

(11) 不飽和帯における注水試験による岩盤水理特性の評価方法

東京大学工学部 登坂 博行
応用地質株式会社 伊藤 一誠
応用地質株式会社 大塚 康範

Evaluation of Hydraulic Properties of Rock Masses in Unsaturated Zone with Injection Well Testings

Hiroyuki TOSAKA, University of Tokyo
Kazumasa ITOH, OYO Corporation
Yasunori OTSUKA, OYO Corporation

ABSTRACT

Conventional well test analysis methods which rely upon theoretical solutions for determining the permeability of water saturated zone lose applicability for unsaturated zone. As a comprehensive analytical technique, the authors propose the modified variable-rate equation which may be valid for various types of well testings in both saturated and unsaturated zones. Through various case studies, the applicability of the equation are discussed with the following conclusions.

- 1) In saturated zone, permeability (transmissivity) can be estimated correctly by the variable-rate equation for any type of well testings. In addition, initial piezometric pressure, if unknown, can also be determined simultaneously utilizing the equation.
- 2) For the analysis in unsaturated zone, a correction factor is introduced into the equation and is determined through numerical case studies.
- 3) The plot of the data from multi-stage constant pressure test for unsaturated zone shows significant deviation from unique straight line, and hence, it may provide good information of judging whether the rock is saturated or unsaturated.

1. はじめに

岩盤の水理特性を把握する目的で、ダムサイトや地下空間建設地域においてルジオン試験などの注水試験や、揚水試験、密閉試験等が広く実施されている。試験の結果得られる透水係数やルジオン値はグラウトの効果判定や数値浸透流解析の解析モデルに与えるべき透水係数等を推定する基礎資料として多く利用される。しかしながら、山口ら(1987)¹⁾や、登坂・小島(1990)²⁾が指摘するように、定常流解析解を不飽和領域に適用した場合には、計測上実用的な時間内では非定常性が強く現れて、物性値算定に大きなずれが生じることになる。

以上を踏まえて、本研究では不飽和帯において高精度のウェルテスト解析を行うことを目的として、第一に飽和・不飽和状態でのウェルテスト時の非定常的な圧力・流量挙動の違いを数値解析によって捉え、次に飽和帯から不飽和帯までの広い範囲で岩盤水理特性の評価を可能とする変圧・変流量解析の基本方程式の適用性について論じる。

2. 注水試験時の時間-圧力-流量関係

ここでは、次章に述べる解析手法に先立ち、飽和帯、不飽和帯で、地層物性や試験形態の違いによって時間(T)-圧力(P)-流量(Q)関係（以下、TPQ関係と記す）がどのように変化するかを知るために行った数値計算の条件設定およびその結果について概要を述べる。

2. 1 計算条件及びケース設定

数値計算では、側方半無限の均質等方地層を仮定し、円筒座標系の差分格子による二相流動シミュレーションを行う。次章の解析のため、二次元型モデルとして上下を不透水層に囲まれた厚さ5mの地層、三次元型モデルとして、上方は地表で大気層と接し、下方は不透水層を持つ20m程度の地層を想定する。三次元型の格子システムはFig. 1に示すように、試験孔直径は6.6cmとし、注水区間は垂直方向に0.2mで区切り、計2130個（30×71）の格子で構成する。

ケース設定は、実際の注水試験を踏まえ、ここでは、地層形状（2次元、3次元）、地層飽和状態、地層透水性、試験区間長、注水圧力、流量を以下の範囲で変え組み合わせる。

地層飽和状態 $S_w=1.0$ （完全飽和）、 0.1 （不飽和）
 浸透率 $k=10, 100, 1000\text{md}$
 試験区間長 $L=20, 100, 500\text{cm}$
 圧力ステージ $P=2, 4, 6\text{kgf/cm}^2$ （絶対圧力）
 流量ステージ $Q=$ 地層浸透率に応じて適宜設定

2. 2 計算結果例

二次元ケース、三次元ケースにつき多数のTPQ関係を得たが、ここではその典型的なTPQ曲線の一例をFig. 2に示す。Fig. 2は、1000mdの浸透率を持つ3次元地層を、完全飽和帯とした場合と不飽和帯とした場合の多段定圧型注水試験の結果を描いたもので、同じ地層であるにもかかわらず、飽和状態の違いにより各圧力ステージでの流量は大きく異なり、漸減傾向も異なっている。

