じん性能を付加した繊維補強ソイルセメント固化体の強度特性[†]

實 松 俊 明* 持 田 悟**
田 中 俊 平** 閑 田 徹 志**

Strength Properties of Fiber-Reinforced Soil Cement Composites with Ductility

by

Toshiaki SANEMATSU*, Satoru MOCHIDA**, Shumpei TANAKA**
and Tetsushi KANDA**

This study focused on strength properties of fiber-reinforced soil cement (hereafter FRSC), which contained PVA (polyvinyl alcohol) fiber with 14 μ m diameter, 8mm length, and 0.6% volume fraction. We conducted two series of experiments, mixing tests with different soil cement matrix mix proportions, and execution tests of FRSC column. As the result of material strength tests for laboratory mixed samples, improvement in tensile strength was the most significant: about four times higher than that of plain soil cement (hereafter SC). And modulus of rupture of FRSC also increased 2-3 times above those of SC. Execution test was conducted at loamy ground, using the machine for Soil Mixing Wall Method, and material strength tests of sampling specimen were carried out. Direction dependence of modulus of rupture was found, but executed FRSC column had approximately high-performance ductility close to that of laboratory mixed samples.

Key words: Soil cement, Fiber reinforcing, Short fiber, Soil improvement, In-situ strength, Execution test

1 はじめに

現地土を骨材に利用してセメント固化体を造成するソイルセメント工法は、年々適用範囲が拡大しており地盤補強だけでなく構造物の基礎をはじめ様々な用途への展開が期待されているが、一方でソイルセメントの材料性能、特に引張性能の不足がその適用範囲を限定している。筆者らはソイルセメントに細径ビニロン短繊維を混入することで引張性能の向上を図った繊維補強ソイルセメント (Fiber Reinforced Soil Cement: FRSC) に関する研究を行っており、その力学的特性を室内混合試料により確認している。¹⁾この FRSC 固化体をスラリー系工法により実際に施工する場合、繊維分散セメントミルクの製造、ポンプによる圧送、土とのかく拌等、室内とは条件の異なる一連の工程が必要であることから、原位置における施工性および品質を確認する必要がある。今回、ソイルセメント壁工法に用いる 3 軸掘削かく拌機によって FRSC の現場施工実験を行った。本報告では現地土を用いた室内練混ぜ実験および原位置施工実験で得られた FRSC 固化体の強度特性について述べる。

2 室内練混ぜ実験

2.1 実験概要

施工実験現場から採取した土の物理特性を Table I に、本実験で使用した繊維の仕様を Table II に示す。採用した繊維は細径のビニロン繊維である。細径ビニロンは細い繊維径 (14 μ m) と高い引張強度 (1870MPa) が特徴であり、セメント系マトリクスとの付着強度が非常に高

Table I. Physical properties of soil.

Soil	Wet density ρ_s (g/cm ³)	Water content w(%)	Plasticity index I _p	Liquid limit w _L (%)	Plastic limit w _P (%)
Loam	1.34	124	48.5	142.1	93.6

Table II. Fiber properties.

Diameter (mm)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Elongation at break (%)	Length (mm)
0.014	1870	41.2	6.0	8

いことが確認されている。²⁾練混ぜ実験の配合は Table III に示すように、主に土量、セメント量および水セメント比を変化させた。繊維量はこれまでに実施した室内練混ぜ実験¹⁾から、十分な補強効果が確認されている 0.6% (体積比) とした。FRSC の練混ぜ時には、フレッシュ性状として練上がり温度・密度・フロー値を測定し、さらには繊維の分散を目視で確認した。

各配合の FRSC について、硬化後材令 28 日で圧縮・引張りおよび曲げ強度試験を行った。圧縮試験では $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体を用い、引張試験では 30×12 mm の中央部断面をもつダンベル型の供試体を用いた。曲げ試験では $40 \times 40 \times 160$ mm の直方体供試体をスパン 100mm で中央集中載荷を行った。

2.2 実験結果

FRSC のフレッシュ性状および強度試験結果を Table III にまとめて示す。Table III の強度試験結果は各配合に対

[†] 原稿受理 平成 15 年 4 月 10 日 Received Apr. 10, 2003

* 正会員 鹿島建設(株)技術研究所 〒182-0036 調布市飛田給, Kajima Corporation, Tobitakyu, Chohu, 182-0036

** 鹿島建設(株)技術研究所 〒182-0036 調布市飛田給, Kajima Corporation, Tobitakyu, Chohu, 182-0036

Table III. FRSC mix and results of laboratory mixing test.

