

Ⅲ - 15

薬液注入工法を対象とした浸透解析：異方性地盤への応用と割裂進展時の解析

東北学院大学工学研究科	学生会員	○櫻井 慎
東北学院大学工学部	学生会員	澤村直子
東北学院大学工学部	学生会員	山田祐馬
東北学院大学工学部	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。本報告では、薬液注入工法での注入を浸透現象と仮定した数理解析に基づいて、異方性地盤の解の求め方、及び、割裂相を含む浸透解析を行い現場での実際の挙動と比較・検討する。

2. 浸透理論の導入

浸透現象を表現する式は、液相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固層が変形しない。〔非圧縮性〕
- ②ダルシー則が成立する。
- ③透水係数が直交異方性を有する、 k_x, k_y, k_z とおく。
- 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、次のような偏微分の方程式を得ることが出来る。

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

このとき、仮想的等方空間の関数を $h(x^*, y^*, z^*)$ として、次式に示す座標変換を行う。

$$x^* = \sqrt{\frac{k_0}{k_x}} x, y^* = \sqrt{\frac{k_0}{k_y}} y, z^* = \sqrt{\frac{k_0}{k_z}} z$$

合成微分に注意し、結果を整理すると、次式が得られる。

$$k_0 \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^{*2}} \right) = 0 \quad (2)$$

すなわち、ラプラス方程式に帰着できることになる。この様に異方透水係数を有する浸透問題は、図-1 に示す方法より、等方問題に帰着させる事が出来る。紙面の都合で、異方性の解析結果は割愛する。

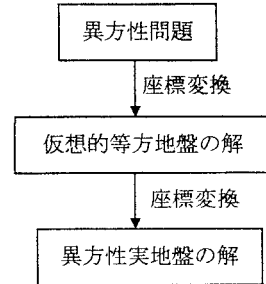


図-1 異方性浸透問題の解析方法

(2)式に対して、直交座標系から球座標系への座標変換を施すと次式が得られる。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (rh) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial h}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \theta} \frac{\partial^2 h}{\partial \phi^2} = 0 \quad (3)$$

球対称条件を仮定すると、(3)式の第二項、第三項が消え、第一項のみの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。

3. 割裂が発生する場合の浸透解析

注入中に、注入速度が大きく、注入圧が高くなる場合には、浸透注入より割裂注入に移行する現象が見られる。地盤の透水係数が小さく、注入圧が大きい場合には、脈状注入と呼ばれる地盤内にクラックが発生する現象を生じる。しかし、今日まで注入中の割裂の発生メカニズムについては、満足すべき結果は得られていない。本研究では、圧力水頭 $h(r)$ がある破壊水頭 h_{cr} に達した時、その半径まで割裂が進行すると仮定し、計算を行った。

4. 割裂が進展する場合の数値解析

図-2に示す様に、1点から注入される状況を想して解析した。数値計算には、Mathematica Ver 4.0を利用した。地盤の条件は次の様に設定した。

(地盤条件)

薬液の透水係数 0.0005 (cm/s) 、水の透水係数 0.001 (cm/s) 、注入半径 $r_0 = 2.5 \text{ (cm)}$ 、間隙率 $n = 0.50$ 、破壊圧力水頭 $h_{fr} = 4500 \text{ (cm)}$ 、又、割裂相の透水係数については、薬液、水のそれぞれ10倍と設定した。この条件のもと、注入流量を 2.0 (l/min) 、 4.0 (l/min) 、 6.0 (l/min) に変化させた。図-3に注入速度を変化させた時の注入時間 t と注入圧(水頭で表現する)の関係を示す。図-4に注入半径と割裂相の進展の関係を示す。注入速度が低い場合には注入圧は時間と共に増大する。この時、注入の進行に係わらず、割裂相の進展は生じないという結果になっている。

注入速度が 4.0 (l/min) の場合には、注入圧は初期にわずかに減少する。この時、割裂相の進展が見られる。割裂相の進度は注入の進行と共に減少し、ある値に近づく傾向にある。注入速度が 6.0 (l/min) の場合には、基本的な傾向は 4.0 (l/min) と同様にあるが、より大きな割裂相の進展が見られる。更に、注入速度を上げた場合、本解析では、注入圧は速度に応じて上昇し続ける事になる。しかし、実際の注入圧と注入速度関係は、ある限界注入速度を超えると逆に注入圧は減少するという結果になる。この差異は、本解析においては、等方的な割裂を想定しているのに対して、実際には限界注入量を超えると、脈状注入が発生する為と考えられる。本解析のもとでは、脈状注入タイプの減少を表現する事はできず、本解析手法の限界である。

5. 結論

- 1) 割裂の進展が等方的に生じる場合を想定して、割裂相の進展を考慮出来る計算方法を開発した。注入速度が増加すると、 $h-t$ 関係は注入圧減少を示し、ある値に落ち着く。(図-3 参照)
- 2) 本解析では、注入試験での $p-q$ 関係を再現することは出来ない。よって本解析は、 q の増加により、 p が増加する場合に限定される。

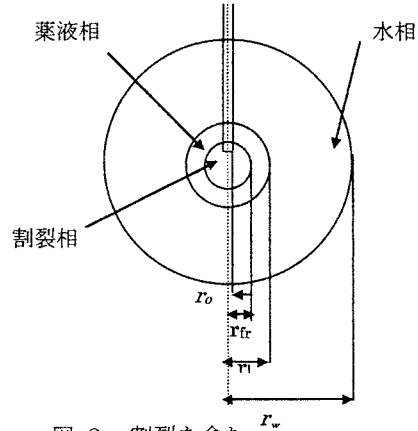


図-2 割裂を含む

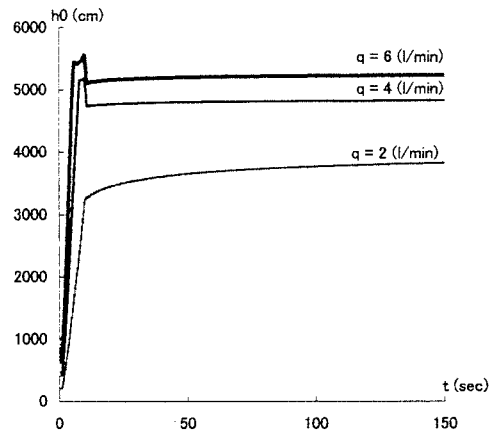


図-3 注入速度を変化させた時の注入時間 t と注入圧の関係

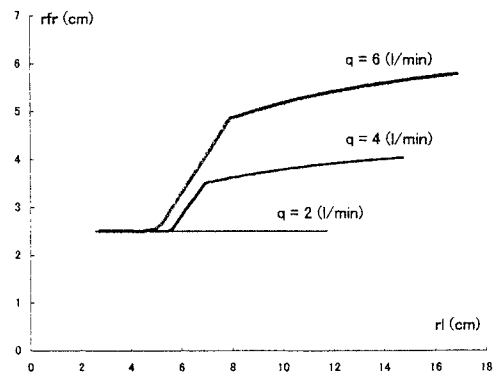


図-4 注入半径と割裂相の進展の関係