

河川堤防の浸透対策ための透気性と防水性を有した短繊維混合土の開発

Development of air-permeable water-proof soil mixed with short fiber for countermeasure against seepage failure of river dike

岐阜大学工学部 教授 神谷浩二

(研究計画ないし研究手法の概略)

1. まえがき

土のせん断強度を高めるなどのため土に短繊維を混合する工法(短繊維混合補強土工法)がある¹⁾。従来、短繊維の径や長さ、土質材料との混合比などを要因としたときの短繊維混合土の浸透特性や強度特性への影響が評価されてきた^{2), 3)}。本研究は、融点の異なる材質の鞘芯構造の極小な熱融着短繊維(以下、単に短繊維と呼ぶ)を土質材料に混合することによって防水性と透気性をもつ混合土を開発して、河川堤防の浸透対策工への適用を究明するものである。短繊維を土質材料に混合したものを加熱することによって短繊維の鞘部のみが相互に熱融着して、短繊維が土粒子を捕捉するような構造の形成が予想され、その混合土の強度増加等が期待される。本報告では、短繊維の機能である熱融着性・撥水性・熱収縮性に着目して、短繊維混合土の透水・透気・保水の浸透特性、強度特性を基礎的に分析するとともに、堤体表面に短繊維混合土を設置した模型地盤への越流実験に基づいて主に流水に対する侵食抵抗を検証した。

2. 熱融着短繊維混合土の浸透特性と強度特性の分析

2.1 短繊維の特徴

用いた短繊維は、極細オレフィン複合繊維(宇部エクシモ(株)製品)である。図1や写真1に示すように、短繊維は鞘芯構造を有し、鞘部の材質はPE(ポリエチレン)であり芯部の材質はPP(ポリプロピレン)である。芯部に比べると鞘部の融点が高いため、短繊維に所定の温度による熱を与えたとき鞘部のみが溶解・接着する特徴がある。そのため、土試料に短繊維を混合した供試体に熱を与えたとき、熱融着した短繊維が土粒子を捕捉するような構造になることが想像される。また、短繊維は熱の負荷によって収縮(収縮率で数%程度)するため、熱融着に伴い混合土供試体の体積が減少する可能性がある。短繊維の鞘芯比率(鞘部と芯部の断面積の比率)は1:1であり、維度は0.3dTex(1万m当たりの質量(g)),長さは3mmである。一方で、短繊維は撥水性を有している。

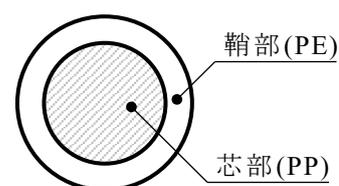


図1 短繊維の構造



写真1 短繊維

2.2 混合土供試体の作製

蒸留水に短繊維を混合したものを攪拌機(攪拌翼はディスパ)によって分散させ、それを炉乾燥した土試料に一様に混合させる。その湿潤状態の混合土を円筒容器に所定の乾燥密

度(土試料部分のみの乾燥密度 ρ_d (g/cm³))になるように充填した後、105℃、24 時間で炉乾燥させる。そして、炉乾燥後のその円筒容器を 120℃のオーブンレンジで 90 分間加熱することによって短繊維の鞘部のみを熱融着させ、混合土供試体を作製した(写真 2 参照)。なお、写真 3 は、デジタル顕微鏡を用いて混合土供試体を観察した様子を示したものであるが、短繊維同士の熱融着に伴って複数の土粒子が捕捉されていることが認められる。



写真 2 混合土供試体

2.3 短繊維混合土の浸透特性・強度特性に関する試験

混合土の土試料には、珪砂 7 号(50%粒径 $D_{50} = 0.187\text{mm}$ 、均等係数 $U_c = 1.8$)を用いた。短繊維の自然乾燥状態での質量を F (g)、土試料の炉乾燥状態での質量を S (g)として、その混合比 $F/S = 0.005, 0.01, 0.02, 0.03$ の 4 通りの供試体を作製した。また、短繊維を混合していないもの($F/S = 0$ に相当)も用意した。



