

(29) 正弦波圧力試験データを用いた原位置岩盤内の透水係数分布の逆推定

電力中央研究所 正会員 ○ 田中 靖治
同 上 正会員 本島 勲

Estimation of Spatial Distribution of Hydraulic Conductivities in Rock Mass by Back Analysis using Data of Crosshole Sinusoidal Pressure Test

Yasuharu TANAKA, Central Research Institute of Electric Power Industry
Isao MOTOJIMA, Central Research Institute of Electric Power Industry

Abstract

In this study, crosshole sinusoidal pressure tests were performed at a granite site and the spatial distribution of hydraulic conductivities in the granitic rock mass could be estimated by the inversion analysis using the data of the crosshole tests. The distance between the source borehole and the receiver ones is 10 m. Sinusoidal pressure was observed along 208 measuring lines among the 352 lines. A numerical code has been developed on the basis of the method of non-linear least squares and used to estimate the spatial distribution of hydraulic conductivities.

1. はじめに

近年、LPGや石油の地下貯蔵、放射性廃棄物の地層処分、圧縮空気の下地貯蔵等、地下に大規模な土木構造物を建設することが注目されている。これら地下構造物の立地選定、建設や環境への影響評価にあたっては、岩盤の水理特性の把握が極めて重要な問題となる。しかし、従来より一般に実施されてきたルジオン試験等の単一孔による透水試験では、得られる透水係数等の物性値が試験位置を含むどの範囲の岩盤の物性を表わしているのか明確でなく、特に、不均一性の著しい岩盤のボーリング孔間の物性分布の推定には適当とは言いがたい。そこで、本研究では花崗岩サイトにおいて多孔式の透水試験である正弦波圧力試験を実施し、その結果を基に逆解析によりボーリング孔間の透水係数の分布を推定することを試みた。

2. 正弦波圧力試験

(1) 試験サイトの概要

試験サイトは海岸線から数十メートル離れた平地に位置している。そして、図-1に示すように、深さ60mの3本の鉛直ボーリング孔が、中心孔に対して点対称となるように10mの間隔で掘削されている。

