

連続長繊維を用いた補強土の力学的特性に関する基礎的研究

MECHANICAL BEHAVIOR OF REINFORCED SOIL BY CONTINUOUS FIBERS

中山覚博*・藤木広一**・久楽勝行***・三木博史****

By Kakuhiro NAKAYAMA, Hirokazu FUJIKI, Katsuyuki KUTARA and Hiroshi MIKI

Mechanical behavior of reinforced soil by continuous fibers is examined by means of three types of soil tests. According to the test results, effect of fibers mixing into the soil comes out as apparent cohesion of the soil and magnitude of it depends mainly on mixing ratio of the fibers. Degree of tension of the fibers in the soil and relation between size of particles of the soils and thickness of fibers have also great influence on the value. Reinforced soil by continuous fibers have an anisotropic behavior concerning the shear strength, which is induced by mixing process of fibers into soils. Influence of the fibers on coefficient of permeability of the soil is almost negligible.

Keywords: geotextile, continuous fiber, soil test

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た補強土を用いて、盛土や切土ののり面に、補強土擁壁やのり面保護のための補強土層を築造し、盛土や切土の安定をはかる工法がフランスで開発され、施工例も増えてきている。特に、当工法は土圧に抵抗できるとともに連続長繊維を混入した補強土層ののり面に植生を施すことが可能なことから、緑化ができる擁壁工法として注目を浴びている。フランスにおいてはテクソル (TEXSOL) とよばれるこの補強土に関する多くの基礎的研究^{1)~3)}が行われており、日本でもその力学的特性に関する報告^{4)~6)}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、繊維の緊張の度合などの因子をも考慮して、この補強土の力学的特性を系統的に調べた研究はほとんどなされていない。

そこで本研究では、盛土や切土に対する補強土壁あるいは補強土層材料としての使用を目的として、連続長繊維を用いた補強土の室内試験を実施し、補強土の基本的な力学的特性について検討を加えた。まず三軸圧縮試験では、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、土の粒度特性などのパラメーターが補強土の強度定数 c' 、 ϕ' に及ぼす影響を明らかにした。また一面せん断試験では、連続長繊維の混入による補強土の強度異方性について調べた。さらに繊維の混入が補強土の透水性に及ぼす影響を透水試験によって評価した。

2. 試験方法

(1) 試料

連続長繊維を用いた補強土では、通常砂質土を使用することから、試験に用いた試料は豊浦標準砂と千葉県君津市産の砂 (砂A, 砂B) の3種類とした。これらの試料についての一連の物理試験結果および粒径加積曲線をそれぞれ表-1と図-1に示した。繊維は表-2に示すようなポリエステル100%のフィラメント糸であり、繊維の太さと引張り強度などの異なる5種類の繊維を用いた。ここで繊維の呼び名として用いたSD50-24やHT125-24などは、SDが引張り強度が4.4~4.8 gf/D

* 正会員 (株)熊谷組土木本部企画管理部部長
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

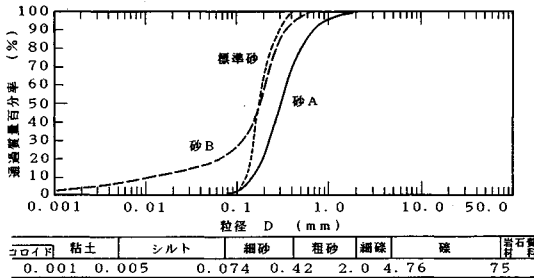
** 正会員 工修 (株)熊谷組土木本部土木技術部
(同上)

*** 正会員 工博 建設省土木研究所土質研究室室長
(〒305 つくば市大字旭1番地)

**** 正会員 工修 建設省土木研究所土質研究室主任研究員
(同上)

表一 土質試験結果一覧表

試料の種類		標準砂	砂 A	砂 B
試験項目				
土粒子の比重 G _s		2.64	2.709	2.678
粒度特性	礫分 (2000 μm 以上) (%)	0	1	0
	砂分 (74 ~ 2000 μm) (%)	100	98	79
	シルト分 (5 ~ 74 μm) (%)	0	1	15
	粘土分 (5 μm 以下) (%)	0	0	6
	最大粒径 D _{max} (mm)	0.420	4.760	2.000
	60%粒径 D ₆₀ (mm)	0.196	0.350	0.210
	50%粒径 D ₅₀ (mm)	0.175	0.310	0.180
	10%粒径 D ₁₀ (mm)	0.129	0.170	0.012
	均等係数 U _c (mm)	1.52	2.1	17.5
	日本統一土質分類		[S]	[S]
締固め	最大間隙比 e _{max}	0.978	-	-
	最小間隙比 e _{min}	0.605	-	-
特性	最大乾燥密度 ρ _{d max} (t/m ³)	-	1.511	1.541
	最適含水比 w _{opt} (%)	-	20.1	20.5



