

線を見れば加振力が増大するとともに共振週期は若干大きくなる。これは地盤係数が変位に比例しなくともゆる soft spring の傾向を若干有することにほかならない。実験範囲内ではその非線型性は実用上無視しうる程度であるが、強大振動に対しては現在のところ何ともいえない。

iii) 仮想質量について 仮想質量または等価質量の考えの歴史は浅くないが、その本質についてはまだ不明であつて本文の地盤反力の問題のみならず種々の地盤係数の問題に付随して解決を困難ならしめている。種々の実測によれば、この量は荷重面積に影響されることがわかつている。従つて荷重面積の影響を除くために現在用いられている物理量、例えば固有週期あるいは復元力などの諸量を若干改変し、面積を考慮した量を採用せねばならないのではないかと思う。その一つの例として、平板載荷振動における reduced natural frequency<sup>3)</sup> の概念がある。また仮想質量は本質的に復元反力に結びついているから両者を2元的に考えればその解明はきわめて困難である。これらの1つをおもに考えて他は一応不変として取扱えれば便利であるが、この方法にも疑義があり現在のところではその善悪は判明しない。

また減衰率は上記の諸量と密接な関係があり、これらは独立に考えられない複雑性を有するため今後の研

究にまつところが多い。従つて現在の段階での耐震計算は依然として物部氏の方法、Engel 氏の方法などに頼らざるを得ないと思う。この点に関し最近発表された後藤氏の方法<sup>4)</sup>は注目に値する。

## 5. 結 び

本文は杭打基礎の耐震性に関する基礎的研究の一端を述べたもので、わずかに基礎地盤係数が複雑な場合の計算法を示し、あわせて簡単な実験結果を述べたにすぎない。その他の諸問題については今後さらに調べたいと思う。

終りに本研究において終始御指導を賜つた京都大学教授村山朗郎博士並びに種々の資料を与えられた後藤尚男助教授に深謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 村山朗郎・谷本喜一：固有値問題の数値解法，土木学会誌，38-4，p. 138 (昭 28-4)
- 2) 後藤尚男・谷本喜一・前田泰敬・吉川和広：国鉄上淀橋梁基礎杭による模型橋脚実験 (昭 29)
- 3) G.P. Tschebotarioff: Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, 1st. ed., 586 (1952)
- 4) 後藤尚男：橋脚地盤の基礎係数値とその橋脚の振動性状に及ぼす影響について，土木学会誌，40-1，p. 12~22 (昭 30-1)

(昭 29. 8. 13)

## トンネル工事に応用した薬液注入

正 員 住 友 彰\*  
准 員 桑 田 博 文\*\*

### ON THE CHEMICAL INJECTION APPLIED TO TUNNEL WORKS

(JSCE April 1955)

Akira Sumitomo, C.E. Member, Hirofumi Kuwata, C.E. Assoc. Member

**Synopsis** Cement grouting and chemical injection are widely used methods to solidify the soft grounds and to stop the seepage of the tunnels. Recently, new chemical compounds  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{AlO}_3$  are proposed for this purpose by Dr. Eng. T. Maruyasu. The authors, however, found another kind of chemical compounds  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$  and  $\text{NaHCO}_3$ , and this method was ascertained more effective, through the fundamental experiments and its applications to the Kammon Vehicular Underwater Tunnel.

**要旨** 軟弱地盤の固結，トンネル覆工の防水にセメント注入，薬液注入が用いられるが，珪酸ソーダ，アルミン酸ソーダによる方法が，東大丸安博士によつて提唱されている。著者等は関門トンネルへの応用にあたり，丸安博士の原理にもとづいて基礎試験を行つて

いる際に，新たな薬液を見出し，これをトンネル覆工の防水注入に応用したところ好結果をえた。

## 1. 緒 言

トンネルの施工において軟弱地盤の固結，湧水の阻止等に注入が有効な工法であり，従来広く用いられてきたセメント乳は，安定した注入剤であるが細かい空隙や砂層に入りにくい欠点をもっている。これにかた

