

③2 非定常地下水流れを考慮した パルステストによる透水性逆解析手法について

東京大学工学部 正会員 登坂 博行
応用地質(株) 正会員○伊藤 一誠
東京大学工学部 増本 清
応用地質(株) 正会員 大塚 康範

A Method of Permeability Inversion with 'Pulsation Test' Considering Transient Ground Water Flow

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

ABSTRACT

The 'Pulsation Test' is an interference test in which pressure build-up and fall-off caused by cyclic fluid injection and shut-in are measured at respective points of multiple wells. The obtained transient pressure data can be utilized to reconstruct the spatial distribution of permeability.

In this paper, the authors discuss some characteristics of Pulsation test, and refer to the numerical technique of inversion using the developed inversion code which employs Powell's Hybrid Method as the nonlinear least squares method and FDM multiphase fluid flow simulator as the forward solution code.

Several 1-D test simulations were made to check the performance of the code using the data obtained from 1-D experiment.

1. はじめに

パルステストとは、適当に配置された複数ボーリング孔を用いた一種の干渉試験であり、地盤中に圧入される流体によって引き起こされる、注入孔ならびに周辺孔の圧力変化の経時的観測値を利用して、地盤中の透水性の分布を判断する試験方法である。パルステストにより地下の透水性分布を再現するためには、第一に圧力情報が空間的透水性の差異を十分に反映したものであり、かつ逆解析に十分な量であることが必要である。すなわち、圧力情報の質と量が問題となる。次に、非定常流動過程を扱う順解析手法と、それを含む効率のよい非線形最小2乗法が必要となる。

本論文では、パルステスト解析における上記諸点に関して、主にモデル計算により考察を加える。

2. パルステストにおける圧力情報の質と量

流体圧入に伴い岩盤各所に引き起こされる非定常流動は、各所の透水性を反映した圧力情報として孔内各点で観測される。圧力情報の質の差異、すなわち時間軸に沿う経時的観測値の個々の時間での積み重ねが、

岩盤の透水性や貯留性の識別には重要である。ここでは、空間に配置された各井戸を結んで作られる内部の領域を解析対象領域とし、その外部領域の物性は均質等方であるとして、2次元のモデル計算を行った。

解析に用いたモデルを図-1に示す。図-1は、半無限一様均質媒体中に設置された2本の孔間の領域に低透水性領域を設けた場合のモデルである。今回の解析では、周辺媒体と低透水性領域の透水性のコントラスト、および与える流量パルスの形状および回数を変化させて、圧力情報の差異の解析を行なった。

解析に用いた基本式は(1)式に示す通りで、ここでは簡単のため、水で飽和された1相流で計算を行なった。影響の評価には、均質モデル（中心の低透水性領域が存在しないモデル）での各圧力観測点での経時的な圧力と、不均質モデルでの圧力の差の2乗和を用いた。この値が大きいほど、不均質性が圧力値に強調されて現れることとなり、逆解析の可能性が高くなる。

$$\nabla \left(\frac{K}{\mu B} (\nabla (P - \rho Z)) \right) = \frac{\partial}{\partial t} (\phi / B) \quad \dots\dots\dots(1)$$

K：地盤の浸透率[L²] μ：水の粘性係数[ML⁻¹T⁻¹] B：水の容積係数[-] P：水圧[ML⁻¹T⁻²]
 ρ：水の密度（圧力換算値を含む）[ML⁻²T⁻²] Z：深度[L] φ：地盤の孔隙率[-]

上記の要因による圧力情報の差異の解析結果を、以下に示す。ここで示したものは、各発信点の内、低透水性領域の影響が最も顕著となる、発信点No.5を発信点とした場合の解析結果である。

図-2に、周辺媒体と低透水性領域の浸透率のコントラストの影響を示す。図に示した通り、浸透率のコントラストが強くなると、圧力情報の質の差が線形以上に大きくなることを示している。また、観測点の数が多い、すなわち情報の量が多ければ、より小さなコントラストも、観測にかかる程度に圧力の差異が増幅され、判別が可能になることが予測される。