図一 土質試料の粒径加積曲線

表二 繊維試験結果一覧表

試験項目	SD50-24	SD125-24	HT125-24	SD150-30	SD250-48
繊維の太さ (D)	48.5	121.8	123.7	146.6	242.2
フィラメント数 (本)	24	24	24	30	48
引張り強度 (gf/D)	4.56	4.77	6.75	4.44	4.40
伸び率 (%)	21.5	29.3	12.3	36.4	26.1
より数 (回/m)	2.8	4.0	7.8	0	5.2

(注) 繊維の呼び名の説明
 SD：普通強度繊維、HT：高強度繊維
 中央部数字：繊維の太さ (D)、後尾部数字：フィラメント数
 (注) D (デニール)；繊維の太さを表す単位、繊維長9000mあたりの繊維の質量 (グラム数)。例えば SD125-24 の場合、1本のフィラメントの直径は23ミクロン、1本の繊維 (24フィラメント) の直径は約 0.1 mm。
 (注) 伸び率；繊維が切断するまでに伸びた長さと同長さとの比率 (%)

程度の普通強度のものを、また HT が引張り強度が 6.75 gf/D 程度の高強度のものを示し、50 や 125 が繊維の太さ (D) を、また 24 がフィラメントの本数を表わしている。

(2) 三軸圧縮試験

a) 試験ケース 本試験では、補強土の締固め度、繊維の種類 (太さ、引張り強度)、繊維の混入比、繊維の緊張の度合および試料の粒度特性が補強土の強度定数

c', φ' に及ぼす影響を評価することを目的として、試験条件を表一3のように設定した。

すなわち、上記の3種類の試料を対象に、試料の密度を3種類 (標準砂では、相対密度がそれぞれ 30%, 50% および 70%, 砂Aでは締固め度がそれぞれ 85%, 90% および 95%, ただし砂Bでは締固め度 80% についてのみ)、繊維の太さを3種類 (50D, 125D および 250D)、繊維の強度を2種類 (普通強度および高強度)、繊維の混入比を3種類 (試料の乾燥重量に対する繊維の重量比が 0.1%, 0.2% および 0.3%), 繊維の緊張の度合を3種類 (高い、中程度および低い) とした。

b) 供試体の作製方法 連続長繊維の試料内への混入は、図-2 に示す供試体作製のための専用装置を用いた。これは繊維が試料内にできるだけ均等に混入されることを考慮したためである。供試体の中に試料を投入する方法はコンベアによる自然落下方式とした。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。

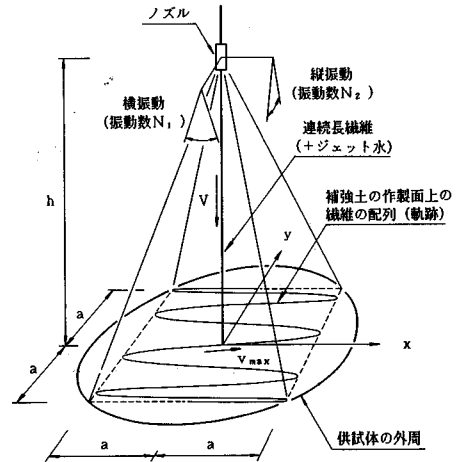
次に、この装置を用いて三軸圧縮試験用の円柱形供試体を作製するときには、繊維を送り出すノズルは図-3 に示すように縦と横の2方向に振幅運動し、それと同時に供試体を設置したモールド台は回転運動するようになっている。このような合成運動によって、供試体内部における繊維の配列ができるだけランダムになるようにした。そして繊維の混入比および含水比の管理は、可変速コンベアによる試料の搬送速度、スレッドスピードコントローラーによる繊維の送り出し速度およびジェット水量を制御することにより行った。

連続長繊維を用いた補強土では、補強土の中に混入された繊維の緊張の度合 (あるいは繊維のたるみの程度) が補強土の強度に大きな影響を及ぼすと考えられる。現在実施工では、連続長繊維の砂の中への混入はノズルを振動させて分散させる方法が採用されており、この方法によって補強土内に混入された繊維の緊張の度合を示す指標として、繊維の緊張度を次のように定義する。すなわち、図-3 はノズルの2方向の振動によって補強土の作製面 (繊維と砂の混合面) 上に描かれる繊維の配列 (軌跡) を示したものであるが、繊維がこの面の中央部を通過するときの作製面上における繊維の敷設速度を v_{max} 、繊維を送り出す速度を V とすると、微小時間 Δt に補強土の作製面上中央部に敷設される繊維の敷設長は $\Delta l' = v_{max} \Delta t$ 、ノズルから送り出される連続長繊維の長さは $\Delta l = V \Delta t$ 、で表わされ、これらの比 $\Delta l' / \Delta l$ 、つまり v_{max} / V を繊維の緊張度 (この値が零から1に近づくほど繊維の緊張の度合は高まり、1のとき繊維はたるむことなく敷設される) とよぶことにする。なお本試験における繊維の緊張度の管理は、繊維を送り出す速度 V