写真 3 混合土供試体の顕微鏡観察

浸透特性の分析では、乾燥状態の混合土供試体の透気係数 k_a (m/s)を求めるための透気試験、飽和状態の混合土供試体の透水係数 k_w (m/s)を求めるための透水試験、水分特性曲線を求めるための保水性試験をそれぞれ実施した。透気・透水試験と保水性試験では、直径 60mm、高さ 30mm の円柱体の混合土供試体(上述の写真 2 参照)を作製して、また、土試料部分のみの乾燥密度が $\rho_d = 1.408\text{g/cm}^3$ と(相対密度 $D_r = 70\%$)なるようにした。透気試験では、オーブン加熱後に室温に戻した状態の混合土供試体(写真 4 に透気試験の供試体部を示す)に対して、所定の空気圧力水頭差を与えたときの透過空気流量を測定して、空気圧力水頭差と空気流量の関係を用いてダルシー則に従って透気係数を求めた。透気試験終了後には、混合土供試体を浸水飽和させた後、その供試体に所定の全水頭差を与えて透水させたときの透水流量を測定する透水試験を実施して、ダルシー則に従って透水係数を求めた。更に、透水試験終了後に混合土供試体を保水性試験装置に静かに移設させ、水頭法⁴⁾によって排水過程での保水性試験を実施し、水分特性曲線を求めた。

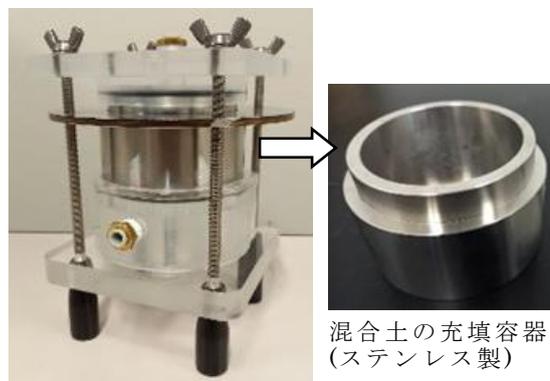


写真 4 透気試験・透水試験における混合土供試体部

強度特性の分析では、乾燥状態の混合土供試体に対して一軸圧縮試験を実施して、圧縮応力 σ (kN/m²)と圧縮ひずみ ε (%)の関係を調べた。そして、一軸圧縮強さ q_u (kN/m²)と破壊ひずみ ε_f (%)をそれぞれ求めた。混合土供試体は直径 50mm、高さ 100mm の円柱体(写真 5 参照)であり、土試料部分のみの乾燥密度が $\rho_d = 1.408\text{g/cm}^3$ (相対密度 $D_r = 70\%$)となるように作製した。そして、毎分 1%の圧縮ひずみが生じる割合の載荷速度で混合土供試体



写真 5 混合土供試体(一軸圧縮試験)

を圧縮させた。なお、短繊維を混合しない場合には供試体の作製が困難であったため、 $F/S = 0$ のときの一軸圧縮試験を実施していない。

3. 短繊維混合土を用いた堤体模型地盤の越流実験

図 2 に示すように、河川堤防の堤体を模擬して、その堤体表面に短繊維混合土を敷設した模型地盤に越流させる実験を実施した。幅(奥行)が 15cm の水槽内に高さ 14cm、天端幅 10cm 程度、1.5 割勾配のり面を有する盛土(堤体)を上述の硅砂 7 号を用いて作製した。そして、のり先付近から天端に至るまでの盛土全体を、硅砂と短繊維の混合土供試体(厚さ 1cm で熱融着させたもの)で被覆した。なお、被覆した混合土供試体は $F/S = 0.01$ によって作製したものである。次に、盛土の片側に水道水を供給して湛水させ、越流水深が 1cm 程度に保った状態で盛土に越流させ、盛土表面の変状等を観察した。

