

A NEW METHOD OF CHEMICAL GROUTING TO SOLIDIFY LOOSE GROUND

(Trans. of JSCE, No. 12, Feb. 1952)

By *Masanori Numata, C.E. Member, Takakazu Maruyasu, C.E. Member*
Tatsuji Kurosaki, C.E. Assoc. Member



Synopsis Cement grouting has been commonly used to solidify loose ground or to check ground-water leakage in the course of excavation or other types of construction work. In cement grouting, however, cement particles in the grout form a kind of so-called suspension; and the grout can penetrate neither into tiny seams of rock that are smaller than the cement particles, nor effectively into sand.

A means to be used successfully in such a case is chemical injection in which suitable chemicals that are originally in a perfectly liquid state are injected and made to coagulate after the injection to effect the purpose of solidification.

Heretofore, a combination of sodium silicate (Na_2SiO_3) and calcium chloride (CaCl_2) has been used for this purpose. But this method has a drawback concerning the procedure of injection. As the two chemicals react each other very rapidly, the solution of sodium silicate must be injected first, and, after cleaning the pipes and the pump free of the first chemical, the second chemical is to be injected. Thus, the injection of two chemicals must be carried out alternately, and this process not only is a troublesome operation but also has a drawback that the chemicals react each other and coagulate near the injection-pipe outlet to stop the passage of the second chemical, the deeper penetration of first chemical thus being not fully utilized.

Therefore, it is essential to inject both chemicals simultaneously through one injection pipe either by mixing them before pumping or by using two pumps. Moreover the time that shall pass after the two chemicals have been mixed together until they start to coagulate (**coagulation time**), should be able to be easily controlled to accord properly with the purpose of the work.

For instance, in case where a considerably large area or mass is to be solidified, the coagulation time should be maintained longer. On the other hand, for checking leakage of water, the chemicals should coagulate as quickly as other working conditions permit.

In order to develop higher strength of the solidified layers, a more concentrated solution of sodium silicate will be required. The viscosity of sodium silicate solution becomes higher at a great rate as the density increases, so it becomes more difficult to effect a satisfactory penetration in narrow voids. This has been another problem in injection of chemicals that consist mainly of sodium silicate. It is necessary to reduce the viscosity without affecting the strength and other properties of the chemicals. Various studies have been done in this respect.

Chemicals Proposed by the Authors:

As a mean to solve the above-mentioned problems, the author devised a method of using a combination of sodium silicate and sodium aluminate, adding, according

to the necessity, a certain amount of NaOH in order to stabilize the reaction of these chemicals.

Sodium aluminate is an intermediate product in the process of manufacturing alumina. The proportion of its two components, Al_2O_3 and Na_2O , can be changed as is desired. In addition to this, the viscosity of this solution does not increase with the degree of its concentration at so great a rate as in case of sodium silicate (Fig. 1.).

Consequently, the mixture of sodium aluminate and sodium silicate solutions is far less viscous than sodium silicate alone. This is to say that the added sodium aluminate has a role of lowering viscosity while it itself acts as one component of the chemical reaction.

On the Coagulation Time:

The most influential factor in using these chemicals is the temperature of the solution. Fig. 9 shows the relation between the temperature and the coagulation time. The coagulation time fluctuates also with the change in mixing proportion of these two chemical solutions as well as the proportion of the two components of each solution. In general, the coagulation time becomes shorter as Al_2O_3 content increases. (Figs. 3~8) By controlling these factors, in doing injection, the coagulation time can be adjusted within the time range from about one minute to one hour, and this time range can be considered to be sufficient enough for any practical purpose.

On the Strength:

The strength of the sand stratum solidified by the injection of chemicals will be governed by the mixing proportion and chemical composition as well as by the size of the sand grains solidified. According to the experiment made on test pieces in a laboratory, compressive strength of the solidified sand can attain to 20kg/cm^2 to 30kg/cm^2 . (Figs. 10~15) The solidified test-pieces maintain their strength better by storing them in water than by exposing them to open air. Considering the wet condition prevailing in the loose mass of the natural ground, this fact may be considered as another desirable characteristic of the proposed chemicals.

The grain size of solidified sand has a certain effect on the strength thus attained. As have been commonly seen in the injection of other chemicals, the strength decreases as the grain becomes larger. (Figs. 20~21)

In practical applications, however, the strength will not materially be affected by the chemical properties of sand grains because the alkaline value of the chemical solution is kept relatively high.

In short, the strength commonly expected in ordinary chemical injection will be sufficiently attained by author's method.

On the Permeability:

The permeability of the solidified sand was tested by a newly-devised set-up shown in Fig. 30, which was found to be also applicable with very good results to testing the permeability of concrete.

The results of the tests are shown on Fig. 31. Being computed from these results, the coefficient of permeability was found to be a value of an order of 10^{-8} cm/sec . This value is a result obtained from laboratory-made specimens, so

some different values should be expected in case of practical application. There is however, no doubt, that the author's method would satisfactorily be employed in checking ground-water flow in most of practical cases.

Experimental Test of Injection:

In order to ascertain whether the two chemical solutions pumped into an injection pipe from two separate containers would mix together well and also to know how the mixed solution penetrates into sand, injections were carried out experimentally into sand masses filled in boxes and in holes dug in the ground. The set-up for this experiment is shown in Fig. 32 and Fig. 33.

The shape of injecting nozzle was also studied, changing it in many respects to improve its effects. An injecting head with a mixing chamber at the tip as shown in Fig. 34 has produced best result.

After the injection had been made, the condition of the coagulated sand was examined, the purpose of solidifying being found to have been sufficiently attained.

In addition to the above tests, a series of experiments was conducted on water-clogged sand with sets-up as shown on Fig. 35 and Fig. 36, and it was found that the injected solution had displaced the pore-water of the sand and coagulated at every tiny corner of voids in the sand.

Another series of tests was made on such technical items as proper depths of injecting holes, the optimum injecting pressure, etc. It was found that much depends on injection technique if an even penetration of the solution is desired.

Injection Test in Field:

Through holes of about 2 meters to 5 meters in depth dug in the ground as shown in Fig. 37 and 38, field experiments were carried out with a set-up as shown on Fig. 39. During injection, utmost care has been paid to ascertain injecting pressure, the viscosity and quantity of the solutions injected.

At first, the two chemicals were pumped in by two separate pumps. But, a second trial in which the two solutions were mixed in advance of pumping and then pumped in by one pump was a success. Success in this process which has been regarded very difficult heretofore is to be considered as a great progress in the art of chemical injection.

About four months after the injection, the ground around the injected spots was excavated. The condition of the ground as revealed by the excavation is shown by the photos. 5 and 6. It may be seen that there is a distinct boundary between the solidified portion and the rest of the ground.

Test specimens were taken from the solidified portion and a series of compression and permeability tests was made on them. The compressive strength was about 10kg/cm^2 and the coefficient of permeability 10^{-5}cm/sec . No compression test was made on the unaffected part of the ground, since it was too loose to take a test piece, but the natural mass showed a coefficient of permeability of 10^{-3}cm/sec .

Conclusion:

Viewing from the above mentioned results obtained both from basic laboratory tests and field experiments, the author has been led to believe that his method of

chemical injection is able to give a practical solution to such problems as the coagulation time, viscosity of sodium silicate solution, etc. which had been regarded very difficult to control.

The author's method is being employed and affecting very satisfactory result at a construction site of a temporary coffer-dam of a big dam project where there is a 15 meters deep layer of gravel. An additional report will later be presented to deal with applications to field projects including the above example.

新しい薬液注入による地盤の固結方法に関する研究

正員 沼田 政 矩*
 正員 丸 安 隆 和**
 准員 黒 崎 達 二***

目 次

第1章 研究の目的	(4) 固結される砂粒の大きさと強度との関係
第2章 薬液注入の現状	(5) 固結される砂の砂質と強度との関係
第3章 この研究に使用する注入薬液	(6) 養生温度と強度との関係
第4章 注入薬液の凝固時間について	(7) 結 論
(1) 苛性ソーダの添加量と凝固時間	第6章 透水試験について
(2) アルミン酸ソーダと珪酸ソーダとの混合割合と凝固時間	第7章 実験室における注入試験
(3) 珪酸ソーダの濃度と凝固時間	(1) 砂箱に注入する場合
(4) アルミン酸ソーダの濃度と凝固時間	(2) 地中の砂層への注入試験
(5) 薬液の組成と凝固時間	(3) 水中に浸した砂箱への注入試験
(6) 温度と凝固時間との関係	第8章 現場における注入試験
(7) 結 論	(1) 計画の概要
第5章 強度について	(2) 注入現場の状況
(1) 薬液の混合割合及び養生方法と強度との関係	(3) 試験設備
(2) 苛性ソーダの混和量と強度との関係	(4) 注入装置
(3) 砂が含水している場合の強度	(5) 注入試験
	(6) 注入現場の掘鑿による注入効果の検討
	第9章 結 び

第1章 研究の目的

従来、軟弱な地盤に注入してこれを固結したり、漏水の多い地盤に注入して防水をしたりするために、セメント注入が広く用いられてきた。しかし、どんな注入方法を用いるにしても、また、どんな薄い液であつても、セメント乳は結局は水中にセメント粒子が浮遊している懸濁液であるから、セメント粒子は、これより小さい空隙には入ることはできないし、また、たとえ粒子より大きい空隙であつても、それは砂層である場合には、所謂濾過作用のために、セメント粒子は砂層深く進入することができず、注入孔の周壁に filter cake を作つて注入効果をあげることができない。従つて、このような地盤を固結しまた防水するためには、セメント乳のように粒子の懸濁した液ではなく、注入前には、完全な液状であつて、注入後に固化して固結するものであることが必要である。

薬液注入は、このような目的に用いられる方法である。使用する薬液には、種々の種類があるが、いずれも、最初完全に液状の材料を注入するのである。

薬液注入は一般に、セメント注入にくらべると、価格の点でも、また固結されたものの強度の点でも、その取扱の点でも優れているとはいえない。従つて、セメント注入が可能である所ではセメント注入を用いる方が有利な場合が多い。セメント注入は可能であるか否かは、地盤の空隙の大きさの外に、セメントの粒径、注入圧、注入技術などによつても異なるわけであるから、どのような方法によつて地盤を固結するかについては、現地の事情について充分な検討を加えてから決定しなければならないのは勿論である。

*東大教授，工学部土木教室

**東大助教授，工博，生産技術研究所

***財団法人電力技術研究所所員

従来、行われてきた薬液注入の方法には種々あり、これに使用する薬液の種類も多い。いままで最もよく知られている方法は、1914年に発明された Joosten の方法である。Joosten の方法は、注入材料として珪酸ソーダ（水ガラス）と塩化カルシウムを用いる方法であつて、わが国でも、丹那トンネル、関門トンネル、その他の工事において屢々試みられたことがある。この方法によると、両液が混合した部分は相当の強度に固化されるのであるが、この反応は瞬間的であるため、実地に注入作業を行うに当つては、まず珪酸ソーダを注入し、次に塩化カルシウムを注入するという極めて煩雑な方法が必要であり、しかも凝固が瞬間的にはじまるため1つの注入孔で注入できる範囲は極めて狭く、広い範囲に注入硬化させるには、非常な手数を要したのである。

