

# SG（自硬性安定液）工法に関する研究（その11）

——繊維状粘土を用いた海水練り SG の開発と現場適用例——

久保 博 川地 武  
吉岡 茂 宮崎 正宏  
(本店) (本店)

## Studies on SG (Self-hardening Slurry) Method (Part 11)

——Development and Field Application of SG-added Fibrous Clay Using Sea Water for Mixing Water——

Hiroshi Kubo Takeshi Kawachi  
Shigeru Yoshioka Masahiro Miyazaki

### Abstract

It is considerably expensive to transport clean water to a remote place such as an artificial island. Therefore, when the SG (Self-hardening Slurry) Method is applied in such a place, it is desired to use sea water for mixing water of the SG. An SG which gives good performance in using sea water was developed by means of addition of a fibrous clay. This report describes the properties and field application of the SG. ① The fibrous clay raised the viscosity and restrained the bleeding of the SG using sea water with a comparatively small quantity of addition. This effect was not shown by bentonite. ② The strength and the permeability of the SG after solidifying were influenced by the mix proportions and the aging time. And, a high correlation was indicated between the strength and the permeability. ③ This SG was adopted for the large-scale construction of sheathing and a water cut-off wall at an island mainly reclaimed with broken rock. As a consequence, a diaphragm wall of high quality was successfully constructed.

### 概 要

人工島などで、大量の清水を輸送することは、かなりのコスト高である。従って、そのような場所でSG(自硬性安定液)工法によって地中連続壁などをつくる場合、SGの混練水として海水を用いることが望まれる。そこで、ベントナイトと繊維状特殊粘土を併用することによって、海水練りでも十分な性能を発揮できるSGを開発した。その性状と現場適用例について述べた。① 繊維状特殊粘土は、比較的少ない添加量で、海水練りSGの粘性を増大させ、ブリージングを抑制するというベントナイトのみの場合では得られない効果を示した。② 繊維状特殊粘土を添加した海水練りSGの固化強度と透水係数は、従来のSGと同様に配合と材令に影響された。そして、強度と透水係数の間に高い相関がみられた。③ 岩砕埋立てを主体とする若齢の人工島における大規模な土留め遮水壁工事に、この海水練りSGが採用され、優れた品質を有することが確認された。

### 1. まえがき

自硬性安定液(以下、SGという)工法は、固化材を含有する自硬性のスラリーを用いて地中連続壁などを築造する工法である。SG工法は、仮設の土留め遮水壁<sup>1)</sup>や地下ダムの遮水壁<sup>2)</sup>を造る工法として、またRC地中連続壁の掘削に先立つ地盤改良<sup>3)</sup>として多く採用されている。そして、近年のウォーターフロント開発などに伴って、SG工法を人工島などのように清水を得難い場所においても適用することが増えている。SGは、通常、水道水や工業用水などの清水にベントナイト・固化材などを混合して作製される。一方、上記のような場所では、工事のために大量の清水を搬入することは、一般に非常にコスト高になるため、SGの混練水として海水を使用することが強く要望される。

海水練りSGは、若令埋立て地盤の人工島における関西電力(株)御坊火力発電所の地中連続壁工事で、大量に採用された実績がある<sup>3)</sup>。海中ではベントナイトの膨潤が妨げられる結果、SGのブリージングが著しく大きくなる。そのため、一般の清水練りSGと同様の配合によって、海水練りSGを作製することは、できない。この対策として、御坊火力発電所の工事では、海水に対して、ベントナイトを通常の清水練りSGの場合の約2倍量、さらに笠岡粘土も添加したのち、固化材および逸泥防止材を添加した。

上記の配合によるSGは、粘土使用量が多いため、混練プラントが大掛かりになるなどの問題があった。そこで、さらに研究を継続した結果、繊維状特殊粘土の使用によって、より優れた海水練りSGが開発された。そのSGの諸性状ならびに現場施工例を述べる。

表一 室内実験に用いた粘土の性状

	土粒子 密度 (g/cm <sup>3</sup> )	液性 限界 (%)	塑性 限界 (%)	粒度分布(μm, %)			
				<2	2~20	20~75	>75
ベントナイト	2.56	388 (107)	31 (31)	81	13	4	2
繊維状 粘土	2.66	326 (266)	85 (78)	84	7	3	6