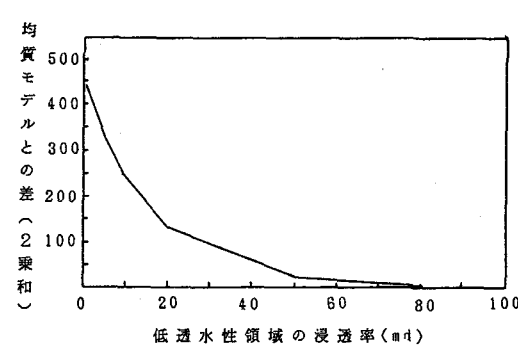


図-2 不均質性の観測圧力への影響

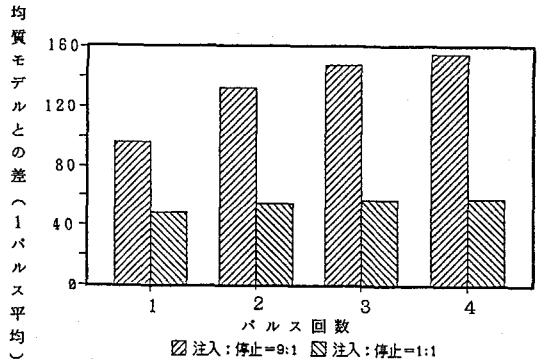


図-3 パルス波形・回数の影響

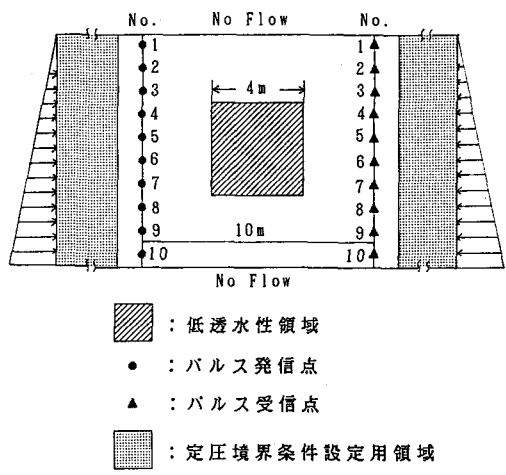


図-1 解析モデル図

図-3は、圧入-停止の時間間隔、およびパルスの回数を変えたときの圧力情報の差を示したものである。図より、圧入時間の比が大きいほど、パルス1回あたりの圧力情報の質の差が顕著になり、逆解析上有利になることが明らかである。

非定常過程に注目すると、比較的短い1サイクルの中で、注水時間を相対的に長くすることによって、圧力が定常状態となる前に、内部の境界条件が変化するため、繰り返しの効果が顕著となっていると考えられる。逆解析の可能性を考えると、より効率的な解析を行なうためには、ここで示したように、圧力が定常状態に達しないような形状と回数で流量パルスを送ることが重要である。

3. 逆解析手法について

前章では、地盤の状況による最適な流量パルスを発生させることによって、解析領域内の透水係数（浸透率）分布を再現する可能性が示された。そこで、次の段階では、非線形最小2乗法を用いた逆解析プログラムの開発を行なった。パルステストの圧力情報を逆解析するためには、順解析手法と非線形最小2乗法が必要となる。パルスを用いること、および非定常系の解析であることから、用いる解析手法に次のような点が要求される。順解析手法としては、1) 圧縮性（空気等）・微圧縮性（水等）の流体圧入と岩盤内流動を扱えるもの、2) 自由地下水面など相境界の影響が考慮できること、3) 解析領域内の不均質性を工学的な範囲内で考慮できるもの、4) 非線形最小2乗法との兼ね合いから計算速度の早いもの、等があげられる。非線形最小2乗法としては、1) 透水性等岩盤物性のとる値の範囲は非常に広いため、初期推定値にあまり依存しない強靱な収束性を持つこと、2) 非定常解析であるため、順解析の回数になるべく少なくすむこと、が要求される。本論文では、上記要件に従い、順解析法としては圧縮性多相流体系を扱う差分型油層シミュレータを使用した。また、逆解析で求めるパラメータは、差分法における各解析格子間の浸透率（隣接する解析格子の浸透率の調和平均値）とした。

非定常系に対する効率的な非線形最小2乗法の研究は多数あるが、計算時間の大部分を消費する順解析の回数を最小限に抑えながら十分な収束安定性を達成することは困難である。筆者らは、上記要件を満足すべくいくつかの方法を開発中である。ここでは、その一つとしてPowellのハイブリッド法に関して述べる。