その後、薬液注入方法に種々改良が加えられてきたが、その目標は、専ら凝固するまでの時間をのばし、出来れば適当に調節できるようにすることにあつたのである。そして、予め2液を十分に混合しておいたものを、1台の注入ポンプで同時に注入し、充分広い範囲に液を滲透させて、一様に固結の目的を達せしめようとしたのである。

著者らの行つた研究の目的もこの点にあるのであつて、上述の目標に適うような薬液を探究し、更にこの液を用いて行う注入作業にもなる施工上の諸問題をも併せて研究しようとしたのである。

この研究は、沼田教授を委員長とする注入研究委員会のテーマとして行つたものであり、共同研究者には著者らの外に、東大生産技術研究所今岡稔助教授がある。尚、研究を行うに当つては、釘宮馨、平山復二郎、広田孝一、磯崎伝作、神谷貞吉の諸氏には、種々懇切なる指導と援助を得、また、現場実験については、国鉄信濃川工事事務所長藤井松太郎氏、次長大谷勝、上田健太郎、瀬尾一久の諸氏に絶大な援助を得たことを附記し、厚く謝意を表する次第である。研究の一部は文部省科学試験研究費によつて行われた。

第2章 薬液注入の現状

薬液注入の使用目的は大きく2つに分けることができる。1つは、漏水、透水の著しい所で、セメント注入を行つてもこれが固結するまでに流失してしまうような場所に防水の目的で使用する場合であり、他はセメント注入の不可能な砂層その他の軟弱地盤を固結する目的で使用する場合である。これら2つの目的に対して、使用する薬液の選定に当つての最も重要な相違点は反応速度である。前者の目的に対しては、相当急激に反応して固結することが必要であり、後者の目的に対しては、反応が充分緩慢であつて広い範囲に注入の目的を達するようにすることが必要である。

薬液注入の最初に発達した Joosten の方法は、珪酸ソーダと塩化カルシウムを用いるのであるが、これは前述のように反応が瞬間的であるため、第1の目的には使用できる場合があつても、第2の目的に対しては極めて煩雑な手数をかけるのでなければ、これを使用することができない。また、この方法では、2液を交互に注入する関係もあつて、一般に最初に注入する珪酸ソーダは相当高い濃度のものが使用され、従つて、粘度が高く、透水性の小さい部分には注入することがむづかしいという欠点があつた。

この方法に対して、種々改良が行われてきたが、これらの中で顕著なものについて簡単に説明しよう。

1. 改良された Joosten の方法:

前述のように、Joosten の方法に使用される珪酸ソーダは相当高濃度のものであるため、利用される範囲が限定され、しかも、濃度をおとせば、固結したときの強度が急速に減ずるといふ困難があつた。これに対し、特別な薬品を加えることによつて、強度を低下させることなく、粘性を減ずることに成功し、透水係数 $k=10^{-4}$ cm/sec 程度の細砂層にまで利用できるように改良された。加える薬品については明らかにされていない。

2. Francois の方法:

うすい珪酸ソーダと硫酸礬土とを用いる方法である。この溶液から出来るゼラチン状の沈澱は、長くドロドロの状態に保たれるために、地山の中の亀裂に入つて薄膜をつくり、このために摩擦が減少し、セメント乳の分離を防ぎ、セメント注入の効果をあげようとする方法である。

3. Rodio の方法:

これは、珪酸ソーダと消石灰の溶液を用いる方法である。凝固時間の調節は、石灰溶液との混合割合によつて可能であるといわれているが、その詳細は不詳である。

4. 珪酸ソーダの pH 値を調節する方法:

珪酸ソーダは普通アルカリ性であつて pH はおよそ 12 である。これに、酸または塩類溶液を加えて pH が次第に小さくなるに従つて、珪酸ソーダがゲル化し易くなる。普通の Joosten の方法では、pH が7程度とな

るので瞬間的に沈澱が生ずるのである。従つて、凝固時間の調節には、その pH 値を調節すればよいわけである。凝固時期は、稀釈の程度、温度、酸またはアルカリの添加量によつて異なるわけである。しかもこの反応時間の変化は規則正しいから、その操作は容易であるといわれている。しかし、注入しようとする地盤の性質にも影響をうけることになるので、予め地盤の土質についての調査を行わなければならないなどまだその手数が相当に煩瑣であることは免がれない。これに更に重金属の塩類を用いる方法もある。

以上種々の方法について簡単な説明を加えたが、いずれの場合でも、その操作が容易であると同時に、仕事の性質上、その供給が豊富であり、しかも低廉であることが大切である。また、強度のみではなく水密性、耐久性に対しても満足な結果を与えるものでなければならない。いずれの方法も、これらの条件を完全に満足する方法ではないようで、最近の誌上で、アメリカでも、Joosten の方法を依然として用いている報告が見られる。

第3章 この研究に使用する注入薬液

第1章及び第2章でのべたように、従来の薬液では、凝固時間を調節するためには、酸—例えば硫酸—および塩によつて、ある程度の濃度以下ならば可能であることが知りうるのであるが、それはかなり稀薄なもので—少数%程度—、従つて、固化して出来たものは、余り高い強度のものが望めず、凝固時間の変化が相当敏感であるため、その調節には相当な困難を伴うものである。現地に应用するには、凝固時間の調節が容易であり、その上に、所要の強度及び水密性を与えることがのぞましいのである。

以上のような見地から、次のような注入薬液を使用することにした。即ち、主成分としては前述の諸方法と同様に珪酸ソーダを用いる。また、注入によつて相当高い強度のものをうるためには、珪酸ソーダは相当高い濃度であると同時に、これに混合する一方の薬液もまた高濃度のものであることが必要である。しかもこれら高濃度の溶液を混じて直ちに沈澱が生じないことが必要である。このためには、アルカリに対して安定な物質でなければならないことになる。

われわれの実験では、これらの条件を満足するものとしてアルミン酸ソーダ (NaAlO_2) を用いることにした。また、混合物が一層安定を保つために、必要に応じて苛性ソーダを加えることもある。

アルミン酸ソーダは、ボーキサイドからアルミナをつくる時の中間製品として出来るものであるから、工業的に生産され、大量に入手することも可能である。

珪酸ソーダには、その中のシリカ分とソーダ分の割合によつて種々の製品があり、アルミン酸ソーダも、アルミナ分とソーダ分を適當の割合に変えた種々の製品が得られる。両方の薬液について、その成分割合をどのようにするかは、注入条件と注入目的によつて適当に定めて註文することができる。

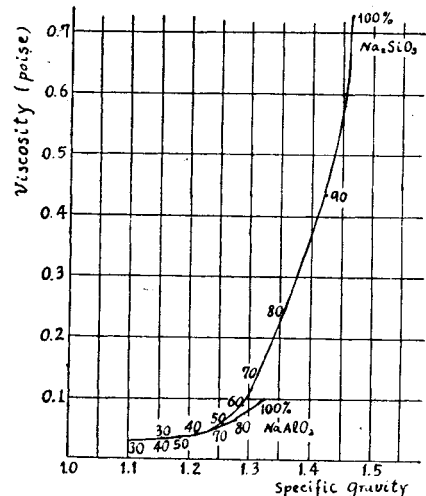
図-1 は珪酸ソーダとアルミン酸ソーダの濃度と粘性との関係を示した。前述したように、珪酸ソーダは相当高濃度のもので用いるため、粘性も急激に増大して注入の有効利用範囲を限定する欠点があつた。従つて、強度に影響を与えることなく粘性を減らすことが必要であるが、アルミン酸ソーダは濃度が増してもそれ程急激に粘性を増さないため、両液を混合して得られる溶液は、珪酸ソーダを単独に用いる場合よりも、相当粘性が小さくなる。従つて、後章でのべる実験においても、透水係数 $k=10^{-4}$ の砂層に容易に (圧力 1kg/cm^2 前後で) 注入することができた。

第4章 注入薬液の凝固時間について

薬液注入を行うにあつて、最も重要な問題は、薬液を混合してから凝固を始めるまでの時間である。凝固時間を適当に調節することができれば、注入作業が容易になる点でも、また、その効果をあげる上からも非常に有利である。

ここに報告する凝固時間としては、試験管中で両液を混合してから、試験管を傾けた時徐々になく流動しなくなるまでの時間をとつた。凝固して行く過程は、両液を混合し

図-1 珪酸ソーダ及びアルミン酸ソーダの濃度と粘性
Fig.1. Viscosity of sodium aluminate and sodium silicate



てから徐々に粘性を増して行くのではなく、最初はほぼ一様な粘性を保ち、凝固を始める直前から急に粘性が増して、遂に凝固するに至る。従つて、凝固の測定も容易であるが、それにもまして、実際にこれを使用する上からも有利である。

アルミン酸ソーダ中のソーダとアルミナ分、及び珪酸ソーダ中のシリカとソーダの割合は、任意に変更できるものであり、各々の成分割合が変わるごとに、混合した両液の示す各種の性質も変化するものであるが、凡ての場合について報告する煩をさげ、ここでは、各液の特定の割合のものについて行つた実験結果を報告することにする。

(1) 苛性ソーダの添加量と凝固時間

アルミン酸ソーダ中のアルミナ分が多くなると、珪酸ソーダを加えたとき、まだらな沈澱が生じ易い。これを防ぐため、必要に応じて珪酸ソーダに苛性ソーダを加えアルカリ性を強くすることが必要である。苛性ソーダを加えたために、凝固時間の変化する状況を図-2 に示した。

この図からわかるように、上述のまだらな沈澱が生じないようにするのに必要な量以上に余分に苛性ソーダを加えても、凝固時間にはあまり大きい影響のないことがわかる。

(2) アルミン酸ソーダと珪酸ソーダとの混合割合と凝固時間

測定した結果の1例を図-3 に示した。この図から、2液の混合割合は凝固時間に著しい影響を与えるものであり、その関係はアルミン酸ソーダと苛性ソーダとの割合によつても異なるものであることがわかる。

一般に、珪酸ソーダが多くなるに従つて、凝固時間が長くなり、固化したものは膠状で割合やわらかく粘りがある。一方、アルミン酸ソーダが多くなるに従つて、凝固時間が短くなり、固化したものは硬く、粘りがなくポロポロするようになる。

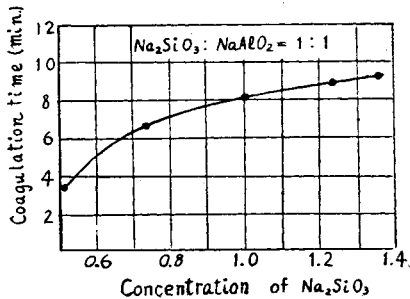
また、アルカリの添加量が少ないと、珪酸ソーダが多くなつても凝固時間をのばすのに、それ程顕著な影響がないようである。

(3) 珪酸ソーダの濃度と凝固時間

2液を 1:1 の割合で混合し、珪酸ソーダの濃度を变化させると凝固時間は図-4 に示すように変化する。この図から、1:1 の配合の場合、珪酸ソーダの濃度が大きくなれば凝固時間はのびるが、その程度は、濃度の小さい時ほど著しく、比重 1.30 以上になると増加の割合は次第に減少することが知られる。

