

カキ殻破砕材と短繊維を利用した高機能地盤材料の開発

石川工業高等専門学校 重松 宏明

1. はじめに

近年の社会情勢に目を向けると、廃棄物処理法の改正（1992）から30年以上が経過し、建設事業における各種廃棄物の有効活用が徐々に広がりを見せている。石川県能登半島沿岸域は日本海側有数の養殖カキの産地で毎年3000トン以上のカキ殻を排出している。剥き身後のカキ殻は県内のリサイクルセンターに設けられたヤードに野積みされ、殻に付着した藻やゴミを取り除くため、2～3年の間、雨や天日に曝す。また同県では古くから繊維産業が盛んで、ナイロンやポリエステルなどの合繊長繊維織物の製造過程で出てきた「繊維くず」が毎年大量に排出されている。

土質改良の考え方の1つに、土以外の材料を組み合わせることで「対象となる土」の特性を改善させる方法がある。例えば、粘性土のような細粒土に硬質な破砕材を混ぜ合わせて締固めた土は、土粒子と破砕材の噛み合わせ効果（インターロッキング効果）によって土の摩擦抵抗が増大し、せん断強度は上昇する。また、砂質土のような粗粒土に繊維くずを混入させた場合は、繊維と土粒子もしくは繊維同士が複雑に絡み合っただけで土そのものに引張力が生じ、その結果、土に粘り強さ（靱性）や耐浸食性が加わる。このように、そのままの状態では土工材料として使用できない不良土に対して、材料特有の特性を利用することは、新たに地盤材料としての力学的な素材を加えることを意味する。これは今後、土の力学的な向上を図る上で非常に重要になってくる。

本研究においては、現地発生土を模擬した粘性土と砂質土に対して、粘性土にカキ殻破砕材、砂質土には短繊維を適量混ぜ合わせて汎用性の高い、次世代型地盤材料（高機能地盤材料）の開発を目指す。そのために、粘性土にカキ殻破砕材を混ぜ

合わせた混合土（以後「カキ殻混合土」と呼ぶ）と砂質土に短繊維を添加させた混合土（以後「短繊維混合補強土」と呼ぶ）に対して、圧密排水三軸圧縮（CD）試験¹⁾を行った。これらの実験結果から、幅広い応力領域におけるカキ殻混合土と短繊維混合補強土の力学特性（せん断強度、ダイレイタンス）を検証した。

2. 実験の概要

(1) 使用材料

本研究で使用するカキ殻は、石川県七尾市中島町のリサイクルセンターで3年近く天日や雨に曝されたものである。採取したカキ殻を洗浄して乾燥させた後、ランマーで粉砕し、これらをさらに4.75mmふるいで通過させたものをカキ殻破砕材（Crushed Oyster Shell）とした。一方、短繊維（Short-Fiber）は、石川県内の繊維会社から毎年大量に排出される長さ10～20mm程度のポリエステルの繊維くずである。

処理対象土には、現場発生土を模擬した2種類の土質材料を用意した。1つは石川県河北郡津幡町太田地区で採取した砂質土（以後「太田土」と呼ぶ）で、他の1つは市販のパウダー状の粘性土（以後「青粘土」と呼ぶ）を用いた。太田土は2mm以下にふるい分けしたものを、青粘土は0.425mm以下にふるい分けしたものを実験試料とした。表-1に各処理対象土の物理特性を示す。

(2) 供試体の作製および実験方法

カキ殻混合土もしくは短繊維混合補強土の供試体の乾燥密度と含水比は、それぞれの最大乾燥密度 ρ_{dmax} と最適含水比 w_{opt} をベースに設定した。各 ρ_{dmax} に対して、締固め度95%（ $=0.95\rho_{dmax}$ ）になるように各材料（土質材料+カキ殻破砕材 or 短繊維

維)の質量調整を行い、含水比は土試料全体がそれぞれの w_{opt} と同じ値になるように加える脱気水の量を調整した。

三軸圧縮試験用供試体(直径:50mm,高さ:約100mm)の作製および実験方法を図-1(注:図は短繊維混合補強土を対象にした場合である)に示す。先ず、太田土もしくは青粘土に、それぞれの w_{opt} に相当する量の脱気水を加えてよく練り混ぜ、所定量のカキ殻破砕材もしくは短繊維を混入して土試料全体が均一になるようによく混ぜ合わせた。その後、土試料を円筒形のモールドに詰め、静的に締固めて供試体を作製した。脱型後は供試体の高ささと直径、質量を測定し、速やかにメンブレンを装着して三軸試験装置にセットした。三軸セル内の応力状態を表-2 にまとめる。過圧密比は先行圧密応力 $p_0' = 1600 \text{ kN/m}^2$ をベースにして OCR=16, 4, 2 の3種類に設定した。