Mix No.	Mix of FRSC						Fresh properties of FRSC			Compression test ^{*2}			Bending test ^{*2}		Tention test ^{*2}	
	Volume of Soil (m ³)	Cement ^{*1} (kg)	Water-cement ratio (%)	Thickener (kg)	Admixture (kg)	Fiber (Vol.%)	Temp. (deg.)	Density (g/cm ³)	Flow (mm)	Number of specimen	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Number of specimen	Modulus of Rupture (MPa)	Number of specimen	Tensile strength (MPa)
1-1	0.88	400	92	2.5	3	0.6	22.7	1.36	117×116	3	0.832	428	3	1.007	4	0.569
1-2		400	102	2.5	3	0.6	21.0	1.35	118×119	3	0.897	328	3	1.076	-	-
1-3		400	122	2.5	3	0.6	20.1	1.32	130×130	3	0.318	238	3	0.458	4	0.358
1-4		450	90	2.5	3	0.6	21.2	1.37	116×116	3	1.411	716	3	1.517	-	-
1-5		450	120	2.5	3	0.6	22.8	1.34	136×137	3	0.923	546	3	1.567	4	0.732
2-1	0.82	350	118	2	3	0.6	21.0	1.33	127×125	3	0.543	333	3	0.683	4	0.473
2-2		350	138	2	3	0.6	19.9	1.30	129×130	3	0.385	300	3	0.379	4	0.356
2-3		400	113	2.5	3	0.6	20.5	1.31	126×125	3	0.974	598	3	1.245	-	-
2-4		400	133	2.5	3	0.6	20.0	1.27	136×134	3	0.634	383	3	0.931	4	0.558
2-5		450	130	2.5	3	0.6	20.5	1.30	147×145	3	1.631	885	3	1.454	-	-

*1: Blast-furnace slag cement(B type)

*2: Age: 28days

Fig. 1. Stress-strain (deformation) relationships of FRSC. [Laboratory mixed samples]

して行った3～4体の試験値の平均を示している。また、弾性係数Eは圧縮強度の1/3の点に対する割線弾性係数とし、曲げ強度は曲げ試験で得られた最大曲げモーメントを断面係数で除した値で定義している。

Fig. 1に強度試験で得られた代表的な応力度—ひずみ(変位)曲線を示す。Fig. 1 (a)の圧縮試験結果およびFig. 1 (c)の引張試験結果をみると、両試験ともにひずみ2%程度以上まで圧縮および引張強度に近い応力度を保持している。また、Fig. 1 (b)の曲げ試験についても曲げ強度時の中央変形が1～2mm程度であり、引張性能をほとんど期待できない通常のソイルセメントと比べて優れたじん性を有していることがわかる。

3 施工実験

3・1 実験概要

施工実験ではソイルセメント壁工法で用いる3軸掘削かく拌機により、N値3～7の様なローム地盤に直径600mmの3連円コラム(ピッチ450mm)を2体造成した。Fig. 2に地盤およびFRSC固化体の施工断面を示す。No. 1コラムは繊維を混入したFRSC固化体(施工深さ8.0m)で、No. 2コラムは繊維を混入しないソイルセメント(SC)固化体(施工深さ3.8m)である。本地盤におけるロームの物性はTable Iに示す通りである。

FRSCの配合は、圧縮強度1.5MPa以上を目標とし、かつ施工性をできるだけ良くするため、施工時のFRSCのフロー140mm程度を目安に室内練混ぜ実験を基に決定した。Table IVにFRSCの配合(No. 1コラム)を示す。コラムの施工では、水セメント比80%のセメントミルクに繊維を混入して地盤内に投入し、さらに必要な水はセメントミルクと別系統で加水した。なお、No. 2コラムではTable IVの配合から繊維のみを除いている。

Fig. 2. Outline of execution test. [mm]

Table IV. FRSC mix for No.1 column. [Volume of soil : 0.82m³]

