

(31) パルステストを用いた 不均質性岩盤の透水性調査手法について

応用地質(株) 正会員 大井 幸雄
同 正会員 〇大塚 康範
同 正会員 伊藤 一誠

A Permeability Testing Method of Heterogeneous Rock Masses
with 'Pulsation Test'

Yukio OHI, OYO Corporation
Yasunori OTSUKA, OYO Corporation
Kazumasa ITOH, OYO Corporation

ABSTRACT

In heterogeneous rock masses, it becomes very important to determine geometrical distribution of permeability. Especially in discontinuous rocks, it is indispensable to evaluate both permeability and continuity of flow paths.

The authors developed a cross-hole interference test named 'Pulsation Test' to investigate the spatial distribution of permeability, and testing instrument which consists of pulsation generator and pulsation measuring unit installed in the borehole.

In this paper, the authors propose the outline of the pulsation test method and the testing instrument, and some remarks about engineering applications.

As the result, it is shown that the pulsation test proposed here is applicable to wide ranged rock masses with permeability, and it is important to design the appropriate pulsation pattern to evaluate effectively the heterogeneity of rock masses.

1. はじめに

近年、割れ目系岩盤のような高度の不均質性を有する地盤の透水性調査、およびダムの基礎岩盤におけるグラウトの効果判定等において、岩盤中の透水性の空間的な分布を把握する必要性が増大してきている。従来の透水性調査手法に加え、特にそのような調査に有効な手段として、著者らはパルステストの開発を行っている。ここで述べるパルステストは、高透水性の開口割れ目から、低透水性の岩盤まで非常に幅広い範囲を対象としている。そのために、試験装置に要求される能力は、地上から孔内への流量制御、あるいは圧力計測の精度等、非常に多岐にわたっている。今回、著者らは、そのような要求を満たし、広範囲の透水性地盤に対して有効と考えられる、パルス試験装置の開発を行なった。

本論文では、パルステスト、および今回開発を行なった試験装置の概要を紹介するとともに、パルステストを行なう上での留意点について述べる。

2. パルステストの概要

パルステストの模式図を図-1に示す。パルステストは、2本以上のボーリング孔間を利用して、一方のボーリング孔の各深度に、矩形波状の流量の水を注入し、他方のボーリング孔の各深度で、ボーリング孔間の水理特性に起因する、応答圧力の経時変化を計測することで、孔間の地盤の透水係数（浸透率）の分布を再現する透水性調査手法である。

断層や節理等の地質的不連続面が顕著な岩盤において、地下水の流動挙動を把握しようとする場合、断層や節理等の地質要素を反映したマクロな岩盤の透水性を求める必要がある。これらの要求に対して、ルジオンテスト、JFT、トレーサー試験などが、岩盤内の地下水調査に広く利用されている。これらの調査を実施することにより、岩盤の透水性、間隙水圧、漏水の有無等の水理情報を得ることは可能であるが、マクロ的な岩盤の透水性を求めるためには数多くの試験を行なう必要があった。これに対し、パルステストを実施することにより、工学的に問題となる透水経路がより明確に把握できることから、上述の試験結果を有効に利用できることになる。

不連続性岩盤の場合は、ここで求められた孔間の透水係数分布より、水みちとなる断層・節理の連続性、透水性を判断することが可能である。また、試験結果は、ルジオンマップ作成上の重要な判断材料となる。

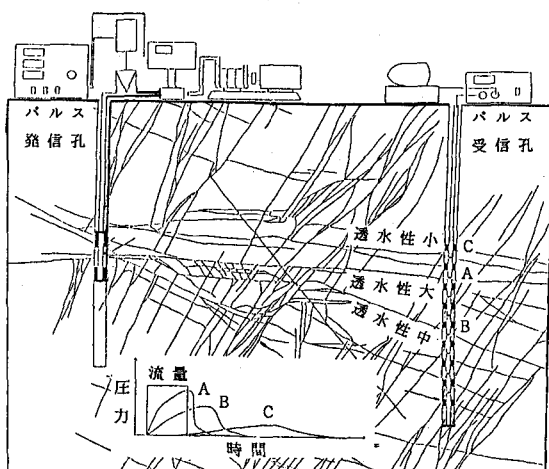


図-1 パルス試験模式図

3. 試験装置とその適用

前章に示したようなパルステストを行なうために、今回、高精度かつ広範囲の透水性の地盤に適用可能なパルス発生装置およびパルス受信装置の開発ならびにその適用を行なった。以下に、その概要を示す。

