

短繊維混合補強土の強度特性と侵食防止効果

土橋聖賢・平野孝行

1. はじめに

短繊維混合補強土（写真-1）は、土または安定処理土にポリエステル等の短繊維（写真-2）を0.1%から数%混合して降雨・流水に対する侵食防止性能や、すべり破壊などに対する強度・靱性（ねばり強さ）の向上を図るものである。この短繊維混合土を用いた短繊維混合補強土工法を適用すればガリ侵食等による崩壊抑制や耐震性能を向上できると考えられ、堤防裏法面、道路等法面の被覆材、多自然型法面の基盤構築、土構造物補強などの面で有効利用が出来るかと期待されている。

（一財）土木研究センターに設置されたHGS（High Grade Soil）研究コンソーシアムの短繊維混合補強土部会では本工法の普及促進を図るべく、建設発生土の高度な有効利用と経済性の追求を目指した活動を続けており、その一環としての調査研究成果については、土木学会などの場で報告²⁾を行ってきた。

文献1)、3)では、固化材を用いた場合の侵食防止性能や強度特性の向上が確認できたことから、本報告では、固化材を用いない場合の短繊維混合補強土の品質管理に関する強度特性と、侵食防止効果について紹介する。



写真-1 短繊維混合補強土

写真-2 短繊維

2. 試験概要

2.1 使用材料

(1) 原料土

試験には、江戸崎産細粒分まじり砂と香取産細粒分質砂を使用した。原料土の物理特性を表-1に、粒

径加積曲線を図-1に、締固め試験結果を図-2に示す。

(2) 使用繊維

使用繊維は、単糸繊維径39 μ mと34 μ mの二種類のポリエステル繊維を使用した。

表-1 地盤の物理特性

土質名 試料番号	細粒分まじり砂			細粒分質砂	
	a	b	c	d	e
土粒子の密度 g/cm ³	2.723	2.739	2.843	2.790	2.894
粒度	最大粒径 mm	4.75	4.75	4.75	4.75
	礫分 %	1.5	1.0	0.1	0.2
	砂分 %	89.8	89.4	91.9	72.7
	シルト分 %	5.3	5.2	4.7	14.3
	粘土分 %	3.4	4.4	3.3	12.8
締固め	最大乾燥密度 g/cm ³	1.653	1.544	1.616	1.544
	最適含水比 %	16.6	21.0	19.2	26.1

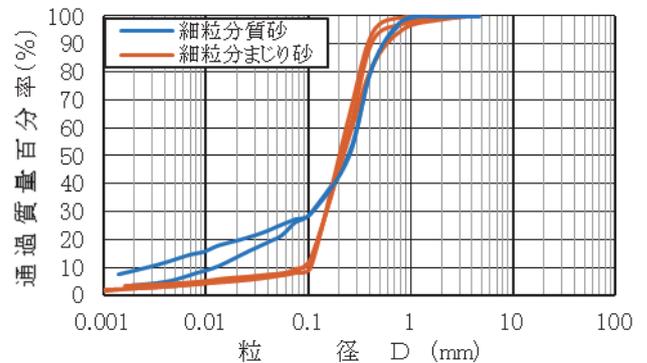


図-1 原料土の粒径加積曲線

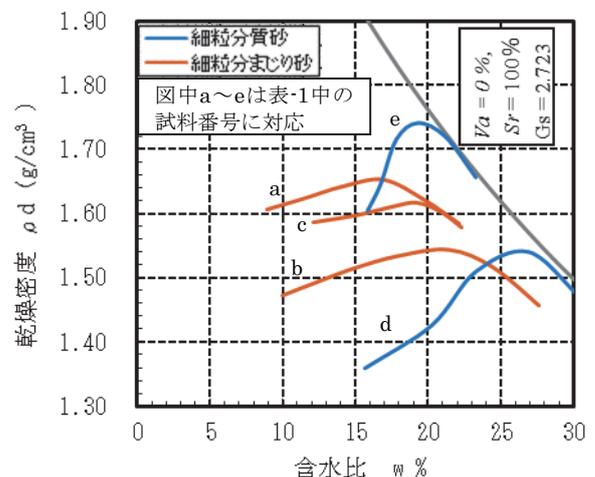


図-2 原料土の締固め試験結果

2.2 強度特性試験結果

(1) 一軸圧縮強さに与える繊維太さの影響

今回の実験では、使用実績・試験データの蓄積が多い径 $39\mu\text{m}$ の繊維が製造中止になったため、径 $34\mu\text{m}$ の繊維を用いることとし、それぞれの繊維を用いることにより短繊維混合補強土の強度に違いが出るかどうかを確認することとした。