図-4 珪酸ソーダの濃度と凝固時間との関係

Fig.4. Effect of concentration of Na_2SiO_3 on coagulation time



(4) アルミン酸ソーダの濃度と凝固時間

両液の配合を 1:1 とし、珪酸ソーダの濃度を一定にしたとき、アルミン酸ソーダの濃度を变化させると凝固時間は図-5, 6, 7 のように変化する。

図-2 NaOH の添加量と凝固時間の関係

Fig. 2. Effect of NaOH on coagulation time

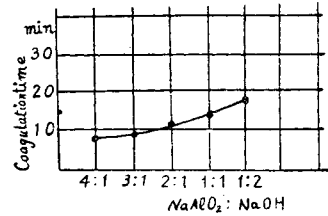


図-3 アルミン酸ソーダと珪酸ソーダの比と凝固時間

Fig.3. Effect of mixing ratio of 2 chemicals on coagulation time

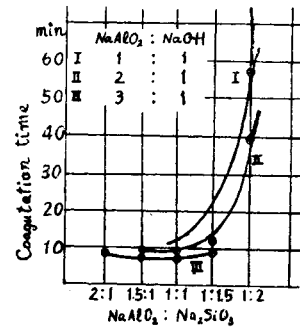
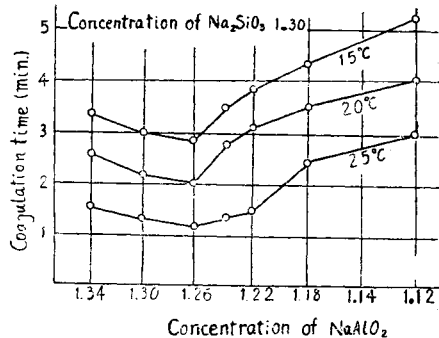


図-5 NaAlO_2 の濃度と凝結時間との関係 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:1.30$ の場合)

Fig.5. Relation between coagulation time and concentration of NaAlO_2 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:1.30$)



成、配合割合、および液温によつて影響される。一般に、アルミナが多くなる程、液温が高くなる程、凝固時間が短くなる。凝固時間は、例えば、止水や防水の目的に用いる時には短く、広い範囲を固結するのに用いる時にはなるべく長くするように、使用目的やその地域の地質の状況に応じて調節しなければならない。

調節できる範囲は、実際の施工上の立場から要求される数分間から1時間、またはそれ以上の間で可能である。この点は、従来の薬液注入の工法と比べて新しい工法として特筆できる点であると思う。

第5章 強度について

薬液注入によつて固結された地層が、どれ程の強度をもつかは、施工上の問題、凝固時間の問題などと共に重要な要素である。しかし、薬液注入の目的からすると、これによつて著しい強度を必要とする場合は少ない。一般に、10 kg/cm² またはこれより幾分か大きい強度があれば充分であろうと一般に考えられている。

この研究に使用した薬液によつて得られる強度は、凝固時間と同様に、薬液の混合割合、薬液の組成などによつて著しい影響をうけるが、更に、保存状態、凝固する地層の状態などによつても影響される。以下はこれらの関係について行つた実験の結果である。

(1) 薬液の混合割合および養生方法と強度との関係

予め一定の割合で混合した薬液に砂を混合して練り混ぜ、これを直径 1.5 cm 高さ 3 cm の型枠に指でおさえながら填充した。このようにして造られた供試体は、砂の空隙は充分薬液で充され、相当緊密な状態になっているものと思われる。従つて、実際に砂層に注入して得られる状態と比較すれば、相当差のあることはいうまでもない。

供試体は填充後相当固結したと考えられる約 30 分の後、型枠を取りはずし、空气中、水中その他の状態で養生し、その強度の変化を調べた。種々、条件をかえて実験を行つたが、ここに報告するのは、その数例である。従つて各々の実験値の間にはお互に関連はない。

(a) 空气中においた場合 使用した薬液は、アルミン酸ソーダ (Na₂O 0.27 gr/cc Al₂O₃ 0.207 gr/cc)、珪酸ソーダ (Na₂O 0.329 gr/cc SiO₂ 0.528 gr/cc) のものである。砂は相馬の標準砂を使用した。供試体は、各配合について各々 1 箇しか造られていないこと、供試体の寸法が小さいことなどの点から、得られた値には、相当の実験誤差が含まれていると考えられる。しかし、定性的に性質を知るには十分であると思う。

図-10, 11 は実験結果の 1 例である。

図-10 は、ある材令に達したときの強度が、配合の割合によつてどのように変化するかを示した。この図からわかるように、各材令で最高強度を示す配合割合は、材令毎に異なる。即ち、3日で最高強度を示す配合割合と7日で最高強度を示す配合割合とは異なるのである。このことは、注入後何日で、掘さくその他の工事を行うかということと関係することからであつて、実際の注入に当つて、配合をきめる上に重要な事項となる。

図-11 は各配合毎に、材令の増加するに伴つて強度がどのように変化するかを示し

図-10 薬液の混合比と各材令における圧縮強度との関係

Fig.10. Relation between mixing ratio of chemicals and compressive strength at various ages

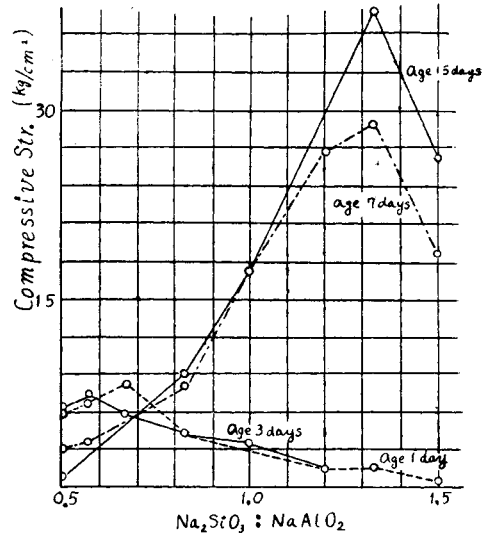
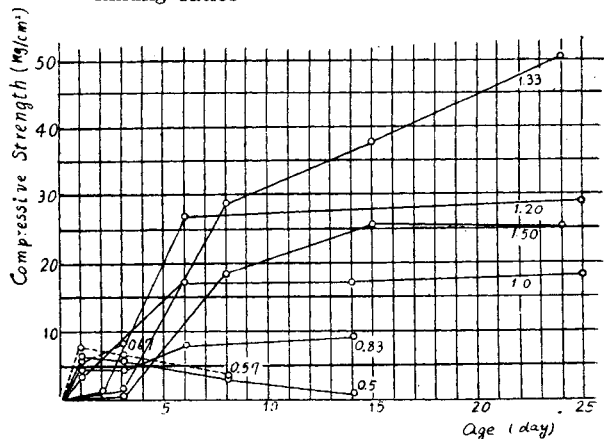


図-11 配合比を異にしたときの強度の変化

Fig.11. Compressive strength for various mixing ratios



た。この結果から、配合が適当であれば、実験の範囲内では、強度は材令と共に増進するが、配合が適当でない
と、材令が増すに従つて却つて強度が低下すること、また、実験に用いた組成の液では両液の配合が 1:1.33 の
附近で安定した強度が得られることがわかる。材令が経つと却つて強度の低下するのは、空気中の CO_2 と反応
して Na_2CO_3 の白い結晶が生じ、外側より次第に崩れて行くことが原因の1つであると思われる。

(b) 水中養生の場合 使用した薬液中、珪酸ソーダは(a)の場合と同様であるが、これに 1lit 当り 50 gr
のNaOHを加え、アルミン

酸ソーダは、工場製品とし
て日本軽金属蒲原工場より
供給されたものを使用した。
アルミン酸ソーダ中のアル
ミナ分は(a)の場合に比し
て相当少ないものと思われ
る。固めた砂は鬼怒川産の
川砂で、その粒度百分率は、
表一1の通りである。

表一1

フルイの種類	フルイに止つた量の百分率
2.5	0
1.2	2.4
0.6	14.7
0.3	54.6
0.15	93.7
通過した量	6.08
失われた量	0.2

供試体は径 1.5 cm 高さ 3 cm とし、養生水温は $15^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$
である。測定結果は図-12 に示す。この結果から、配合が適正で
あれば、水中において強度が材令と共に低下するものでないことが
わかる。特に、水中では、 CO_2 による Na_2CO_3 の結晶が生じない
ことが強度を維持する上に好都合である。なお図-13, 14 は、供
試体を径 5 cm 高さ 10 cm の円筒形にし、前者は、0.3~0.6 mm
の砂を、後者は 1.2~2.5 mm の砂を固結したときの結果である。

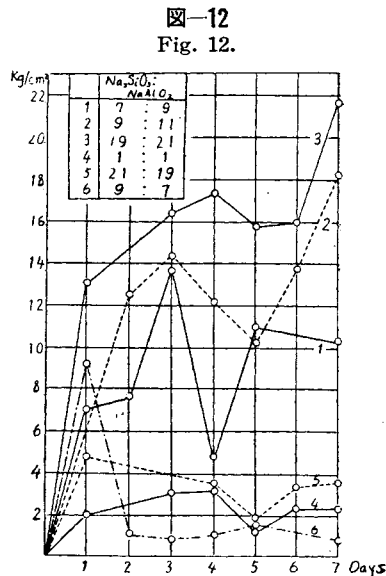
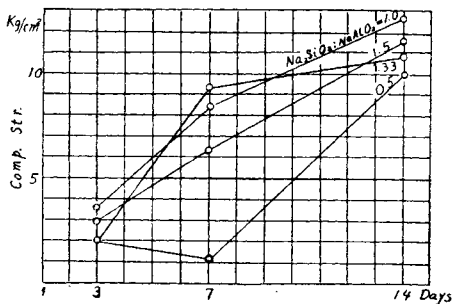


図-13 水中養生を行つたときの強度の変化
(砂粒 0.3~0.6 mm)

Fig.13. Relation between compressive
streng and mixing ratio of chemi-
cals (case of water curing and sand
grain 0.3~0.6 mm)



(c) 考察 図-13の実験と同じ方法でつくつた供
試体を空気中においたときの強度の変化を図-15 に示し
た。これらの結果を比較すると、水中に養生する場合の方
が、強度が遙かに安定であることがわかる。このことは、
珪酸ソーダとアルミン酸ソーダによつて出来たゲルが本質
的には水に不溶性であることが、化学的に認められてい
ること、実際に注入する地質は、殆んど含水状態である
こと、などの点から考えて好都合な結果であるといわなけ
ばならない。

また、注入を実際に行うに当つては、2台のポンプを同
時に運転する場合が多いが、普通に入手できる薬液を用い

図-14 水中養生を行つたときの強度の変化
(砂粒 1.2~2.5 mm)

Fig.14. Relation between compressive
strength and mixing ratio of chemicals
(case of water curing and sand grain
1.2~2.5 mm)

