

III-773

薬液の二段階注入による限界注入速度 q_{er} の算定方法について

早稲田大学 正会員 森 麟
早稲田大学 学生員 入谷 剛（現 東京電力）
早稲田大学 学生員 大屋 顕

1. 研究目的

砂質地盤における薬液注入では、割裂が発生せず球状浸透する浸透注入形態が理想であるが、対象地盤の透水性に対して過剰な流量で注入した場合、割裂が発生し固結形状がいびつ形になることがある。しかし割裂の大きさを許容値以下に抑えればほぼ良好な固結形状を得られることが実験的に確かめられており¹⁾、この許容の割裂面積を発生するときの注入速度を限界注入速度 q_{er} と呼んでいる¹⁾。

限界注入速度 q_{er} は標準化された水注入試験による $p-q$ 曲線から求められる¹⁾。この水注入試験による q_{er} の測定は注入範囲の地盤において一箇所程度である。しかし実際注入地盤は均一でないため、 q_{er} の測定位置の選択が難しい。このため各注入ステップの位置毎の地盤の q_{er} の概略値を求めることができれば、非常に合理的になる。

そこで本研究では、薬液注入の際各ステップでまず一段目に2(1/min)で、二段目に任意の q_d (1/min)で数分注入する二段階注入を行いその際の p 、 q に基づいて概略の q_{er} (1/min)を算出する計算法を研究した。そして今までに実施された水注入試験による q_{er} (1/min)と比較し、かなり実用性の高いことを立証した。

2. 二段階注入による地盤の透水係数 k の算定

水注入試験による $p-q$ 曲線から q_{er} を求めるにはまず限界勾配 i_{er} を求める必要があるが、薬液の q_{er} を求める場合 i_{er} は次式によって表される¹⁾。

$$i_{er} = \sqrt{\frac{A_0}{A_{er}}} \times \mu^{\frac{1}{3}} \times i_0 \quad (1)$$

A_0 : 初期浸透面積(cm^2) A_{er} : 薬液の許容割裂面積(cm^2)

i_0 : $p-q$ 曲線の初期直線勾配(p/q) μ : 薬液の粘性比

$A_0=140(\text{cm}^2)$ としてこれを球面と仮定すると半径 $r_0=3.34(\text{cm})$ となる。また実験結果から $A_{er}=3000(\text{cm}^2)$ とし、 $\mu=2$ とすると式(1)は次式のように表すことができる。

$$i_{er} = 0.27 \times \frac{1}{240 \times \pi \times k \times 3.34} \quad (2)$$

k : 透水係数(cm/sec)

式(2)から i_{er} は透水係数 k によって決まることがわかる。この k を水注入試験の代わりに二段階注入で求める方法を研究した。現場のデータから同一 k の地盤でも $p-q$ 曲線の形状と N 値の大きさに密接な関係があることに着目し、 α_d という次式の指標を考えた。

$$\alpha_d = \frac{A_d}{A_2} \times \frac{N^{\frac{2}{3}}}{50} \quad (3)$$

A_2 : 一段目注入の q が2(1/min)のとき発生する割裂面積(cm^2)

A_d : 二段目注入の q が q_d (1/min)のとき発生する割裂面積(cm^2)

q_d は6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20の中から選ぶ

球状浸透の理論式(Maagの式)より式(3)の α_d は次式のように表すことができる。

$$\alpha_d = \left(\frac{q_d \times p_d}{2 \times p_d} \right)^2 \times \frac{N^{\frac{2}{3}}}{50} \quad (4)$$

p_d : 一段目注入の q が2(1/min)での有効注入圧力(kgf/cm^2)

p_d : 二段目注入の q が q_d (1/min)での有効注入圧力(kgf/cm^2)

実際に水注入試験を行った12箇所の現場について、その $p-q$ 曲線の初期直線勾配から求めた透水係数 k_0 と α_d との関係を調べたところ、 q_d が6(1/min)~20(1/min)では k_0 と α_d の間に相関関係がみられ、式(5)の関数で近似できることがわかった。

$$\ln \alpha_d = m_d + n_d \times \ln k_0 \quad (5)$$

m_d, n_d : 注入速度 q_d により異なる係数(図-1に記載)

k は式(4), (5)を用いることで算定することができるが(図-1)、

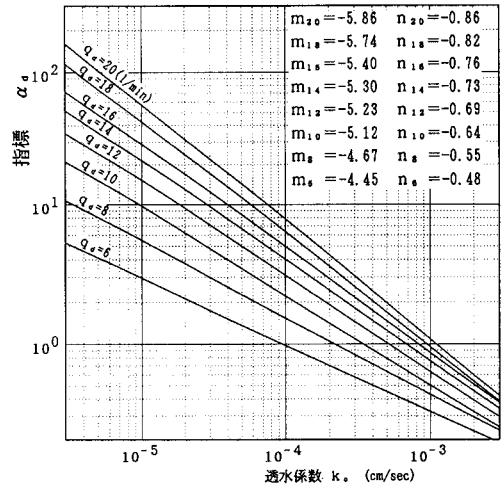


図-1 二段目注入速度(q_d)別 α_d-k 直線

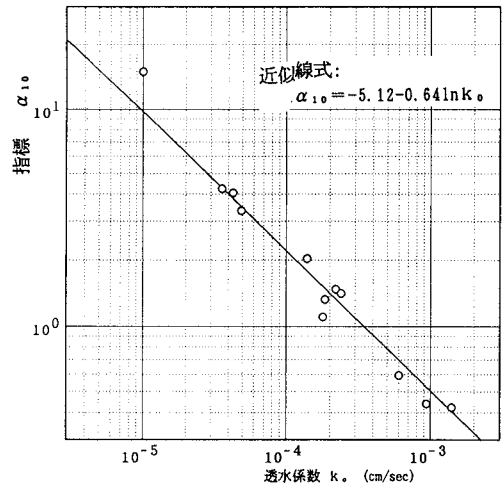


図-2 $q_d=10$ (1/min)における $\alpha_{10}-k$ 直線

式(4), (5)に用いる q_d の大きさによってその値が多少異なる。算出した透水係数を k_d とし、その精度を調べたところ $k_d/k_o=0.5\sim 1.8$ であり中でも q_d を10(1/min)としたときの k_{10} の精度が最も高かったことから($k_{10}/k_o=0.5\sim 1.65$)以下 q_{cr} の算出に k_{10} を用いている(図-2)。表-1に現場毎の k_o と k_{10} を示す。

