# 単孔式の水理試験による透水特性パラメータの 評価方法に関する研究

橋本秀爾1\*・田中達也1・安藤賢一1・竹内真司2・三枝博光2・金亨穆3

<sup>1</sup>株式会社大林組 東京本社(〒108-8502東京都港区港南2丁目-15-2) <sup>2</sup>独立行政法人日本原子力研究開発機構(〒509-6132岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64) <sup>3</sup>Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (30, Gajeong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350, Korea) \*E-mail: s.hashimoto@ospec.co.jp

本研究では,ボーリング孔で行われる水理試験に関して幅の広い透水性を有する岩盤を対象とした水理 試験を想定し,試験方法や試験場の条件が岩盤の透水特性パラメータの評価値に与える影響について数値 実験により検討した.ボーリング孔内で水理試験を行う際に,孔壁に形成された泥膜や断層破砕帯等の脆 弱部による孔径拡大という現象に遭遇することがある.このような試験場で水理試験により得られる周辺 岩盤の透水特性パラメータへの影響について検討するために,定常法および非定常法水理試験試験を模擬 した試験データを作成し,直線勾配法や標準曲線一致法により透水特性パラメータを評価した.その結果, 試験場の変化に対して試験方法や解析方法の違いによる透水特性パラメータへの影響を把握した.

Key Words : Hydraulic test, Data analysis, Hydraulic conductivity, Skin effect, Borehole enlargement

#### 1. はじめに

近年,地下空間の利用,CO2の地中貯留,放射性廃棄物の地層処分等に関連して,地下深部の水理地質構造を 把握することが重要となり,深部岩盤の透水特性を合理 的に評価することが技術的な課題になっている.

特に,放射性廃棄物の地層処分で対象とするような深 部岩盤の透水係数は非常に低いと考えられるため,これ まで浅層部を対象とした土木調査やダムサイト等で行わ れてきた水理試験の適用性について吟味する必要がある. 例えば,定常法水理試験の一つである地盤工学会基準 「注水による岩盤の透水試験」(JGS 1322-2003)で対象と している透水係数は、1.0E-04~1.0E-10(m/sec)程度と比較 的幅広いが,一方で,試験区間の深さや試験用具などに よって適用範囲が大きく異なるということも指摘されて いる<sup>1)</sup>.また,深部岩盤を対象としたボーリング調査で は、泥水を使用したボーリング掘削が行われることが考 えられるため,泥膜が形成されたボーリング孔での水理 試験の方法やデータの解析方法についても検討の余地が ある.さらに,岩盤中にみられる破砕帯のような脆弱部 では,ボーリング孔を精度良く掘削することは困難であ リ, 孔壁の崩壊による孔径拡大のような現象も十分に起 こると考えられる.

そこで,本報告ではボーリング孔で行われる単孔式の 水理試験に関して,幅の広い透水特性(透水係数および 比貯留係数)を有する岩盤を想定し,様々な水理試験方 法を模擬した数値実験により,透水特性パラメータの評 価方法について検討した結果を報告する.

# 2. 模擬計測データの作成

#### (1) 想定した岩盤の透水特性

本研究で行った数値実験では,表-1に示すように透水 係数1.0E-07(m/sec)を基本透水場として,それよりも3オ ーダ大きい透水係数を有する透水場を高透水場,また, 3オーダ小さい透水係数を有する透水場を低透水場と定 義した.さらに,岩盤の貯留性の指標となる比貯留係数 に関してもそれぞれの透水場について1.0E-06~1.0E-08(1/m)の幅を想定した.

