

(95) 揚水試験における非定常データを利用したグラウト効果判定

応用地質株式会社 ○伊藤 一誠
東京大学工学部 増本 清
応用地質株式会社 大塚 康範

Evaluation of Grouting Effect with Transient Pressure Data Obtained in Pumping Well Testing

Kazumasa ITOH (OYO Corporation)
Kiyoshi MASUMOTO (University of Tokyo)
Yasunori OTSUKA (OYO Corporation)

ABSTRACT

In construction of large cavern at soft ground especially in urban area, permeability of ground should be dropped by grouting for the prevention of water inflow during construction. And, in grouting, monitoring improvement in permeability of the grouting area is indispensable for appropriate grouting.

In this study, the authors have introduced the pumping well testing and numerical inversion for the determination of grouting zone and permeability distribution, and applied this method to numerical experiments. The summarized results are as follows.

- (1) Transient pressure data that reflect the difference of grouting effect can be obtained by partial pumping with double packers and pressure measurement in surrounding boreholes by piezometers with multi packers and transducers.
- (2) By the numerical inversion making use of transient pressure data in partial pumping well testing, it is possible to determine geometrical distribution of permeability in grouting area.

1. はじめに

近年、都市部における大深度地下空間利用の必要性がクローズアップされてきている。その際の技術課題の一つに、地下空間掘削時の漏水を防止する目的で実施するグラウトの効果を適切に判定することが挙げられる。透水性に着目したグラウト効果としては、以下の点を明らかにする必要がある。

- 1) グラウトの空間的な充填状況
- 2) グラウト充填部の透水性

従来、以上の調査はルジオン試験等の単一孔を利用した透水試験によって行われてきた。しかしながら、グラウトの空間的な広がりを検証するためには数多くのボーリング孔を掘削し、透水試験を実施したうえで、その結果を補間する必要がある。筆者らは、割れ目系岩盤に対し透水性の空間的な分布を把握する調査・解析手法として、パルステストおよびそこから得られる非定常的な圧力データを用いた浸透流逆解析手法を提案してきている^{1),2)他}。一方、軟弱な地盤に対しては、従来より揚水試験が多く実施されているが、解析条件として均質媒体を仮定しているため地盤の細かい不均質性を捉えることは困難であった。本論文では、このような地盤に対して、揚水試験で得られた非定常的な圧力データを用いた浸透流逆解析によってグラウトの効果判定を効率的に行なう方法を提案し、数値実験によってその適用性を検証する。

2. 解析方法

ダム基礎岩盤等におけるグラウト効果判定には、ルジオン試験をはじめとする単孔透水試験が一般的に用いられてきた。この方法では、試験孔周辺の線的な透水係数分布が表現されるのみであり、各試験孔間に関しては人為的な補間を行なうため、グラウトの空間的な分布を精度良く把握するためには数多くの試験孔を掘削し、試験を実施する必要がある。このような地盤で、効率的にグラウト効果判定を行なうためには、パルステストやここで述べる揚水試験を利用した試験・解析が有用と考えられる。

従来、揚水試験においてはTheisの式等、均質媒体中の理論解によるタイプカーブフィッティングを利用した解析が行われてきた。しかしながら、それらの理論解は均質媒体等の非常に単純なモデルを対象としているため、本研究で対象としているようなグラウトの壁面が形成される場合や、その一部にグラウトの欠落が存在する場合などの複雑なモデルに対して適用することは困難である。そこで、筆者らは、注水式の干渉試験の一種であるパルステストで用いている数値的な逆解析手法を揚水試験に適用し、地盤中の3次元的な透水係数分布を再構成することによって、グラウトの空間的な広がりおよび透水性の改良効果を判定する方法を提案する。

3次元での1相流体の流動における基本方程式は、以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k_x}{\mu B} \frac{\partial}{\partial x} (P - \rho g z) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k_y}{\mu B} \frac{\partial}{\partial y} (P - \rho g z) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{k_z}{\mu B} \frac{\partial}{\partial z} (P - \rho g z) \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi}{B} \right) \quad \cdots (1)$$

