

# 短繊維・製鋼スラグ混合土の配合条件が一軸圧縮による変形挙動に及ぼす影響

柳橋 寛一<sup>1</sup>・田中 裕一<sup>1</sup>・堤 彩人<sup>2</sup>  
松村 聡<sup>3</sup>・水谷 崇亮<sup>3</sup>・森川 嘉之<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)

E-mail: Tomokazu.Yanagibashi@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup> 正会員 五洋建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

<sup>3</sup> 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

短繊維・製鋼スラグ混合土の材料特性を明らかにするために、様々な配合条件で一軸圧縮試験を実施し、配合条件が変形挙動に及ぼす影響を検討した。短繊維・製鋼スラグ混合土の変形挙動はポストピーク領域において短繊維の影響を強く受け、破壊モードが変化することがわかった。これらの破壊モードは「Ⅰ. 脆性破壊型」「Ⅱ. 安定破壊型」「Ⅲ. 延性破壊型」「Ⅳ. ひずみ硬化型」の4つに分類され、各実験ケースに照らし合わせることで、短繊維と製鋼スラグの混合体積比に対する変形特性の模式図が得られた。この模式図は、配合条件から混合土の変形特性を制御する際の指標となり、求められる材料特性に応じた配合設計をする際の重要な手がかりになる。

**Key Words :** *fiber reinforcement, steelmaking slag, dredged soil, Unconfined Compression Test, deformation behavior*

## 1. はじめに

### (1) 背景

船舶や荷役機械の大型化への対応や産業の国際競争力の向上を目的として、国等で推進される港湾施設の大水深化に伴い、港湾整備で増大する浚渫土の処分は喫緊の課題となっている。近年では、浚渫土に製鋼スラグを加え、改質・固化された製鋼スラグ混合土を地盤材料として有効利用することが検討されている。製鋼スラグ混合土の強度に影響を与える要因等については未解明な点が残されているものの、これに短繊維を加えた短繊維・製鋼スラグ混合土として用いることにより、脆性の改善効果があることが示されている<sup>1)</sup>。このような短繊維・製鋼スラグ混合土の特徴を把握し、強度や変形特性を制御することができれば、地盤材料としての利用拡大が期待できる。

本研究では、短繊維・製鋼スラグ混合土の材料特性を明らかにするために、実用的と考えられる範囲で配合条件を様々に変化させて供試体を作製し、一軸圧縮試験を実施した。その結果を基に配合条件が強度や変形挙動に与える影響を検討することで、短繊維・製鋼スラグ混合土の材料特性を把握することを試みた。

### (2) 短繊維・製鋼スラグ混合土

短繊維・製鋼スラグ混合土は、浚渫土、製鋼スラグ、短繊維の3種類の材料で構成される複合材料である。この材料は、近年研究が進み実用化が図られつつある製鋼スラグ混合土に着想を得て開発を進めているものである。

製鋼スラグ混合土の実用については、様々な用途が検討されている。たとえば山田ら<sup>2)</sup>は、人工干潟の造成における端部の法留め潜堤としての利用を提案している。実験では、混合土の固化にともない、軟弱地盤へのめり込みで曲げ応力が発生し、クラックが形成される現象について検討している。

このような課題に対し、堤ら<sup>1)</sup>は製鋼スラグ混合土に短繊維を加えることで短繊維・製鋼スラグ混合土とし、脆性を改善して海面処分場の遮水材への適用を検討した。三軸圧縮・透水試験による遮水性を検討した結果、一定の有効拘束圧の存在下においては、大きな軸ひずみを受けても遮水材としての透水係数を維持できることを確認している。この変形に対する遮水性能の追従性は、混合土の脆性が短繊維により改善され、ひずみ硬化性を得たことに起因すると推測している。また堤ら<sup>3)</sup>は、セメント固化処理土と製鋼スラグ混合土に対する短繊維の補強効果について一軸圧縮試験により比較した。短繊維・製鋼スラグ混合土がより高い脆性改善効果を示しており、

表-1 使用材料の物理特性

項目	浚渫土	製鋼スラグ
粒子密度 $\rho_s$ ( $\text{g/cm}^3$ )	2.67	3.49
液性限界 $w_L$ (%)	84.3	—
塑性限界 $w_p$ (%)	24.4	—
強熱減料 $L_f$ (%)	7.4	—
表乾密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	—	3.11
fCaO (wt%(-dry))	—	2.4

