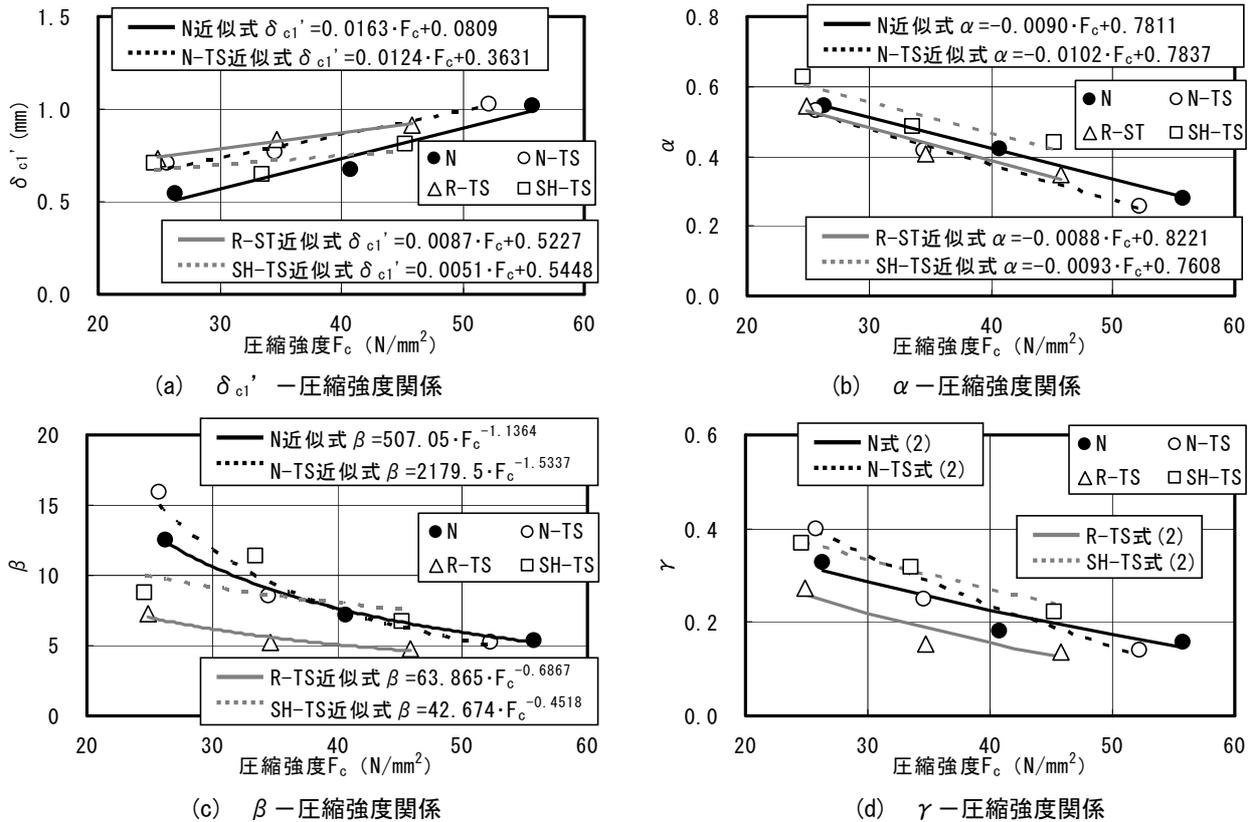


図-10 2直線近似圧縮軟化挙動の各材料定数-圧縮強度関係

の $\sigma_c - \delta_c'$ 関係および図-6(c)~9(c)の2直線近似 $\sigma_c - \delta_c'$ 関係においても確認できる。これは、各種細骨材を使用したDFRCCの圧縮軟化挙動を2直線近似した場合において、 $\sigma_c - \varepsilon_c$ 関係の傾向を模擬できることを示している。

3.3 2直線近似圧縮軟化挙動の各材料定数

図-10に、各種細骨材を使用したDFRCCの2直線近似圧縮軟化挙動の各材料定数- F_c 関係を示す。

まず、図-10(a)によれば、いずれの細骨材を使用した場合においても、また、いずれの拘束条件(テフロンシートの有・無)においても、 δ_{c1}' は F_c の増加に伴い、ほぼ直線的に増大する傾向にある(ただし、SHDFRCCでは、多少、不明瞭となっている。)

