

回転式破碎混合工法による建設発生土を利用した短繊維混合補強土の適用用途について

中島 典昭¹・田中 克哉²

¹日本国土開発株式会社 技術センター (〒243-0303 愛甲郡愛川町中津4036-1)

²日本国土開発株式会社 広島支店 (〒730-0051 広島市中区大手町2-8-1)



発表者

短繊維混合補強土は、建設発生土や安定処理土にポリエステル製などの短繊維を混合して強度や靱性、降雨や流水に対する耐侵食性の向上などに期待される工法である。また、混合機械として回転式破碎混合工法を用いることで、多種多様の性状の建設発生土の利用を可能にする。近年、台風や集中豪雨によって盛土のり面の流失、崩壊する被害が発生しており、中国地方においては、雨流水により風化残積土(まさ土)のり面の侵食による被災が懸念される。

本報は、短繊維混合補強土を盛土のり面や河川堤防のり面の被覆材として適用することにより、盛土や河川堤防における災害被害を軽減する対策の一手法として提案するものである。

キーワード 回転式破碎混合工法, 短繊維混合補強土, 建設発生土, 侵食, 有効利用

1. はじめに

短繊維混合補強土は、まさ土やしらすなどの砂質土系の原位置土や建設発生土、または安定処理土に長さ数センチ、太さ1~100dtex (dtex: 繊維の長さ10,000mの質量をグラム数で表した単位)の短繊維を混合して強度や靱性、降雨や流水に対する耐侵食効果の向上¹⁾、さらには植生基盤²⁾として適用性を示す土質材料である。このような工学的特長を有する短繊維混合補強土の効果を発揮させるためには、短繊維の束を解繊し、対象土中へ均質分散させることが重要となる。また、侵食を受けやすいまさ土などは、少量のセメントを添加することにより粘り強さ(靱性)が向上する。しかしながら、従来の混合機械では写真-1に示す短繊維束を解繊し、セメント共



写真-1 短繊維束

に短繊維を土中へ分散することは困難であった。回転式破碎混合工法は、これらの課題を克服し、短繊維束の解繊・分散を可能にした混合機械である³⁾。また、回転式破碎混合工法は粘性土から岩まで多種多様の建設発生土の利用を可能にする工法であり、建設発生土の場外搬出量の削減による運搬車両の総数を抑制して沿道の環境への負荷を軽減すると共に、可能限り建設発生土を有効利用することによりゼロエミッションの促進に寄与する技術としても期待される。

近年、台風や集中豪雨等により甚大な自然災害が頻発している。その被災状況は、切土や盛土では斜面の流失や崩落、河川では堤防の決壊などがある。特に、施工後間もない盛土のり面や河川堤防は、植生の活着が期待できないため被害を受けやすい。概して、侵食を生じやすい砂質土、シルト質土、シラス、そして中国地方に広く分布する風化残積土(以下、「まさ土」と称する。)などは、降雨や流水によりガリ侵食を起こし、盛土のり面の崩壊や河川堤防の決壊などの大きな被災を誘発することが懸念される。

このような状況を鑑み、回転式破碎混合工法により建設発生土と短繊維とを破碎混合し、室内レベルでの諸特性を確認し、盛土のり面や河川堤防被覆材への適用性について検討を行った。

なお、本報は、(独)土木研究所、(財)土木研究センターおよび民間企業(HGSハイグレードソイル研究コンソーシアム)の枠組みの中で検討した成果の一部を報告するものである。

2. 回転式破碎混合工法の概要

回転式破碎混合工法（以下、「ツイスター工法」と称する。）は、円筒内で高速回転する複数本のフレキシブルなチェーンの打撃力で、地盤材料の破碎・細粒化(破碎)と添加材料との均質な混合を同時に行うことを特長とし、従来の技術では困難であった礫や粘性土の対応も可能にした技術である⁴⁾。図-1 にツイスター工法の概念図を示す。

ツイスター破碎混合装置（以下、「ツイスター」と称する。）は、回転軸に取り付けたチェーンを軸方向に最大5段、放射方向に1段当たり最大8本まで任意に設定することが可能な構造で、改良する地盤材料に応じて取り付け段数・本数を変化させる構造になっている。また、チェーンの回転数（最大1,000rpm）を変化させることにより地盤材料の粒度調整も可能とする。ケーシング部は、粘性土等のケーシング内面への付着を防止する目的から、強制付着掻き取り装置(ケーシング回転数：最大2.2rpm)を有する構造としている。