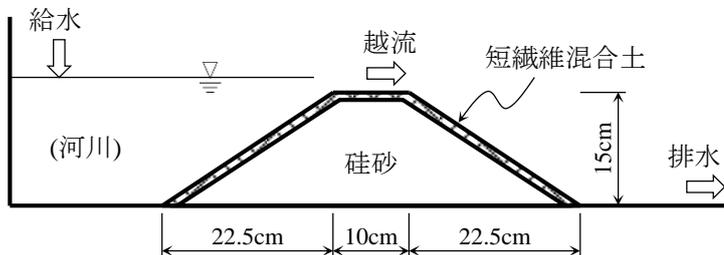


図 2 短繊維混合土を敷設した模型地盤の越流実験

(実験調査によって得られた新しい知見)

4. 短繊維混合土の浸透特性・強度特性

4.1 透気係数と透水係数

図 3 は、混合比 F/S の値に対して、混合土供試体が乾燥状態での透気係数 k_a の値、飽和状態での透水係数 k_w の値をそれぞれ示したものであり、短繊維を混合していない場合の供試体の両者の値を $F/S = 0$ に対して併記した。短繊維を混合していない場合に比べると、混合土供試体の透気係数は大きくなる傾向にあり、 F/S 値が 0.005 や 0.01 のときが顕著であり 1.5 倍ほどの大きさになる。一方、透水係数は F/S の大きさによって同程度あるいは若干小さくなる傾向にある。

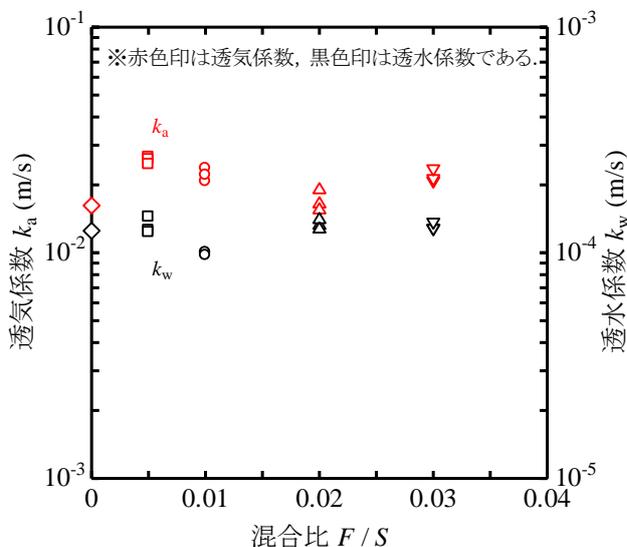


図 3 混合比と透気係数・透水係数

4.2 水分特性曲線

図 4 は、体積含水率 θ と圧力水頭 $|h_p|$ (m) の関係による水分特性曲線を示したものである。短繊維を混合していない場合に比べると、混合土供試体での水分特性曲線は下方に位置するように描かれ、中間的な大きさで同じ θ のときの $|h_p|$ の値は 2~3 割程度小さく、保水性が低下することが認められる。

4.3 短繊維の混合による土構造への影響

上述したように、短繊維の混合によって、透気性が高くなる一方で透水性が低めになり、また保水性も低下するという特徴が明らかになった。熱融着した混合土供試体を観察すると、写真 6 のような複数の凝集体で供試体が形成されていることが確認された。 $F/S = 0.005$

の場合では短繊維によって複数の土粒子が捕捉されていて脆弱な凝集体が形成され、 $F/S=0.03$ の場合ではそれが全体的に発達した強固な凝集体が形成され、両者とも粗な間隙部分の形成が認められた。即ち、短繊維の混合量によって、混合土供試体の土の骨格構造が異なることが考えられる。短繊維混合・熱融着によって土粒子間の間隙が大きくなるため混合土供試体の透気係数が混合していない場合のものに比べて大きくなるのではないかと想像される。一方で、短繊維の撥水性に起因して短繊維周囲で透水部分の間隙が狭くなるなどして透水に対して抵抗するため、土粒子間隙が大きくなったにも拘らず、透水係数が透気係数のように大きくなり難いことが考えられる。また、保水性の低下は、間隙の大きさに加えて撥水性が影響しているとみられる。