Powellのハイブリッド法のフローチャートを、図-4に示す。

Powellのハイブリッド法とは、非線形最小2乗法の中で、いわゆるGauss-Newton法系、すなわち、目的関数の一次微分値のみを算出し、パラメータベクトルの修正量（修正ベクトル）を求める方法に属する。本手法の特徴としては、最急降下法とGauss-Newton法の折衷という形をとっているために、比較的非線形性の強い問題でも安定した収束挙動が得られることである。また、本解析手法の最も優れた点は、各反復ステップにおいてGauss-Newton解を求めるために必要なヤコビアン行列を、目的関数の勾配を計算せずに逐次修正することが可能であるという点である。ヤコビアン行列の逐次修正方法はいくつ

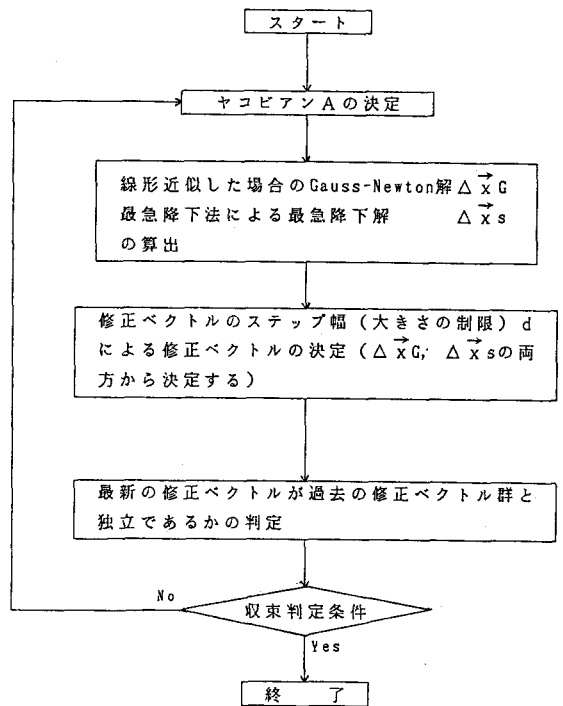


図-4 ハイブリッド法の流れ図

が提案されているが、ここでは、Broydenによるヤコビアン逐次修正アルゴリズムを用いて計算時間の短縮を図っている。

ヤコビアン行列の修正値 A' は、最新のパラメータ修正ベクトル $\Delta \vec{x}$ 、目的関数（計算水圧）の前段階からの変化量 ΔP_{cal} 、および前段階のヤコビアン行列 A より、(2)式に示す方法で求められる。

$$A' = A \Delta \vec{x} + (\Delta P_{cal} - A \Delta \vec{x}) \cdot \Delta \vec{x} / \|\Delta \vec{x}\|^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ただし、各反復ステップにおける残差2乗和が連続して増加する場合には、逐次修正を行わず、圧力の勾配をあらたに求めることにより、ヤコビアン行列を更新するという方法を採用し、安定した収束を図っている。

4. 一次元モデルにおける逆解析例

前章で述べた逆解析手法を用いて、一次元モデルにおける解析を行なった。解析は、登坂他(1989)の室内実験をモデル化して行なった。解析モデルを図-5に示す。解析に用いた観測値は、図-5の解析モデルに対して、室内実験を合致する解析条件（圧入流体は空気とし、圧入流量は時間とともに増加し、一定時間後に停止する）で求めた計算値を採用した。その計算圧力値を再現する透水性分布を、前述した逆解析手法によって求めたが、今回は、孔隙率は既知とし、各格子間の透水係数のみを再現するものとして逆解析を行なった。解析に用いた観測値（圧力経時変化）を図-6に示す。図中で、●で示したものが、パルス発信位置での圧力経時変化であり、▲で示したものが、受信位置における圧力経時変化である。このように、一秒おきの非定常的な圧力値をすべて観測値として用いることにより、求めるパラメータ数9（各格子間の透水係数の総和）に対し、28の観測データで同定を行なうこととなる。

以上のモデルに対して、ハイブリッド法による逆解析を行なった結果を、図-7に示す。初期値としては全格子の平均的な浸透率である2500md(2.5×10⁻³cm/s)で均質であるというモデルを採用した。107回の反復解析の後、図に示したように、最終的に真に近い透水性分布が十分再現される結果が得られた。