( )は海水を加えて練った場合

## 2. 室内実験の材料と方法

### 2.1 使用材料

粘土として、群馬県産ベントナイト(250メッシュ)および繊維状特殊粘土(以下、繊維状粘土という)を用いた。それぞれの物理的性状を表一に示す。粒度分布は、類似している。液性限界・塑性限界試験では、土質工学会基準などのように蒸留水を加えて行なう方法とは別に、海水を加える方法も行なった。その結果、ベントナイトの液性限界が海水で著しく減少したのに対して、繊維状粘土では海水の場合の減少がわずかであった。このことは、ベントナイトの著大な膨潤性が塩類濃度の増大によって大きく抑制されるのに対して、繊維状粘土は、陽イオン交換容量が比較的小さいために塩類濃度の影響を受けにくいことによると考えられる。

粘土のX線回折図を図一に示す。ベントナイトは、モンモリロナイトの他に、クリストバライトや石英などを含んでいた。繊維状粘土は、パリゴルスカイトのピークを示した。繊維状粘土の電子顕微鏡写真(SEM)を写真一に示す。同粘土が繊維状の微細形態を有することが認められる。

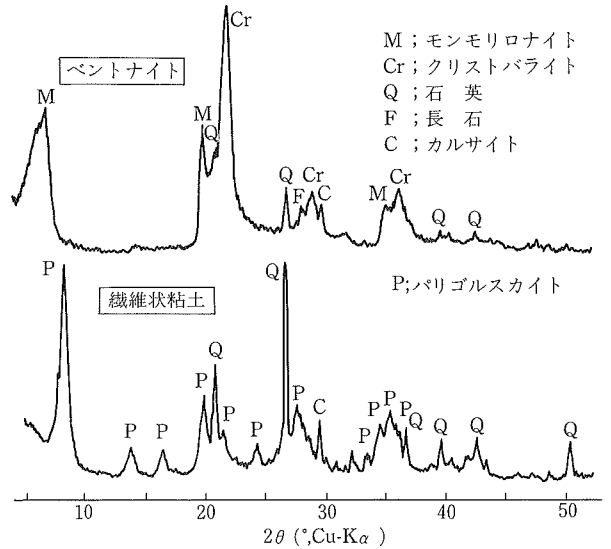
次に、使用した固化材は、スラグに富むセメント系特殊固化材、そして硬化遅延剤は、オキシカルボン酸塩系である。また、海水として、市販の海水調製剤(アクアマリン)による人工海水を用いた。

### 2.2 実験方法

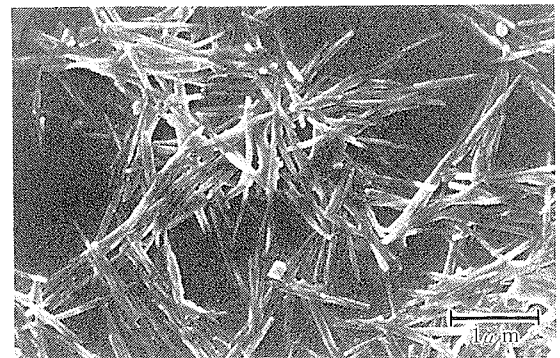
家庭用ミキサーに海水を入れ、ベントナイトおよび繊維状粘土を加えて3分間混合したのち、固化材、硬化遅延剤を加えてさらに0.5分間混合してSGを作製した。

SGの固化前の性状として、ファンネル粘度をAPI規格に準じて測定し、またアクリル円筒(φ5cm・h30cm)に流し込んでブリージング率を測定した。ここで、ブリージング率は、初期のSGの全体積に対するブリージング水の体積の比率(%)である。