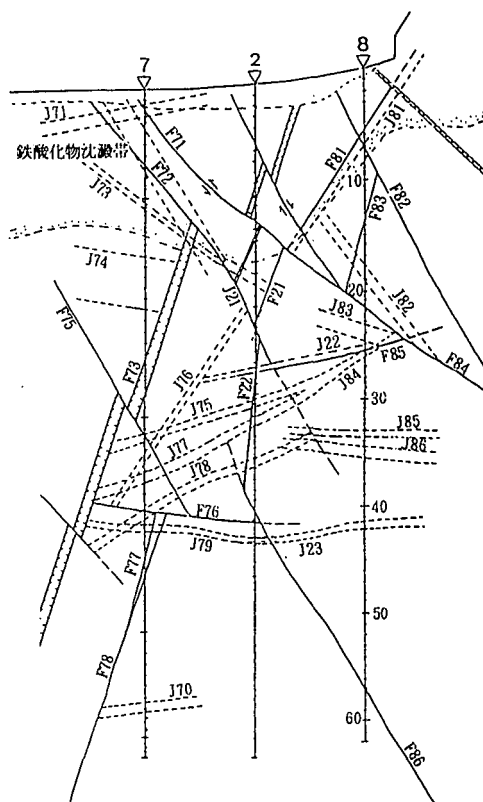


図-1 試験サイト付近の主要な割れ目構造

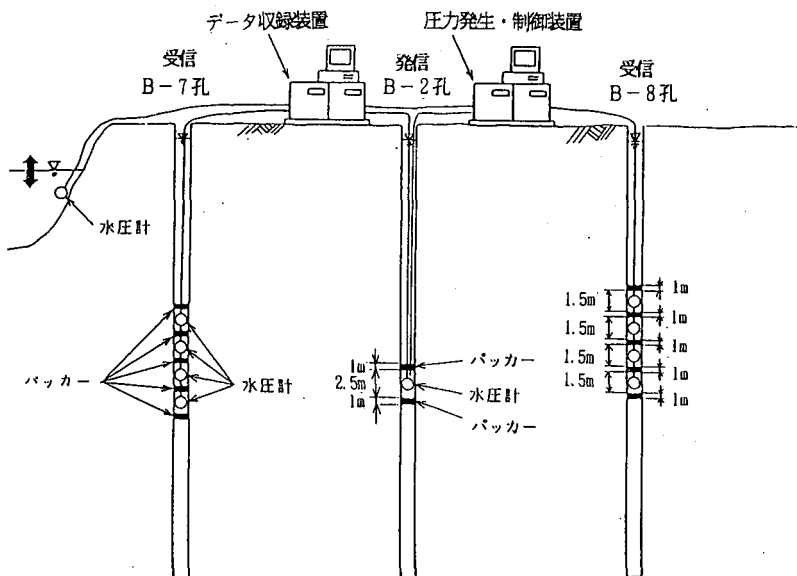


図-2 正弦波圧力試験装置の概要

試験サイト付近の地質は、領家花崗岩類に属し、強片麻状花崗閃緑岩・片麻状花崗閃緑岩および泥質岩起源のホルンヘルスに区分される。主要な割れ目構造は、図-1に示したように固結破碎帯と系統的節理に区分される。

また、別途実施された単孔式透水試験により得られた透水係数の平均値は $6.56 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$ であった。

(2) 試験方法¹⁾

試験では、中央のボーリング孔 (B-2孔) を発信孔とし、他の2孔 (B-9, B-10孔) を受信孔とした。試験の対象範囲は各孔のG. L. -17.5~57.5m間である。試験装置の概要は図-2に示す通りであり、発信孔内の特定区間の水圧を時間の経過とともに正弦波状に変動させ、それに対する受信孔の水圧の応答を計測した。

発信、受信はパッカーで各孔を2.5m毎の区間に区切って行った。ただし、受信に関しては、5連のパッカー (長さ1m) を使用して各孔4区間の同時計測を行うため、実際の計測区間長は1.5mとなる。試験対象範囲の中で順次発信および受信区間を移動させていき、全部で44回の試験を実施しており、全測線数は352となった。

発信区間の水圧は、一定の基準圧力の周りで正弦波状に変化するように制御した。本試験で使用した計器での受信圧力の計測精度は 0.0005 kgf/cm^2 程度であるため、受信圧力の振幅がそれを下回る場合その測線ではデータが欠落することになる。透水係数分布の高精度な推定を行うためには、できるだけ多くの測線でデータを取得することが望ましい。発信圧力の正弦波の振幅が大きいくほど、同一測線上での受信圧力の振幅も大きくなる。そのため、ポンプの給水能力 (最大注入流量 60 リットル/分) の範囲内で、発信圧力の振幅を可能な限り大きくすることとした。今回の試験では、発信圧力の振幅は発信区間の透水係数に応じて $0.25 \sim 3.0 \text{ kgf/cm}^2$ の範囲で適当な値を選

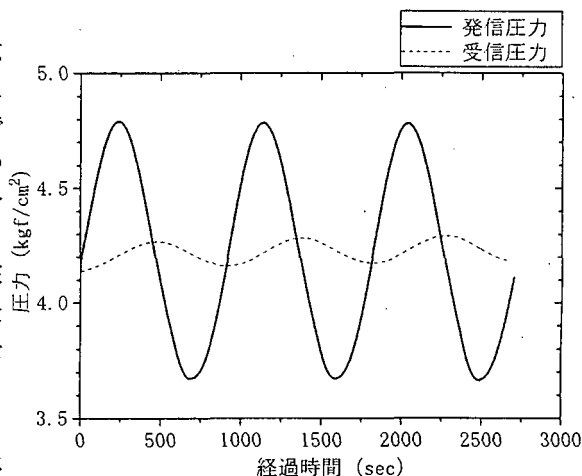


図-3 計測結果の例

択した。

また、正弦波圧力試験においては、発信圧力の正弦波の周期が長いほど、同一測線上での受信圧力の振幅が大きくなる。そのため、やはり周期を可能な限り長くすることが望ましいが、受信孔であるB-7、B-8孔の付近に掘削された他のボーリング孔における自然状態での間隙水圧測定では、潮位の影響により最大で 0.088kgf/cm^2 もの振幅をもった間隙水圧の変動が計測された。そこで、受信圧力の計測値から潮位による影響を除去しやすくするため、発信圧力の正弦波の周期は15分とし、1回の試験では3周期分の発信・受信データを取得した。注入流量および潮位の計測も併せて実施した。