表-2 配合条件一覧

Case	浚渫土 含水比 (%)	製鋼スラグ 体積比 S(vol%)	短繊維 体積比 f(vol%)	材齢 (day)
1 to 20	126.5	10	0.0	7 14 28
		20	0.1	
		30	0.3	
		40	0.5	
		4水準	5水準	3水準

骨格構造の材料構成の違いが原因であると推測している。短繊維・製鋼スラグ混合土が脆性改善効果やひずみ硬化性を持つとすれば、強度や遮水性能の観点からの利用のみならず、変形が生じた場合でも耐力を保持する地盤材料（例えば仮設道路の敷均し材や、変形が許容される構造物に対する埋め戻し材など）として適用範囲の拡大が期待される。

しかしながら、短繊維・製鋼スラグ混合土の材料特性は、浚渫土を母材に製鋼スラグが分散している粒子分散形複合材料としての特性と、浚渫土に短繊維が分散している繊維形複合材料としての特性を二極として、製鋼スラグと短繊維の混合量により様々な特徴を示すと考えられる。材料の変形特性に影響を与える因子として、①製鋼スラグ混合土の骨格強度や②製鋼スラグと短繊維の絡み合いによる引張抵抗、③製鋼スラグと浚渫土で形成された固化部による短繊維の引抜き抵抗などが推測され、それらが相互に関与し合い、複雑な変形挙動を示すと考えられる。そこで本研究では、短繊維・製鋼スラグ混合土の変形特性の推定方法を模索するため、様々な配合条件下で作製した供試体の一軸圧縮試験を実施し、その変形挙動を調査・検討した。

## 2. 実験方法

含水比を調整した浚渫土に、製鋼スラグの混合体積比  $S$  (vol%) と短繊維の混合体積比  $f$  (vol%) を様々に変化させて混合し、プラスチックモールドにタッピング法で詰め、供試体を作製した。浚渫土は 4.75 mm ふるいにかけて雑物を除去し、含水比を 126.5% に調整した。また、製鋼スラグは粒径を 4.75 mm 以下に調整し、短繊維にはポリエステル繊維（材料密度 1.38  $\text{g/cm}^3$ 、直径 12.5  $\mu\text{m}$ 、長さ 10 mm）を使用した。以下では、供試体の配合条件について、 $S$  は製鋼スラグの表乾密度から計算される内割混合体積比により、 $f$  は短繊維の材料密度から計算さ

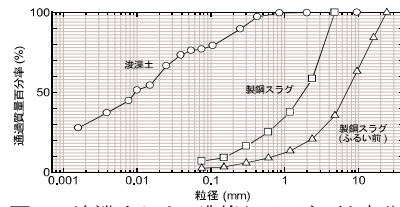


図-1 浚渫土および製鋼スラグの粒度分布

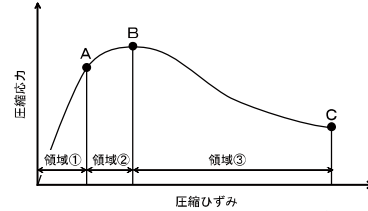


図-2 応力～ひずみ関係の模式図

れる外割混合体積比により示されている。

使用材料の物理特性を表-1、粒度分布を図-1に示す。

混合には混練ミキサーを使用し、浚渫土に製鋼スラグ、短繊維の順で加え各 3 分間混練した<sup>4)</sup>。その際、短繊維の分散性が良好であることを確認している。プラスチックモールドは直径 50 mm、高さ 100 mm の容器を使用した。供試体は各実験ケースで 3 本ずつ作製し、密封したのちに室温 20°C、湿度 60% の恒温室内で所定の期間養生した。材齢 7 日、14 日、28 日でひずみ 15% までの一軸圧縮試験 (JIS A 1216 : 2009) を実施し、同時にひずみ 1% ごとの写真撮影で外観の変形過程を観察した。