表-3 三軸圧縮試験ケース一覧表

ケース No.	試料の種類	補強の有無	相対密度または締固め度	繊維の太さ (D)	繊維の引張り強度	繊維の混入比 (%)	繊維の緊張度					
1	標準砂	無	Dr=30%	-	-	-	-					
2			Dr=50%									
3			Dr=70%									
4		有	有	Dr=30%	125	SD	0.2	高い				
5				Dr=50%								
6				Dr=70%								
7				Dr=50%	50	SD	0.2	高い				
8					250							
9				Dr=50%	125	HT	0.2	高い				
10									Dr=50%	125	SD	0.1
11				0.3								
12				Dr=50%	125	SD	0.2	中程度				
13								低い				
14	砂 A	無	Dc=85%	-	-	-	-					
15			Dc=90%									
16			Dc=95%									
17		有	有	Dc=85%	125	SD	0.2	高い				
18				Dc=90%								
19				Dc=95%								
20				Dc=90%	50	SD	0.2	高い				
21					250							
22				Dc=90%	125	HT	0.2	高い				
23									Dc=90%	125	SD	0.1
24				0.3								
25				Dc=90%	125	SD	0.2	中程度				
26	低い											
27	砂 B	無	Dc=80%	-	-	-	-					
28			Dc=80%					125	SD	0.2	高い	
29			Dc=80%									50
30		Dc=80%	250									
31		有	有	Dc=80%	125	HT	0.2	高い				
32				Dc=80%					125	SD	0.1	高い
33											0.3	
34				Dc=80%	125	SD	0.2	中程度				
35								低い				

(注) SD、HTは、それぞれ普通強度繊維、高強度繊維を示す。繊維の緊張度の高い、中程度、低いはそれぞれ $v_{max} / V = 0.77、0.58、0.38$ を示す。繊維の緊張度の詳細は供試体の作製方法の項参照。



補強土の作製面上における繊維 (ジェット水) の配列 (軌跡)

$x = a \sin 2\pi (N_1/60) t$
 $y = a \sin 2\pi (N_2/60) t$
 繊維 (ジェット水) が補強土の作製面上中央部を通過するときの作製面上における速度 ($N_1 \geq N_2$ のとき)
 $v_{max} \approx (dx/dt)_{t=0} = a 2\pi (N_1/60)$
 ここに、
 h ; ノズルから補強土の作製面上までの高さ
 a ; 補強土の作製面上における繊維 (ジェット水) の振幅
 N_1 ; ノズルの横方向の振動数 (rpm)
 N_2 ; ノズルの縦方向の振動数 (rpm)

図-3 ノズルの動きと補強土の作製面上における繊維の配列 (モールド台の回転を止めた場合)

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	2,000 W
振動数	6,000 rpm	2,850 rpm
振幅	0.8 mm	0.5 mm

備考: 錘は円柱形供試体に対して5種類 (重量 0.8 kgf、1.7 kgf、3 kgf、5 kgf、9.7 kgf)、直方形供試体に対して2種類 (重量 10 kgf、22 kgf) 使用

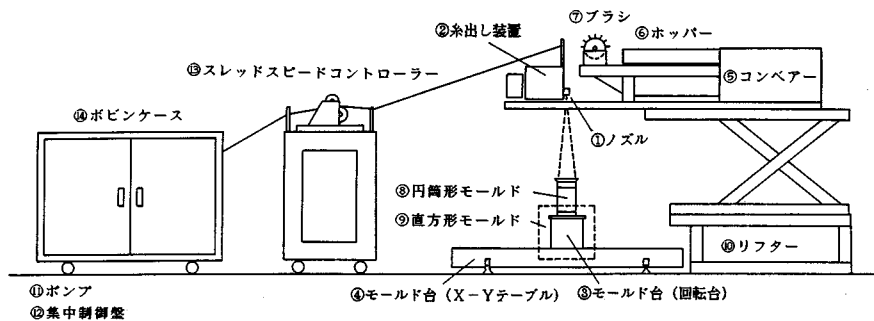


図-2 供試体作製装置の概略図

とノズルの振動数 N を変化させることにより行った。

供試体の締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ものである。なお供試体の密度は、振動台の種類、錘の重量および振動時間を調整することにより、できるだけ均等になるように管理した。すなわち、試験に先立ち、振動台を用いた供試体の締固めに関する予備試験を行い、これらのパラメーターと密度（相対密度または締固め度）の関係調べて、振動台の仕様を表一4のように決定した。

