

V-6

液状化防止用超微粒子注入材について

日鐵セメント㈱ 星 俊彦
日鐵セメント㈱ 唐津 啓一

1. まえがき

日本は火山国であり、また海岸地区の埋立により、硫酸塩および塩化物を含む海水等に満たされた地盤も多い。これらの地盤の改良法の1つとして注入による方法が考えられるが、セメント系注入材を用いた場合注入の困難性が予想される。通常、グラウトに用いるミルクには粒子の安定化を計るために分散剤が用いられる。セメント系注入材粒子は水に接触すると疎水性コロイドとみなせる分散状態が得られるが、逆に粒子間引力（ファンデルワールズ力）が働き、粒子が細かいほど凝集力が強くなる。分散化の理論は電気二重層によることが明らかにされ、分散剤は同電荷を付与することにより電位を大きくし、粒子間の反発力を利用している。分散の安定度は注入材の水和特性、粒子径等にも影響を受ける。

海水は塩化物および硫酸塩を主成分とする強電解質物質であり、電解質物質の凝集作用の利用は工業的にも行われており、コロイドを凝集させるのに必要な塩の最小濃度を臨界凝集濃度もしくは凝析価と知られている。海水の凝集作用については、河川に含まれる永久コロイドである粘土鉱物が海水に接することにより凝集沈殿する現象で周知のことである。電解質物質が凝集力を有する原理は粒子の周りに形成した電気二重層の厚さを減少させる結果、粒子同志が接近し凝集することによる。ポルトランドセメントミルク中の粒子の凝集速度は非常に速く、海水砂層への浸透注入は困難であることが分かった。

著者らは、高炉スラグの水和特性と分散剤の効用に着目し、海水を含む砂層地盤に浸透可能な超微粒子注入材（以下SF-L）の特性を見出したので、現場施工例と併せて報告する。

2. 実験の概要

グラウトに用いられるミルクに必要な特性としては、(1)材料分離を起こさぬこと（安定性）(2)流動性が良いこと（粘性）(3)浸透性が良いこと（4）耐久的であること（強度、止水性他）等が重要である。本実験ではこれらの項目について、ダムの基礎処理に用いられている超微粒子注入材（以下SF）との比較を行い、SF-Lの基本特性を明らかにすることにした。

2.1 使用材料

注入材にはSFとSF-L、使用水は水道水と海水とし注入砂層に用いる砂は豊浦標準砂と7号珪砂、注入ミルクの分散剤にはコンクリート用混和剤のマイティ150Rを用いた。SF-Lは水和増進に必要な成分を少量含む高炉スラグを主材とし、粒度調整をした平均粒径 $2.8\mu\text{m}$ の超微粒子注入材である。液状化を発生しやすい砂層地盤の粒度幅は比較的狭い $0.1\sim 1\text{mm}$ の範囲との報告¹⁾もあり、本実験には表-2に示す粒度からなる砂を用いた。海水は室蘭市祝津より採取した。

2.2 実験の方法

ミルクの安定性試験は海水の影響を調べるため、水比400%のミルクを調整し、攪拌時間毎にサンプリングを行い、

表-1 注入材の物理的性質

注入材	比重	圧縮強度 (kgf/cm ²)			
		3日	7日	28日	91日
SF-L	2.93	137	204	316	410
SF	3.00	181	315	520	556

JIS R 5201

表-2 砂の粒度

砂の種類	比重	粒度 (mm)		均等係数 U_c
		D_{10}	D_{60}	
標準砂	2.63	0.178	0.216	1.2
7号珪砂	2.63	0.069	0.147	2.1

1) 中田邦夫 寺内潔 千代義広：液状化防止対策とその実証試験，土と基礎，32-12(323)，1984

レーザー回折法により測定した。また、シリンダーによる沈降実験を行い沈降特性を比較した。ミルクの流動性は各水比の粘度を測定し、分散剤の効果も調べた。ミルクの浸透性は注入材および間隙水の違いによる影響を調べるため図-1に示す装置により、自然流下浸透性実験を行い、さらに、注入圧力および注入砂層粒度の違いによる影響を調べるために、長円筒アクリル管(100cm)に所定間隙率の注入砂層を作り、図-2に示す装置で圧力注入実験も行った。注入後の硬化サンドゲルの強度、止水性は所定材令毎に $\phi 5.5 \times 11$ cmの寸法に切断した供試体について透水試験および圧縮強度を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 ミルクの安定性