\* 建設省関門国道工事事務所

\*\* 同 上

つて、珪酸ソーダと塩化カルシウムを主体とする薬液はかなり古くから用いられており、最近珪酸ソーダ、アルミン酸ソーダを用いる方法が、東京大学丸安教授によつて提唱され各方面で効果をあげ、二、三の報告が発表されている<sup>1)</sup>。著者等の行つた研究は、上記薬液注入の方針にしたがつて現場への応用を試み、その過程において施工の操作、生成物の物理的性質等に、二 三 尚改良すべき点があることを認め、適当な薬劑を求めさらにトンネル覆工の裏込の注入に適用して良好な結果を得たのでその概要を報告する。

2. 薬液の種類

薬液の凝固時間は注入作業の操作に大きい影響をもつものである、一般に時間を長くすれば凝固しにくくなり、生成物の強度が不安定なものになりやすい。特に海水に接触する場合には特別な考慮を払う必要があるように思われる。

これらの点から考えて現場への応用、海水にたえず接触する関門トンネルの場合のごときには、いままでの方法では適当でないと考えられた。こうした観点から珪酸ソーダを主体として他に適当な添加剤を研究した結果、宇部ソーダ研究課長石川良夫氏が珪酸ソーダに珪弗化ソーダ及び重曹を添加する方法を考案されてゐることを知り、その基礎実験と現場応用を行つた結果、良好な結果を得たので報告する。

3. 薬液の凝固時間

(1) 珪酸ソーダに珪弗化ソーダを添加した場合

図-1 珪酸ソーダの濃度と凝固時間との関係

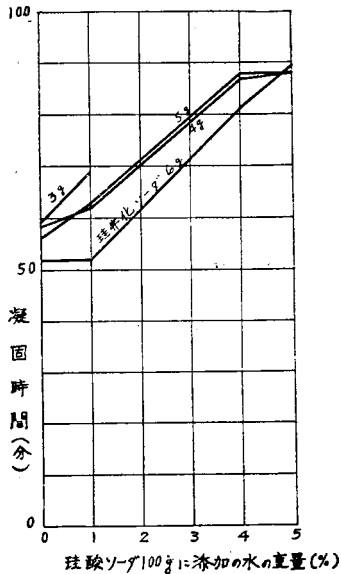
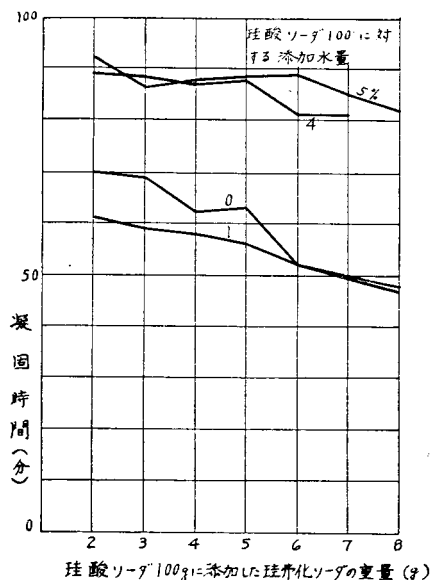


図-2 珪弗化ソーダの量と凝固時間との関係



珪酸ソーダに珪弗化ソーダ ( $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ) を加えるときの反応は混合後しばらくすると、粘性が増し、ゲル状となり以後固結する。アルミン酸ソーダの場合よりも反応が漸近的である。それぞれ 0, 1, 2, 3, 4, 5% の水を加えた珪酸ソーダ液に珪弗化ソーダを添加して凝固時間を測定した結果を 図-1~3 に示す。

珪弗化ソーダの添加量が大となると凝固時間が短縮される。

珪酸ソーダの濃度が小になると凝固時間が延長する。

液温が高くなる  
と凝固時間が短縮される。

(2) 珪酸ソーダに重曹を添加した場合 重曹の添加量が大となると急激に凝固時間が短縮し、この反応でできた固結物は非常に脆い。この点から現場への応用は不適當と考えられる。

