

高性能繊維補強ソイルセメント固化体の開発

Development of High-Performance Fiber-Reinforced Soil Cement

閑 田 徹 志 田 中 俊 平
野 原 博 志 久保田 淳

要 約

本研究では、ソイルセメントに繊維を導入することで工法自体の適用分野の拡大及び施工コストの削減を目的として、曲げ・せん断強度の向上及び補強材の不要な山留め壁の実現の可能性について検討を行った。ビニロン繊維を用いた繊維補強ソイルセメント (FRSC) を対象として、練混ぜ実験及び材料強度実験を行い、FRSCの練混ぜに関わる問題点の抽出やFRSCの材料性能に関する可能性の調査を行った。その結果をもとに、仮設山留め部材を対象として試設計を実施し、FRSC固化体の地盤基礎構造分野での適用について可能性を調べた。その結果、FRSCの練混ぜ時における繊維分散性はフレッシュ時の粘度をある程度高めることで確保できること、また、FRSCの圧縮強度は、単位セメント量、水セメント比、骨材種類の影響を受けるが、引張及び曲げ強度は単位セメント量及び水セメント比に支配されていることが分かった。さらに、繊維混入による補強効果は、引張強度 (3~7倍)、圧縮強度 (1.2~1.7倍)、曲げ強度 (2~3倍) の全てにおいて顕著であり、実験で得られたFRSCの材料性能から、鋼材を省略したFRSC山留め壁の可能性が確かめられた。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験計画
- III. 実験結果
- IV. 実験結果の考察
- V. 山留め構造の試設計
- VI. まとめ

I. はじめに

掘削残土を骨材として利用しセメント固化体を施工するソイルセメント工法¹⁾は、地下工事を対象として近年適用が拡大している。同工法の特徴として、1) 現場で発生した残土を利用するため建設発生土の発生を減少させることができる、及び2) 地下掘削に必要な山留め、止水壁を短期間で造成できるなど施工の合理化に適していることがあげられる。したがって、同工法は、建設工事に求められている環境問題への対応及び施工合理化の要求への解決策として期待される。

しかし、同工法は発展途上の技術であり、施工法及び材料の面からの改善の努力が続けられているが、ソイルセメント固化体の材料信頼性の低さから引張強度が構造設計上考慮できず、したがって許容曲げ強度及び許容せん断強度も低く押さえられており、構造材として利用する地下工法としては一般化するには至っていない。この様な問題に対して、ソイルセメント固化体に短繊維を混入することにより材料信頼性及び曲げ・せん断強度を大きく改善し解決を図ることが考えられる。繊維の導入による材料特性の向上の結果、対象

構造及び設計条件によってはソイルセメント構造体の断面の大幅な縮小が可能となることが期待される。軟弱地盤の改良工事を例にとると、特に浅層改良を設計する際に、改良地盤の厚さが曲げ強度で決定される場合にはこのような効果が期待できる。さらに、山留め壁のように曲げ補強鋼材が必要となる構造体では、ソイルセメントの曲げ強度の向上によって補強材が省略できれば、施工省力化の効果は非常に大きい。

このような繊維補強ソイルセメント (Fiber Reinforced Soil Cement, FRSC) の開発研究例は、多くはないものの過去に数例見られる。例えば、早崎²⁾、五十嵐³⁾の研究が挙げられる。これらの研究では、圧縮・曲げ・せん断強度の増加よりも、材料靱性の向上が顕著であったことが報告されている。しかし、これらの研究では、繊維導入による力学性能の向上について、広範な条件下での評価を得るには必ずしも至っていない。一方、最近の研究では、繊維種類・形状やマトリクス調合の組合せを適切に行うことにより、短繊維補強セメント材料の力学性能の大きな向上が図れることが分かってきており⁴⁾、FRSCにおいても文献²及び³の成果よりもさらに大きな繊維補強効果を実現することが可能と考えられる。そのためには、このような構成材料の組合せの変化がFRSC性能に与える影響について、基本的なデータを収集することが必要である。また、短繊維を混入する場合に常に問題となる練混ぜ製造時の繊維分散についても、FRSCについては詳しい検討がなされているとは言い難く、解決しなければならぬ重要な課題である。

このような背景のもと、本研究では、力学性能の向上を目指し、細径の高強度ビニロン繊維で補強したFRSCについて、マトリクス

キーワード：ソイルセメント，圧縮，引張，
曲げ，繊維補強，山留め

Table 1 Constitutive Materials

材料	種類	比重
セメント	普通	3.16
	ポルトランドセメント	
骨材	木節粘土	2.60
	7号珪砂	2.69
繊維	ビニロン繊維	1.3

Table 5 Experimental Parameter and Level

因子		0水準	1水準
a	セメント量 (kg/m ³)	150	350
b	水セメント比(%)	60	100
c	骨材種類	珪砂	粘土

Table 2 Fiber Property

比重 (g/cm ³)	繊維径 (μm)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	破断時 ひずみ(%)
1.3	14	1470	36	7.2

Table 4 Combination of Experimental Parameter

調査 No.	列						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
#1	0	0	0	0	0	0	0
#2	1	0	1	0	1	0	1
#3	0	1	1	0	0	1	1
#4	1	1	0	0	1	1	0
#5	0	0	0	1	1	1	1
#6	1	0	1	1	0	1	0
#7	0	1	1	1	1	0	0
#8	1	1	0	1	0	0	1
基本 表示	a	b	ab	c	ac	bc	abc