海水を用いたミルク中の注入材平均粒子径を時間毎に測定した結果を図-3に示す。混練水および

注入材による定性的差は明らかであり、特に海水においては攪拌時間15分後から粒子の粗大化が認められる。海水に含まれる Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} イオンによる電気二重層の厚み減少により急速に凝集が進むものと考えられる。また注入材による差が認められるのは、SF-Lの場合、溶出 Ca^{2+} が少なく、水和が抑制されるため水和凝集による影響が少ない結果と考えられる。しかしながら、本測定結果は400%のミルク中のアクチュアルな粒子径を示したものでなく、測定器による条件は極めて薄い溶液条件でのみ測定が可能のため、サンプリングした少量のミルクをアルコールに高分散化して測定した結果である。またサンプリング誤差か凝集度の影響なのかバラツキも大きい。海水を用いた水比250%のミルクによる沈降特性を図-4に示す。一般的にミルクの沈降特性は沈降開始後に等速沈降現象を示す自由沈降域と等速沈降後に湾曲部を示す圧縮沈降域が認められるが、条件によっては判然としない場合もある。粗大もしくは凝集した粒子は沈降速度が大きく、粒子間の水隙も大きくなるために最終沈降容積は大きくなる。本実験の結果、分散剤無添加の場合には注入材による差は大きくないが、SF-Lのほうが沈降速度が小さく、また、最終沈降容積も小さくなり分散状態は良いと判断できるが、両注入材とも等速沈降部が判然としなく、初期から一部凝集化が進んでいるものと思われる。分散剤添加の効果は顕著であり、両注入材とも長時間にわたり等速沈降部が認められ、沈降速度も小さい。分散性はSF-Lのほうが好ましく、90分後には凝集度の弱い粒子に認めら

表-3 自然流下浸透性実験の条件

注入材	水比 (%)	分散剤 (%)	注 入 層 (15cm)			
			砂	間隙水	間隙率 (%)	透水係数 (cm/sec)
SF-L	400	0.75	標準砂	海水	45	2.6×10^{-2}
SF		1.5		水道水		

表-4 圧力注入実験の条件

シリーズ	注入材	水比 (%)	注 入 層 (100cm)				注入圧力 (kg/cm ²)
			砂	間隙水	間隙率 (%)	透水係数 (cm/sec)	
I	SF-L	250	標準砂	海水	43	2.1×10^{-2}	0.5, 1.0
	SF			海水			
II	SF-L	1000	7号珪砂	海水	47	6.6×10^{-3}	1.0, 2.0
				水道水			

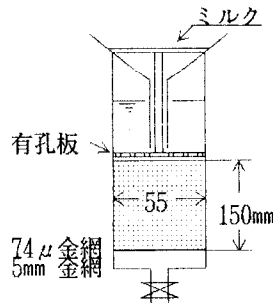


図-1 自然流下浸透性装置

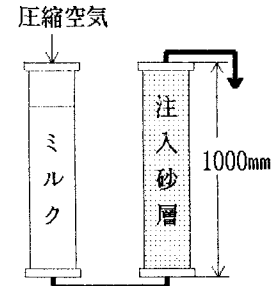


図-2 圧力注入装置

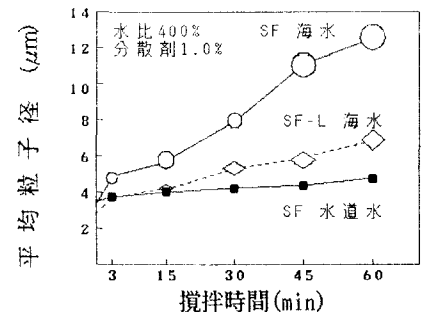


図-3 ミルク中の注入材平均粒子径

れる透液現象による圧縮沈降部が認められる。最終沈降容積における水比は分散剤無添加の場合SF-Lは136% SFは152%であり、分散剤添加の場合、SF-Lは85% SFは114%となった。

3.2 流動性

水道水を用いたSF-Lミルクの攪拌直後の二重円筒型回転粘度計で測定したせん断速度とせん断応力の関係を示したのが図-5である。水比200%で、分散剤が無添加の場合、ビンガム塑性流動に近い挙動を示し、低いせん断速度で受けるせん断応力が大きい。分散剤を添加した場合、さらに水比を大きくして400%にした場合は、ダイラント流動に近い挙動を示し、せん断速度10~80 sec⁻¹の範囲内ではせん断応力とほぼ直線に近い関係が成り立つ。実用的ミルクにおいては注入材粒子の高分散化により、ダイラント流動を示すと考えて良いようである。