量をbと置くととき、解繊率cは

$$c(\%) = \{[a(g) - b(g)] / a(g)\} \times 100$$

で表される。

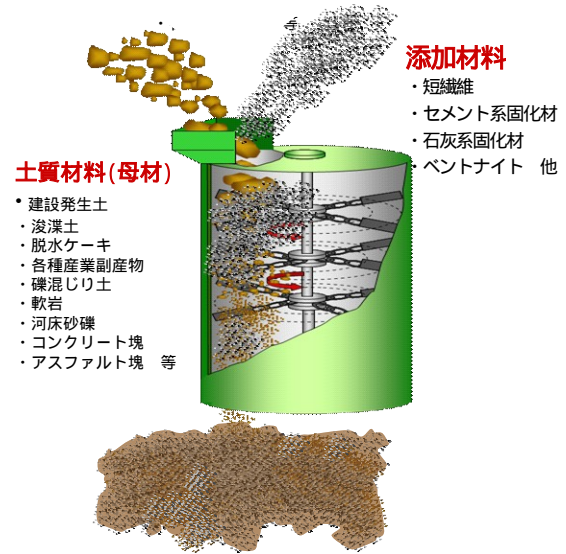


図-1 ツイスター工法の概念図

3. 検討概要

(1) 使用材料

本試験に用いた建設発生土は、風化した軟質シラスから中硬質シラスが混在したシラスである。また、短繊維を解繊・分散させるための助材として道路用単粒度砕石5号³⁾を用いた。表-1に建設発生土（シラス）と道路用単粒度砕石5号の物理特性を示し、図-2に使用材料の粒径加積曲線を示す。また、短繊維は繊維径17dtex（39 μm）、繊維長60mmのポリエステル製の繊維である。固化材は、高炉セメントB種である。

(2) 短繊維束の解繊・分散手法

短繊維束の解繊・分散性を定量的に評価する手法は、現在のところ基準化された指標はないため、本検討では以下の方法で解繊性・分散性を評価した。

a) 解繊性

ツイスターで破碎混合した短繊維混合補強土中には、解繊されずに未解繊状態の短繊維が残留している。この残留した未解繊状態の短繊維に着目し、解繊率と称した手法を用いて短繊維束の解繊性を評価した。

解繊率は、ツイスターで破碎混合した未解繊状態の短繊維束の質量を測定して短繊維の解繊性を定量的に評価するものである。破碎混合前の短繊維束の質量を「初期短繊維添加量(g)」と称し、破碎混合後に残留した短繊維束の質量を「未解繊短繊維量(g)」と称して解繊率を求める。ここに、初期短繊維添加量をa、未解繊短繊維

表-1 使用材料の物理特性

試験項目	建設発生土(シラス)	道路用単粒度砕石5号
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.571	2.700
自然含水比 w_n (%)	17.4 ~ 19.7	0.0
最大粒径 D_{max} (mm)	75.0	26.5
礫分 (2.00 ~ 75mm) (%)	27.7	98.7
砂分 (0.075 ~ 2.00mm) (%)	39.3	1.3
シルト分 (0.005 ~ 0.075mm) (%)	22.8	0.0
粘土分 (0.005mm以下) (%)	10.2	0.0
均等係数 U_c	76.8	-
曲率係数 U_c'	1.90	-
液性限界 w_L (%)	NP	-
塑性限界 w_p (%)	NP	-
塑性指数 I_p	NP	-
コンシステンシー指数 I_c	-	-
地盤材料の分類名	シルト質礫質砂	礫
分類記号	(SMG)	(G)

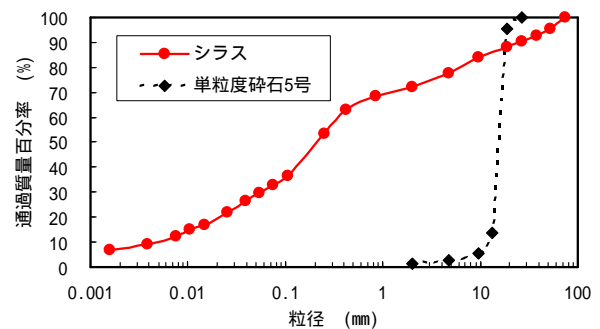


図-2 粒径加積曲線

また、「未解繊短繊維量(g)」は、短繊維束と土質材料をツイスターで破碎混合した後、解繊されずに土質材料中に残留した短繊維束を採取して、75 μ m フレイで短繊維束に付着した土質材料を水で洗い流し、110 で乾燥して質量を測定して求めた。

なお、水洗い時の短繊維の流失については、柔軟で繊維長が60mmと長い短繊維であるため、フレイ目を通することなく長さ方向に留まる形で残留することから、仮に流下する短繊維があったとしても微量と推察される。

b) 分散性

分散性を定量的に評価するためには、土質材料中の任意の体積当たりの短繊維量、および短繊維の配列を確認するなどの方法が考えられるが、現時点ではそのような規格化された試験方法がないことから、分散性の確認においては目視観察により評価した。