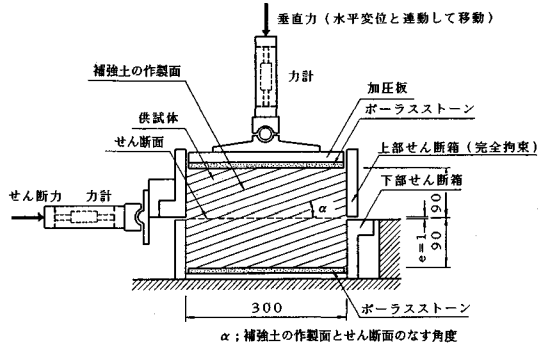
c) 試験条件 三軸圧縮試験の供試体の寸法は直径10 cm、高さ20 cmとした。試験方法は土質工学会の土質試験法を準用した。試験は供試体を飽和させた後、圧密排水条件 (CD) で行った。圧縮速度は1.0 mm/min (0.5 %/min) とし、側圧を3種類 ($\sigma_3=1.0, 2.0$ および 3.0 kgf/cm^2) 変えて実施した。

(3) 一面せん断試験

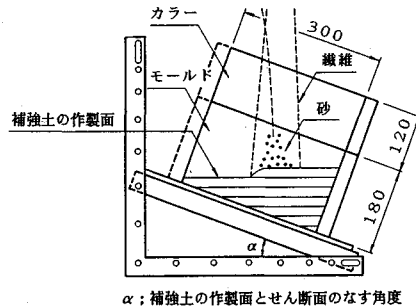
a) 試験ケース 本試験では、連続長繊維を用いた補強土の強度異方性を明確にするために、砂Aを用いて表一5に示すような試験ケースについて一面せん断試験を実施した。試験ケースは、繊維の混入方法、1個のノズルを通る繊維の本数、補強土の作製面とせん断面のなす角度の条件を変化させた16ケースで、供試体の締固め度、供試体の含水比、繊維の種類、繊維の混入比、繊維の緊張度は共通条件の欄に示すようなものを用いた。また、繊維の混入方法および補強土の作製面とせん断面のなす角度については供試体の作製方法の項で述べる。

b) 供試体の作製方法 試験装置は図一4に示すような上部せん断箱可動式の大型一面せん断試験機を使用し、供試体の寸法は縦、横30 cm、高さ18 cmとした。

連続長繊維の試料内への混入および供試体の締固めは、三軸圧縮試験の場合と同様にそれぞれ供試体作製装置と振動台を用いて行った。なお一面せん断試験の供試体を作製するときは、補強土の強度異方性を調べるため、図一5に示すように、補強土の作製面とせん断面のなす角度だけ供試体を傾斜させた状態で、繊維を試料内へ混入した。



図一4 一面せん断試験機の概要



図一5 繊維の試料内への混入方法

表一5 一面せん断試験ケース一覧表

ケース No.	繊維の混入方法	1個のノズルを通る繊維の本数	補強土の作製面とせん断面のなす角度 α (度)	共通条件
1	A	1	0	試料の種類 砂 A 供試体の締固め度 $D_c = 95$ (%) 供試体の含水比 $w = 20$ (%) 繊維の種類 SD 150-30 太さ 150 (D) 引張り強度 普通強度 フィラメント数 30 本 繊維の混入比 0.2 (%) 繊維の緊張度 $v_{max} / V = 0.77$
2			10	
3			20	
4			30	
5			45	
6			90	
7	B	1	0	
8			10	
9			20	
10			30	
11			45	
12			90	
13	B	4	0	
14			10	
15			20	
16			30	

(注) 繊維の混入方法A、Bおよび補強土の作製面とせん断面のなす角度 α の詳細は、供試体の作製方法の項参照。

繊維の混入方法として、補強土の作製面上における繊維の配列が異なるA法とB法を用いた。すなわちA法では1方向にのみ振幅運動するノズルを2個組み合わせ用いて、2つのノズルの振幅の方向を直交させると同時に、供試体を設置したモールド台を縦方向と横方向に任意に動かして、供試体内に繊維がまんべんなく混入されるようにした。B法では縦と横の2方向に振幅運動する(ただし、一方の振動数は他方向の振動数に比べて著しく大きい)1個のノズルを用い、A法と同様にモールド台を縦方向と横方向に動かして供試体を作製した。

c) 試験条件 試験は圧密定圧条件(CD)とし、せん断速度1.5 mm/minで載荷し、垂直応力は3種類($\sigma = 1.0, 2.0$ および 3.0 kgf/cm^2)とした。なお、供試体の含水比は表一5に示す供試体作製時のままで試験を行った。

(4) 透水試験

a) 試験ケース 本試験では、上記の試験で用いたものと同じ3種類の試料(標準砂, 砂Aおよび砂B)について、繊維の混入の有無が透水係数に与える影響を調べた。なお、試料の密度、繊維の種類、繊維の混入比、繊維の緊張の度合などの試験条件の詳細は、試験結果をとりまとめた表一6に示すとおりである。

