

鹿島建設技術研究所

坪井 直道

正会員 木島 詩郎

〃 〃 池上 政雄

〃 〃 ○中尾 努

I. はじめに

薬液注入の施工に際しては、薬液が計画範囲外に注入されたり、注入圧が高く地盤を隆起させたりする現象を生ずる事が多い。一般に注入圧は、注入材が地盤内に浸透して行く抵抗を示すものであり、(1)対象地盤の成層状況と帯水条件、(2)注入の方法(注入管の機構など)、(3)注入材の性質(粘性、ゲル化時間など)などによって大きく変化する。

この報文は、薬液注入の計画・施工に先立ち、事前に地盤の状態を充分調査して、既存の注入圧計算式に基づいて各土層の注入圧を算出し、この結果から注入される状態を推測し、さらに実際の施工時の注入圧ならびに注入状態を確認して、これらの推測と実測とを対比して検討を加えたものである。

II. 注入圧の計算式

1. 粘性土層に対する注入圧計算式

粘性土層へ注入される場合には、注入圧により孔壁にテンションクラックが発生し、このクラックから脈状に注入されるのが一般である。すなわち、図-1に示すように半径 r の範囲にテンションクラックを発生させる注入圧は(1)式で示される。また、孔壁に最初にクラックを発生させるに必要な注入圧は(2)式で示される。

$$P_i - P_0 = \frac{C r^2}{r_0^2} + f_0 \gamma_t Z \quad \text{----- (1) 式}$$

$$P_{cr} - P_0 = C + f_0 \gamma_t Z \quad \text{----- (2) 式}$$

但し、 P_i ：半径 r の範囲にテンションクラックを発生させるに必要な注入圧 (kg/cm^2)

P_0 ：地盤内の水压または空気圧 (kg/cm^2)

P_{cr} ：孔壁に最初にクラックを発生させるに必要な注入圧 (kg/cm^2)

C ：粘性土層の粘着力 (kg/cm^2)

r ：テンションクラックを発生させる範囲(半径cm)

r_0 ：注入孔の半径(cm)

f_0 ：静止土圧係数

γ_t ：土の単位体積重量 (kg/cm^3)

Z ：土被り厚(cm)

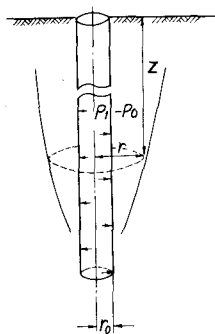


図-1 粘土層における
デシジョンクラックの発生状態

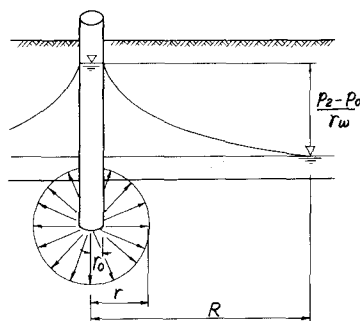


図-2 先端注入方法による浸透状態

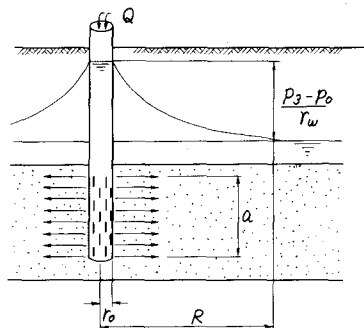


図-3 ストレーナ注入方法による浸透状態

2. 砂質土層に対する注入圧計算式

砂質土層へ注入される場合には、注入材が層流状態で粒子間に浸透するものとする。注入の方法としては、注入管の先端のみから注入する方法（先端注入方法—図-2参照）と注入管のある限定された範囲にストレーナを設け注入する方法（ストレーナ注入方法—図-3参照）とがあり、それぞれ注入圧は(3)式および(4)式で示される。

$$p_2 - p_0 = \frac{Q \gamma_w}{4\pi k_g} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{R} \right) \quad \text{--- (3) 式 (Maagの式)}$$

$$p_3 - p_0 = \frac{2.3 Q \gamma_w \log \frac{R}{r_0}}{2\pi k_g a} \quad \text{--- (4) 式 (Thiem式)}$$

但し、 p_2 : 先端注入方法による注入圧 (kg/cm^2) Q : 注入量 (cm^3/sec)
 γ_w : 水の単位体積重量 (kg/cm^3) k_g : 注入材の透過係数 (cm/sec)
 R : 影響半径 (cm) p_3 : ストレーナ注入方法による注入圧 (kg/cm^2)
 a : ストレーナ部の長さ (cm)

また、注入対象砂質土層に被圧地下水が存在する場合には、注入によって遠方まで被圧水圧が上昇し、この被圧水を排除して注入を行なうには高い注入圧を必要とし注入が困難となる。そこで筆者らは、被圧帯水砂質土層内に空気を圧送して、注入範囲に空気ゾーンを形成し、注入し易くする方法を開発したが、この方法による場合の注入圧は(5)式で示される。（図-4参照）

$$p_4 - p_0 = \frac{2.3 Q \gamma_w \log \frac{r}{r_0}}{2\pi k_g a} \quad \text{--- (5) 式}$$

