

注水試験による岩盤の評価と注入計画

正 員 北 川 修 三

1. ま え が き

青函トンネル本州方では、全作業日数に対して注入日数の占める割合は50%近くにも及んでおり、注入作業の能率が青函トンネルの工期の鍵を握っているといつても過言でない。

注入作業を能率化するうえで大きな問題は、注入材料の選択、注入圧、注入量の適正化、注入範囲の適正化等があるが、これらはいずれも注入対象となる地山そのものの性質に左右される面が多い。そこで、地山の性質を把握するために行なつた注水試験結果から、いくつかの能率化の措置がなされ、比較的良好の結果が得られたので、その内容について報告する。

2. 岩盤に対する注水試験と注入実績

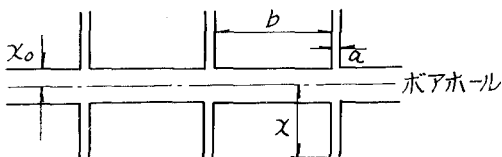
(1) 仮想岩盤に対する注水試験

青函トンネル本州方では、一般に火山岩の分布が著しく、その生成時期の急冷却によつてできた節理が海水の浸透を許し、岩盤の良好な場合でも注入のためにさつ孔したボアホールから烈しい湧水をみる事がしばしばある。凝灰岩のような火山砕屑岩であつても、溶結作用を受けている場合には同じような現象がみられる。

こうした亀裂岩盤に対して注水試験を行なう場合を考察するにあたり、問題を簡単にするために次のような仮想岩盤を想定した。すなわち、図-2-1に示すように、円形ボーリング孔に直交し等間隔に亀裂のはいつた岩盤に注水試験を行なつた場合を考える。

x : 亀裂中の任意点の、ボアホール中心からの離

図-2-1 仮想岩盤



れ

x_0 : ボアホールの半径

a : 亀裂の平均開き幅

b : 亀裂の平均間隔

P : 位置 x における有効水圧

η : 水の粘性係数

R : 亀裂の径深 $[=1/2(a+bP/E)]$

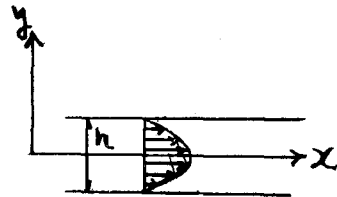
g : 1つの亀裂の単位幅における流量

Q : 1つの亀裂の全流量

亀裂への注水量を100/min程度とすれば、亀裂中の水の流れは層流として扱つて差しつかえない。

一方間隔 b の平行平板の間を流れる層流が x 方向に流速の変化がない定流とすれば、流量 g は次式で表わされる。

図-2-2 平行平板の間を流れる局流



$$g = \frac{b^3}{12\eta} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} \dots\dots\dots (2-1)^{(1)}$$

ボアホールから放射状に流れる水は、上記の条件を満足しないけれども近似的には(2-1)式は成り立つ。そこでボアホール中心から半径 x の円周での全流量 Q は

$$Q = \frac{\pi x}{6\eta} \left(a + \frac{b}{E} P \right)^3 \frac{\partial P}{\partial x}$$

境界条件 $x = x_0$ で $P = P_0$ 、 $x = x$ で $P = 0$ として解けば

$$Q = \frac{\pi E a^4}{24 b \eta \log \frac{x_1}{x_0}} \left\{ \left(1 + \frac{b}{a} \frac{P_0}{E} \right)^4 - 1 \right\} \dots\dots\dots (2-2)^{(2)}$$

(2-2)式は水圧によつて岩盤が押し縮められ、亀裂幅が大きくなるとして解かれたものである。亀裂幅が開かれる量は $E = 1 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ (本州方の凝灰岩の値) $b = 20 \text{ cm}$ 、 $P = 25 \text{ Kg/cm}^2$ として、 $bP/E = 5 \times 10^{-3} (\text{cm}) = 50 (\mu)$ となるが、この程度では注水にほとんど響いてこないと考えられる。亀裂幅と注水量の関係をみる場合、(2-2)式ではわかりにくいので、圧力による径深の変化がないとして考えれば ($b/E \rightarrow 0$)

$$Q = \frac{\pi a^3 P_0}{6 \eta \log \frac{x_1}{x_0}}$$

依つて

$$a^3 = \frac{6 \eta \log \frac{x_1}{x_0}}{\pi} \left(\frac{Q}{P_0} \right) \quad \text{となる。}$$

