

○井 上 敏 男

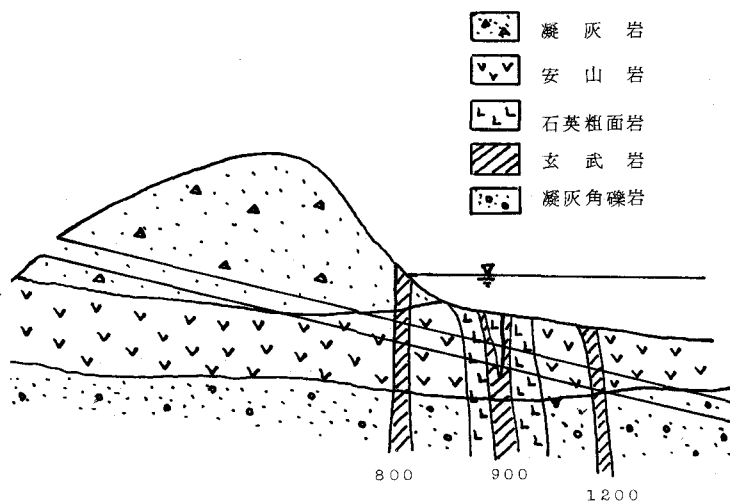
青函トンネル本州方龍飛斜坑は、火山岩帯（安山岩、玄武岩、石英粗面岩）の複雑な地質の中を掘削していくもので、勾配 $\frac{1}{4}$ 、全長1335M、掘削断面積約30M²の計画である。当初から予想されていた通り、火山岩の亀裂より多量の湧水がある。41年3月に掘削を始め、41年8月に295M（海拔一22M）に於て初めて止水注入を要する湧水に会い第1回目の止水注入を行つた。460M（一63M）に達してからは、全区間注入しなくてはならなくなり、44年11月末現在迄に46回の注入を行つてきた。46回迄の総注入量は、約8,600M³、使用セメント約2400t、使用水ガラス約1,000tにもなっている。第1回以降の注入作業日数は約480日で、全作業日数の50%を占めている。

龍飛斜坑の地質

図一Iの龍飛付近の地質概略図に示してある通り、この付近は安山岩中を玄武岩、石英粗面岩が貫入しており、玄武岩は石英粗面岩中にも貫入している。掘削上特に問題となつた地質は、玄武岩と石英粗面岩で、この地域では、いづれも岩脈として表われ、部分的に粘土化著しく、又湧水が多かつた斜坑1,280M（11月末現在切羽）迄を岩質別にみると、凝灰岩、火山礫凝灰岩8%、凝灰角礫岩が29%、安山岩47%、石英粗面岩7%、玄武岩9%となつている。坑口より250M迄は、小さな火山礫を含む凝灰岩、250M～600Mは凝灰角礫岩中に安山岩、玄武岩の岩脈を含んだ地層、600M以奥はラバーフローの安山岩を所々玄武岩が貫入している。850M～950M間は石英粗面岩が貫入し、この中を更に数本の玄武岩が貫入している。このうち800M付近の玄武岩は、小断層と競合して玄武岩の風化が著

しかつた。突破するのに約2ヶ月を要した。900M付近は前述の通り複雑な地質で粘土化しており、ここでは約6ヶ月を費した。1220M付近は断層で安山岩が凝灰岩に変わり、この境目にはやはり玄武岩が貫入しており、湧水は多く粘土化していた。ここで鏡は崩壊し、11 $\frac{1}{2}$ 分の湧水に会い、坑道が150M間水没した。この区間は3ヶ月半の注入と、2ヶ月半の掘削で突破した。坑底設備付近は凝灰岩層であるが、所々玄武岩が貫

図一I



入し、粘土化しており、多量の湧水を伴っている。

湧水処理方法

前述した通り、本州方に於ては非常に複雑な地質であるので、夫々の岩質に応じて注入の方針を立てて注入基準を定めている。しかしこれは斜坑の進行に伴い湧水圧が増加しているので、常に現場で検討し、改訂している。以下に各地質に対する注入基準の基本的な考え方を述べる。

