

青函トンネル海底部工事の グラウト施工における問題点

正員 石 崎 昭 義*

1. ま え が き

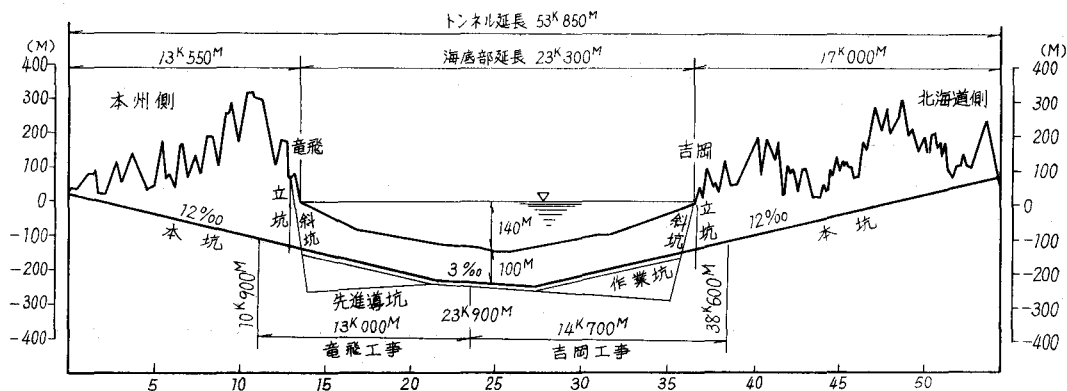
青函トンネルは、延長53K850Mの内、海底部の延長が23K300Mで43%が海底下にある。昭和47年4月から海底部における本工事が開始され、工事は次第に活発化しつつある。

この海底部工事において最も問題となるのは、高圧の湧水であつて、無限の供給力をもつ高圧湧水を処理しなければ、地山が硬岩であれ、軟岩であれ工事は、施工できない。

硬岩部においては、多量の湧水は作業の能率を低下させるばかりでなく、さく孔、爆破作業を困難ならしめ軟弱破碎帯においては、高圧湧水が地山の崩壊を惹起する

こととなる。山岳トンネルのように水抜き坑道によつて地下水を枯渇させ、湧水圧を低下させることは不可能であり、このため、堅岩部に対してはグラウトにより止水し、軟弱部に対しては、止水と地山の強化を行つたのち、堀さくしなければならないわけで、このグラウト施工の能率化が、工期を支配するといつても過言ではあるまい。本文では、特に湧水の多い本州方龍飛におけるグラウト施工の現状と問題点についてのべてみたい。図-1に青函トンネル縦断面図を示す。

図-1 青函トンネル縦断面図



2. グラウト施工における問題点

青函トンネル海底部工事のグラウト施工の問題点を列挙すると次のとおりである。以下各項目について説明する。

2-1 注入範囲の決定

必要にして十分且つ経済的な注入範囲は、地山、注入材料、掘さく工法等とも関聯し、理論的実験的に今後研究しなければ不明な点が多いが、対称地山によつ

てその考え方を区別するのが妥当のように思われる。一つの考え方として堀さくにより地山がゆるむ高さの外側まで注入することが必要と考えられ、テルツァーの支保工に作用する土荷重の式を参考とすると普通程度に塊状で割れ目のあるものは、

$$H = 0.25B \sim 0.35(B + H_t) - \text{ここに} H: \text{土荷重高}(m) B: \text{トンネル掘さく断面幅}(m) H_t: \text{トンネル掘さく断面の高さ}(m) \text{であるから、本坑、作業坑、先進}$$

