

自硬性安定液に関する研究（その8）

——路下工事における CIS 掘削機による置換式 SG 工法の施工例——

喜田大三 久保 博

Studies on Self-Hardening Slurry (Part 8)

——Field Studies on Substitutional SG Method
with CIS Type Excavator in Underground Works——

Daizo Kita Hiroshi Kubo

Abstract

In works for an underground railway, SG-H diaphragm walls (composed of SG wall with H-shaped steel member) were constructed by underground work. Since the height of the work space were limited to within 4.5 m, excavation of trenches was done with a CIS-58 type excavator which discharges soils with circulating slurry. This was the first time that SG walls were constructed using a CIS-58 type excavator. The thickness of each wall was 0.6 m and the depth 12.65 m. After excavation, bentonite slurry or polymer slurry was substituted for SG and the trenches were filled. The excavation and substitution for SG were done separately for preceding panel and jointing panel. On excavation of a jointing panel the polymer slurry was intermixed with a large quantity of hardened SG pieces, but the excavation progressed smoothly because of use of the polymer slurry. SG of all panels hardened up to the targeted strength (13 kgf/cm²) in 9 to 10 weeks.

概 要

市街地における鉄道の地下化工事に伴い、路下作業によって、土留め遮水壁として SG-H 壁（H 形鋼挿入 SG 壁）を施工した。現場は、よく締った砂礫地盤であったが、地下水位が高く、その水量が豊富であった。作業空間高さの制約から、掘削機として循環排土方式の CIS-58 型掘削機を用いたが、同機による SG 壁の施工は初めてのケースであった。SG-H 壁は、置換方式によって構築し、壁厚 0.6 m、壁深さ 12.65 m であった。施工順序として、まず 3.2~4.6 m 幅のパネルを独立して施工し（先行パネル）、続いてその間にパネルを施工し（ジョイントパネル）、連続壁とした。ジョイントパネル掘削時には、ジョイント部の SG 硬化体切削片が多量混入したが、ポリマー泥水を使用したため、順調に施工できた。また、SG は回収泥水（先行パネル：ベントナイト泥水、ジョイントパネル：ポリマー泥水）を用いて作製したが、いずれも材令 9~10 週で目標の強度（13 kgf/cm²）と遮水性を発現でき、満足できる結果を得た。

1. まえがき

各種の土留め工法のうち、泥水固化連続壁工法は、比較的新しい工法であり、地中の掘削溝に満した泥水を固化させて連続壁を構築する工法である。そして、土留め壁に用いる泥水固化連続壁には、土水圧に対する耐力を増すために、H 形鋼などの鋼材を建て込むのが一般的である。当社では、泥水固化連続壁工法として、SG（自硬性安定液）を用いる SG 工法があり、SG 壁中に H 形鋼を建て込んだ壁を“SG-H 壁”と称している。

ここに紹介する工事例は、市街地における鉄道の地下

化工事に伴う土留め遮水壁として、路下作業によって SG-H 壁を施工した例である。この工事では、路下作業のため、掘削機として機械高さの低い機械が必要となり、循環排土式の CIS-58 型機を用いた。そして、SG 工法として、前報¹⁾に述べた置換方式が採用された。

しかし、SG 壁の施工に CIS-58 型掘削機を用いるのは、初めてのケースであり、施工上いくつかの点で注目された。そこで、本報では、特に重要となった、①連続壁のジョイント部掘削における SG 硬化体の切削状況、②切削した SG 硬化体片が泥水に混入した際の泥水の性状、③SG 置換時の回収泥水を用いて作製した SG の性

状, などについて現場調査を行ない, 有益な知見を得たので, 以下に報告する。

2. 工事概要と SG-H 壁の施工計画

2.1. 土質と工事計画概要

現場の土質柱状図を工事計画概要とともに図-1 に示す。まず, 土質について, GL-0.5~6 m は, 河川氾濫堆積層であり, 粘土分の少ない砂礫層 (透水係数 $10^0 \sim 10^{-3}$ cm/s) である。また, GL-6 m 以深は, 洪積層であり, GL-6 m 以浅と同様に砂礫 (最大粒径 200 mm, 透水係数 $10^0 \sim 10^{-3}$ cm/s) を主体としている。そして, GL-17~20 m 付近には, 砂質シルト層 (透水係数 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ cm/s) を挟んでいる。