1.単純亀裂

斜坑部の母体である安山岩に存在するクラックで、概して形状が単純であるためか、湧水量が多くても、比較的容易に止水できる。大きな割目（湧水量の多い孔）はセメント注入で、小さな割目（湧水量の小さい）はLW注入で有効に止水可能であるし、掘削後も湧水は比較的少ない。900M以前はセメントミルク主体であつたが、以後はLW注入、最近ではコロイドセメント（表一I）を使用してのLW注入を行つている。比較的少数の孔で止水効果が現れる。地盤に強度を持たせるという点は余り注意しなくてもよい。

2.玄武岩の岩脈付近

玄武岩は最も新しい貫入岩でここでは必ず大量の湧水に会つている。注入効果が悪いので、当初はセメント注入の濃度を下げたり、孔数を増加していたが、最近ではLW注入で高圧（湧水圧+40 $\frac{Kg}{cm^2}$ ~20 $\frac{Kg}{cm^2}$ ）で行つている。掘削後の湧水量も多く現在掘削完了区間で湧水が残つているのは、この地質が多い。

3.玄武岩変質部

玄武岩が断層又は熱作用等を受けて大巾に変質軟弱化したものである。湧水が多く、高圧の湧水が崩壊を呼んで危険である。800M、900Mの地質がこれであつた。800Mは湧水圧も低いいためセメント注入のみで突破できたが、900MではLW注入を用い苦勞して突破した。この経験により低粘性の浸透性の大きい薬液注入の必要性を感じ以後数種の薬液の試用をしている。

3.粘土層

この地質は止水することは勿論であるが、更に均一の強度を持たせる事が必要である。この

表一I

比表面積 0m ² /g	SS フライ 残分 %	始 発	終 発	圧 縮 強 度 $\frac{Kg}{cm^2}$			
		時間一分	時間一分	1日	3日	7日	28日
5,680	0.2	2-00	3-05	84	230	366	466

目的のためには浸透性の高い薬液注入が不可欠である。注入方法も他の場合は、ワンステップ注入で良いが、ここでは粘土層と岩盤との境目に入つて肝心の粘土層部分は仲々入りにくく、所期の目的の完成を期し難い。従つて粘土層のみを注入する様に2及至3ステップ注入を行なう必要がある。そのため削孔中

表一2

グ ラ ウ ト 材		浸透し得る 粒徑 mm	圧 縮 強 度 $\frac{Kg}{cm^2}$		
			3 h	24 h	3 d
L W	普 通 W/C 200%	1.2	5.2	6.1	8.9
	" W/C 400%	0.6	2.5	3.1	4.9
	コ ロ イ ド W/C 200%	2.5	6.3	7.5	9.8
	" W/C 400%	1.2	6.1	10.2	13.8
	" W/C 600%	0.6	3.6	4.6	6.1
日 東 S S		0.15	1.0	1.6	1.6
ユ リ ロ ッ ク		0.3	1.5	1.5	1.5

にジャーミングしたり、その気味があつた所で削孔を打ち切り、一度注入し、更に再削孔して注入している。強度の点からは、粘土層を注入材と置換できれば最上であるが、実際不可能であるので高圧（湧水圧 + $4.5 \sim 5.5 \text{ kg/cm}^2$ ）で注入し、注入量が少なくなつてきても出来るだけ注入を続け加圧時間を長くして、粘土層の圧密化をねらつてゐる。又セメントミルクには膨張剤としてアルミ粉を入れている。以上注入方針を述べたが、表一に龍飛に於て使用している薬液の諸性質を示す。