b) 供試体の作製方法 連続繊維の試料内への混入および供試体の締固めは、三軸圧縮試験の場合と同様にそれぞれ供試体作製装置と振動台を用いて行った。

c) 試験条件 JIS A 1218の規定に従って行った。

3. 試験結果および考察

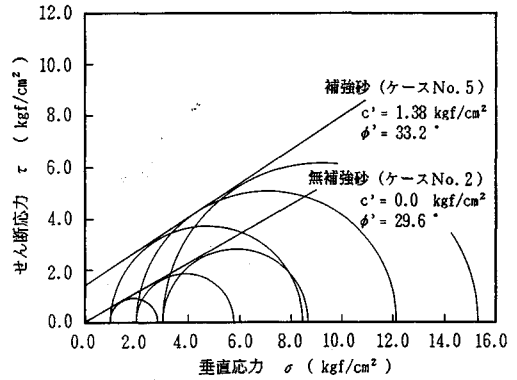
(1) 三軸圧縮試験結果

三軸圧縮試験結果をもとにして、補強土を構成する各種のパラメーターが、補強土の強度・変形特性に及ぼす影響について考察を加えると以下ようになる。

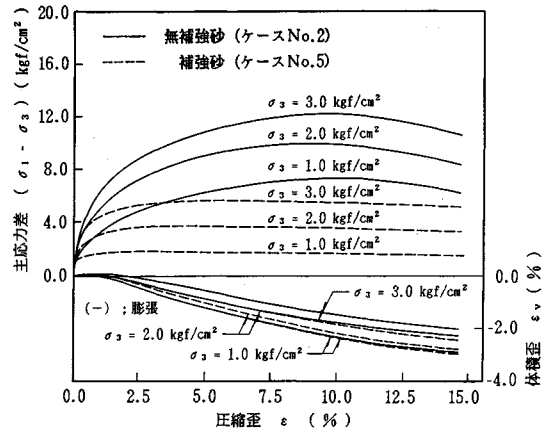
a) 補強土の強度特性 標準砂の場合を例にとりて、三軸圧縮試験によって得られたモールの応力円と応力~ひずみ曲線を示すとそれぞれ図一6と図一7のようになる。図一6から、連続繊維を用いた補強土では、せん断抵抗角 ϕ' の増加はそれほど顕著には認められないが、見掛けの粘着力 c' の発現が著しいことがわかる。次に、強度定数 c' 、 ϕ' と繊維混入比の関係を整理した図一8から、見掛けの粘着力 c' は繊維混入比の増加とともに著しく増大することが認められる。一方、せん断抵抗角 ϕ' の増加は3~5度程度であった。

このように、繊維混入の効果は、見掛けの粘着力 c' とせん断抵抗角 ϕ' の増加となって現われ、特に見掛けの粘着力 c' の増加は顕著であるといえる。

b) 補強土の変形特性 標準砂の場合を例にとりて、三軸圧縮試験における主応力差ピーク時(砂Bにお



図一6 モールの応力円(標準砂の場合)



図一7 主応力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ~圧縮ひずみ ϵ 曲線ならびに体積ひずみ ϵ_v ~圧縮ひずみ曲線(標準砂の場合)

いては15%ひずみ時)の圧縮ひずみ ϵ_f および圧縮ひずみ10%時の体積ひずみ ϵ_{v10} の値と繊維混入比の関係を図一9に示す。図一9から、繊維混入比が増加するほど主応力差ピーク時の圧縮ひずみ ϵ_f が大きくなる傾向が認められ、砂に繊維を混入することによって粘り強い土となることがわかる。

一方、圧縮ひずみ10%時の体積比 ϵ_{v10} に着目すると、繊維混入比の増加による影響はそれほど顕著には認められないから、繊維を混入しても砂が破壊に近い状態に至ったときのダイレイタンス特性そのものにはあまり変化が生じないことがわかる。

したがって、破壊に至るまでの砂のダイレイタンス(膨張)を繊維が拘束することによって、補強土内部に緊張力が導入され、その結果、圧縮ひずみおよび圧縮応力が増大し、見掛けの粘着力 c' の増加となって現われると解釈できる。

