

日本鐵道建設公団東京新幹線建設局 正員 小林素一

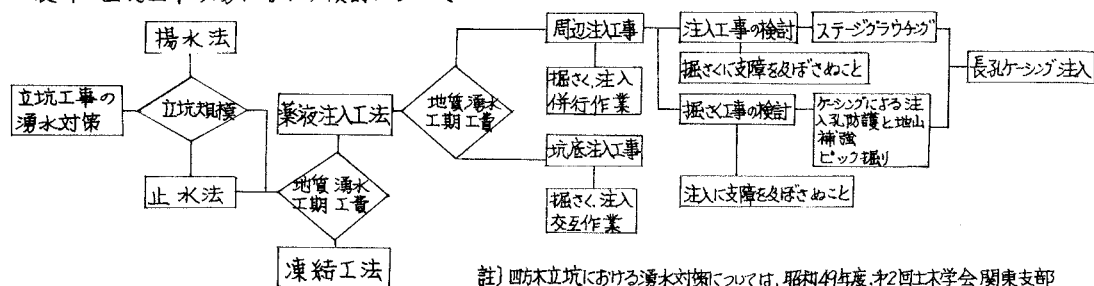
1.はじめに

上越新幹線中山トンネル工事は、主に固結度の低い火山泥流より構成される地盤内を掘り進んでいるが、この泥流中の粗粒部分は、帯水層となっており、土被りの厚い地区においては、地下水位が高い位置にあるため、工事の進捗には、膨大に被圧された地下水の処置が問題となっている。今回はその中で、四方木立坑において実施された「立坑」の特徴を生かした長孔注入工事について報告するものである。

2. 工事に伴う湧水対策

四方木立坑は、全長372mの作業用立坑としては、前例の少ない長大立坑工事であるが、掘さくに際しては、工事対象地盤の大半が岩とは程遠い固結度の低い中に、地下水が膨大に被圧されているため、地山自身の自立性が低く、周辺部の止水と地盤補強が要求され、湧水処理が工事工程にひじょうに大きな影響を及ぼしていた。工事は、地下水に遭遇以来、坑底注入を実施してきたが、表-1のような検討結果から、工事の後半は、最終的には、立坑周辺部からの止水、補強注入工事を先行しながら、立坑掘進を行おうとするケーシング注入方式による立坑周辺注入工事を実施することとし、周辺からの注入不足が判定された場合においては、坑底からの補強注入を実施することにした。

表-1 立坑工事の湧水対策の検討について



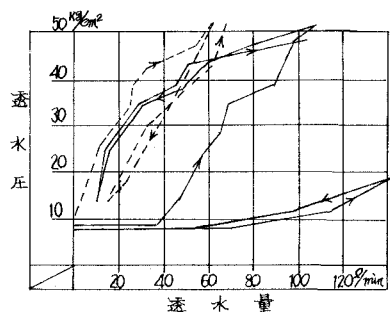
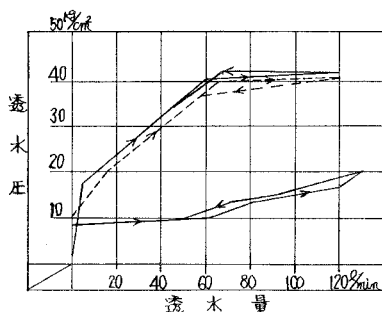
註) 四方木立坑における湧水対策については、昭和49年度、第2回土木学会 関東支部講演会にて報告してありますので、参照していただきたい。

3. ケーシング注入方式による周辺注入工事の施行結果

工事は、図-1の透水試験結果に示すように、注入対象地盤が不均質であることが予想され、地下水は膨大に被圧されているため、土粒子間隙に入っているある水頭を持った水をしばらく出しながら注入しなければならなかったため、各回の注入状況の傾向は、図-2に示すように、高圧の注入圧、及び時間当たり注入量の制限の基に、浸透性の

良い注入材料が要求された。このような状況下における長孔ケーシング注入を実施するにあたっては、注入材料、注入方法、注入機器においても、表-2に示すような検討結果にあった。

図-1 透水試験傾向について(註、下記結果は段階透水試験によるものである。)