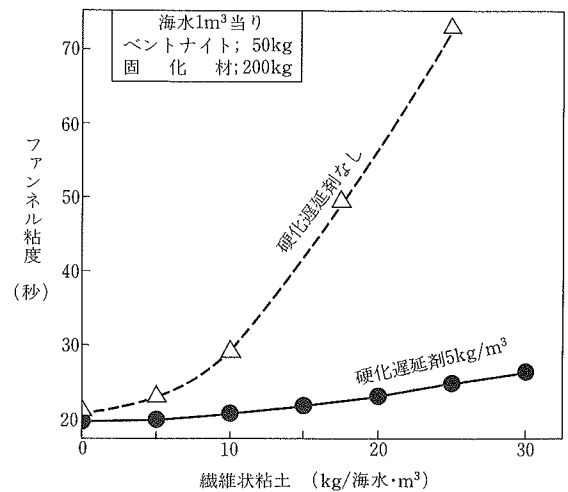
次に、SGの固化後の性状として、SGをφ3cm・h7cmのモールドに流し込んで20°C水中に所定期間養生し、一軸圧縮強度を測定した。また、SGをφ5cm・h10cmのモールドに流し込んで同様に養生し、既報<sup>4)</sup>と同じ中空円筒外圧法(供試体:φ5cm・h10cm, 外圧:2kgf/cm<sup>2</sup>)によって透水係数を測定した。



図一 粘土のX線回折図



写真一 繊維状粘土のSEM写真



図二 繊維状粘土の量とファンネル粘度の関係

## 3. 室内実験の結果と考察

### 3.1 海水練りSGの固化前の性状

3.1.1 粘性 海水練りSGにおける繊維状粘土の添加量とファンネル粘度の関係を図二に示す。ここで、海水1m<sup>3</sup>当りのベントナイト量と固化材量は、一定とし

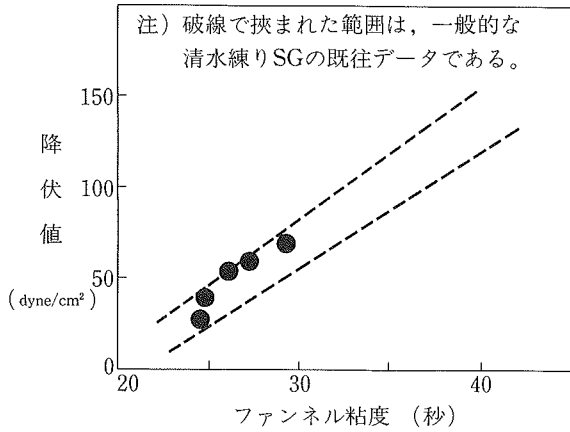


図-3 ファンネル粘度と降伏値の関係

た。まず、硬化遅延剤を添加しない場合、ファンネル粘度は、繊維状粘土の量とともに急激に増大した。このように、繊維状粘土は、海水条件においてもわずかな添加量で粘性を増大させるというベントナイトにない効果を示した。次に、硬化遅延剤を5 kg/m<sup>3</sup>添加した場合、SGの粘性の増大が抑制され、硬化遅延剤が通常の清水練りSGの場合と同様に作用することが認められた。

また、海水練りSGのファンネル粘度と降伏値の関係を図-3に示す。なお、降伏値は、B形粘度計によって描いたずり速度~ずり応力曲線から求めた。降伏値は、ファンネル粘度との間にほぼ直線関係を示し、両者の関係は清水練りの一般的なSGの場合<sup>5)</sup>と一致していた。このことは、海水練りSGのレオロジー的性質が清水練りSGのそれとほぼ同じであることを示唆する。

図-4は、SGを作製直後から緩やかに往復攪拌(約100回/分、約20°C)して、所定時間ごとにファンネル粘度を測定した結果を示している。硬化遅延剤を添加しない場合、粘性は、急激に増大して測定不能になり、6時間後にやや低下した。また、硬化遅延剤なしで粘性土を添加した場合、粘性の増大がさらに顕著であった。一方、硬化遅延剤を添加した場合、粘性は、12時間後でも30秒以下に抑えられた。これらの結果は、工事においてSGの粘性が高すぎると掘削困難になるため、例えば地盤が硬質で掘削に長時間を要する場合、粘性を適度に抑えるための硬化遅延剤が必要なことを示している。