Table 3 Outline of FRSC Mix

調査 No.	使用土	¹ C (kg/m ³)	² W/C (%)	繊維量 (%)
#1	珪砂	150	60	0.60
#2		350	60	
#3		150	100	
#4		350	100	
#5	粘土	150	60	
#6		350	60	
#7		150	100	
#8		350	100	

1)単位セメント量 2)水セメント比

調合を変化させて練混ぜ実験及び材料強度実験の2種類を実施する。練混ぜ実験では、FRSCのソイルセメント調合が異なる場合の繊維分散の確保について検討する。また、材料強度実験では、ソイルセメント調合の違いが力学性能に及ぼす影響を明らかにし、無補強のモルタルと比較することにより繊維補強効果について検討する。さらに、仮設山留め部材を対象としたケーススタディをもとに、FRSCの地盤基礎構造分野での適用について構造上の可能性を明確にする。

II. 実験計画

1. 練混ぜ実験

(1) 使用材料

本研究で使用する主要材料をTable 1にまとめて示す。骨材に関して、実際のソイルセメントで対象となる現地発生土の種類は多様で性質に非常にばらつきが大きく、数少ない特定のサンプルでその性質を代表させるのは困難である。したがって、ここでは実際の工事で一般的な砂地盤と粘土地盤を模擬し、品質が明確で安定した木節粘土及び7号珪砂を用いた。繊維にはTable 2に示す細径のPolyvinyl Alcohol (PVA)繊維（通称ビニロン）を選択した。細径ビニロンは、Table 2に示すように、細い繊維径(14μm)と高い引張強度(1470 MPa)が特徴で、セメント系マトリクスとの付着強度が非常に強いことと相まって、セメント材料への補強効果が高いことが分かっている⁹⁾。ソイルセメントは貧調合であることから、FRSCの場合には繊維とマトリクスの付着が低くなることが懸念されるが、細径ビニロン繊維はこのような用途に適した繊維であると考えられる。また、ビニロン繊維は、他の高性能繊維、例えば炭素繊維と比較して安価であり、コスト上の利点も大きい。本研究では、このようなビニロン繊維の優れた特性を考慮し使用繊維とした。

(2) 調合

FRSCの調合は全8種類とし、実験要因として骨材種類・単位セメント量・水セメント比の三つを考慮し、水準をそれぞれ二とした。骨材は、先に述べたように珪砂及び粘土を用いた。ただし、これらの骨材は実際の現地発生土と違い水分をほとんど含んでいないので、目標単位体積重量として粘土で $\gamma = 1.6 \text{ t/m}^3$ 、珪砂で $\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$ を設定して目標含水比を定め、この含水比が確保されるようにセメント用の水量に上乘せした。単位セメント量及び水セメント比は、ソ

イルセメントの調合で一般に用いられている値の上限・下限を選んだ。前者の値として150kg及び350kg、後者は60%及び100%とした。これら三つの実験パラメータとそれぞれ二つの水準を組合せ、実験計画法を援用して8種類の調合をTable 3のように決定した。

その他の調合要因の内、FRSCの引張挙動を大きく左右する繊維長・繊維混入量はそれぞれ6mm及び0.6%とした。繊維長6mmは、フレッシュマトリクス中での分散を考えると、採用した細径ビニロン繊維の繊維長さとしてはほぼ最長であることが過去の経験から分かっており、繊維による補強効果を高めるためにこの値を採用した。また、繊維混入量については、地下工事に用いるソイルセメントの施工量はかなり大きくなることを考え、できるだけコストアップを押さえるために、建築用外装材として実用化されているビニロン繊維補強コンクリートで用いられる繊維混入量のおよそ1/2程度である0.6%とした。

良好な繊維分散を図る上で、フレッシュマトリクスの粘度が問題となるが、粘度が不足するソイルセメントマトリクスの場合には増粘剤（メチルセルロース）を適宜添加して補った。粘土骨材を用いた場合、粘土が繊維分散に適当な粘度を付与するため増粘剤は必要でなかったが、珪砂骨材の場合には全部の調合で必要となった。

また、FRSCと比較して繊維混入の効果を明らかにするために、Table 3のFRSC調合から繊維だけを除いたモルタルも合わせて練混ぜた。

(3) フレッシュ性状試験

フレッシュ時には、練上がり温度・単位体積重量・フロー値・粘度を測定し、さらには繊維の分散を目視で確認した。粘度測定には、簡易回転式粘度計（リオン製）を用い、同測定器のアナログ指示値を読みとることで測定した。しかし、このアナログ表示の指示値が時間とともに変化することから（回転体表面と試料の間のすべりが原因と思われる）、開始直後の最大指示値をもって測定値とした。このため、本研究の粘度測定は、厳密なものとは言えないが、繊維分散のための実用的な参考値を提供するためには十分と考えられる。

2. 材料強度実験

Table 3に示す8調合のFRSCについて、硬化後材令4週で引張・圧縮・曲げの各試験を行った。引張試験体は、30x12mmの断面をもつダンベル型の形状のものを使用し、荷重だけでなく、変位計を用いてひずみを測定した。曲げ試験体は40x40x160mmの直方体で、ス

パン100mmで中央点荷重により試験した。曲げ試験についても、試験体下面の荷重点直下の位置での変位をレーザー変位計で測定した。また、圧縮試験でも、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ の円柱試験体を用い、コンプレッソメータを介してひずみを測定した。

FRSCと比較するために、繊維を除いたモルタルについても同様の材料強度試験を行った。ただし、引張試験については、強度が低くダンベル型の試験体が使えないため、 $\phi 50 \times 100 \text{ mm}$ 円柱試験体を用いた割裂試験で代用した。