このように, 現場の土質は, よく締った砂礫が主体であった。しかし, 地下水位は, GL-7 m 付近にあり, その水量が豊富であった。また, 市街地であるため, 交通量が非常に多く, 地下には多くの埋設物があった。そのため, 土留めの全体計画は, 以下のとおりとした。

まず, 地上から小型杭打機によって, 土留め支持兼用杭と中間杭を打設して, 路面覆工下で GL-7 m まで掘削する。そして, 作業床コンクリートを打設し, 路下作業によって土留め遮水壁を GL-19.65 m まで構築する。この路下より施工する土留め遮水壁に対しては, 前記のような地下水条件を考慮して, 十分な剛性と遮水性を付与する必要があった。

そこで, 各種の土留め工法を比較検討した結果, 路下での作業性, 土留め壁の剛性・遮水性, 施工時の騒音・振動, 経済性などから, SG-H 壁が採用された。

2.2. SG-H 壁の計画概要

SG-H 壁は, 図-1 のように, 壁深 12.65 m, H 形鋼 (300×300) 9 m 挿入とした (施工壁面積: 約 480 m², 施工時期: 昭和58年 1月~3月)。SG-H 壁の設計は, 親杭横矢板工法における親杭として H 形鋼, 横矢板として SG 硬化体があるとして, 親杭横矢板工法の設計法に準じて行なった。その結果, 図-2 のように, SG-H 壁の壁厚を 0.6 m, H 鋼挿入間隔を 0.8 m, SG の目標一軸圧縮強度を 13 kgf/cm² (56 日材令) とした。

ところで, SG-H 壁の施工法には, つぎの二つがある。

(1) SG を掘削溝孔に満しながら, KELLY 掘削機によって掘削したのち, H 形鋼を挿入して, SG をそのまま硬化させる方法。

(2) OWS-SOLETANCHE 工法で従来から使用されている泥水を用いて, 所定の溝孔を掘削したのち, トレミー管などによって SG を孔底から供給置換し, SG を硬化させる方法 (H 形鋼は SG 置換前または SG 置換後に挿入)。

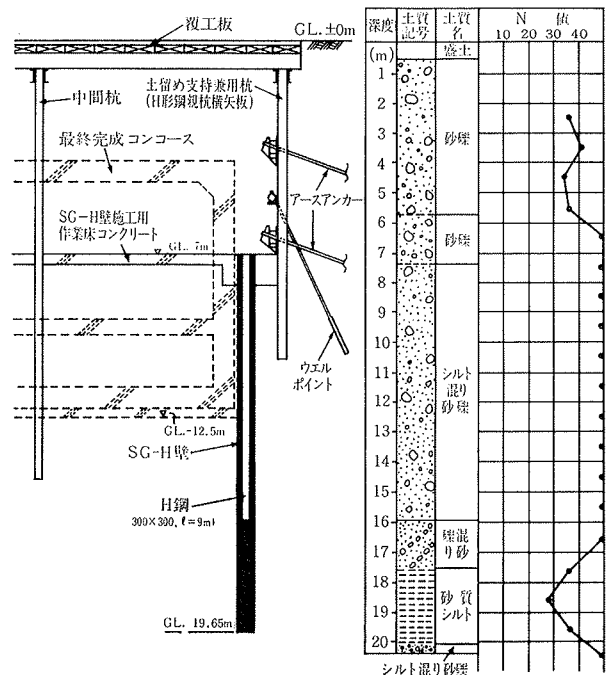


図-1 土質柱状図と土留め工事計画概要

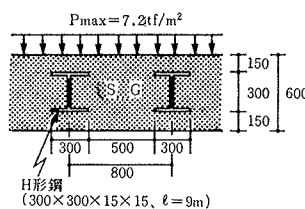


図-2 SG-H 壁の詳細

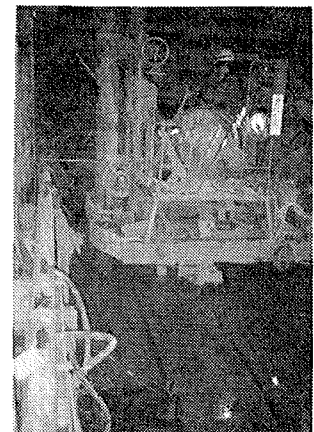


写真-1 CIS-58型掘削機による掘削状況

当現場では, 路下作業で, 路下より GL-2.5 m までには埋設配管などがあり, 作業空間高さが 4.5 m 以下に制限された。したがって, KELLY 掘削機は使用できず, CIS-58 型掘削機 (路下用, 機械高さ 3.85 m) を用いた。その施工状況を写真-1 に示す。本機は, 衝撃掘削 (パーカッション)・循環排土方式である。そのため, 前記の SG-H 壁施工法(1), (2)のうち, (1)は循環系統 (特に土砂分離槽) 内で SG が硬化するので適用できない。本工事では, (2)の置換方式を採用した。その施工手順は, 以下のものであり, 大略は前報¹⁾に示したものと同様である。

