

## III-310

## 電気比抵抗法を用いた注入固結砂強度の推定

(株) 青木建設 技術本部研究所 正会員 ○森川義人  
中央開発(株) 探査計測部 正会員 徳丸哲義

## 1. はじめに

比抵抗トモグラフィを用いて、溶液型水ガラス系薬液による注入改良地盤の改良効果を推定する場合、改良範囲と改良物性値の両面から評価する必要がある。改良範囲は注入前の地盤に対する比抵抗ポテンシャルの差を評価基準とするが、これを改良強度の評価基準に直接適用することは危険である。なぜなら注入後の地盤の比抵抗は注入前に比べて1/10以下に低下するが、これは薬液が浸透したことを意味しているにすぎない。改良強度は一般に土の間隙が大きい場合には強度が小さく、逆に間隙が小さい場合には強度が大きいことが報告されていることから、同様に大きく低下した比抵抗の値からだけでは直接強度の判定ができない。

本報文では、比抵抗から改良強度を推定する上で重要となる因子を考察し、浸透注入された固結砂の一軸圧縮強度の推定方法について提案する。

2. 強度推定における動水半径 $R_H$ の導入

本研究では、溶液型水ガラス系薬液により浸透注入された固結砂に関して検討を行う。固結砂の強度発現は図-1のMohr-Coulombの破壊規準で示すように粘着力 $C$ が付加されることによるものであり、砂の内部摩擦角 $\phi$ はほとんど変化しないことが知られているが、間隙比 $e$ が大きいと内部摩擦角 $\phi$ は小さくなり<sup>1)</sup>、また砂の表面積も小さくなるため同じ拘束圧下では、固結砂のせん断強度は小さくなる。また、実験<sup>2)</sup>でも明らかであるが、間隙比 $e$ が同じであっても砂の粒径が大きい場合は小さい場合に比較してホモゲルの付着面積が小さくなるので、同じ応力状態であっても間隙中のゲルが受けるせん断応力が大きくなり、破壊しやすくなるため、固結砂強度も小さくなる。

ところで、地盤の比抵抗は図-2に示すような比抵抗等価構造によって説明されており<sup>3)</sup>、間隙比 $e$ は地盤を構成する要素の比抵抗で表すことが可能である。

以上より、比抵抗から固結砂強度の推定を行うには間隙比 $e$ と砂の粒径 $D$ が重要なパラメータとなることと、注入中の薬液は間隙を移動する粘性流であるという認識からkozenyにより導かれた動水半径 $R_H$ <sup>4)</sup>を用いて検討することとした。

動水半径 $R_H$ は、 $R_H = (e/6) \cdot D_s$  --- (1)  $e$ : 間隙比  
 $D_s$ : 土粒子の粒径

## 3. 固結砂強度推定式の提案

固結砂強度の指標値として、一軸圧縮強度( $qu$ )を用いて表すこととする。推定式検討の実験に用いた砂の粒度曲線を図-3に、砂の物理定数を表-1に示す。また、実験に用いた薬液の配合を表-2に示す。一軸圧縮強度( $qu$ )と比抵抗( $\rho$ )の測定は固結砂、ホモゲル共に材令7日の密封水浸養生によるものである。

表-1 砂の物理定数

| 種類   | 比重 G.S | 10%粒径 $D_{10}$ | 20%粒径 $D_{20}$ | 均等係数 $U_c$ | 間隙比 $e_{min}$ | 間隙比 $e_{max}$ |
|------|--------|----------------|----------------|------------|---------------|---------------|
| 珪砂3号 | 2.640  | 1.08 mm        | 1.15 mm        | 1.39       | 0.747         | 1.017         |
| 珪砂4号 | 2.635  | 0.85 mm        | 0.94 mm        | 1.32       | 0.740         | 1.030         |
| 珪砂5号 | 2.637  | 0.52 mm        | 0.57 mm        | 1.27       | 0.715         | 1.055         |
| 珪砂6号 | 2.636  | 0.30 mm        | 0.33 mm        | 1.30       | 0.700         | 1.090         |
| 珪砂7号 | 2.635  | 0.10 mm        | 0.12 mm        | 1.70       | 0.679         | 1.198         |

