Mechanical Behavior of Reinforced Soil by Continuous Threads

Kutara, K., Public Works Reserch Institute, Ministry of Construction

Miki, H., Public Works Reserch Institute, Ministry of Construction

Horiya, S., Kumagai Gumi Co., Ltd

Ishizaki, H., Kumagai Gumi Co., Ltd

Fujiki, H., Kumagai Gumi Co., Ltd

This Paper presents the results of triaxial compression test of reinforced soil by continuous threads. It is already known that soil reinforcement by continuous threads gives apparent cohesion to the soil. In the test, degree of compaction of soil, type of threads, proportion of threads and tightness of threads in the soil were changed, and the effect of each factor on the strength parameters of reinforced soil was examined.

本論文は、連続長繊維を用いた補強土の三軸圧縮試験結果についてまとめたものである。土のなかに連続糸を混入することによりみかけの粘着力が発生することが既に知られているが、当試験では補強土の締固め度、繊維の種類、繊維の混入比、繊維の緊張の度合を変えることにより、それぞれのファクターが補強土のみかけの粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ および変形特性に与える影響を調べた。

連続長繊維を用いた補強土の力学的特性

建設省土木研究所 久楽 勝行
同 上 三木 博史
(株)熊谷組 堀家 茂一
同 上 石崎 英夫
同 上 ○藤木 広一

1. はじめに

ジオテキスタイルに関する技術開発が進むなかで、連続長繊維を砂質土の中に混入して新しい土木材料として利用する工法がフランスで開発され、施工例も増えてきている。フランスにおいてはテクソル (TEXSOL) と呼ばれるこの補強土に関する多くの基礎的研究¹⁾がおこなわれており、日本でもその力学的特性に関する報告^{2), 3), 4)}がいくつか発表されているが、現場の施工方法とも密接に関係する補強土の締固め度や繊維の緊張の度合などの因子も考慮してこの補強土の力学的特性を系統的に調べた研究はあまりなされていない。そこで本研究では、一連の三軸圧縮試験を行い、補強土の締固め度、繊維の種類、繊維の混入比、繊維の緊張の度合などが連続長繊維を用いた補強土の力学的特性に与える影響を調べた。

2. 試験条件

2-1 試験試料

土質試料は豊浦標準砂と千葉県君津産の砂 (砂 A) の二種類とした。標準砂⁵⁾と砂 A についての一連の物理試験結果ならびに粒径加積曲線をそれぞれ表 1、図 1 に示す。また繊維試料は、ポリエステル 100 % の繊維であり、繊維度 (繊維の太さに相当) と引張り強度の異なる 4 種類の繊維を用いた。これらの繊維試料についての繊維試験結果 ((財) 日本化学繊維協会に依頼) は表 2 に示すとおりである。

表1 土質試験結果一覧表

土質材料		標準砂	山砂 A
試験項目			
土 粒 子 の 比 重 G s		2.64	2.709
粒 度 特 性	礫分 (2000 μ m 以上) (%)	0	1
	砂分 (74~2000 μ m) (%)	100	98
	細土分 (5~74 μ m) (%)		
	粘土分 (5 μ m 以下) (%)	0	1
	最大粒径 D _{max} (mm)	0.420	4.760
	60% 粒径 D ₆₀ (mm)	0.196	0.350
性	50% 粒径 D ₅₀ (mm)	0.175	0.310
	10% 粒径 D ₁₀ (mm)	0.129	0.170
	均等係数 U _c (mm)	1.52	2.1
日 本 統 一 土 質 分 類		[S]	[S]
最大密度 $\rho_{d \max}$ (t/m ³)		1.645	—
最小密度 $\rho_{d \min}$ (t/m ³)		1.335	—
締 固 め 特 性	最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$ (t/m ³)	—	1.511
	最適含水比 W _{opt} (%)	—	20.1

表2 繊維試験結果一覧表

試験項目	SD 50-24	SD 125-24	SD 250-48	HT 125-24
正繊維度 (D)	48.5	121.8	242.2	123.7
引張り強さ (gf/D)	4.56	4.77	4.40	6.75
伸び率 (%)	21.5	29.3	26.1	12.3
初期引張抵抗度 (gf/D)	127	117	115	155
より数 (回/m)	2.8	4.0	5.2	7.8