* 日本鉄道建設公団青函建設局龍飛鉄道建設所長

導坑、斜坑は次の値をうる。

本坑 $B=11.0\text{m}$ $H_t=8.8\text{m}$ $H=2.8\text{m}\sim 7.0\text{m}$

作業坑及び先進導坑 $B=4.5\text{m}$ $H_t=4.0\text{m}$

$H=1.1\text{m}\sim 3.0\text{m}$

斜坑 $B=6.6\text{m}$ $H_t=5.2\text{m}$ $H=1.7\text{m}\sim 4.1\text{m}$

現在実施している先進導坑、作業坑の注入範囲は、
5m～6mで本坑は8.0m～12.0mで計画している。

斜坑では、1.5m～3.0mで実施してきたが、止水状況からみると、先進導坑作業坑よりも斜坑からの湧水が多い。図-2に本坑、作業坑、先進導坑の標準断面を示す。斜坑1200m付近の破碎帯における注入範囲の決定に当たって参考としたのは次のような考え方である。今、注入範囲内を弾性体と考えると図-3の安定条件として次の式が成立する。

$$\frac{Pa + C \cot \varphi}{P_R + C \cot \varphi} = \frac{1 - \sin \varphi}{1 - (a/R)^2 \sin \varphi}$$

$$\therefore P = -C \cot \varphi + \frac{(P_R + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{1 - (a/R)^2 \sin \varphi}$$

a : 堀さく半径

R : 注入域半径

P_a : 支保圧力 C : 粘着力 φ : 内部摩擦角 P_R : 注入域外圧 $n = \sigma_{ca} / \sigma_{ta}$: しわい度合

σ_{ca} : 岩盤圧縮強度、 σ_{ta} : 岩盤引張強度

Mohr-Coulombの強度説に従い、 $C \cot \varphi$ 、 $\sin \varphi$ を n と σ_{ca} に換算すると

$$P_a = \frac{-\sigma_{ca}}{n-1} + \left(P_R + \frac{\sigma_{ca}}{n-1} \right) \cdot \frac{1 - (n-1/n+1)}{1 - (a/R)^2 (n-1/n+1)}$$

$\sigma_{ca} = 10 \text{ Kg/cm}^2$ 、 $n=3$ 、 $\varphi=30^\circ$ とし、 $P_R = 30 \text{ Kg/cm}^2$ （水圧 25 Kg/cm^2 、土圧 5 Kg/cm^2 ）と仮定すると次式をうる。これを図にすると P_u

$$P_u = -5 + \frac{35 \times 0.5}{1 - 0.5(a/R)^2} \quad (\text{Kg/cm}^2)$$

と R/a の関係は図-4の通りとなる。図-4より $R/a=4.5$ として $R=15$ 即ち堀さく面外方12mを注入範囲とした。斜坑11.200mの破碎帯を突破した根拠の1つである。 σ_{ca} の値をもつと大きくとつても、 R/a の関係は大きく変化はなく、現在の所、テルツァギの式と、上式の釣合式の両方を参考として、これに余裕を見込んで注入範囲を決定していきたいと考えている。参考までに今日まで実施してきた実績を示すと表-1のとおりである。