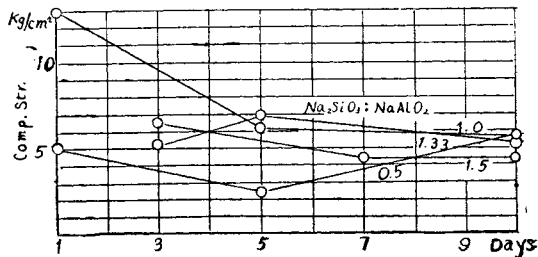
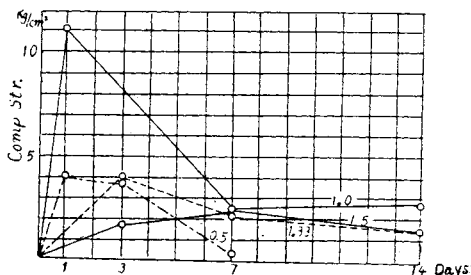


図-15 圧縮強度と配合割合との関係
(空気中養生の場合)

Fig.15. Relation between compressive
strength and mixing ratio of chemicals
(case of air curing)



た場合、1:1に近い配合割合で最も好ましい結果が得られることは、実際に施工する場合作業が非常に容易となる点でもまた便利である。

一般に薬液の中のアルミナが多くなると早期に強度が出るが、ボロボロの状態で強度の増進が期待できなくなり、珪酸ソーダが多くなる程早期の強度は次第に小さくなるが、材令と共に強度が増進し、固結されたものは強靱なものとなる。このことは、凝固時間にも関係することであつて、既に述べたところである。

(2) 苛性ソーダの混和量と強度との関係

アルミン酸ソーダ中のアルミナが多くなると、凝固がまだらになり、一様な固結が望めなくなるので、これを防ぐために、珪酸ソーダを加える必要のあることは先に述べた。この目的に加えられた苛性ソーダが強度に対してどのような影響を与えるかについて調べた。

薬液としては、珪酸ソーダ(Na₂O 12%, SiO₂ 29%)アルミン酸ソーダ(Na₂O 20.8%, Al₂O₃ 15.9%)を使用し、両液とも20°Cに保つた。固結した砂は九味浦の微砂である。供試体は径1.5cm、高さ3.0cmの円筒とした。

苛性ソーダを予め所定の割合で珪酸ソーダに混じ、これとアルミン酸ソーダとを1:1と3:2の割合で混合した場合について調べた。図-16, 17はその結果である。

これらの結果からわかるように、適当量の苛性ソーダを混和することは凝固時間の調節に役立つばかりではなく、強度を安定させる上にも有効である。しかし、配合割合や養生方法によつて、その影響する程度に差が認められる。

なお、苛性ソーダを混和するとき、苛性ソーダの濃溶液を加えてから珪酸ソーダを更に濃縮しても、固体の苛性ソーダを加えてから加熱溶解しても、珪酸ソーダの性質には変化はなく、同様な強度が得られることを確めた。

(3) 砂が含水している場合の強度

実際注入を必要とする場合、その砂層が乾燥状態にあることは稀であつて、多少とも含水しているか、或いは全く水で飽和されているものである。

このような地層に注入された薬液が、水によつてどのような影響を受けるかは、注入作業を行う上からは非常に重要な事項であるが、これを実験室で確実に試験することは困難であるので、砂に適当な水量を含水させておいて、この砂と各種の薬液とを混和して、その影響をしらべた。その1例を図-18, 19に示した。

含水量が多い程強度の低下することは、いずれの場合についてもいわれるが、その程度は配合割合、養生の方法によつて異なる。一般に、水中に貯える方が含水の影響を受け易いようである。

これは、薬液を混和するとき、含まれている水のために薄められることにもよるが、また、砂粒に附着している水膜を完全に取除き、薬液によつて置きかえることが出来ないためにもよると考えられる。混合された溶液

図-16 苛性ソーダの混和量と強度との関係

Fig.16. Effect of mixing ratio of NaOH on compressive strength

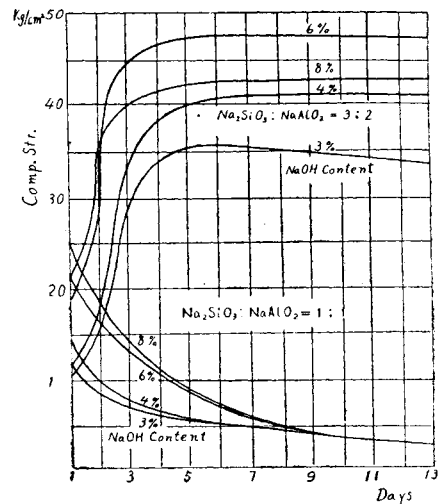


図-17 苛性ソーダの混和量の強度に及ぼす影響(水中養生)
Fig.17. Effect of mixing of NaOH on compressive strength (Water curing)

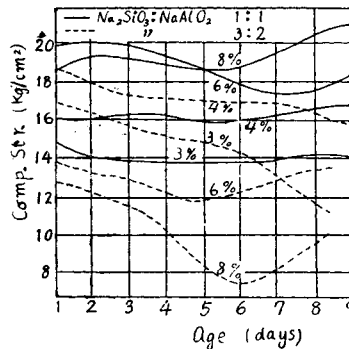
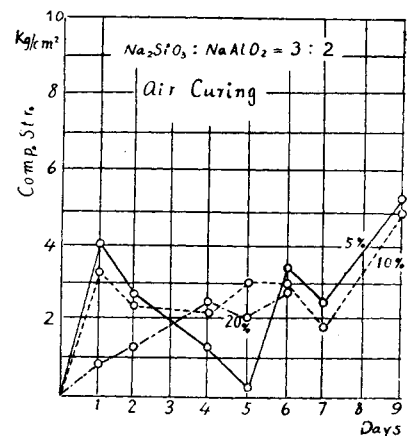


図-18 砂の含水量と強度との関係(空气中養生の場合)

Fig.18. Effect of water content in sand on compressive strength (Air curing)



が水に接触すると、その部分に白いゲルが生ずるが、これをおし流しつつ注入する場合と、混合鉢において一緒に混合する場合とは大分様子がちがう。しかし地下水を含む地層に対しては、これによつて稀釈される程度を考へて薬液の濃度、注入量を十分考慮しなければならないことがわかる。

(4) 固結される砂粒の大きさと強度との関係

(a) 用いた砂の種類

A. 山砂：相当かど張つた砂

(表一2 参照)

表一2

番 号	砂粒の大きさ(mm)
A-1	10 ~ 5
A-2	5 ~ 1.2
A-3	1.2 ~ 0.6
A-4	0.6 ~ 0.3

B. 川砂：鬼怒川産でAにくらべると丸味のある砂

(表一3 参照)

表一3

番 号	砂粒の大きさ(mm)
B-1	5 ~ 1.2
B-2	1.2 ~ 0.6
B-3	0.6 ~ 0.3
B-4	0.3 以下

C. 丸味浦砂：試料 500 gr についてふるい分析を行った結果は表一4の通りである。

D. Bの砂を用いるが、各粒度の砂を表一5のように等量に混合する。

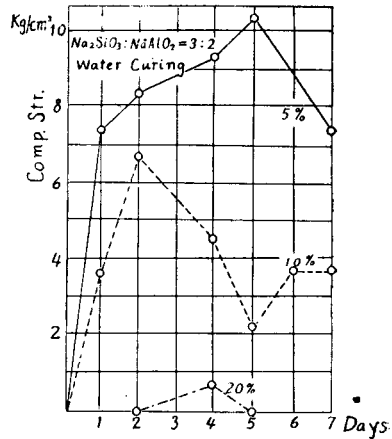
E. Aの砂を用いるが、砂粒を表一6のように混合する。

表一5

番 号	粒の大きさ
D-1	5 ~ 0.6
D-2	0.6 以下

図一19 砂の含水量と強度との関係
(水中養生の場合)

Fig.19. Effect of water content in sand on compressive strength (Water curing)



表一4

ふるいの種類	ふるいに止まる重量 (gr)	百分率
細ふるい 1.2	0	0
" 0.3	82	1.64
" 0.15	331.6	66.32
0.15を通過した砂	166.6	33.32
失われた砂	1.8	0.36

表一6

番 号	砂粒の大きさ(mm)	重量百分率
E-1	5 ~ 1.2	75
	1.2 ~ 0.6	20
	0.6 ~ 0.3	5
E-2	5 ~ 1.2	5
	1.2 ~ 0.6	75
	0.6 ~ 0.3	20
E-3	5 ~ 1.2	5
	1.2 ~ 0.6	20
	0.6 ~ 0.3	75

F 千葉海岸の砂：貝殻が多少含まれている。試料 500 gr についてふるい分けを行った結果は表一七の通りである。

表一七

ふるいの種類	ふるいに止まる重量 (gr)	百分率
板ふるい 5	0	0
網ふるい 2.5	4.2	0.84
" 1.2	14.2	2.84
" 0.15	483.7	96.74
0.15 以下	13.7	2.78
失われた量	2.4	0.48

Fは採集したまま、洗わずに使用した。砂は総て空气中乾燥の状態 で用いた。

(b) 薬液 薬液は総て工業製品を用い、珪酸ソーダ ($\text{Na}_2\text{O}:12\%$, $\text{SiO}_2:29\%$) 1 lit に対し、苛性ソーダ 75 gr を加え、アルミン酸ソーダ ($\text{Na}_2\text{O}:20.8\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3:15.9\%$) を約 $\frac{2}{3}$ に濃縮して使用した。

(c) 供試体の製作 供試体は $4 \times 4 \times 8$ cm の直方体とし、アルミン酸ソーダを攪拌しながらこれに珪酸ソーダを加え、1分間混合してから所定の砂を混入した。砂 600 gr に対し、両液を等量に混合した液 200 cc を用いた。填充後1時間で型わくを取外し、2時間後に水中に入れて所要の期間中養生した。水温は 15°C 、製作時の液温は 18°C である。

(d) 試験の結果 材令が1日、3日、7日に達したとき圧縮試験を行った。その結果は図一20, 21 に示した。結果は3箇の供試体の平均値である。

(e) 考察 これらの結果からわかるように、固結される砂粒が大きくなるに従つて強度が減少する。また、その傾向は材令がまずに従つて顕著となるようである。このことは珪酸ゲルを基本とするすべての注入方法についていわれることで、珪酸ゲルによつて得られる固結作用は珪酸ゲルの表面張力が大きいことに基づくからである。従つて、固結される粒子が緻密な程、その効果が著しくなるのである。一般に、粒子が大きくなれば、空隙が大きくなり、また粒子の全表面積が小さくなるために、注入されたゲルによつて強度を増進させることが困難になるわけである。空隙が大きい場合、その地層を固結するには先ずセメント注入によつて大きい空隙をふさぎ、セメント注入のきかない部分に対して薬液注入を行うという原則は、経済的な見地からばかりでなく、得られる強度の点からも必要であることがわかるのである。