**3.1.2 ブリージング率** 海水練りSGにおける繊維状粘土の添加量とブリージング率の関係を図-5に示す。ブリージング率は、硬化遅延剤の有無いずれの場合も、繊維状粘土なしで約40%と非常に大きいのが、繊維状粘土の量とともに急激に減少した。このように、海水にベントナイトと固化材を添加して作製したSGは、ベントナイトの膨潤が妨げられるため、大きなブリージング率を示し、SGとして機能しなくなる。この対策として、繊維状粘土の添加は、極めて有効である。繊維状粘土がブリージングを抑制した機構として、繊維状であるため、SG中のベントナイト粒子やセメント粒子の間を架橋しやす

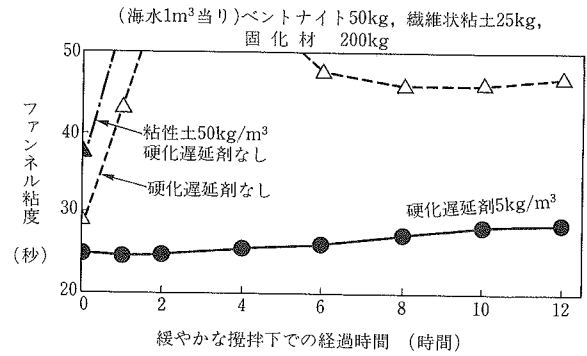


図-4 緩やかな攪拌条件下での経過時間とファンネル粘度の関係

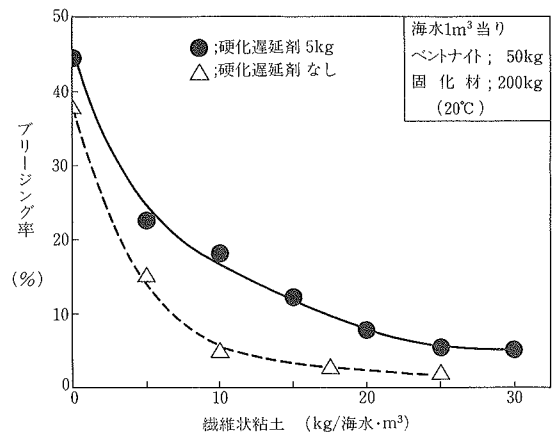


図-5 繊維状粘土の添加量とブリージング率の関係

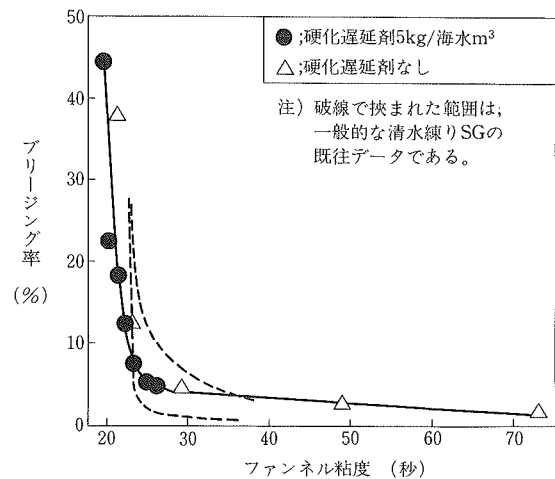


図-6 ファンネル粘度とブリージング率の関係

く、それぞれの粒子の沈降を妨げたことが考えられる。ファンネル粘度とブリージング率の関係を図-6に示す。ブリージング率は、ファンネル粘度25秒までは粘度とともに激減し、それ以降で漸減した。例えば、ブリージング率を約5%以下に抑えるためには、ファンネル粘度を約25秒以上にする必要がある(温度条件20°C)。そして、同図に併記したように、上記の関係は、清水練りの一般的なSGの場合<sup>5)</sup>とほぼ一致していた。

3.2 海水練り SG の固化後の性状

3.2.1 一軸圧縮強度 5 ケースの配合の海水練り SG について、材令と一軸圧縮強度の関係を図-7 に示す。強度は、固化材量およびベントナイト量とともに増大し、また材令28日まで直線に近い増大を示し、28日以降も漸増した。これらの傾向は、清水練り SG でも従来、認められていることである。

