

セメント・スラグ・水ガラスを用いたグラウトによる 地盤注入工法

Studies on Cement, Slag and Sodium Silicate Grout

丸安隆和*・阪本好史**

Takakazu MARUYASU and Yosihumi SAKAMOTO

都市土木、トンネルなどの工事が今日のように発達したわけには、注入工事による地盤固結の技術の大きい貢献を見逃すことはできない。この報告は、新しく開発した注入材料の成果を述べたもので、特長として、(1) 固結後の強度の大きいこと、(2) 凝固するまでの時間が調節できること、(3) 海水等に対する耐久性の大きいこと、(4) 従来のセメント注入より確実にかつ能率的に作業できることなどをあげることができる。

まえがき

軟らかい地盤、崩れやすい地盤、湧水のげししい地盤など、一昔前なら避けて通ったようなところでも、最近ではどんどん建設工事が進められる。このような場所では工事中および完成後の十分な安全を確保するために、慎重に地盤改良を行なってから作業を進めることが要求される。

地盤改良の主力は、何といっても現在では注入工法である。セメント、水ガラス、合成樹脂、その他の材料をあらかじめ高圧のもとで注入し、地盤を固結し、漏水をとめるのである。ところが最近この注入工事に新たな要求が生じた。それは、たとえば、青函トンネル工事におけるように、トンネル掘削の方法は非常に発達し、能率化してきたため、それに先立って行なわれる地盤注入工事は従来と比べて遙かに能率的であること、トンネルの受ける圧力が非常に大きい場合(青函トンネルの場合は250mの水圧をうける)、注入したトンネル周辺の岩盤の強さをできるだけ大きくしたいということ、注入工事が工事費の中で非常に大きい割合を占めることを考えると、できるだけ経済的でなければならないこと、使用する注入材料は十分大量に入手可能であり、注入後の耐久性(特に海水や滲透した薬品等に対して)が保証されなければならないこと、などである。

注入工事に対してこれらの新しい課題は、注入され、改良された地盤は永久構造物としての役割をも要求する場合もあることを示している。

この研究は、これらの新しい情勢に対応することのできる注入工法を開発しようとするのが目的であるが、セメント、スラグ、水ガラスの三成分系を主体としたグラウトを用いる工法は上述の目的をある程度満足するものであることを確認した。実験の結果から判断して従来の注入工法を一步進めたものということができ、これから

の海洋開発工事などにも利用価値が高いものと考えている。

1. 新しい工法の特長

従来の注入工法ではセメントを用いるセメントグラウトが主体となっているが、セメントは粒径が5~30 μ 位あって、界面張力その他の原因から、粒径の10倍以下の間隙には浸透せず、砂層ではほとんど注入効果が得られない¹⁾のが難点となっている。

この欠陥を解消するために、セメントに薬液を混ぜて注入する方法や、懸濁物を含まない、いわゆる薬液注入が発達した。その中で薬液注入は一般にセメント注入にくらべて高価につき、固結強度も弱いという欠点があるが、凝結時間の調節が割合自由である点で、漏水どめや細粒土壌の固結に広く用いられている。

最近 LW-工法という新しい工法が利用されるようになった。これは、セメントミルクに水ガラスを混合して注入する方法である。

この方法によると大きな空隙をまずセメント粒子が充填し、また微細な空隙にはいわゆる不安定水ガラスが浸透してゲル化して固化するという特徴がある。しかし、この2液は混合すると極めて短時間に凝固する欠点があるため一つの注入孔から注入できる範囲が狭く、作業が能率的にならない欠点があった。この欠点を補いゲルタイムを長くするために、セメントミルクを薄くして凝結時間を調整する方法がとられる。しかし、水が多くなるとこれにともなって固結物の強度は著しく減少するという不利な結果を避けることができなかった。

本研究ではこの問題を解決する方法として、高炉スラグなどを利用する新しい方法を提案している。この方法によるとゲルタイムを比較的自由に調節でき、しかも固結物の強度を単味のセメントミルクを用いるよりかえって増大させることが期待でき、さらに以下に述べるような種々の利点のあることが確認された。

以下この工法を MS 工法とよぶことにする。

* 東京大学生産技術研究所 第5部

** 新日本製鉄化学株式会社

この工法の特徴をあげると、次のようである。

① セメントとスラグ量の混合割合、あるいはセメントミルクと水ガラスとの混合比率を変えることによって、ゲルタイムを調節することができる。

② スラグの割合を多くすると、強度がかえって大きくなる傾向を示し、容易に圧縮強度を 24 時間で 10 kg/cm²、28 日で 100 kg/cm² をうることができ、配合を選べば 24 時間で 100 kg/cm² という強度をうることも可能である。

③ スラグは海水に対する耐久性が強いので、注入した後海水に対して高い安定性を示す。

④ 配合の調節やその操作が簡単である。

⑤ スラグは人体に無害で、貯蔵安定性もよく、ゲル化した後も公害要因とはならないので都市土木への応用も広い。

⑥ スラグはセメントに比べて同価またはそれ以下の価格で得られると思われる点で経済的である。

⑦ 注入作業の能率化はボーリング穿孔の速度に支配されるが、ゲルタイムを自由に調節できることは注入作業を能率化し、かつ効果的に行なううえで極めて重要である。すなわち、1 本のボーリング孔で注入できる範囲を増大し、したがってボーリング孔の数を少くすることができる。

⑧ また相当大きい安定した強度が得られることは、隧道の支保工に加わる圧力を軽減することができ、また注入域を縮小することができるので材料費が少なくなる。覆工の設計に岩盤強度を考慮することができ、工事の安全性や経済性を高めることができる。