繊維の呼び名の説明 SD: 普通強度、HT: 高強度
中央部数字: 公称繊維度
後尾部数字: フィラメント数

図1 土質試料の粒径加積曲線

2-2 試験ケース

試験は、上記の2種類の土質試料を対象に、試料の密度を3種類（標準砂では、相対密度 D_r がそれぞれ30%、50%および70%、砂Aでは、縮固め度 C_d がそれぞれ85%、90%および95%）、繊維の太さを3種類（50デニール、125デニールおよび250デニール）、繊維の強度を2種類（普通強度の繊維および高強度繊維）、繊維の混入比を3種類（土質試料の乾燥重量に対する繊維の重量比がそれぞれ0.1%、0.2%および0.3%）、繊維の緊張度を3種類（試料内の繊維の緊張の度合いがそれぞれ高程度、中程度および低程度）設定し、繊維補強の効果を三軸圧縮試験によって調べた。実施した三軸圧縮試験のケースを試験結果とあわせて一覧表で示すと表5-1、表5-2のとおりである。

2-3 供試体の作製方法

三軸圧縮試験に用いた供試体の寸法は直径10cm、高さ20cmとした。土質試料と繊維試料の混合は、表3と図2に示すような仕様を持つ供試体作製のための専用装置を用いた。これは繊維が土質試料内にできるだけ均等に混合されることを考慮したものである。また繊維を送り出す方法は、現在実施工で採用されているジェット水を利用する方式とした。供試体を作製するときの繊維の混入比の管理は、繊維の送り出し速度 (m/sec) と土質試料の落下速度 (kgf/min) により行った。また繊維の緊張度の管理は、ノズルと揺動箱の振動数を変化させることにより行った。繊維の緊張度は、繊維を送り出す速度 V とジェッ

図2 供試体作製装置の概略図

ト水がモールド内の供試体の製作面の中央部を通過（掃射）するときの速度 v_{max} との比 V/v_{max} で表すことにした。供試体の縮固めには振動台を用いた。これは繊維の配列をできるだけ乱さないことを考慮したためである。今回使用した2種類の振動台の仕様を表4に示す。供試体の密度の管理は、振動台の種類、錘の種類（4種類）および振動時間によって行った。なお、振動台の種類、錘の種類ならびに振動時間は、予め密度（相対密度または縮固め度）とこれらのパラメーターの間の関係を調べることにより決定した。

2-4 三軸圧縮試験の条件

三軸圧縮試験の試験条件は圧密排水条件（CD）とし、歪速度 1.0 mm/min ($0.5 \text{ \% / min}$) で载荷し、側圧は3種類 ($\sigma_3 = 1.0, 2.0$ および 3.0 kg/cm^2) とした。

3. 試験結果および考察

三軸圧縮試験結果の一覧表を表5-1、表5-2に示す。また繊維混入比および繊維の引張り強度と強度定数 c 、 ϕ の関係を図3-1、図3-2に示す。標準砂と砂Aとでは、図3-1、図3-2に示すようにほぼ共通した結果が得られているので、以下では両者をまとめて各種要因が強度定数 c 、 ϕ に及ぼす影響について得られた知見を述べる。

(1) 繊維混入比と強度定数 c 、 ϕ の関係

図3-1と図3-2から、繊維混入比の増加とともに、みかけの粘着力 c が著しく増大することが明らかになった。従って、繊維混入の効果はみかけの粘着力 c の増大として表されるといえる。

(2) 密度（相対密度または縮固め度）と強度定数 c 、 ϕ の関係

縮固め度を変えても、補強砂のみかけの粘着力 c はそれほど変化しないが、せん断抵抗角 ϕ は縮固め度の増加とともに増大する。この傾向は、無補強砂の場合と同様であるが、せん断抵抗角 ϕ の大きさは、補強砂の方が無補強砂よりも約3～5度大きくなった。