但し、 p_4 : 空気圧送方法を用いた場合の注入圧 (kg/cm^2)
 r : 注入材の浸透距離 (cm)

ここで、注入施工に際し、上記空気圧送方法を用いた場合の注入圧と、用いない場合の注入圧との比を求めると(6)式となる。

$$\frac{(4)式}{(5)式} = \frac{p_3 - p_0}{p_4 - p_0} = \frac{\log \frac{R}{r_0}}{\log \frac{r}{r_0}} \quad \text{--- (6) 式}$$

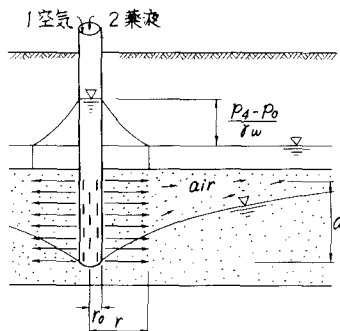


図-4 空気圧送注入方法による浸透状態

3. 層境に対する注入圧計算式

一般に各種土層の層境には水みちが構成されており、注入によって注入材が遠方まで走る場合が多い。この場合には、定量的には把握し難く、(4)式の k_g が非常に大きな値となると考える。

Ⅲ. 注入圧、注入状態の予測と実測との対比

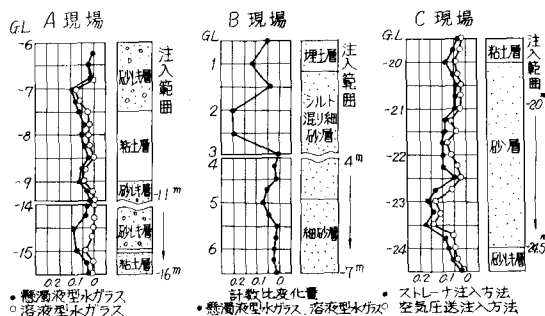
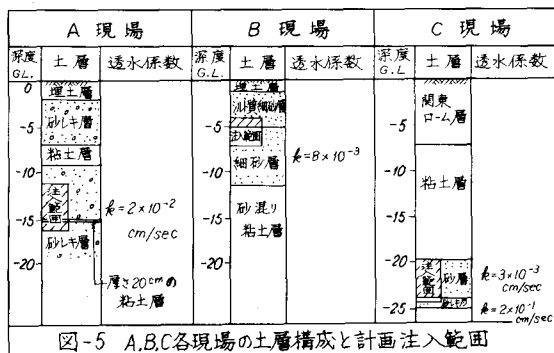
ここでは実際に注入工事を実施したA, B, Cの3現場における実績の一部について記述する。各現場の土層構成ならびに計画注入範囲は図-5に示すとおりで、いずれもシールド工事の補助工法として注入を行なったものである。各層への注入圧については、土層および地下水の状況、注入材の性質、注入の方法などを考慮して、Ⅱに記載した注入圧計算式を使用して算出した。なお下記の現場の実績ととりまじめ表-1に示した。

1. A現場の場合

注入対象土層は締った被圧帯水砂レキ層で、G.L.-15m付近に厚さ20cm程度の粘土層を挟み、この上部に水みちが構成されていた。この部分をまず懸濁液型水ガラスで処理するとして注入圧と計算すると約 1 kg/cm^2 となる。また砂レキ層に先端注入方法で浸透注入させるには 8 kg/cm^2 の圧力が必要とし、この圧力では地表面を隆起させるか、もしくは地上に注入材が湧出することが予測された。さらに溶液型水ガラスでは約 4 kg/cm^2 の圧力で均等に注入がなされると予測された。これに対して実績では、まず懸濁液型水ガラスを先端注入方法で注入し、対象地盤の周辺から順次内部に注入する方法をとったが、注入圧は周辺では 8 kg/cm^2 以下、中央部で次第に高くなり $8 \sim 10 \text{ kg/cm}^2$ に上昇し、地表面が隆起したので、溶液型水ガラスに切替え、 $4 \sim 6 \text{ kg/cm}^2$ の圧力で注入を終えた。中性子水分計による測定(ボウ素利用法-図-6参照)ならびにシールド掘進時の観察結果では、懸濁液型水ガラスは上記水みちおよび上部粘土層に注入されており、また溶液型水ガラスはほぼ目的の砂レキ層に均等に注入されていた。

2. B現場の場合

注入対象土層はG.L.-4m~-7mで、この上部1mはシルト質細砂層、下部は細砂層であり、またG.L.-1.2m~-5mには層境があっていずれも注水試験の結果透水性が大きい事がわかっていった。A現場の例と同じくこの層境は懸濁液型水ガラスで処理できるが、対象土層に先端注入方法で懸濁液型水ガラスを浸透注入させるには、計算の結果 13 kg/cm^2 の圧力が必要であり、土被り厚が5mしかないで当然地表面を隆起させるか、もしくは地上に湧出してしまふ事が予測された。一方、