たとえば、北原氏の理論³⁾により注入域地盤の強度と支保工に加わる圧力の低下との関係の一例を示すと、図

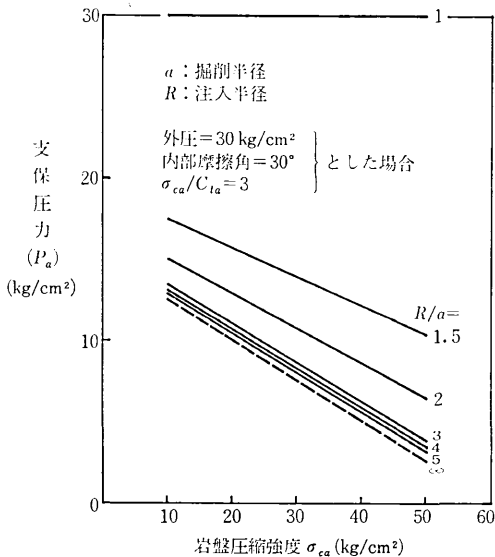


図 1 σ_{ca} と R/a および P_a の関係

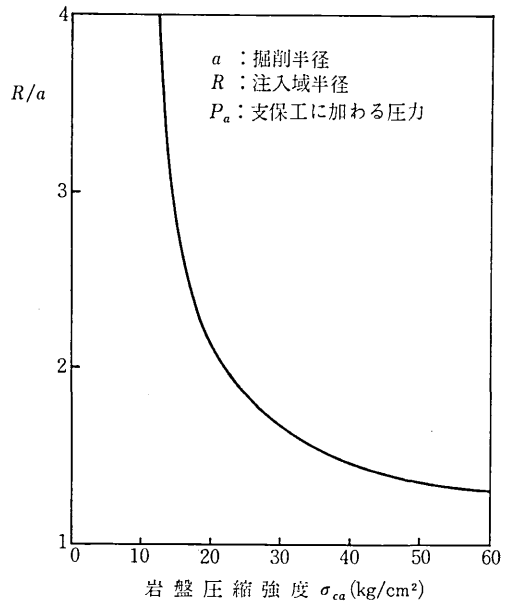


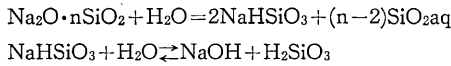
図 2 $P_a=12.5 \text{ kg/cm}^2$ に相当する R/a

1, 2 のようになる。同じ R/a の場合には、岩盤圧縮強度 σ_{ca} が増すと P_a は一次的に減ずる。また、広範囲に注入して、 σ_{ca} が 10 kg/cm² になった場合を例にとると P_a は 12.5 kg/cm² となり、さらに σ_{ca} を大きくすることができるならば、 P_a を一定とすると R/a は図 2 に示すように小さくしてよいことがわかる。

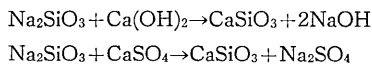
2. グラウト材料について

この MS 工法に使用するスラグは、高炉スラグを熔融状態から水で急冷固化したいわゆる水滓を微粉砕したものである。水滓の化学成分は大体 SiO₂ 31~35%, Al₂O₃ 14~20%, CaO 38~42%, MgO 3~8% である。大部分がガラスであって、結晶学的にみると不安定な状態にあり、簡単な刺戟物によってカルシウムイオンを流出し、スラグ自らは硬化をする。すなわち、水滓は Ca(OH)₂ や NaOH などのアルカリ塩類を含む水に対しては水和物を生成し、凝結および硬化の反応を起こすいわゆる潜在水硬性をもっている。

また、水ガラスは古くから、セメントの急結剤として用いられたり、薬液注入材料として用いられてきたもので、普通比較的安価で、入手しやすく、取り扱いも簡単な材料である。水ガラスはアルカリけい酸塩またはアルカリけい酸塩とけい酸との混合物で、ガラス状の固化した溶融物の水溶液である。わが国では JIS K 1408-1966 けい酸ナトリウムとして 1 号、2 号、3 号およびメタけい酸ナトリウムが規定されている。水ガラスの粘性は号数の多いほど小さい。また水ガラスは水に対して大きな溶解度をもった無機質の電解質で、水中では次のように加水分解すると考えられている。



水溶液中のけい酸は糸状に連なった親水性分子コロイドで、負に荷電していて、これに酸や無機塩を加えるとけい酸が析出することはよく知られている。これをけい化法ともよんでおり、ユーステンの工法、不安定水ガラス工法、ケミセクト工法、ハイドロック工法などはこの性質を利用したものである。けい化法に用いるグラウトは溶液であるから、一般には、懸濁液のものにくらべて微細な間隙にまで浸透することが期待できる。しかし、この場合でも凝結後の強度を高めようとするれば、水ガラスの濃度も硬化剤の濃度もともに大きくすることが必要となる。この点から水ガラスは3号より2号、2号より1号を用いることが望ましい場合があり、また凝固時間もこの順に長くすることができると考えてよい。セメントミルクと水ガラス混合物のゲル化は、セメントから供給される消石灰や石こうが反応して起こる。その状態を次に示す。



また電気的には、けい酸ソーダ溶液中で負に帯電しているコロイド状けい酸が、正に帯電したセメント粒子と混合して荷電置換が行なわれ、けい酸カルシウム水和物となりゲルとして分離する⁴⁾。

水ガラス水溶液は常に加水分解を起こして、その時に生じる OH⁻ イオンはアルカリ性を呈する。加水分解は温度が高くなると進行して、溶液のアルカリ度は増大し、ゲル化の速度は速くなる。セメント水ガラスグラウトの性状は、一定の水セメント比の場合には、水と水ガラスの比において水が増加するとゲルタイムは早くなり、水と水ガラスの比を一定にした場合には、水セメント比が小さいほどゲルタイムは早くなる。またセメント量が増せば粘性は大きくなり、注入は困難となるが強度は大きくなる⁵⁾。

水ガラス水溶液すなわち糸状のけい酸コロイドに硬化剤を加えると、重合して長くなり、からみ合いが発達し、三次元的に高分子化してゆくため粘性を増す。一方、スラグから溶出した Ca²⁺ と NaOH から解離した OH⁻ で Ca(OH)₂ を生じ、Na⁺ と Ca(OH)₂ の刺戟によってシリカゲルやアルミナゲルを生じて、スラグの硬化が促進される。したがって、スラグのように水ガラスとの反応性のゆるやかな硬化剤を用いれば、十分大きい強度の得られるグラウトを用いても、初期の相当時間は粘性を低く保持できて、グラウト材料として極めて有利な特長をもたせることができるのである。