表-2 に作製した供試体の配合条件を示す。

## 3. 実験結果

### (1) 実験結果の整理

一軸圧縮試験で得られた応力～ひずみ曲線から、図-2の模式図に示す A～C 点を整理した。

図-2 の点 A は、圧縮開始後から破壊点までの間に最大曲率を示す点である。本検討ではこの点を構造骨格の降伏点と考え<sup>5)</sup>、この点から骨格強度 (マトリックス強度) :  $q_m$  ( $\text{kN/m}^2$ ) と降伏ひずみ :  $\epsilon_y$  (%) を求めることにした。点 B は最大圧縮応力を示す点であり、ここを供試体の破壊点と考え、一軸圧縮強さ  $q_u$  ( $\text{kN/m}^2$ )、破壊ひずみ  $\epsilon_f$  (%)、弾性係数  $E_{50}$  ( $\text{MN/m}^2$ ) を求めた。Case5 および Case10 では著しいひずみ硬化がみられ、 $E_{50}$  が領域①で得られなかった。点 C は試験における最大ひずみ点 (試験終了時のひずみで約 15% 程度) であり、ここでの圧縮応力を残留強度  $q_r$  ( $\text{kN/m}^2$ ) とした。一部のケースでは最大応力の 2/3 まで応力が低下したところで試験を終了したため、残留強度についての検討から除外した。また脆性破壊を生じて圧縮応力が計測できなくなった供試体については、残留強度をゼロとした。