図-3 注入域と外力との関係

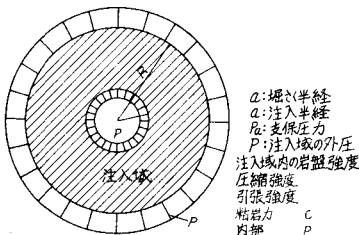


図-4 注入半径と掘さく半径との比と支保圧力の関係

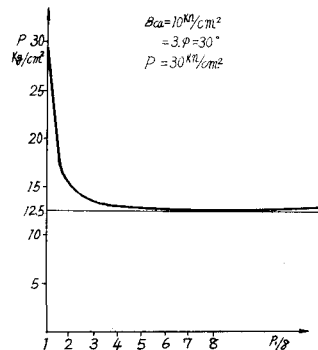


図-2 標準断面図

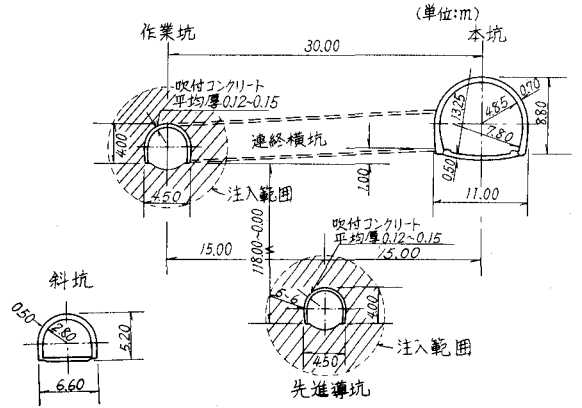


表-1 掘削半径と注入半径の実績表

先進導坑

注入回数別	1	2	3~4	5	6~8	9~11	12	13	14~22	23	24	25~
掘き(半径(m))	4.00	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	4.00	4.00	2.65	2.30	2.30	2.35
注入半径(R)	9.00	7.80	10.80	8.80	10.80	12.80	10.80	11.00	9.65	9.30	8.30	8.35
R/a	2.25	2.79	3.86	3.14	3.86	4.57	2.70	2.75	3.64	4.04	3.61	3.55
地質	BS	Tf	Tf	Tf	20Tf	Tf	BS	LP	LP	Tf	20Tf	20Tf
						GS		BS	BS	BS	BS	BS

作業坑

注入回数別	斜坑	斜坑	4~6	7~17	18~24	25~
掘き(半径(m))	4.00	1.75	2.80	2.80	2.30	2.35
注入半径(R)	7.00	4.75	5.80	2.80	7.30	7.35
R/a	1.75	2.72	2.07	2.78	3.17	3.13
地質	Ad	Ad, BS	Ad	Ad, Tf	Tf	20Tf
					GS	Ad

斜坑その他

注入回数別	斜坑	斜坑	斜坑	斜坑	斜坑	斜坑	本坑
掘き(半径(m))	3.30	3.30	3.30	3.85	3.30	2.10	5.50
注入半径(R)	4.80	6.30	15.30	8.85	8.30	7.10	12.30~17.30
R/a	1.45	1.91	4.63	2.30	2.52	3.38	2.44~3.20
地質	Ad, BS	Ad, BS	Ad, BS	Ad, BS	Ad, BS	Tf	Ad

BS: 玄武岩

Ad: 安山岩

LP: 石英粗面岩

Tf: 凝灰岩

20Tf: 角礫凝灰岩

20Tf: 火山礫凝灰岩

2-2 注入用さく孔の能率化

現在、注入孔のさく孔には、60m程度をさく孔でできるガードナーデンバー社製のPR-123を主体とし、長孔用として、120m程度までさく孔可能なPR-143を補助的に使用している。PR123は、パーカッションとローテーションが各々独立して、リバースローテーションも可能で、さく孔時には、切羽にパイプ架台を組立てこれに取りつける方法と、2ブームジャンパーによる2つの方式を採用している。地質が複雑で注入完了後、チェック孔のみで不安なときは、切羽から小型ボーリング(GP65又はOP-1)でコアボーリングをして確認する。さく孔時間と注入時間を比較すると最近の水ガラス注入では、さく孔時間が注入時間を上廻るため、さく孔時間の短縮を計ることが一つの課題であり、さく孔数の減少を計る以外に、さく孔に占める機械セット時間、ロッド継ぎ、ロッド抜き、スライム排除等の時間を少しでも縮めることが大切である。参考までにさく孔時間の実績を表-2に示す。

表-2 さく孔時間の実績表

注入回数別	先進導坑				作業坑	
作業内容	8回	16回	23回	24回	9回	作業坑
機械セット	38分	28分	24分	25分	23分	55分
さく孔	116	286	119	137	343	317
ロッド継ぎ	31	40	27	30	60	121
ロッド抜き	41	105	23	29	56	125
機械撤去	7	3	6	4	28	5
機械その他	35	103	20	15	40	221
合計	268	565	219	240	550	844
平均(1/下リ(m))	0.21	0.17	0.29	0.30	0.23	0.29
1掘削(1/下リ(m))	35.3	33.8	34.1	41.4	65	91
1掘削の掘削量(m)	418	84	20	58	11	1000
岩種	Tf	LP	Tf	Tf, BS	Ad	BS
記号	・聖母部	・教務部	・教務部	・教務部	PR/23	PR/143
	PR/23	PR/23	PR/23	PR/23	PR/23	PR/143
注入ジャンパー	架台PR-123	架台PR-123	架台PR-123	架台PR-123	架台PR-123	架台PR-143