(3) 繊維の緊張度と強度定数 c 、 ϕ の関係

繊維の緊張度の低下 (V/v_{max} の上昇) に伴ってみかけの粘着力 c が低下する傾向が顕著に認めら

表3 供試体製作装置の仕様

供 試 体 の 寸 法	円筒形供試体 ($\phi 100 \text{ h } 200$ 、 $\phi 150 \text{ h } 300$)
土 質 材 料 の 落 下 方 法	コンベアーによる自然落下方式
土質材料の落下量制御方法	スリット幅 ($0 \sim 20 \text{ cm}$)、スリット高さ ($0 \sim 2.5 \text{ cm}$)、コンベアー速度 ($0 \sim 5.7 \text{ m/sec}$) による総合制御方式 ($0 \sim 15 \text{ kg/min}$)
繊維の送り出し方法	ジェット水による送り出し方式
繊維の送り出し速度制御方法	スピードコントローラーによる速度制御方式 ($0 \sim 30 \text{ m/sec}$)
ジェ ャ ッ ト 水 量	$500 \sim 2000 \text{ mL/min}$
供試体内部における 繊維の混入パターン	ノズルの振動（横振動：振動数 $0 \sim 2414 \text{ rpm}$ 、振幅 $\pm 5^\circ$ ）、揺動箱の振動（縦振動：振動数 $0 \sim 164 \text{ rpm}$ 、振幅 $\pm 5^\circ$ ）、モールド台の回転（回転数 $0 \sim 100 \text{ rpm}$ ）の合成によりジェット水がモールド内に描く軌跡

表4 振 動 台 の 仕 様

	振 動 台 A	振 動 台 B
振 動 エ ネ ル ギ ー (モーター使用電力)	750 w	200 w
振 動 数	6000 vpm	2850 vpm
振 幅	~0.8 mm	~0.5 mm
備 考	錘は4種類使用（重量 1.7kg f、3 kg f、5 kg f、9.7kg f）	

れた。繊維の緊張度の低下は、現場での施工方法と密接に関係するので施工法の改良を含めた検討が必要であると思われる。

(4) 繊維の引張り強度と強度定数 c 、 ϕ の関係

図3-1と図3-2に示すとおり、繊維の引張り強度の大きいほど、強度、特にみかけの粘着力 c の発現が大きくなる傾向が認められた。

(5) 繊維の太さと強度定数 c 、 ϕ の関係

繊維の細いものの方が強度の発現が大きいという傾向が得られた。ただし125 デニールの繊維を使用したときには250 デニールのものよりみかけの粘着力 c が増大し、50デニールの繊維を使用したときにはせん断抵抗角 ϕ が増加した。なおこの点に関しては、まだ検討の余地があると思われる。

次に、繊維の強度および繊維の混入比が主応力差ピーク時における圧縮歪および圧縮歪10%時における体積歪に及ぼす影響を標準砂を例にとりて示すと図4のようになる。

図4より、繊維混入比が増加するほど主応力差のピーク時における圧縮歪が大きくなる傾向があり、粘り強い土となることが読み取れる。また圧縮歪10%時における体積歪は繊維混入比の増加とともに小さくなる傾向が認められ、繊維混入比が大きいほどダイレタンシー抑制効果が強まることを表している。

高強度繊維を使用した場合は、普通強度の繊維を使用した場合と比べて、主応力差のピークが明瞭に出現し、圧縮歪は小さくなる傾向が認められた。また圧縮歪10%時における体積歪は高強度繊維を使用した方が小さく、繊維混入比が大きいほどダイレタンシーを抑制する効果が強いことがうかがわれる。

表5-1 三軸圧縮結果一覧表

砂の種類	C, ϕ	補 固 材	繊維の太さ (denier)	繊維の引張り強度	繊維の混入比 (%)	繊維の緊張度
標準砂	無補強砂					
	ケース数	3		—	—	—
	ケース	L	M	D		
	C	0.0	0.0	0.0		
	ϕ	27.6	29.6	33.7		
	ケース数	3				
	ケース	L	M	D	50	125 250
	C	1.20	1.38	1.21	SD	HT 0.1 0.2 0.3 T M S
	ϕ	32.3	33.2	39.5		
	ケース数	3				
	ケース	L	M	D	50	125 250
	C				SD	HT 0.1 0.2 0.3 T M S
	ϕ					
	ケース数	2				
	ケース	L	M	D	50	125 250
	C				SD	HT 1.38 1.93
	ϕ					33.2 34.7
	ケース数	3				
	ケース	L	M	D	50	125 250
	C				SD	HT 0.1 0.2 0.3 T M S
	ϕ					33.8 33.2 34.2
	ケース数	3				
	ケース	L	M	D	50	125 250
	C				SD	HT 0.1 0.2 0.3 T M S
	ϕ					1.38 0.64 0.24
						33.2 32.4 32.7