確認試験は表-1に示す細粒分まじり砂bを用い、一軸圧縮試験 (JIS A 1216) により評価した。試験体は使用する繊維長 60mm を考慮して $\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$ の円柱供試体である。図-2に示す締固め試験結果を基に、繊維長さ 20mm 、 40mm 、 60mm に対して、それぞれ混入率 (原料土の乾燥重量に対する比率) 0.1% 、 0.2% 、 0.4% 、 0.8% の4水準の組み合わせとなるよう最適含水比で所定の締固め度 (85% 、 90% 、 95%) に突き固めた。

図-3に繊維長 40mm 、混入率 0.1% の場合の応力～ひずみ曲線を、図-4に繊維長毎の一軸圧縮強さと繊維混入率との関係を示す。

これらより、繊維径が変わっても、以下のように強度に影響する補強効果などの相対的な比較は、繊維太さ $34\mu\text{m}$ と $39\mu\text{m}$ とでほぼ同等と判断できる。

- ① 繊維太さ $34\mu\text{m}$ と $39\mu\text{m}$ とでは、初期の弾性領域における立ち上がり傾向や、ピーク後の軟化傾向も含めて応力～ひずみ曲線の傾向に大きな差異は認められない (図-3)。
- ② 締固め度に係らず繊維混入率の増加と共に一軸圧縮強さも大きくなるが、繊維太さの違いにより若干の差異が生じている (図-4)。

(2) 締固め特性

施工管理における品質確認の一環として締固め特

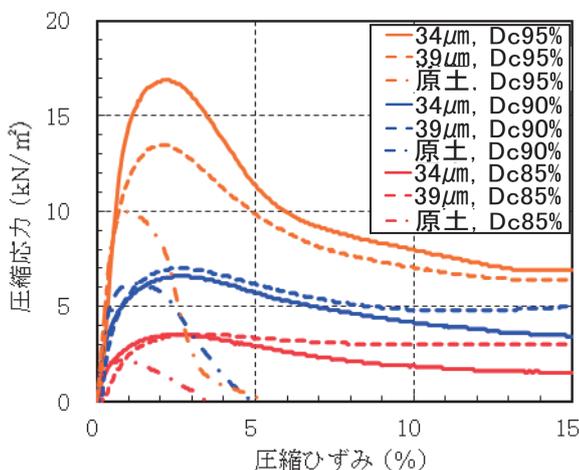


図-3 一軸圧縮試験の応力～ひずみ曲線 (繊維長 40mm 、混入率 0.1%)

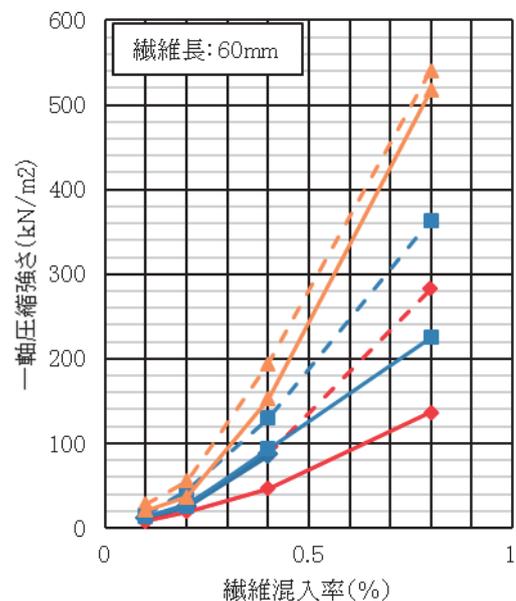
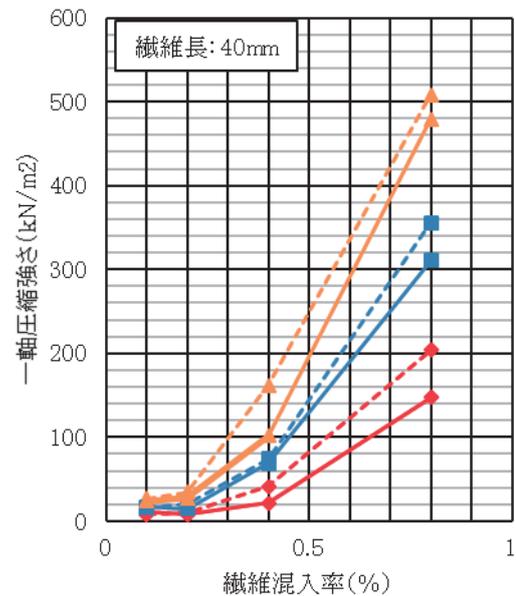
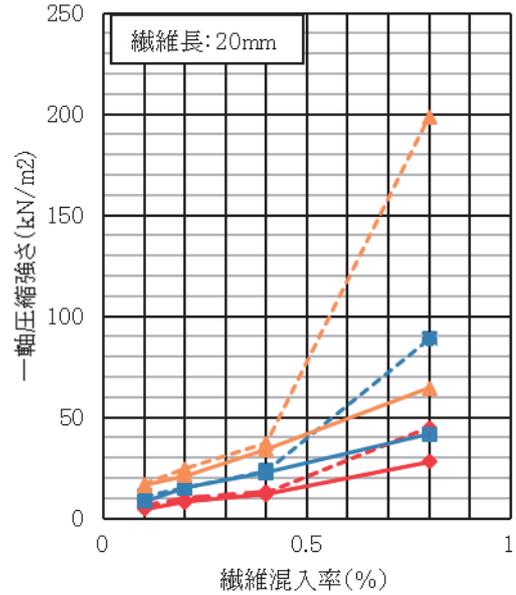