1) 固結砂比抵抗 $\rho_{gs}$ と固結砂間隙比 $e_{gs}$ 

まず、動水半径 $R_H$ のパラメータである間隙比 $e$ を固結砂の比抵抗 $\rho_{gs}$ で表すことについて検討を行った。作成された浸透注入固結砂の比抵抗 $\rho_{gs}$ が $200 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下であることから文献<sup>5)</sup>より、薬液の間隙充填率( $\alpha$ )は100%に近いと見なせるため、固結砂の間隙比は飽和砂の間隙比 $e$ と同値と考え、 $e_{gs}$ で表すこととする。

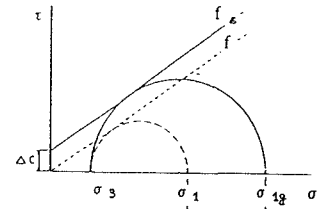
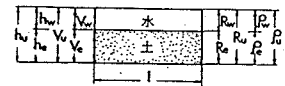


図-1 固結砂の破壊規準



$$e = \rho_w / (\rho_{gs} - \rho_w)$$

$$\frac{\rho_w}{\rho_{gs}} = \frac{\rho_{gs}}{\rho_{gs}}$$

(間隙充填率 $\alpha=100\%$ とする) $e$ : 間隙比 $\rho_w$ : 間隙水の比抵抗 $\rho_{gs}$ : 飽和砂の比抵抗 $\rho_g$ : 薬液の比抵抗 $\rho_s$ : 固結砂の比抵抗

図-2 比抵抗等価構造

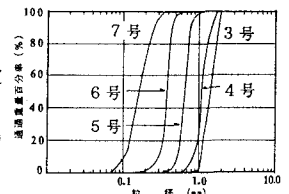


図-3 砂の粒度曲線

表-2 薬液の配合

| A液 (1000cc)  |         | B液 (1000cc)  |          |
|--------------|---------|--------------|----------|
| 3号水ガラス<br>CC | 水<br>CC | 3号水ガラス<br>GS | リン酸<br>E |
| 700          | 300     | 75.0 (60)    | 46.0     |

主剤濃度35%・GS 3%・リン酸 20分

ホモゲル比抵抗:  $4.1 \Omega \cdot \text{cm}$ ホモゲル $q_s$ :  $0.609 \text{ kgf/cm}^2$

$e_g$  は前述図-2の比抵抗等価構造により  $\rho_{gg}$  を用いた関数で表されるときと考えられるので、珪砂3、5、7号の3種類の固結砂について  $e_g$  と  $\rho_{gg}$  の関係をプロットすると図-4のようになった。ここで、 $e_g \rightarrow \infty$  のとき  $\rho_{gg} \rightarrow \rho_H$  (ホモゲルの比抵抗) と予想されるので、各  $e_g$  における  $\rho_{gg}$  の平均値をとり、 $\rho_{gg} = \rho_H (=41)$  を漸近線とする曲線を最小自乗法により求め重ねると図-5のようになる。相関係数は  $r = -0.977$  となり強い負の相関性を示した。

実験式は(2)式のような一般式で表されるときと考えられる。

$$e_g = a \cdot (\rho_{gg} - \rho_H)^b \quad \text{---(2)} \quad (a > 0, b < 0)$$

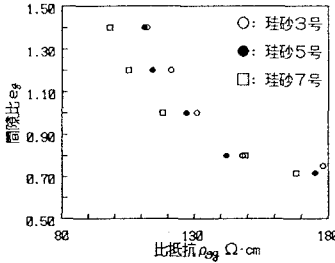


図-4  $e_g$  と  $\rho_{gg}$  の関係

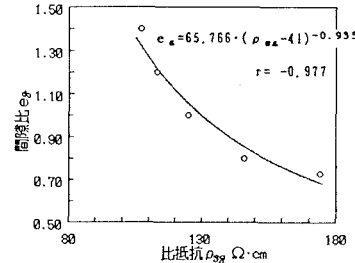


図-5  $e_g$  と  $\rho_{gg}$  の関係

係数  $a$ 、 $b$  は注入条件(注入速度、加圧注入等)の影響による間隙充填率( $\alpha$ )