ここで、 $\eta = 1 \times 10^{-2} \text{ dgm} \cdot \text{s/cm}^2$ 、 $x_0 = 3.5 \text{ cm}$

x_1 : 海底に出たところで有効圧力が0となると考えられるので、 x_1 は $100 \text{ m} \sim 200 \text{ m}$ となる。

$x_1 = 100 \text{ m}$ の時 $\log x_1/x_0 = 7.96$

$x_1 = 200 \text{ m}$ の時 $\log x_1/x_0 = 8.65$

依つて $\log x_1/x_0 \div 8$ として差しつかえないだろう。

$$\therefore a^3 = 2.6 \times 10^{-6} \frac{Q}{P} \dots\dots\dots (2-3)$$

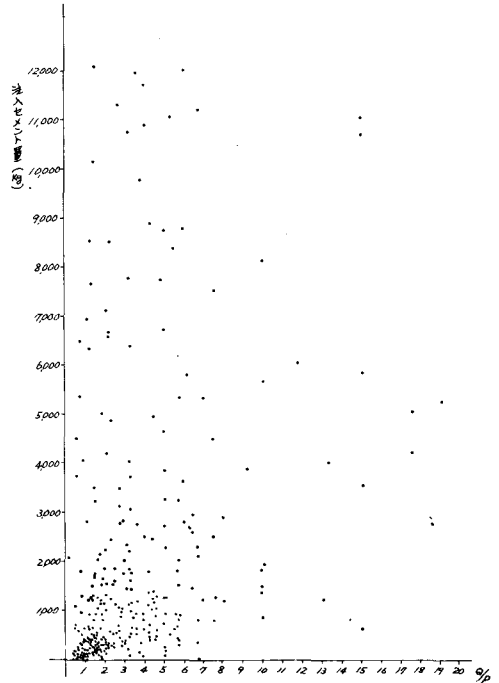
(但し、 P は Kg/cm^2 Q は l/min)

(2-3)式によれば、注水量 Q は注水圧 P に比例し、亀裂幅 a の3乗に比例することがわかる。

(2) 亀裂注入の実績と注水試験

図-2-3は、確実に亀裂注入と考えられた過去の注入実績から、注水試験での Q/P とセメント注入量との関係をみたものである。これによれば注入量と Q/P とはほとんど相関はなく注入量はあたかも亀裂幅とは無関係であるように見える。しかし各図において共通していることは Q/P が2以下では注入量が特に少なく、 750 Kg 以下に集中していることである。これは Q/P が2以下になると急にセメント粒子が亀裂を閉塞しやすくなるためであると解釈される。(2-3)式は湧水量がそれ程多くない場合には湧水量と湧水圧の関係としても成り立つ。そこで Q/P が2になる湧水量、すなわち湧水圧が 25 Kg/cm^2 だから湧水量 50 l/min 程度のボアホールでは湧水箇所がたいてい一ヶ所しかないので、注水試験の対象となる亀裂が一ヶ所しかないとしてその亀裂幅を計算すれば、 $a = 0.17 \text{ mm}$ となる。

図-2-3 注入量と注水試験の関係
(本州方先進導坑第7・8・10・11・12回注入)



Kennedy T.B.によれば、割目幅と粒径の比が3以上であれば注入可能としている。現場で使用したコロイドセメントの最大粒径を 40μ として注入可能な最小割目幅を出せば、 0.12 mm となる。しかしコロイドセメントは安定性に乏しいために、現場では普通セメントよりも浸透性がよくないというデータが、青函トンネル龍飛試験室より出されている。そこでちなみに普通セメントの最大粒径 80μ から注入可能な最小割目幅を出せば 0.24 mm となる。このようなことから、 Q/P が2以下になると、セメント粒子は亀裂を閉塞しやすくなり、その先への浸透をはばまれて、止水効果が急激におちると結論できるだろう。

以上のように、青函トンネル本州方でみられる火山岩や溶結凝灰岩にはセメントミルク注入の限界に近い $0.1 \sim 0.3 \text{ mm}$ 程度の亀裂が多いと考えられ、止水には非常に高圧の注入 ($80 \text{ Kg/cm}^2 \sim 90 \text{ Kg/cm}^2$) を必要とした。そのためグラウトの亀裂への均一な充填はなされにくく、セメントミルクは最弱線に集中して遠方へ流失してしまう可能性が大きいと考え