高压2液注入を効果的に実施するに、岩盤注入においてエキスパンションラバーパッカーが多く用いられているが、今回の長孔注入を確実に実施するには、注入材料を、注入管内において可能な限り単液のまま搬送し、パッカー先端部にて混合させる2重管式2ショット方式注入管及びパッカーの開発を行い導入し、又グラウトポンプにおいても、高压、低吐出量、2液の混合比率の管理が可能なポンプを用いることにした。

このような検討結果に基づき、工事は実施されたが、実施状況の詳細は、図-3に示すとおりである。

表-2 注入方法の検討について

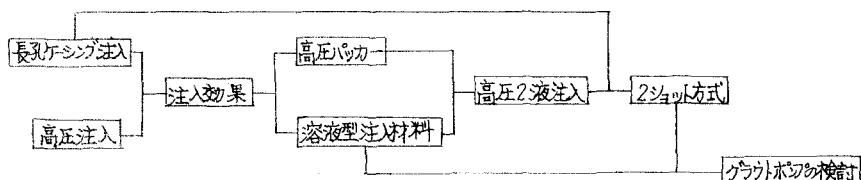
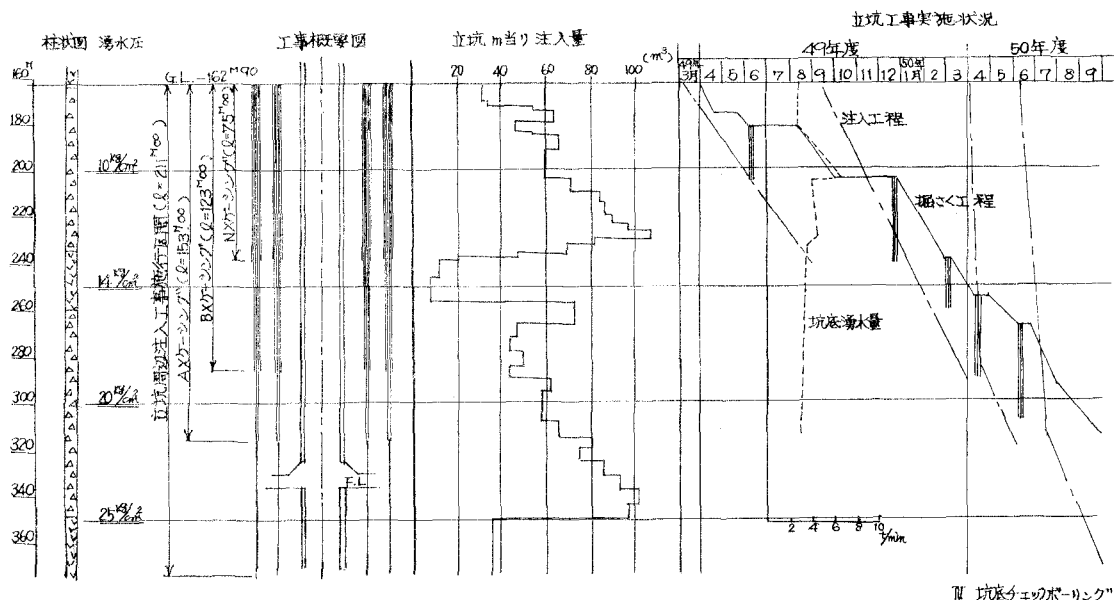