(3) 珪酸ソーダに珪弗化ソーダ及び重曹を添加する場合 種々の濃度の重曹液を作り珪酸ソーダ 100g

に対して重曹液の量を変化し、さらに 2~5g の珪弗化ソーダを添加した場合にそれぞれの凝固時間を調べたものが、図-4~7 である。

重曹液の濃度、量が大となると凝固時間が短縮される。

珪弗化ソーダの量が大となると凝固時間が短縮される。

温度が上昇すれば凝固時間が短縮される。

(4) 結論 珪酸ソーダの濃度が小さいときは、重曹のみ添加の場合を除けば凝固時間が長くなる。

アルミン酸ソーダ添加

図-3 液温と凝固時間との関係

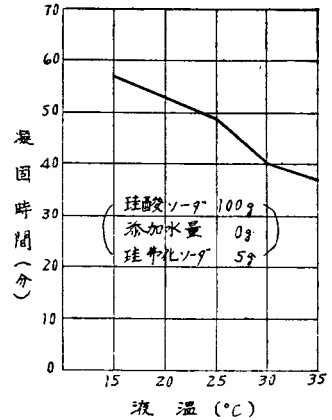


図-4 重曹液の量と凝固時間との関係

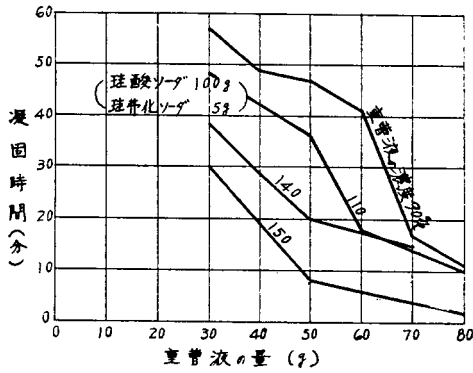


図-6 重曹液の濃度と凝固時間との関係

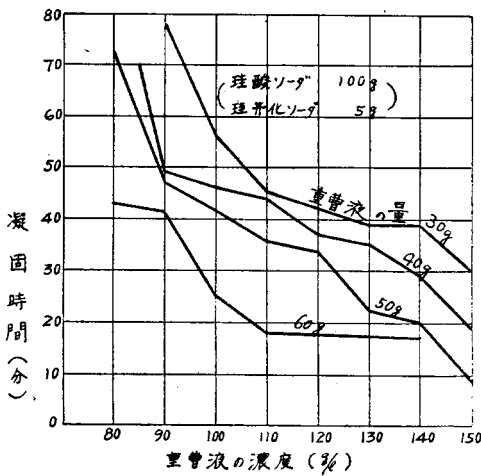


図-5 珪弗化ソーダの量と凝固時間との関係

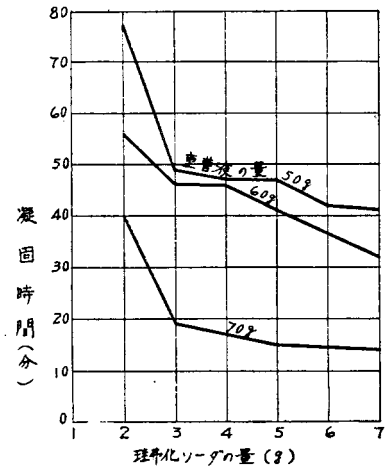
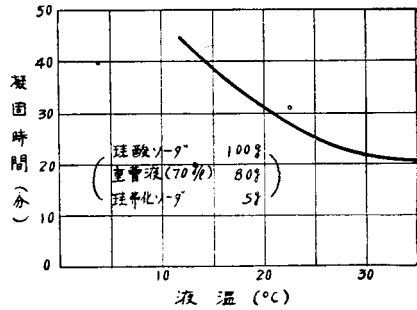