短繊維は、解繊されて均質に分散した状態になると、地盤材料中に短繊維と短繊維が絡み合う塊状の短繊維（以下、「短繊維塊」と称する。）は認められず、目視では短繊維がほとんど認識できないほど均質に混合された状態となる。以上から、ツイスターで破碎混合した短繊維混合補強土の分散性評価においては、短繊維塊の状態を目視観察により定性的に確認する方法とした。

なお、短繊維塊は、ツイスターで破碎混合されて一度解繊したものが、再び絡み合ったものとして取り扱い、本検討では解繊した状態の短繊維とした。

(3) 短繊維混合補強土の配合および製造方法

表-2に検討配合を示す。配合は、短繊維の有無による緒特性を比較するため、短繊維以外の材料については同じ配合量とした。製造方法は、使用材料を所要量計量した後、ベルトコンベア上に短繊維が飛散しないように土砂でサンドイッチ状に敷き均し後、ツイスターに材料を投入した。また、目視観察で解繊性が不十分な場合には破碎混合を繰り返して解繊性を確認した。

(4) 短繊維混合補強土の強度および靱性評価方法

短繊維混合補強土の強度特性は、JIS A 1216 土の一軸圧縮試験に準拠して強度および靱性について調査した。強度は、一軸圧縮強さ q_u (kN/m^2)で評価し、靱性は破壊ひずみ $\epsilon_f + 3\%$ ひずみ時の応力と一軸圧縮強さの比 ($\epsilon_f + 3\%$ ひずみ時の応力 / 一軸圧縮強さ) が1.0に近いほど靱性（粘り強さ）の高い短繊維混合補強土として評価した。

(5) 供試体作製方法

供試体の密度は、最大乾燥密度の90%密度に設定し、直径100mm×高さ200mmの鋳物製のモールドに5層で締めて温度20の恒温室内に7日間ラップで密封養生した。また、供試体作製に当たり、事前にJIS A 1210突き固めによる土の締固め試験（A-c法）を行い、試験ケースの締固め特性を確認した。

4. 検討結果

(1) 短繊維束の解繊・分散

土質材料と破碎混合した短繊維束の状態は、1回破碎混合するだけでは解繊・分散性が不十分であったことから、3回を限度に破碎混合を繰返し行った。図-3に破碎混合回数と解繊率の関係を示す。

図-3から、短繊維を添加したケースは、破碎混合2回で解繊率が一定になった。分散性は、写真-2に示すように破碎混合2回で短繊維は土中へ均質に混合されていることを確認した。これにより、2回破碎混合することで良好な解繊性・分散性が得られることを確認した。

表-2 検討配合

試験ケース	乾燥質量比(内割)		(シラス:碎石)に対して外割添加	
	シラス	碎石	短繊維	固化材
	70	30	0	0
				3
				6
	70	30	0.2	0
				3
				6

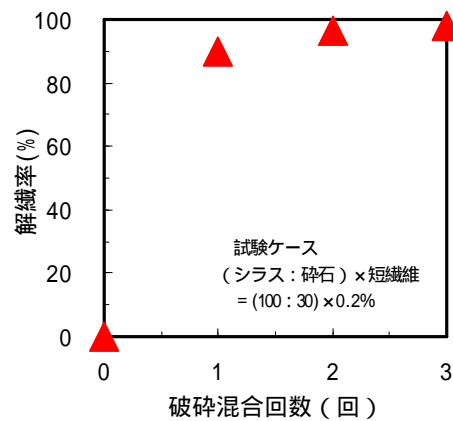


図-3 破碎混合回数と解繊率の関係



写真-2 破碎混合2回の短繊維混合補強土

(2) 強度および靱性

図-4に応力～ひずみ曲線、図-5に固化材添加率と一軸圧縮強さ、および ($\epsilon_f + 3\%$ ひずみ時の応力 / 一軸圧縮強さ) の関係を示す。図-4, 5から、一軸圧縮強さは短

繊維の有無に係らず固化材を増加すると大きくなる。一方、 $f_{t+3\%}$ （ $f_{t+3\%}$ ひずみ時の応力 / 一軸圧縮強さ）は、固化材の増加と共に小さくなるが、短繊維を添加したケースは短繊維無添加のケースと比べて、セメントを添加した場合においても $f_{t+3\%}$ を示しており、短繊維による補強効果が認められる。また、供試体の破壊状況の観察から、ケースはせん断破壊後も短繊維がせん断面をつなぎ留めている状況が確認されており、ピークひずみを超えた後も粘り強い $f_{t+3\%}$ が発揮されていることが確認された。