3. 実験結果および考察

(1) カキ殻混合土の排水せん断挙動

図-2~4 にそれぞれ過圧密比 16, 4, 2 におけるカキ殻混合土(Oy-20)のCD試験の結果を示す。図中には比較のため、粘性土のみ(Clay-100)と砂混合土(S-20)の結果も併記した。ただし、カキ殻破砕材および砂の混合率は、すべての過圧密比において20%に固定した。(a)に軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係、(b)に体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_a の関係を表す。

先ず、図-2(a)~4(a)の軸差応力と軸ひずみの関係を見てみると、拘束圧(圧密応力 σ_c')の増加に伴って軸差応力が上昇していることが確認できる。そして、図-2の重過圧密領域に位置する過圧密比16の結果に注目すると、カキ殻混合土・砂混合土・粘性土のみの3者は、それぞれ類似した挙動を示している。体積ひずみと軸ひずみの関係から、カキ殻破砕材もしくは砂を混入させた方が正のダイレイタンスーが抑えられ、軸差応力が大きくなることが理解できる。

表-1 処理対象土の物理特性

処理対象土	太田土 (砂質土)	青粘土 (粘性土)
土粒子の密度 ρ_s (Mg/m ³)	2.629	2.753
砂分 (%)	62.8	14.0
シルト分 (%)	26.4	50.4
粘土分 (%)	10.8	35.6
液性限界 w_L (%)	30.7	43.1
塑性限界 w_p (%)	NP	22.7
塑性指数 I_p	—	20.4
分類記号	SCs	CL-S
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (Mg/m ³)	1.698	1.673
最適含水比 w_{opt} (%)	15.3	18.7

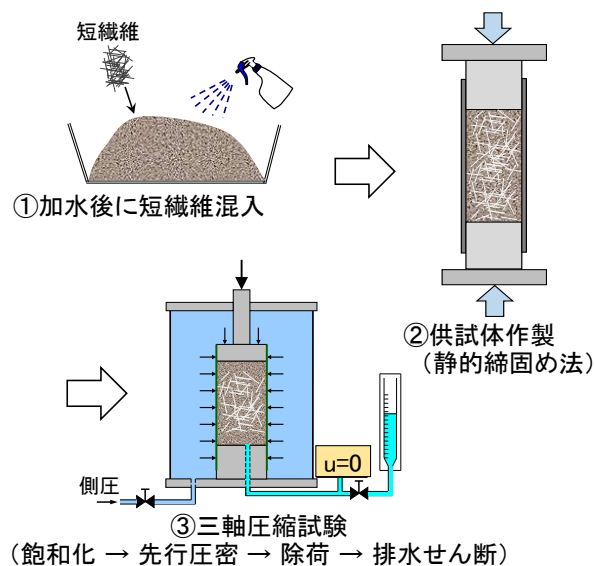
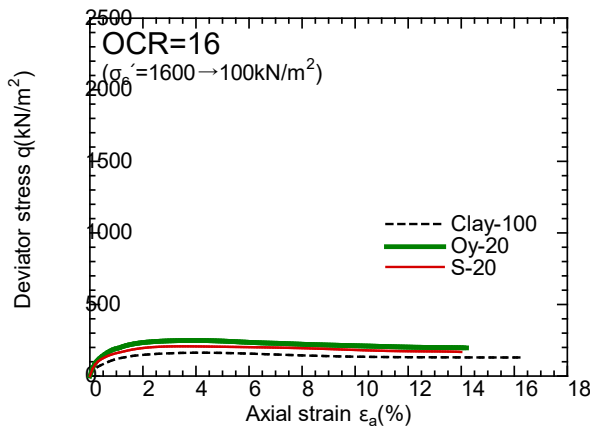