練混ぜ実験及び材料強度実験は、Table 4に示す直交表に割り付けて実施し、分散分析により各実験パラメータの影響を解析した。

III. 実験結果

1. 繊維分散性実験結果

(1) フレッシュ性状

FRSCのフレッシュ試験結果をTable 6に示す。Table 6にあるように、FRSCの粘度は#8を除いて全て150 Pa・sec以上であり、優れた繊維分散性を実現するにはある程度の高さの粘度を確保することが大切であることが伺える。しかし、この粘度だけで分散性を一義的に評価することは困難であることも次のことから分かった。珪砂骨材の場合の測定粘度は、良好な繊維分散性を確保できるまで試し練の際に増粘剤量を増加させていった結果得られた値であり、繊維分散に必要な最低粘度ということができるが、この最低粘度は、単位セメント量及び水セメント比によって異なっている。例えば、

Table 6 Fresh Property of FRSC

調合	骨材	¹⁾ C (kg/m ³)	²⁾ W/C (%)	温度 (°C)	単位体積重 量(g/cm ³)	粘度 (Pa・sec)	フロー
#1	珪砂	150	60	21.9	1.69	500	148×143
#2	珪砂	350	60	21.7	1.73	175	204×196
#3	珪砂	150	100	21.0	1.69	200	185×175
#4	珪砂	350	100	20.7	1.64	250	184×182
#5	粘土	150	60	22.2	1.47	800	126×124
#6	粘土	350	60	21.9	1.54	250	167×172
#7	粘土	150	100	21.3	1.47	310	148×148
#8	粘土	350	100	21.3	1.50	52	216×216

*1)単位セメント量 *2)水セメント比

#1 調合では、よい繊維分散性を得るためには、500 Pa・secの粘度が必要であったが、#2 調合では175 Pa・secで十分であった。これは、同じ粘度のフレッシュ流体であっても繊維を分散させる能力が違っていることを示しており、粘度以外の物性が影響していることが伺える。例えば、付着力⁶⁾といった物理量が影響要因として考えられるが、これら粘度以外の物性値が与える影響については今後明らかにすべき課題である。

Table 7には、Table 6のFRSCより繊維を除いたモルタルのフレッシュ性状を示す。Table 7中の粘土骨材の場合の粘度をTable 6と比較すると、モルタルの粘度がFRSCと比較してかなり小さいことが分かる。一般に、繊維を混入するとワーカビリティは大きく低下すると言われているが、この粘度の大幅な増加がその一因であることが推察される。

(2) 材料強度実験結果

Table 8に強度試験結果の一覧を示す。また、Fig. 1～3では、モルタルに対するFRSCの強度の比を各調合間で比較して表した。Table 8においてFRSCの引張強度は0.3～1.1 MPaであるが、対応する調合のモルタルと比較して3～7倍の引張強度となっていることがFig. 1から読みとれることから、繊維補強の効果が明らかであると言える。ただし、モルタルの引張強度は割裂試験による値であり、一軸引張試験とは試験方法が異なるため、特にセメント量が低い調合の場合には割裂の荷重線近辺の材料が局部的に圧縮変形することにより、この比較は厳密なものではなくなる可能性があること

Table 7 Fresh Property of Mortar

調合	骨材	¹⁾ C (kg/m ³)	²⁾ W/C (%)	温度 (°C)	単位体積重 量(g/cm ³)	粘度 (Pa・sec)	フロー
#M1	珪砂	150	60	21.8	1.67	—	189×187
#M2	珪砂	350	60	21.6	1.78	—	330×325
#M3	珪砂	150	100	21.7	1.71	—	281×276
#M4	珪砂	350	100	21.6	1.70	—	295×295
#M5	粘土	150	60	22.6	1.55	310	167×168
#M6	粘土	350	60	21.6	1.59	50	252×246
#M7	粘土	150	100	22.0	1.55	103	207×208
#M8	粘土	350	100	21.5	1.53	3.6	348×340

*1)単位セメント量 *2)水セメント比

Table 8 Mechanical Property of FRSC and Mortar

種類	骨材	調合	¹⁾ C (kg/m ³)	²⁾ W/C (%)	引張試験結果			圧縮試験結果				曲げ試験結果			
					終局ひずみ (%)	引張強度 σ_t (MPa)	引張強度比 (FRSC/ モルタル)	終局ひずみ (μ)	終局ひずみ比 (FRSC/ モルタル)	圧縮強度 σ_c (MPa)	引張強度比 (FRSC/ モルタル)	終局変位 (mm)	終局変位比 (FRSC/ モルタル)	曲げ強度 σ_b (MPa)	曲げ強度比 (FRSC/ モルタル)
FRSC	珪砂	#1	150	60	0.528	0.465	7.30	5673	1.11	0.606	1.71	0.587	6.29	0.432	2.09
		#2	350	60	0.712	1.076	4.00	2763	1.24	2.289	1.15	1.674	15.9	2.109	2.25
		#3	150	100	0.392	0.353	5.83	4145	4.92	0.450	1.59	0.575	7.66	0.410	2.53
		#4	350	100	0.126	0.615	4.02	4652	3.03	1.082	1.44	0.946	6.60	1.116	2.01
	粘土	#5	150	60	0.516	0.731	4.04	6362	1.52	2.034	1.47	0.497	4.38	1.360	3.18
		#6	350	60	0.417	1.045	3.52	7588	1.71	3.357	1.44	1.353	10.7	1.869	2.85
		#7	150	100	0.129	0.592	3.64	6802	1.53	1.429	1.27	0.340	4.43	0.680	2.24
		#8	350	100	0.221	0.646	4.04	6438	2.41	1.990	1.57	0.633	5.76	1.006	2.89
モルタル	珪砂	#M1	150	60	-	0.064	-	5107	-	0.355	-	0.093	-	0.207	-
		#M2	350	60	-	0.269	-	2225	-	1.995	-	0.105	-	0.935	-
		#M3	150	100	-	0.061	-	843	-	0.283	-	0.075	-	0.162	-
		#M4	350	100	-	0.153	-	1538	-	0.751	-	0.143	-	0.555	-
	粘土	#M5	150	60	-	0.181	-	4185	-	1.386	-	0.113	-	0.428	-
		#M6	350	60	-	0.297	-	4427	-	2.338	-	0.127	-	0.655	-
		#M7	150	100	-	0.163	-	4453	-	1.122	-	0.077	-	0.303	-
		#M8	350	100	-	0.160	-	2667	-	1.268	-	0.110	-	0.348	-