3-1 試験装置の概要

パルス試験装置は、パルス発信装置と受信装置の二つよりなる。発信装置は発信ボーリング孔の所定の深度に、所定の流量および圧力の水を供給する装置であり、地上に設置する給水装置と、孔内装置とに分けられる。一方、受信装置は発信孔から離れて設けられる受信孔で生じる圧力変化を測定する装置であり、孔内装置と圧力変化の指示・記録装置からなる。次に、それぞれの装置の機能と性能について述べる。

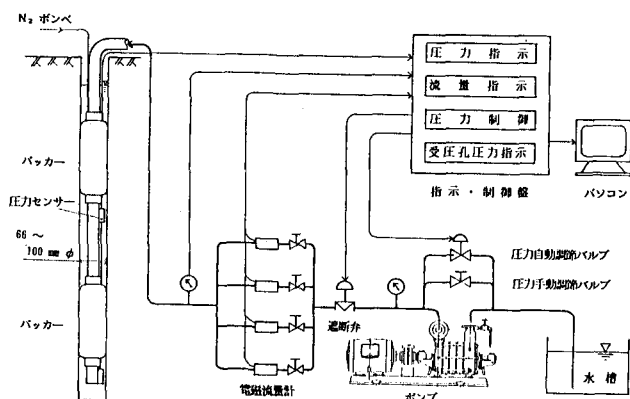


図-2 パルス発信装置概要図

3-1.1 発信装置の機能と性能

発信装置の概要を図-2に示す。

(1) 給水装置

給水装置は、高圧ポンプ、遮断弁、流量計から構成される。本試験は高透水性地盤から低透水性岩盤までの広い範囲の地盤に適用することを目的としているため、パルス発信に必要な流量は、地盤の透水性によって大幅に異なる。これに対応するため、給水装置には高圧の状態で大流量を吐出し、圧力が比較的安定し易い、多段式渦巻ポンプを用いている。また、発信区間の透水性に合わせて流量を調節するために、ポンプの吐出側に戻りパイプを接続し、その戻り流量を調節するための手動および自動バルブを取り付けた。このバルブの開度を調節することによって、発信区間の透水性に応じた適切な流量を得ることができる。手動バルブの開度を一定とし、遮断弁を開閉することにより、発信区間に矩形波状の流量パルスを与えることが可能となる。また、自動バルブをあらかじめ定めたプログラムに従って開閉することによって、所定の波形の圧力あるいは流量パルスを試験区間に与えることも可能である。

流量計は、小流量から大流量までの幅広い範囲の流量を、可能な限り精度良く測定するために、異なる測定レンジを持つ4台の電磁流量計を用い、20m³/分～300³/分までの範囲の流量が測定可能である。

(2) 孔内装置

孔内装置は、遮水用ニューマチックパッカー、圧力トランスジューサー、および給水管から構成される。遮水用パッカーは、ダブルパッカー方式とし、それぞれのパッカーで遮断された区間が発信区間となる。パルス発信の際には、この区間に急激に高圧がかかるため、それによって遮水状態が破られることが無いように、パッカー長は2mとした。

圧力トランスジューサーは、発信区間および発信区間下部の孔内圧力を測定するために、二台設置されている。発信区間下部の圧力を測定することによって、下部パッカーの遮水状態をモニターすることが可能である。圧力トランスジューサーとしては、比較的高圧がかかること、および孔内に設置するための大きさが制限されることから、ひずみゲージ式とした。

給水管は、注水時の圧力損失および漏水を可能な限り低減するために、ガスネジ加工を施したAQロッドを用いた。また、発信区間の穴開き管は、所定の発信区間長に合わせて長さの調節が可能となっている。

(3) 指示・制御・記録装置

測定される物理量は、流量、流量計出口圧力、発信区間圧力および発信区間下部圧力の4種類である。このうち、(1)で述べた自動制御を行なうためには、流量あるいは発信区間圧力が、ポンプの自動バルブとリンクされ、プログラム設定器であらかじめ設定された波形に制御される。また、以上の測定された物理量は、後述する受信圧力とともに、パーソナルコンピュータによって記録・モニターが行なわれる。

