

III-17

割裂を含む注入問題に対する浸透解析の応用

東北学院大学工学部	学生会員	○成田 匡邦
東北学院大学大学院工学研究科	学生会員	櫻井 慎
東北学院大学工学部	学生会員	星 光昭
東北学院大学工学部	正会員	飛田 善雄

1. 序論

薬液注入工法において、透水性と比較して、注入速度 q が大きい場合においては注入圧 p の減少が見られる。これは地盤の割裂現象によるものと考えられる。このような破壊現象を含む浸透問題を解析することは現時点ではきわめて困難である。

本報告では、地盤の破壊現象の影響は透水係数の変化として捉え、浸透理論を適用して、割裂を含む注入時の挙動の再現を目的とし、解析を行う。解析にあたり、次の考えを利用する。

- 1) 割裂を二つの種類に分類し、等方割裂と大きな亀裂がある方向に発生する異方割裂に分けて考える。それぞれに透水係数の変化を考え、浸透解析を適用する。
- 2) 異方割裂に対しては、異方性地盤に対して座標変換法を用いて解を求める方法の適用性を検討する。

2. 浸透理論の導入

浸透現象を表現する式は、薬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。通常利用される仮定を用いて、次のような偏微分方程式が得られる。

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

このとき、仮想等方空間の関係を $h(x^*, y^*, z^*)$ 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、Laplace 方程式に帰着できることになる。

(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. 割裂現象を考慮した浸透解析

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、注入圧力が高い場合には、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、割裂を等方割裂と異方割裂の2つの場合に分け解析を行った。等方割裂においては等方的な割裂を割裂相とし、圧力水頭 $h(r)$ がある破壊水頭 h_{rr1} に達した時、その半径 r_{rr} まで割裂相が進行すると仮定した。又、等方割裂が発生すると割裂相の透水係数が10倍となるものと計算を行った。異方割裂においては圧力水頭 $h(r)$ がある破壊水頭 h_{rr2} に達したとき、割裂は異方的なものとなり、水平方向の透水係数が急激に増加するものと仮定し計算を行った。

(地盤条件)

水の透水係数 $k_w = 0.001$ (cm/s)、 $k_g = 0.00001$ (cm/s)、薬液の透水係数 $k_s = 0.0005$ (cm/s)、 $k_g = 0.000005$ (cm/s)、注入管半径 $r_0 = 2.5$ (cm)、間隙率 $n = 0.50$ 、等方割裂が発生する破壊圧力水頭 $h_{rr1} = 4500$ (cm)、異方割裂が発生する破壊圧力水頭 $h_{rr2} = 10000$ (cm)、割裂相の透水係数については浸透時の10倍、異方割裂が発生す

る場合の透水係数は時間と共に大きくなるように設定した。図-2、図-3に注入時間 t と注入圧 p （圧力水頭 h で表現する）関係を示し、図-5、図-6に注入量 q と注入圧 p の関係を示す。

透水係数 $k_p=0.001$ (cm/s)の地盤では、異方的割裂が発生せず、割裂浸透注入が行われるという結果になっている。

透水係数 $k_p=0.00001$ (cm/s)の地盤では、異方割裂が発生し、脈状注入が行われるという結果になっている。

4. 異方透水係数の推定方法

本研究では、実際観測された h_{obs} 、理論式から得られる圧力 h_{cal} を用いて、異方的透水係数の推定方法を示し検証を行った。検証方法は最小二乗法を適用した。次式にその関係を示す。

$$I_z = \sum_{i=1}^n (h_{obs} - h_{cal})^2 \quad - (4)$$

(地盤条件)

実際の z 方向の透水係数 $k_{wzobs}=0.001$ (cm/s)、注入孔半径 $r_{0zobs}=5.0$ (cm)、間隙率 $n=0.5$ 、注入孔半径から観測点までの距離 $z_{0zobs}=100$ (cm)、観測により求められる圧力水頭 $h_{2zobs}=ai+b+c\sin \omega i$ の様な地盤条件の下、(4)式の h_{cal} に含まれる z 方向における注入孔半径 r_{0zcal} と、透水係数 k_{wzcal} を変数とし検証を行った結果、図-6の様に r_{0zcal} と k_{wzcal} にはある関数関係が存在し、異方的透水係数の精度よい推定のためには、注入孔半径の推定を経験に基づいて推定する必要があることがわかった。

5. 結論

1) 等方割裂、異方割裂が薬液注入に与える影響を透水係数の変化として捉え、すべての過程を浸透問題として取り扱う解析方法の可能性について検討した結果、妥当な計算結果を得た。

2) 異方性地盤の浸透問題に座標変換法を利用して解析する方法を検証し、異方性地盤の透水係数を注入試験により求める方法を提案した。注入孔と別の孔で間隙水圧を測り、また注入孔の半径がある程度の精度で推定できれば、異方的透水係数を求められることが分かった。

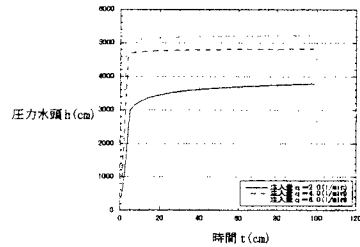


図-2 $h-t$ 関係 ($k_p=0.001$ (cm/s))

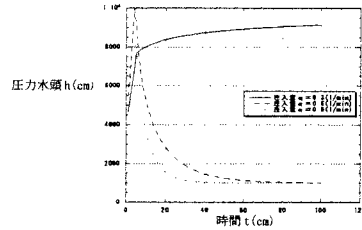


図-3 $h-t$ 関係 ($k_p=0.00001$ (cm/s))

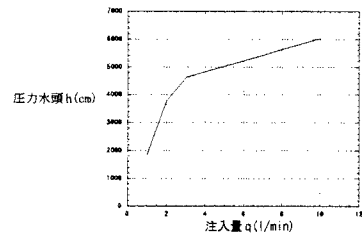


図-4 $h-q$ 関係 ($k_p=0.001$ (cm/s))

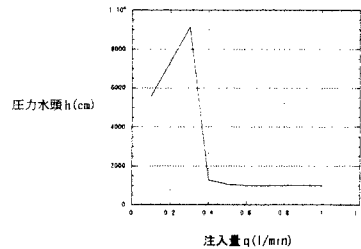


図-5 $h-q$ 関係 ($k_p=0.00001$ (cm/s))

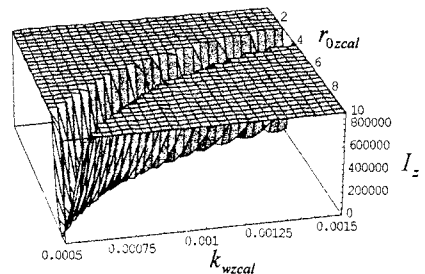


図-6 $I_z - r_{0zcal} - k_{wzcal}$ 関係