4.4 一軸圧縮強さと破壊ひずみ

図5は、圧縮ひずみ ε と圧縮応力 σ の関係を示したものである。そして、図5の関係に基づき一軸圧縮強さ q_f と破壊ひずみ ε_f をそれぞれ求め、これらの値を混合比 F/S に対して示したものが図6である。

F/S 値が大きくなるに伴い、一軸圧縮強さは比例して大きくなる傾向にあり、その一方で、圧縮ひずみは $F/S = 0.02$ のときまで増加した後に横ばいに変化する傾向にある。写真6で上述したように、短繊維混合・熱融着によって凝集体が形成され F/S の増加によって凝集体が全体的に発達するため、 F/S 値の増加によって一軸圧縮強さと圧縮

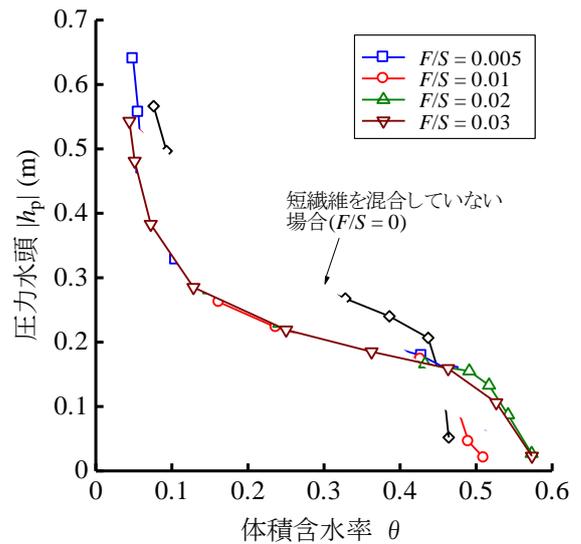


図4 混合比による水分特性曲線



写真6 混合比による混合土供試体の様子

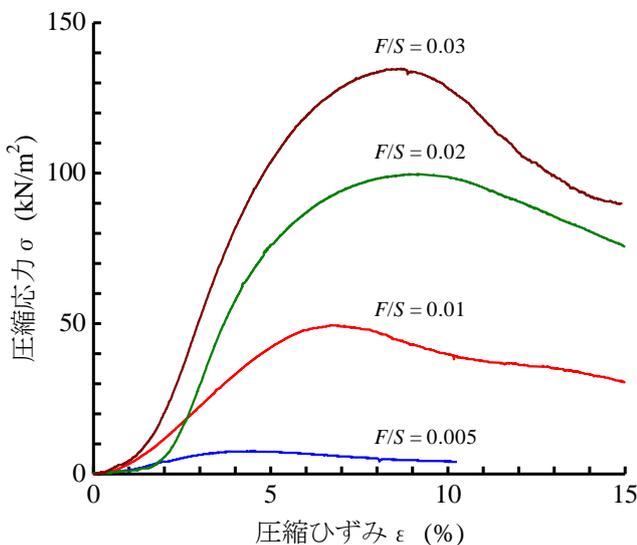


図5 混合比による応力-ひずみ曲線

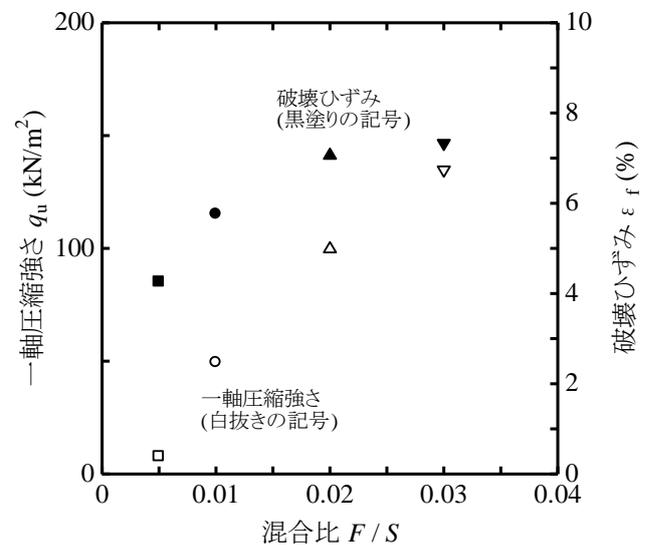


図6 混合比と一軸圧縮強さ・破壊ひずみ

ひずみが大きくなるのではないかと考えられる。

5. 堤体の越流に対する侵食抵抗

写真7は、越流時の河川堤防の模型地盤の様子を示したものである。ところで、裏のり面の短繊維混合土上における水深 $h_0 = 0.5\text{cm}$ 程度であった。このとき、短繊維

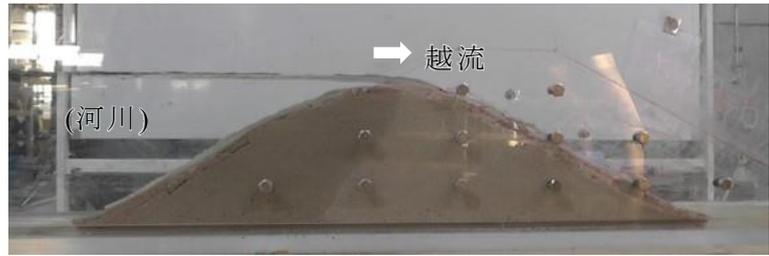


写真7 模型地盤の越流実験の様子

混合土表面に作用する掃流力 τ_0 (kN/m^2)を試算すると、 $\tau_0 = \gamma_w h_0 \sin\alpha = 0.03\text{kN/m}^2$ である(γ_w (kN/m^3)は水の単位体積重量、 α ($^\circ$)は裏のり面の傾斜角である。試算では、 $\gamma_w = 9.80\text{kN/m}^3$ 、 $\alpha = 38.2^\circ$ を代入)。さて、写真7に示したように、短繊維混合土の敷設によって、特に裏のり面での越流による侵食等の変状は認められず、掃流力の規模との関係で検討する必要はあるが盛土の侵食を防止できる可能性が示唆される。