られる。こうした状態になると、多量のグラウト量のわりには止水効果ははかばかしくなく、注入工期は非常に長いものとなつた。

こうしたことから、青函トンネルでは、昭和46年10月頃からそれまでの主流であつたセメントミルク注入にかわつて、1号水ガラスを使つたLW注入を本格的に導入した。LW注入のグラウト材料は、水ガラスセメントミルクの2液から構成されており、やはりセメント粒子を多量に含んでいる。しかし、実際に注入されると、水ガラスセメントミルクの上澄みの混合液とセメント粒子との分離が起り、混合液中のセメント粒子分は非常に少なくなるため、非粒子性の注入の性格を多分にもつている。このことが狭い亀裂の止水にかなりの効果をあげるものと期待された。

(3) 破碎帯での注水試験と注入実績

a) 変圧注水試験

岩盤に対する注水試験において、注水圧を除々にあげていくと、注水量も圧に比例して増加する。しかし、ある圧以上になると、注水量は急激に増加しだし注水圧とは比例しなくなる。このような現象は、地山が注水圧によつて破壊されるために起こるものとされ、ダムサイトでの注入等では、よく行なわれているものである。しかし、トンネルでの注入では、地山の破壊とか構造物への注入の影響といった問題は、比較的省みられることが少なかつたため、このような注水試験はほとんど行なわれなかつた。

青函トンネルでは、先進導坑での注入において地山の破壊が注入量の増大を招いていると考えられる事態が発生したため、この変圧注水試験を数回にわたつて実施した。

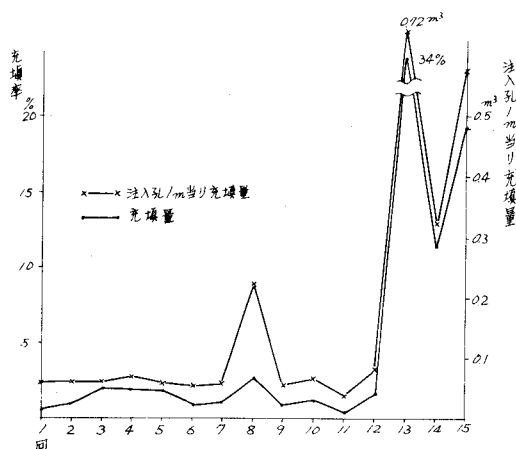
b) 破碎帯注入の実績と変圧注水試験

先進導坑第13、14、15、16回注入において対象となつた地山は、それまでの亀裂岩盤とは異なり、かなりの破碎部をもつた貫入岩であつた。地質は全体としては幅140mくらいの流紋岩の岩脈で、それをさらに粗粒玄武岩が何本も貫いていた。流紋岩は柱状節理の発達が著しいが、岩そのものの変質はほとんど受けていない。しかし、粗粒玄武岩は変質粘土化が著しく、手でも堀り起こせるような箇所が随所に見られた。

この時の注入は、それまでの注入と様相を一変した。図-2-4は先進導坑第1回～15回注入

での注入実績である。

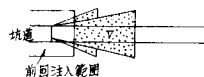
図-2-4 本州方先進導坑第1回～第15回注入での充填量



注-1 充填量は次の様な換算を行った。

LW注入は注入量の100%
素液注入は注入量の30%
セメント注入はセメント1500kg/m³とする。

注-2 注入対象地山量とは下図のVの値である。

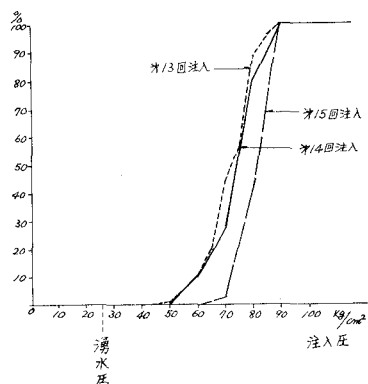


注-3 充填率 = $\frac{\text{充填量}}{\text{注入対象地山量}} \times 100$

これによれば、先進導坑第1回～第12回注入においては、充填率、注入孔1m当り充填量ともほぼ似たような値となつており、平均すると、前者においては1.3%後者においては0.06 m³/mとなる。ところが第13回注入以後は、注入量が非常に多くなつて、充填率においてはそれまでの、10～26倍、注入孔1m当り充填量においてはそれまでの5～12倍にも及んだ。これ程のグラウトがどうして注入できたか、またこれ程の注入量が必要だつたのかという問題は今後の注入計画において非常に重要である。以下にこの問題に対する若干の考察を述べる。