C : (kgf/cm²) L : Loose S D : Standard T : Tight
 ϕ : (degree) M : Medium H T : High Tenacity M : Medium
D : Dense S : Slack

(注) 各試験ケースで採用した補強土の締め度、繊維の太さ、繊維の引張り強度、繊維の混入比、繊維の緊張度は各ケース間に下線をひいて示した。

表5-2 三軸圧縮結果一覧表

砂の種類		C, Φ	締固め	繊維の太さ (denier)	繊維の引張り強度	繊維の混入比 (%)	繊維の緊張度
砂 A	無補強砂	ケース数	3	—	—	—	—
		ケース	L M D				
		C	0.0 0.0 0.10				
		Φ	29.7 31.1 32.8				
		ケース数	3				
		ケース	L M D	50 125 250	SD HT	0.1 0.2 0.3	T M S
	補強砂 (テクソル)	C	1.64 1.51 1.60				
		Φ	32.5 34.1 35.3				
		ケース数	3				
		ケース	L M D	50 125 250	SD HT	0.1 0.2 0.3	T M S
		C		0.83 1.51 0.86			
		Φ		36.3 34.1 34.6			
		ケース数	3				
		ケース	L M D	50 125 250	SD HT	0.1 0.2 0.3	T M S
		C			1.51 1.95		
		Φ			34.1 32.6		
		ケース数	3				
		ケース	L M D	50 125 250	SD HT	0.1 0.2 0.3	T M S
		C			0.36 1.51 2.27		
		Φ			34.3 34.1 34.2		
		ケース数	3				
		ケース	L M D	50 125 250	SD HT	0.1 0.2 0.3	T M S
		C				1.51 0.94 0.45	
		Φ				34.1 33.0 33.7	

C : (Kgf/cm²) L : Loose S D : Standard T : Tight
 Φ : (degree) M : Medium HT : High Tenacity M : Medium
D : Dense S : Slack

(注) 各試験ケースで採用した補強土の細砕め度、繊維の太さ、繊維の引張り強度、繊維の混入比、繊維の緊張度は各ケース欄に下線をひいて示した。

図3-1 強度定数c, ϕ と繊維混入比mならびに繊維強度の関係 (標準砂の場合)

図3-2 強度定数c, ϕ と繊維混入比mならびに繊維強度の関係 (砂Aの場合)

図4 主応力差ピーク時の圧縮歪 ϵ_r ならびに圧縮歪10%時の体積歪 ϵ_{v10} と繊維混入比 m ならびに繊維強度の関係

4. おわりに

連続長繊維を用いた補強土の締固め度、繊維の種類、繊維の混入比および繊維の緊張の度合いが補強土の力学的特性に与える影響を三軸圧縮試験によって調べてみた。その結果、繊維混入比ならびに繊維の緊張度が補強土のみかけの粘着力の発現に特に大きく影響することが判明した。今後、各種の土質への適用性ならびに補強土の異方性に関する検討を更に継続していく予定である。

参考文献 1) Leflaive, E., Liausu, Ph.: The Reinforcement of Soils by Continuous Thread, Third International Conference on Geotextiles, Vol. IV, pp 1159~1162, 1986. 2) 坂口 昌彦, E. ルフレブ: 連続した糸で補強された砂の三軸圧縮試験の結果について, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集第3部, pp 895~896, 1986. 3) 玉井 達郎 他: 連続糸混入土の基本的力学特性, 土木学会第42回年次学術講演会講演概要集第3部, pp 860~861, 1987. 4) 谷 茂, 山下 恒夫 他: 連続糸による補強土の強度特性, 第23回土質工学研究発表会, pp 2179~2180, 1988. 5) 龍岡 文夫: 室内土質試験, 生研セミナーテキスト コース 106, 1980.