### (2) 模擬試験データの作成方法

表-1に示した想定岩盤に対して,定常法水理試験(注水による岩盤の透水試験)や非定常法水理試験(例えば, パルス試験,スラグ試験,段階式揚水試験など)を模擬した順解析を行い,模擬計測データを作成した.模擬デ

表-1 想定した岩盤の透水特性

想定場	透水係数(m/sec)	比貯留係数(1/m)
高透水場	1.0E-04	1.0E-06
基本透水場	1.0E-07	1.0E-07
低透水場	1.0E-10	1.0E-08

ータの作成には,井戸解析コードnSIGHTS(n-dimensional Statistical Inverse Graphical Hydraulic test Simulator)を使用した. nSIGHTSでは,モデル領域を井戸を中心として同心円状 に節点により離散化した軸対称モデルを構築し,井戸お よびモデル境界における境界条件やモデル内の物性値等 を設定することで順解析および逆解析を行うことができ る.また,Barker(1988)<sup>2)</sup>によって提案された流れの幾何 形状を示すFlow dimension(流れの次元)をパラメータと して考慮することもできる.本コードにおける支配方程 式についてはPickens et al.(1987)<sup>3</sup>に示されている.ここで は,流れの次元を2.0として被圧帯水層中での放射状流 を想定した.

注水による岩盤の透水試験は,試験区間内に一定圧力 で水を注入した時の注入流量の経時変化を計測する試験 であることから,試験区間の圧力を段階的に昇圧および 降圧した時の試験区間内の注入流量を計測値とした.一 方,非定常法水理試験は,試験区間の圧力を瞬間的に変 化させた後の圧力の経時変化や揚水による圧力の経時変 化を計測する試験であることから,試験区間内の圧力を 計測値とした.模擬計測データのサンプリング間隔は1 秒~最大60秒とした.

# 3. 模擬水理試験による透水特性パラメータの評価

#### (1) 定常法水理試験による透水特性パラメータ評価

前述のとおり,定常法水理試験として注水による岩 盤の透水試験を模擬した.本試験は,試験区間の有効圧 力を段階的に昇圧させながら水を注入し,定常状態到達 後の注水流量と有効圧力により透水係数を求める水理試 験である.しかし,岩盤の貯留性,井戸貯留性,あるい は試験システムの貯留性が大きい場合には,注水流量 (あるいは有効圧力)が定常状態に至るまでにかなりの 時間を要すると考えられる.ここでは,前述した想定岩 盤に対して,有効圧力0.25MPaピッチで上昇4段階,降下 3段階の透水試験を模擬した順解析を行い,計測時間と 計測データから求められる透水係数との関係を整理した. 順解析で想定したモデル条件を表-2に示す.また,各圧 力段階の最大計測時間は302,400秒(3.5日)とした.図-1に想定岩盤の透水係数1.0E-07(m/sec)および比貯留係数 1.0E-07(1/m)のケースについて有効注水圧力水頭と注入流 量の関係を示す.

表-2 注水による岩盤の透水試験で想定したモデル条件

項目	単位	設定値
試験区間長	m	10.0
試験区間半径	m	0.072
境界半径	m	1000
静水圧	Pa	1500000
流れの次元	-	2.0
試験区間圧縮率	1/Pa	1.0E-09
水の密度	kg/m <sup>3</sup>	1000



図-1 有効注水圧力水頭-注水流量の関係(透水係数 1.0E-07(m/s), 比貯留係数 1.0E-07(1/m)のケース)

計測時間 5分では昇圧段階と降圧段階の傾きに差がみ られるが,計測時間 3.5日では,ほぼ同じ傾きを示して いる.これは,計測時間 5分では貯留性の影響により注 入流量が定常状態に達していないためと考えられる.

次に,作成した試験区間の模擬計測データ(注入流量)を使用して,各圧力段階における計測時間を5分, 15分,30分,1時間,10時間,24時間,3.5日とした場合 についてそれぞれの透水係数を算出した.透水係数の算 出には,地盤工学会基準JGS 1322-2003で定めれた次式を 使用した.

$$k = \frac{\Delta Q}{2\pi L \Delta s} \ln \left(\frac{2L}{D}\right) \tag{1}$$

ここで,k は透水係数、 $\Delta Q$  は注入流量差,L は試験区間の長さ、 $\Delta s$  は水頭差、D は試験区間の孔径である. 式(1)によって求めた透水係数と各圧力段階における計 測時間との関係を図-2に示す.