ミルク中のSF-Lの濃度と粘度の関係を示したのが図-6である。粘度と濃度の関係は精度の良い相関性が得られ、また分散剤の添加によっても同様の関係が得られ、低粘効果も顕著である。ミルクの粘性は注入材粒子の占める相対容積が支配的であると言える。注入用ミルクにSF-Lを用いる場合ミルクの安定性流動性という点からも、分散剤の適切な使用法が極めて重要である。

3.3 浸透性

(1) 自然流下浸透性実験

水比400%のミルクを用いて表-3に示す条件で自然流下浸透性実験を行った結果を表-5に示す。間隙水に水道水を用いた場合の浸透性は注入材による差は認められないが、海水を用いた場合、浸透性は低下し、注入材による差も明らかに認められ、SF-Lは15cm以上の浸透長が得られたが、SFは初期浸透速度は変わらないが、短時間で浸透が停止し、8cmの浸透長しか得られなかった。

(2) 定圧注入実験

表-4に示す注入条件により、一定圧力でミルクを注入し注入時間(T)と注入量(Q)の関係を求め、最終浸透長を測定した。透水係数が比較的大きい標準砂を注入砂層とし、間隙水に海水を用いた注入実験の結果を図-7に示す。注入圧力が0.5kg/cm²の場合の浸透長はSF-Lで81cm、SFでは28cmであり、注入圧力が1.0kg/cm²では

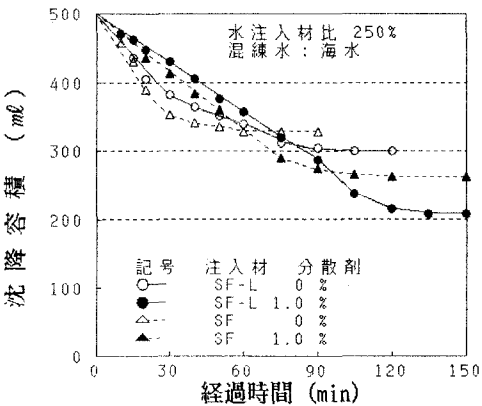


図-4 経過時間と沈降容積

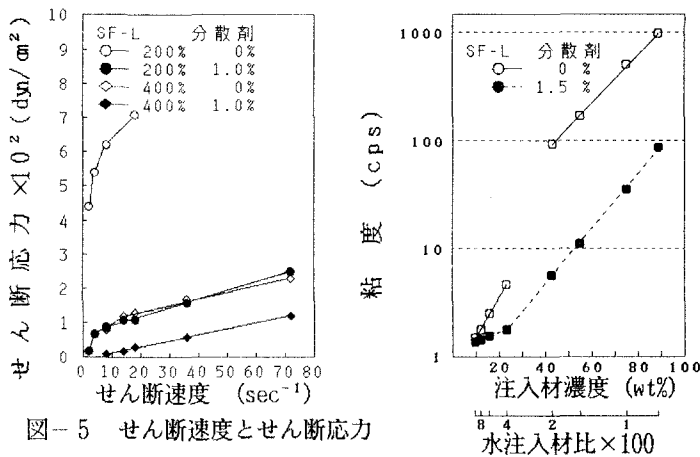


図-5 せん断速度とせん断応力

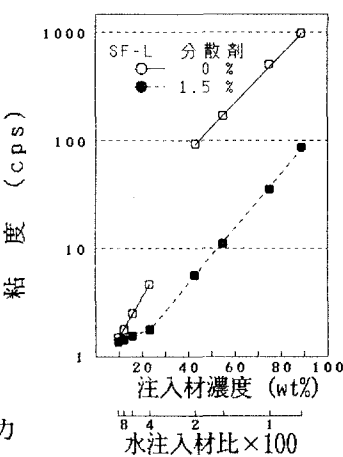


図-6 注入材濃度と粘度

表-5 自然流下浸透性実験結果

注入材	間隙水	浸透長 (cm)	砂層通過時間 (m-s)	浸透継続時間 (m-s)
SF-L	水道水	15全長	1 - 16	2 - 18
	海水	15全長	1 - 30	1 - 51
SF	水道水	15全長	1 - 26	2 - 05
	海水	8		0 - 40