(3) 試験結果

今回の試験では、全測線数352のうち208の測線で受信圧力に 0.0005kgf/cm^2 以上の正弦波状の反応が確認された。計測結果の例を図-3に示す。また、図-4には大きな受信-10m

圧力の得られた測線の分布を示す。
大きな受信圧が得られた測線は、コア観察やボアホールテレビスキャナーを用いた孔壁観察により確認された低角度の系統的割れ目帯J78、J85、J86や主要固結破砕帯F77、F78の存在箇所と良く一致している（図-1参照）。F77、F78それ自体は難透水性であると思われるが、周辺に透水性の高いゾーンが存在している可能性が考えられる。

また、強い応答の認められた受信区間は、単孔式透水試験で $1 \times 10^{-5}\text{cm/sec}$ 以上の大きな透水係数の得られたゾーン（B-7孔：G.L.-35~-40m、-45~-60m、B-8孔：G.L.-15~-20m、-30~-35m、-55~-60m）におおむね一致している。

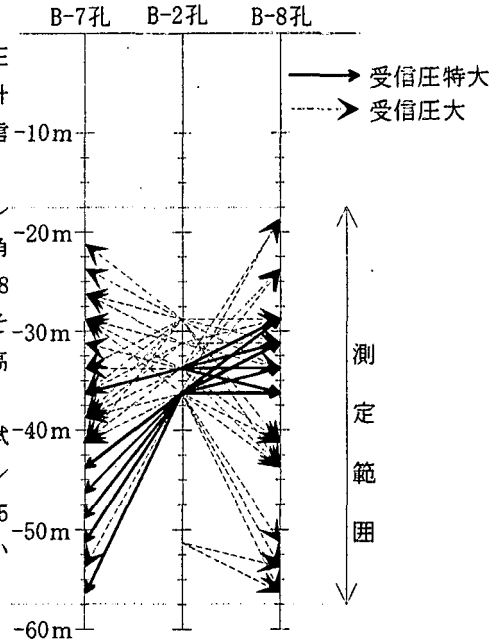


図-4 受信圧の大きな測線の分布

3. 透水係数分布の推定

正弦波圧力試験の結果に対する解析は、従来は主に岩盤を均質な多孔質媒体としてモデル化したり、あるいは、母岩と割れ目のかなり理想的な幾何学形状のモデルを想定して求めた解析解を利用して行われてきた^{(1),(2),(3)}。しかし、今回試験を実施したような割れ目系岩盤においては、透水性は一般に不均質であり、また、割れ目の分布状況も非常に複雑である場合が多い。そこで、本研究においては、逆解析により岩盤内の透水係数の分布を求める。

解析モデルを図-5に示す。解析は2次元で行なった。また、解析に用いた有限要素は $0.5 \sim 2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ の四角形要素である。透水係数の推定領域は、G.L.-13.75~-61.25m、B-2孔の左右15mの範囲である。

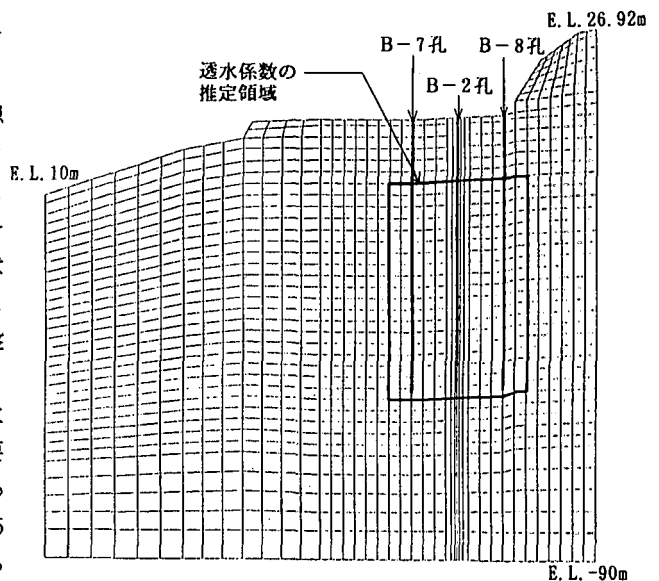


図-5 解析モデル

解析に先立ち、前処理としてFFT解析により受信圧力の観測値から発信圧力の基準圧力と潮位の影響による成分を除去した。そして、発信圧力の正弦波状の変動に対する応答成分のみを逆解析用データとして使用した。