次に MS 工法においてスラグが強度発現性にいかに有効であるかを説明しよう。

実験はセメントに対してスラグ、フライアッシュ、およ

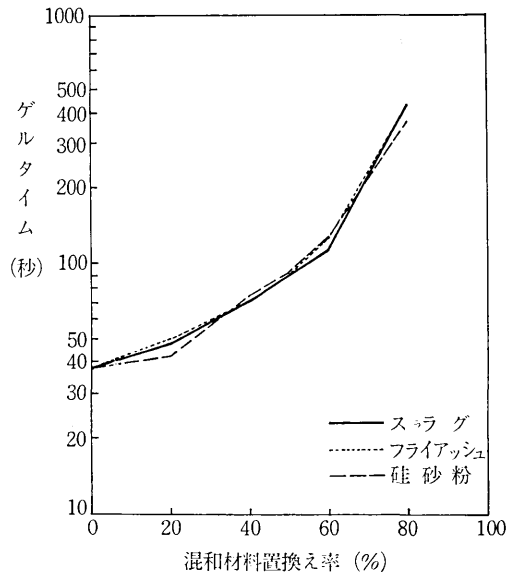


図3 置き換え材料とゲルタイム

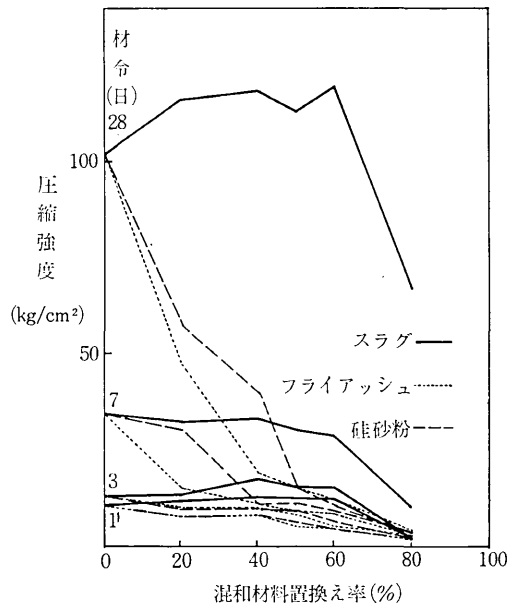


図4 置き換え材料と強度発現性

び豊浦標準砂を粉砕した珪砂粉末をセメントに混ぜ、水とC+混和材の比100%のセメントミルクを作った。各鉱物質微粉末の粉末度はブレン値で、スラグ 4000 cm²/g、フライアッシュ 2900 cm²/g、珪砂粉末 4000 cm²/gである。このセメントミルクと3号水ガラス原液を容積比で5:5に混合してグラウトを作った。グラウトのゲルタイムと圧縮強度(測定方法は2節にのべてある方法と同じ)を測定した結果を図3、図4に示す。

いずれの微粉末の場合にもほとんど同様なゲルタイムの遅延の効果が認められる。圧縮強度はスラグで置き換えたものは、スラグ置き換え率60%位までは置き換えないものと同等かそれ以上の強度を示している。フライ

表 1 スラグとフライアッシュの PHI

混和材	材令(日)	1	3	7	28
	置き換え率(%)				
ス ラ グ	20	157	117	85	133
	40	200	230	94	127
	50	159	169	82	113
	60	135	144	77	120
フ ラ イ ア ッ シ ュ	80	60	-19	22	64
	20	4	14	-37	-22
	40	12	26	0	-33
	50	-10	-25	-6	0
	60	0	-10	-2	2
	80	0	-9	0	1

アッシュや珪砂粉末で置き換えたものは、その置き換え率が増すにつれて、グラウトの強度は小さくなるのがわかる。いま珪砂粉末は非反応性であると考えて、普通ポルトランドセメントに対するスラグまたはフライアッシュの強度発現性を Keil⁶⁾ の PHI (Principal Hydraulic Index) で表わしたものが表 1 である。

$$PHI = \frac{a-c}{b-c} \times 100$$

ただし、

- a : 普通ポルトランドセメントと混和剤を置き換えをしたグラウトの強さ
- b : 普通ポルトランドセメント単味の場合のグラウトの強さ
- c : 普通ポルトランドセメントに a と同じ割合で珪砂粉末を置き換えをしたグラウトの強さ

PHI は大きいほどグラウトの混和材の強度発現性のよいことを示しており、100 の場合は普通ポルトランドセメントと混和材の強度発現性が等しいことを意味している。すなわち PHI によると、スラグの強度発現性の大きいことが明らかである。

また、スラグ使用のグラウト水和物の内部比表面積を BET 法 (キャリアーガスにヘリウムガス、吸着ガスに窒素ガスを使用) によって測定した場合、表 2 に示すようにスラグを置き換えをしたグラウトの比表面積は初期の増加が著しく大きく、強度が大きくなる原因と考えられる。セメントミルク以外のものの比表面積の値は材令 7 日において小さくなっているが、これは水和生成物の粒子が大きくなるか、あるいは結晶化によるためと考えられる。

表 2 グラウトの内部比表面積 (m²/g)

配合比率				材令 (日)			
C	S	W	水ガラス:セメントミルク	1	3	7	28
100	0	100	0:1	6	8	9	22
100	0	100	1:1	6	24	10	154
50	50	100	1:1	29	75	49	204

3. MS 工法グラウトの特性

(1) グラウトの性能

現在ではまだ地盤への注入工法は非常に経験的な面が多く、グラウトの性能試験方法も確立されていない。

グラウトの混合後粘性が増加して、流動性を失うまでの時間、すなわちゲルタイムの測定方法として、ここではビーカーの中で一定量のグラウトをガラス棒で混合攪拌して、ビーカーを横に倒した状態で表面の流動性がなくなった時とした。攪拌の方法は、水ガラスとセメントミルクの混合物の量が 200cc になるように計量して、500cc のビーカーの中で、ガラス棒で 15 秒間よく混ぜ、以後は 1 分まではごくゆっくり混ぜて、1 分以降は静置した。ゲルタイムが 1 分以内の場合には、普通はゲルタイムと判定する 5~10 秒位前から、グラウトを攪拌している手に粘性が急激に変化し始めるのが感知される。ゲルタイムが 1 分以上のものは、時々ビーカーを傾けてみて、流動性を失った時をゲルタイムとした。ゲルタイムの測定は 2 度行ない、その差が 1 秒以内の時はその 2 つの測定値の平均値を、1 秒以上の差があった場合には 3 度測定して、その平均値をとってゲルタイムとした。ゲルタイムの判定の精度は、グラウトが分離しないで凝固するものはゲル化の判定が明確で、精度も良好であるが、グラウトが分離するものでは、ゲルタイムの長いものほど判定のバラツキが大きくなった。

グラウトの強度は φ3×4cm または φ5×10cm 型枠にグラウトを流し込んで成形し、凝固後 30 分~1 時間後に脱型し、以後圧縮強度を測定する材令まで淡水中あるいは海水中に養生した。圧縮強度試験には φ5×10cm 供試体を使用した方が測定値のバラツキが少なく、安定した値が得られた。以下の文中に特にことわりのない場合は φ5×10cm 供試体を使用したものである。なお、これらの実験は、温度による影響をさけるため、すべて 20°C の恒温室内で行なった。

ゲルタイムを測定した結果から、特に W/C+S (W: 水, C: セメント, S: スラグ) が 100% の場合について C と S, 水ガラスとセメントミルクとの割合とゲルタイムの関係を図 5 に示した。実験結果を総合して、次のことがわかった。

① 水ガラス (けい酸ソーダ 3 号) とセメントミルクの配合割合によってゲルタイムは変化し、水ガラスが減少して、セメントミルクが増すほどゲルタイムは短くなる。なお、セメント中にスラグの置き換えをしない場合のゲルタイムは樋口氏の実験結果⁷⁾ と比較的良好に一致している。