図-1 供試体の作製から三軸圧縮試験までの流れ

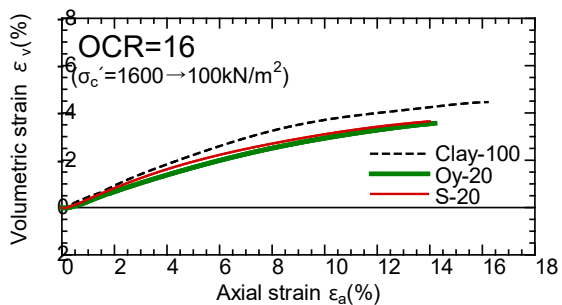
表-2 三軸セル内の応力状態

	σ_c' (kN/m ²)	C.P. (kN/m ²)	B.P. (kN/m ²)	OCR
飽和化	100	2000	1900	—
先行圧密	1600	2400	800	—
除荷	1600→100	2400→900	800	16
	1600→400	2400→1200		4
	1600→800	2400→1600		2

次に、重過圧密領域と軽過圧密領域の境界近くに位置する過圧密比4の図-3を見てみると、ダイレイタンスー特性に大きな違いが認められる。カキ殻混合土はせん断の進行に伴って負のダイレイタンスー(せん断収縮)が発生していることが分

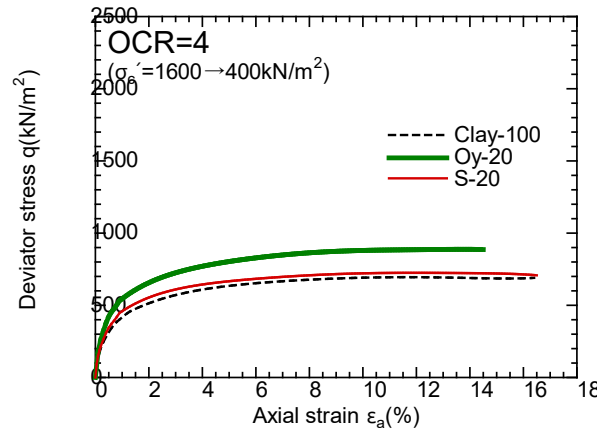


(a) 軸差応力と軸ひずみの関係

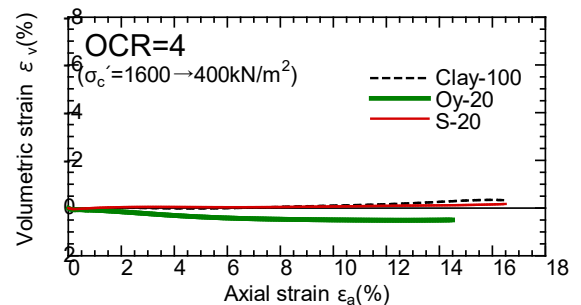


(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-2 CD 試験の結果 (過圧密比 16)



(a) 軸差応力と軸ひずみの関係



(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

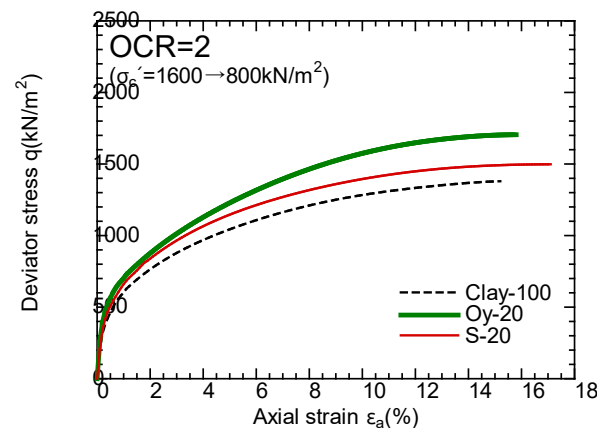
図-3 CD 試験の結果 (過圧密比 4)

かる。一方、砂混合土と粘性土のみを見ると、ダイレイタンシーが全く現れず、せん断が進行しても体積変化が全く生じていない。砂混合土と粘性土のみ場合においては、過圧密比 4 が重過圧密と軽過圧密領域の境界であると判断できる。

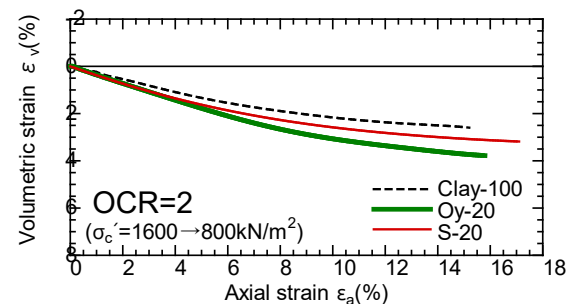
最後に、軽過圧密領域に位置する過圧密比 2 の CD せん断挙動について考察する。図-4 を見てみると、これまでと同様、軸差応力はカキ殻混合土・砂混合土・粘性土のみの順に大きくなっている。また重過圧密領域とは異なり、3 者ともに明瞭なピーク点が認められない。体積ひずみ-軸ひずみ関係に注目すると、せん断の進行に伴って負のダイレイタンシーが顕著に表れている。負のダイレイタンシーによるせん断収縮は、カキ殻混合土が他の 2 者よりも大きく、これが軸差応力の増大にも繋がったと判断できる。