また、同一の配合条件で、海水練り SG と清水練り SG のそれぞれの固化強度を比較した例 (固化材 200 kg/m<sup>3</sup>) を図中に併記している。それによると、ベントナイト量および固化材量を同一にした場合、清水練りの方がやや大きい強度を示した。また、清水練り SG にも、繊維状粘土を同量加えた場合、特に長期強度において、清水練り SG の方が特に長期材令でかなり大きい強度を発現した。このように海水練り SG の方が小さい固化強度を示した理由として、海水練りではベントナイトの分散および膨潤が不良であることが関与していると考えられる。

3.2.2 透水係数 上記の5 ケースの海水練り SG について、材令と透水係数の関係を図-8 に示す。透水係数は、固化材添加量および材令とともに減少した。しかし、ベントナイト量の増大は、必ずしも透水係数の減少をもたらさなかった。このことは、ベントナイトが海中では、透水抑制にそれほど有効でないことを示唆する。

SG 固化体の透水係数が固化材量とともに減少した理由は、固化材量とともにセメント水和鉱物の生成量が増大し、粘土粒子間を密に充填したためであると考えられる。また、透水係数が材令とともに減少した理由は、材令とともにセメント水和反応およびセメント・土粒子のポゾラン反応が進み、土粒子間に、より多量かつ密実に生成鉱物を生じたためと考えられる。

また、同図に併記したように、海水練り SG の透水係数は、同一配合の清水練り SG のそれに比べて、大きい値を示した。

3.2.3 一軸圧縮強度と透水係数の関係 SG 固化体の一軸圧縮強度と透水係数の関係を図-9 に示す。図中のプロットは、すべて海水練り SG であり、種々の配合 (貧配合を含む) および種々の材令のものである。透水係数は、強度とともに減少し、そして両者の間にかなり高い相関が認められた。このことは、清水練り SG の場合においても、既に認められている<sup>4)</sup>。また、図中に併記するように、同一強度で比較すると、海水練り SG は、清水練り SG よりも約1 オーダー高い透水係数を示した。この原因として、海水中でベントナイトの膨潤が抑制されることが関与していると考えられる。

ところで、SG の配合・材令に関係なく、透水係数と強度が一元的に対応したことは、固化材の量・材令、すなわち生成鉱物の量と質が強度増大と同じような関係で透水係数の減少に寄与することを示唆する。そして、SG 固化体の品質を管理する際、強度は、透水係数の指標になり得ると考えられる。