Fiber mixed cement slurry								Water (kg)
Cement ^{*1} C(kg)	Water W(kg)	W/C (%)	Thickener (kg)	Admixture (kg)	Fiber ratio (Vol.%)		Total (L)	
450	360	80	2.5	3	Cement slurry	FRSC	521	178
					1.75	0.6		

*1: Blast-furnace slag cement(B type)

施工直後にコラム頭部において未固化試料を型枠に採取し、硬化後に圧縮、引張りおよび曲げ試験を行った。また、硬化後にコラムを掘り出し、No. 1コラムでは鉛直コアおよび水平コアの採取を、No. 2コラムでは鉛直コアの採取を行い、圧縮および曲げ試験を行った。

3・2 実験結果

(1) コラムの施工状況

施工時のプラントにおける繊維混入セメントミルクのかく拌性、繊維の分散状態、ポンプの圧送性は良好であっ

た。また掘り出したコラムに対して任意の深度でコラムの断面観察を行った結果、セメントミルクとかく拌せずにそのまま残った土塊の混入面積の割合は3%程度であり、土とのかく拌性は良好であった。

(2) 強度試験結果

Table V に型枠採取試料の各強度試験結果を示す。強度試験結果は各コラム・各材令に対して行った3体の試験値の平均を示している。Table V によると、材令4週の圧縮強度は目標値である1.5MPaに達していないが、材令6週では強度が増加し1.5MPa以上となっている。

Fig. 3 にコア試料の強度試験結果の深度方向分布を示す。Fig. 3 より No.1 コラムの鉛直コアと水平コアの強度を比較すると、圧縮強度については有意な差は認められないが、曲げ強度は鉛直コアが水平コアの1/3程度となっている。

Fig. 4 にコア試料の代表的な応力度—ひずみ (変位) 曲線を、Fig. 5 に型枠採取試料の代表的な応力度—ひずみ (変位) 曲線を示す。Fig. 5 の型枠採取試料の結果をみると、繊維を混入した No. 1 コラムは Fig. 1 に示した FRSC の室内練混ぜ実験結果と同様の高いじん性の力学的性状が得られている。一方、繊維を混入しない No. 2 コラムについては、Fig. 5 (a) の圧縮試験では圧縮ひずみ0.5%以下で荷重の低下が認められ、Fig. 5 (b) の曲げ試験についても載荷点の変位が0.1mm程度で急激に荷重が低下し、脆性的な破壊性状となっている。

Fig. 4 のコアの結果をみると、No. 1 コラムの水平コアについては (a) の圧縮、(b) の曲げ試験結果共に、室内練混ぜ試料と同様の高いじん性が得られている。一方、鉛直コアについては、(a) の圧縮試験では水平コアと同様の力学的性状が得られているのに対し、(b) の曲げ試験では曲げ強度到達時の中央変形は0.5mm程度であり、その後の荷重の低下度合いは比較的緩やかであるものの水平コアと比較するとじん性の向上効果は小さい。繊維を混入しない No. 2 コラムについては、Fig. 5 に示す型枠採取試料の No. 2 コラムと同様、圧縮強度および曲げ強度到達後に急激な荷重の低下がみられる。

4 FRSC の強度特性

Fig. 6 に室内練り混ぜ試料、型枠採取試料、コア試料の強度試験から得られた圧縮強度と曲げ強度の関係を、Fig. 7 に圧縮強度と引張強度の関係を、Fig. 8 に圧縮強度と弾性係数 E の関係を示す。型枠採取試料は同材令におけるデータを、コア試料は深度差30cm以内のデータを用いている。また、Fig. 6～Fig. 8 には繊維を混入しない通常のソイルセメントに対する既往の関係式^{3), 4)}を、

Fig. 3. Strength of mold samples.

Table V. Strength of mold samples.