図-4 繊維混入率と一軸圧縮強さ

土研センター

性は重要な役割を担う。繊維混入が締固め度に大きく影響すれば、原料土のみの締固め試験では誤った品質管理を行うため、過去の実験結果も踏まえ、繊維混入が締固め特性に与える影響を確認した。

締固め試験には、表-1に示す細粒分まじり砂cと細粒分質砂eを使用した。使用繊維はポリエステル繊維で繊維径34 μ m、長さ40mmである。

図-5、図-6に締固め試験結果を、図-7、図-8には文献4)、5)からのデータも加えた最大乾燥密度並びに最適含水比と繊維混入率との関係を示す。

図-5、図-6に示すように、細粒分まじり砂、細粒分質砂ともに、短繊維混合補強土と原料土の含水比～乾燥密度曲線は相似である。原料土とする短繊維混合補強土の品質管理に関しては、原料土の締固め曲線を使用しても問題ないと考えられる。

一方、図-8に記載の関東ロームについて原料土と繊維混合補強土を比較すると、最大乾燥密度について1.2倍、最適含水比について0.7倍と大きく差がある。このことは、関東ロームのような粘性土に短繊維混合を行う場合の管理値は、原料土だけではなく短繊維混

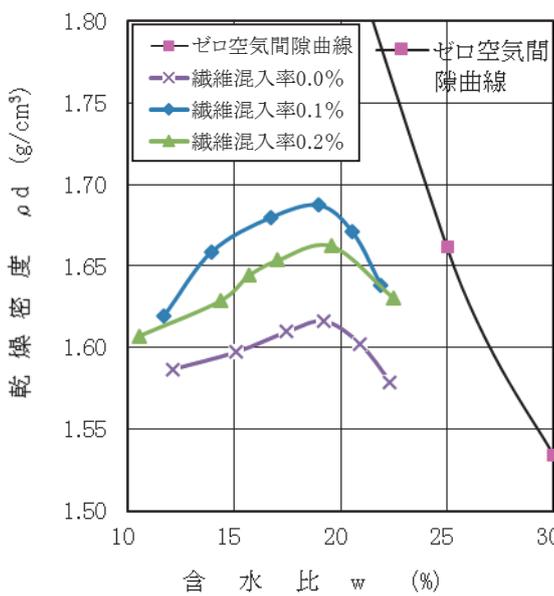