ここで、 μ ：水の静粘性係数 B ：水の容積係数
 k ：浸透率 P ：水圧
 ρ ：水の密度 g ：重力加速度
 z ：深度 ϕ ：孔隙率

上の(1)式の内、逆解析では空間的に分布した各観測点における水圧の経時変化を既知量として、浸透率（透水係数） k の空間的な分布を求める。その際に、 N 個の観測点、 M 回の時間ステップにおける観測圧力 P_{obs} と計算圧力 P_{cal} の残差2乗和、

$$J = \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N (P_{cal, i, k} - P_{obs, i, k})^2 \quad \cdots (2)$$

を目的関数とし、これを最小とする浸透率分布を非線形最小2乗法（準ニュートン法）を用いて求める。その際に計算効率を向上させるため、目的関数の微分値を計算する方法として最適制御理論を導入し、非線形最小2乗法1回の反復ステップでの順解析回数を1～2回程度に低減させている。^{3), 4)}

揚水試験を利用した浸透流逆解析の流れを図-1に示す。

3. 順解析による圧力挙動の特徴

ここでは、グラウトによる透水性の一部低下によって、揚水試験時の圧力挙動がどのように影響されるかを、3次元浸透流解析シミュレーションを用いて検証した結果を示す。本解析の最終的な目的は、浸透流逆解析で解析可能な圧力データを得るために、どのような測定方法が必要となるかを検証することである。解析には、差分法を用いた3次元2相の圧縮性流体を対象とした浸透流シミュレータを用いた。解析における物理モデルは、グラウトの壁で囲まれた部分の中心に揚水孔を配置し、グラウト壁の外側の4孔を水位観測孔として用いるという設定を行った。また、グラウトは深度GL-40m～65mの25m区間に施工するものとし、グラウト壁面の内1面の中心部が改良されていないというモデルを設定した。本研究では、グラウト対象外の地盤

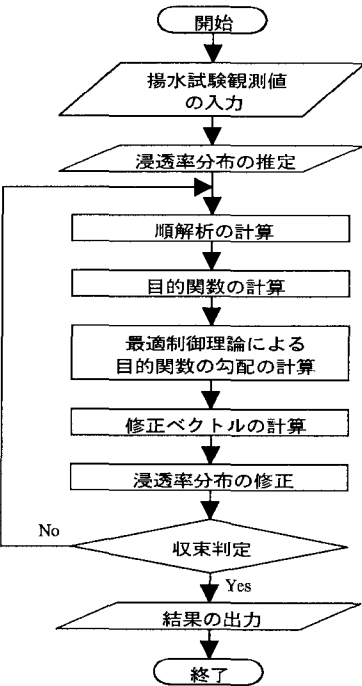


図-1 浸透流逆解析フローチャート

の透水係数を $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 、グラウト部分の透水係数を2オーダー低い $1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ として解析を行なっている。解析モデルの大きさは、 $124 \text{ m} \times 124 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ で、解析グリッド数は $23 \times 23 \times 17$ ヶとしている。また、水位観測孔は一辺 6 m の正方形の頂点部に配置し、揚水孔はその中心に配置している。図-2にグラウト未改良部の水平断面、図-3にグラウト未改良部を含む鉛直断面を示す。

