

Ⅲ－21

超多点注入の有効性と浸透理論に基づく薬液注入の解析

東北学院大学工学部

学生会員 ○今野淳子

学生会員 濱田邦宏

正会員 飛田善雄

1. 序論

薬液注入工法は地盤の改良工法の一つである。中でも超多点注入工法は、注入管1本あたりの改良半径が小さく、多数の注入管を配置し、1本あたりの注入速度が低くても効果的な注入が実施できるように開発された工法である。本報告では薬液注入工法での注入を浸透注入と仮定した数理解析に基づいて、超多点注入工法の有用性を説明する。また、室内実験と現場実験の浸透が卓越した注入速度の限界：限界注入速度の差異を考察する。

2. 浸透理論の導入

浸透現象を表現する式は、液層の質量保存則と間隙中の水の流れに関するダルシーの法則により導かれる。一般的に次の仮定を置く。

- ① 固相が変形しない。(非圧縮製)
- ② ダルシー則が成立する
- ③ 透水係数が均質である
- ④ 間隙を流れる液体が非圧縮である

上記①～④のように仮定すると次のような Laplace の方程式を得ることができる。

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \dots (1)$$

この方程式について座標変換を施すと、球座標系では

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rh) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial h}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 h}{\partial \phi^2} = 0 \dots (2)$$

となる。球対象条件を仮定すると (2) 式の第2項、第3項が消え、第1項のみ常微分方程式となる。この式を使い各種注入条件、または境界条件より圧力水頭の解が求められる。この式を変形し、それぞれの条件を与えることにより、注入において重要な関係式が得られる。

地盤条件	
透水係数(cm/sec)	$k_w = 1.0 \times 10^{-2}$
薬液に対する透水係数(cm/sec)	$k_g = 2 \times k_w / 3$
注入管半径(cm)	$r_0 = 2.5$
注入影響半径(cm)	$r_2 = 250$
注入予定半径(cm)	$r_f = 100$
r_2 での水頭	$h_2 = 0$
間隙率	$n = 50\%$

3. 超多点注入の有用性

各種地盤条件を与え、数式計算ソフト Mathematica により解析を行っていく。図1より、注入速度と水頭(注入圧力)は線形関係であることが分かる。このことから、水頭を抑えるためには注入速度をできるだけ小さくしなければならないという事が分かる。

図2より、改良半径が大きくなるほど、水頭が上昇することが分かる。

また、図3より注入半径をできる限り大きくすれ

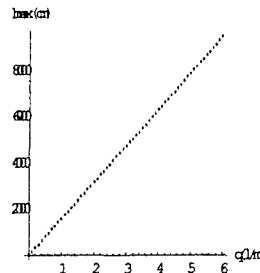


図1 注入速度と水頭

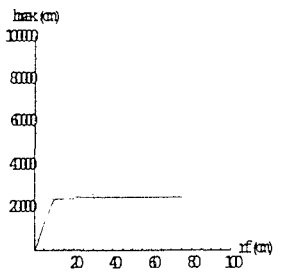


図2 改良半径と水頭

ば、水頭を押さえることができることが分かる。

限界注入圧で半断すると、浸透注入が卓越するための条件は次のようになる。

- (1) 決まった施工速度が確保できる範囲の中で注入速度を小さく押さえること。
- (2) 注入管の1本あたりの改良半径を小さく押さえること。
- (3) (仮想的)注入管半径を大きくする。

超多点注入工法では上記の条件全てを満足させることができ、浸透が卓越する注入を行うことができる。

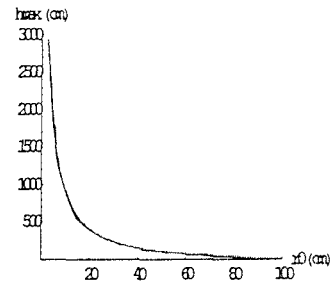


図3 注入半径と水頭

4. 室内実験と現場実験の差異¹⁾

室内実験では、透水係数 7×10^{-4} (cm/sec)、注入速度 0.3 (l/min) で、水頭 20 (m) で割裂が発生した。室内実験での実際の注入管半径は 0.2 (cm) であるが、計算上は注入管半径を 0.4 (cm) とすれば室内での $h-q$ 関係を再現できる。これを室内の仮想的注入半径とする。一方、現場実験では、透水係数 1×10^{-3} (cm/sec)、注入速度 2.0 (l/min) で、水頭 30 (m) でも、掘削後の観察では注入管周りに脈状注入は見られず、良好な改良結果を示した。現場実験での実際の注入管半径は 0.4 (cm) であるが、注入管半径を 2.5 (cm) とすれば現場の $h-q$ の関係を再現できる。これを現場の仮想的注入半径とする。以上の計算では、現場では 2.5 (cm)、室内では 0.4 (cm) までの透水係数は無限大と考える。

図4は、上記仮想注入半径を固定して限界注入水頭を現場では 30(m) 室内では 20(m)と設定した時の地盤の透水係数に対する限界注入速度の関係を表したものである。2つの条件での限界注入速度は大きく異なる。室内実験においては浸透注入から割裂浸透となったところで割裂が起きたと判断し、一方、現場実験では注入管近傍では割裂浸透注入が行われていたものと考えられる。上記計算では、割裂浸透が生じているところは透水係数を無限大と設定したが、実際の割裂浸透領域となる注入管周りは有限の透水係数を持つ。室内実験では、その割裂領域の透水係数は、地盤の透水係数の 10 倍程度となった。このことから、割裂浸透領域の透水係数を k_f とし、 $k_f = 10 \times k_w$ (k_w は水の透水係数) とする。注入管よりそれぞれ 割裂浸透領域、薬液浸透領域、水浸透領域として透水係数を変化させて解析を行った。現場での実験結果については、割裂浸透領域を 4.0(cm) と設定すると、現場の $h-q$ 関係を再現することができる。これは、仮想的注入管半径を設定した場合(透水係数は無限大)と比べ大きくなる。しかし、この2つの計算方法の差は、地盤の間隙率、透水係数の測定精度などを考えると、工学的には問題にならないと言える。

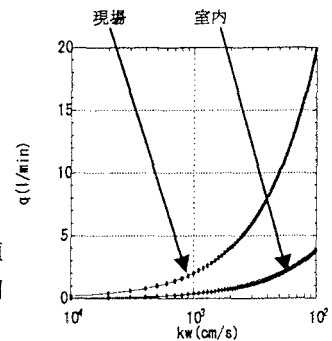


図4 室内実験と現場実験の
注入速度と透水係数関係

よって、現場施工のための計算としてはより簡便な仮想注入管半径を設定する方法が有利である。

5. 結論

- ① 超多点注入工法の有効性を浸透解析理論に基づいて説明した。
- ② 現場と室内実験の水頭 h - 注入流量 q の関係の差異を説明した。

¹⁾ 岡田和成(2000):東北学院大学修士論文