次に、図-10(b)によれば、いずれの細骨材を使用した場合においても、また、いずれの拘束条件(テフロンシートの有・無)においても、 α は F_c の増加に伴い、ほぼ直線的に減少する傾向にある。

更に、図-10(c)によれば、いずれの細骨材を使用した場合においても、また、いずれの拘束条件(テフロンシートの有・無)においても、 β は F_c の増加に伴い減少する傾向にある(ただし、SHDFRCCでは、多少、不明瞭となっている。)。なお、その減少勾配は、 F_c の増加に伴い緩やかとなっている。

これらのことから、2直線近似圧縮軟化挙動の各材料定数(δ_{c1}' , α , β)は F_c の関数で表すことが可能であると思われ、各材料定数について、 δ_{c1}' および α を

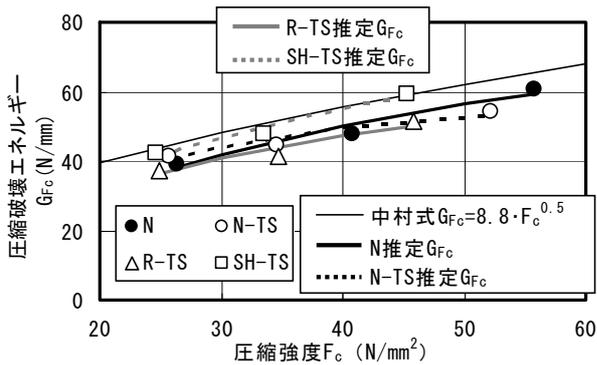


図-11 圧縮破壊エネルギー—圧縮強度関係

直線近似， β を累乗近似すると，図-10に示す近似式が得られる。

図-10(d)中には，図-10(a)～(c)に示す近似式に各種細骨材を使用したDFRCCの F_c を代入して各材料定数(δ_{c1}' ， α ， β)を求め，それらを用いて式(2)より得られた γ - F_c 関係も示してある。図-10(d)によれば，いずれの細骨材を使用した場合においても，また，いずれの拘束条件(テフロンシートの有・無)においても， γ は F_c の増加に伴い減少する傾向にあり，2直線近似 σ_c - δ_c' 関係の γ は，概ね，前述の手法で得られる γ と近似している。

以上より，各種細骨材を使用したDFRCCの F_c から，2直線近似圧縮軟化挙動の各材料定数を推定するための式が明らかとなった。

図-10に示す近似式に，各種細骨材を使用したDFRCCの F_c を代入して各材料定数を求め，式(1)を用いて推定した G_{F_c} - F_c 関係を図-11に示す。なお，図-11中には中村等の提案式¹³⁾から得られた G_{F_c} - F_c 関係も示してある。推定された G_{F_c} - F_c 関係は，いずれの細骨材を使用した場合においても，また，いずれの拘束条件(テフロンシートの有・無)においても，実験結果と概ね近似していることがわかる。

即ち，本研究の範囲(W/C=40～60%，フロー値=180mm程度，繊維や細骨材は本研究に示したものを使用)において，W/Cが変動した場合についても，各種細骨材を使用したDFRCCの F_c を与えることにより，2直線近似圧縮軟化挙動を定めることができる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を，以下にまとめる。

- (1) 各種細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の圧縮強度から，2直線近似圧縮軟化挙動の各材料定数を推定するための式が明らかとなった。
- (2) 本研究の範囲において，水セメント比が変動した場合についても，各種細骨材を使用した高靱性セメン

ト複合材料の圧縮強度を与えることにより，2直線近似圧縮軟化挙動を定めることができる。

謝辞

実験およびデータ整理に際してご助力を得た，東海大学学生の内出恵介君および犬嶋慧君に謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W. : Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites HPRCC, High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPRCC2), pp.1-23, 1996
- 3) 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, July 1993
- 4) (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
- 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.1-10，2002.1
- 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，Vol.44，No.1，pp.11-18，2006.3
- 7) 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
- 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) 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
- 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報告集，Vol.22，No.2，pp.493-498，2000.6
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準・同解説2010，pp.6，2010.2
- 13) 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