の違い<sup>2)</sup>や薬液主剤の性状の差等に支配されるときと考えられ、現在検討を行っている。

2) 固結砂動水半径  $R_{Hk}$  と一軸圧縮強度  $q_u$

固結砂の動水半径は、前述のように間隙比が  $e_g$  であるので同様に薬液で充填された  $R_H$  と考え、 $R_{Hk}$  と表すこととする。また、(1)式より  $R_{Hk}$  は土粒子の粒径  $D_S$  の値により異なるが、 $D_{10}$ あるいは  $D_{20}$  は砂の透水係数( $k$ )と深いかわりがあることから薬液の浸透性にも影響すると思われるので、 $D_S$  に  $D_{20}$  を用いることとし、 $R_{Hk}$  を(3)式のように表すことにする。

$$R_{Hk} = (e_g / 6) \cdot D_{20} \quad \text{---(3)}$$

$R_{Hk}$ :  $D_{20}$  で計算した固結砂の動水半径(mm)  
 $D_{20}$ : 20% 粒径(mm)

ここで、珪砂3号から7号までの5種類を用いた注入固結砂について  $R_{Hk}$  と一軸圧縮強度( $q_u$ )の関係をプロットすると、図-6のようになった。ここで、 $e_g \rightarrow \infty$  のとき  $q_u \rightarrow q_{uH}$  (ホモゲルの  $q_u$ ) と予想されるので  $R_{Hk}$  と  $q_u$  について各々平均値をとり、 $q_u = q_{uH} (=0.609)$  を漸近線とする指数曲線を最小自乗法により求め重ねると図-7のようになる。相関係数は  $r = -0.997$  となり非常に強い相関性を示した。

実験式は室内実験により得られたものであるため、実際は有効土被り圧( $\sigma_v$ )と  $N$  値および粒度分布の差によるダイレイタンスの影響で内部摩擦角  $\phi$  の補正が必要であり(4)式のような一般式で表されるときと考えられる。

$$q_u = \lambda \cdot \{c \cdot d^{R_{Hk}} + q_{uH}\} \quad \text{---(4)} \quad (c > 0, 0 < d < 1)$$

係数  $c$  は注入可能限界における固結砂強度とホモゲル強度により関係づけられ、係数  $d$  は砂の表面積に影響する均等係数  $U_c$  により関係づけられると考えられるので、現在検討を行っている。

#### 4. まとめ

以上をまとめると次のようになり、今後検討項目を明らかにしていきたい。

1. 比抵抗  $\rho_{gg}$  から固結砂の間隙比  $e_g$  を推定する。  

$$e_g = a \cdot (\rho_{gg} - \rho_H)^b$$
ただし、 $a$ 、 $b$  は間隙充填率  $\alpha$  や薬液の主剤性状に支配される。(検討中)
2.  $e_g$  を用いた動水半径  $R_{Hk}$  から一軸圧縮強度( $q_u$ )を推定する  

$$q_u = \lambda \cdot \{c \cdot d^{R_{Hk}} + q_{uH}\}$$
ただし、 $c = f(q_{u\max}, q_{uH})$   $d = f(U_c, A_g)$  (検討中)

参考文献:1) (社) 土質工学会:「土質工学ハンドブック」, PP.210

2) 森川他:「電気比抵抗法を用いた浸透注入固結砂の改良効果に関する基礎実験」薬液注入工法における注入効果の予測確認手法に関するシンポジウム論文集(土質工学会), PP.303~308

3) 吉住:「地盤調査における比抵抗電気探査法について」土と基礎, Vol.24, No.1, 1976, PP.21~26

4) (社) 土質工学会:「土質工学ハンドブック」, PP.68

5) 小峯他:「浸透注入した水ガラス固結砂の電気比抵抗特性」第26回土質工学研究発表会, PP.1949-1950