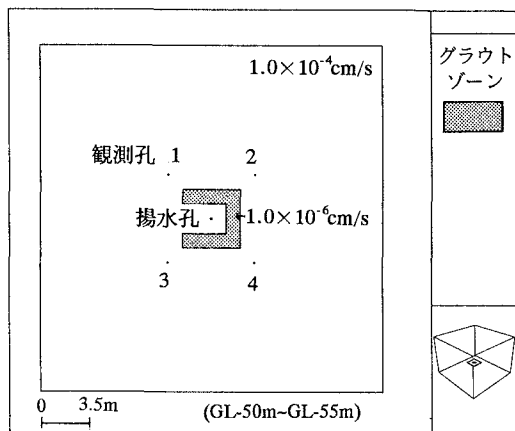


図-2 未改良部を含む深度の水平断面

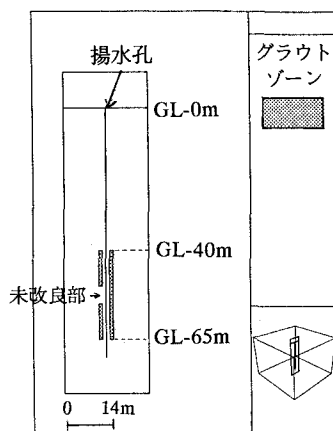


図-3 未改良部を含む鉛直断面

揚水の方法としては、従来の揚水試験で行なわれているようにパッカー無しで孔底から揚水を行なう方法と、ダブルパッカーで特定区間を遮断してその区間からのみ揚水を行なうパルステストを応用した方法の2種類の方法を採用している。また、周囲の観測孔では多段パッカー式の間隙水圧計の利用を想定し、各区間を遮断した形のモデル化を行なっている。図-4に孔底からの揚水を想定した場合の圧力経時変化の例を示す。また、図-5に各揚水区間を遮断した場合の圧力経時変化の一例を示す。それぞれ、観測孔の圧力変化はグラウト未改良部が存在する層（GL-50m～GL-55m）におけるものを示している。また、揚水量は両者とも 2 l/min という想定で実施している。

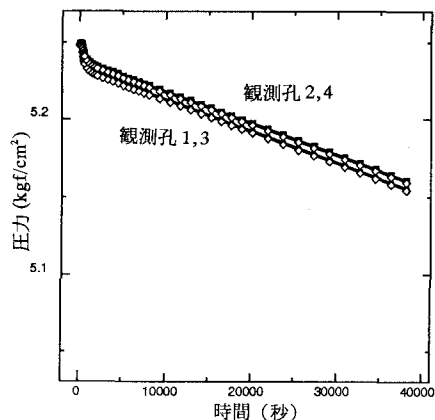


図-4 各観測孔における圧力経時変化
(孔底からの全体揚水)

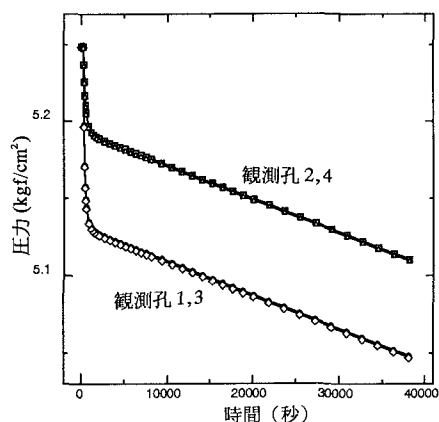


図-5 各観測孔における圧力経時変化
(未改良深度からの部分揚水)

揚水区間を遮断した解析結果は、グラウト未改良部方向の圧力観測孔（1,3）での圧力低下が他の部分と比較して明瞭に大きく、グラウト未改良部の影響を強く反映した結果となっている。しかしながら、揚水を孔底からのみ行った設定では、揚水によって与えるインパクトが深度方向全体に広がり、グラウト未改良部では弱められてしまうため、グラウト壁面方向およびグラウト未改良部方向の圧力低下に明瞭な差が現れない。従って、現実の計測を行なう場合には、高精度の圧力センサーを用いた場合でも、グラウト改良度の違いによる圧力経時変化の相異が測定誤差範囲内に収まってしまう可能性がある。また、その結果を用いた逆解析においても、グラウト改良度の違いを十分に表現したデータではないため、解析効率が落ちるか、あるいは解析ができない可能性が高い。

図-6に揚水区間の遮断を行わない場合、図-7に遮断を行った場合の、鉛直断面内での揚水開始から2時間後における圧力低下状況を水位コンター表示で示す。揚水区間を遮断しない場合には、揚水によって全体的な水位低下を起こすのみであるが、揚水区間を遮断した場合には部分的に水圧を低下させることが可能なことが理解される。