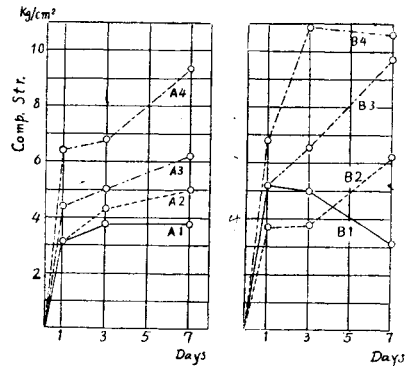
実際に注入を行うには、予め透水試験などによつてその空隙の大きさを判断し、注入材料、注入方法などを決定することが非常に重要な事柄となるわけである。

(5) 固結される砂の性質と強度との関係

珪酸ソーダは、アルカリ性に保たれている時には安定であるが、これに酸または塩類を加えて、 $\text{pH}=7$ 附近になると急に凝固を始めるようになることは既に述べた。また、従来行われてきた方法の中には、珪酸ソーダの上述の性質のために、予め砂層の詳細な調査を行つて配合その他を決定するのでなければ、注入作業を安全に行うことができないものもあつた。

この報告にのべる薬液を用いる場合、砂質によつてどのような影響があるかを、(4)における実験結果からしらべて見た。

図一20 砂粒の大きさと強度との関係
Fig.20 Effect of grain size of sand on compressive strength



図一21 砂の大きさと強度との関係
Fig.21 Effect of grain size of sand on compressive strength

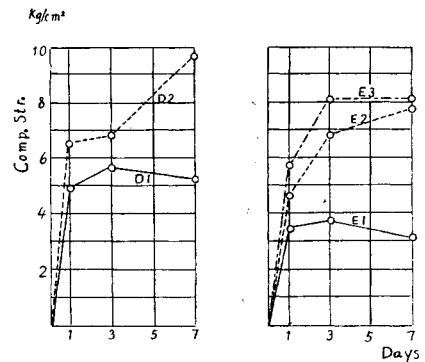


図-22 砂質と強度との関係
Fig. 22. Effect of properties of sand on compressive strength

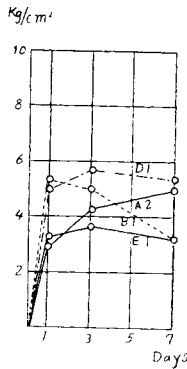


図-23 砂質と強度との関係
Fig. 23. Effect of properties of sand on compressive strength

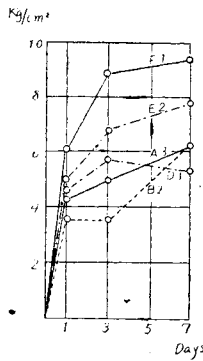
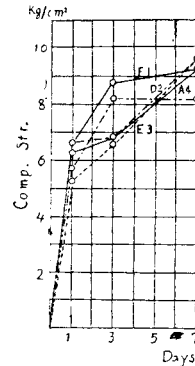


図-24 砂質と強度との関係
Fig. 24. Effect of properties of sand on compressive strength



これを図に示したのが図-22, 23, 24, 25 である。

これらの結果を見ると、砂質に関しては著しい影響がないようである。これは、珪酸ソーダに予め相当量の苛性ソーダを加えて、アルカリ性を強くしてあるためと思われる。従つて、注入に先立つて、必要に応じて苛性ソーダを混和することは、薬液を安定させる上からも安全となるわけである。

(6) 養生温度と強度との関係

薬液の凝固の進行は、温度によつて著しい影響をうけることについては既に述べた。ここでは、凝固後の強度が温度によつてどのように変化するかを調べた。

使用薬液は工業製品で、珪酸ソーダ ($\text{Na}_2\text{O}:12\%$, $\text{SiO}_2:29\%$) アルミン酸ソーダ ($\text{Na}_2\text{O}:20.8\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3:15.9\%$) を (4) (a) と同様の方法で混合し、同様の供試体を作つて試験した。ただ、ここで固結するに用いた砂は九味浦砂である。養生には恒温水槽を用いた。

結果 養生温度を 3°C , 20°C , 30°C の3種類とし、試験した結果は図-26, 27, 28, 29 に示した。

この図から、 3°C 及び 30°C にくらべて、 20°C で養生したものは一般に強度が安定しているようである。特に 30°C の場合には、初期の強度は大きいが材令と共に低下する傾向がある。従つて、凝固時間の点からも強度の点からも、出来れば 20°C 以下で凝固させることが望ましいようである。しかし、地中に注入する場合には、普通この条件は満足されるから、一般に問題にはならない。

図-25 砂質と強度との関係
Fig. 25. Effect of properties of sand on compressive strength

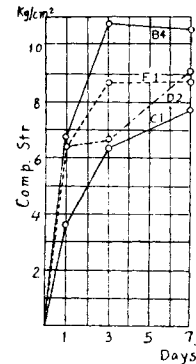


図-26 強度と養生温度との関係(1)
Fig. 26. Effect of temperature of curing on compressive strength (1)

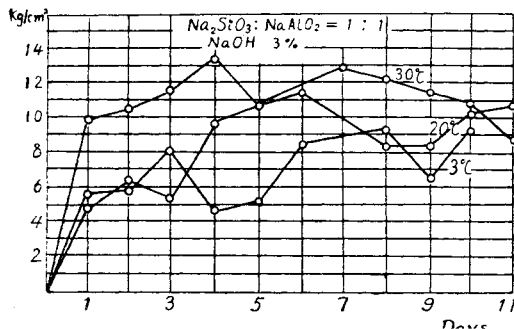


図-27 強度と養生温度との関係(2)
Fig. 27. Effect of temperature of curing on compressive strength (2)

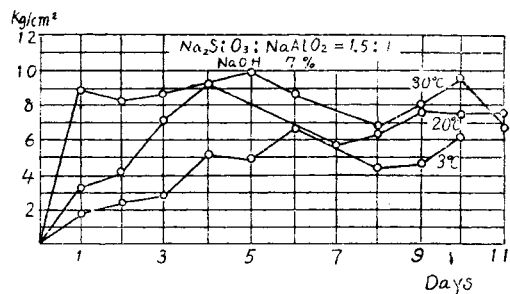


図-28 強度と養生温度との関係(3)
Fig. 28. Effect of temp. of curing on comp. str. (3)

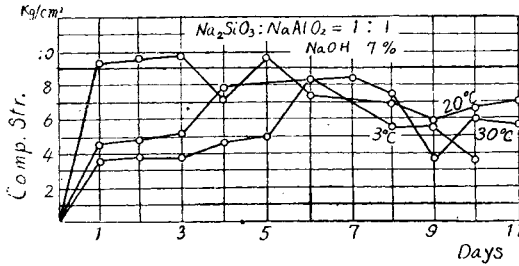
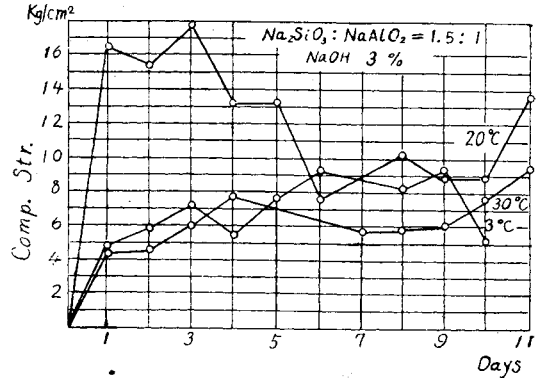


図-29 強度と養生温度との関係(4)
Fig. 29. Effect of temp. on comp. str. (4)



(7) 結論

以上のような実験結果から、薬液注入によつて固結された砂の強度について次のような結論が得られる。

(a) アルミン酸ソーダが多くなると早期に強度が出るが、余り量が多くなるとボロボロとなり易く強度が安定しない。逆に、珪酸ソーダが多くなると、強度の発生は徐々であるが強度が安定する。しかし、多量に過ぎると終結の強度も低く、ゼリー状を呈するに到る。薬液の組成を考へて、適当な濃度の薬液を適当な割合で混合することが必要である。

(b) 苛性ソーダを適量混合することは、強度を増進させる上からも効果がある。

(c) 固結した供試体は水中におく方が強度が安定である。

(d) 固結する砂粒が小さい程強度が大きくなる。

(e) 砂質には、一般に影響されることは少ないと思われる。

(f) 養生温度が 20°C 以下であることが望ましいが、実際に現場に注入する時には、このことは殆んど問題にならない。

(g) 砂が含水しているときは、それだけ薬液が稀釈される可能性があり強度を低下させることがある。従つて、注入薬液の濃度及び注入量については、稀釈される程度を考へて適当な処置をとることが必要である。

第6章 透水試験について

薬液によつて固結した供試体が、どの程度の防水効果をもつようになるかを試験するために、吉越氏の方法によつて透水試験を行つた。試験装置は図-30 に示すように、コンクリート用のものを改作し、径 5 cm 高さ 10 cm の供試体に適するようにした。

(1) 供試体の製作

薬液及び配合：アルミン酸ソーダ (比重 1.36)

50 cc, 珪酸ソーダ (比重 1.36) 75 cc

使用する砂：径 5 mm 以下の多摩川砂

型わくは 径 5 cm 高さ 10 cm とし、中心に径 10 mm の丸棒を固定し、中空円筒の供試体をつくつた。

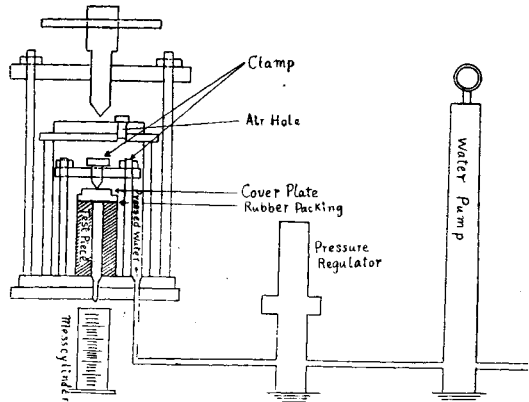
(2) 試験方法

供試体は 1 日空气中に放置した後、型わく及び丸棒をはずし、供試体の上下面からの滲透を防ぐためにアスファルトを塗り、更にゴム粘土を塗りつけた上にゴムパッキングをはさんで蓋板をボルト締めにした。試験機に水を入れ、上部空気抜きより排気しながら滴水させ、栓をとじて水圧をかける。水圧は、10 kg/cm², 15 kg/cm², 20 kg/cm² の 3 種に変えた。

(3) 試験結果

図-30 透水試験装置

Fig. 30. Apparatus of permeability test



試験の結果は図-31 に示した。水は供試体の周囲から滲透し、中央の中空部に集まる。この水をメスシリンダーでうけて流量を求める。この場合供試体の透水係数は次の式で計算する。

$$K = \frac{\rho \log r_0/r_i}{2\pi h} \frac{Q}{P_0 - P_1}$$

ρ : 水の単位容積重量 (kg/cm³), Q : 流出量 (cm³/sec), r_0 : 供試体の外径 (cm), P_0 : 試験水圧 (kg/cm²), r_i : 供試体の内径 (cm), P_1 : 大気圧 (kg/cm²), h : 供試体の高さ (cm)