(2) 短繊維混合補強土の排水せん断挙動

図-5~7 は過圧密比 16, 4, 2 における短繊維混

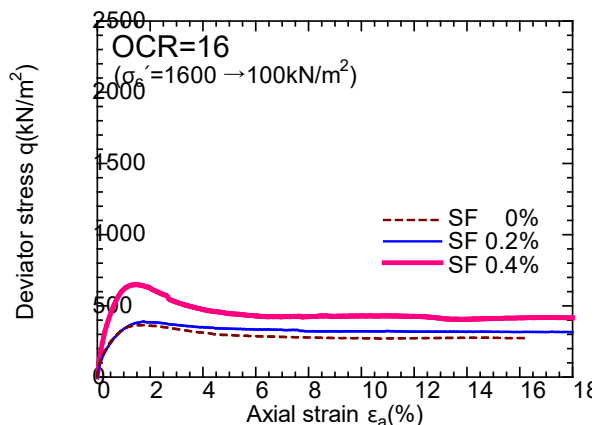


(a) 軸差応力と軸ひずみの関係

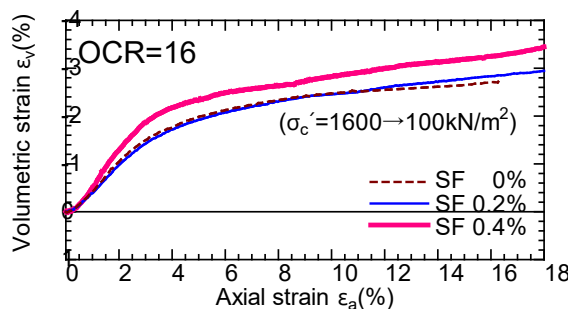


(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-4 CD 試験の結果 (過圧密比 2)



(a) 軸差応力と軸ひずみの関係



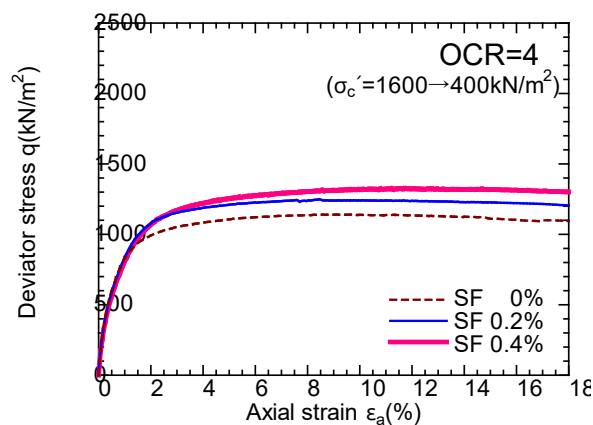
(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-5 CD 試験の結果 (過圧密比 16)

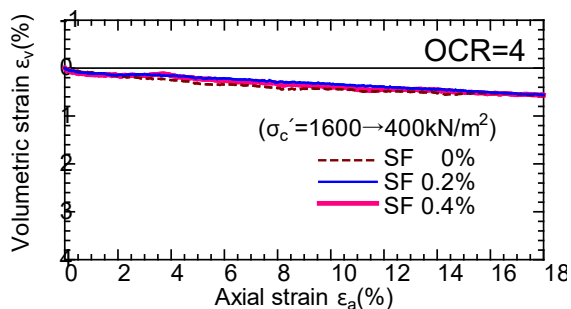
合率 0.4% (SF 0.4%) , 0.2% (SF 0.2%) , 短繊維未混入 (SF 0%) の CD 試験の結果を示す. (a)に軸差応力 q と軸ひずみ ϵ_a の関係, (b)に体積ひずみ ϵ_v と軸ひずみ ϵ_a の関係を表す.