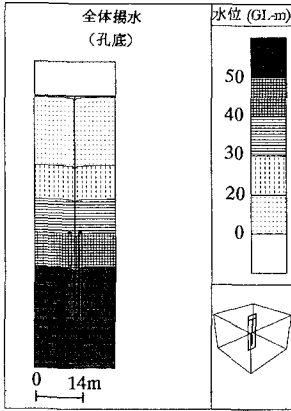


図-6 揚水に伴う水位低下
(孔底からの全体揚水)

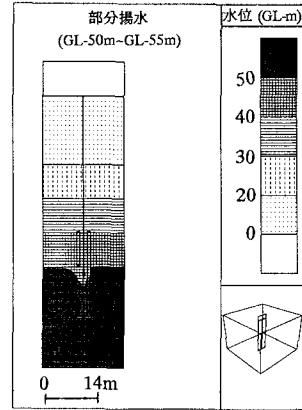


図-7 揚水に伴う水位低下
(未改良部分からの部分揚水)

4. 逆解析によるグラウト効果判定

ここでは、2章で述べた浸透流逆解析手法を用いて、グラウト効果判定を行った数値実験例を示す。前章で、揚水区間を遮断する方法によって不均質性をより反映した圧力データが得られることが示されたため、逆解析は揚水区間を遮断したモデルで行なっている。逆解析の未知パラメータは離散化に用いた差分格子の各格子間の浸透率として解析を行った。グラウト後のモデルは3章の順解析で用いたものと同様のモデルで解析を行なっているが、解析に要する計算時間の低減のために、モデル全体を格子数 $15 \times 15 \times 8$ に粗く格子分割し直している。その際に、揚水孔における圧力に関しては、Piecemanの式を用いて、シミュレーションによって計算された格子内の平均的な水圧から孔井内実際の水圧への補正を行なっている⁵⁾。このモデルでの未知パラメータ数は1,044ヶである。

逆解析においては、適切な初期モデル(透水係数分布)を得ることが安定した解を得るための必要条件である。一般の地盤調査においては、単一孔での透水試験結果、あるいはボアホールテレビによる亀裂調査結果等の地質データを用いて初期モデルを作成するが、本研究のようなグラウト効果判定においては、グラウト前のモデルに加えて以下の設計量を用いて初期モデルを作成することが可能と考える。

- 1) 設計時に想定したグラウトの注入範囲
- 2) グラウトによる透水係数の改良目標値

本研究は、数値実験として均質モデルにグラウト範囲を設定して解析を行なっているため、初期モデルとしては $1.0 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ の地盤中に、グラウトが設計通りに充填されているというモデルを初期モデルとしている。本研究のような数値実験では、この設定のように正しいモデルに近い初期モデルから解析を開始することが可能であるが、実際の地盤に適用する場合には、グラウト施工前に同様の試験・解析を実施し、地盤のグラウト前における透水係数分布の不均質性を把握することが不可欠である。

逆解析の反復ステップ数50回終了時における逆解析結果を図-8および図-9に示す。図-8は、グラウト未改良部の上部層における水平方向の透水係数分布逆解析結果を示したものであり、図-9はグラウト未改良部の水平方向の透水係数分布逆解析結果を示したものである。ここでは、

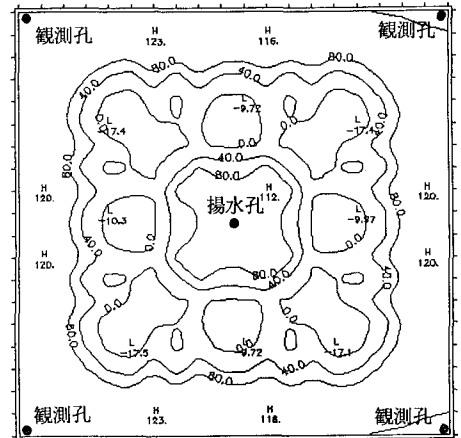


図-8 水平方向の透水係数分布逆解析結果
(未改良部の上部層における水平断面)