② セメントミルクの水セメント比 (W/C+S) が大きくなるほど、ゲルタイムは長くなる。

③ セメント中のスラグ置き換え率が増すと、ゲルタ

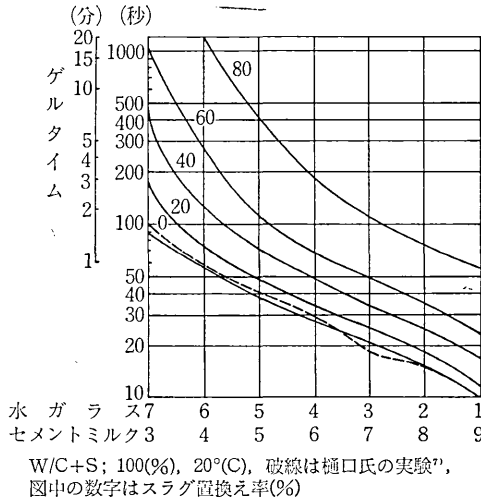


図 5 グラウトの配合とゲルタイム

タイムは長くなる。

④ セメントミルクの $W/C+S$ が大きくなると、および水ガラスの配合割合が増すと、グラウトの上澄部分が増える傾向は増す。

⑤ スラグ置き換え率が増すと分離する傾向は減少する。

⑥ どの $W/C+S$ のグラウトでも、水ガラスを多くし、水ガラスとセメントミルクの配合割合がある値以上になると、ゲルタイムは急激に長くなる傾向がある。

⑦ グラウトの温度が下るとゲルタイムは長くなって、温度が上るとゲルタイムは短くなる。この関係を図 6 に示す。

次に図 7 は $W/C+S$ を 100%、水ガラスとセメントミルクの配合割合 5 : 5 とした場合のグラウトの圧縮強度の変化の状況を示した。一般に材令と共に強度は増加

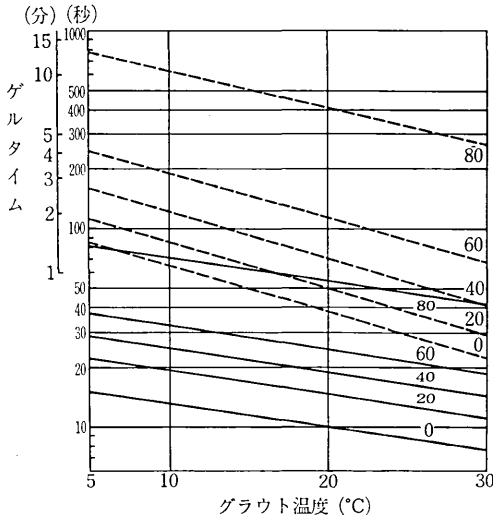


図 6 グラウト温度とゲルタイム

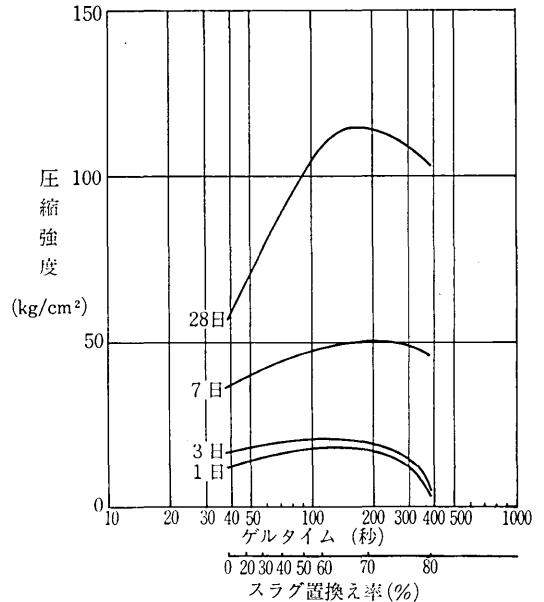


図 7 ゲルタイムと圧縮強度

する。ゲルタイムを長くするために、スラグの置き換え率を変えてゆくと、スラグの量が増すにつれてグラウトの強度は増し、ほぼ 65% 付近に最大値があり、80% の置き換えでは、初期材令では強度は低いが、材令 7 日以降になると、スラグを置き換えない場合よりも大きい強度を示している。すなわち、ゲルタイムを調節するためにセメントの一部をスラグに置き換えても、グラウトの強度は十分確保することができることがわかる。

$W/C+S$ の大きいミルクを用いたグラウトでは、その強度は急激に低下する。これは凝固する際に材料が分離することによってさらに促進されるようである。また、水ガラスとセメントミルクとの配合割合を 3 : 7 ~ 2 : 8 程度にした場合にグラウトの強度は最大になる。これらの関係を図 8 に示した。

また実験によると、セメントと水ガラスを混合すると急激に凝固するが、この二者の接触を避ければ、それ以外のグラウト材料の混合順序を変えても、各材料の比率が変わらなければ、グラウトのゲルタイムと強度はたいして変わらないことがわかった。

凝結したグラウトを養生するのに、淡水中の場合と海水中の場合について実験したが、両養生条件とも全く変わらない安定したグラウト強度を示し、両者の間には有意の差のないことが検定確認された。その状態を図 9 に示す。また海水中に養生すると、供試体の外面に主として炭酸カルシウムの析出をみたが、スラグ混入量の多いグラウトではその析出量が少なく海水中での安定性のよいことがわかった。

実験的には、グラウト固結物を淡水中と海水中にそれ

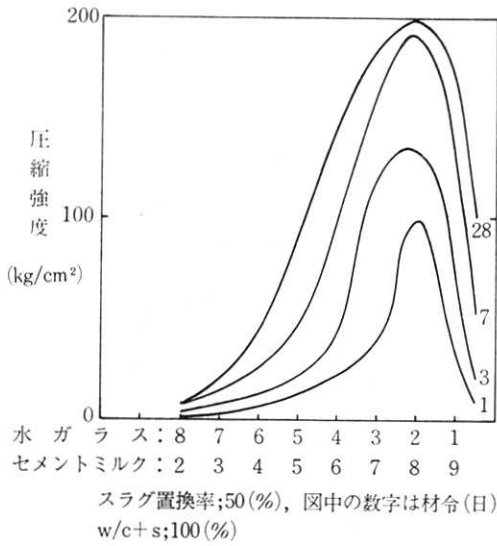


図 8 グラウトの配合と強度

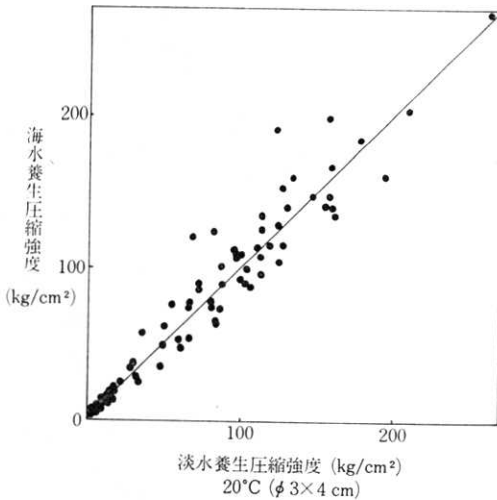


図 9 淡水養生と海水養生

ぞれ養生した場合の外観観察と内部比表面積および空隙の測定を行なった。海水中に養生したものではスラグ置き換えをしないもの(表3 配合B)は材令2ヵ月で亀裂を観察している。材令4ヵ月になると、グラウトは淡水中に養生したのも写真1に示すように、セメントミルクと水ガラスの二成分(左側の二つ)では膨脹および亀裂を生じているが、セメントにスラグを50%置き換えをしたもの(右側の二つ)は全く健全である。また海