図-5 細粒分まじり砂cの締固め試験結果

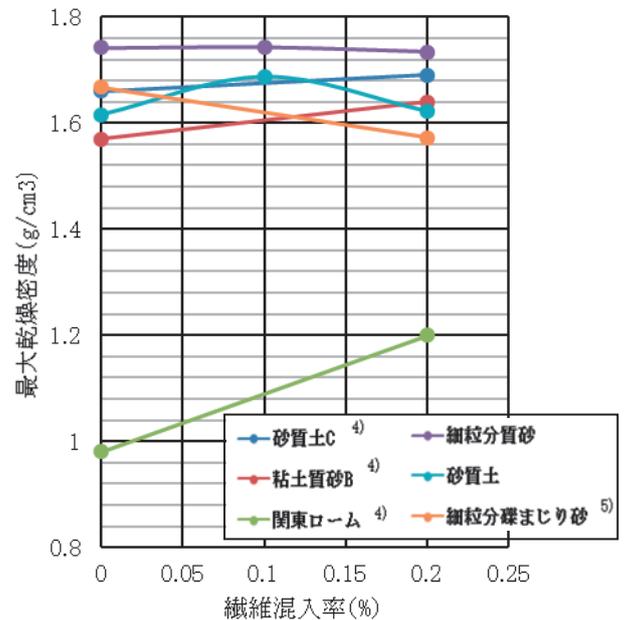


図-7 最大乾燥密度と繊維混入率の関係

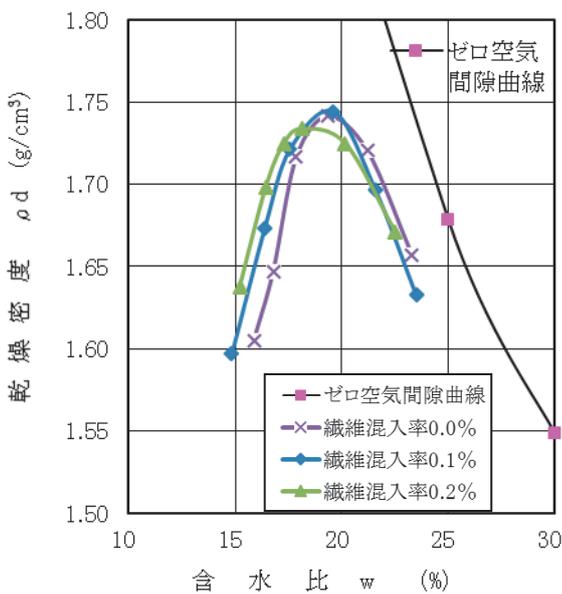


図-6 細粒分質砂eの締固め試験結果

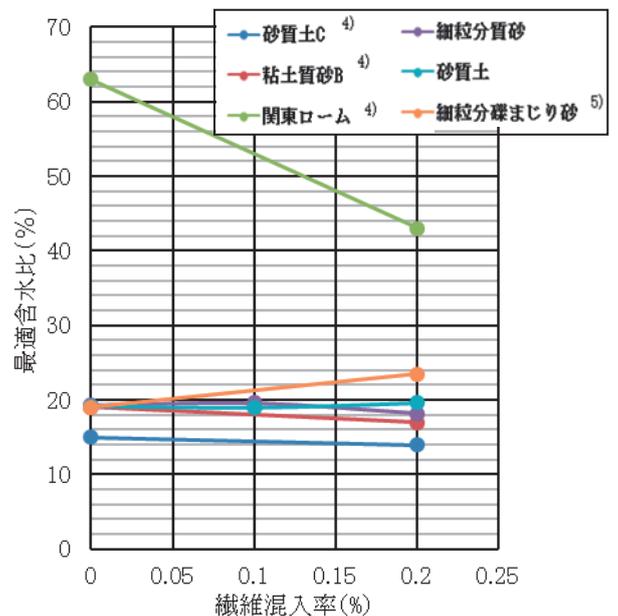


図-8 最適含水比と繊維混入率の関係

合補強土についても締固め試験を実施する必要性を示唆している。しかし、現段階では原料土と短繊維混合土の締固め試験結果に大きく影響を与える要因を特定するだけの情報を得ていないことから、引き続きデータの取得が必要である。

(3) 配合試験に用いる供試体寸法

従前短繊維混合補強土の力学特性を評価する際には、最大繊維長60mmを考慮してφ100mm×h200mmの円柱供試体を用いてきた。φ50mm×h100mmの円柱供試体に比べて、原料土が8倍必要となり取り扱いにくいこと、試験費用が高額となることなどから、研究、実務の面での適用性を高めるために小口径供試体での試験実施の可能性を検証した。