逆解析の反復ステップ数50回での解析結果を示している。

両結果ともに、逆解析で得られた透水係数と改良目標値 (1.0×10^{-6} cm/sec) との差を等高線図表示している。解析結果を見ると、図-8のグラウト未改良部の上部においては、グラウト部の4辺全体が低透水部分で取り囲まれており、グラウトの欠落が生じていない。一方、図-9のグラウト未改良部を含む水平断面の解析結果においては、低透水性のグラウト壁が不連続となっており、グラウト壁を横断して高透水性部分が存在することが表現され、グラウトの欠落が逆解析結果からも確認されている。ただし、図-8、図-9ともに壁面横断方向に比べてグラウト壁面に平行な方向で再構成の精度が劣る結果となっている。これは、周辺部の圧力観測孔が正方形の頂点部のみに配置されているため、グラウト壁面に平行な方向に関しては流動が生じにくいことが一因している。これを解決するためには、圧力観測孔と揚水孔を交換する等の計測上の工夫が必要であるが、グラウトの効果判定という面では、本解析結果のみでも工学的に有用な解析結果と考えられる。

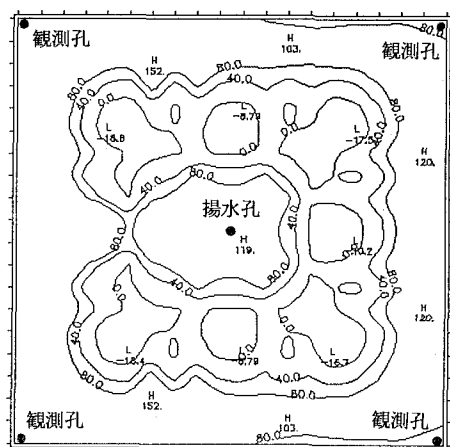


図-9 水平方向の透水係数分布逆解析結果
(未改良部の深度における水平断面)

5. まとめと今後の課題

本研究では、グラウトの効果判定に対して、揚水試験およびその非定常的な圧力変化を用いた浸透流逆解析を適応することを提案し、その数値実験結果を示した。本研究の結果から得られた成果を以下にまとめる。

- 1) 揚水区間をダブルパッカーで遮断し、周辺の圧力観測孔においても各深度の水圧変化を独立に計測可能なシステムを用いることによって、グラウト効果の不均質性を強く反映した圧力データを得ることが可能である。
- 2) 非定常圧力データを非線形最小2乗法による浸透流逆解析に適用することによって、揚水試験結果より、最少の試験孔配置でグラウトによる透水性改良部分の空間的な分布およびその透水性を効率的に把握することが可能である。

今後、実際のグラウト試験に本計測および解析手法を適用することを考慮した場合の課題としては、以下のことがあげられる。

- 1) ダブルパッカーで揚水区間を遮断した上で、揚水しながらその区間の間隙水圧を同時に計測する測定システムの開発。
- 2) グラウト前に、グラウトの注入範囲の透水係数を的確に予測する解析手法の開発。

逆解析の効率性は、初期モデルの適否に大きく左右されるため、精度を求められる場合にはグラウト前の地盤の透水性分布を、パルステストや今回の解析手法を用いて的確に評価しておくことが特に重要である。

謝辞：本研究を進めるにあたり、ご指導、ご助言を賜りました東京大学工学部資源開発工学科、登坂博行助教授に感謝致します。

参考文献

- 1) 登坂博行, 伊藤一誠, 増本 清, 大塚康範(1990): 非定常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, 土木学会第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.156-160
- 2) 伊藤一誠, 増本 清, 登坂博行, 大塚康範(1990): パルステストによる岩盤水理特性分布の逆解析, 日本応用地質学会平成2年度研究発表会講演論文集, pp.97-100
- 3) 嘉納秀明(1987): システムの最適理論と最適化, コンピュータ制御機械システムシリーズ, コロナ社
- 4) 登坂博行, 増本 清, 伊藤一誠, 大塚康範(1990): パルステストデータを用いた岩盤水理特性分布の3次元逆解析手法, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.399-404
- 5) 増本 清, 登坂博行, 伊藤一誠(1992): パルステストデータによる岩盤水理特性分布逆解析手法の実用化に関する研究, 土木学会第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.56-60