この実験では $\rho=0.0001$, $r_0=5$, $r_i=1$, $h=10$ である。これらの値を用いて透水係数を求めると

$P_0=10$ kg/cm ² の場合	$K=1.06 \times 10^{-8}$ cm/sec	} 平均 $K=0.92 \times 10^{-8}$ cm/sec
$P_0=15$ " "	$K=0.956 \times 10^{-8}$ cm/sec	
$P_0=20$ " "	$K=0.761 \times 10^{-8}$ cm/sec	

透水係数として 10^{-8} 程度の値が得られれば、極めて満足すべき結果といえる。しかし、実際に注入する場合には、供試体を作るように一様な注入効果を期待できないことは勿論である。

このようにして試験を行つた結果、流出水には相当量の苛性ソーダが含まれていること、また、透水試験後、強度は一般に低下することなどの点については、今後の耐久性の試験によつて充分検討しなければならない問題であると思われる。

第7章 実験室における注入試験

前章までに述べた試験は、すべて、薬液と砂とを予め混合して、これを型わくにつめて、作成した供試体について行つたものである。従つて、実際に注入した場合にくらべると相当な相違があると考えられる。

この章では、混合された薬液を実際に注入したときに、砂層にどのように滲入するか、また、砂層が水で飽和されているとき薬液がどのように硬化するかを知るために、実験室において、砂箱に注入する場合と、地中に礫をほり砂をつめてこれに注入する場合とにつき実験した。その概要は次のようである。

(1) 砂箱に注入する場合

(a) 試験設備 注入は圧縮空気によつて行つた。従つて、実験に用いた設備としては、砂箱、薬液タンク、air compressor などである。その装置の概略は図-32 に示す通りである。compressor は 1/2 HP のもので、15 分間で 100 lb/sq.in. の圧力に達した。

(b) 試験材料

- (i) 使用した砂: 多摩川砂で 5 mm の篩を通過したもの
- (ii) 薬液: アルミン酸ソーダ (昭和電工鶴見工場より供給されたもの) 比重 1.36
珪酸ソーダ 旭化成より供給された 3 号品 比重 1.36
珪酸ソーダとアルミン酸ソーダの混合割合はすべて 1.3:1 とする。

(c) 注入試験

(i) 砂の填充: 砂箱に砂を填充するには、なるべく緊密になるように、3 層にわけ、水を加えながら突き固めつつ填充した。尚、試験のとき底部の穴から砂が流出するのを防ぐために、穴には網をはり、その上に小砂利を僅かに敷いた。砂の填充が終つてから、水を充分に入れて空気を抜き、箱の底部と壁に吊るした満水の水槽とをゴム管で連結した。

図-31 透水試験の結果
Fig. 31. Result of permeability test

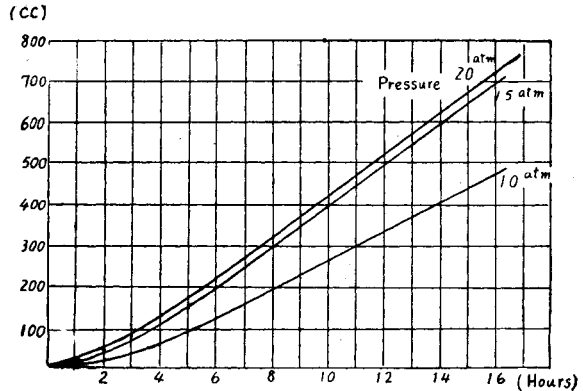
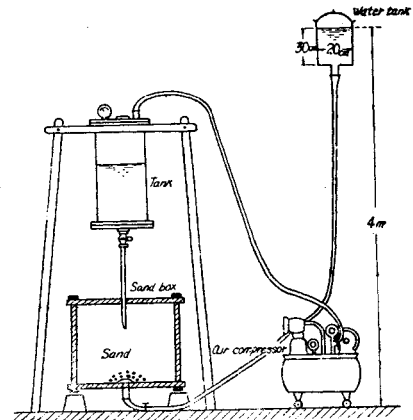


図-32 注入装置の概要
Fig. 32. Apparatus of grouting test



(ii) 薬液注入: 薬液の注入は、予め2液を混合しておいて同時に行う方法と、両液を別々に、まずアルミン酸ソーダを注入し、次に珪酸ソーダを注入する方法の2種の方法について行つた。薬液をタンクに所要量入れ、次に圧縮空気を所定の圧力まで上げる。注入管のコックを開いて一気に注入を行つた。

(iii) 注入ノズル: 注入に用いたノズルは、長さ24 cm、径7 mm で先端は4 mm として開放している。砂層表面から5 cm の位置で注入を行つた。

(iv) 注入量: 予め両液を混合した場合には4.6 lit ずつ、別々に注入するときは合計8 lit になるようにした。しかし、実際には、砂箱の外部にもれる量が相当多いので、砂層に注入された量は不明である。

(d) 注入成績及び注入後の砂層の状態

(i) 2液を予め混合して注入した場合: 注入中液が砂箱のパッキングを通して甚しく噴出した。2時間後砂

写真-1 Photo. 1.

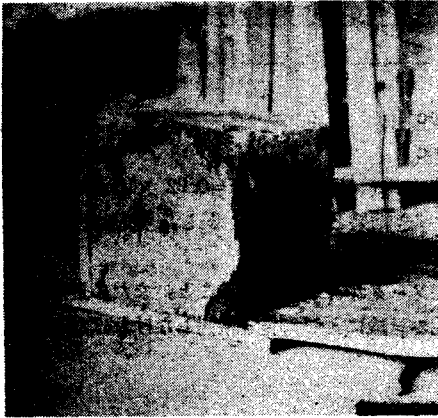


写真-2 Photo. 2.



箱をはずして見ると表面は非常によく硬化し(写真-1)、内部はいく分粘りのある状態であつたが、時間がたつて従つて全体が硬化した。内部が硬化がおくれた原因は、アルミン酸ソーダ中のアルミナの含有量が少なかつたこと、注入液量が少なくまた注入圧力が適当でなかつたために、内部に充分液が滲透せず、砂の含水の影響をいちじるしくうけたためと思われる。

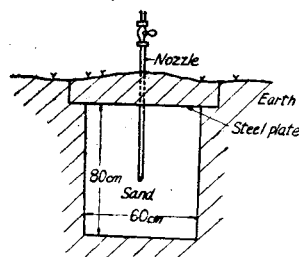
(ii) 2液を別々に注入した場合: 上記のアルミン酸ソーダに、固形のアルミン酸ソーダを加え、アルミナの含有量を増した。この場合の特徴は、両液が充分混合した部分とそうでない部分のはつきり区別され、よく混和したと思われる所では円筒状に白い縞をなして非常に硬くなつているが(写真-2)、そうでない所は非常に弱い。縞の出来る位置は、ノズルの位置によつて異なる。

これらの実験から、2液を別々に注入する方法では一様に固結させることはむづかしく、部分的にしか固結が行われないうこと、別々に注入するにはその操作が非常に煩雑であり、特に注入が深い層が流水中になされる時は困難な場合が多いであろうということがわかつた。従つて、両液を予め混合させる適当な装置を用いることが薬液注入には非常に重要なことである。

写真-3 Photo. 3.



図-33 Fig. 33.



(2) 地中の砂層への
注入試験

(a) 注入設備

(i) 注入砂層: 関東ロームの地盤に深さ1 m 巾及び長さそれぞれ60 cm の壕をほり、これに砂を填充した。砂を填充

するには、水を加えてよく突固めた。砂は 80 cm の深さとし、その上に薬液の逆噴をふせぐために薄い鉄板をおおい、更に 20 cm の厚さの土をかぶせた。砂の容量は約 288 lit である (図-33)。

(ii) 薬液タンク：薬液は2つのタンクに別々に貯えた。液の出口は連結管によつて連結している(写真-3)。タンクの容量は約 254 lit で、compressor に連つている。

(iii) 連結管及びノズル：両液を別々に貯えたタンクは、Y字管で連結されノズルに連つている。両液がタンクから出るとY字の交点で混合され、注入されるわけである。

(b) 試験材料

(i) 砂：多摩川砂で、5 mm のふるいを通過したものを使用した。

(ii) 薬液：アルミン酸ソーダ(昭和電工鶴見工場)比重 1.24, 1.22, 1.15 の3種について行う。

珪酸ソーダ 3号品を水で稀釈し、比重 1.26, 1.30 とした。

表-8

凝固時間は表-8 のようである。

両液の配合は 50 lit ずつ 1:1 の割合とした。

(c) ノズルの改良 Y字管で連結し、1本の

ノズルで注入する上述の試験の結果、両槽の圧力が相違したとき、所望の割合に混合しないばかりでなく、圧力の低い方へ逆流して固結するおそれがあり、またノズルが長い場合、混合された液の凝固時間が短いと充分な注入効果をおとることがわかつたので、ノズルを改良し図-34 に示すように、先端に混合室を設け、ここに放出され混合された薬液が直ちに砂層に注入されるようにした。このようにすれば、混合される状態もよくなり、また逆流するおそれも少なく、非常に好成績であつた。

試験番号	比重		25°Cにおける凝固時間
	珪酸ソーダ	アルミン酸ソーダ	
1	1.26	1.24	30 秒
2	1.26	1.22	1 分 40 秒
3	1.30	1.15	2 分 05 秒

(d) 注入作業及び注入成績 注入は圧縮空気によつた。薬液のタンクが所望の圧力に達したとき、両方のコックを開いて一気に注入した。圧力は 3~4 kg/cm² である。

注入後、薬液の滲透及び硬化状態を調べるために砂層を掘り返した。その結果、凝固時間の長い配合の場合には、砂層に広く分布して一様にかたまつてゐるが、凝固時間の短いほど、分布状態が不良で固結した形は不規則である(写真-4)。

①及び③と④の場合を比較すると、①②では地表面に噴出が著しく砂層が半分位固結し、③は砂層にほぼ一様に分布している。なお外側のローム層に滲入した液はそのわずかな割合でよく固結しこの部分のローム層は非常に硬くなつていた。

(3) 水中に浸した砂箱への注入試験

一般に注入を行う場合、その砂層は水で飽和の状態にある場合が多い。このような水中に注入してよく硬化の目的が達せられるかどうかを検査するために、次のような実験を行った。

(a) 試験設備 試験設備の大体は(2)において用いたと同じである。ただ地中に注入するかわりに、外壁に径 1 cm の穴を多数あけた箱に砂を填充し、これを締めつけてコンパクトにした後、水槽の中にしたした砂箱の中に注入した。砂箱及び試験設備の概要を図-35, 36 に示した。

(b) 試験材料 砂は、(1)及び(2)と同様であり、薬液は珪酸ソーダを比重 1.30 とし、アルミン酸ソーダの比重を 1.26 及び 1.24 の2種とした。

(c) 注入方法 2液を別々に貯え、圧縮空気を用いて同時に注入した。ノズルの位置を表面から 15 cm、

図-34 改良されたノズル
Fig. 34. Improved nozzle

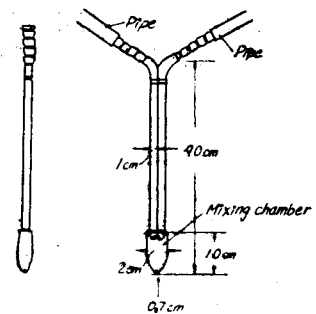
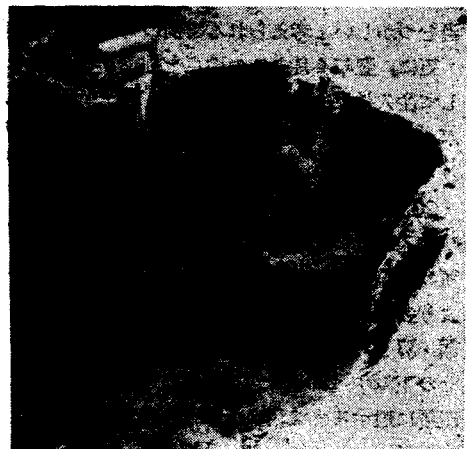


写真-4 Photo. 4.