*1)単位セメント量 *2)水セメント比

を付記しておく。また、Table 8中の引張終局ひずみは0.1～0.7%で、一般的な繊維補強コンクリート(FRC)と同等以上の値となっている。ここに、終局ひずみは強度時のひずみで定義している。しかし、Fig. 4に示すように、#2調合FRSCでは、初期ひびわれ以降でもひずみが2%程度以上に達するまで、初期ひび割れ強度に近い応力を保持し、非常に優れた靱性を有していることが分かる。このような優れた靱性能は、他のほとんどの調合で観察された。

また、Fig. 2に示した圧縮強度比を見ると、FRSCの圧縮強度は、モルタルに対して1.2～1.7倍の増加に止まっており、引張強度に比べて繊維の補強効果は顕著ではない。このような圧縮強度に対する繊維補強効果は、あまり期待できないことがFRCの解析や実験によっても知られており⁷⁾、ここでも同様の結果となっている。しかしながら、圧縮終局ひずみについては、1.1～4.9倍と圧縮強度にくらべて繊維補強の効果が大きく現れている。FRSCとモルタルの圧縮応力-ひずみ曲線の比較例をFig. 5に示す。同図に示すように、FRSCの圧縮ひずみ及び圧縮強度がモルタルと比較してともに大き

く改善されていることが明らかであり、他の調合でも同様の傾向であった。

さらに、Fig. 3から、FRSCの曲げ強度はモルタルの2～3倍に達していることが分かる。したがって、繊維による補強効果は、引張強度と圧縮強度の中間程度であると言える。終局変位(曲げ強度時)については、モルタルの4.4～15.9倍と顕著に改善されている。この傾向を応力-変位関係で表したのがFig. 6である。Fig. 6中、モルタルの曲げ応力-変位曲線では、変位が増加すると応力は破壊までほぼ直線的に増加しており、初期ひび割れが破壊を決定すると推察される。FRSCでも、初期ひび割れまではモルタルと同様の直線的な挙動を示しているが、この初期ひび割れ強度はモルタルに対して高い値となっている。さらに、FRSCでは、初期ひび割れ後も変位とともに応力が増加し、終局強度は初期ひび割れのおよそ4倍程度の変位時に記録されている。他の調合でも類似の傾向を示したが、これは、FRSCの繊維によるクラック架橋効果が優れていることを示している。