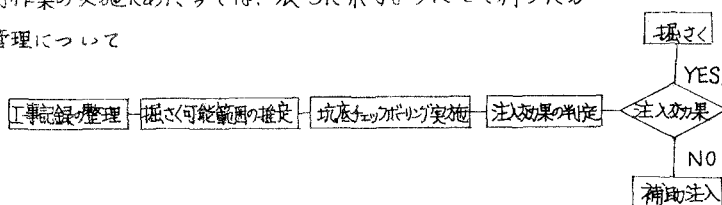
図-3 立坑周辺注入工事(ケーシング注入方式による)実施状況について



4. 注入効果の判定と湧水量の想定について

「止水」「掘進」の並行作業の実施にあたっては、表-3に示すようにして行ったが

表-3 工事の管理について



この場合において、坑底チェックボーリングの本数、長さ、及び施行結果からの掘さく時の湧水量の想定が重要になるが、これらについては次のような検討を行い実施した。

4-1 坑底チェックボーリング施行時の湧水量の処理法に対する一指針

坑底から、同一条件で穿孔した注入孔の集団において、
 ｲ) 湧水量の分布は正規分布する。
 ｵ) 確率的に少ないと考える範囲を5%とする。
 ｴ) 平均湧水量とその標準偏差には比例関係がある。 $\sigma = K\bar{Q}$ (σ : 標準偏差、 $\bar{Q}$: 平均湧水量)
 という仮定に基づき検討すると、仮定ｲ)より、正規分布と仮定できる n 本のチェックボーリングを実施した時の標準偏差は、 $\sigma_n = \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}$ で表わすことができる。

又、仮定ｵ)より確率的に通常おこる範囲を5%と仮定できるので

$$\bar{Q}_{00} - 1.65 \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}} \leq \bar{Q}_n \leq \bar{Q}_{00} + 1.65 \frac{\sigma_0}{\sqrt{n}}$$

仮定ハ)より

$$\bar{Q}_{00} \left(1 - 1.65 \frac{K}{\sqrt{n}}\right) \leq \bar{Q}_n \leq \bar{Q}_{00} \left(1 + 1.65 \frac{K}{\sqrt{n}}\right)$$

$$\frac{\bar{Q}_n}{1 + 1.65 \frac{K}{\sqrt{n}}} \leq \bar{Q}_{00} \leq \frac{\bar{Q}_n}{1 - 1.65 \frac{K}{\sqrt{n}}}$$

この $\bar{Q}_{00}$ がチェックボーリングで求めたい湧水量であるが、仮定ハ)の関係は、実績から $K=1$ とみることができるので

$$\frac{\bar{Q}_n}{1 + \frac{1.65}{\sqrt{n}}} \leq \bar{Q}_{00} \leq \frac{\bar{Q}_n}{1 - \frac{1.65}{\sqrt{n}}}$$

$$K_1 = \frac{1}{1 + \frac{1.65}{\sqrt{n}}} \quad K_2 = \frac{1}{1 - \frac{1.65}{\sqrt{n}}} \quad \text{とすると}$$

$$K_1 \bar{Q}_n \leq \bar{Q}_{00} \leq K_2 \bar{Q}_n \quad \text{となる。}$$

この結果は、図-4のとおりとなるが、 n が増加するほどに K_1 、 K_2 は1に収束することが解る。この結果から判断すると、

- ｲ) $n \leq 2$ の場合は、その平均値 $\bar{Q}$ はほとんど意味を持たない。
- ｵ) $n \geq 8$ の場合は、 K_1 、 K_2 、 K_1 の変化は少なくなる。

このことより、坑底からのチェックボーリングの実施は、掘さく可能範囲区間において8孔行うことにした。

4-2 掘さく時の湧水量の想定について

注入工事を実施した場合、最終注入孔、チェック孔の湧水量と、掘さく時の坑底湧水量の間には、四方木立坑の実績として、

$$\text{掘さく時坑底湧水量} = \text{最終注入孔湧水量} \times 10 \text{ 倍} \sim \text{チェックボーリング孔湧水量} \times 25 \text{ 倍}$$

と提示されているが、現在の地山性状、施行法に限定した条件で、若干の水理学的解析を行い、坑底湧水量の推定式を求めてみたが

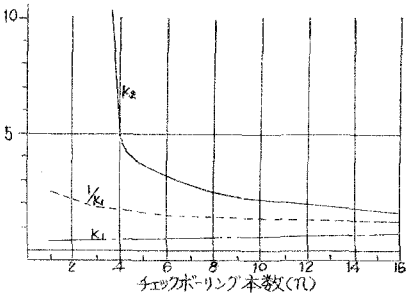
- ｲ) 注入改良前の地山は、水平方向に均一である。
- ｵ) 坑底附近の地山の自然水位は、ボーリング孔の最大水圧の水頭と等しい。
- ｴ) 地山からの湧水状況から判断して、注入改良前の地山水平方向の透水係数は、垂直方向の透水係数より10倍と仮定する。
- ｵ) 立坑湧水、孔内湧水に時間的な変化はない。即ち定常状態を対象とする。