次に、逆解析のデータとして、図-6の●で示した、発信位置での圧力経時変化のみを利用した場合の解析を行なった。その結果を図-8

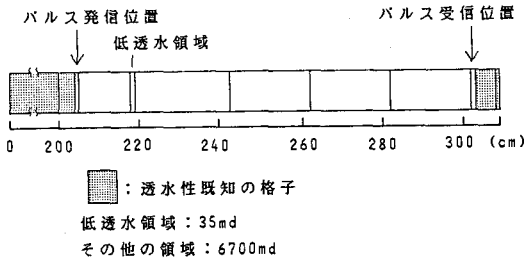


図-5 逆解析モデル図

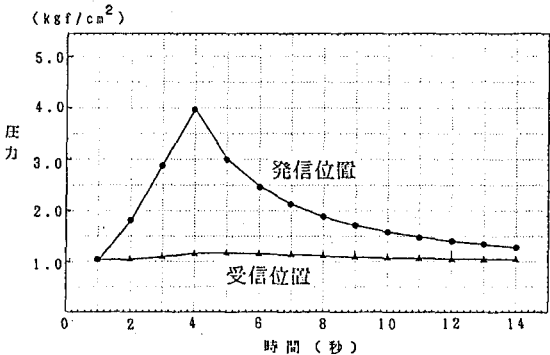


図-6 逆解析に用いる圧力経時変化

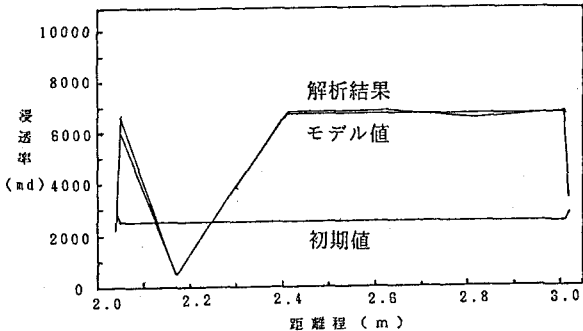


図-7 浸透率逆解析結果図

に示す。反復解析過程の中で、解析された圧力と、実測（図-6中●で示した解析結果）の残差2乗和が最小となった時点でのパラメータ値を結果として表示した。

この結果によると、発信位置の近傍に低透水性を示す部分が存在することは再現されているが、それ以外の部分の透水性は、発信孔近傍も含めて全く再現できていない。発信孔のみのデータしか用いていないために、観測データ数が図-7のケースより少ないことを考慮しても、単孔の圧力経時変化のデータから、周辺の不均質性を逆解析によって求めるということは、非常に困難であり、複数孔での圧力計測が非常に重要であるということがわかる。

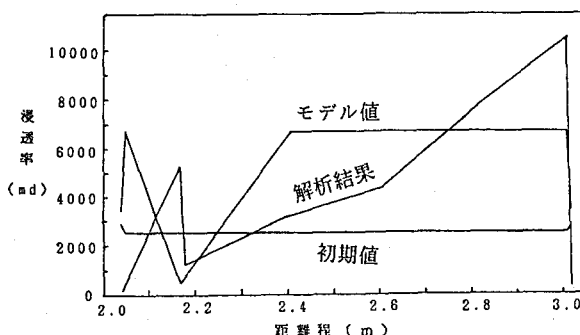


図-8 発信位置のデータのみを用いた場合の逆解析結果

5. まとめと今後の課題

本論文では、複数孔を利用したパルス試験により得られる圧力情報の質と量が、岩盤の不均質性やパルス形態によりどのように変化するかを考察するとともに、非定常圧力情報の逆解析法とモデル計算の結果を報告した。前章でも示されているように、空間各点の非定常圧力情報を用いることで、単孔試験では把握できないような、岩盤の物性分布を再現できる可能性がある。しかしながら、実際の三次元岩盤に適用された場合には、如何にして十分な質と量の圧力情報を得るか、といった岩盤自体と試験機器に依存した問題と、自由地下水面など流体相境界や解析領域外部物性の影響、三次元逆解析に要する膨大な計算時間等数値解析的困難を解決する必要がある。

謝辞

今回の研究にあたり、油層シミュレータの使用の許可を頂いた日本オイルエンジニアリング（株）に、感謝致します。

参考文献

- (1) Earlougher, R.C., Jr. (1977): "Advances in Well Test Analysis", Monograph Volume 5 of the Henry L. Doherty Series, Society of Petroleum Engineers of AIME.
- (2) 登坂博行, 小島圭二, 増本 清, 穂刈利之(1989): "ガスパルスを用いた地層水理特性評価法の基礎的研究", 日本応用地質学会平成元年度研究発表会講演論文集, pp41-44
- (3) 中川 徹, 小柳義夫(1982): "最小二乗法による実験データ解析", 東京大学出版会
- (4) TOSAKA, Hiroyuki(1989): "A Study on Special Technique for Field-scale Reservoir Simulation" 東京大学博士論文