c) 繊維の引張り強度と強度・変形特性 強度・変形特性をとりまとめた図一8、図一9の中には、普通強度の繊維を用いた場合と合わせて、引張り強度が高くて、

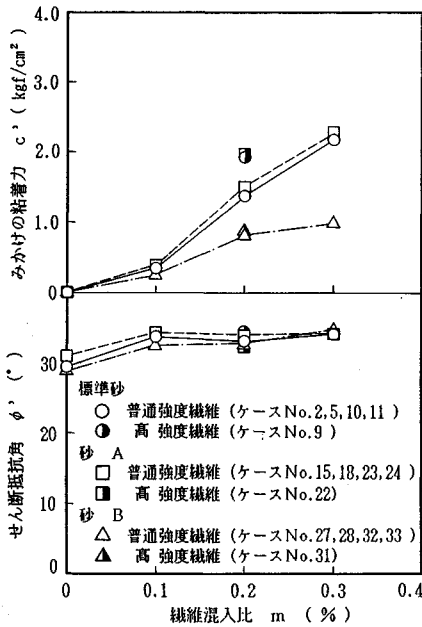


図-8 強度定数 c' , ϕ' と繊維混入比 m の関係

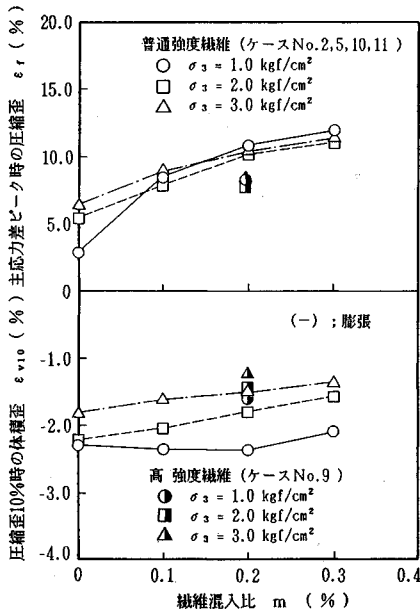


図-9 主応力差ピーク時の圧縮ひずみ ϵ_r および圧縮ひずみ 10% 時の体積ひずみ ϵ_{v10} と繊維混入比 m の関係 (標準砂の場合)

伸び率の小さい高強度繊維を用いた場合の結果を示してある。これらの図から読み取れるように、細粒分の少ない標準砂と砂 A では、高強度繊維を使用すると、普通強度の繊維を使用した場合と比べて見掛けの粘着力 c' の発現が大きくなった。また変形特性に着目すると、高強度繊維を使用したものは、主応力差のピークが明瞭に出

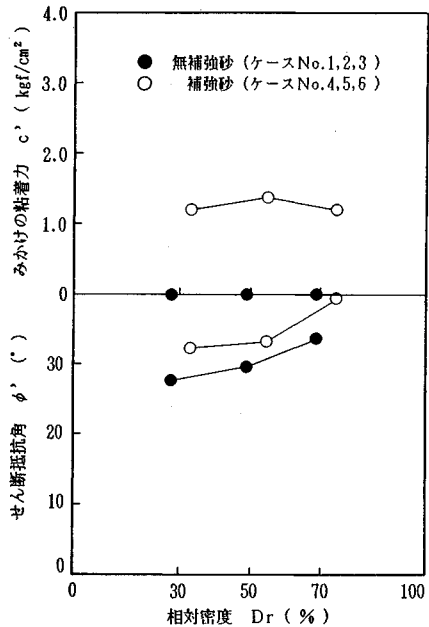


図-10 強度定数 c' , ϕ' と相対密度 D_r の関係 (標準砂の場合)

現するとともに破壊ひずみが小さくなる傾向にあった。さらに圧縮ひずみ 10% 時の体積ひずみ ϵ_{v10} がやや小さくなって、繊維によるダイレイタンスの拘束効果がいつそう強まる傾向にあることがわかる。これらの結果から、繊維の太さや繊維の表面摩擦特性などに大差がなければ、高強度の繊維のものほど補強効果が大きくなるといえる。

d) 密度 (締固め度または相対密度) と強度特性
試料の密度定数 c' , ϕ' の関係を標準砂を例にとって示すと図-10 のようになる。この図から、無補強砂では密度によらず粘着力は無視できるほど小さく、せん断抵抗角が密度の増加とともに増大する傾向にあることがわかる。これに繊維を混入すると、見掛けの粘着力 c' が顕著に増大し、せん断抵抗角 ϕ' も 3~5 度程度増加することが読み取れ、しかもこの傾向は密度によらないことがわかる。

e) 繊維の緊張度と強度特性 繊維の緊張度と強度定数 c' , ϕ' の関係を図-11 に示す。この図から、試験条件によらず、繊維の緊張度を高めることにより、補強土のせん断抵抗角 ϕ' はそれほど変化しないが、見掛けの粘着力 c' が著しく増大することが認められる。

このように、繊維混入による補強効果を十分に発揮させるためには、繊維の緊張度がきわめて支配的な因子になるので、できるだけ高い繊維の緊張度を確保するような施工方法を工夫することが重要であるといえる。

f) 繊維の太さと強度特性 3 種類の砂を用いた補強土について、繊維の太さと強度定数 c' , ϕ' の関係

を図-12に示す。砂の粒度特性と繊維の太さの組合せに着目してみると、細粒分が約20%含まれていて、均等係数が比較的大きい砂Bの場合は、細い繊維を使用したものほど強度の発現が増大した。これに対して、細粒分が少なく、均等係数が小さい標準砂と砂Aの場合は、125デニール程度の太さの繊維を使用したものが強度の発現が最も大きくなる傾向が認められる。

これらの結果から、補強土の強度の発現の仕方は、砂の粒度特性と繊維の太さの組合せとかなり密接に関係していて、これらの間に最適な組合せがあるといえる。これは、砂の粒子の大きさに対して繊維が十分太い場合には、繊維の混入比が一定であれば、繊維が細いほどトータルの繊維長が長くなることになるので強度の発現が大きくなるが、逆に、砂の粒子の大きさに対して、繊維が細すぎると、繊維の破断が生じやすくなって、強度の発現が低下するためと考えられる。