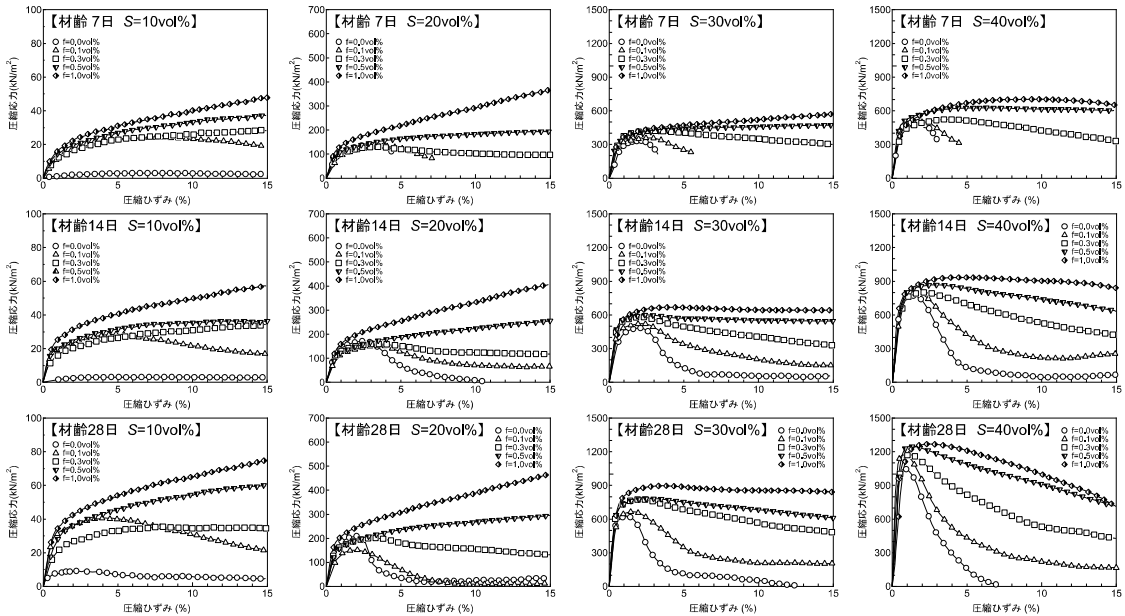


図-3 短繊維・製鋼スラグ混合土の一軸圧縮試験結果例

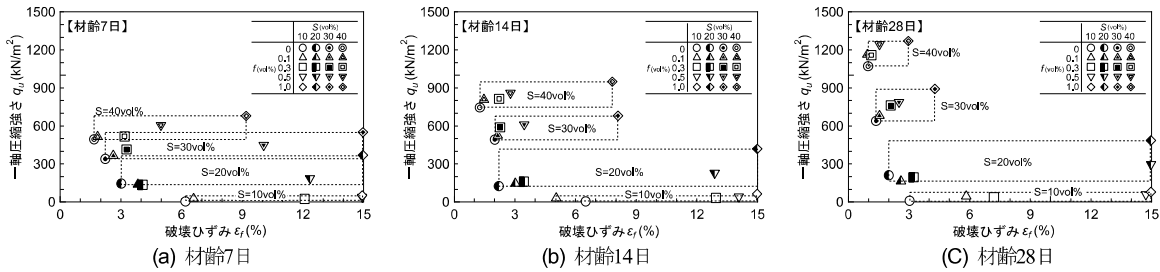


図-4 一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係

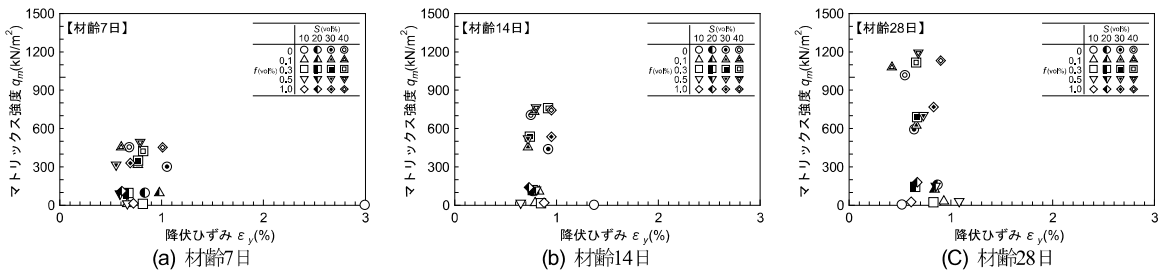


図-5 マトリックス強度と降伏ひずみの関係

以降の考察では、各実験ケースの3本の供試体の試験結果の平均値を用いている(図-3は除く)。ただし、3本の供試体のうち1本だけが特異な試験結果を示していたケース(6ケース)については、2本の供試体の平均値を採用している。なお、各実験ケースにおける供試体のばらつきについては、材齢7日のCase3(S=10vol%,f=0.3vol%)において、一軸圧縮強さの変動係数が0.14と大きい値を示したが、全実験ケースのうち9割以上のケースでは変動係数が0.1以下であった。

(2) 応力～ひずみ関係

材齢およびスラグの混合体積比 S (vol%) ごとに整理した一軸圧縮試験結果の例を図-3に示す。図-3によると、圧縮応力の最大値(σ<sub>max</sub>)は、Sおよび材齢とともに大きくなっている(応力～ひずみ曲線の形状の視認性を高めるため図中の各グラフの縦軸が揃っていないことに注意

願いたい)。また最大ひずみにおける圧縮応力(σ<sub>residual</sub>)は、fとともに大きくなっている。ひずみが大きくなるとともに圧縮応力が上昇し続けるケースでは、σ<sub>max</sub>=σ<sub>residual</sub>となる場合もある。応力～ひずみ関係の初期の勾配は、材齢とSが等しい条件下でfに関わらずほぼ一致している。

(3) 一軸圧縮強さと破壊ひずみの関係

図-4に応力～ひずみ曲線から得られた一軸圧縮強さ q<sub>u</sub> と破壊ひずみ ε<sub>f</sub> の関係を示す。図によると、q<sub>u</sub> が S および材齢とともに大きくなるのがわかる。また、材齢と S が等しい条件下で ε<sub>f</sub> が f とともに大きくなることも確認できる。図中点線で示される各 S における q<sub>u</sub>～ε<sub>f</sub> 関係は、f に比例して右肩上がりの傾向が見られる。ε<sub>f</sub> の分布幅は材齢7日で1.7～15%、材齢14日で1.3～15%、材齢28日で0.9～15%となっている。S=30vol%および

