

割裂現象を含む注入問題に対する浸透解析応用の試み

東北学院大学工学部 正会員 飛田 善雄
 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 正会員 斎藤 孝一

1. はじめに

薬液注入工法においては、地盤の透水性と比較して、注入速度 q が大きい場合は、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、その破壊メカニズムを再現して、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する解析を試みる。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、微細な割裂である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。それぞれの現象に対して、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、異方性地盤に対する解析手法である座標変換法を用いて、等方性地盤に帰着させて、その解を利用する方法を利用する。

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。

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

(1)式に対して、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。

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

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。

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

地盤のある半径を有する球からの注入問題を考え、球状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、問題に対する境界条件を与えることにより、基本的な解が得られる。

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、注入圧が大きい場合には、脈状注入と呼ばれ、地盤内にクラックが発生する。しかし、注入中の割裂の発生・進展メカニズムについて、現象を追跡して数値解を得ることは極めて困難である。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、それぞれ異なる浸透解析を行った。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_{fr1} に達した時、その半径 r_{fr} 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倍となるものとし計算を行った。異方割裂においては圧力水頭 $h(r)$ がある破壊水頭 h_{fr2} 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。

(計算に用いた地盤条件)

水の透水係数 $k_w=0.001(\text{cm/s})$, $k_w=0.00001(\text{cm/s})$, 薬液の透水係数 $k_g=0.0005(\text{cm/s})$, $k_g=0.000005(\text{cm/s})$, 注入管半径 $r_0=2.5(\text{cm})$, 間隙率 $n=0.50$, 等方割裂が発生する破壊圧力水頭 $h_{fr1}=4500(\text{cm})$, 異方割裂が発生する破壊圧力水頭 $h_{fr2}=10000(\text{cm})$, 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

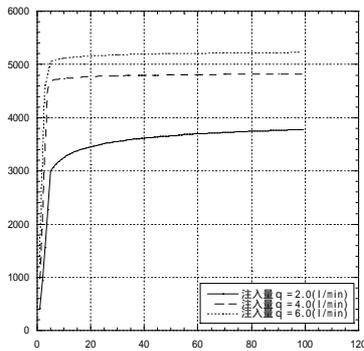


図 1：注入水頭 h - 時間 t の関係 (k=0.001(cm/s))

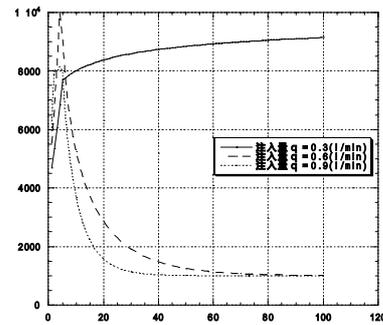


図 2：水頭 h - 時間 t の関係 (k=0.001(cm/s))

透水係数は累積注入量と共に大きくなるように設定した。図-1，図-2 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-3 に透水係数が 10^{-5} cm/s とした場合の注入量 q と注入圧 p の関係を示す。

透水係数 $k_w=0.001$ (cm/s)の地盤では，異方的割裂が発生せず，等方的割裂のみが発生するという結果になっている。透水係数 $k_w=0.00001$ (cm/s)の地盤では，注入圧が高くなり，異方割裂が発生し，大きな透水係数に変化するため，注入速度の増加に伴い，注入圧が減少するという結果になっている。

4. 異方透水係数の推定方法

本研究の応用として，地盤の異方的透水係数を推定する方法について考えた。地盤内の別の孔で水压変化が観測されたものとし h_{obs} で表現する。計算式から得られる圧力水頭 h_{cal} の二乗和の最小条件(最小二乗法)により透水係数を求めることができるものと考えた。注入孔の半径と透水係数を求めるべき変数とした。

(計算に用いた地盤条件)

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 $z_{2obs}=100$ (cm)とした。観測により求められる圧力水頭 h_{2obs} に適当な変動を与えそれを正しい値として，(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} を変数とし最小となる条件を数値計算により求めた結果，図-5 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

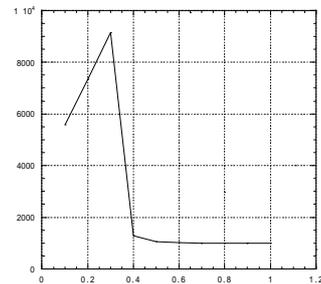


図 - 3：水頭と注入速度の関係係数 $k_w=0.00001$ (cm/s)

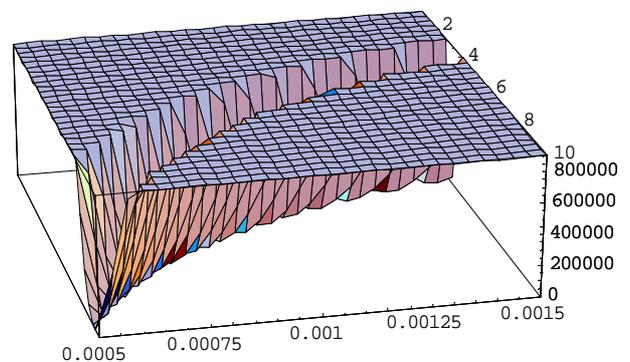


図 4：透水係数と注入半径の変化に伴う誤差の変化 (横軸が透水係数の変化，奥行きが注入孔半径)

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。まだ，満足すべき段階ではないが，可能性は示唆された。

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。注入孔で注入圧，別の孔で間隙水压を測り，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。