図-2に示すように,高透水場のケースでは,透水係数 は各圧力段階の計測時間に関係なくほぼ同じ値が得られ た.この透水係数と比貯留係数の組み合わせでは,各圧 力段階の計測時間を5分として透水係数を求めても,計 測時間を3.5日として求める透水係数とほぼ同じ精度の 値を得ることができる.また,基本透水場では,各圧力 段階の計測時間を5分とした場合と3.5日とした場合とで 得られる透水係数に最大で30%程度の差が生じている.



図-2透水係数と計測時間の関係

一方,低透水場では各圧力段階の計測時間が長くなる につれて得られる透水係数は小さくなる傾向を示してい る.これは,試験場が定常状態に達していないことが影響している.透水係数1.0E-10(m/sec),比貯留係数1.0E-06(1/m)の組み合わせでは,各圧力段階の計測時間を5分 にした場合と3.5日にした場合とで約70%の差が生じてい る.したがって,このような透水係数と比貯留係数を組 み合わせた透水場で注水による岩盤の透水試験により高 精度に透水特性パラメータを評価するためには各圧力段 階で長時間の計測を要すると考えられる.

(2) スキンゾーンが形成されたボーリング孔における定 常法水理試験による透水特性パラメータ評価

試験区間近傍では,ボーリング掘削時に使用した泥水 によって岩盤本来の透水係数よりも相対的に低い透水性 を有する領域(ポジティブスキン)が形成されたり,ボ ーリング掘削による岩盤のゆるみによって相対的に高透 水性の領域(ネガティブスキン)が形成されることがあ る.ここでは,試験区間近傍に形成される透水特性の変 化領域をスキンゾーンと呼び,スキンゾーンが形成され た試験区間において定常法水理試験を行った場合に得ら れる透水特性パラメータについて検討する.

想定岩盤は,前項(1)で示した基本透水場の透水係数 1.0E-07(m/sec)および比貯留係数1.0E-07(1/m)とした.そし て,試験区間の近傍に0.05m厚さのスキンゾーンが形成 されているとし,スキンゾーンの透水係数として1.0E-05 (m/sec)(SkinKE05),1.0E-06(m/sec)(SkinKE06),1.0E-08(m/sec) (SkinKE08)および1.0E-09 (m/sec)(SkinKE09)の4つのケース を設定した.なお,スキンゾーンの比貯留係数は,想定 岩盤と同じ1.0E-07(1/m)を設定した.このような想定岩盤 に対して,前項(1)で示した注水による岩盤の透水試験 を模擬した順解析を行い,模擬計測データを作成した. 想定モデル条件は表-2に示した条件と同様である.

各ケースについて得られた有効注水圧力水頭と注入流 量の関係図を図-3に示す.また,設定したスキンゾーン の透水係数と模擬計測データを用いて式(1)により算出 した岩盤の透水係数との関係を図-4に示す.

図-3に示すように,ネガティブスキンが形成されてい る場合には,スキンゾーンが形成されていない場合の傾 き(有効注水圧力水頭差/注入流量差)に対して若干小 さくなる程度であるが,ポジティブスキンが形成されて いる場合には,その傾きが大きく異なる結果になった. 式(1)に示すように,透水係数はこの傾きに依存するた め,ポジティブスキンが形成されている場合にはスキン ゾーンが形成されていない場合の透水係数と比較して, 33~85%程度小さく評価された(表-3参照).