表 3 グラウトの比表面積と空隙

記号	配合比率			水ガラス:セメントミルク	比表面積 (m ² /g)		空隙 (cm ³ /g)		
	C	S	W		淡水中	海水中	淡水中	海水中	海水/淡水中
	A	100	0	100	5:5	155	178	0.43	0.39
B	100	0	100	3:7	20	4	0.42	0.49	117
C	50	50	100	5:5	145	146	0.41	0.37	90
D	50	50	100	3:7	91	19	0.34	0.28	82

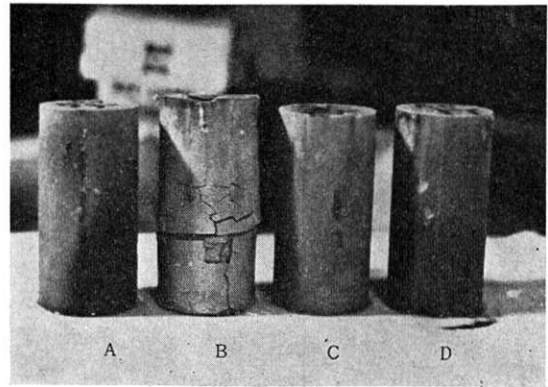


写真 1 淡水中養生(4ヶ月)したグラウト固結物

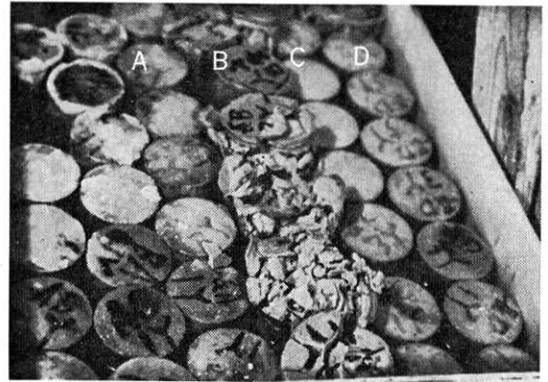


写真 2 海水中養生(4ヶ月)したグラウト固結物

水中に養生したものは写真2に示すようにスラグを置きかえたものは全く変化はないが、セメントミルクと水ガラスだけのもの(右から3, 4列目)は膨脹と破壊を示した。表3に示したような配合種別のものについてみると、最も耐久性の良いものは配合Cのもので、次が配合Dであり、配合A, 配合Bの順に劣化が進んでいる。すなわち、この実験をした範囲では水ガラスの使用比率の多い配合のものの方が耐久性は良好のように観察された。

材令4ヵ月の状態のグラウト固結物の内部比表面積は表3に示したように、スラグを置きかえると置きかえない場合より水ガラスとセメントミルクの比が3:7のものでは約4.5倍も比表面積が大きく、水ガラス配合比率の大きいものが比表面積も大きく安定性が高い。更に同じ試料について、水銀圧入式のポロシメータで、空隙を測定した結果も表3に示したように、同一条件のグラウトで比べた場合にスラグ置き換えをしない方が空隙量は大きい。また海水の場合は淡水の場合にくらべて、破壊の著しい配合Bのグラウトでは空隙の増加があり、不安定であることが認められる。

(2) グラウト材料の特性とグラウトの性能

(a) セメントおよびスラグの粉末度

一般に、微細な空隙に懸濁形のグラウトで填充するに

表 4 粉末度とグラウトの特性値

スラグ粉末度 (cm ² /g)	セメント粉末度 (cm ² /g)	スラグ置換率 (%)	ゲルタイム (秒)	圧縮強度 (kg/cm ²)		
				1 日	3 日	7 日
4000	3200	0	40	11.5	15.3	37.0
		20	59	14.1	19.4	41.7
		50	108	17.2	20.8	48.4
		80	400	2.6	4.1	46.3
4000	6000	0	30	11.4	33.7	57.2
		20	35	14.0	27.4	58.0
		50	62	15.9	21.2	47.7
		80	300	1.8	3.6	30.9
6000	6000	0	30	11.4	33.7	57.2
		20	34	16.5	33.5	60.1
		50	54	17.5	23.9	54.7
		80	300	2.8	2.9	35.7

表 5 スラグ粉末度とゲルタイム (秒)

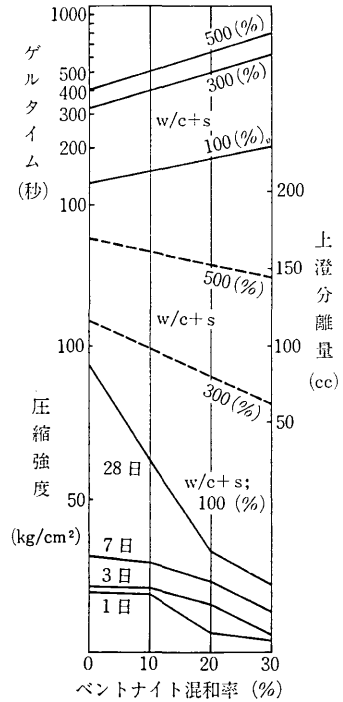
スラグ粉末度 (cm ² /g)	W _G : C _p		
	4000	5000	6000
5 : 5	95	105	105
2 : 8	35	37	35
1 : 9	20	24	24

(注) W_G : C_p = 水ガラス : セメントミルク (容積比)

は、その粒径が小さいほど狭い間隙にまで注入しようと考えられる。セメント注入は小さい間隙には入りにくいので、コロイドセメントがこの点を改善するのに役立つことなどが最近の実績から報告されている²³⁾。そしてわが国では、数社のセメントメーカーがコロイドセメントを供給しており、その粉末度はブレン値で 5000~7000 cm²/g 程度のもが多い。試製した粉末度 6000 cm²/g のコロイドセメントを使用した MS グラウトの性質は、表 4 に示すようにゲルタイムは 2 (1) 項に示した普通ポルトランドセメントの場合の 60~80% 程度に短かくなっている。スラグ粉末置き換えによるゲルタイムの調節はコロイドセメントに対しても効果的で、スラグを用いない場合に比べて、50% 置き換えをした場合にはゲルタイムは約 2 倍に長くできる。また、コロイドセメントを用いたグラウトの強度は表 4 に示すように、普通ポルトランドセメントに比べて材令 1 日では大差なく、3 日以降には大きい強度を得ている。さらにこのコロイドセメントに対して、置き換えをするスラグの粉末度が大きくなると、強度も大きくなる点が認められる。次に水ガラスとセメントミルクの配合割合を変えた場合に、スラグの粉末度がグラウトのゲルタイムに及ぼす影響は、表 5 に示すように、セメントに対し 50% スラグを置き換え、W/C+S が 100% の場合のゲルタイムは、スラグの粉末度が 4000~6000 cm²/g では大した変化を示さない。