逆解析の手順の概略を図-6に示す。解析の手順としては、最初に、試験1ケース分について発信圧力の変動に伴う受信点の水圧の経時変化を、順解析により計算する。そして、その結果を基に受信圧力に関する計算値と観測値の誤差（目的関数）を計算し、誤差が許容範囲に収まっていなければ、その誤差を減らすような透水係数の修正量を算定する。透水係数の修正量は、準ニュートン法を用いた非線形最小自乗法により求める⁴⁾。全試験ケースについて同様な計算を繰り返す。全ケースの計算が終了した時点で、平均誤差が許容範囲に収まっていなければ、図-5に示した推定領域内の透水係数分布を修正し、再び同じ作業を収束するまで繰り返す。

今回の解析には、比較的大きな受信圧の得られた13ケース分の計測データを使用した。解析に使用した測線の分布を図-7に示す。

また、境界条件を図-8に示す。右側境界の水圧としては、そこに位置するボーリング孔での間隙水圧の実測値を与えた。

一方、透水係数の初期値としては、地質調査や単孔式透水試験の結果を基に作成したルジオンマップの値を使用した。透水係数の推定領域における初期値の分布を図-9に示す。

逆解析の結果算定された透水係数の分布を図-10に示す。逆解析の結果得られたB-2、B-7、B-8孔上の透水係数は、分布の傾向として

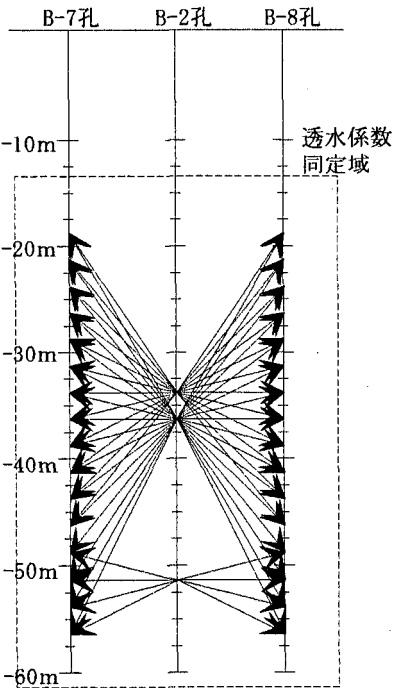


図-7 解析に使用した測線

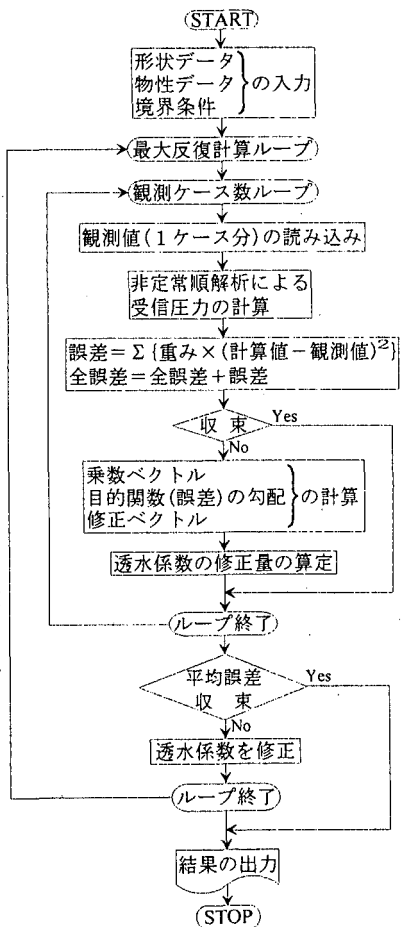


図-6 解析のフロー

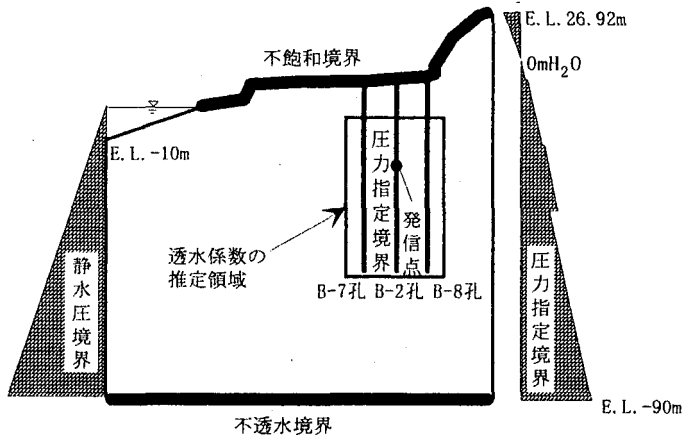


図-8 境界条件

は単孔式透水試験の結果と比較的良く一致した。また、領域上部の比較的透水係数の大きな部分は、J78, J85, J86等の系統的割れ目帯の位置と良く一致している。

4. まとめ

花崗岩サイトにおいて正弦波圧力試験を実施し、その計測データを基に逆解析を行うことにより、透水係数の空間分布を推定することができた。今後は、逆解析コードを3次元に拡張し、透水係数の推定精度の向上を図る予定である。