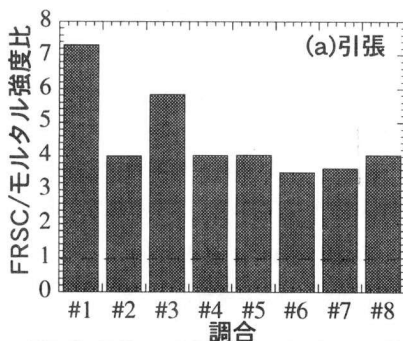


Fig. 1 Effect of Compressive Strength on Tensile Strength

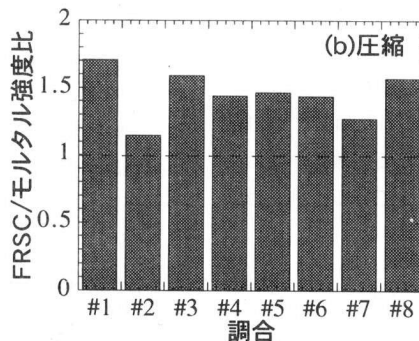


Fig. 2 Effect of Compressive Strength on Modulus of Rupture

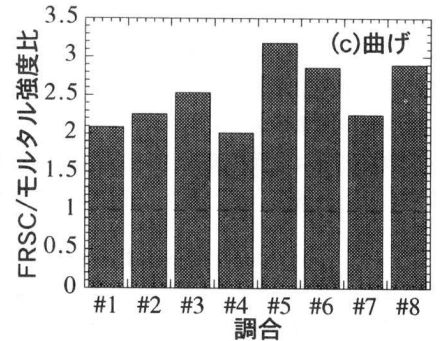


Fig. 3 Required Viscosity for Fiber Dispersion

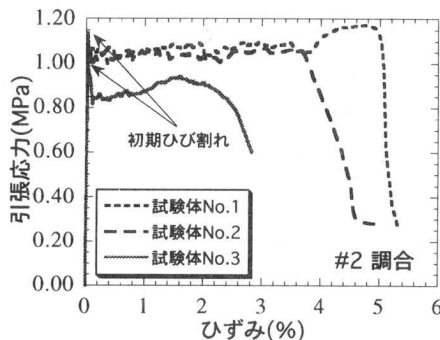


Fig. 4 Tensile Property of FRSC

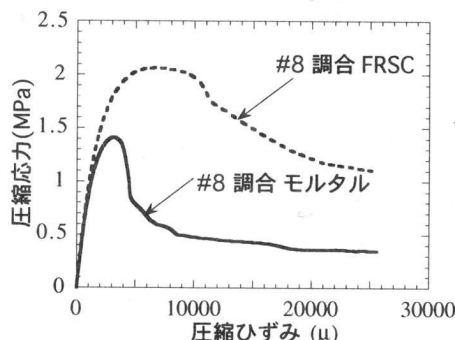


Fig. 5 Compressive Property of FRSC

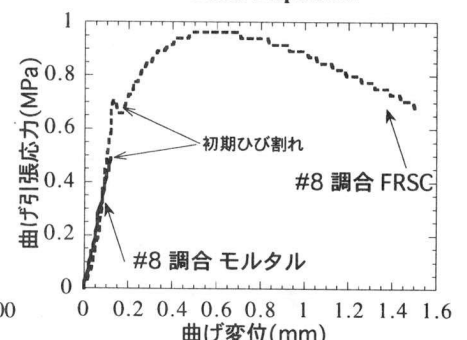


Fig. 6 Flexural Property of FRSC

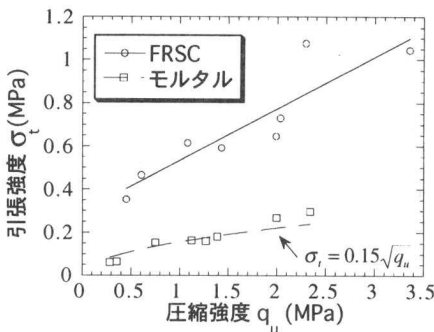


Fig. 7 Effect of Compressive Strength on Tensile Strength

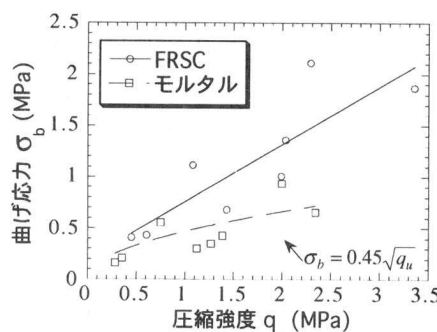


Fig. 8 Effect of Compressive Strength on Modulus of Rupture

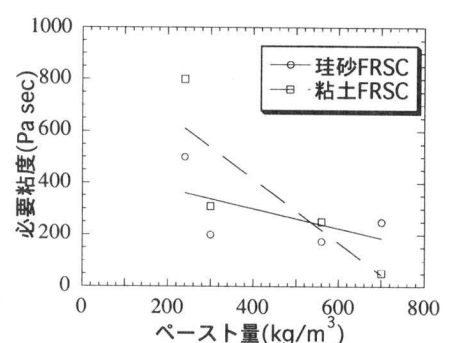


Fig. 9 Required Viscosity for Fiber Dispersion

Table 9 Analysis of Variance for Fresh Property

要因	自由度 f	変動S	分散V	分散比F ₀
a	1	146611	146611	170*
b	1	104196	104196	121
ab	1	55611	55611	64.6
c	1	10296	10296	12.0
ac	1	35511	35511	41.2
bc	1	26796	26796	31.1
err.	1	861	861	

Table 11 Analysis of Variance for Compressive Strength

要因	自由度 f	変動S	分散V	分散比 F ₀
a	1	2.203	2.203	82.8*
b	1	1.390	1.390	52.3*
ab	1	0.411	0.411	15.4*
c	1	2.401	2.401	90.2*
err.	3	0.080	0.027	

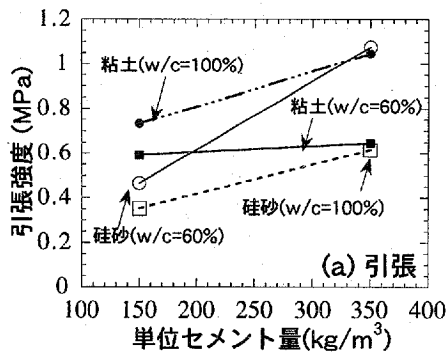


Fig. 10 Effect of Cement Content on Tensile Strength

Table 10 Analysis of Variance for Tensile Strength

要因	自由度 f	変動S	分散V	分散比 F ₀
a	1	0.193	0.193	17.5*
b	1	0.154	0.154	14.0*
ab	1	0.046	0.046	4.2
c	1	0.032	0.032	2.9
err.	3	0.033	0.011	

Table 12 Analysis of Variance for MOR (Modulus of Rupture)

要因	自由度 f	変動S	分散V	分散比 F ₀
a	1	1.294	1.294	19.2*
b	1	0.817	0.817	12.1*
ab	1	0.166	0.166	2.47
ac	1	0.300	0.300	4.443
err.	3	0.202	0.067	

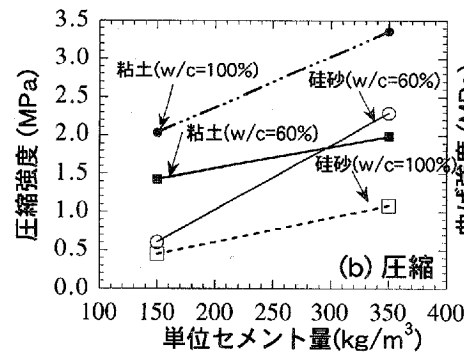


Fig. 11 Effect of Cement Content on Compressive Strength

Table 13 Influence of Experimental Parameter

	有意要因	影響が無視できない要因
粘度	セメント量	水セメント比
引張強度	セメント量	-
	水セメント比	
圧縮強度	セメント量*	-
	水セメント比*	
	骨材種類*	
	セメント量と水セメント比の交互作用	
曲げ強度	セメント量	-
	水セメント比	