①CIS-58 型掘削機によって, 掘削孔内に泥水を満しながら, 所定の溝孔を掘削する。

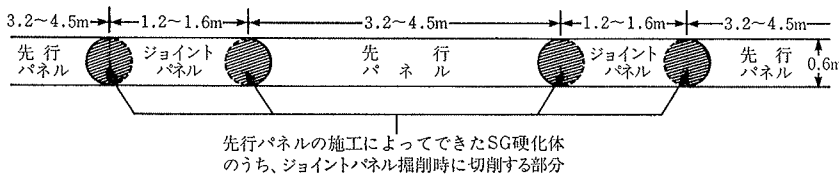


図-3 パネル形状とジョイント部の施工

	先行パネル	ジョイントパネル
	ベントナイト泥水	ポリマー泥水
掘削に使用する泥水とその配合	水 1 m ³ ベントナイト(共立,250)100kg 逸泥防止材 10~15kg	水 1 m ³ ポリマー(OP-14) 4~5kg
置換SGの配合	回収ベントナイト泥水 1 m ³ 硬化材 240kg	回収ポリマー泥水 1 m ³ ベントナイト(共立,250)75kg 硬化材 270kg

表-1 泥水とSGの配合

②H鋼を挿入する。

③トレミー管を用いて孔底からSGを供給し、泥水と置換する。その際に回収した泥水の一部は、次のパネルの掘削用泥水として、また残りの大部分はSG作製に利用する。したがって、最終パネルの施工が終るまで、泥水の廃棄処分は行なわない。

また、パネルは、図-3のように、先行パネルとジョイントパネルに分けた。施工順序として、先行パネルをすべて施工し、先行パネルのSGが硬化したのち、ジョイントパネルを施工した。ジョイントパネル掘削時のジョイント部のSG硬化体の切削は、図-3のように行なった。

2.3. 泥水とSGの配合

泥水とSGの配合を表-1に示す。泥水、SGともに先行パネルとジョイントパネルでは、配合を変えた。先行パネルの泥水は、逸泥防止のために、高濃度のベントナイト泥水(逸泥防止材も使用)とした。一方、ジョイントパネルの泥水は、SG硬化体の切削片が混入することによる影響も考慮して、ポリマー泥水とした。また、SGは、室内配合試験の結果にもとづいて、同表のような配合とした。

3. CIS掘削機による掘削時の泥水と掘削状況の調査

3.1. 先行パネルの掘削

ベントナイト泥水の作製液と循環液の性状を毎日管理したが、いずれも管理基準値(作製液比重1.05~1.06, 循環液比重1.05~1.10, ファンネル粘度22~35秒, 造壁性0~6ml)を満足していた。また、掘削完了時の孔内液(作業床-5m)の砂分率も管理基準値(5%以下)を満足し、泥水性状に関して全く問題なかった。

逸泥量は、当初1.5 m³/hとやや大きかったが、逸泥

	試験結果	管理基準値
比重	1.04~1.07	1.00~1.10
ファンネル粘度	25~30秒	25~35秒*
造壁性	1~5.5ml	0~6ml
砂分率**	1~4%	0~5%
pH	11~12.6	—

*土砂分離の状況を考慮して決定した。
**掘削完了時の孔内-5mの泥水

表-2 ジョイントパネル施工時のポリマー泥水(循環液)の性状

防止材の増量などによって、0.2~0.3 m³/hに抑えることができた。また、SG置換量から計算される掘削溝孔の体積は、砂礫地盤であるために、設計値よりも1.4~1.5倍大きくなった。しかし、問題となるような孔壁崩壊はなく、順調に施工できた。

3.2. ジョイントパネルの掘削

ポリマー泥水の作製液も毎日管理したが、ファンネル粘度24~26秒, 造壁性3~4mlであり、管理基準値(ファンネル粘度22秒以上, 造壁性0~6ml)を満足していた。