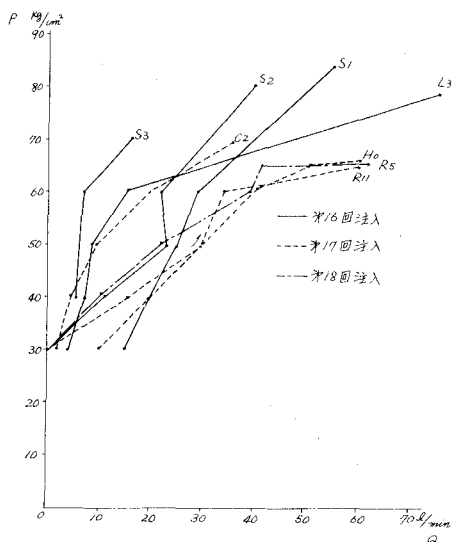
図-2-5は注入圧力とグラウト量の関係を示したものである。これによれば、流紋岩中の破碎帯にはいつてからの注入では注入圧60 kg/cm²以

図-2-5 注入量累加曲線



下ではグラウトはほとんどはいらないが、 60 Kg/cm^2 以上になると急にはいり出し、注入量の90%以上が 60 Kg/cm^2 以上の圧で注入されていることがよくわかる。この時の岩盤状態は、粘土化した所が随所にあり、湧水はそれまでの岩盤よりずつと少なかったため、このようなグラウトはもともとあつた亀裂を充填したものではなく、むしろ亀裂を作りながらはいつていつたものと思われた。そこで、こうした地山の破壊がどれくらいの注入圧で起るかを調べるために、先進導坑第16、17、18回注入において前述の変圧注水試験を行なった。その結果を図-2-6に示す。

図-2-6 変圧注水試験



これによると、スライム等が亀裂につまつて圧の上昇にもかかわらず注水量が減少しているケースもあるが、一般に注水圧が 60 Kg/cm^2 になるまでは注水圧と注水量は比例関係にあり、それ以後注水量の急増が認められる。こうしたことからこの時注入対象となつた地山は注入圧 60 Kg/cm^2 程度で破壊を起こしているものと考えられた。

3. 注入基準の設定

a) 最終注入圧の設定

先進導坑第13回～第15回注入の施工の良否は注入後の堀削でほぼ結論が出された。すなわち無い亀裂をむりやり作るほどの注入圧は必要ではなかつたし、従つて注入量ももつと少なくとも止水は十分可能であつたと考えられるからである。しかし、一度で次のような疑問が出された。それは今度のような最初から破碎されているような地山では、むしろ高圧注入によつて圧密が進み、地山強度の改良になつていないのではないかという問題である。この問題に関しては現在青函トンネル龍飛試験室にて実験中であるが、実験結果からみる限りでは高圧注入による地山の改良はかなり成されるようである。しかし圧密をおこすほどの注入となると、注入切羽や既掘削部への悪影響が十分考えられること、また今回あれ程の注入量にもかかわらず掘削中の切羽視察では圧密による地山の改良がほとんど考えられないこと等から実際の施工においては圧密による地山の改良はほとんど期待できないと思われる。

こうしたことから先進導坑の第16回注入以後一応最終注入圧を 75 Kg/cm^2 に設定した。この値は前述の変圧注水試験や注入量累加曲線からすれば若干大きい値となつてはいるが、それでも注入量は大幅に減少し、工期もかなり短縮できるものと期待される。

b) 一孔当り最大注入量の制限

青函トンネルでの注入の施工においては、注入効果の良否を注入量の多少で判断する傾向が強かつた。こうした考え方は、グラウトがよくはいらない場合には、はいるようになるまで注入圧をあげていくという現象を招き、結局本州方先進導坑第13回～第15回注入のような事態を引き起こした。そこで、前述の最終注入圧という基準を維持するためには、注入量そのものにも規制を加え、ある程度以上の注入量は必要がないという具体的な数字を示すことが要求される。

図一2-5によれば、本州方先進導坑第1回～第12回までの注入は各回とも比較的同じような状況を呈しており、しかも止水にほぼ成功し、掘削においても問題はなかった。そこで、一応この注入実績を注入量制限の目安とした。1孔当り注入量制限の要旨は次の通りである。