<参考文献>

- 1)Black, J.H., Barker, J.A., and Noy, D.J. : Crosshole investigations - the method, theory and analysis of crosshole sinusoidal pressure tests in fissured rock, Stripa Project IR 86-03. SKB, Stockholm, 1986.
- 2)Black, J. H., and K. L. Kipp, Jr., Determination of hydrogeological parameters using sinusoidal pressure tests : A theoretical appraisal, Water Resources Research, Vol. 17, No. 3, pp. 686 - 692, 1981.
- 3)Noy, D.J., Barker, J.A., Black, J.H., and Holms, D.C.: Crosshole investigations - implementation and fractional dimension interpretation of sinusoidal tests, Stripa Project IR 88-01. SKB, Stockholm, 1988.
- 4)登坂博行, 増本清, 伊藤一誠, 大塚康範 : パルス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, 1990.

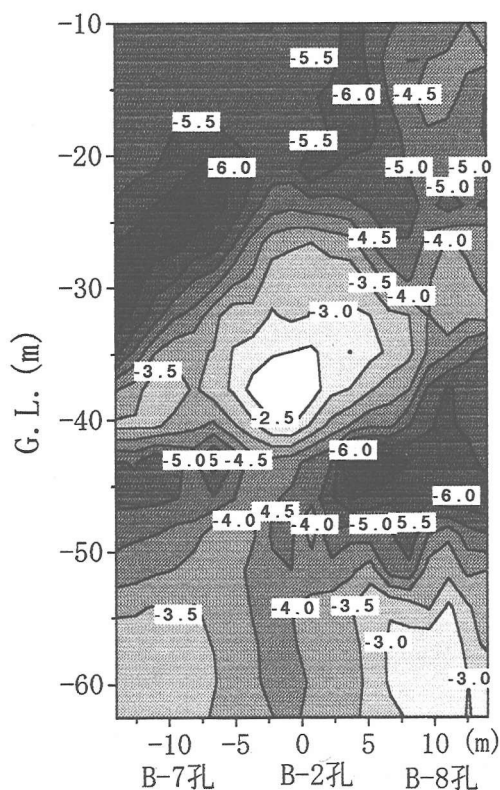


図-9 透水係数の初期値
(cm/sec単位の数値の対数表示)

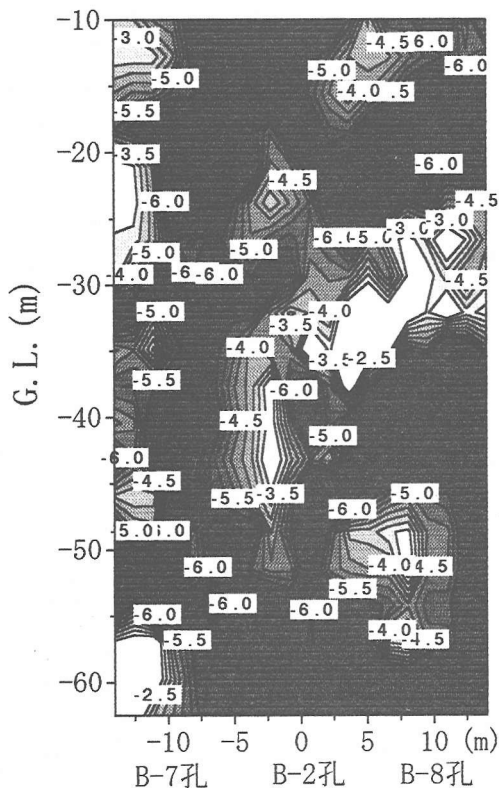


図-10 透水係数の推定結果
(cm/sec単位の数値の対数表示)