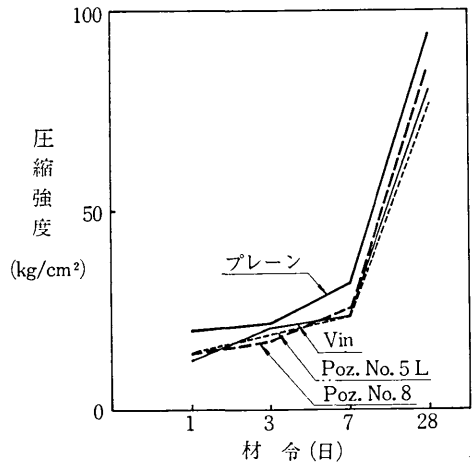
(b) ベントナイトの添加

グラウトの安定性を増すために、セメントミルクを作



水ガラス : セメントミルク ; 5 : 5
スラグ置換率 ; 50 (%)

図 10 ベントナイトの影響



スラグ置換率 ; 50 (%)
w/c+s ; 100 (%)
水ガラス : セメントミルク ; 5 : 5

図 11 混和剤の影響

る場合にベントナイトを添加すると、その混和率が多くなるほどゲルタイムは伸び、グラウトの分離上澄量は減少する。しかしグラウトの強度は次第に低下する。この傾向は図 10 に示すように、スラグを置き換ええないものも、置き換えたものにも同様である。

(c) 混和剤の添加

混和剤の添加による影響を調べるため、ヴィンゾル、ポゾリス No. 5 L, 同 No. 8 などを使用して実験した。

混和剤の中には水ガラスと直接反応してゲル化するものもあり、グラウトのゲルタイムを短くする場合もある。しかし、グラウトの分離上澄量は多少多くなる傾向が認められた。ただし、スラグを置き換ええないものも、置き換えたものも $W/C+S$ が 500% で、水ガラスとセメントミルクの配合割合が 1:9 の場合のように、著しく水量の多いグラウトの場合にのみ分離上澄量の減少が認められる。グラウトに混和剤を加えた場合の材令と強度の発現性は、混和剤を加えない場合とほぼ変わらないが、図 11 に示すようにどの混和剤の場合にもブレーンのものよりも少し強度は小さいようである。なお混和剤については、品種と使用量について検討の余地は多いと考える。

(3) 注入に関する検討

(a) グラウトの流動性

グラウトの注入時の作業性を比較するために、土木学会の流下試験装置⁶⁾の有溝コーンを除いた装置によって、グラウトの全材料を混合した直後の流出時間を測定した。測定結果は表 6 に示す通りであって、次のことがいえる。

① スラグを置き換えてもグラウトの流出時間はほとんど変わらない。

② $W/C+S$ を大きくするとグラウトの流出時間は短くなる。

表 6 グラウトのフロー (秒)

スラグ置換率 (%)	$W/C+S$ (%)		$W_C : C_p$	
	100	300	0:10	5:5
0	3.6	5.0	3.3	3.6
20	3.7	4.3	3.3	3.6
50	3.7	4.0	3.3	3.6
80	3.7	4.0	3.3	3.6

(注) $W_C : C_p$ = 水ガラス : セメントミルク (容積比)

(b) 注入の条件とグラウトの強度

これまでの実験では、グラウトの強度試験用供試体を作る場合に、流し込み注入をする型枠の中には、当初はからで空気が入っているものばかりであった。この実験では水中に流し込み成形をした場合の強度について調べたものである。

実験の方法は、セメントに対するスラグ置き換え率を 0, 50%, $W/C+S$ を 100% としたセメントミルクを作り、3号水ガラス原液とセメントミルクの容積比が 5:5 になるように配合したグラウトを $\phi 5 \times 10$ cm 型枠の中に、ガラス製の漏斗にガラス管をつけた注入器具を通して 1 ショット方式で注入を行なった。型枠内の条件は、空気中、淡水中、および海水での 3 種類とした。成形後、脱型した供試体は強度試験の材令がくるまで 20°C の海水中に養生した。

実験の結果は表 7 の通りである。すなわち、空気中に流し込み注入成形したグラウトの強度を基準にして考察

表 7 注入条件と圧縮強度 (kg/cm^2)

注入条件	スラグ置き換え率 (%)	1d	3d	7d	28d
空気中	0	10.0	18.9	36.7	106.2
	50	15.1	20.4	39.5	122.3
淡水中	0	7.9	10.7	27.0	95.3
	50	12.5	14.6	29.3	116.2
海水中	0	3.3	6.6	7.4	37.2
	50	7.9	10.3	12.8	73.4

すると、

① 空気中で注入成形したものは、淡水中や海水中に注入成形したものよりも強度は大きく、この傾向はスラグを置き換ええないものも、置き換えたものも同様である。

② 海水中で注入した場合には、淡水中で注入したものよりもグラウトの強度は小さい。これは海水と水ガラスが反応して、軟質のゲルがグラウトと海水の接触部分に生成しており、この部分は供試体は成形時にその最上部に多く集まっているので、著しく軟質の部分は取り除いたが、このような弱い部分が生成するために強度が低いと考えられる。水ガラスと塩分の反応のほかに、グラウトに塩分が加わるとセメント中の石こうの溶解度が高まって、反応が促進し凝固が早くなるためであろう。

③ いずれの注入条件においても、セメントにスラグを 50% 置き換えたものの方が強度は大きい。

④ 空気中注入に対して、水中注入したグラウトの強度は低下しているが、この強度低下率はスラグを置き換えてないものの方が、50% 置き換えをしたものより大きい。

以上の結果から、セメントにスラグを置き換えたものは、置き換ええないものより、水中特に海水中でも安定な強度を示すグラウトであることがわかる。

(c) 小形砂層注入試験

$\phi 5 \times 10$ cm の型枠中につけた砂層に注入して成形した固結物の強度について調べた。実験の方法は型枠に粒度を 5~2.5 mm にふるった砂を軽く詰め (間隙比 1.104)、この中にあらかじめガラス管の注入管をつけた漏斗を中央に鉛直に挿入しておいて、これを通じて 1 ショット方式で自然流下によって注入する。グラウトの配合と注入の条件は次の通りとした。

(i) 注入状況の差異を検討するもので、配合はスラグ置き換え率を 0, 50%, $W/C+S$ を 100%, 水ガラスとセメントミルクの配合割合を 5:5, 2:8 にしたグラウトを、当初の砂の間隙を空気、淡水、海水で満たした中に注入し、材令が 7 日と 28 日の強度測定を行なった。なお、比較用として LW の注入供試体を作った。LW の配合は次の 2 種類とした。

(ア) A液: 水ガラス 70% 水溶液 100 l, 1部

表 8 小形砂層への注入試験 (海水中養生)