注入現場	A現場 (活積層)	B現場 (沖積層)	C現場 (活積層)
注入範囲	10m × 10m × 5m	4m × 5m × 3m	10m × 10m × 4.5m
注入薬液	①懸濁液型水ガラス……空ゲキ、水みろ ②溶液型水ガラス……砂レキ層	①懸濁液型水ガラス……空ゲキ、水みろ ②溶液型水ガラス……シルシア系薬液……砂層への浸透	①溶液型水ガラス……空ゲキ、水みろ、砂層への浸透 ②アクリルアミド系薬液……砂層への浸透
注入量(ポンプ仕様)	12 ~ 24 (ℓ/min)	12 ~ 24 (ℓ/min)	12 ~ 24 (ℓ/min)
注入方法	先端注入方法	①先端注入方法 ②ストレーナ注入方法	①先端注入方法 ②ストレーナ注入方法 ③空気圧送注入方法
計算注入圧	層境への注入①P ₃ = 1 ℓ/cm ² 砂レキ層への①P ₂ = 8 ℓ/cm ² 浸透注入②P ₂ = 4 ℓ/cm ²	浸透注入①P ₂ = 13 ℓ/cm ² ②P ₃ = 1.5 ℓ/cm ²	浸透注入①砂層P ₂ = 27 ℓ/cm ² 、砂レキ層P ₂ = 7 ℓ/cm ² ②砂層P ₃ = 5 ℓ/cm ² ③砂層P ₃ = 3 ℓ/cm ² 初期7.7kg/cm ² P _{cr} = 4 ℓ/cm ²
実際の注入圧	①周辺部8 ℓ/cm ² 以下 中央部8~10 ℓ/cm ² ②4~6 ℓ/cm ²	①1~4.5 ℓ/cm ² ②0.6~4 ℓ/cm ²	①10~15 ℓ/cm ² ②5~6 ℓ/cm ² ③3 ℓ/cm ²
注入状態 観(①中注水の計 ②初期観察 ③後期観察)	①ほとんど層境あるいはかなり上部の 粘土層に浸透していた。 ②砂レキ層にかなり均等に浸透した。 ③②により調査	①大部分層境や粘性土層に注入されていた。 ②砂層に均等に浸透していた。 ③②により調査	①上部粘土層層境に注入、砂層には脈状に注入 されていた。 ②均等に注入されていた。 ③②により調査

表-1 試験結果一覧表

容液型水ガラスをストレーナ注入方法で注入すれば、計算注入圧は1.5 ℓ/cm²となり、この方法を採用することとした。これに対して実績では、まず懸濁液型水ガラスを注入したが、最初1 ℓ/cm²程度の圧力で注入されたが(層境)、次第に圧力が上昇し4.5 ℓ/cm²に達して地表面隆起が認められた。直ちに容液型水ガラスによるストレーナ注入方法に切替えた結果、注入圧は0.6~4 ℓ/cm²で予定量を注入する事ができた。注入状態を調査した結果懸濁液型水ガラスは層境と上部の埋立層とに、また容液型水ガラスは一部懸濁液型水ガラスと競合して注入されていたが、大部分は砂層に均等に浸透していた。

3. C現場の場合

注入対象土層は被圧帯水層で、砂層と砂レキ層とに分けられる。計算注入圧は、容液型水ガラスを先端注入方法で注入する場合、砂層で27 ℓ/cm²、砂レキ層で7 ℓ/cm²となり、またアクリルアミド系薬液もストレーナ注入方法で注入する場合、砂層で5 ℓ/cm²となった。一方、上部の粘性土層に最初にクワックを発生させる注入圧は計算では4 ℓ/cm²(但しG.L.-17mの位置)であり、また空気圧送注入方法で砂層にアクリルアミド系薬液を均等に注入させる場合には計算注入圧は3 ℓ/cm²となった。これに対して実績では、容液型水ガラスを先端注入方法で注入した結果、注入圧は10~15 ℓ/cm²と上昇し、またアクリルアミド系薬液はストレーナ注入方法で5~6 ℓ/cm²、空気圧送方法の併用で約3 ℓ/cm²の注入圧で注入を行なう事ができた。注入後、注入状態を調査した結果では、容液型水ガラスは砂レキ層全体と上部の粘土層に縦方向に脈状に注入されており、さらに層境には水平層状に注入されていた。一方、アクリルアミド系薬液は注入対象砂層を主体として均等に注入されていた。

IV. あとがき

以上、薬液注入工事の際に、各層への注入圧と注入状態とを既存の注入圧計算式を適用して予測し、注入計画の一助とする事、さらに注入施工中に注入圧の状況から注入状態を推測して、適宜注入計画を変更して行く事に着目して、3現場において実際に予測し、かつ実測を行ない、この両者を対比した結果、かなり両者が一致している事がわかった。今後さらに現場実測データも集収して注入圧計算式の修正およびその通用法を検討し、注入効果も高める有効な手段として利用して行きたいと考えている。