このための対策としては、次のようなことが考えられる。

- (1) 空気圧、空気量を増加してのみ下りを向上する。
- (2) ロッドのカップリングの形状の改良を行う。
- (3) ロッドの径、形状の選択と寿命の向上を計る。
- (4) さく孔機械の故障の予測と適正管理を実施する。
- (5) 回転力を強力にしてジャーシングの防止を計る。
- (6) 送水圧、送水量を増加してスライム排除を良くする。

表-3にはPR123、PR143の諸元を示した。

以上の対策の他に、問題となるのは、ロッドの孔曲りを防止することにある。さく岩機を計画注入範囲に正しくセットしても、孔曲りがあつては、正しくセットしても無意味である。孔曲りが激しい時は、これを予想してセットする必要がある、長孔である程孔曲りが大きいから、せん孔長にも限度があり掘さく長と注入作業のバランスを考えなければならない。図-5に最近測定した孔曲りの傾向図を示す。この孔曲りの対策としては次のように対処していきたいと考えている。

- (1) さく孔架台を堅固にして機械の据付精度の向上を計る。
- (2) ロッド(現在1.50m/本、φ32mm六角)の剛度を上げる。
- (3) 岩質の変化を予想してさく孔方向をセットする。
- (4) 回転力を向上し、スライム排除を良くする施策をとる。
- (5) 地質によつて送り速度、衝撃力の調整を行う。

いずれにしても、孔曲り測定の実績が少ないため、岩種別の傾向をつかむなどして今後も実態の把握に努めたい。

図-5 孔曲り傾向図

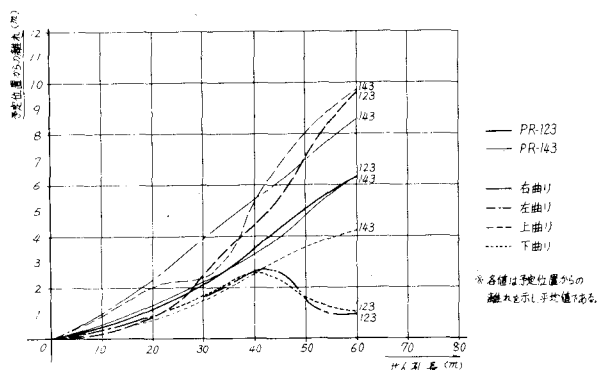


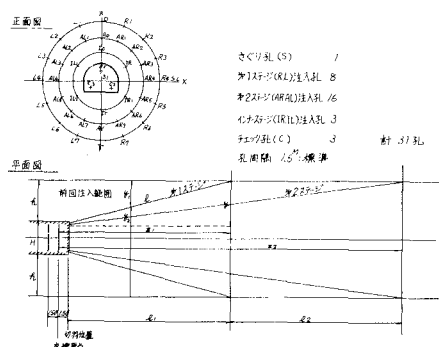
表-3 大型さく岩機の性能諸元表

名 称	ガードナー・デンハ DH-99	ガードナー・デンハ PR-123	ガードナー・デンハ PR-143
形 式	回転打撃式 (ライフルバー式)	回転打撃式 (独立回転式)	回転打撃式 (独立回転式)
ピストン径 mm	102	114	140
ストローク mm	82	90	94
全 長 mm	756	978	1397
重 量 kg	68	131.5	313
ロ ッ ド	25mm6角×1500	32mm6角×1500	38mm6角×1500
フ ィ ー ダ	スクリュ-フイード	スクリュ-フイード	スクリュ-フイード
ガイドセル全長 mm	2700	2959	644
重量 kg	75.7	94	212.5
空気消費量	4.75m³/min	8.15m³/min	29.7m³/min

2-3 せん孔配置の決定

せん孔配置は図-6 のとおりで、さぐり孔、注入孔、チェック孔の順序で注入する。標準孔数全部をせん孔するわけではなく、湧水の状況によりせん孔数は増減している。掘進速度を上げるためには、最少のせん孔数で、最大の注入長をとればよいわけである。注入範囲 ℓ_1 が小さい程、 ℓ_1 、 ℓ_2 が長くとれるわけであるが、せん孔長を長くした場合、注入効果に問題があり、また孔曲りの問題も残る。もう一つの問題としてパッカーが確実にセットできる位置にも関係する。現在作業坑、先進導坑では、 $Z_2 = 4.0\text{m} \sim 6.0\text{m}$ で本坑では $\ell_1 = 2.5\text{m}$ 、 $\ell_2 = 5.0\text{m}$ である。