5. まとめ

検討結果から、シラスに短繊維と少量のセメントを添加することで粘り強い補強土に改良可能であることがわかった。これより、シラスはガリ侵食の生じやすい材料として有効利用する用途は限られていたが、目的に応じて短繊維とセメントを添加することにより、適用用途の拡大が期待できる。また、建設発生土として大量に発生するシラスを高品質な盛土材料へ有効利用が可能となる。

一方、シラスと同様に粒子破碎しやすくガリ侵食の生じやすいまさ土においても、短繊維とセメントを添加しツイスターで破碎混合して補強土に改良することにより、発生土の有効利用と共に適用用途の拡大が期待できる。

さらに、短繊維混合補強土は、降雨や流水などに対する耐侵食性の向上¹⁾が期待できることから、盛土のり面や河川堤防の被覆材としてシラスやまさ土に短繊維で補強することにより、集中豪雨などの雨水流によって侵食・破壊される被害を軽減する一つの手法として適用可能と考えられる。

今後、巨大地震や台風・集中豪雨等の自然災害に備えた防災工事においては、住環境、CO₂抑制などを含む自然環境への負荷の軽減、トータルコストの縮減の観点から、大量に発生する建設発生土を有効活用する防災工事の需要が増大すると思われる。

このような諸情勢を踏まえて、今後もツイスター工法による短繊維混合補強土の適用拡大を目指して技術開発に取り組む所存である。

謝辞：本研究におきましては、(独)土木研究所、(財)土木研究センターおよびHGSハイグレードソイル研究コンソーシアム参加企業の方々には、多くご指導をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井厚企, 小畑敏子 他: 繊維混合補強土に関する研究(その17)-工ローション試験(その2)-, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2599-2600, 1997.7
- 2) 三木博史, 藤原広一, 大山将 他: 繊維混合補強土

- 3) に関する研究(その14) -木曾川堤防法面試験施工-, 第32回地盤工学研究発表会, pp.2593-2594, 1997.7
- 4) 中島典昭, 齋藤由紀子, 高橋勇 他: 短繊維混合補強土への回転式破碎混合工法の適用性 -短繊維束の解繊・分散方法-, 土木学会第63回年次学術講演会, pp.539-540, 2008.9
- 高垣豊, 中島典昭, 平松重孝, 丸井英司: 地盤材料からみたツイスター工法の評価(その1), 技術研究報告 No.18, 日本国土開発株式会社, 2001.9

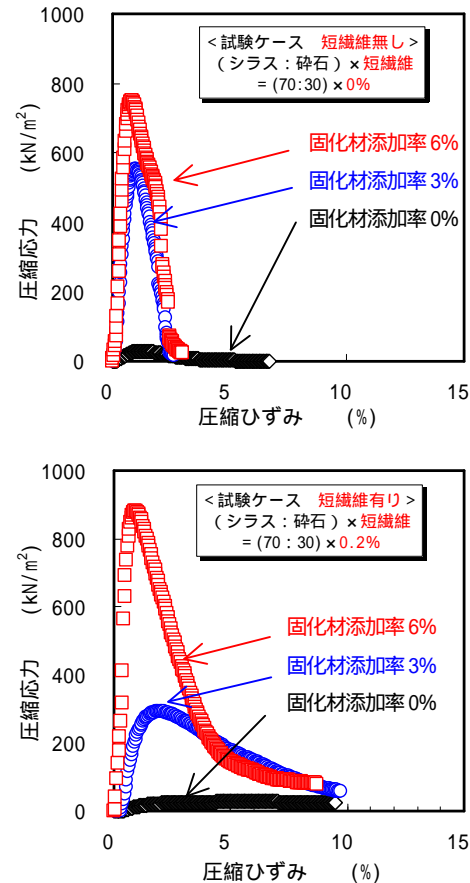


図-4 応力～ひずみ曲線

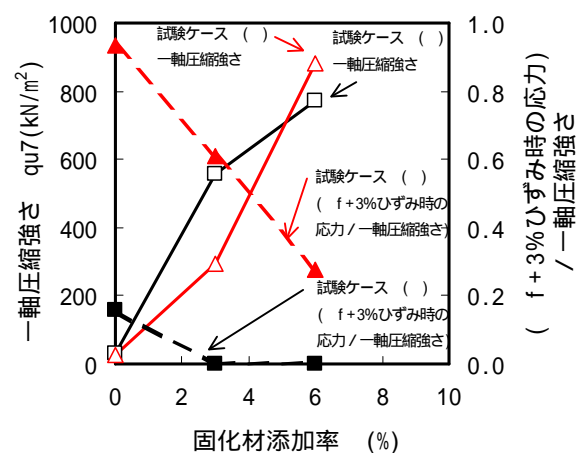


図-5 固化材添加率と一軸圧縮強さおよび ($f_{t+3\%}$ ひずみ時の応力 / 一軸圧縮強さ) の関係