まず, 重過圧密領域に位置する過圧密比 16 を示す結果 (図-5) を見てみると, 短繊維混合率 0%, 0.2%, 0.4% と, 短繊維の増加に伴って軸差応力は増大している. 特に SF=0.4% においては, ピーク点を過ぎてからのひずみ軟化が顕著に表れ, 非常に脆性的 (brittle) な挙動を示していることが分かる. この大きなひずみ軟化は, 当初期待していた短繊維の破壊に対する抵抗性 (靱性, タフネス) が全く表れていないことを意味する. また, 正のダイレイタンス (せん断膨張) が顕著に表れ, せん断の進行に伴って供試体が大きく膨張していく様子が確認できる. しかもこのせん断膨張は軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ を過ぎても一向に収束する気配がない.

次に, 重過圧密領域と軽過圧密領域の境界付近に位置する過圧密比 4 の結果 (図-6) を見ると,

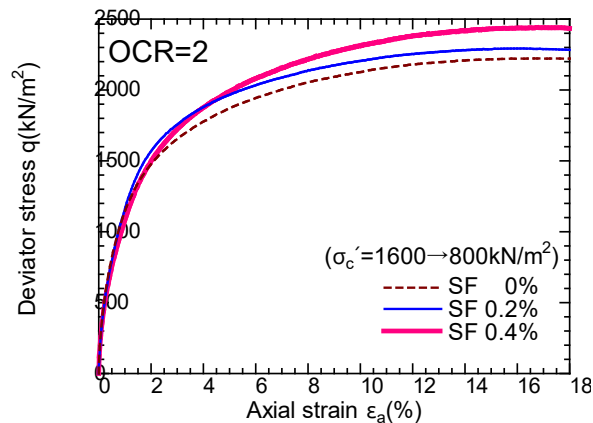


(a) 軸差応力と軸ひずみの関係

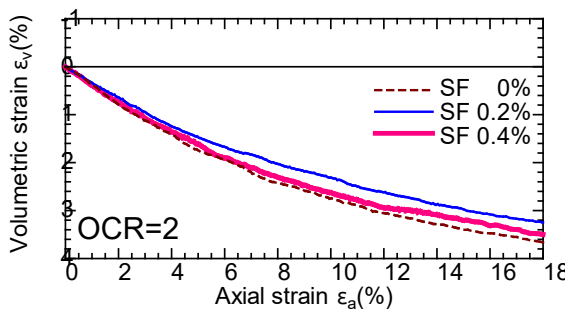


(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-6 CD 試験の結果 (過圧密比 4)



(a) 軸差応力と軸ひずみの関係



(b) 体積ひずみと軸ひずみの関係

図-7 CD 試験の結果 (過圧密比 2)

重過圧密領域と同様、短繊維の増加に伴って軸差応力の上昇が認められる。しかしながら、その上昇割合は OCR=16 と比べると大きく低下している。体積ひずみに注目すると、3 者ともに緩やかなせん断収縮、つまり負のダイレイタンスを発生している。

最後に軽過圧密領域に位置する OCR=2 の結果 (図-7) を見てみると、僅かではあるが、短繊維混合率の増加に伴う強度発現効果が認められる。ただし、明瞭なピーク点は認められない。また、せん断の進行に伴って著しい負のダイレイタンス (せん断収縮) が発生し、軸ひずみ $\epsilon_a=15\%$ を過ぎても収束する気配を見せない。

4. 結言

本研究で得られた主な知見を以下にまとめる。

- 1) カキ殻混合土の CD 試験の結果から、重過圧密領域において、カキ殻破砕材はせん断膨張を抑制する効果がある。このことがカキ殻混合土の軸差応力やせん断強度の増大に繋がった大きな要因の 1 つと考えられる。また軽過圧密領域

においては、せん断収縮に伴って軸差応力は上昇し、軸ひずみ 15% を過ぎても、ひずみ硬化挙動が続いた。

- 2) 短繊維混合補強土の CD 試験の結果から、重過圧密領域において、短繊維混入による強度発現効果は得られたが、ひずみ軟化が顕著に表れ、非常に脆性的な挙動を示した。また軽過圧密領域においては、短繊維混合率の増加に伴う強度発現効果は認められ、せん断収縮に伴ってひずみ硬化挙動が続いた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、一般社団法人北陸地域づくり協会の第 31 回「北陸地域の活性化」に関する研究助成事業の助成を受けました。末筆ながら、記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 重松宏明, 吉田千倅: 短繊維混合補強土の排水せん断挙動に関する実験的研究, 第 16 回環境地盤工学シンポジウム論文集, 171-176, 2025.