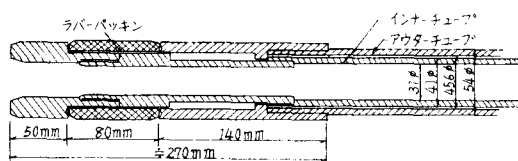
図-6 標準せん孔配置図(先進導坑の実施例)



せん孔配置を決める要素を挙げると次のようなことを考えねばならない。なおパッカーには硬質ラバー(図-7 参照)を使用しており、その位置は一般に2~6mの範囲にセットし、先進ボーリングのコアから判断している。

- (1) 地質によつてパッカーが確実にきく場所を選定する。
- (2) 必要最小限の注入範囲 y 又は y_2 の決定。
- (3) 地質より最的の止水効果をもつせん孔長 ℓ の決定。
- (4) 孔曲りに対する配慮

図-7 60φ, 65φ用パッカ先端部構造図



(5) さく孔順序と注入順序

2-4 注入材料の選択と配合

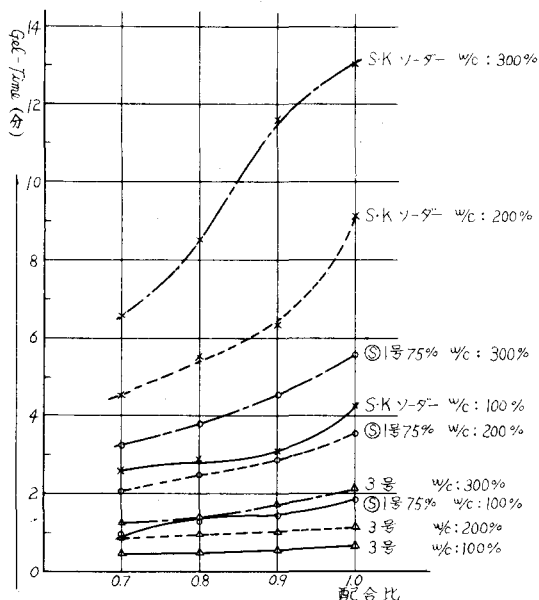
今日までの本州方龍飛における注入材料は、斜坑の掘さく当初は、普通ポルトランドセメントによる、セメントミルク注入を主体とし、斜坑900m付近の断層破砕帯では、3号水ガラスによる水ガラス注入を主体とする注入を実施し、第39回～42回注入でも水ガラス注入とした。水ガラス注入は、セメントミルクより強度が小さく特に水セメント比の大きい配合では、耐久性にも疑問があるが、堅岩部の止水注入には、これを主体としてよいのではないかといわれてきた。その後、粉末度の小さいコロイドセメントを開発し、先進導坑第12回注入まではコロイドセメントを主体としたセメントミルク注入を実施し、3号水ガラスは、坑壁へのリーク防止、又はセメント注入の終りに使用し、バツカー撤去を早めるなどの補助的な使用にとどめ、切羽には常に水ガラスを注入しうる設備を設けてきた。その後室内実験で、1号水ガラスを希釈した水ガラスミルクが、3号水ガラスに比較し、初期強度が高く、ゲルタイムが長く、粘性も低いことが判明し、先進導坑第13回注入以降は、⑤1号水ガラス75%液による水ガラス注入に切换え、第22回注入からは、3号水ガラスの必要性も認識し、リーク止め等の補助的注入に併用しはじめた。その後水ガラスミルクの初期程度等が、水ガラスのモル比に関係することに着目し、第28回注入以後は、低モル比のS.K珪酸ソーダを主体とし、3号水ガラスを併用して今日に至っている。作業坑、本坑では現在⑤1号75%液のみを単独に使用しているが、今後3号水ガラスを補助的に使用することも検討している。なお作業坑、本坑のセメントミルクと水ガラスの配合比は1:1を原則としているが、先進導坑では1:0.7～1:1と変化させて使用している。注入材料の選択と配合についての以上の経過を整理すると、セメントミルク注入では地質により水セメント比800%の濃度から注入しなければ注入できず、序々に600, 300, 300, 100%と濃度を下げて注入していた。セメントミルクでは、実際に固結する量は脱水作用により注入量の数分の1程度にすぎず時間がかかる。3号水ガラス注入では、全体が固結し、能率的であるが初期強度が低く、ゲルタイムが短い欠点等のため本格的な使用をさせてきた。普通セメントによるミルク注入で注入できないのは、セメント粒子の大きさが大きいと考え、粒子の小さいコロイドセメントを開発し効果があることを確めた。その後、コロイドセメントは、品質管理上、風化したり、凝集物ができやすいこと等の欠点を有することが判明し、現在では、⑤1号水ガラス希釈液や、更にモル比の低いS.K珪酸ソーダを使用しているわけである。水ガラス注入で大切なことは、強度、ゲルタイム、粘性でこれは、配合、温度等に関係する。また固結物は、空中にさらすと脱水し粉状化するなど、耐久性について今後確めねばならないと考えている。更に、その使用については、止水注入と補強注入とに分けて検討すべきであろう。表-4に、セメントミルクと水ガラス注入の比較を示す。図-8は表-4の配合とゲルタイムの関係を表したものである。