つぎに、先行パネルとのジョイント部のSG硬化体の切削について述べる。このSG硬化体の切削時の材令は、パネルの施工順序の関係で、12~30日(一軸圧縮強度3~10 kgf/cm²)であった。土砂分離装置(バイブレックスクリーン, 網目2mm)において目視調査した結果、SG硬化体が短材令で、強度が小さい場合、スクリーン上に残るSG硬化体片は全く認められなかった。一方、SG硬化体が長材令で、強度が大きい場合、スクリーン上に50mm程度のSG硬化体切削片が残ることが認められた。すなわち、SG硬化体をCIS掘削機によって掘削する場合、SG硬化体の一部が塊状のまま切削・排土され始めるのは、その強度が概ね7~8 kgf/cm²以上からであることが認められた。

掘削時に孔内リターン口より採取した循環泥水の性状を表-2に示す。先行パネル掘削時の循環泥水の比重は、1.04~1.07ではほぼ一定であったので、ジョイントパネルの循環泥水の比重がこのように増大した(作製時1.005)のは、大部分、SG硬化体切削片の混入によると推察された。そこで、計算値と試験値を比較してみる。1パネル施工当りで切削されるSG硬化体の質量W_{SG}は、その密度γ_{SG}を1.25として

$$W_{SG} = 0.3^2 \times \pi \times 12.65 \times 2 \times 1.25 = 8.9(t)$$

である。孔内と循環系統の全泥水量は、約55 m³であるので、切削したSG硬化体片がすべて泥水に混入するとすれば、混入率aは、a = 8.9 ÷ 55 = 0.16(t/m³)である。一方、aとSG硬化体片混入泥水の比重ρ_{SL}の間に、

$$\frac{\rho_0 + a}{1 + \frac{a}{\gamma_{SG}}} = \rho_{SL} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\frac{\gamma_{SG}(\rho_{SL} - \rho_0)}{\gamma_{SG} - \rho_{SL}} = a \quad \dots\dots\dots(2)$$

ρ_0 : 泥水作製液の比重, γ_{SG} : SG 硬化体の密度
 の関係が導かれる。いま, (1)式に $\rho_0=1.005$, $\gamma_{SG}=1.25$, $a=0.16$ を代入すると, $\rho_{SL}=1.033$ が得られる。この結果は, 試験結果の最小値とよく一致しており, SG 硬化体切削片の大部分が泥水中に混入したという推察が正しいことが計算上認められた。そして, 終期のパネルで測定された $\rho_{SL}=1.07$ の場合, (2)式より $a=0.45 \text{ t/m}^3$ が得られ, かなり多量の SG 硬化体片が混入していた。

このように多量の SG 硬化体片が混入する条件下においても, 表-2 のように, 循環泥水のファンネル粘度・造壁性, 掘削完了時の孔内泥水の砂分率をいずれも管理基準値内に抑え, 順調に施工できたのは, 泥水としてポリマー泥水を用いたからである。なお, このような SG 硬化体片の混入下では, ベントナイト泥水は, 即時に凝集し粘性が非常に増大して, 土砂分離が不能となる。

ジョイントパネル掘削時の逸泥は, $0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ 以下であり, 先行パネルのそれに比べて小さかった。このことは, 泥水の粘度が比較的高かったこと, 泥水中の SG 硬化体切削片が壁面の目詰め効果をもったことなどによると考えられる。また, ジョイントパネルの掘削壁面は, 設計線とよく一致し, 肌落ちは非常に少なかった。このことは, ジョイントパネルにおいてパネル幅が小さかったためだけでなく, 先行パネルの SG 硬化体による周辺地盤へのグラウト効果もあったためであろう。

4. SG に関する調査

4.1. SG (硬化前) の性状

(1) 先行パネルの SG 先行パネルの SG は, 回収ベントナイト泥水に硬化材を混合して作製した(表-1 参照)。SG の作製時の比重は, $1.19\sim 1.21$ であった。このばらつきが回収泥水の比重のばらつきによると仮定すると, 回収泥水の比重は $1.05\sim 1.07$ と算出される。この値は, 回収泥水の比重の試験値とよく一致するので, SG の比重のばらつきは, 主に回収泥水の比重のばらつきに起因すると考えられる。

また, SG の粘度は, ファンネル粘度計で測定不能であったので, プレパクトコンクリートなどの試験に用いられるフローコーン (1725 ml) で測定した結果, 流下時間が $10\sim 14$ 秒であった (水では約 8.5 秒)。