20 cm の2種にかえた。注入圧は2及び1.5 kg/cm² とし、10 lit ずつ1:1 の割合で混合した。

使用した薬液及び注入圧、凝固時間などの関係は表-9の通りである。

表-9

試験番号	比 重		注入圧力 kg/cm ²	凝固時間 (25°C)
	硫酸ソーダ	アルミン酸ソーダ		
(1)	1.30	1.24	2	1分25秒~1分10秒
(2)	1.30	1.24	1.5	1分10秒
(3)	1.30	1.26	2	50秒

(d) 硬化の状況 注入後、砂箱をとり出して硬化の状況を調べた。いずれの場合でも、注入を始めると同時に水槽の水が溢流し、薬液は水中において充分硬化することがわかった。(1)の場合には、砂層の中間より底の方で凝固し、(2)は中央より上部が、(3)は略一様に凝固していた。このことは、凝固時間、注入圧、及びノズルの位置が適当であることが大切であることを示すものである。

また、周壁の穴からもれた薬液は、水槽と砂箱の間に沈澱して凝固し、砂箱をとり出すのに相当困難を感じた。

一般に、混合された両液が水にふれると、その部分に薄い被膜が出来るが、このために液が水中に拡散し稀釈されることが防がれ、水中に沈澱し、よく硬化するものと思われる。硬化した試片を取り出し、約1ヶ年余水中に保存しているが、その後変化は認められない。

第8章 現場における注入試験

(1) 計画の概要

この研究に用いた新しい薬液注入の基礎的な問題については、実験室においてかなり好結果が得られたことは上述した通りである。しかし、これを相当大規模に、実際の地盤の固結に利用した場合、どのような結果が得られるか、また、現地に注入する場合の注入工法をどのようにするのが適当であるかなどの問題について研究を進めるために、国鉄信濃川工事事務所の好意によつて、1950年12月同現場において本格的な注入試験を行うことができた。注入を行つた地域には、これより先、既にセメント注入が試みられ、殆んどセメントが入らないということが明らかになっている砂層及び砂利交り砂層であること、また、注入に当つては、その附近に特別に逆噴どめのためにバルクヘッドを設けず、直接地盤に注入する工法をとつたこと、などの点で、注入作業としては相当むづかしいと考えられる事情のもとで行つた実験である。

更に、翌年4月にこの地点を掘鑿して注入効果を確認したのであるが、相当な成果がえられたので、これらの概要について報告する。

(2) 注入現場の状況

注入を行つた場所は、小千谷発電所の調整池となる予定の所で場所により多少の差はあるが、その地層は図-37 のようであり、表土は40cm その下180~230cmが砂層、以下三紀層に達するまで相当な厚さの砂利交り砂層となつている。砂層は図-38に示すような粒径の小さい砂が相当緊密な層をなしている。地下水は170~230cm位の所にある。

図-37 注入地点附近の地層
Fig. 37. Schematic diagram of strata near grouting station

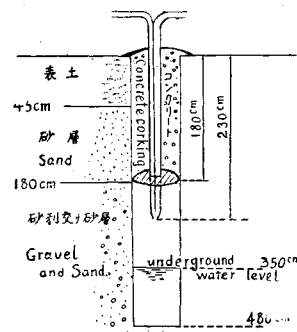


図-35 砂箱
Fig. 35. Sand box

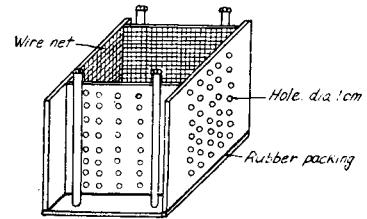


図-36 注入装置
Fig. 36. Grouting apparatus

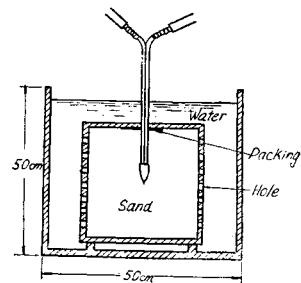
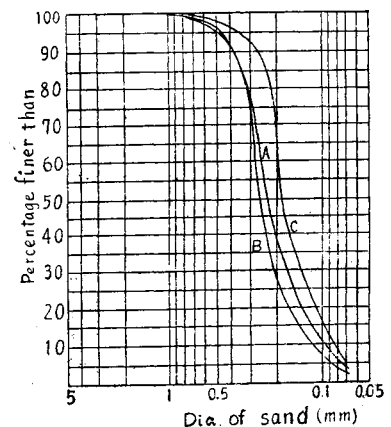


図-38 注入地点の砂の粒度曲線
Fig. 38. Gradation curve for sand at grouting station



(3) 試験設備

注入しようとする箇所に、ボーリング機またはオーガを用いて所望の深さまで穴をほり、深い場合には、ドライブパイプを打ちこんだ。

注入ノズルは図-37に示すように、先端において両液が混合するような改良型とし、これに木製のフランジを取りつけた。逆噴を防止するために、フランジの上部にコンクリートを詰め、ドライブパイプを抜きながら突き固めた。

機械設備の中主なものは次の通りである。

ヤンマーディーゼルエンジン：1台 S6 型 6 H 700 r.p.m, ボーリング機用のポンプ：2台 公称 30 気圧,
薬液水槽：2 罐, パイプ, ノズル：すべて 1/2" のもの

(4) 注入装置

注入圧及び注入量を調節するために、配管は circulating system とした。普通、セメント注入を行うときには、注入口金を用いて、セメント乳を循環させているが、薬液注入の場合には、混合された溶液の凝固時間に限度があるので、口金から循環させることは出来ない。従つて、両液を混合前にそれぞれの貯蔵槽に戻すように工夫した(図-39)。

両液を同時に送っているとき、両液の圧力に差が出来て液が他の液の中に逆流するのを防ぐために、それぞれの回路に check valve を用意した。

(5) 注入試験

注入に当つては、まず、すべての valve を全開しておき、両方のポンプを始動する。この時は、液は全部 return line を通つて貯蔵槽に帰つてくる。注入開始と同時に、return valve を圧力計を見ながら調節し、所定の圧力で所定量が注入されるように操作した。

薬液の注入に先立つて水を注入し、注入圧と注入量との関係をしらべて、薬液の濃度をきめるようにしたが、これらの関係を確立するためには条件が十分ではなかつた。

使用する薬液：珪酸ソーダ(旭ガラス製) 3号品 比重 1.40, アルミン酸ソーダ(昭和電工製) アルミナ量 100~110 gr/lit 比重 1.37

(a) 第1回の注入試験

(イ) 水による試験：水を注入したときに得られた資料は表-10, 11の通りである。

表-10 単独に運転した場合

	注入時間 (min)	1 分間に注入された量 (lit)	注入圧 (kg/cm ²)
右ポンプ側	1	30	1.5
	2	34	1.5
左側ポンプ	1	24	1.5
	2	22	1.5
	3	24	1.5

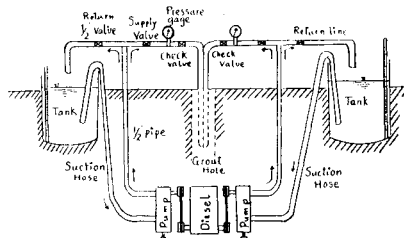
表-11 両方同時に運転した場合

右 ポ ン プ			左 ポ ン プ		
注入時間 (min)	1 分間に注入された量 (lit)	圧力 (kg/cm ²)	注入時間 (min)	1 分間に注入される量 (lit)	圧力 (kg/cm ²)
1	28	1.5	1	22	1.5
2	30	1.5	2	22	1.5
3	28	1.5	3	24	1.5
4	28	1.5	4	22	1.5

これらの結果から右側のポンプの能力が左側のそれより少し大きいと思われる。従つて、実際の注入に当つては、配合を 1:1 ときめたので、粘度の大きい珪酸ソーダには右側の、アルミン酸ソーダには左側の、ポンプを

図-39 注入装置 (Circulating-line system)

Fig. 39. Schematic diagram of circulating-line system used to grouting



それぞれ使用することにした。

(ロ) 珪酸ソーダのみを用いた試験：水による試験のみでは、薬液の適切な濃度を定めることは困難であつたので、珪酸ソーダの原液を注入し、注入圧と注入量の関係を更に調べた。珪酸ソーダの比重は 1.40、液温 3°C である。左側ポンプを使用して試験した結果は表一12の通りである。

表一12

時間 (min)	1 分間に注入される量 (lit)	(圧力 kg/cm ²)
1	22	7.5
2	20	7.5
3	18	7.5

これらの結果を比較すると、水の場合と粘度の高い珪酸ソーダの場合とでは、注入量には大した差はないが、注入圧力が非常に上昇していることがわかる。このことは、ポンプの能力や地層の透水性に関係することであるが、実際の注入に当つては重要な資料となるものである。

(ハ) 2薬液の注入：珪酸ソーダの注入が相当順調であり、高圧 (8 kg/cm²) で注入してもコーキングより逆噴することがなかつたので、注入後の硬化がより効果的になるようにするためと、地下水によつて稀釈されることを考えて、薬液は次のようにして配合した。

珪酸ソーダ：比重 1.37、液温 3°C、気温 5.5°C、アルミン酸ソーダ：比重 1.37、液温 3°C、配合：1：、凝固時間：48 分、注入経過は表一13の通りである。

表一13

珪 酸 ソー ダ			アル ミ ン 酸 ソー ダ		
注入時間 (min)	注入量 (lit/min)	圧力 (kg/cm ²)	注入時間 (min)	注入量 (lit/min)	圧力 (kg/cm ²)
1	30	5 ~ 6	1	18	3.5
2	20	"	2	24	"
3	18	"	3	24	"
4	18	"	4	24	"
5	噴 出		5	22	"
6			6	12	"
7			7	16	"

注入後、約5分たつたとき、注入孔より約2m離れた所より、薬液が噴出し出したので、注入を中止した。注入した総量は約220 lit である。

(ニ) 考 察：始め注入が順調に行われたため、Return valve を全閉にしたまま圧力調整を行うことなく注入を続行したため、弱い地層を破つて噴出した。このように、bulk head を設けることなく地盤に直接注入する場合には、急激に注入圧を増大することは、注入効果を広範囲に求めるには最も危険であり、圧力の操作が非常に重要な事項であることがわかる。