図-3 有効注水圧力水頭と注水流量の関係(スキンゾーンの透水係数で区分)



図-4 スキンゾーンの透水係数と岩盤の透水係数との関係

表-3 定常法水理試験による透水特性算出結果

ケース	透水係数(m/sec)	透水係数比
Nonskin	5.21E-08	1.00
SkinKE05	5.52E-08	1.06
SkinKE06	5.49E-08	1.05
SkinKE08	3.47E-08	0.67
SkinKE09	8.00E-09	0.15

(3) スキンゾーンが形成されたボーリング孔における 非定常法水理試験による透水特性パラメータ評価

非定常法水理試験には,パルス試験,スラグ試験,注 水試験,揚水試験など多様な試験方法がある.これらの 試験に関して,試験区間内の圧力の経時データを用いた データ解析法を多くの研究者が提案している(例えば, Hvorslev(1951)<sup>4</sup>, Theis(1935)<sup>5</sup>など).ここでは,前節(2)と同 様に試験区間近傍に0.05m厚さのスキンゾーンが形成さ れた試験区間で非定常法水理試験を模擬した数値実験を 行った.スキンゾーンの透水係数は前項(2)と同様に4ケ ースを設定した.また,非定常法水理試験として,注水 スラグ試験(SW),段階揚水試験(RW1-RW3),圧力回復試 験(RWS) およびパルス試験(PW)を一連の試験として想定 した.なお,想定モデル条件は,表-2に示した試験区間 長を5.0(m)に変更し,加えて揚水管半径0.0451(m)を設定 した.作成した試験区間内の模擬圧力データの経時変化 の一例を図-5に示す.各試験による透水特性パラメータ の評価結果を以下に述べる.

#### a) 注水スラグ試験による透水係数の評価結果

本模擬試験では,試験区間の初期水頭に対して約20m 高い水頭差を設定した注水スラグ試験を模擬した.

図-6に各ケースの水頭変化曲線を示す.図中の縦軸は 初期設定水頭で各計測時間の水頭差を正規化した値である.図-6に示すように,SkinKE05およびSkinKE06では水 頭低下がNonskinと比べて若干早い傾向を示すが,Skin KE08およびSkinKE09では遅い水頭低下傾向を示す.

次に,Hvorslev(1951)<sup>4</sup>による直線勾配法によって透水 係数を算出した(表-4参照).図-6に示した水頭変化曲線 の傾向からも分かるように,SkinKE05およびSkinKE06で はNonskinに対して7%程度大きい透水係数が得られたが, SkinKE08では38%程度,SkinKE09では87%程度小さい透 水係数が得られた.

# b) 段階揚水試験による透水係数の評価結果

本模擬試験では,揚水量をRW1で0.12(L/min),RW2で 0.24(L/min)およびRW3で0.36(L/min)に設定した3段階の開 放系段階式揚水試験を模擬した.

図-7に各ケースの水頭変化曲線を示す.本模擬試験で もSkinKE05およびSkinKE06はNonskinと同様な水頭変化曲 線を示すが,SkinKE08およびSkinKE09では異なる水頭変 化を示す.ここでは,Theis (1935)<sup>5)</sup>の解析法により,透 水係数を算出した(表-5参照).なお,SkinKE09は,図-7 に示すように水頭の変化傾向が大きい状態で次の揚水段 階に移行していることから,透水係数の算出が困難であ った.SkinKE09以外のケースでは,SkinKE05および SkinKE06ではNonskinに対して1%程度の差であったが, SkinKE08では10%程度小さい透水係数が得られた.







図-6模擬注水スラグ試験による水頭変化曲線

ケース	透水係数(m/sec)	透水係数比
Nonskin	5.42E-08	1.00
SkinKE05	5.82E-08	1.07
SkinKE06	5.78E-08	1.07
SkinKE08	3.38E-08	0.62
SkinKE09	7.08E-09	0.13





図-7 模擬段階揚水試験による水頭変化曲線

表-5 模擬段階揚水試験による透水特性算出結果

ケース	透水係数(m/sec)	透水係数比	
Nonskin	9.06E-08	1.00	
SkinKE05	9.17E-08	1.01	
SkinKE06	9.16E-08	1.01	
SkinKE08	8.18E-08	0.90	
SkinKE09	解析困難		

## c) 圧力回復試験による透水係数の評価結果

揚水試験(RW3)後に試験区間を閉鎖系にして,圧力変 化を計測する圧力回復試験を模擬した.