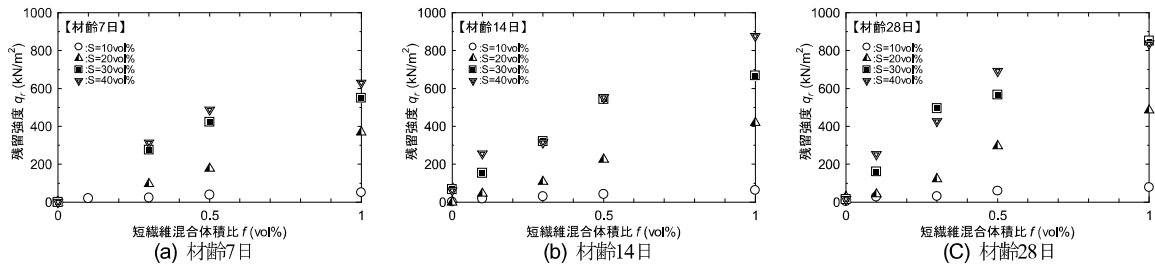


図-6 残留強度と短繊維混合体積比の関係

S=40vol%の配合条件では、材齢による $q_u$ の増加とともに $\epsilon_f$ の分布幅が狭くなっていく。

(4) マトリックス強度と降伏ひずみの関係

図-5 にマトリックス強度  $q_m$  と降伏ひずみ  $\epsilon_f$  の関係を示す。 $q_m$  は S および材齢とともに大きくなる傾向にあり、図-4 の  $q_u$  の傾向に類似している。 $\epsilon_f$  の分布幅は、材齢 7 日で 0.6~3.0%、材齢 14 日で 0.6~1.4%、材齢 28 日で 0.4~1.1% となっており、 $\epsilon_f$  に対する  $f$  の影響は小さい。

(5) 残留強度と短繊維混合体積比の関係

図-6 に残留強度  $q_r$  と短繊維混合体積比  $f$  の関係を示す。材齢と S が等しい条件下で  $q_r$  は  $f$  とともに大きくなり、その傾向は S が大きいケースほど明瞭になる。また、各 S における  $q_r \sim f$  の関係は、材齢に対して大きな変化は見られない。 $q_r$  に対しては、S と  $f$  の配合条件の影響が支配的であると考えられ、材齢による  $q_u$  や  $q_m$  の変化の影響は小さいと考えられる。

(6) 一軸圧縮強さと  $\epsilon_f/\epsilon_y$  の関係

図-7 に  $q_u \sim \epsilon_f/\epsilon_y$  関係を示す。 $q_u$  が大きくなると  $\epsilon_f/\epsilon_y$  は 1.0 に近づいてきており、 $q_u$  が大きい供試体ではマトリックス強度の影響が支配的になっていると考えられる。

(7) 一軸圧縮強さと変形係数の関係

一軸圧縮強さ  $q_u$  と変形係数  $E_{50}$  の関係を図-8 に示す。ただし Case5 および Case10 の結果を除く。図によると、本実験で得られた  $q_u \sim E_{50}$  関係は、管中混合固化処理土で示される  $E_{50} = 50 \sim 300q_u$  の関係<sup>6)</sup> とほぼ一致している。また  $f=0 \sim 0.3\%$  までは  $E_{50} = 100 \sim 300q_u$  の関係にあり、製鋼スラグ混合土で示されている関係式<sup>7)</sup> と一致している。

また、材齢 28 日における  $f \sim E_{50}$  関係を図-9 に示す。S=40vol% では  $f$  に対して  $E_{50}$  の低下がみられるが、S=30vol% 以下かつ  $f=0.5\%$  以下の配合条件では、初期の剛性に対する  $f$  の影響は小さいと考えられる。

(8) 短繊維が混合土に与える影響

ここまでで述べたとおり、短繊維が混合土に与える影響は、破壊ひずみや残留強度に対して大きく、マトリッ

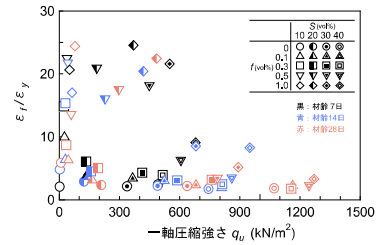


図-7 一軸圧縮強さと  $\epsilon_f/\epsilon_y$  の関係

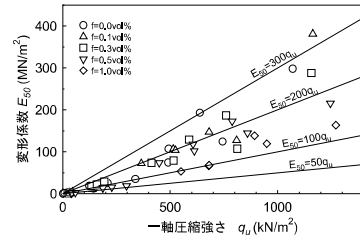


図-8 一軸圧縮強さと変形係数の関係

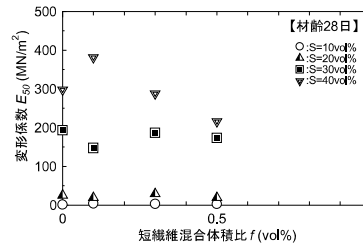


図-9 短繊維混合体積比と変形係数の関係 (材齢28日)