図-7 液温と凝固時間との関係



の方法では苛性ソーダを加えないと、まだらな沈澱を生じた凝固時間を適当に延長できない。

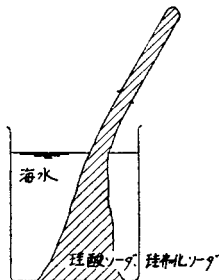
珪弗化ソーダを加える方法は固形物は安定したものになるが、凝固の反応が漸進的で長くなり、また価格の点で適当でない。

珪弗化ソーダ、重曹添加の方法はその配合を加減すれば、凝固時間を長短いずれでも加減でき、固結物も安定しており、価格の点も有利である。

4. 固結物が海水、淡水よりうける影響

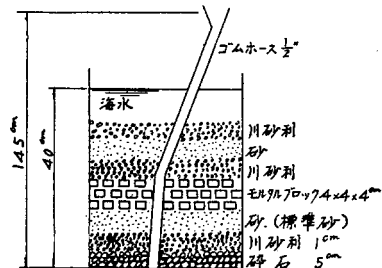
(1) 海水よりうける影響 アルミン酸ソーダ、珪酸ソーダ及び苛性ソーダより生成された固結物が、海水によつて破壊されることはすでにのべたとおりである。珪酸ソーダと珪弗化ソ

図-8 海水を満たしたビーカーに薬液を入れる



ーダより作った供試体を、1週間湿潤養生をし、のち海水中に移して1週、2週、3週、3カ月後の重量を測定したが変化は認められなかつた。また注入時に海水と接触することを考えて次のような実験を試みた。その一は、海水を満たしたビーカーの中に試験管中で配合した薬液を流しこんだ。薬液の表面は白濁するが下部に沈んだのち固結した(図-8)。その二はドラム缶に図-9に示すように碎石、砂利、砂、モルタルプロ

図-9 海水で満たされた砂、砂利層に薬液を注入する



ックの互層を作り、これに海水を満たし薬液を徐々に注入した結果は順次海水と薬液が置換され、24時間後には隙間は完全に固結していた。砂層は多少弾力性をもっていたが1週間後には完全に固結していた。

珪酸ソーダ、珪弗化ソーダ及び重曹を混合した供試体について同様のことを行つたが、重量減は同じく認められず、また海水中で注入した場合にもなら影響をうけないことを確かめ得た。

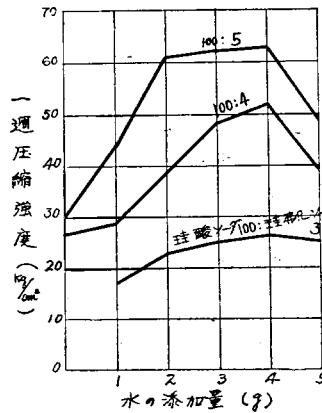
(2) 淡水よりうける影響 圧縮試験用供試体(4×4×16cm)を成形24時間経過後淡水で養生した場

これは固結反応の際含水珪酸の状態で  $n(H_2SiO_3)$  が生ずるがこれが淡水中では表面よりすこしずつ溶けるために破壊するが、海水中では  $MgSiO_3$  の不溶性の膜を生じ、 $H_2SiO_3$  が溶出せず  $SiO_2$  のゲルを経て完全に固結する。試みに一週間海水中で養生したものを淡水に移し、材令とともに重量の変化を測定したが変化は認められなかつた。

珪酸ソーダに珪弗化ソーダ及び重曹を添加した固結物について、成形後24時間経過したものを淡水中で養生したが、溶解、流出の現象は全く認められなかつた。したがつてこの方法は、淡水、海水いずれの場合にも応用することができる。