表-4 セメントミルク注入と水ガラス注入との比較表(竜飛試験室による)

項目	セメント注入		L W 注 入									
	普通セメント	コロイドセメント	⑤1号75%(商品名)				3号		S.K珪酸ソーダ(商品名)			
配合	w/c 600/400 200/150/100/80	w/c 400/200 150/100/80	1:1	1:0.9	1:0.8	1:0.7	1:1	1:1	1:0.9	1:0.8	1:0.7	1:0.7
モル比			2.1~2.3				3~3.3		1.6~1.8			
珪酸ソーダ			15~16%				9~10		14~15			
Na ₂ O			31~33%				28~30		23~25			
SiO ₂			57 CP				91		54			
粘度												
ゲルタイム												
強度												
w/c 300	4 CP	12 CP	10.0	10.3	9.8	8.1	10.1	9.5	9.3	8.5		
200	8	29	14.3	12.0	12.5	12.8	10.4	9.9	9.9	9.6		
100	77	260	19.0	17.0	18.2	16.8	13.3	16.2	14.9	12.0		
モル比												
w/c 300	—	—	4.3	6.6	5.2	3.1	4.1	3.6	2.3	3.6	1.0	
200	—	—	8.2	9.4	7.2	5.6	8.1	9.2	8.4	29.2	6.1	
100	—	—	58.6	80.3	106.2	110.4	20.7	96.8	89.5	112.0	103.5	
ゲルタイム												
w/c 300	—	—	5'34"	4'33"	3'48"	3'16"	2'04"	13'05"	11'39"	8'32"	6'35"	
200	—	—	3'35"	2'52"	2'30"	2'04"	1'10"	9'09"	6'20"	5'30"	4'32"	
100	—	—	1'49"	1'29"	1'20"	57.7"	40'8"	4'15"	3'06"	2'50"	2'36"	

*セメントミルクのσ₃はP=30kg/cm²で加圧脱水した値である。

図-8 セメントミルクと水ガラスの配合とゲルタイムの関係図



2-5 注水テストと岩盤の評価

現在、さく孔終了後必ず注水試験を行つている。これは他孔へのリークの確認、スライム排除の他、岩盤の評価を目的としている。ルジオン試験のよう一般に注入圧 P と注入量 Q とは、直線関係にあり、一定注水圧以上では Q が急速に増加する。図-9 に注水テストによる P と Q との関係を示すが、 60 Kg/cm^2 位で変曲点をもつ。これはいわゆる注入による岩盤の破壊といわれるものであろう。一方岩盤の亀裂幅 a と Q/P との関係については、図-10 のような円形ボーリングに直交した等間隔の亀裂を有する仮想岩盤に注水テストを行つた場合を考えると、一般に Q/P は a^3 に比例する。湧水量は岩盤の亀裂幅に比例すると考えて、先進導坑における代表的地質により Q/P と湧水量 の関係をプロットすると図-11 のとおりである。これより岩盤が堅岩か岩脈かの目安を得ることができる。仮想岩盤で、ボアホール内を層流で定常流とし、圧力による径深の変化を無視すると次式をうる。