(2) ジョイントパネルの SG ジョイントパネルの SG は, 回収ポリマー泥水にベントナイトおよび硬化材を混合して作製した(表-1 参照)。その比重は, $1.20\sim 1.24$ であった。このばらつきが回収泥水の比重のばらつきによると仮定すると, 回収泥水の比重は, $1.00\sim 1.24$

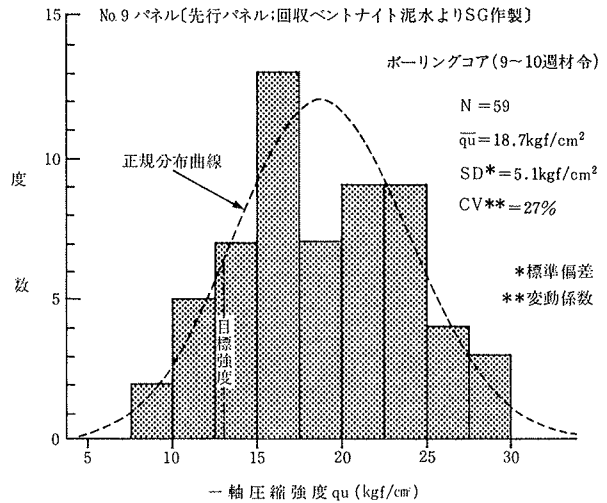


図-4 先行パネルの現場 SG 硬化体の強度ヒストグラム例

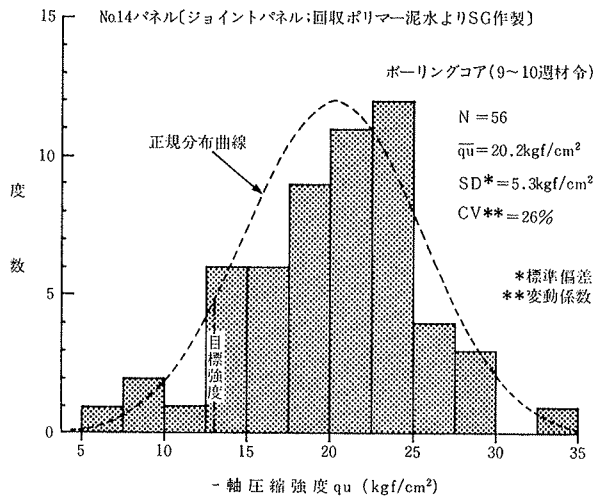


図-5 ジョイントパネルの現場 SG 硬化体の強度ヒストグラム

ボーリング NO.	供体数	一軸圧縮強度			対象パネル
		平均 (kgf/cm²)	標準偏差 (kgf/cm²)	変動係数 (%)	
1	59	18.7	5.1	27	先行
2	14	17.6	5.2	30	〃
3	17	17.8	5.1	29	〃
4	56	20.2	5.3	26	ジョイント

表-3 現場 SG 硬化体の強度

と算出され, この場合も SG 比重のばらつきは主に回収泥水の比重のばらつきによると推察された。

また, フローコーン (前述) による流下時間は, $9\sim 10.5$ 秒であり, 先行パネルの SG に比べて小さかった。

4.2. SG 硬化体の性状

(1) 一軸圧縮強度 現場 SG 硬化体について, 材令 $9\sim 10$ 週においてコアボーリング ($\phi 66 \text{ mm}$, ダブルコアチューブ) を行ない, 成形して一軸圧縮強度を測定した。

なお、SG 硬化体の強度は、長期間増大するが、9～10週で最終強度に近くなる²⁾。

このようにして得た現場 SG 硬化体の強度ヒストグラムについて、先行パネルでの例を図-4、ジョイントパネルでの場合を図-5に示す。これらは、それぞれ底部までのボーリングコア1本からできるだけ多数の一軸圧縮試験用供試体を作製し、試験した結果である。

SG 硬化体の強度は、いずれも正規分布に近い分布を示し、その平均値は、図-4で 18.7 kgf/cm²、図-5で 20.2 kgf/cm²、また変動係数はいずれも 26～27%であった。そして、これらの強度のばらつきを正規分布であるとして、目標強度 13 kgf/cm² を下回る確率を算出すると、図-4で13%、図-9で9%であり、両者とも10%程度に抑えられている。現場 SG 硬化体のコアボーリングは、上記のものを含めて計4本行なった。その結果をまとめて表-3に示す。このように、現場 SG 硬化体の強度は、壁全体としてみても、図-3および図-4で代表されるような分布を示していると考えられる。