3. 一般化非定常ウェルテスト解析式の検討

飽和帯における単孔透水試験結果を解析するためには2次元、3次元放射状流の式などが用いられるのが普通である。実用的な試験形態においては、昇圧、

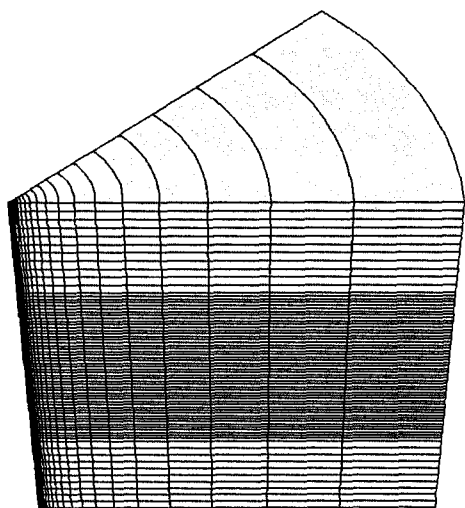


Fig.1 A perspective view of 3-D cylindrical grid system.

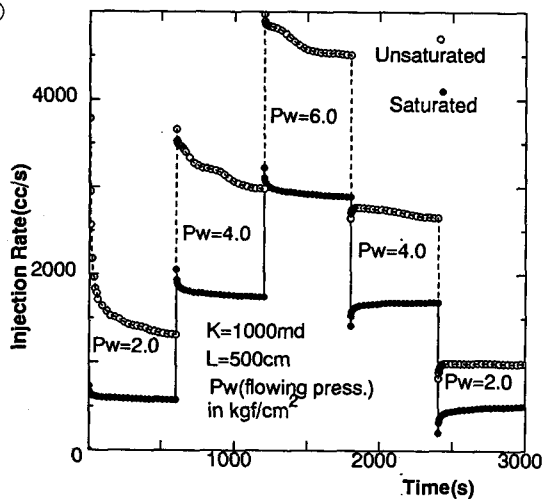


Fig.2 A result of multi-stage constant pressure test.

降圧過程は当然ことながら、定圧あるいは定流量注入過程においても T , P , Q が関連を持ちながら変化する。従って、様々な試験形態に対応するためには、ここで提案する変圧・変流量型解析が最も適用性が高い。以下にその基本式と適用性を述べる。

3. 1 変圧・変流量解析手法³⁾

注入圧力・注入量が時間と共に変化するような条件下でのウェルテストの解析式は、試験孔周辺での水平放射状流を仮定すると、無次元の圧力 P_D および時間 t_D を用い、重ね合わせの原理によって以下の式で示される。

$$P_i - P_{wf} = \frac{B\mu}{2\pi\alpha kh} \left[\sum_{j=1}^N (q_j - q_{j-1}) (P_{Dj-1} ((t_N - t_{j-1})_D) + s) \right] \cdots (1)$$

ここで、無次元圧力は以下の式で示される。

$$P_{Dj-1} ((t_N - t_{j-1})_D) = \frac{1}{2} (\ln(t_N - t_{j-1}) + \ln \frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0.80907) \cdots (2)$$

P_i : 初期間隙水圧 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] P_{wf} : 試験区間圧力 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$] k : 浸透率 [L^2]
 q_j : j 段階目の流量 [L^3T^{-1}] B : 容積係数 [-] μ : 静粘性係数 [$\text{ML}^{-1}\text{T}^{-1}$]
 ϕ : 間隙率 [-] c_t : 岩盤と水の合算圧縮率 [M^{-1}LT^2] t : 時間 [T]
 s : スキンファクター [-] α : 浸透率補正係数 [-]

ただし、単位系は atm , cm^3/s , cm , sec , darcy , cp とする。

従って、(2) 式を (1) 式に代入し、水平放射状流における基本式として以下の式が得られる。

$$P_i - P_{wf} = \frac{B\mu}{2\pi\alpha kh} \left[\sum_{j=1}^N (q_j - q_{j-1}) \left\{ \frac{1}{2} \ln(t_N - t_{j-1}) + \frac{1}{2} q_N \left(\ln \frac{k}{\phi\mu c_t r_w^2} + 0.80907 \right) + q_N s \right\} \right] \cdots (3)$$

(3) 式は、時間軸に沿って得られた P , Q データを、 Σ vs $\Delta P/q_N$ でプロットすることにより、全データを利用して精度良く kh を求めるために有効である。本研究では Newton 法を用いた非線形回帰によって (3) 式より初期間隙水圧 P_i および透水量係数 kh を推定する手法を導入した。