本模擬試験の水頭変化曲線を図-8に示す.図-8中の横 軸は,揚水開始後の計測時間を閉鎖後の計測時間で割る ことで正規化した値である.図-8に示すように, SkinKE05およびSkinKE06はNonSkinとほぼ同様な傾向を 示すのに対し,SkinKE08およびSkinKE09は水頭変化量 10m付近までNonskinと大きく異なる傾向を示し,それ以 降はほぼ同じ傾向を示す.これは,低透水性のスキンの 影響が初期段階に現れ,その後は岩盤本来の透水特性を 反映した圧力挙動を反映しているためと考えられる. Theis(1935)<sup>5</sup>により算出した透水係数を表-6に示す.得ら れた透水係数は,他の模擬試験結果と比較すると Nonskinに対する差が最も小さい.

(4) 孔径が拡大した試験区間における非定常水理試験

孔径が拡大した箇所において水理試験を行う場合,孔 径拡大によって実際の試験区間の体積が大きくなるため 井戸貯留性が変化し,計測される試験区間の圧力データ にその影響が含まれることになる.ここでは,孔径拡大 による水理試験への影響を数値実験により再現し,どの ような影響が見られるかを検討した.

まず, 孔径が拡大していない通常ケース, 孔径が2倍 に拡大したケース, 4倍に拡大したケースの3つのケース について順解析により試験区間内の模擬圧力データを作 成した.想定岩盤は,透水係数1.0E-07(m/sec)および比貯 留係数1.0E-08(1/m)とし,スラグ試験や段階揚水試験等の 非定常法水理試験を一連の試験として模擬した.想定モ デル条件は前節(3)と同じ条件とした.



表-6 模擬圧力回復試験による透水特性算出結果

ケース	透水係数(m/sec)	透水係数比
Nonskin	9.95E-08	1.00
SkinKE05	9.96E-08	1.00
SkinKE06	9.96E-08	1.00
SkinKE08	9.72E-08	0.98
SkinKE09	5.36E-08	0.54

次に,作成した3種類の模擬圧力データに対して, nSIGHTSにより逆解析的にヒストリーマッチィングを行い,岩盤の透水係数および比貯留係数を算出した.

図-9に孔径拡大を伴う閉鎖系スラグ試験に対する試験 区間内の圧力の時間微分曲線を示す.孔径が2倍および4 倍に拡大したケース共に,井戸貯留性の影響が現れる計 測初期段階において模擬計測データと解析値との間に差 が生じ,また,孔径の拡大幅が大きいほどその差は大き いことが分かる.ヒストリーマッチィングにより得られ た各ケースの透水係数および比貯留係数を表-7に示した. 透水係数は孔径4倍ケースで17%程度大きい値となり, 比貯留係数は約2倍の差が生じた.





図-9 閉鎖系スラグ試験の圧力時間微分曲線

表-7 孔径拡大を考慮しない場合の透水係数の算出結果

ケース	透水係数 (m/sec)	透水係数比	比貯留係数 (1/m)
基本ケース	1.00E-07	1.00	1.00E-08
孔径2倍ケース	1.08E-07	1.08	1.33E-08
孔径4倍ケース	1.17E-07	1.17	1.96E-08

# 4. まとめと今後の課題

(1) 定常法水理試験による透水特性パラメータ評価

定常法水理試験として注水による岩盤の透水試験を模擬した数値実験を行った結果,高透水場では,各圧力段階の計測時間5分でも計測時間を3.5日とした場合に得られる透水係数とほぼ同じ精度で評価できることを確認した.一方,低透水場では,各圧力段階の計測時間を3.5日としても定常状態に達したことが確認できないことから,高精度に透水係数を評価するためには各圧力段階の計測時間を3.5日よりもさらに長くする必要があることが分かった.一般的に対象とする岩盤の比貯留係数を事前に把握することは困難であるが,地下深部の岩盤の透水性は相対的に低いことを考えると,このような透水特性を有する岩盤で定常法水理試験により透水特性パラメータを評価するためには長時間の計測が必要になる.試験効率を考えると,深部岩盤を対象とした水理試験には, 定常法よりも非定常法の方が合理的であると推察される.