注入効果

注入を終了するに当つて、止水、補強という注入初期の目的を達成したかどうかの判定は非常に難しい。湧水はトンネル全長に亘つて平均的にあるのではなく、断層、破砕帯及び特に断層と呼ぶ程でなくても割目の多い部分等に集中しているであろうが、一応これを平均的に分布しているとして、注入の前期と、注入の後期の各々数本の湧水を基にして、透水係数を計算し、地盤がどれだけ注入により止水されたかを判定してみる。龍飛に於ては、注入に先立ち前方を精確に予知し、注入の方針を立てるためにさぐり孔（S孔と呼んでいる）、注入終了前にチェックのためにチェック孔（O孔と呼んでいる）を削孔注入している。このS孔とO孔を夫々岩盤の注入前、注入後の状態とみなし、この湧水量を用い、Muskatの公式を用いて透水係数を計算したものが表一である。

表一 注入削孔湧水による透水係数の比較

位置	岩質	S孔 1/分	O孔 1/分	K cm/sec	K' cm/sec	K'' cm/sec	注入量 M ³
794	玄武岩	11.9	2.31	1.97×10^{-4}	3.79×10^{-5}	2.37×10^{-5}	127
811	"	3.47	1.72	5.60×10^{-5}	2.79×10^{-5}	2.19×10^{-5}	16
826	"	6.54	0.80	1.03×10^{-4}	1.25×10^{-5}	7.63×10^{-6}	34
872	石英粗面岩 玄武岩	2.90	1.92	4.29×10^{-5}	2.84×10^{-5}	1.99×10^{-5}	19
894	"	9.91	2.26	1.42×10^{-4}	3.26×10^{-5}	1.99×10^{-5}	49
902	"	4.60	0.06	6.22×10^{-5}	8.11×10^{-7}	4.68×10^{-7}	126
961	安山岩	5.83	0.25	7.69×10^{-5}	3.30×10^{-6}	1.91×10^{-6}	32
985	"	9.60	2.03	1.23×10^{-4}	2.61×10^{-5}	1.58×10^{-5}	56
1005	"	8.48	1.13	1.06×10^{-4}	1.42×10^{-5}	8.36×10^{-6}	137
1021	玄武岩	4.14	0.14	5.18×10^{-5}	1.75×10^{-6}	9.96×10^{-7}	155
1067	安山岩	6.40	2.00	7.56×10^{-5}	2.36×10^{-5}	1.44×10^{-5}	88
1090	"	1.06	0.19	1.22×10^{-5}	2.19×10^{-6}	1.24×10^{-6}	32
1132	安山岩 玄武岩	4.59	0.27	5.08×10^{-5}	2.99×10^{-6}	1.70×10^{-6}	68
1175	安山岩	17.4	0.97	1.89×10^{-4}	1.03×10^{-5}	5.81×10^{-6}	69
1200	"	2.97	1.89	3.07×10^{-5}	1.95×10^{-5}	1.29×10^{-5}	54
1217	"	8.49	1.47	8.71×10^{-5}	1.50×10^{-5}	8.71×10^{-6}	186

（注） K, S孔による透水係数

K', O孔による平均透水係数

K'', 注入範囲を7.5Mとした時の注入範囲内の透水係数

$$K = \frac{1n(2h/r_0)}{2\pi(H+h)Q} \quad K = \frac{1n(2h/r_0)}{2\pi(H+h)Q} \quad K' = \frac{1n(r_1/r_0)}{2\pi(H+h) - \frac{1n(2h/r_1)}{K}}$$

Q, S孔の単位長さ当り湧水量 r_0 , 掘削径 H, 水深 h, 土被り
Q', O孔の単位長さ当り湧水量 r_1 , 注入範囲

表一3より透水係数の改良と地質、注入量との相関性は見出せないが、注入域に於ては、 1×10^5 cm/sec 程度に改良していることが分る。現在の注入基準ではO孔の湧水量が $2\frac{1}{4}$ 分/m以下なら注入終了としているが、この間は1200M付近では 1.4×10^{-5} cm/sec に相当し、斜坑掘削時の湧水量は約6分/mになる。現在の斜坑の湧水量より区間別の透水係数を計算してみると表一4になる。この値