3. 2 解析結果および考察

(1) 飽和帯における解析結果

飽和帯における解析では、初期間隙水圧を既知と仮定すると 2 次元モデル、3 次元モデルともに Σ vs $\Delta P/q_N$ のプロットを行うと非常に良い直線性を示す。初期間隙水圧を未知としても (3) 式から非線形回帰によって、2 次元モデルにおいては透水量係数、初期間隙水圧ともに正確な値が推定できた。しかしながら飽和帯における 3 次元モデルを取り扱う場合、帯水層の厚さと透水区間長の関係によって疑似的なスキンファクターを導入する必要が生じるために、非線形回帰によって初期間隙水圧を求め、その初期間隙水圧による Σ vs $\Delta P/q_N$ のプロットから、疑似スキンファクターを考慮して透水量係数を算定することとした。

Fig. 3 に飽和帯の 3 次元モデルで初期間隙水圧を既知として線形回帰によって水理特性を求めた結果を示す。本解析モデルの浸透率は 1000md 、帯水層厚さは 20m である。また、初期間隙水圧は 1.678 気圧である。ここでは、層厚既知として浸透率に変換した値を示した。また、Fig. 4 に非線形回帰によって求めた初期間隙水圧から、透水量係数およびスキンファクターを解析した結果を示す。この結果より、より正確な解析を行うためには初期間隙水圧の計測が重要なことが理解される。しかし、初期間隙水圧が未知の状態においても、本解析手法を用いることにより、初期間隙水圧および透水量係数をほぼ同定する事が可能であることが示された。

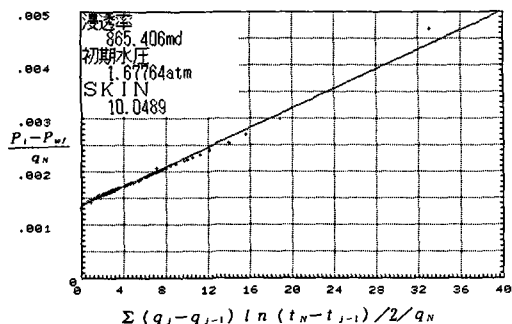


Fig.3 Result of variable rate analysis.
(Initial Pressure is known)

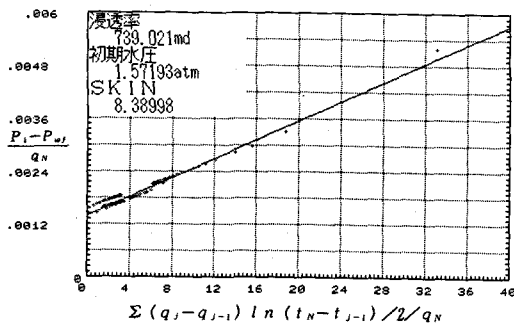


Fig.4 Result of variable rate analysis.
(Initial pressure is unknown)

(2) 不飽和帯における解析結果

不飽和帯での2次元モデルにおけるTPQ関係から Σ vs $\Delta P / q_N$ のプロットを行うと、定圧型、多段圧力型にかかわらずかなり良い直線性を示す。ただし、この直線から求められる透水量係数は常に真値より大きくなる。

登坂・小島(1990)に示されたような補正係数として、解析によって求められた透水量係数 $(kh)_{est}$ と、真の透水量係数 $(kh)_{TRUE}$ の比 $(kh)_{est} / (kh)_{TRUE}$ を採用し、様々な浸透率について2次元不飽和帯モデルにおけるスキンを考慮した解析によって補正係数 α の値を算出するとFig. 5に示したような関係となる。これから、補正係数が浸透率に依存することが示された。その関係は概ね以下のように考えられる。

$$\alpha = a \log k + b \cdots (4)$$

さらに有効差圧力 ΔP と補正係数 α の関係についても検討を加えた。3次元不飽和モデルに対して1段階の定圧注水試験を行い変圧・変流量解析を行った。結果によれば ΔP が 2 kgf/cm^2 程度以下の低い場合には α の値が上昇するが、 ΔP が上昇するに従い α は ΔP に対しては鈍感となる。この傾向は、浸透率が高くなるに従って顕著となる。以上を総合すると、一定圧力以上の試験結果に対して(1)～(3)式における Σ 項と差圧力項の間の傾き m' として、以下の補正式を組み込む必要があることが示唆される。

$$m' = \frac{B\mu}{2\pi(a \log k + b)kh} \cdots (5)$$

上記補正式にプロット結果から得られる m' およびFig. 5から得られる a, b を与える事によって、透水量係数 kh は非線形回帰によって求めることができる。