注入孔1m当りの充填量は各回注入とも比較的似かよった値となっており、平均すると $0.06\text{ m}^3/\text{m}$ である。この値は掘削状況から判断すれば十分量であると思われるが、各注入孔の多様性を考慮して安全率を4倍とり、注入孔1m当りの最大充填量を $0.24\text{ m}^3/\text{m}$ とする。

この基準をさつ孔長30mの注入孔でLW注入を行なう場合で考えれば、 $0.24\text{ m}^3/\text{m} \times 30\text{ m} = 7.2\text{ m}^3$ が注入量の制限値となる。

このようにして一孔当り最大注入量の基準を設定したが、この値についてはそれ程確実な理論的根拠

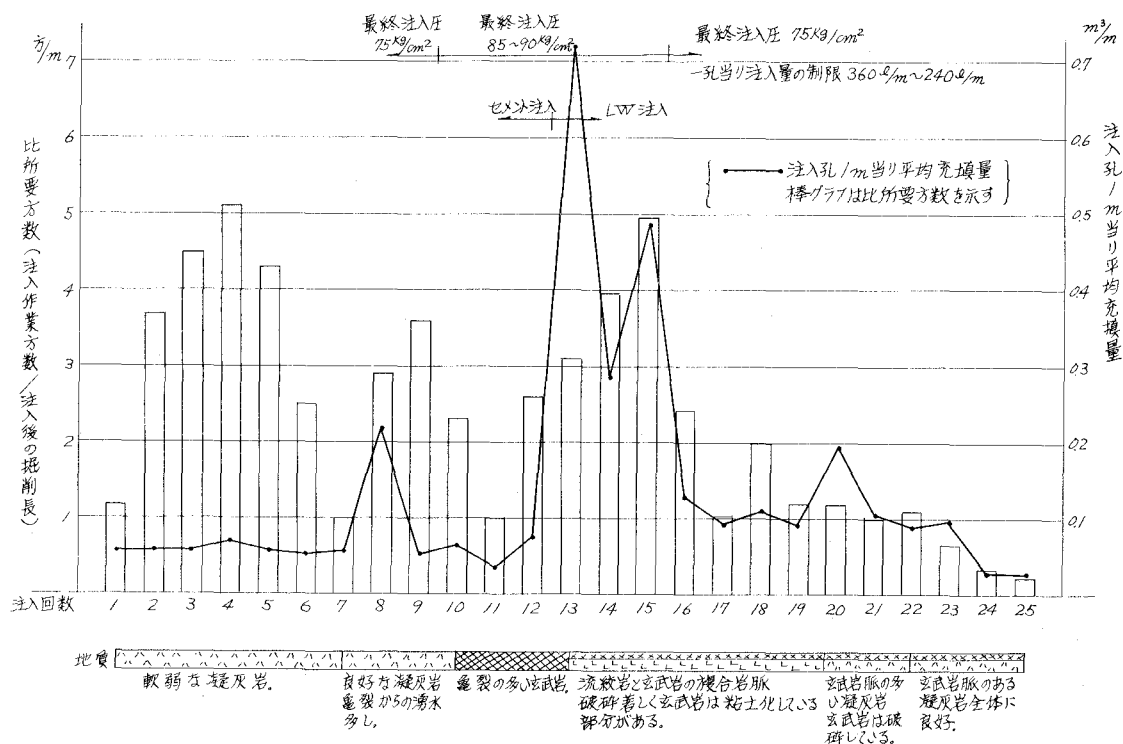
はなかった。ただ一孔当りの注入量が 100.000ℓ とか 200.000ℓ にもなるのは無益であり、せいぜい 100.000ℓ もあればその孔は注入孔としての任務を十分果しているだろうことは、グラウトの到達距離等から判断される。そしてこの基準設定後の注入実績と止水効果から、この問題に関してさらに検討を加えていく方向で、第16回注入以後一孔当り注入量を制限するこの基準が採用されたのである。

4. あとがき

注水試験ならびに注入実績を検討して取られた注入作業能率化の各措置は、第16回注入で一応完了した。

その実績は期待通りのものであったが、その分析は後日にまわし、一応図-4-1にその実績を示すにとどめる。

図-4-1



参考文献

- (1) 本間 仁、安芸皎二編 物部水理学
- (2) 進藤一夫 訳 J、タロブル 岩盤力学