*影響度が特に大きな要因

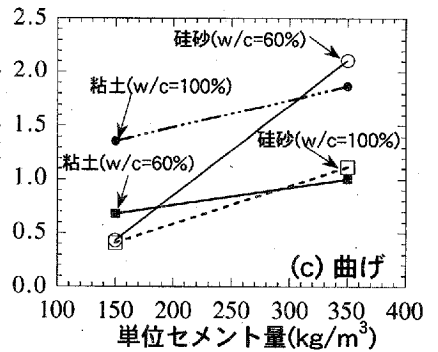


Fig. 12 Effect of Cement Content on Modulus of Rupture

(3) 圧縮強度と引張・曲げ強度の関係

ソイルセメント固化体の引張強度は、圧縮強度の関数として表すのが従来一般的であり、ここでも、圧縮強度と引張強度の実験値の関係を Fig. 7 に示した。Fig. 7 から、FRSC 及びモルタルともに、圧縮強度と引張強度には強い相関があることが分かる。このうち、モルタルに関しては、次のような関係で近似されることが報告されている⁸⁾。

$$\sigma_t = \alpha \sqrt{q_u} \quad (1)$$

σ_t : 引張強度(MPa)

α : 実験定数

q_u : 圧縮強度(MPa)

文献8)では、 α の値として0.09-0.15が提案されており、Fig. 7 に示すように本研究のモルタルの結果とよい対応を示している。また、FRSCの引張強度は、Fig. 7 から明らかなように、圧縮強度につれて増大しているが、同じ圧縮強度の時の引張強度はモルタルの3~4倍の値となっており、繊維補強の効果が明らかに現れている。

ソイルセメント固化体の曲げ強度についても圧縮強度との関係を Fig. 8 に示した。曲げ強度と圧縮強度の関係については、引張強度の場合と同様に次の実験式が提案されている⁸⁾。

$$\sigma_b = \beta \sqrt{q_u} \quad (2)$$

σ_b : 曲げ強度(MPa)

文献8)では、 β の値として0.3~0.45が提案されており、引張強度の場合と同様、Fig. 8 に示すように本研究のモルタルの結果とよく一致している。Fig. 8 のFRSCの曲げ強度は、引張強度の場合と同様に、圧縮強度につれて増大しているが、同じ圧縮強度の時の曲げ強度はモルタルの1.5~2倍の値となっており、引張強度の場合ほど顕著ではないが繊維補強の効果が明らかである。

IV. 実験結果の考察

1. フレッシュ時粘度の分散分析及び考察

繊維分散に必要な粘度が、単位セメント量及び水セメント比によって異なっている傾向について前節で述べたが、この必要粘度に与える各実験要因の影響を分散分析を行って明らかにした。Table 9 にその分析結果を示す。誤差検定においては、直交表(Table 4)に示したように要因を割り付けた各列のうち、最も分散が小さな1列を誤差としてプールし、5%危険率で検定した結果有意となった要因に“*”を付けて表中に表示した(F値161)。同表より、セメント量が必要粘度に対して最も大きな影響を与えることが分かる。また、有意とはならなかったものの、水セメント比の影響も無視できない。これらの結果をもとに、セメント量及び水セメント比に大き

な影響を受けるFRSC中のペースト量と繊維分散に必要な粘度の測定値との関係をプロットしたのがFig. 9である。各調合のペースト量は、Table 3に示した単位セメント量と水セメント比から算定した。同図から、ペースト量が300kg/m³を下回ると必要粘度が極端に高くなる傾向があるようである。このことより、繊維分散を容易にするにはできるだけペースト分の多いソイルセメントとするのが有利であることが類推される。

2. 材料強度試験結果の分散分析及び考察

Table 10に引張強度に関する分散分析結果を示す。ここでは、最も分散が小さな3列を誤差としてプールし、フレッシュ時粘度の場合と同じく5%危険率で検定した（F値10.1）。その結果、Table 10にあるように、要因a（単位セメント量）及び要因b（水セメント比）が有意となった。同様の分散分析の結果、圧縮強度に関しては、Table 11に示すように要因a（単位セメント量）、要因b（水セメント比）、要因c（骨材種類）の全主要因が有意となり、さらに、単位セメント量と水セメント比の交互作用が有意であった。また、これら圧縮強度への主効果を表す分散比F0は引張強度の場合と比較して数倍になり、圧縮強度に対するこれら要因の主効果が大きいことが明らかとなった。さらに、曲げ強度の分散分析では、Table 12に示すように単位セメント量と水セメント比が有意となり、引張強度の場合と類似の結果となった。3種類の強度に対する影響が全て有意となった要因は単位セメント量であり、この単位セメント量が強度に与える影響をFig. 10～12に表す。単位セメント量が大きくなるほど各強度とも明らかに増加していることが分かる。

Table 14 Estimated Moment Capacity for FRSC Earth Retaining Wall

Wall E _c =2GPa, ε _{cu} =500μ, ε _{cu} =1000μ, ε _{cu} =2%, τ _{xy} =1MPa, τ _{xy} =2MPa						
FRSC 山留め壁 の厚さ (m)	ひびわれ時		降伏時		塑性時	
	M _u (kN・m/m)	1/ρ _c (μ・mm ⁻¹)	M _y (kN・m/m)	1/ρ _y (μ・mm ⁻¹)	M _u (kN・m/m)	1/ρ _u (μ・mm ⁻¹)
0.55	50	1.8	84	4.0	101	54.5
0.7	82	1.4	136	3.2	163	42.9
1.0	167	1.0	278	2.3	333	30.0
1.5	375	0.7	626	1.5	750	20.0
2.0	666	0.5	1112	1.1	1333	15.0