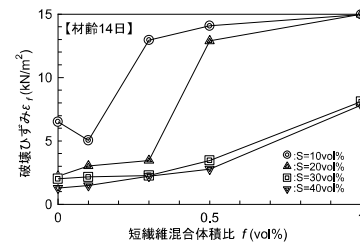


図-10 短繊維混合体積比と破壊ひずみの関係 (材齢14日)

クス強度に対しては小さい。したがって短繊維の効果は図-2 の領域②~③にかけての変形特性に現れると考えられる。図-10 は材齢 14 日における短繊維混合体積比と破壊ひずみの関係を示したものである。S が 10vol% および 20vol% の条件では、 $f=0.3 \sim 0.5\%$  の間に破壊ひずみの急激な増加が見られ、S が 30vol% および 40vol% の条件では破壊ひずみの急増はみられない。材齢 14 日、S=20vol% の実験ケースにおいて、 $f=0.3 \sim 0.5\%$  におけ

る破壊状況を詳しく観察することで、短繊維・製鋼スラグ混合土の変形挙動の変化を確認できる可能性がある。

#### 4. 考察

##### (1) 変形特性の分類

材齢 14 日,  $S=20\text{vol}\%$ の実験条件 (Case6,7,9,10) において、図-11 に示す  $\epsilon=4\%$ ,  $8\%$ ,  $15\%$ での供試体外観の変形過程を抽出した (図-12)。

短繊維を加えない ( $f=0\text{vol}\%$ ) 供試体の変形過程を図-12 の Case6 に示す。ピーク後にひずみの増大とともに圧縮応力が大きく減少する応力～ひずみ関係を示した。初期に発生したき裂が拡大し、供試体側面の土塊が脱落していく破壊形態が確認された。

$f=0.1\text{vol}\%$ の供試体の変形過程を図-12 の Case7 に示す。先に述べた図-10 で、 $S=20\text{vol}\%$ の破壊ひずみが  $f=0.3\sim 0.5\text{vol}\%$ にかけて急増する前の供試体である。ひずみの増大とともにせん断面が形成されていくが、Case6 に比べてき裂の発達速度が遅く、土塊の脱落までには至らなかった。ピーク後に圧縮応力の減少がみられるが、Case6 のように大きな減少ではない。せん断面には架橋する短繊維が観察され (図中抽出写真参照)、短繊維自体の強度と繊維による拘束効果で、せん断面上に作用する摩擦力が発生することで圧縮応力が維持されていると考えられる。

$f=0.5\text{vol}\%$ の供試体の変形過程を図-12 の Case9 に示す。先に述べた図-10 で、 $S=20\text{vol}\%$ の破壊ひずみが  $f=0.3\sim 0.5\text{vol}\%$ にかけて急増した後の供試体である。圧縮開始とともに微細なき裂が供試体全体に発生し、たる型変形を起こしていた。本ケースの応力～ひずみ曲線は (図-11)、ひずみの増大とともに圧縮応力が徐々に増加し、ピーク強度と残留強度が一致していたが、ピーク後に圧縮応力が低下する実験ケースでも同様の破壊形態が見られるものがあつた。ひずみが大きくなると、微細なき裂が徐々にせん断面へと成長していった。

$f=1.0\text{vol}\%$ の供試体の変形過程を図-12 の Case10 に示す。圧縮開始とともに微細なき裂が供試体全体に発生し、たる型変形を起こすところは Case9 と同じであるが、ひず

みが大きくなってもせん断面が現れず、たる型に変形し続けた。

以上の観点から、短繊維・製鋼スラグ混合土の破壊モードを整理し<sup>8)</sup>、Case6, Case7, Case9, Case10 の各々に対応する4つの破壊モード「I.脆性破壊型」「II.安定破壊型」「III.延性破壊型」「IV.ひずみ硬化型」に分類することにした。