5. 固結物の強度について

図-12 水の添加量と圧縮強度との関係



セメントの物理試験法と同様の方法で供試体を作成し圧縮、曲げ試験を行つた結果を次にのべる。配合は標準砂1200gと薬液600gとを混合し、成型型に二層につめた。

(1) 珪酸ソーダに珪弗化ソーダを添加 圧

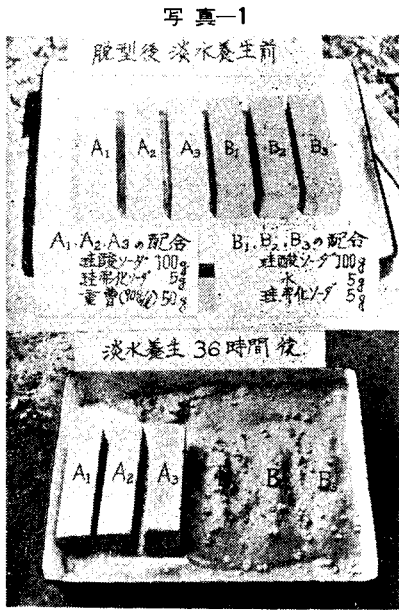
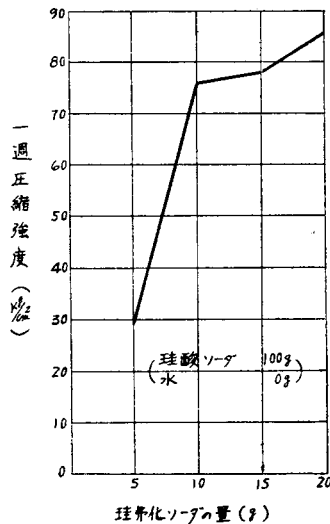