砂層通過時間：全長15cmの通過に要した時間
浸透継続時間：浸透開始からミルクが停止するまでの時間

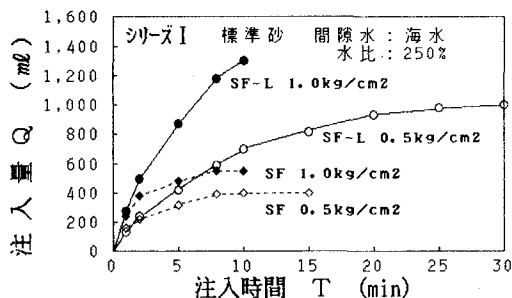


図-7 注入時間と注入量

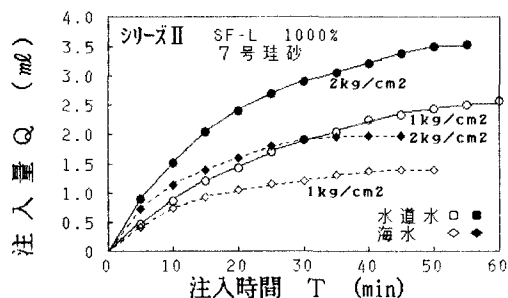


図-8 注入時間と注入量

浸透性が向上し、SF-Lでは100cm以上、SFは45cmとなった。SFは水比が小さいこともあり、ミルクが海水と接触することにより短時間でも凝集化が進み浸透性を阻害するものと考えられる。SF-Lの浸透注入による適用砂層を広げる目的で、透水係数の小さい7号珪砂を用いて注入実験を行った結果を図-8に示す。本実験の結果から、注入圧力2kg/cm²の浸透長は水道水で66cm、海水では44cmとなり間隙水の影響が大きく、海水の場合は浸透性が低下する。注入圧力2kg/cm²以下では間隙水の違いによらず1mの浸透長を得ることができなかった。細砂の場合、高水比のSF-Lを用いても注入時間の経過と共に凝集化が生じていると予想できる。

表-6 サンドゲルの圧縮強度と変形係数

注入材	注入圧力 (kg/cm ²)	圧縮強度(kgf/cm ²)		変形係数(kg/cm ²)	
		7日	28日	7日	28日
SF-L	0.5	31.5	60.4	9480	18900
	1.0	36.5	64.3	13410	20010
SF	0.5	40.2	67.5	12600	19650
	1.0	46.7	75.6	16550	24600

3.4 強度および止水性

標準砂を注入砂層とした注入後の硬化サンドゲルの圧縮強度、変形係数を表-6に示す。材令7日では30~40kgf/cm²、材令28日では60~70kgf/cm²の高強度を示し、変形係数も1×10⁴~2×10⁴kg/cm²の値が得られた。

また、7号珪砂を用いたSF-Lミルクによる注入硬化サンドゲルの材令28日の圧縮強度と透水係数の結果を図-9に示す。圧縮強度は90~190kgf/cm²を示し、透水係数は1~7×10⁻⁷cm/secとなった。水道水と海水それぞれに強度と透水係数の相関が認められ、同一強度であれば海水のほうが透水係数は小さいようである。この透水係数の低下は、粒子の水和によるものか砂層間隙の低下によるものか定かではない。

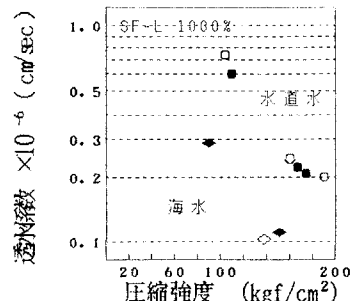


図-9 圧縮強度と透水係数

4. 現場施工例

異常波浪のため破壊したケーソンの補強として、ケーソン中詰砂の注入固結による注入工法が採用された。ケーソン内1マスは3.6×4.3×深さ11.5mで、中詰砂は0.1~4.2mmの粒度で間隙率が40%、常時海水に満たされている。注入材としては浸透性に優れ、低圧で注入可能で、硬化後は耐久的であることが要求された。室内予備試験により配合を決定し、本工事では二重管ダブルパッカー注入工法(ソレクンシュ工法)で水比250%のミルク注入を行い、3週間後、注入性状および圧縮強度、変形係数の確認のためコアを採取した。

SF-L注入部位のコアは均一な状態で固結しており、十分な浸透性が発揮されていた。コアの圧縮強度は20~30kgf/cm²となり、変形係数は7000~9600kg/cm²の値が得られた。

5. 結論

液状化防止用超微粒子注入材は、海水を含む砂層地盤に対して極めて有効であることが確認できた。