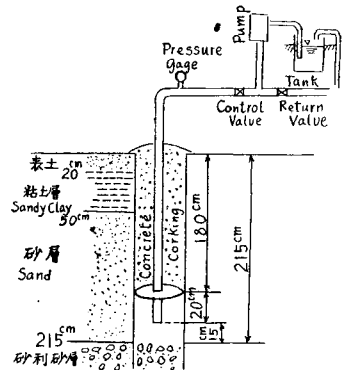
(b) 第2回注入試験 第1回の注入孔より約5m離れた所に、オーガで穿孔し、前と同様の方法で注入管を装置した。この場合、気温は低く、凝固時間が相当長いことがわかつたので、薬液注入としては最も好ましい状態である予め混合した液を1つのポンプで注入する方式を用いた。その時の概要を図-40に示す。

(イ) 水による注入試験：ここでも先ず水を注入した。その結果は表一14の

表一14

注入時間	30 sec の間の注入量 (lit)	注入圧 (kg/cm ²)
30 sec	12	2
1 min 0 "	14	2
1 " 30 "	16	2

図-40 第2回の注入装置
Fig. 40. Schematic diagram apparatus used to grouting of readymixed chemical



通りである。

(ロ) 予め混合した薬液の注入試験：注入薬液 — 珪酸ソーダ：比重 1.30，液温 3°C，アルミン酸ソーダ：比重 1.30，液温 3°C，凝固時間 — 60 分

圧力を1気圧になるように調節しながら注入を行った。1分間の注入量は 12~16 lit である。約 330 lit 注入を行った頃、前日に行つたコンクリートのコーキングが充分硬化していなかつたため、コンクリートが破れて、これより逆噴を始めたので、注入を中止した。コーキングが充分硬化していたら更に注入が進められたと考えられる。

(6) 注入現場の掘鑿による注入効果の検討

注入を行つてから約4ヶ月を経て、注入現場を掘鑿し、その効果の検討を行つた。

(a) 硬化の状況 注入孔を中心として、6m×6m の範囲を掘鑿した。その結果、薬液が滲透したと思われる所は、そうでない所と明らかに区別することができた。液の滲透状況は、注入孔の先を底面としたほぼ円錐形の形をなしており(写真—5,6) 下方にも一様に滲透するものと考えていたが、下方には殆んど液が滲透しないようである。これは、薬液が滲透するには、既に空隙にある水または空気を追出してそのあとに滲透するものであるから、地下水が移動するのに抵抗の最も小さい方向に液が滲透するものであるためと想像される。このことは、地盤の固結を行うに当つて、注入管の深さや注入工法をきめる上に考慮しなければならない点である。即ち、低圧によつて上層部分をまず硬化し、次第に注入孔を深くして行くような方法によつて注入して行けば、充分緊密に地層の固結が達せられるものと考えられる。注入孔の配置、注入圧などは、注入孔の深さ、地盤の状態などと密接な関係をもつものであるから、これらの関係を充分吟味した上で決定しなければならない。

また、上層の粘土層にも、少しの亀裂をもとめて液の滲入したあとが認められ、この部分の粘土は非常に固くなつていたことが注目された。

(b) 固結された砂層の物理的性質

比重 試料として注入前のもの6箇，注入後のもの5箇をとり、その平均値を求めた。

表—15

	真比重	湿潤密度	含水比(%)	乾燥密度
地 山	2.65	1.45	27.2	1.14
注入後	—	1.69	39.5	1.21

間隙率は表—16 の通りである。

表—16

	間隙率(%)	間隙比(%)	摘 要
地 山 砂	57	133	水と空気を間隙とする
"	26	35	空気の部分だけを間隙とする
注 入 後	2	2	"

透水試験

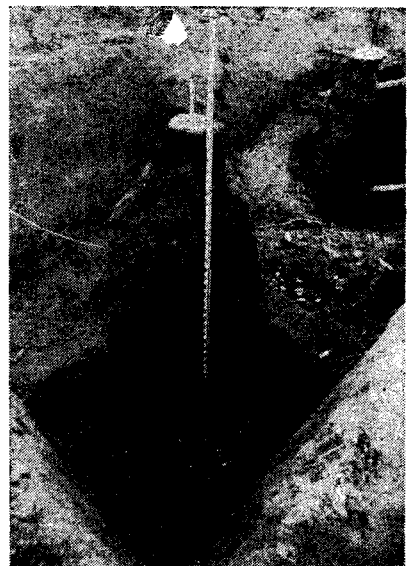
(i) 定水位式*：装置は図—41 に示す。透水係数は次の式で計算した。

* 透水度の高いときに用いられる

写真—5
Photo. 5.



写真—6
Photo. 6.



$$k = \frac{Q \cdot l}{h \cdot A \cdot t} \text{ (cm/sec)}$$

h : 水位(cm), l : 試料の長さ(cm), A : 試料の中心部の面積(cm²), t : 試験時間(sec), Q : t sec 中の透水量

この装置では $h=200$ cm, $l=22$ cm, $A=100$ cm², $t=60$ sec

試験結果は表-17の通りである。

表-17

	k (cm/sec)	備 考
注 入 後	8.2×10^{-5}	調整部分より試料を採集成形する
"	6.3×10^{-5}	"
地 山	3.9×10^{-3}	地山のままでは成形不可能のため4層にわけて観測

(ii) 変水位式*: 装置は図-42に示す。透水係数 k (cm/sec) は次の式で計算する。

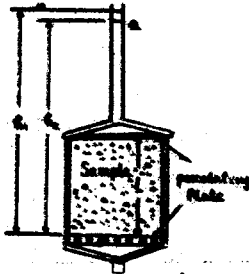
$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot t} \log \frac{h_1}{h_2}$$

この装置では h_1 : もとの水位=約145 cm, a : ガラス管の断面積=0.84 cm²,

A : 試料の断面積=78.5 cm², l : 試料の高さ=10 cm, $t=600$ sec

試験の結果は表-18の通りである。

図-42 透水試験装置
Fig. 42. Apparatus for testing permeability



(c) 考 察 注入された砂層を掘鑿して得られた資料から、大体次のようなことがわかる。

1) 注入液の渗透の状況については(a)において述べたように、最小の抵抗方向に向い、注入口を中心にした無円錐形の状態になる。

2) 注入液の渗透したと思われる部分には、大約重量割合で0.24の液が含まれ、従つて、間隙率は57%から2%に減少している。

3) 透水係数は 10^{-3} の地山が 10^{-5} のオーダーまで減少している。 10^{-3} 程度であれば、一応アースダムに利用できる程度の材料であると思われる。

4) 透水係数は試験の方法によつて多少の差が認められる。変水位式では、試料が大きいため、その全面に一律な注入効果を維持することは無理で、部分的に注入の効果の程度の低い部分がある。この影響によつ

* 透水係数の低い試料について行う

図-41 透水試験装置
Fig. 41. Apparatus of permeability test

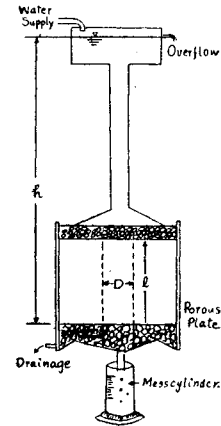


表-18

	h_1	h_2	°C	k
注入後(第1号)	144.9	128.8	16	$(2.1 \sim 2.6) \times 10^{-5}$
" (第2号)	143.9	131.1	13	$(1.4 \sim 1.75) \times 10^{-5}$

圧縮強度 掘鑿して得られた塊から適当な大きさの供試体をつくり、これについて圧縮試験を行つた。その結果は表-19の通りである。

地山のままの砂については供試体に成形できなかったため試験ができなかった。

表-19

回 数	形 状	圧縮強度 (kg/cm ²)
1	角形 10×10×10	4.0
2	φ 15×10	12.0
3	角形 10×10×10	5.0
4	" "	5.0
5	" 12×11.5×11.5	3.2
6	6.1×5.8×5.2	4.0
7	4.7×5×5	1.5
8	5×5×5	1.6
9	4×4×4	5.3
10	3.6×3.6×3	6.3

透 水 試 験 後

11	φ 15×10	3.4
12	φ 15×10	2.8
13	"	1.7
14	角形 10×10×10	3.0
15	"	3.0

て透水係数が大きくあらわれたものと思われる。

5) 圧縮強度は 5~10 kg/cm² を期待できる。この実験に用いた薬液の中、アルミン酸ソーダはアルミナの含有量が少なく 100 ga/lit 程度であるため、強度は割合に小さくなった。また、供試体が大きくなるに従って弱くなるのは、透水係数の場合と同じ理由によるものと思う。

6) 透水試験を行った試料についての圧縮強度は一般に小さい。両薬液が混合して出来るゲルは、本質的には水に不溶性であるが、ゲル化せずに残ったアルカリが透水試験の結果流水し強度の低下が起つたものと思う。従つて、止水の効果を上げ乍ら長期間にわたつて強度を維持することが必要であるような場合には、薬液の配合について一層の注意を必要とすることがわかつた。

第9章 結 び

従来の薬液注入の方法には種々困難な問題があつた。その中で最も重要な問題は凝固時間を調節できるようにすることである。

著者らがこの報告に提案した薬液注入の方法は、その薬液が工業的に生産されていて大量に入手が可能であること、凝固時間を数分から約1時間の間で調節することが可能であること、出来たゲルは防水性であること、強度が普通に要求される程度には達すること、などの点で全く新しい工法であるということが出来る。

実験室において得られた結果は、大規模に現場に利用する場合には、そのまま期待できない場合も多いが、この点については、最後の章において述べたように、一応現場実験においても成功した。特に薬液を予め混合しておいて1台のポンプで注入できたことは充分特筆すべき点であると思う。

薬液注入の工法については、セメント注入の方法をそのまま利用できない点が多い。この点については例えば *circulating system* を用いるなどして、その工法の端緒をつかみえた。しかし、工法については各々の場合に依つて更に研究すべき点が多いのはいうまでもない。これらの点については一層の研究を行いたいと思う。

基礎実験から現場実験まで約4年の年月を費して行つた研究結果が、一応実際に利用しうる段階にまで達し、既に深い砂利層の仮締切に利用し、極めて注目すべき効果をおさめることができたので、これまでの研究の経過を纏めて発表することにした。この実際の施工例については後の機会に発表したいと考えている。

しかし、一般に注入の技術については、種々難しい問題があるにかかわらず、あまり文献も多く見あたらない。従つてこれらの点を解明するには尙一層の努力が必要であることを痛感している。諸家の御指導と御教示を得られれば誠に幸である。(尙、この薬液注入の方法については特許申請中である。)



(実費著者一部負担)

昭和27年2月20日印刷

土木学会論文集

昭和27年2月25日発行

第12号

著者 沼田政矩・丸安隆和・黒崎達二

編集兼発行者 中川一美 東京都千代田区大手町2丁目4番地

印刷者 大沼正吉 東京都港区溜池町5番地

印刷所 株式会社技報堂 東京都港区溜池町5番地

東京中央郵便局区内千代田区大手町2丁目4番地

電話 和田倉(20)3945番

発行所 社団法人土木学会

振替 東京 16828番