図-11 珪弗化ソーダの量と圧縮強度との関係



縮強度を 図-10~12, 曲げ強度を 図-13 に示す。

合、珪酸ソーダと珪弗化ソーダの固結物は36時間後に原形をとどめないまでに破壊した(写真-1)。

図-10 珪弗化ソーダの添加量と圧縮強度との関係

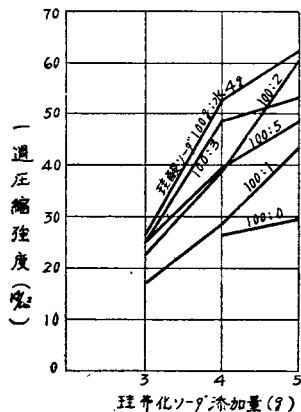


図-13 水の添加量と曲げ強度との関係

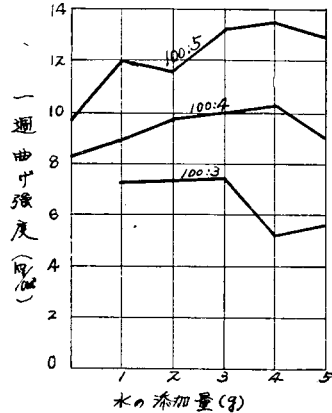


図-14 珪弗化ソーダの添加量と曲げ強度との関係

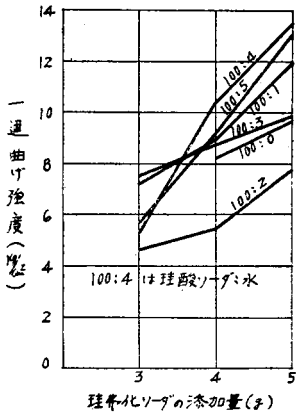


図-15 重曹液の濃度と圧縮強度との関係

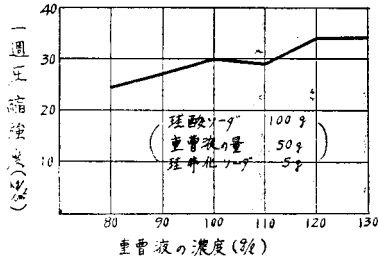


図-16 重曹液の量と圧縮強度との関係

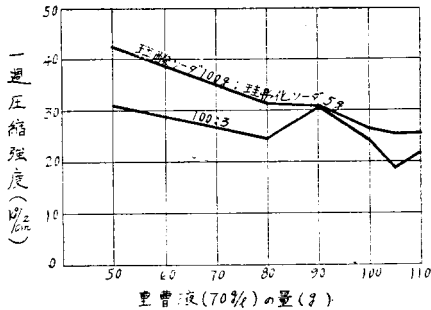
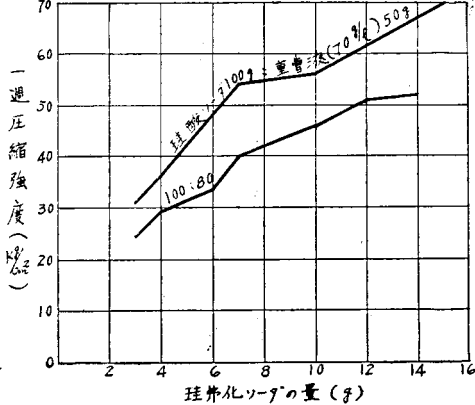


図-17 珪弗化ソーダの量と圧縮強度との関係



(2) 珪酸ソーダに珪弗化ソーダ及び重曹を添加  
圧縮強度を 図-15~17, 曲げ強度を 図-18~20 に示す。

(3) 結論  
重曹液の濃度, 量が増加すると強度は減少する。  
珪弗化ソーダの量を増すと強度は増加する。

圧縮強度は 50 kg/cm<sup>2</sup> 程度のものをうる事ができる。

曲げ強度は圧縮強度にはほぼ比例する。

珪弗化ソーダの量は凝固時間, 強度, 経費の点から珪酸ソーダ 100 g に対して 10 以上に増す必要はない。

図-18 重曹液の量と曲げ強度との関係

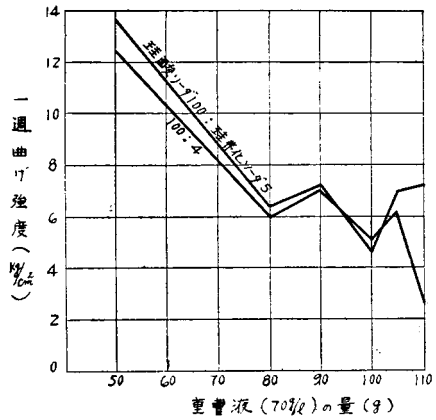


図-19 重曹液の濃度と曲げ強度との関係

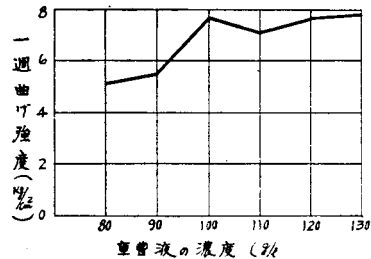
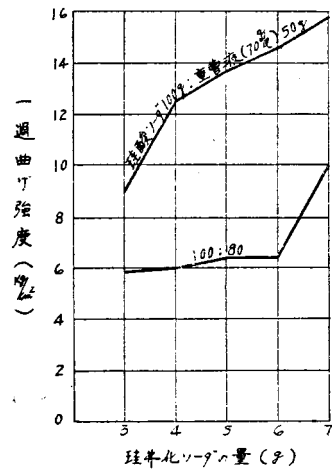


図-20 珪弗化ソーダの量と曲げ強度との関係



6. コンクリートに及ぼす影響

Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, NaHCO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>、いずれもそれ自身コンクリートの成分をおかすものではない。またコンクリートの中から生ずる Ca(OH)<sub>2</sub> は Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>+4NaOH→Si(OH)<sub>4</sub>+6NaF によつてできる NaF と反応して不溶性の CaF<sub>2</sub> を作り Ca(OH)<sub>2</sub> の流れでるのを止める。海水中の MgSO<sub>4</sub>, MgCl<sub>2</sub> はコンクリートに侵入し 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> と化合してセメントバチルスを生じたり、Ca(OH)<sub>2</sub> と反応して可溶性 CaCl<sub>2</sub> を作つたりするのであるが、珪弗化ソーダを用いる場合には生成液中の F<sup>-</sup> と反応して MgF<sub>2</sub> なる不溶性物質を作り、海水の侵入を防ぐとともに上記セメントバチルスの発生、コンクリートの腐食を防ぐに有益であると考えられる。