$$a^3 = \frac{6\eta}{\pi} \log \frac{\chi}{\chi_0} (Q/P)$$

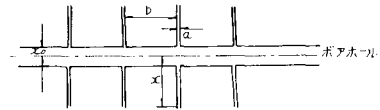
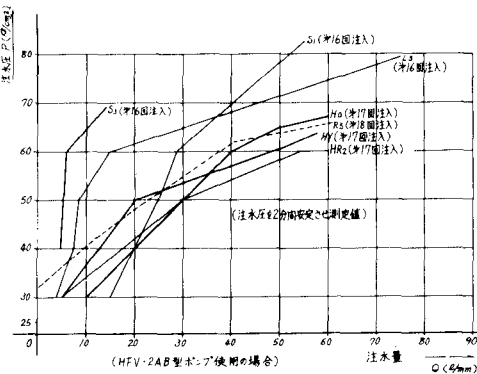
今、 $\eta = 1 \times 10^{-2} \text{ dyn} \cdot \text{sec/cm}^2$ 、 $\chi = 200^m$ 、 $\chi_0 = 3.25 \text{ cm}$ とすると

$$a^3 \div 2.8 \times 10^{-6} \times Q/P$$

をうる。上式より求めた割れ目幅と注入量の関係を先進導坑第25～第27回注入（玄武岩）についてプロットすると、図-12 のとおりで、 $1,000 \text{ l}$ 以下の注入量の亀裂幅は $0.15 \sim 0.20 \text{ mm}$ であり、これは Kenedy . T.B によれば、割目幅と粒径の比が3以上で注入可能としている説に従えば、セメントミルク注入の限度であると考えられる。注水テストによる岩盤の評価と注入量の関係については、基準を作成したいと考えている。

図-9 注入テストによる注入圧と注入量との関係図（先進導坑）

図-10 仮想岩盤モデル図



- X : 亀裂中の任意点のボアホール中心からの距離
 - R : ボアホール半径
 - a : 亀裂の開き幅
 - b : 亀裂の間隔
 - P : 位置 X における有効注水圧
 - η : 水の粘性係数
 - R : 亀裂の半径 $= \frac{1}{2}(a + \frac{b}{2}P)$ (但し E は弾性係数)
 - Q : 1つの亀裂の単位幅における流量
 - Q : 1つの亀裂の全流量
- $$Q = \frac{\pi E a^3}{240 \eta \log \frac{\chi}{\chi_0}} \left[\left(1 + \frac{b}{a} \frac{R^4}{E} \right) - 1 \right]$$