6. あとがき

本研究では、まず、熱融着性の短繊維を混合した砂質土の浸透・強度特性について基本的に分析した結果、短繊維の混合によって、透気性が高くなる一方で、透水性と保水性が低下するという特徴を得た。これらは、短繊維の撥水性などの特性に起因しているのではないかと推察された。一軸圧縮強さや破壊ひずみは、短繊維混合比 F/S の増加によって短繊維の混合・熱融着によって形成される凝集体がより強固になるため、増大する傾向にあることが考えられた。そして、短繊維混合土を用いた堤体模型地盤の越流実験によって、越流に対する侵食抵抗を示す傾向が得られた。今後、河川堤防の浸透対策工への適用を究明するため、短繊維の長さ等の特性による影響も分析しつつ短繊維混合土の開発を引き続き検討する予定である。

【参考文献】 1)三木博史，藤井厚企，小畑敏子，藤木広一，加津憲章，増井 仁：短繊維混合補強土の特性と現場適用事例，ジオシンセティックス論文集，Vol.13，pp.337-345，1998。 2)増山博之，齋藤由紀子，石原雅規，佐々木哲也，森啓年：短繊維混合補強土の耐侵食性と植生への適用性に関する実験的研究，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol65，No4，pp. I_1129-I_1134，2012。 3)古賀新太郎，佐藤研一，藤川拓郎，古賀千佳嗣：短繊維混合処理土の強度・変形特性に及ぼす繊維長の影響，ジオシンセティックス論文集，Vol.30，pp.105-110，2015。 4)地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説(二分冊の1)，丸善，pp.162-176，2009。

(発 表 論 文)

神谷浩二，小川善也：熱融着短繊維を混合した砂質土の浸透特性，令和2年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，III-04，2021。