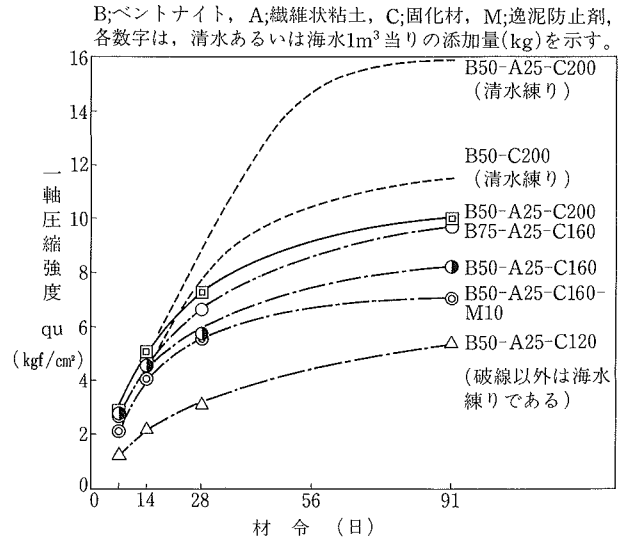


図-7 材令と一軸圧縮強度の関係

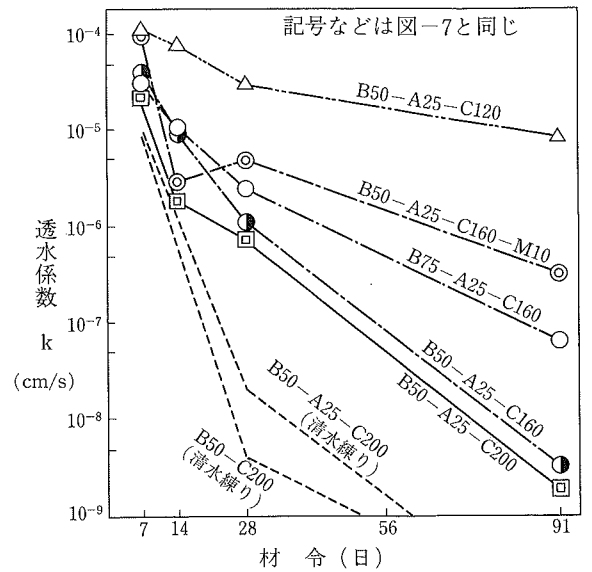


図-8 材令と透水係数の関係

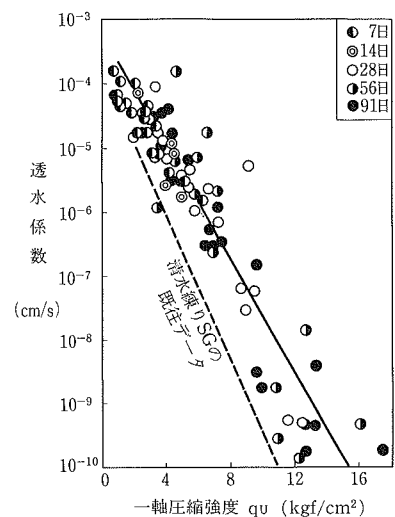


図-9 一軸圧縮強度と透水係数の関係

#### 4. 海水練り SG の現場適用例

##### 4.1 工事の概要

某空港の建設工事(第一期計画)は、沖合い約5kmの海上に511haの空港島と空港施設および連絡橋をつくる工事であり、1994年の開港を目指して、急ピッチで行なわれている。その建設地は、水深が平均約18mで、海底に厚さ約20mの軟弱な粘土層と、その下に400m以上の洪積層が堆積していた。ここに、地盤改良工事を施し、護岸をつくり、約1億8000万m<sup>3</sup>もの岩砕や土砂を埋め立てて、空港島がほぼ完成している。

そして、空港ターミナルと連絡橋を結ぶ道路・鉄道の掘削区間約500mにおいて、土留め遮水壁工法が各種検討され、試験工事などを踏まえて泥水固化壁工法(当社でいうSG工法)が採用された。施工は、1991年2月～9月に行なわれ、壁厚0.8m・壁深約32m・延長約1300m・壁面積約41,600m<sup>2</sup>の大規模なものであった。ここでは、SGの混練水として工業用水を対岸から輸送するよりも、海水を用いる方が安価であったことから、海水練りSGが採用された。

##### 4.2 土質の概要

図-10に土質とSG壁の概要を示す。埋め土層は、最大300mmの岩砕を主体とし、透水係数が非常に大きく逸泥しやすい層であった。SG壁は、粘土層に2m以上根入れするため、32mの深さとされた。

##### 4.3 施工機械

掘削機として、バケット式の「ケリー60M」6台が使用された。その施工状況を写真-2に示す。

SG作製フローを図-11に示す。まず、泥水プラントで、海水にベントナイト・繊維状粘土・逸泥防止材を加えて泥水を作製した(混練量550m<sup>3</sup>/日)。ここでの混練程度は、特に繊維状粘土の分散、そしてSGのブリーディング率に大きく影響するので、混練能力の大きい37kWスラリーミキサーを使用した。この泥水を貯留したのち、固化材混合プラントに送り、固化材・硬化遅延剤を添加混合してSGを作製した。

1箇所の泥水プラントで作製された泥水が、3箇所の固化材混合プラントまでポンプ圧送された。それぞれの固化材混合プラントから各2台のケリー掘削機にSGが配送(最大約250m)された。なお、繊維状粘土・逸泥防止材のミキサーへの供給が人力で行なわれた以外、すべての混練・供給システムが自動化された。

##### 4.4 SGに要求された性能とSGの配合

SGには、品質管理基準として、材令14日で透水係数10<sup>-5</sup>cm/s以下が要求された。また、SG壁完成後の内部掘削の形状との関連でSG壁にかかる土水圧が場所によって異なることから、SGの一軸圧縮強度は、材令14日で場所に応じてそれぞれ2.6, 3.2, 4.7kgf/cm<sup>2</sup>以上とされた。