##### (2) 配合条件に対する変形特性の模式図

すべての実験ケースの結果を再確認し、(1)で述べた4つの破壊モードに分類したところ、図-13 のような短繊維

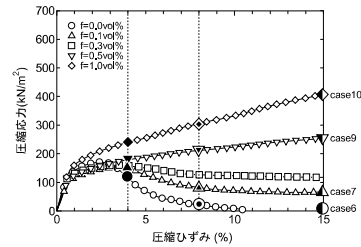


図-11 応力～ひずみ関係 (材齢14日,  $S=20\text{vol}\%$ )

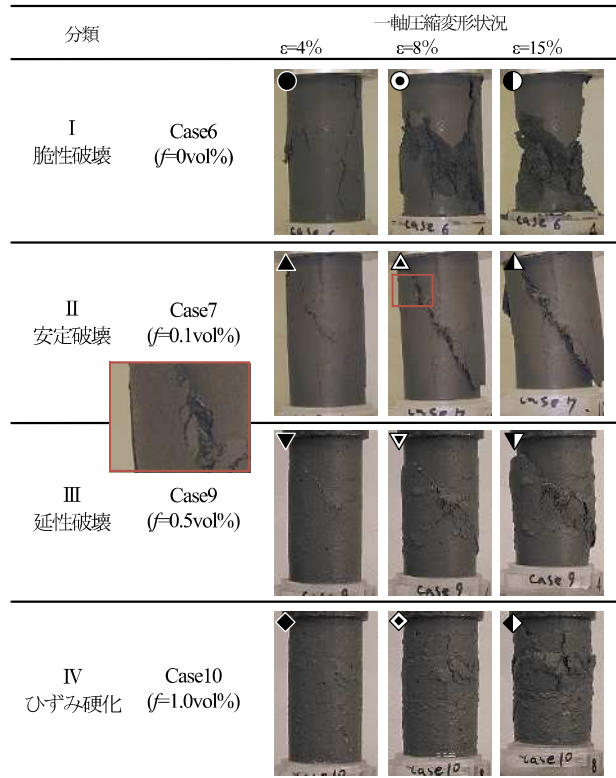


図-12 一軸圧縮変形の様子 (材齢 14 日,  $S=20\text{vol}\%$ )

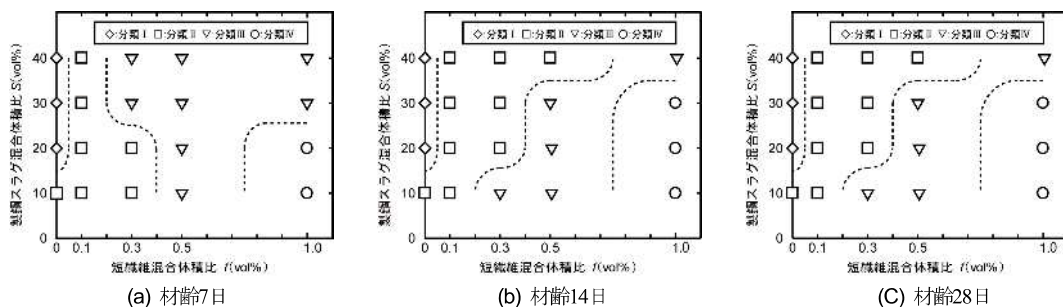


図-13 配合条件と変形特性の模式図



維と製鋼スラグの配合条件に対する混合土の変形特性の模式図が得られた

材齢7日の模式図は、短繊維混合体積比 $f=0.3\sim 0.5\text{vol}\%$ において14日以降と大きく異なり分類Ⅲが多く出現した。材料7日ではマトリックス強度が十分に発現していないことや(図-5)、繊維が変形特性に与える影響が大きい(図-10)ことが相乗し、材料特性が不安定な状態であったと考えられる。一方材齢14日と材齢28日の模式図は同じものであり、材齢14日以降は短繊維・製鋼スラグ混合土の変形特性が安定したものと考えられる。