表一4

区 間	湧水量	透水係数
M ~ M	1/分	cm/sec
825~983	3.6	2.48×10^5
983~1178	4.1	2.40×10^5
1178~1280	7.5	3.64×10^5

は表一3に比べ透水係数が増加しているが、これは掘削により生ずる地山のゆるみによるものと思われる。従つて地山のゆるみを考えて注入範囲を決めることは勿論であるが、地山のゆるみを生じないような掘削方法を採用することが必要であるが、その点でもトンネルボーリングマシンの意識は大きいものと思つてゐる。

以上述べてきた通り、湧水に関しては一応透水係数を目安にすることにより注入効果の判定はある程度可能であるし、将来の湧水量の予想も大体見当がつく。又S孔、O孔に対する電気検層によつても割目の充填の度合等はある程度判定できる。一方の強度に関しては、1220M付近断層突破の際、地圧の目安にするために(1)式を用いた。これは注入域が塑性安定化するのに必要な支保反力を求める式である。そして注入範囲と支保反力との関係を求め下の結果を得た。(1) $\sigma = -C \cot \phi + (C \cot \phi + P)(\frac{R}{a})^K$ $K = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi}$

R/a	2	4	6	8
$\frac{t}{M^2}$	75	19	8	5

σ , 支保反力

C, 粘着力 (0と仮定)

ϕ , 内部摩擦角 (30°と仮定)

R, 注入半径

a, 掘削半径 (導坑加背2M×2M)

P, 岩盤の潜在地圧 (60 kg/cm^2 とした)

そして掘削、注入の施工上から R/a を4とし安全をみて10Mの注入をして掘削をした。掘削に先立ちパイプ歪計を導坑周辺に埋込み掘削の際の予知の手段としたが、不慣れのためと悪条件下ということで疑問点も多く、まだ実用的でない。

掘削時には支保工に直視歪計を取付けたが変位はなく掘削にあたつても荷はかからなかつた。覆工、インバートにも測定器を取付け、現在測定検討中である。

あとがき

これからの工事に於てまだまだ火山岩帯、そして高圧湧水を伴う断層破砕帯を通らなくてはならない。今迄の経験でこれらの地質注入で突破する自信は出来たが、まだ定性的でカンに頼る部分が多い。今後はこの注入を確実に、しかも能率的に実施するための工法、判断方法を定めていかななくてはならない。これからも広範囲の方々から御指導と助言をいただいてこの問題に取り組んで行きたいと思つてゐる。

Water Seal Grouting In Seikan Tunnel

Seikan Tunnel Research Office Yokoyama Akira

° Inoue Toshio

At Honshu side a inclined shaft is excavating through volcanic rocks such as andesite, basalt and liparite. Its length is 1335 meter and grade is $\frac{1}{4}$ grade. Much water come out from fissures, basalt and faults. Since 295M from portal of inclined shaft we can not excavate only a meter without water-seal grouting as we supposed.

The basical formations in this area are tuff-breccia and andesite. And into these formation relatively young volcanic rocks, such as basalt and liparite intrude. Rocks we excavate are tuff 37%, andesite 47%, basalt 9% and liparite 7%.

Key points in Seikan undersea tunnel are how to prevent the coming out water according to rocks. In case of simple fissure in andesite, we can seal come out of water by only cement grouting and after excavate we left a little water. And this case we care only water-seal grouting. For relatively large fissures we use cement grouting method and for small we use cement-water glass method, which has better permeability. In case of basalt and affected basalt we use cement water glass and enlarge the grouting zone. But after excavating much water come out. Most difficult case is claied parts, because this part is very difficult to grout so we use chemical grouting material, which have low viscosity and must to grout two or three step grouting method so as to grout well in clay parts. And high grouting pressure (static water pressure + about $55 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$) is necessary to consolidate.

We judge the effect of grouting by coefficient of permeability and use it we can estimate how much water comes out. We can improve the permeadility of rock from $1 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ to $1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$.

But yet now we have no formula to decide grouting zone and to judge strength of grouted zone. We think we must find these formula and improve grouting methed, which is more practical and economical.