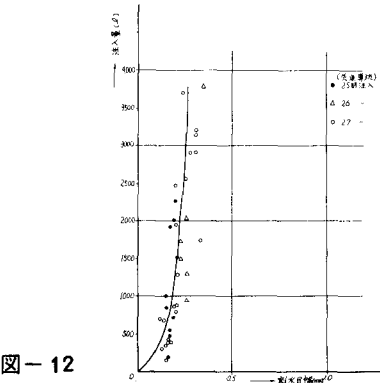


図-12

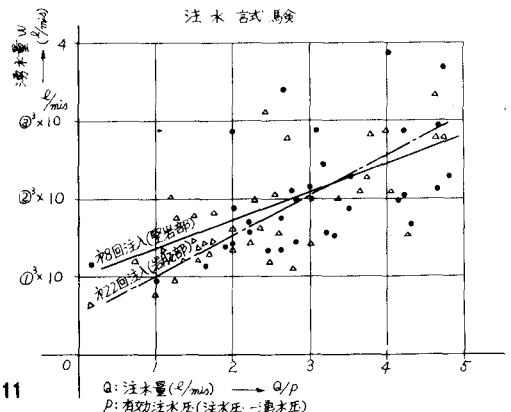


図-11

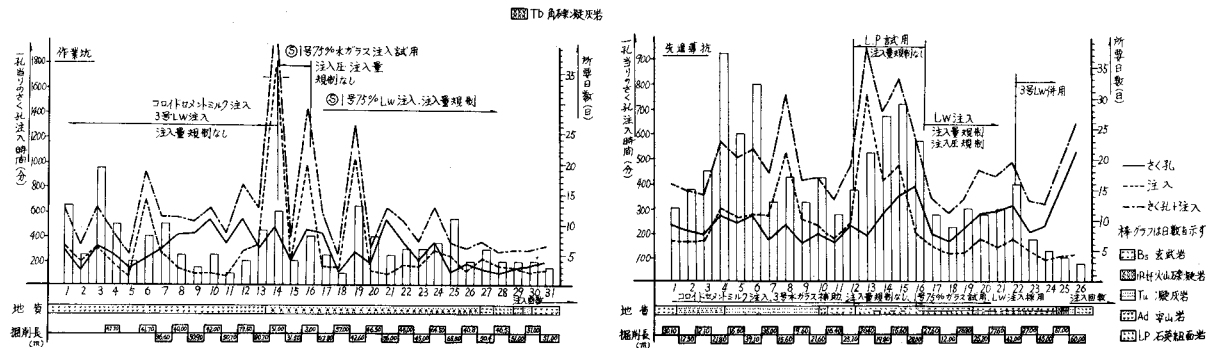
2-6 注入圧、注入量の規制

従来、注入圧は、湧水圧の2〜3倍であるといわれており先進導坑では、 2.7 Kg/cm^2 の湧水圧に対して 9.0 Kg/cm^2 、作業坑でも 1.4 Kg/cm^2 の湧水圧に対して 5.0 Kg/cm^2 以上のケースが多い。その後、岩盤の破壊を考慮して、現在先進導坑では 7.5 /cm^2 、作業坑では 4.5 Kg/cm^2 以下に押えて注入している。これは、注入量の制限にも関係し、従来の実績では、充填量が1孔平均 $0.06\text{ m}^3/\text{m}$ であることを根拠として、最大注入量を $0.12\sim0.24\text{ m}^3/\text{m}$ 以下とし、またボアホールの孔を埋める量等から最小注入量を $1,000\text{ l}$ とするなど、止水効果が十分な、必要最小量を規制する試みを行つている。図-13に今までの注入実績を時間で示してあるが、これから判るように注入時間の短縮がよみとれる。

3 あとがき

グラウト施工の問題点として、この他止水効果の判定と水抜き効果の関聯や、グラウトポンプの改良、機械類の能率的使用があるが、一番大事なことは、止水と地盤強化をもつとも効率よく施工することであつて、今後は、同時さく孔、同時注入がどの程度可能かを追求して行きたいと考えている。字数の関係から十分説明できないので、別の機会にゆずりたい。皆様の御批判を頂く次第である。おわりに資料作成に協力された鉄道建設公団龍飛鉄道建設所の末永充弘君、秋田勝次君をはじめとする関係の方々に心から御礼申上げる次第である。

図-13 一切羽注入における時間及び日数の実績図



参考文献

- (1) 北原正一 : 青函トンネル調査工事報告、土木学会誌第56巻第4号、1970年4月
- (2) 横山 章 : 青函トンネル調査工事におけるグラウト施工、コンクリートジャーナル第7号、1971年7月
- (3) 石崎昭義、岩田伸雄 : 青函トンネル海底部における岩盤止水注入について、第7回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要、1972年2月
- (4) 篠原 紘、秋田勝次 : 先進導坑における注入工法<青函トンネル本州方>鉄道土木第14巻第7号、1972年7月
- (5) Karl Terzaghi : Rock Tunneling with steel support、1945年
- (6) 土木学会岩盤力学委員会 : 土木技術者のための岩盤力学
- (7) 本間 仁、安芸皎二 : 物部水理学
- (8) Talobre, J : La Mécanique des Roches