この模式図は配合条件から混合土の変形特性を制御する際の指標となり、求められる材料特性に応じた配合設計をする際の重要な手がかりとして活用できる。

## 5. まとめ

短繊維・製鋼スラグ混合土の一軸圧縮による変形特性を検討し、以下の結果が得られた。

- 1) 製鋼スラグ混合土に対する短繊維の効果は、破壊ひずみと残留強度を大きくする効果がある。
- 2) ポストピーク領域での短繊維の効果に着目することで、短繊維・製鋼スラグ混合土の破壊モードを「Ⅰ.脆性破壊型」「Ⅱ.安定破壊型」「Ⅲ.延性破壊型」「Ⅳ.ひずみ硬化型」の4つに分類できた。
- 3) すべての実験ケースを4つの破壊モードに照らし合わせた結果、短繊維と製鋼スラグの配合条件に対する混合土の変形特性の模式図が得られた。

短繊維・製鋼スラグ混合土は、変形が生じた場合でも耐力を保持する地盤材料としての利用が期待される。このような材料の設計手法は未だ確立されておらず、適用

の場を検討すると同時に、当該材料を使用した構造形式に対しどのような設計手法を取り入れていくかが今後の課題であると考えられる。また実用においては、拘束圧がある状態での使用も想定される。別途実験を実施しており、機会をみて報告する予定である。

**謝辞:** 本研究の実施にあたり、北海道大学大学院 渡部要一 教授から貴重な助言を頂きました。ここに記し厚く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 堤彩人, 田中裕一, 山田耕一: 短繊維・製鋼スラグ混合土の土質遮水材としての適用性の検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.72, No.2, L\_431-L\_436, 2016.
- 2) 山田耕一, 辻匠, 渡部要一, 水谷崇亮, 森川嘉之, 鶴飼亮行: 軟弱地盤上のカルシア改質土を用いた干潟潜堤に関する実験と考察, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 69, No. 2, pp.1048-1053, 2013.
- 3) 堤彩人, 田中裕一, 山田耕一: 製鋼スラグ混合土とセメント固化処理土に対する短繊維補強効果の比較, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016.
- 4) 平井壮, 水谷崇亮, 菊池喜昭: 製鋼スラグ混合土の混合条件が一軸圧縮強さに及ぼす影響, 第7回地盤工学会関東支部発表会, 2010.
- 5) 小林晃, 龍岡文夫: セメント混合により改良した飽和軟弱粘性土の強度変形特性Ⅳ, 生産研究, vol.34, No.9, 1982.
- 6) 財団法人沿岸技術研究センター: 管中混合固化処理工法技術マニュアル(改訂版), 沿岸技術ライブラリー, No.32, 2008.
- 7) 一般財団法人 沿岸技術研究センター: カルシア改質土利用技術マニュアル, 沿岸技術ライブラリー, No.47, 2017.
- 8) 小林英男: 破壊力学入門 5.線形弾性破壊じん性, 材料, vol.32, No.363, pp.118-123, 1983., (2017.2.2 受付)

## EFFECTS OF MIXING RATIO ON UNCONFINED COMPRESSIVE BEHAVIOR OF FIBER REINFORCED MIXTURE OF SOIL AND STEELMAKING SLAG

Tomokazu YANAGIBASHI, Yuichi TANAKA, Ayato TSUTSUMI  
Satoshi MATSUMURA, Takaaki MIZUTANI and Yoshiyuki MORIKAWA

Fiber-Reinforced Mixture of Dredged soil and Steelmaking slag (FRMDS) has been developed as, for example, an impervious material used to fill waste reclamation sites in Japanese coastal areas. Recent studies have revealed that the mixed fiber resulted in higher deformability of FRMDS.

The principal goal of this study is to reveal deformation characteristics of FRMDS and possible factors to influence them. The authors conducted the unconfined compression tests (UCT) of FRMDS to evaluate effects of mixing ratio between fiber and steelmaking slag on the deformation characteristics. The results of stress-strain behavior and visual observation during UCT indicates a failure mode of FRMDS can be categorized into four different types depending on the mixing ratio and curing period; I. Brittle Failure Type, II. Stable Failure Type, III. Ductile Failure Type and IV. Strain Hardening Type. In other words, the deformation characteristics of FRMDS are expected to be predicted by properly controlling the mixing ratio and curing period. The paper describes a schematic diagram of the failure mode partitioned based on the mixing ratio.