3-1.2 受信装置の機能と性能

発信装置で発信孔の所定深度にかけられた水圧は、発信孔ー受信孔間の水理特性に従った方向および圧力で受信孔に伝播する。例えば、割れ目系岩盤においては圧力の伝播方向は、割れ目の方向によって規制されるが、応答圧力の強度は、高透水性割れ目では強く、低透水性割れ目では弱い。また、孔間の距離を大きくすれば、応答圧力は微弱になる。従って、広い範囲の透水性の地盤に、孔間隔を広くして適用するためには、パルス受信装置に高感度・高分解能の圧力センサーが必要となる。

本論文では、比較的高透水性地盤に対して適用し

た多段式間隙水圧計と、低透水性地盤用に開発した、

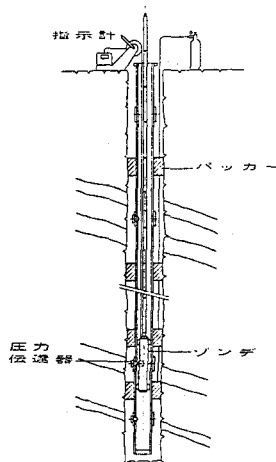


図-3 多段式間隙水圧計概要図

水晶振動子式圧力計の二種類を紹介する。

(1) 多段式間隙水圧計を利用する方法

この方法では、スイス・チューリッヒ工科大学コバリ教授の開発による多段式間隙水圧計を用いる。この装置の概要を図-3に示す。これはパッカーで多段に区切られた区間に、ダイアフラムとピストンを組み合わせた圧力伝達器をセットし、ロードセル方式の力センサーを内蔵したゾンデを挿入し、圧力伝達器を介して、間隙水圧を力に変換して伝達される力を測定する方式となっている。この方式では、ゾンデ挿入時に地下水の移動を伴わないため計測効率がよく、またロードセルの定格を低くすることができるため、測定の感度を2cmH₂O以下、精度を±5cmH₂Oまで上げることが可能である。

(2) 水晶振動子式圧力計を利用する方法

これは、水晶振動子の固有振動数が、それに加わる圧力によって変化することを利用した圧力測定装置である。圧力は、振動数に変換されてデジタル量で取り扱われるため、精度として1mmH₂Oという非常に高いものとなっている。装置としては、パッカーを5段に接続し、それぞれのパッカーの間の区間に、上記の圧力センサーを設置してパルス受信装置としている。それによって、一度に4区間での圧力計測が可能となり、試験の能率向上と同時に、パルスの発信回数を低減させることができるため、試験による地盤状況の乱れを抑えることが可能である。本受信装置は、上述したように非常に高精度であるため、伝播される圧力が微弱な、低透水性岩盤および発信孔-受信孔間の距離が長い場合に有効な受信装置である。

3-2 適用例

以上述べた発信および受信装置を、実際の岩盤に適用した例を図-4に示す。ここでは、受信装置として多段式間隙水圧計を用いた。図-4は、高透水性の割れ目に対して適用した場合の計測結果であり、0.2kgf/cm²の発信圧力に対して、応答圧力が0.1kgf/cm²と比較的強い応答が得られている。

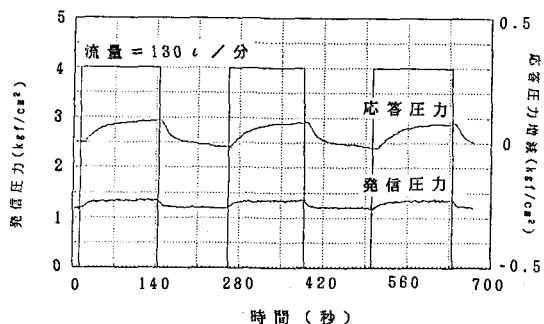


図-4 パルス試験適用例

4. 工学的な応用および留意点

前章で述べた装置を用いることにより、10⁻⁶cm/sec程度の低透水性の岩盤から、割れ目の透水係数で10⁻¹cm/sec~10⁰cm/sec程度の高透水性の割れ目系岩盤や多孔質岩盤までの広い範囲を対象としてパルステストを実施することができる。その工学的な応用範囲としては、