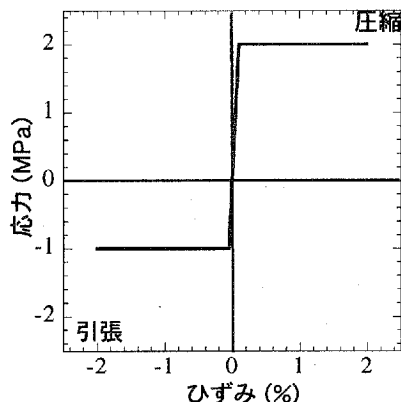


Fig. 13 FRSC Material Property for Trial Design

ソイルセメント固化体の圧縮強度が単位セメント量、水セメント比、土質に大きく依存することは、過去の研究成果（例えば文献8）によって確かめられており、本研究ではFRSCについても同様の傾向があることが確かめられた。しかし、FRSCの圧縮強度とこれら影響因子の定量的な関係については、本研究の範囲では実験数が限られており、明確な結果を得るには至っていない。

引張強度については、FRSCの分散分析の結果から、単位セメント量及び水セメント比の影響を受けるものの、圧縮強度の場合と異なり土質にはあまり依存しないという傾向があることが分かった。この結果は、FRSCの圧縮強度と引張強度を決定するメカニズムが異なることを反映していると考えられ興味深い。ソイルセメント固化体やモルタル・コンクリートのようなセメントペーストと骨材の2相材料の場合、その圧縮挙動はセメントペーストと骨材の界面性状に大きく依存していることが広く知られている。FRSCの圧縮挙動についても、繊維補強効果が圧縮時には副次的な役割しか果たさないことから考えて⁷⁾、ソイルセメントマトリクスの圧縮時の性質がFRSCの圧縮挙動に対して支配的であることが推察される。さらに、このソイルセメントマトリクスの性質は、土質の相違に起因する土粒子の力学的性質の違い及び骨材-セメントペースト界面性状の違いによって影響を受けるから、この土質の相違がFRSCの圧縮強度に反映されたと推測される。しかし、本研究で対象としたFRSCでは、モルタル単独の場合よりも引張強度が大きいため、繊維によるクラックの架橋強度によって引張強度が決まると考えられる。この架橋強度は、繊維の付着特性、繊維長、繊維径等の関数となるが⁹⁾、本実験のように、使用する繊維の種類・形状・混入量が同一の場合、架橋強度は付着特性のみによって大きな影響を受けると考えてよい。したがって、本研究の分散分析の結果から、この付着特性は、単位セメント量や水セメント比によって決定されるセメントペーストの性質には影響を受けるが、土質には影響を受けにくいこ

Table 15 Estimated Moment Capacity for Ordinary Soil Mixing Wall

Wall E _c =210GPa, ε _{cu} =1140μ, ε _{cu} =2%, τ _{xy} =240MPa						
親杭	ピッチ	降伏時		塑性時		備考
		M _y (kN・m/m)	1/ρ _y (μ・mm ⁻¹)	M _u (kN・m/m)	1/ρ _u (μ・mm ⁻¹)	
SS400 H=396× 199×7× 11	0.45m	539	5.76	604	101	Z=1,010 (cm ³ /本) A=72.16 (cm ² /本) I _x =20,000 (cm ⁴ /本) 塑性弾面係数比1.12
	0.675m	359	5.76	402	101	

*SMW D 0.55m φ 0.45m

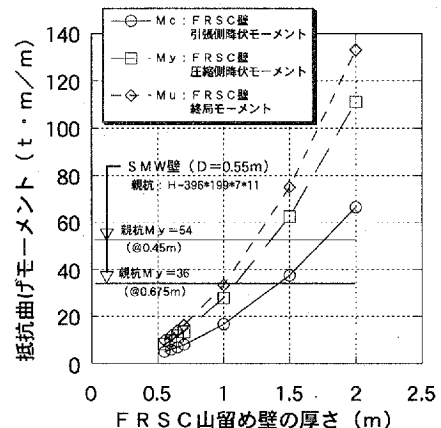


Fig. 14 Moment Capacity Comparison between FRSC Wall and Ordinary Soil Mixing Wall

とが推察される。このソイルセメント-繊維間の付着特性に影響を与える要因については、繊維の引き抜き試験によって直接的な検討を今後加える予定である。

V. 山留め構造の試設計

本研究では、Fig. 4に示す#2調合のように、引張強度1MPa程度を高い靱性ととも確保できるFRSCの可能性を示したが、このような材料を用いた構造体の性能について試設計を実施し、適用性の検討を行う。現状ではFRSCのような材料を主要な地下構造体として用いることは現実的でないため、ここでは、仮設部材である山留め壁を対象とする。山留め壁は施工を合理化する際にまず検討される項目で、合理化に対するウエイトが最も高い工事となっている。最近では、地下工事の自由な空間を確保するために水平支保工を使わない自立山留め壁の計画が多く生じている。そのために壁厚5m程度のブロック式ソイルセメント自立山留め壁やH鋼により高い曲げ剛性を確保したSMW(Soil Mixing Wall)山留め壁が採用されることが多くなっている。