原料土には表-1に示す細粒分まじり砂cと細粒分質砂eを用い、一軸圧縮試験(JGS 0511)により評価した。使用する繊維長は最も汎用性が高いと思われる40mmとし、最適含水比に調整した短繊維混合補強土をφ100mm×h200mm、φ50mm×h100mmのモールドに投入して締固め度90%、95%の供試体を作製した。

図-9は、各試験条件下でのφ50mm供試体の一軸圧縮強さ(q_{uφ50})とφ100mm供試体の一軸圧縮強さ(q_{uφ100})との相関である。試験データ9点についての相関式は次のようになっており、φ50mm供試体による試験の適用性が確認された。

$$q_{u\phi 100} = 0.919 \times q_{u\phi 50}$$

$$r = 0.987$$

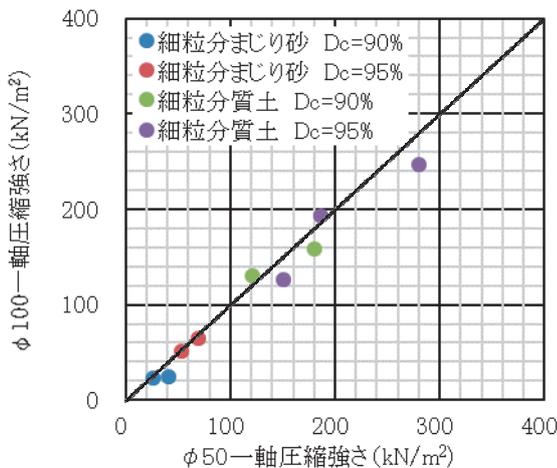


図-9 供試体寸法の違いによる一軸圧縮強さの関係

なお、この結果は過去のφ100mm供試体の試験結果をφ50mm供試体の試験結果と比較する時には、0.9倍するのが実務的な評価になることに注意が必要であることを意味するが、今回の相関性の確認に当

たっては試験データが少ないこと、各々の供試体径における分散性の照査ができないことなどから、引き続きデータ集積することによりその精度を高める必要がある。

2.3 緩い締固め状態での耐侵食性試験結果

本工法の普及を目指す活動を進める中で、緩傾斜農耕地での耐侵食工法としての利用について問い合わせを受けた。これまで、土木構造物としての法面を対象とした耐侵食性について報告³⁾している。しかし、ヒアリングを重ねる中で、耕作地の傾斜が非常に緩いこと、耕耘後の状態や農作物の生育を考えると農耕地の締固まり方は、これまで対象とした法面とは全く異なり非常に緩いことが判明した。本節では、この背景下で実施した締固め度の低い緩傾斜斜面での耐侵食性能調査結果について報告する。

実験は、降雨強度150mm/hの降雨に見立てた噴霧を行う方式を採用し、締固め度2水準(70%、85%)、傾斜角度3水準(5度、15度、30度)の模擬斜面に対

表-2 耐侵食性実験ケース

締固め度 (%)	傾斜角 (度)	降雨強度 (mm/h)	土層底面
70	15	50	排水
		100	
		150	
	30	150	非排水
	5	150	
85	15	100	排水
		150	
		50	



図-10 土槽供試体設置状況と降雨装置

土研センター

して表-2のケースについて実施した。耐侵食性能は土砂流出量で評価する。実験に用いた原料土は、表-1に示す細粒分まじり砂cと細粒分質砂eである。締固めは最適含水比を目指したが、締固め度70%の場合これを最適含水比 ($w_{opt}=24.0\%$) よりもドライ側の17%に調整することで供試体を作製した。図-10に模擬斜面に見立てた土層の設置状況と模擬降雨状況を示す。

下面を排水条件にした土層と非排水条件にした土層による実験では、排水条件にした場合は降雨がすべて下面から排水されてしまい表流水となることがなく、結果として土砂の流出が確認できなかったため、本実験では底面を非排水条件として実施している。また、締固め度を85%まで高めたものでは、いずれの傾斜角でも土砂流出は見られなかった。このため、本報文では締固め度70%の結果について報告する。

図-11は、締固め度70%、傾斜角15度、降雨強度150mm/hのケースにおける降雨開始後1時間の土層表面状況である。左側の繊維の入っていないケースでは、表面が大きく削られているのに対して、繊維混入率0.1%、0.2%の場合は、ほとんど侵食が見られない。