という仮定条件を基に、トンネルからの湧水の推定に好結果を得ている透水係数の推定方式の、J F T 試験(米陸軍水路実験部の式)を用いると、透水係数は①式で表わされる。

$$kR = Qb \frac{\ln \left[\frac{2mH}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{2mH}{r} \right)^2} \right]}{2\pi H H_0} \quad \text{----- ①}$$

但し σ_n : チェックボーリング n 本の標準偏差
 σ_0 : 無数にボーリングした場合の標準偏差
 n : チェックボーリングの本数
 $\bar{Q}_n$: チェックボーリング n 本の平均湧水量
 $\bar{Q}_{00}$: 無数にボーリングした場合の平均湧水量

図-4.



H: 坑底ボーリング孔長 Q_b: 坑底ボーリング孔からの湧水量

k : 注入改良範囲の透水係数
 K : 注入改良範囲外の透水係数
 $K' \gg K$

注入改良範囲
 カベロウ下下面
 H_0
 H
 x
 dx
 K
 K'
 L
 D
 L
 $k_w H_0$ 水圧
 $\gamma_w (H_0 + x)$

註※:この範囲は、地下水の流路

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q &= K \cdot i \cdot \Delta S \text{-----} \textcircled{2} \\ \Delta S &= dx \cdot \pi \cdot (D+L) \text{-----} \textcircled{3} \\ i &= (H_0 + x) \text{-----} \textcircled{4} \end{aligned} \right\} \Delta Q = K \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{D}{L}\right) (H_0 + x) dx \text{-----} \textcircled{5}$$
$$Q = \int_{x=0}^{x=H} K \cdot \pi \cdot \left(1 + \frac{D}{L}\right) (H_0 + x) dx$$

$$= K \cdot \pi \cdot H \cdot H_0 \cdot \left(1 + \frac{D}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{H}{H_0}\right) \dots \textcircled{6}$$

1. 6式より

$$Q_s = k \cdot \pi \cdot H \cdot H_0 \cdot \left(1 + \frac{D}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{H}{H_0}\right) = \frac{1}{2} \ln \left\{ \frac{2mH}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{2mH}{r}\right)^2} \right\} \left(1 + \frac{D}{L}\right) \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{H}{H_0}\right) \cdot Q_b \quad \text{となる。}$$

工事は、以上のような検討資料を基に、掘さく時の湧水量の想定することにより、今後の立坑掘進が可能かどうか判定の上、実施してきたが、チェックボーリング実施時においては、湧水圧を測定することも重要なチェックポイントであった。

このようにして、地質的に恵まれぬ被圧地下水下における長大立坑は、各々の湧水処理法により、工期的にはかなりの遅れを生じているが、最近においては、湧水によるトラブル(異状出水、周壁部の崩壊)もなく、工事の終盤を迎えているが、地盤が岩とは程遠い固結度の低い中に、地下水が膨大に被圧されているため、地山自身の自立性が低く、立坑掘さくの際しては、周壁部の止水と同時に地盤補強が要求されてきたことから、注入工事の必要性が大きかった。この中で、四方木立坑において実施された立坑周辺注入工事の実施は、図-3に示すように立坑深度230^m以深において、注入工事が、掘さく工事にはほとんど影響を及ぼしてはおらず、工事工期は、その間坑底注入を実施するに要する日数だけ短縮できたという事になる。

しかし、このような注入工事としては前例のない施行区間長が210 mにも及ぶ長孔注入工事を実施するにあたっては、注入材料、注入機器、及び工事の総合的な施行管理の再検討が数回にわたり行われ、完全に成功したとは断言できないが、立坑工事においては、注入工事と掘く工事を併行して施行することが可能である。ということと、ケーシングを用いることにより、又ここにおいて新たに開発された2重管式2ショット方式注入管及びパッカーを用いることにより長孔注入工事が可能であることを実証したことは、意義ある工事であったと思う。