(2) 一面せん断試験結果

一面せん断試験結果をもとにして、補強土のせん断強度特性、特に強度異方性について考察を加えると以下のようになる。

a) 補強土の作製面とせん断面のなす角度の影響

見掛けの粘着力 c' に及ぼす補強土の作製面とせん断面のなす角度 α の影響を示したものが図-13である。供試体の作製方法としては、繊維の混入方法と1個のノズルを通る繊維の本数を変えた3通りの方法を用いている。この図から読み取れるように、補強土の見掛けの粘着力 c' は、補強土の作製面とせん断面のなす角度 α の

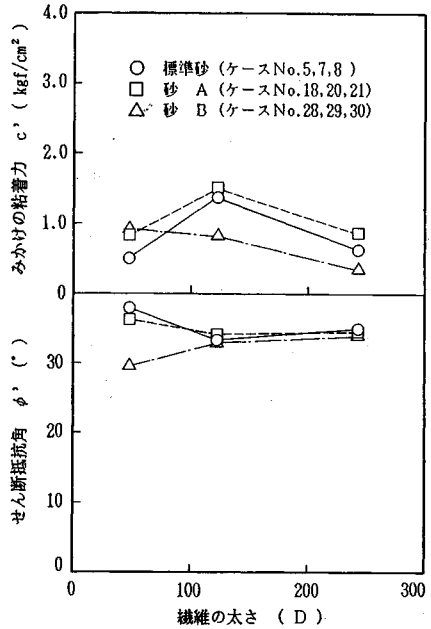


図-12 強度定数 c' , ϕ' と繊維の太さの関係

値によって大きく変化し、 α が小さいほど c' が低下する傾向にあり、補強土の作製面とせん断面が平行 ($\alpha = 0^\circ$) のとき c' が最小値を示す。

このように、連続長繊維を混入した補強土は顕著な強度異方性を有するので、これを盛土や切土に使用する場合には、この強度異方性を十分に考慮して設計を行う必要がある。なお、現場では補強土の作製面(施工面)を15度程度傾斜させていることから、図-13の角度 α が15度における見掛けの粘着力 c' を設計に用いるものとしている。

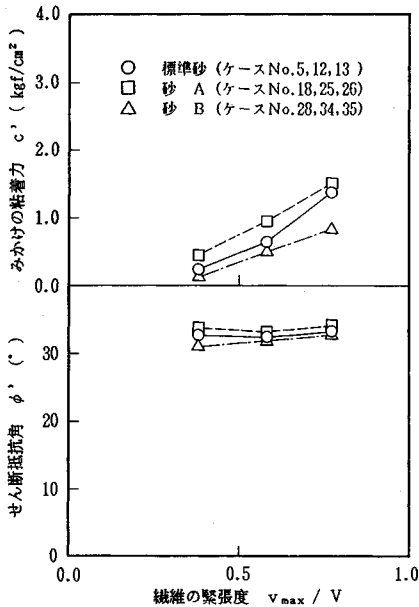


図-11 強度定数 c' , ϕ' と繊維の緊張度 v_{max}/V の関係

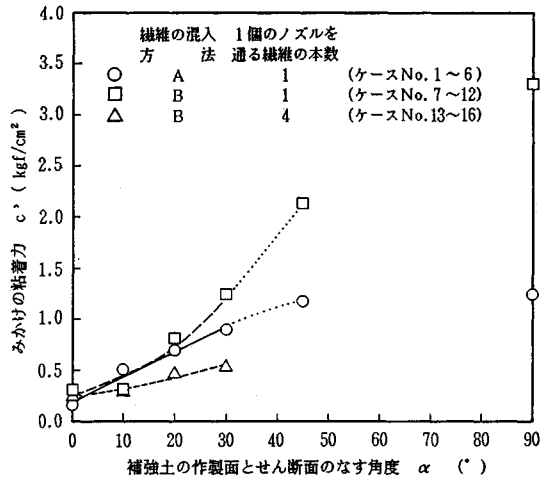


図-13 補強土の作製面傾斜角とせん断面のなす角度 α と見掛けの粘着力 c' の関係 (砂Aの場合)

b) 繊維の混入方法の影響 補強土の強度異方性は、図-12に示されるように、2.(3)b)で述べた繊維の混入方法による影響を受ける。補強土の作製面上の繊維の配列が、1方向にのみ卓越する繊維の混入方法(B法)を用いて作製した補強土の方が、互いに直交する2方向に卓越する繊維の混入方法(A法)を用いて作製した補強土よりも強度異方性が強いことが読み取れる。設計上重要な α が0度から30度の範囲に着目すると、繊維の混入方法による影響はそれほど大きくなく、1個のノズルを通る繊維の本数の影響の度合いが大きいことが読み取れる。これは、1個のノズルを通る繊維の本数が増えることによって、補強土の中の繊維の分散の状態で低下することによるものと考えられる。

(3) 透水試験結果

透水試験結果の一覧表を表-6に示す。また図-14に、標準砂を用いた場合における無補強砂と補強砂の透水係数の違いを、相対密度との関係でとりまとめた。これらの試験結果から、繊維の混入が補強土の透水係数に及ぼ