3. α_d - k_o 直線による p - q 曲線の概形の決定

限界注入速度 q_{cr} の決定には k の他に p - q 曲線の形状が必要となる。図-1において、横軸に算出した k_{10} を用い各 q_d に対応する α_d を求めれば、有効注入圧力 p_d (kgf/cm²)の概略値は次式で求められる。

$$p_d = \frac{p_2 \times q_d \times N^{\frac{1}{3}}}{14.14 \times e^{\frac{1}{2}(m_d + n_d \times \ln k_{10})}} \quad (6)$$

図-3には算出した有効注入圧力による p - q 曲線(実線)と実際の p - q 曲線(点線)を示したが、比較的良好に近似している。 p - q 曲線の決定には q_d として2, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20(1/min)の9点を用いるが、一段目の2(1/min)、二段目の10(1/min)に当たる2点の p は実測値とする。

4. 限界注入速度 q_{cr} の算定

限界注入速度 q_{cr} は p - q 曲線と限界勾配線との交点における注入速度として与えられるため、図-4のように3.で求めた p - q 曲線と限界勾配線 $p = i_{cr} q$ との交点(Q, P)のQの値が q_{cr} となる。このような作図による方法でなく q_{cr} を計算により求める方法を以下に示す。

- (1) 式(7)によりQの値を求める。式(7)は、3.で求めた隣接する2点(q_s, p_s), (q_t, p_t)を通る直線と限界勾配線 $p = i_{cr} q$ の交点の q 座標を表している。

$$Q = \frac{(q_t - q_s) p_2 - q_s (p_t - p_s)}{(q_t - q_s) i_{cr} - (p_t - p_s)} \quad (7)$$

$q_s \leq Q \leq q_t$ の条件を満たすとき $Q = q_{cr}$ (1/min)となるため(図-4)、Qが条件を満たすまで2点を選び直し再度計算を行う。

- (2) $q_s = 2$ (1/min)としても $Q < q_s$ (1/min)となる場合、即ち図-4中①のような限界勾配線の下に p_2 がくる場合は、小さな q_s がないので、 $q_s = 2$ (1/min)としたときの Q を q_{cr} (1/min)とする。
- (3) また、 $q_s = 18$ (1/min)としても $Q > q_t$ となる場合、即ち図-4中②のように限界勾配線の上に p_{20} がくる場合は、20(1/min)以上の p - q 曲線は $p = p_{20}$ の水平直線と考え、式(8)の Q を q_{cr} (1/min)とする。

$$Q = \frac{p_{20}}{i_{cr}} \quad (8) \quad \text{注: 式(7), (8)の } i_{cr} \text{ は } k_{10} \text{ を式(2)に用いて算出できる}$$

以上の方法で算出した q_{cr} と、実際の p - q 曲線から求めた q_{cr} を表-2に示す。誤差は0.41~1.72倍の範囲であった。

5. まとめ

以上の結果から、薬液を注入する際に二段階注入(一段目 $q = 2$ (1/min)、二段目 $q = 10$ (1/min))を行うことで、各注入ステップに当たる地盤の概略の限界注入速度 q_{cr} を知ることが可能であることが分かった。

表-1

現場名	西武44	西武34	成田7	船橋	下落合	麻布	六本木	青山	柳町	神楽坂	本郷	元浅草
実際の $k_{cm/sec}$	3.6×10^{-5}	4.3×10^{-5}	6.0×10^{-4}	2.2×10^{-4}	2.4×10^{-4}	1.0×10^{-5}	1.9×10^{-4}	1.8×10^{-4}	9.4×10^{-4}	4.9×10^{-5}	1.4×10^{-4}	1.4×10^{-3}
算出した k_{10}	3.6×10^{-5}	3.9×10^{-5}	7.8×10^{-4}	1.9×10^{-4}	2.0×10^{-4}	5.1×10^{-6}	2.2×10^{-4}	3.0×10^{-4}	1.2×10^{-3}	5.3×10^{-5}	1.1×10^{-4}	1.3×10^{-3}
k_{10}/k_o	1.01	0.91	0.88	0.86	0.84	0.51	1.20	1.65	1.32	1.07	0.81	0.93

表-2

現場名	西武44	西武34	成田7	船橋	下落合	麻布	六本木	青山	柳町	神楽坂	本郷	元浅草
実際の q_{cr} 1/min	3.10	5.70	16.5	6.00	14.0	0.70	15.2	15.4	20.7	2.85	6.80	39.0
算出した q_{cr}	3.17	5.94	21.9	4.32	10.7	0.29	19.8	26.4	34.8	3.09	4.07	30.6
q_{cr}'/q_{cr}	1.02	1.04	1.33	0.72	0.76	0.41	1.30	1.72	1.68	1.08	0.60	0.77

□参考文献

- 1) 森崎、田村昌仁他: 薬液注入において浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法, 土質工学会論文報告集 Vol. 33, No. 3, pp159-169, Sept. 1993