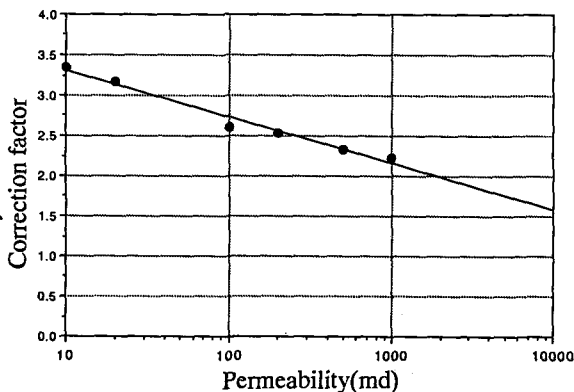


Fig.5 Correction factor in unsaturated zone.

(3) 解析による不飽和帯の特徴の検証

変流量解析式による Σ vs $\Delta P/q_N$ のプロットでは、飽和・不飽和の判定が可能であることも特長の一つである。以下に本研究で得られた不飽和帯の判別手法を示す。Fig. 6に、(2)で用いた3次元モデルを用いて、不飽和帯における多段階圧力試験データに対してスキンを考慮した解析を行った例を示す。ここでは、回帰に用いるデータとして全圧力段階における流量・圧力を用いている。不飽和の判別手法としては、以下の2通りの方法が考えられる。

- ① 非線形回帰による初期圧力値が1気圧を示す。
- ② 多段階圧力試験において、昇圧過程と降圧過程におけるプロット結果が異なる傾きを持つ。

以上の2点の判別方法の内、特に②が不飽和帯における特徴といえる。本現象を利用して、不飽和帯の判別が可能であると考えられる。その上で、不飽和帯での試験であることが判別できれば、初期水圧を既知(大気圧)として解析を行うことが可能である。

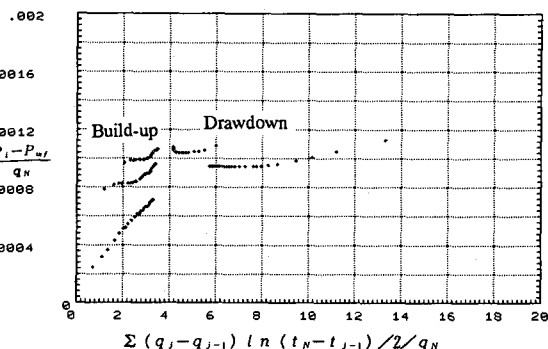


Fig.6 Variable rate analysis in unsaturated zone.

4. まとめと今後の課題

本研究では、ルジオン試験等の試験仕様も含めた広範囲の単孔透水試験に適用できる変圧・変流量解析手法を飽和帯および不飽和帯に適用した結果を示した。以下に本研究で得られた成果を示す。

- (1) 本手法を用いることによって、飽和帯においては透水量係数のみならず、従来の試験では厳密に求めることが困難であった初期間隙水圧を同定する事が可能である。
- (2) 本手法を不飽和帯に適用する場合は、浸透率に依存する補正係数を導入する必要がある。
- (3) 多段階圧力試験解析に本手法を用いる場合、降圧過程のデータに注目することによって、飽和帯・不飽和帯の判別を容易に行うことが可能である。

本研究は、地盤の水理特性をより迅速かつ適確に評価する手法として変圧・変流量解析の改良を行い、飽和帯および不飽和帯に適用したものであるが、不飽和帯においては今後より多くのケーススタディを行い、補正係数の定量化を行う必要がある。また、ここでは水平放射状流の基本方程式を適用し、実施した解析ケースでは妥当な結果を得ているが、試験区間長等の問題により他の基本式を用いる必要が生じる可能性がある。その際にはDoe(1991)⁴⁾の方法等を用い、あらかじめ流動形態を把握する必要がある。

このような単孔透水試験の適確な解析手法はパルステストにおける透水性逆解析手法における初期モデル推定等にも非常に有効なものと考えている。

<参考文献>

- 1) 山口嘉一, 弘末文紀, 松本徳久(1987): ルジオンテスト結果の解釈, 第19回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp. 56-60
- 2) 登坂博行, 小島圭二(1990): 三次元流動条件を考慮したルジオン値から透水係数への換算方法について 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 405-410
- 3) R.C. Earlougher Jr.(1977): Advances in well test analysis, Monograph vol.5 of H.L. Doherty, SPE-AIME
- 4) T.W.Doe(1991): Fractional Dimension Analysis of Constant-Pressure Well Tests. SPE 22702