7. 注入薬液の決定

以上実験その他の考察より他の薬液よりも珪酸ソーダ、珪弗化ソーダ及び重曹によるものは

- 凝固時間を長短自由に調整しうる。
- 強度は圧縮 50 kg/cm<sup>2</sup>, 曲げ 10 kg/cm<sup>2</sup>(一週)程度のもをうることができる。
- 淡水、海水いずれの場合でもさしつかえない。
- 強アルカリを使わないですみ、同一タンクで混合しうるので注入作業が容易かつ簡単である。
- 価格も普通のセメント注入とくらべて高くない。
- コンクリートの防食に有効な作用をする。

ことが判明したので同液を使うことに決定した。

8. トンネルへの応用

(1) 薬液の配合

- 珪酸ソーダ 100 g (Na<sub>2</sub>O·3SiO<sub>2</sub> 三号珪酸ソーダ)
- 重曹液 (90 g/l) 50 g
- 珪弗化ソーダ 5 g
- 凝固時間 45 分

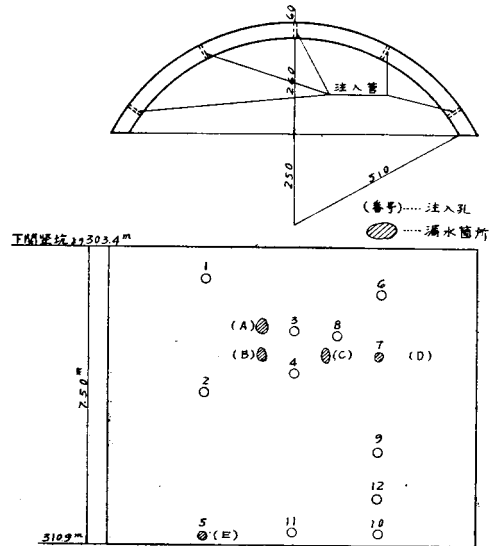
(2) 施工箇所

関門道路トンネル海底部下関堅坑より 303.4~310.9 m 間のアーチコンクリートの裏込注入を行った。

同区間は昭和 27 年度に工事が再開される以前に施工された箇所であつて、漏水が特にはなはだしかつた(図-21)。砂の吹き込みをしたのちモルタル注入を行ったが十分の効果を得なかつたところである。図中数字で示したものは注入孔であり、ハッチングの部分は覆工面より漏水している箇所である。覆工背部の空隙量を 1.95 m<sup>3</sup>/m と考え、このうち 50% は砂で満たされているとすると、注入すべき空隙は 0.98 m<sup>3</sup>/m となる。

(3) 注入作業 使用した注入機は二連堅型プラン

図-21 アーチコンクリート裏込注入孔及び漏水箇所



ジャーポンプで注入量は 0.06 m<sup>3</sup>/min, 7.5 HP の電動機を備えている。混合タンクに一回分として珪酸ソーダ 26 kg, 珪弗化ソーダ 1.315 kg, 工業用重曹 1.220kg, 水 13.7 kg を、水、重曹、珪弗化ソーダ、珪酸ソーダの順序で混合した。表-1 はその注入結果である。

表-1

注入孔番号	注 入 量	注入圧力	注入時間	摘 要
1	539 l	4 kg/cm <sup>2</sup>	2.5時間	再 注 入
2	809	5	3.0	
1	303	5	1.0	
3	2292	4	5.5	
6	236	5	1.0	
8	438	6	2.1	
5	910	4	3.5	
7	270	5	1.5	
9	101	5	1.0	
10	371	5	2.0	
5	135	5	1.5	再 注 入
9	135	4	1.5	
11	371	6	2.5	
計	7 010		29.5	

表-2

漏水箇所	注入前の漏水量	注入後の漏水量	摘 要
A	9 l	0.045	漏水量は 10 分間の量を示す
B	11	0.06	
C	8	0.00	
D	200	0.03	
E	130	0.01	
計	358	0.145	