SGの配合を表-2に示す。海水1m<sup>3</sup>当りの固化材量は、上記の強度と対応してそれぞれ180, 200, 220kgと

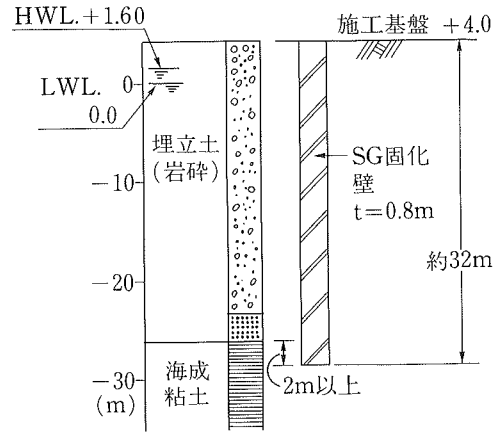


図-10 土質とSG固化壁の概要

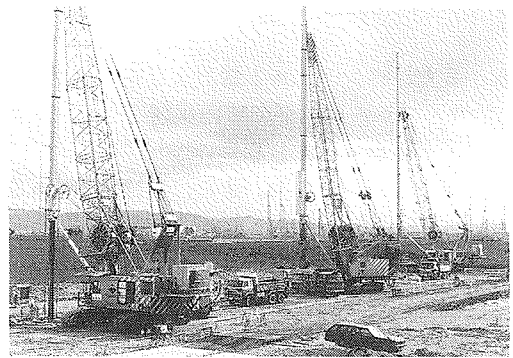


写真-2 施工状況

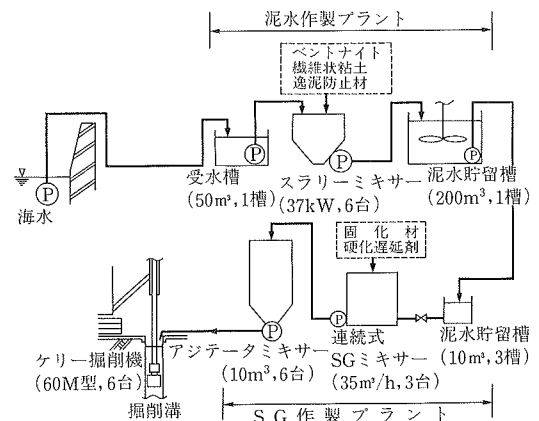


図-11 SG作製フロー

表-2 SGの配合

海水	ベントナイト	繊維状粘土	固化材	硬化遅延剤	逸泥防止材
1 m <sup>3</sup>	50kg	25kg	180, 200, 220kg	0 ~ 5 kg	10kg