実験結果を、降雨開始からの経過時間と流出土砂乾燥重量の関係として図-12～図-14に示す。過年度の成果³⁾と同様、原料土のみでは降雨開始15分を過ぎると土砂流出が始まるのに対して、繊維混合補強土の場合、傾斜角に係わらず降雨強度150mm/hであっても2時間までの土砂流出はほとんどない。このことから、農耕地でも土砂流出対策として有効であると考えられる。なお、図-14に示す降雨強度100mm/hで繊維混入率0.1%の場合の流出土砂量が多い結果については、過年度の成果³⁾も考え合わせると土層作製

時の繊維の解繊・分散性が影響したのではないかと考えている。

3. まとめと課題

短繊維混合補強土の強度増加は、土にランダムな配向性をもって混入した微細繊維の引抜き抵抗や繊維そのもののせん断抵抗により、土が本来持たないと言われる引張り強度や見掛けの粘着力が付加されることで発揮されるものである。また、耐侵食性については、同じく土に混入された微細繊維が土粒

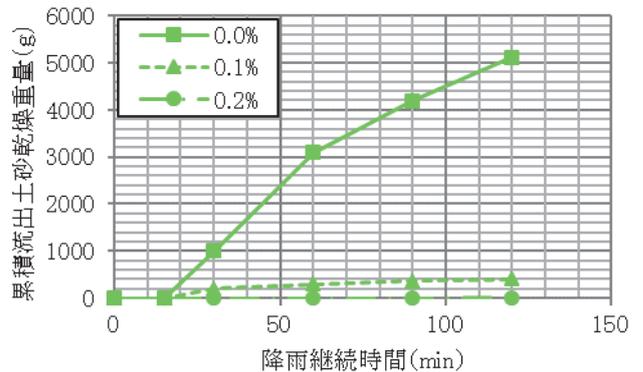


図-12 降雨継続時間と累積流出土砂乾燥重量 (締固め度70%、勾配15度、降雨強度150mm/h)

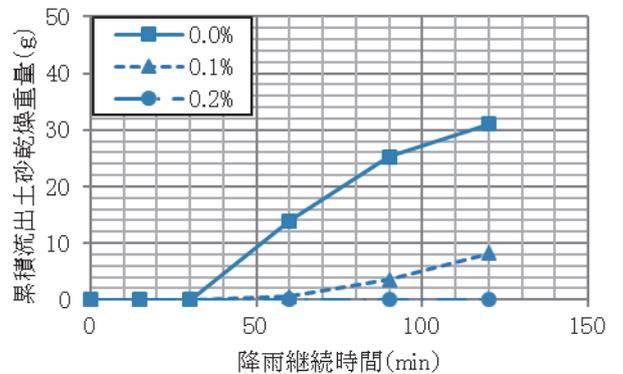


図-13 降雨継続時間と累積流出土砂乾燥重量 (締固め度70%、勾配5度、降雨強度150mm/h)

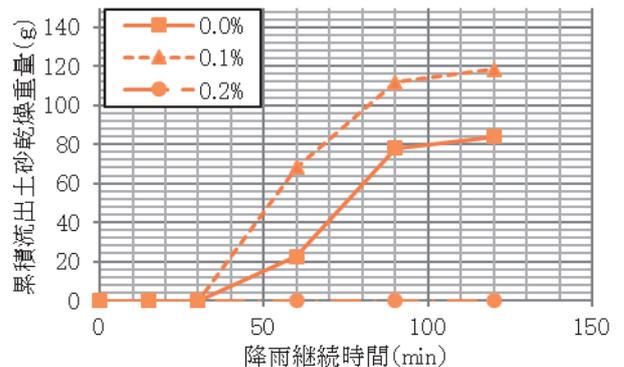


図-14 降雨継続時間と累積流出土砂乾燥重量 (締固め度70%、勾配15度、降雨強度100mm/h)

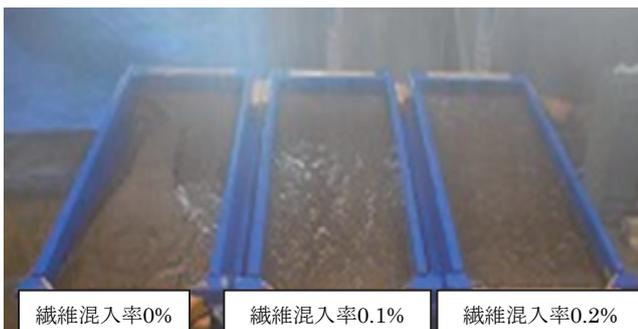


図-11 耐侵食実験中の土層表面状況 (降雨強度150mm/h、開始後2時間、締固め度70%、傾斜角15度)