なお現場において注入薬液の凝固時間を測定した結

果 18 回の測定値の平均は 40 分となり、実験室での時間 45 分より短縮している。

(4) 注入後の状況 注入前後の漏水量を測定した結果を表-2 に示したが漏水量がいちじるしく減少していることが認められる。

(5) 工費の比較 参考までに従来の裏込めセメント注入と単位当り工費を比較してみると

セメント注入 (アーチ 1 m 当り)

材料費	0.64 m <sup>3</sup> @ 15 709 円/m <sup>3</sup> = 10 054 円
労力費	4.5 人 @ 587 円/人 = 2 642
その他材料費 (電力, 油, ボロ等)	994
	13 690 円

薬液注入 (アーチ 1 m 当り)

材料費	0.64 m <sup>3</sup> @ 15 693 円/m <sup>3</sup> = 10 044 円
労力費	3.6 人 @ 587 円/人 = 2 113
その他材料費 (電力, 油, ボロ等)	260
	12 417 円

## 9. 結 語

以上の報告は短区間の注入結果についてのべたのであるが、セメント注入に比較して防水の効果はきわめて良好であり、コンクリートの打継目、細隙にも薬液が完全に滲透し固結し防水の目的が果されたことが認められる。また排水を要するトンネル工事において、

漏洩したセメント乳が排水ポンプに悪影響を与えるおそれがあるのに対して、薬液注入の場合には支障とならないことは、間接的効果の大きいものといえる。この報告に記載したのちにおいて今日まで引き続きおよそ 140 m<sup>3</sup> の裏込め注入を実施し、同様の効果をおさめてきている。今後なお固結体の長期強度、耐透水性の試験を行うとともに、トンネル工事への応用についてさらに研究をすすめたいと考えているが、先輩諸家の御指導と御教示を切にお願いする次第である。

報告を終るにあたり化学的基礎研究に力をつくされ御指導をいただいた宇部ソーダ研究課長石川良夫氏の御好意に対し衷心より謝意を表する次第である (なお珪酸ソーダ、珪弗化ソーダ及び重曹を添加して固結物を生成する方法については石川良夫氏より特許を申請中である)。

## 参 考 文 献

- 1) 沼田政矩ほか：薬液注入による地盤固結に関する研究，土木学会論文集 12 号  
丸安隆和：セメント及び薬液注入を利用したダムの仮締切および既設ダムの漏水どめの施工例 土木学会誌 (昭 28.6.)  
丸安隆和：コンクリート壁体中に薬液注入を行いトンネル覆工の漏水どめを行った施工例 土木学会誌 (昭 29.6.)

(昭.29.8.15)

# ダムコンクリートに使用するフライ アッシュについて

正 員 水 越 達 雄\*

## USE OF FLY ASH FOR DAM CONCRETE

(JSCE April 1955)

Tatsuo Mizukoshi, C.E. Member

**Synopsis** In this paper, the author describes the properties of fly ash produced in Japan and explains the outline of field and laboratory investigations, specifications, shipping tests and handling equipments for Dam concrete.

**要旨** 国産フライアッシュの諸性質につき概説し、国内産のフライアッシュを須田貝ダムに利用するために行つた各種試験成績、材質の規格、品質の管理、現場における打設用設備について説明した。

### I. 須田貝ダムコンクリートにおけるフライアッシュの使用計画

火力発電所より生産されるフライアッシュをボゾラン質混合材として使用する研究は 1914 年ころから米国において始められ、日本においても 1944 年フライ

アッシュ混合セメントの研究が行われた。米国においては 1948 年ころより、実際の使用が始められ Canyon Ferry, Davis, Hungry Horse, Trenton, Falcon, Ca-chuma, Palisades 及び Liberty の各ダムにフライアッシュコンクリートが用いられて、きわめて優良な成績を収めたことが報告されている。すなわち、フライアッシュコンクリートの性質として、長期材令における圧縮及び引張強さの増加、耐久性の増加、溶出の防止、容積変化の減少、水和熱の減少、伸張性の増加、気密性の増強、ウォーカビリティの改善及び所要水

\* 東京電力株式会社建設部土木課長