(2) スキンゾーンが形成されているボーリング孔での透 水特性パラメータ評価

スキンゾーンの影響を想定せずに一般的な試験方法お よび解析方法を適用して透水性を評価した結果,定常法, 非定常法のいずれの方法でもネガティブスキンと比較し てポジティブスキンが形成されたケースの方が岩盤の透 水係数を小さく評価することが分かった.試験方法別に は,定常法水理試験および注水スラグ試験ではスキンゾ ーンの影響が大きく,揚水試験および圧力回復試験では 相対的に影響が小さいことが確認できた.また,圧力回 復試験では計測データを図-8に示した水頭変化曲線のよ うに整理することで,計測データへのポジティブスキン の影響の有無を推察できる可能性がある.

以上のことから,スキンゾーンの形成による透水性評価結果への影響を低減するためには,孔内洗浄などの対

策を実施することに加えて,非定常法水理試験(特に揚 水試験および圧力回復試験)を計画し,計測データの解 釈によりその影響の有無を確認することが望ましい.

(3) 深部岩盤を対象とした水理試験による透水特性パラ メータの評価に関する課題

本研究により,ボーリング孔周辺に形成されたスキン ゾーンが,水理試験で得られる岩盤本来の透水特性の評 価結果の精度に影響を及ぼすことが確認された.また, 水理試験方法の選定によりその影響を低減することが可 能であることも確認された.

近年の水理試験データ解析コードでは,スキンゾーン と岩盤のコンポジットモデルを想定し,スキンゾーンの 影響を考慮した岩盤本来の透水特性を評価することが可 能である.岩盤の透水特性を高精度に評価することを目 的とした試験の実施には,上記の対策に加えて,解析手 法の高度化も必要と考えられる.今後は,実際に原位置 で取得された計測データを用いた評価を行い,スキンゾ ーンの特性やその影響程度について検討をすすめる.

#### 参考文献

- 1) (社)地盤工学会:地盤調査の方法と解説, pp.448-455, 1989.
- Barker, J.A. : A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock, *Water Resources Research*, vol.24, No.10, pp.1796-1804, 1988.
- Pickens, J.F., G.E.Grisak, J.D.Avis, D.W.Belanger, and M.Thury : Analysis and interpretation of borehole hydraulic tests in deep boreholes:Principles, model development, and applications, *Water Resources Research*, vol.23, No.7, pp.1341-1375, 1987.
- Hvorslev, M.J.: Time Lag and Soil Permeability in Ground-Water Observations, Bull. No. 36, Waterways Exper. Sta. Corps of Engrs, U.S. Army, Vicksburg, Mississippi, pp. 1-50, 1951.
- Theis, C.V.: The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage, *Am. Geophys. Union Trans.*, vol. 16, pp. 519-524, 1935.

# STUDY OF EVALUATION FOR HYDRAULIC PROPERTIES WITH THE SINGLE BOREHOLE - HYDRAULIC TEST

# Shuuji HASHIMOTO, Tatsuya TANAKA, Kenichi ANDO, Shinji TAKEUCHI, Hiromitsu SAEGUSA and Hyung-Mok KIM

In this study numerical experiments were conducted assuming highly variable hydraulic conductivities and the occurrence of skin. In the field during drilling, a filter cake can develop by using mud fluid. Partial collapse of the borehole wall around fracture zones might also occur. To investigate the influence of these phenomena, artificial hydraulic test data have been generated that simulate hydraulic tests in borehole. These artificial data were then used to evaluate the hydraulic parameters of the rock using some analysis methods. As a result, the influence on the determined hydraulic parameters caused by the different testing and analysis methods, as well as for a change in the test conditions, has been evaluate.