表-6 透水試験結果(透水係数 k) 一覧表

(単位 cm/sec)

	標準砂			砂 A	砂 B
	相対密度 D_r (%)			締固め度 D_c (%)	締固め度 D_c (%)
	30	50	70	90	80
無補強砂	1.66×10^{-2}	1.26×10^{-2}	1.03×10^{-2}	2.30×10^{-2}	5.52×10^{-5}
補強砂	1.51×10^{-2}	1.12×10^{-2}	7.47×10^{-3}	2.14×10^{-2}	5.34×10^{-5}

備考
 (1) 繊維の種類 SD125-24(繊維の太さ125 デニール、フィラメント数24本)
 (2) 繊維の混入比 0.2%
 (3) 試験法 定水位法(標準砂、砂A)、変水位法(砂B)

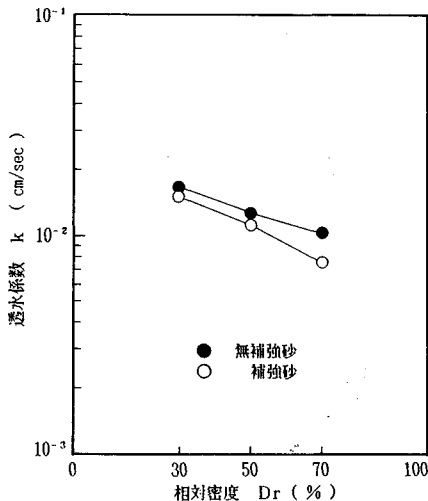


図-14 透水係数 k と相対密度 D_r の関係(標準砂の場合)

す影響は無視できるほど小さいことが判明した。これは、繊維を0.2%程度混入した通常の補強土では、混入された繊維の容積が補強土の空隙に対して占める割合が、0.5%程度と非常に小さいことから十分に理解できる。

4. まとめ

連続長繊維を用いた補強土の力学的特性を明らかにするため、砂の種類、補強土の締固め度、繊維の種類、繊維の混入比と緊張度、繊維の混入方法、補強土の作製面とせん断面のなす角度などの条件を変えた、一連の三軸圧縮試験、一面せん断試験、透水試験を実施し、以下のような知見を得た。

(1) 繊維混入の効果は、繊維が砂の粒子を拘束することによる、破壊ひずみの増大と見掛けの粘着力 c' の増加となって現われる。見掛けの粘着力 c' の大きさは繊維混入比の増加とともに著しく増大するが、補強土の締固め度にはあまり影響されない。また、細粒分の少ない砂に対しては、引張り強度が大きい繊維ほど大きな補強効果が得られるが、普通強度の繊維でも実用上大きな効果が期待される。

(2) 補強土の強度特性に影響を及ぼす各種の因子のうち、繊維の緊張度の影響がきわめて大きいので、高い繊維の緊張度を確保するような施工方法を工夫することが必要である。

(3) 補強土の強度の発現の仕方は、砂の粒度特性と繊維の太さの組合せとかなり密接に関係していて、これらの間に最適な組合せがある。すなわち、砂の粒子の大きさに対して繊維が十分太い場合は、繊維が細いほど補強効果が大きい。砂の粒子の大きさに対して繊維が細いと、繊維が破断しやすくなって逆効果になる。

(4) 連続長繊維を混入した補強土は、図-12に示すような顕著な強度異方性を有するので、これを盛土や切土に使用する場合には、この強度異方性を十分に考慮した設計を行う必要がある。補強土の作製面とせん断面のなす角度が30度程度の範囲内では、強度異方性に影響を及ぼすと考えられる因子のうち、繊維の混入方法による影響はそれほど大きくなく、1個のノズルを通る繊維の本数の影響の度合いが大きい。

(5) 繊維の混入が補強土の透水係数に及ぼす影響は、ほとんど無視できるほど小さい。

今後、これらの試験結果をもとにして、連続長繊維を用いた補強盛土に対する模型実験を行い、この実験結果や、さらに現場実験で得られた結果等を合わせて、連続長繊維を用いた補強盛土の合理的設計法を提案していく予定である。

参 考 文 献

- 1) Leflaive, E. : The Reinforcement of Granular Materials with Continuous Fibers, Second International Conference on Geotextiles, pp.721~726, 1982.
- 2) Leflaive, E. : Soil Reinforced with Continuous Yarns : the Texsol, Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp.1787~1790, 1985.
- 3) Leflaive, E. and Liausu, Ph. : The Reinforcement of Soils by Continuous Thread, Third International Conference on Geotextiles, Vol. IV, pp.1159~1162, 1986.
- 4) 坂口昌彦・E. ルフレーブ：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.
- 5) 玉井達郎・阿部・裕・北本幸義：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.
- 6) 谷 茂・山下恒夫・堀家茂一・石崎英夫：連続糸混入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.

(1990.11.8・受付)