子を絡め取る形でその移動を抑止することにより発揮されるものである。以下に、前述の試験結果についてまとめると共に、今後に向けた課題を整理する。

① 一軸圧縮試験に与える繊維太さの影響

34 μ mと39 μ mの繊維径では、強度特性に大きな違いはないと考えられる。しかし、両者のピーク強度には、若干の差が生じていることから、短繊維混合補強土に上記以外の繊維太さの繊維が採用される場合、実際に使用する繊維を用いた強度試験などを通して要求性能に見合った特性を有することを確認する必要がある。

② 繊維混入による締固め特性への影響

関東ロームのような粘性土では、短繊維混合を行った場合と原料土だけの場合では、締固め特性に大きな差が生じる。このため、締固め管理値を決める場合は両者の締固め試験を実施する必要がある。しかし、現段階ではこの影響要因を特定するだけの情報を得ていないことから、引き続きデータの取得を試みる必要がある。

③ 配合試験時の供試体寸法の影響

繊維長40mmを採用する場合は、 ϕ 50mmの供試体の適用が可能と考えられる。今回の試験結果からは、過去の ϕ 100mm供試体の試験結果を ϕ 50mm供試体の試験結果と比較する時には、0.9倍するのが実務的である。

$$q_{u\phi 100} = 0.9 \times q_{u\phi 50}$$

なお、この結果は過去の ϕ 100mm供試体の試験結果を ϕ 50mm供試体の試験結果と比較する時には、0.9倍するのが実務的な評価になることに注意が必要であることを意味するが、今回の相関性の確認に当たっては試験データが少ないこと、各々の供試体径における分散性の照査ができないことなどから、引き続きデータ集積することによりその精度を高める必要がある。

④ 緩詰状態の土砂に対する耐侵食性能

傾斜土層を用いた耐侵食性能実験では、耕耘直後の傾斜農地を想定した締固め度70%であっても傾斜勾配15度以下であれば、時間降水量150mmまでの降雨に対して、繊維混入による土砂流出抑制効果を確認できた。また、平成20年に固化材を添加した短繊維混合補強土の実証工事が行われた川内川堤防法面は、平成22年6月20日に川内市アメダス観測所で日降水量252mm、日最大1時間降水量69mmを経験している⁶⁾。この

時の結果では、降雨侵食に対する効果と植生に対する悪影響のないことの確認ができており、しかし、固化材添加を行わない耕耘直後の農地斜面等に対しては、今後実証実験を通してその効果を検証していく必要がある。

なお、これまでは主にポリエステルなどの化学繊維を使用しているが、今後は適用箇所に応じた生分解性繊維や自然由来繊維の使用など、環境に配慮した繊維の選定が必要と考えている。

謝 辞

試験実施、結果の評価にあたっては、HGS研究コンソーシアム短繊維混合補強土部会の皆様に多大なるご協力を頂いた。ここに深く謝意を表すものである。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：混合補強土の技術開発に関する共同研究報告書－短繊維混合補強土利用技術マニュアル－、共同研究報告書第168号、平成9年3月
- 2) 例えば平野他：低混入率短繊維混合補強土の繊維長さおよび強度特性、第47回地盤工学研究発表会、pp.531～532、2012
- 3) 平野他：短繊維混合補強土の基本特性、ジオシンセティックス論文集、pp.135～142、2013
- 4) 林他：繊維混合補強土に関する研究（その5）－混合土の諸特性－、第28回土質工学研究発表会、pp.2687～2688、1993
- 5) 三木他：繊維混合補強土に関する研究（その8）－堤防法面への試験施工－、第29回土質工学研究発表会、pp.7～8、1994
- 6) 気象庁ホームページ：川内市観測史上1～10位の値（年間を通じての値）、http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/rank_a.php?prec_no=88&block_no=0880&year=&month=&day=&view、2020.1.14
- 7) 中島他：短繊維混合補強土を河川堤防土羽土に適用した試験施工及び追跡調査報告、ジオシンセティックス論文集、Vol.31、pp.183～190、2016.12

土橋聖賢



(一財)土木研究センター
技術研究所土工構造物研究部 主任研究員
DOBASHI Kiyomasa

平野孝行



西松建設(株)土木設計部
シニアマイスター
HIRANO Takayuki