Column	Compression test			Bending test		Tension test		Age (week)
	Number of specimen	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (MPa)	Number of specimen	Modulus of Rupture (MPa)	Number of specimen	Tensile strength (MPa)	
No.1 (FRSC)	3	0.855	555	3	0.841	3	0.565	4
	3	1.520	749	—	—	3	0.595	6
	—	—	—	3	1.501	—	—	10
No.2 (SC)	3	1.669	887	3	0.455	—	—	4
	3	3.393	1831	3	0.711	—	—	10

Fig. 4. Stress-strain (deformation) relationships of FRSC. [Core samples]

Fig. 5. Stress-strain (deformation) relationships of FRSC. [Mold samples]

Fig. 6 および Fig. 7 には過去に実施したソイルセメントの室内練混ぜ実験結果¹⁾も併せて示している。

室内練混ぜ試料の結果をみると、Fig. 6 より、同じ圧縮強度における FRSC の曲げ強度 (◆) はソイルセメントに対する既往の関係³⁾あるいは過去に実施したソイルセメントに対する試験結果 (◇)¹⁾と比較して2倍～3倍となっている。また Fig. 7 より同じ圧縮強度における FRSC の引張強度 (◆) はソイルセメントに対する既往の関係³⁾および過去に実施したソイルセメントに対する試験結果 (◇)¹⁾と比較して4倍程度となっており、繊維補強の効果が明確に現われている。

型枠採取試料については、Fig. 6 より、繊維なしの No. 2 コラムの曲げ強度 (△) はソイルセメントに対する既往の関係式³⁾上に分布している。また、Fig. 6、Fig. 7 より、繊維を混入した No. 1 コラム (▲) はソイルセメントに対する既往の関係と比べて曲げ・引張強度ともに大きく、繊維による補強効果が確認できる。

コア試料については、Fig. 6 より、繊維なしの No. 2 コラムの曲げ強度 (○) はソイルセメントに対する既往の関係式³⁾上に分布している。繊維を混入した No.1 コラムの曲げ強度は水平コアと鉛直コアで傾向が異なっており、水平コアの曲げ強度 (■) は FRSC の室内練混ぜ試料と同様、ソイルセメントに対する既往の関係³⁾と比べて2～3倍と大きな値を示している。一方、鉛直コアの曲げ強度 (●) は Fig. 6 に示した式の延長上に分布し、ソイルセメントと同等の値を示している。第3章の後半でも触れているが、このように FRSC の鉛直コアと水平コアの間で曲げ特性が異なった原因としては、水平方向に回転するかく拌翼によって繊維の配向に方向性が生じたことによるものと推測される。繊維の配向性についてはかく拌方法と FRSC の流動性が大きく影響すると考えられ、今後検討を行う必要がある。

Fig. 8 の圧縮強度と弾性係数 E の関係については、図中の式⁴⁾の弾性係数 E_{50} が圧縮強度の 1/2 の点に対する割線弾性係数であるため本試験における弾性係数とは厳密には定義が異なっているが、No.1 コラムの鉛直コアの値が若干ばらついている点を除くとソイルセメントに対する既往の関係⁴⁾の範囲に分布しており、繊維なしの

Fig. 6. Effect of compressive strength on modulus of rupture.

Fig. 7. Effect of compressive strength on tensile strength.

Fig. 8. Relationship between compressive strength and elastic modulus.

ソイルセメントとほぼ同様の関係となっている。

5 ま と め

本実験結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 施工実験現場から採取した土を用いて FRSC の室内練混ぜ実験を行った結果、繊維を混入しないソイルセメントと比較して曲げ強度では2～3倍、引張強度では4倍程度の強度向上が確認された。
 - (2) 施工実験で造成した FRSC コラムから試料を採取して強度試験を行った結果、型枠採取試料および水平コアについては強度・じん性共に室内混合試料の材料特性に近い力学的性状が得られた。一方、鉛直コアについてはじん性の向上効果が水平コアと比べて小さく、曲げ強度もソイルセメントと同等であり、繊維の配向性によるものと推測される。
 - (3) FRSC の弾性係数と圧縮強度の関係は、繊維を混入しないソイルセメントに対する既往の関係とほぼ一致する傾向がみられた。
- 今後は、繊維の配向性をより向上させることを目的とした検討を行い、品質の向上を図っていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 関田徹志, 田中俊平, 野原博志, 久保田淳, 鹿島技術研究所年報, 47, 79 (1999).
- 2) T. Kanda and V. C. Li, J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, 10, 5 (1998).
- 3) テノコラム協会, “テノコラム・マニュアル基礎設計編”, p.189 (1988).
- 4) 斉藤 聡, 川崎孝人, 新名昭士, 馬場崎亮一, 宮田孝志, 第15回土質工学研究発表会, 717 (1980).