試設計に用いるFRSCの材料性能として、強度及び靱性とも高い値を示した#2調合の結果をもとに、Fig. 13に示すような応力ひずみ曲線を考えた。Fig. 13にあるように、引張強度は1MPa、圧縮強度は2MPaで、設計用終局ひずみは引張り・圧縮とも2%とした。ただし、ここで言う設計用終局ひずみとは、Table 8で示した終局ひずみ(強度時のひずみで定義)とは異なり、連続的なひずみ軟化が起こるひずみレベルを採用した。この定義は、ここで対象とするFRSCの引張挙動の場合、最大応力に達しても軟化挙動が必ずしも連続して起こらず抵抗応力を維持できることを考慮して採用した。また、弾性係数は、試験値をもとに2GPaを用いた。

この結果を利用して、壁状に造成される山留め壁の抵抗曲げモーメントを壁厚をパラメータにして算定した。抵抗曲げモーメントは、FRSC山留め壁の引張り側にひび割れが生じて降伏する引張り側降伏モーメント、次に圧縮側も降伏する圧縮側降伏モーメント、全断面が塑性化する終局モーメントで定義できる。算定した山留め壁の抵抗曲げモーメントをTable 14に示した。

一方、高さ10m以内の掘削で山留め壁に発生する曲げモーメントは200~300kN・mであるが、この設計曲げモーメントに対して一般的なSMW山留め壁を中期荷重で設計すると、親杭としてH-200x400を@450~675ピッチに配置することになる。この仕様でSMW山留め壁が保持する抵抗曲げモーメントを算定し、Table 15に示した。この算定にあたり、芯材として用いる鋼材の弾性係数を210GPa、及び降伏強度を240MPaと仮定した。

FRSC山留め壁の実際の設計では(設計用)終局ひずみが2%(20,000 μ)程度と大きいので圧縮側が降伏する時点(1,000 μ)の圧縮側降伏モーメントによって設計することが十分可能と考えられる。また、SMW山留め壁も親杭に新品材を利用することで短期許容曲げモーメントに相当する降伏モーメント(縁ひずみ度1,140 μ 程度)で設計できる。Fig. 14に試算したFRSC山留め壁とSMW山留め壁の抵抗曲げモーメントの関係を示した。

同図から親杭としてH-200x400を@450~675ピッチに配置するSMW山留め壁の抵抗曲げモーメントと同等な抵抗曲げモーメントを持つFRSC山留め壁の壁厚は約1.1~1.4mであることが分かる。

この壁厚は前記した壁厚5m程度のブロック式ソイルセメント自立山留め壁と比較すると十分小さく、SMW山留め壁と比べても必要な鋼材が省略できることから合理的な山留め壁としてのFRSC山留め壁実現の可能性は高いと言える。

VI. まとめ

本研究より次のことが明らかとなった。

- (1) 細径ビニロンFRSCのフレッシュ時に、繊維分散性の目視による観察及び簡易円筒型粘度計による粘度測定を行った結果、繊維分散はある程度以上に粘度を高めることで確保することができ(本研究の範囲では150 Pa sec程度)、繊維分散をより容易にするにはできるだけセメントペースト分の多いソイルセメントとするのが有利であることが分散分析の結果から類推された。
- (2) 繊維混入による補強効果は、引張・曲げ・圧縮強度の全てにおいて顕著で、繊維を抜いた同調合のモルタルとFRSCの強度を比較すると、引張強度は3~7倍、圧縮強度で1.2~1.7倍、曲げ強度では2~3倍の強度向上が観察された。
- (3) FRSCの圧縮強度は、実験要因である単位セメント量、水セメント比、骨材種類の全てに影響を受けるが、引張及び曲げ強度は単位セメント量及び水セメント比に支配されていることが推察される。
- (4) 高さ10m以内の地盤掘削で使用される一般的なSMW山留め壁と同じ曲げ性能を有する、H鋼を設置しないFRSC山留め壁は壁厚1.1~1.4m程度となり、H鋼を設置しない場合のブロック式ソイルセメント山留め壁の壁厚5m程度と比較すると鋼材を省略したFRSC山留め壁実現の可能性は高いと言える。

参考文献

- 1) セメント協会;セメント系固化材による地盤改良マニュアル, 1985.
- 2) 早崎;各種の繊維を利用した補強土工法の開発, 第17回土質工学研究発表会, pp. 2469-2472, 1982.
- 3) 五十嵐, 深沢, 八鍬;繊維補強ソイルセメントのせん断強度特性, 第24回土質工学研究発表会, pp. 1953-1954, 1990.
- 4) Li, V. C. and Leung, C. K.; Steady-state and multiple cracking of short random fiber composites, J. of Engineering Mechanics, ASCE, pp. 2246-2263, 1992.
- 5) Kanda, T. and Li, V. C.; Interface property and apparent strength of a high strength hydrophilic fiber in cement matrix, J. of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 10, No.1, pp.5-13, 1998.
- 6) 井上, 和泉他;超ワーカブルコンクリートの調合設計に関する基礎研究(その2 超ワーカブルコンクリートを構成するフレッシュモルタルの粘性特性と付着特性に関する一考察), 日本建築学会大会梗概集, pp.917-919, 1992.
- 7) Li, V. C.; A simplified micromechanical model of compressive strength of fiber-reinforced cementitious composites, Cement and Concrete Composites, Vol. 14, pp.131-141, 1992.
- 8) テノコラムマニュアル基礎設計編, テノコラム協会, 1988.
- 9) Kanda, T. and Li, V. C.; Effect of apparent fiber strength and fiber-matrix interface on crack bridging in cementitious composite, J. of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 125, No.3, 1999.