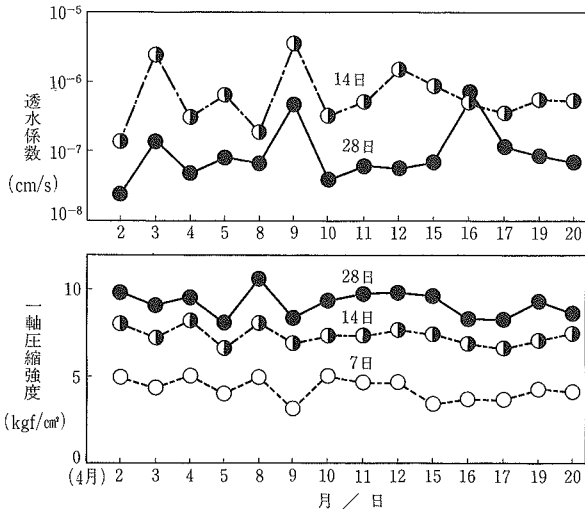


図-12 一軸圧縮強度および透水係数のデータ例

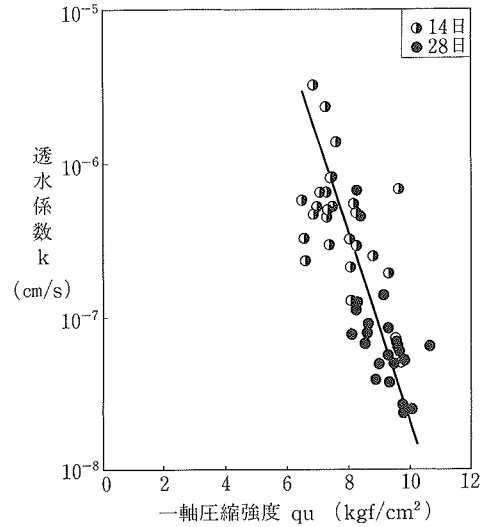


図-13 一軸圧縮強度と透水係数の関係

された。また、ベントナイト量および繊維状粘土量は、SGの粘性・ブリージングの室内実験をもとに設定された。そして、極めて逸泥しやすい地盤であったため、逸泥防止材が多く用いられた。また、岩砕が主体で壁深が深く、掘削に長時間を要すること、掘削後にH形鋼を挿入する「SG-H壁」区間もあること、さらに夏場の工事で固化材の硬化が速いことから、硬化遅延剤が0~5 kg/m<sup>3</sup>の範囲で、特に後行パネルで多く用いられた。

#### 4.5 施工結果

海水練りSGは、上記のシステムで順調に作製され、目標通りで、かつ安定した品質であった。また、掘削溝の崩壊や大逸泥などの大きなトラブルもなく、掘削は、順調に行なわれた。

品質管理の一つとして、掘削完了後の溝内SGを採取してモールドに流し込み、養生して強度と透水係数を測定した例を図-12に示す。すべてのデータは、この場合の管理基準(14日で透水係数10<sup>-5</sup> cm/s以下、一軸圧縮強度4.7 kgf/cm<sup>2</sup>以上)を満足した。そして、材令28日では、強度および遮水性がさらに増大した。また、強度と透水係数の関係を図-13に示す。室内実験の場合(図-9)と同様に、両者の間に相関が認められた。

以上、繊維状粘土を用いた海水練りSGは、施工性・品質ともに良好な結果を示し、人工島など清水を入手し難い場所での土留め遮水壁の工事などに非常に有効と考えられる。

#### 5. まとめ

人工島など清水を得難い場所において、SG(自硬性安定液)工法によって土留め遮水壁などを築造する場合、

SGの混練水に海水を使用することが望まれる。そこで、繊維状粘土を添加した海水練りSGを開発した。そのSGの性状と現場適用例について述べた。

① 繊維状粘土は、比較的少ない添加量で、海水練りSGの粘性を増大させ、ブリージングを抑制するというベントナイトにない効果を示した。また、時間経過に伴うSGの粘性増大を抑制するためには、一般的な清水練りSGと同様に硬化遅延剤が有効であった。

② 繊維状粘土を添加した海水練りSGの固化後の強度と透水係数は、配合および材令に影響された。また、強度と透水係数の間に高い相関が認められた。

③ 人工島における大規模な土留め遮水壁工事において、繊維状粘土を添加した海水練りSGが適用され、同SGの優れた施工性と品質が確認された。

#### 参考文献

- 1) 例えば、鈴江、阿部、野崎：南麻布ビル新築工事における自硬性安定液工法の山留め工事例，基礎工，Vol. 12, No. 4, p. 73~81 (1981)
- 2) 例えば、川崎：自硬性安定液工法による地下ダムについて，基礎工，Vol. 12, No. 4, p. 109~116, (1981)
- 3) 喜田，川地，斎藤，辻，高木：若令埋立地盤（人工島）における海水練り安定液によるWFの施工，大林組技術研究所報，No. 27, p. 65~71, (1983)
- 4) 喜田，斎藤，川地：自硬性安定液に関する研究(その1) - 硬化体の圧縮強度，弾性係数，透水係数について -，大林組技術研究所報，No. 20, p. 65~70, (1980)
- 5) 喜田，川地，斎藤：自硬性安定液に関する研究(その2) - 自硬性安定液の硬化前の性状 -，大林組技術研究所報，No. 20, p. 71~76, (1980)