また、図-6には、同一パネル内の2箇所でもコアボーリングを行ない、両者の強度比較を示している。両者間に強度差は認められない。なお、同図では、上部の強度が下部の強度に比べて小さい傾向がある。しかし、他のパネルの SG 硬化体では、その傾向が認められない場合もあり、上下方向の強度差については、今回の調査で明瞭でなかった。

以上のように、ポリマー泥水から作製した SG 硬化体でも、バントナイト泥水から作製した SG 硬化体と同様の強度を発現でき、また現場 SG 硬化体の強度は90%程度の確率で目標強度を上回り、SG の配合ならびに施工法が適切であったと判断される。また、回収泥水を SG 作製用としても利用し、泥水の廃棄処分を極力減少させるという目標も満すことができた。

(2) 透水係数 材令9～10週の SG 硬化体の一軸圧縮強度と透水係数の関係を図-7に示す。この透水係数は、コンクリートの透水試験法によって求めた。

既報²⁾にも述べたように、SG 硬化体の透水係数は、その強度が増大するほど減少する傾向を示した。そして、SG 硬化体の強度が約 10 kgf/cm² 以上であれば、その透

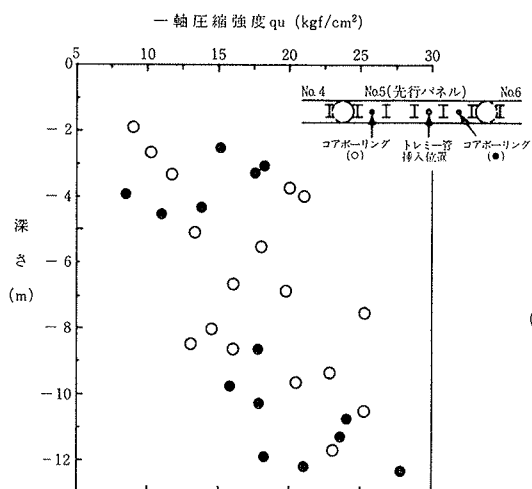


図-6 同一パネル内の SG 現場硬化体の強度分布

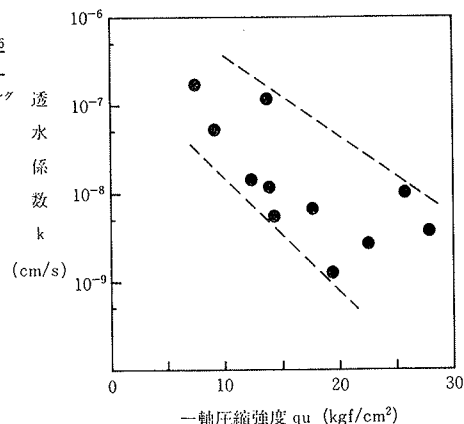


図-7 SG 硬化体の強度と透水係数の関係

水係数は、 5×10^{-6} cm/s 以下に抑えられている。したがって、前述の SG 硬化体の強度試験結果を考慮すると、現場の SG-H 壁は、遮水性の面からも所期の目標を満足したと判断される。

5. あとがき

市街地における鉄道の地下化工事に伴い、路下作業において、SG-H 壁による土留め遮水壁を施工した。その際、作業空間の制約などで、掘削機として、CIS-58 型掘削機を使用した。本機を用いる SG-H 壁の施工は、初めてのケースであったが、泥水と SG の配合、ならびに施工を適確に行ない、目標を満足する土留め遮水壁を構築できた。

なお、この施工結果が評価され、同現場では次期の土留め工事にも SG-H 壁が採用された。その壁厚は 0.6 m、壁深さは 16.5 m、壁面積は約 2400 m² であり、工期は昭和58年10月～59年2月であった。この工事では、CIS-58 型機よりさらに掘削能力の大きい HYDROFRASE 掘削機（路下型）も導入された。同機は掘削形状が角状であるため、CIS-58 型機に比べて、ジョイントパネル施工時の硬化 SG 部の切削が少なくできる点でも優れていた。

最後に、現場調査に際して、御協力を頂いた現場工事事務所の方々、また化学研究室の斎藤裕司副主任研究員に感謝します。

参考文献

- 1) 斎藤, 喜田: 自硬性安定液に関する研究 (その7), 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 98～102
- 2) 喜田, 川地, 斎藤: 自硬性安定液に関する研究 (その1), 大林組技術研究所報, No. 20, (1980), pp. 65～70