- ①ダムの基礎岩盤の透水性調査
- ②地下空間利用における周辺岩盤の透水性調査
- ③グラウトにおける止水効果の判定
- ④不均質地盤における透水性調査

等があげられる。

次に、パルス試験を適用する際の留意点を、おもに解析方法の視点から述べる。

パルステストの解析は、発信孔および受信孔の圧力経時変化のデータを用いた、非線形最小2乗法によって行う。解析方法の詳細に関しては登坂他の報文に譲るが、発信孔-受信孔間の不均質性に起因する透水性の違いを解析によって再現するためには、非定常過程の圧力データを取り入れて解析上の情報量を増すことと、不均質性をより強く反映させる形状の流量パルスを与える必要がある

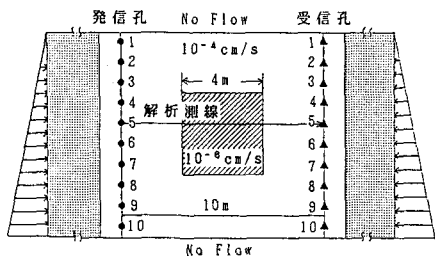


図-5 解析モデル図

ここでは、パルス波形の影響を示す一例として、図-5に示したようなモデルで数値解析を行なった。

この解析では、流量パルスの形状として、水の注入-停止の1サイクルの時間、および流量は同一とし、注入と停止の時間比を変化させた。解析結果を図-6に示す。図中の圧力経時変化は、図-5に示された測線における受信圧力の計算結果である。図-6(a)は注入時間：停止時間の比を1：1とした場合であり、図-6(b)は、同様に9：1とした場合である。それぞれの図について、低透水領域（透水係数 1×10^{-6} cm/sec）が存在する場合と、透水係数 1×10^{-4} cm/secで均質な場合の2種類の解析結果を併記してある。

これらの図より、注入時間：停止時間の比が9：1という流量パルスの形状を与えた方が、均質、不均質の両モデルでの解析結果の差が大きく現れ、不均質性をより強く反映した結果となっている。これは、停止時間を長く取ることによって、解析領域内の圧力状態が、パルス発信前の状態により近くまで戻ってしまうことに原因があると考えられる。従って、実用上は地盤の透水性に応じ、可能な限り停止時間を短くする方が望ましいと考えられる。また、今回のモデルのような、低透水領域を挟んだパルス試験において、このようなパルス波形を用いる場合には、受信区間における圧力上昇時と下降時の圧力差が微弱となるが、受信装置として3-2(2)で述べた高精度の圧力センサーを用いれば対応は可能である。

5. まとめと今後の課題

パルステストは、地盤の透水性分布を空間的に把握できる点で優れているが、本文で述べたように、試験装置だけでなく解析上も解決すべき問題も多い。特に、パルステストの解析では、圧力変化の非定常過程のデータをすべて用いるため、特に注入開始時等、圧力・流量が急激に変化する時点において、より正確なデータ収集の可能な計測システムの開発が、特に今後は必要となると考えられる。

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) 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
- (2) 登坂博行, 伊藤一誠, 増本 清, 大塚康範(1990): "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", 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

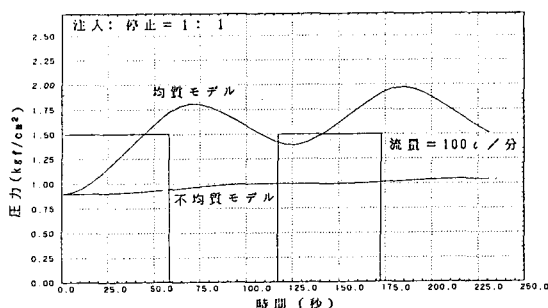


図-6(a) 解析結果圧力経時変化図
(注入：停止=1：1)

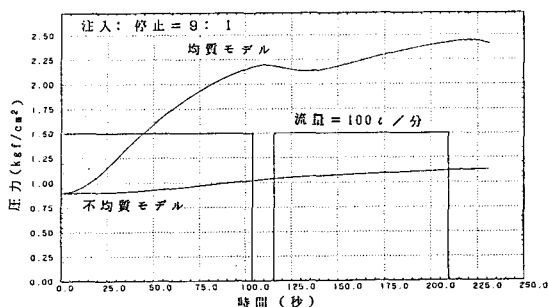


図-6(b) 解析結果圧力経時変化図
(注入：停止=9：1)