スラグ置換率 (%)	注入条件 W _G : C _p	空気中		淡水中		海水中	
		σ ₇	σ ₂₈	σ ₇	σ ₂₈	σ ₇	σ ₂₈
0	5 : 5	16.8	68.3	25.8	64.7	18.1	57.9
	3.5 : 6.5	—	—	—	—	35.2	51.5
	2 : 8	80.3	82.8	59.1	66.5	30.8	51.2
50	5 : 5	26.3	77.7	19.4	69.3	18.9	58.1
	3.5 : 6.5	—	—	—	—	38.8	92.8
	2 : 8	74.4	107.0	87.7	111.6	56.6	58.6
LW	(ア)	6.4	40.8	5.6	38.8	3.4	20.4
	(イ)	1.3	5.9	1.4	5.4	1.0	3.9

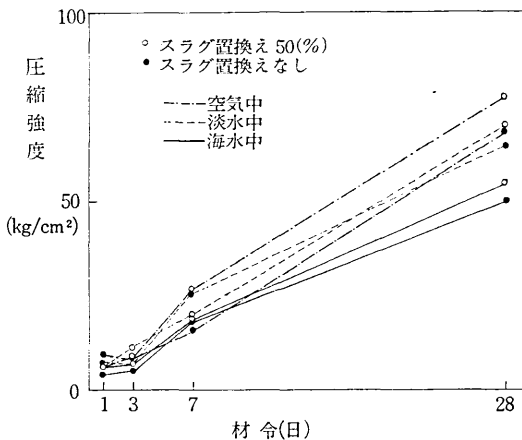


図 12 小形注入供試体の強度

B液: セメント 50kg, ベントナイト 7kg 4
水を加えて 100l としたセメントミルク,
1 部

(イ) A液: 水ガラス 50%水溶液 100l, 1 部

B液: セメント 30kg, ベントナイト 5kg 4
水を加えて 100l としたセメントミルク,
1 部

どの供試体も強度試験の材令がくるまで、海水中に養生する。すべての実験は 20°C 恒温室内で行なった。試験結果は表 8 に示す。また材令 1 日から 28 日までの強度の推移は図 12 に示す通りである。

(ii) 水ガラスとセメントミルクの配合割合が、強度におよぼす影響を調べるもので、スラグ置き換え率 0, 50%, W/C+S は 100%, 水ガラスとセメントミルクの割合を 5 : 5, 3.5 : 6.5, 2 : 8 としたグラウトを砂層中に海水中で注入成形し、強度測定材令まで海水中で養生する。結果は表 8 に示す。

実験の結果から、次のことが考察される。

① 一般に注入条件により、グラウト固結物の強度は、空気中>淡水中>海水中、の順になっている。

② どの注入条件でも、スラグをセメントの一部に置き換えをしたものの強度は、しないものに比べて同程度かそれより大きい値を示す。

③ 各注入条件では一般に、水ガラスとセメントミルクの配合割合は 5 : 5 のものよりも 2 : 8 のものの方が、すなわち、セメントミルクの量の多い配合のものの方が大きい強度を示す。海水中注入、海水中養生の場合の σ₂₈ は、スラグを置き換えたものでは配合割合が 3.5 : 6.5 のものに最大値がみられた。

④ 各注入条件における固結物の強度は、図 12 に示す通りで、材令とともに増加している。

⑤ LW 工法による同注入条件の固結物の強度よりも、MS 工法による固結物の強度の方がすべて大きい値を得ている。

⑥ この小形注入供試体の強度は、グラウト単味の強度よりも小さいのは、型枠中に当初に入れた砂が整粒された単一粒度のもので、貝殻が多く、しかも著しくゆるく詰めたものであることによると思われる。

以上のことから、セメントの一部をスラグで置き換えた場合には、グラウト単味の場合と同様に、注入固結物についてもゲルタイムは長くすることができ、固結物の強度はスラグを置き換えない場合に比べて同程度か、それより大きい強度値を得ることができ、海水中工事でも同様のことが認められる。

(d) 大形モールドによる注入実験

φ 100×115cm の鋼製円柱形 2 つの割りモールド中に、表 9 に示すような砂礫層の注入地盤を作り、これに現場で実際に使用するミキサ、注入ポンプ、Y 字管およびバッカー付ストレナー式注入管などを使用して、図 13 に示すような装置で、1.5 ショット方式の注入試験を行なった。

注入の状況は、たとえば写真 3, 4 に示すように支障なく注入が可能である。注入量は 30l/min, 注入圧は 0.5kg/cm² 程度であった。

次に φ 58×88cm のモールドを用いて、グラウトの配合を種々変えた注入試験を行なった。注入の条件は表 9 の注入地盤の砂礫層の状態が、自然含水状態および下方から上方に向けて水流のある中へ注入する場合の 2 種類

表 9 注入地盤の性質

		小 礫	細 礫
粒度試験 結 果	60% 径 (mm)	5.3	1.7
	10% 径 (mm)	2.8	0.45
	均 等 係 数	1.9	3.8
	2000μ ふるい通過率 (%)	4.0	73.0
	420μ ふるい通過率 (%)	2.0	8.3
	74μ ふるい通過率 (%)	0.4	1.1
間 隙 比		0.71	0.59
F M		5.36	3.55
自然含水率 (%)		3~5	

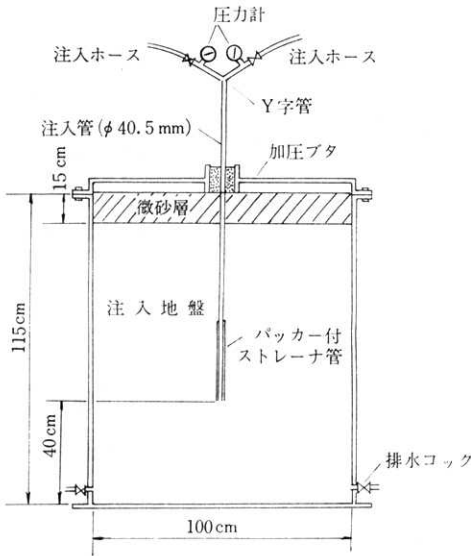


図 13 大形注入試験装置

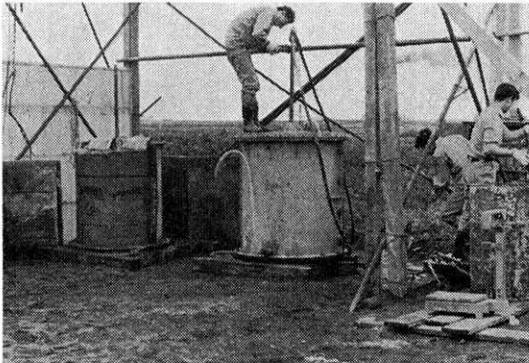


写真 3 大形モールドによる注入実験の状況

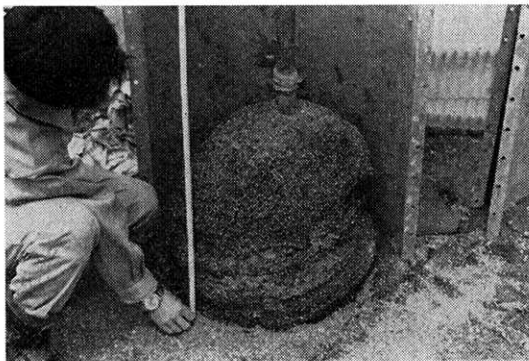


写真 4 グラウトを 10l 注入した球根

について行なった。固結物の測定値の一例として、スラグ置き換え率 60%, W/C+S が 100%, 水ガラスとセメントミルクの配合割合が 5:5 の場合を示すと表 10 の通りである。

簡単な考察にすぎないが、一般に、止水を目的とする場合には、経験から地盤間隙の 50% 以上の注入が必要であると考えられている。この実験から得られた間隙充填率は、この条件を上回っており、止水効果は十分とい

表 10 注入固結物の性状の例

注入条件	注入地盤	固結率 (%)	間隙充填率 (%)	σ_{28} (kg/cm ²)
自然含水状態	細 礫	403	66.7	80
	小 礫	385	62.7	57.5
流水中	0.49* 細 礫	358	78.7	66.0
	0.27* 小 礫	360	83.9	81.1

(注) 固結率 (%) = (固結物容積/注入量) × 100
 間隙充填率 (%) = (注入量/固結物容積 × 地盤間隙率) × 100
 * 流速 (cm/sec)

える。圧縮強度は大きかみにて、小形の注入試験値に近い傾向を示している。固結率は LW 工法で同じ注入地盤に注入した場合が 300% 前後であるので、MS 工法の場合は良好であると判断される。

む す び

セメント水ガラスグラウトの特性を、スラグ粉末を利用して改善する方法を研究した。セメントの一部をスラグで置き換えることによって、グラウトのゲルタイムは延長され、W/C+S や水ガラスとセメントミルクの配合割合の調整によって、ゲルタイムを制御することができるようになった。そして、従来一般の混和材料を添加した場合や、主として水量を増やすことによってゲルタイムを長くした場合と違って、グラウトの強度を低下することなく、かえって大きい強度を発揮すること、海水に対しても安定性のよいグラウトであることを明らかにした。

グラウトに用いるセメントの粉末度は、細かいものほど地盤の間隙に浸透しやすいと考えられるが、コロイドセメントに対してもスラグ粉末によってゲルタイムを調節することは可能で、効果的であることがわかった。

以上のほか、グラウトの性状に関して実験した範囲では、スラグの粉末度はゲルタイムに大して影響しないことがわかった。また混和材料の使用については、混和材としてベントナイトを加えると、ゲルタイムは長くなり、強度は減少するが、グラウトの分離を防ぐには効果がある。混和剤として、一般に、セメントコンクリートに用いられているものから 3 種類だけ検討してみたが、水量の多いグラウトの分離は減少させるが、ゲルタイムは幾分短縮する傾向のものもあり、強度はプレーンの場合より少し小さくなった。しかし、ゲル化する以前の浸透性の点からは、まだ利用検討の余地があると思う。

グラウトを注入する場合の検討結果から、スラグをセメントの一部に置き換えてもフロー値は変わらない、砂礫層の空隙を満たしている物質が、空気 > 淡水 > 海水の順に強度の大きい固結物が得られ、いずれの場合にもスラグを 50% 置き換えたものの強度は置き換えないものよりも大きい傾向が認められた。いずれの場合も、従来工法よりも大きい強度が得られ、大形モールドによる現場

スケールの実験でも注入が良好に行なえることを証明した。

なお、このように MS 工法は、強度と流動性を保持しながら、ゲルタイムの制御ができるので、今後でてくるであろう非常に高圧をうけるトンネルでは、従来のように掘削時に水をとめるという目的だけではなく、注入後の地盤の強度を高め、ライニングの設計、またはトンネルの耐久性に十分効果のある注入工法が必要となるが、この工法は、これらの目的に十分こたえることのできる新しい注入工法であるということが出来る。

これらの結果は今後現場においてさらに検討を加え、注入圧力または注入量と連動してグラウトの配合を変え、地盤の状態に応じたグラウトが注入でき、最も効果的な注入工事が行なえるような、自動化されたシステムまで開発されるようにしたいと考えている。

なお、大形モールドによる注入試験は日本総合防水

(株)にたいそうご協力をいただいた。ここに感謝の意を表する。
(1971 年 11 月 4 日受理)

参 考 文 献

- 1) 坪井, 柴崎: 土木施工, 11 卷 12 号 p.91, 1970
- 2) 日本国有鉄道建設局, 注入の設計施工に関する研究委員会: 注入の設計施工指針 (案), 1970
- 3) 北原: 青函トンネル調査工事報告, 土木学会誌, 56 卷 4 号 pp.2-8, 1971
- 4) ハンス・イエーデ(樋口・吉田訳): セメント薬液注入工法, 技報堂 p.123, 1960
- 5) 日本材料学会, 土質安定材料委員会: 薬液注入工法, 鹿島出版会 p.21, 1968
- 6) F. Keil: Slag Cements, Proceedings of 3rd International Symposium on the Chemistry of Cement, 1952
- 7) 樋口, 杉山: セメント水ガラスグラウト, 鉄道技術研究所報告, No.454, 1965
- 8) 土木学会: プレストレストコンクリート設計施工指針, 1961

東京大学生産技術研究所報告 刊行

第 21 卷・第 5 号 (和文)

山 口 楠 雄・嶋 田 淑 男 著

ハイブリッド方式による制御用限時装置の開発

(Development of Control-Timer of Hybrid System)

限時装置は、任意時点からの一定の時間あるいは遅れの信号発生に用いられ、タイマと呼ばれることが多い。工業的な制御の目的に使用されるタイマには、モータ・タイマ、CR タイマ、デジタル・タイマおよび計算機の利用などがある。これらのタイマにはそれぞれ特徴があるが電気信号による設定、高精度、広限時範囲、小形で計装密度を高めうることおよび計装と取り扱いの容易さなどの要求を必ずしも満たさない。これらの要求に合致した船用タイマの一種として、時間積分のみをデジタル信号で行ない、他の動作はアナログ信号によるハイブリッド方式のタイマを開発した。

設計に当って、タイマの各アナログ要素に対する許容誤差を考慮し十分満足すべき結果を得た。また制御装置として重要な信頼性の試験を行なうために長時間の動作試験中のパラメータの設定とデータの収集整理を自動的に行なう試験装置を早くから開発し有効に使用した。

このタイマの特徴を生かし、パフォーマンスを上げるため、並列および直列の多重設定方式を標準化してシーケンス制御などに利用できるようにした。これにより、一設定当りのコストを下げる事ができる。

このハイブリッド・タイマの使用例としてはシーケンス制御のほか時間のカスケード制御、装置群の起動間隔の操作による流量制御などがあり、それぞれ有効で使いやすいたしがめられつつある。

(1971 年 12 月発行)