

短区間透水試験・蒸発量試験による 坑道周辺岩盤の水理特性評価

Investigation of hydraulic characteristics of rock mass around a tunnel by short-distance permeability test and evaporation measurement

谷 智之*・池谷貞右*・小山 俊博*・南 将行**・日比野悦久**

Tomoyuki TANI, Sadau IKEYA, Toshihiro KOYAMA, Masayuki MINAMI, Yoshihisa HIBINO

In disposal of radioactive waste, attention has been focused on the hydraulic characteristics of areas around the repository tunnel that are subject to the effect of tunnel excavation. In this study, hydraulic characteristics were assessed by short-distance permeability test and evaporation measurement at an unsupported tunnel.

As a result of the permeability test, it was found that coefficient of permeability in the range to a depth of dozens of centimeters from the tunnel wall surface was 10^{-3} to 10^{-5} cm/sec highly as in deeper areas.

Permeability and evaporation in the same section were compared with each other to identify unsaturated areas.

Key Word: excavation disturbed zone, hydraulic characteristic, short-distance-permeability test, evaporation, in-site test

1. はじめに

放射性廃棄物の地層処分における分野では、処分坑道周辺の掘削影響領域が核種の移行経路あるいは地下水の流動場に影響を与える可能性が指摘されている。従って、この領域の水理特性並びにその広がりを把握することは特に性能評価上重要な課題となる。しかしながら、掘削により水理特性が最も変化すると考えられる坑道壁面直近の水理特性について詳細に実測・評価した例は少ない。

そこで本検討では、坑道の掘削影響領域のうち特に透水係数の変化や不飽和領域発生が考えられる坑道壁面近傍において、原位置試験を実施し、坑道周辺でのこれらの変化を把握することを試みた。試験を行った坑道の地質は、硬質堆積岩であり、この坑道で事前に行った弾性波探査の結果では、弾性波速度の低下領域が約2m程度と狭い範囲で生じていることから、坑道周辺の変化も2m程度と狭い範囲で生じている可能性が高いと考え、これに対応できるように短い区間長で試験可能な短区間透水試験装置および蒸発量試験装置を新たに製作し、坑道から2本の水平ボーリング孔を配して原位置試験を行った。本論では、原位置試験結果を紹介するとともに試験結果に関する考察について報告する。

* 正会員 東電設計(株) 第一土木本部地下環境技術部

** 正会員 東京電力(株) 建設部土木・建築技術センター

*** 正会員 東京電力(株) 神流川水力建設所南相木工事事務所

2. 原位置試験の概要

原位置試験を実施した坑道(B=3.2m,H=3.2m)は地山被りが約 500m の大深度にあり、発破工法で掘削後、約 5 年経過している無支保の坑道である。試験箇所地質は後期古生代～中生代の海底堆積物がジュラ紀～白亜紀の海底地滑りによって再堆積したものであり、粗粒砂岩・礫岩の巨礫が密集したほとんど基質を挟まない混在岩で非常に硬質な堆積岩(オリストリス)である。試験坑道の近傍の地下水観測孔の測定結果によると、地下水面は坑道上部約 440m に形成されていることが確認されている。

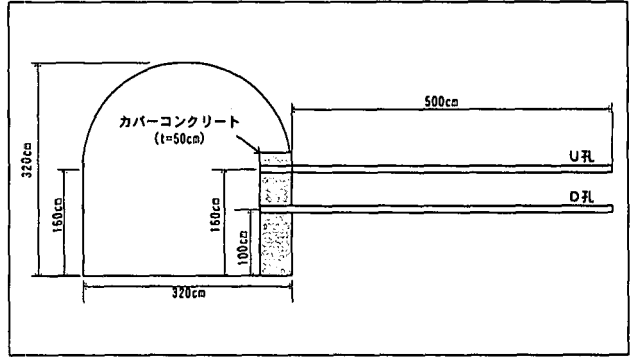


図-1 ボーリング孔のレイアウト

この坑道に試験実施するため外径 $\phi 100\text{mm}$ 、深さ5mの水平ボーリング孔を2孔上下（上側：U孔、下側：D孔）に配した。また、特に坑壁面直近部の水理特性を把握するため、坑壁に厚さ40cmのカバークンクリートを打設し、この部分にパッカーを装着することで、坑壁深度0cmからの測定ができるようにした（図-1）。当該地点での弾性波探査の結果では地山深部の弾性波速度が $V_p=5.8\text{km/s}$ 、表層部が 3.7km/s で弾性波速度の低下領域は坑壁から約2m程度と想定された。

3. 短区間透水試験

(1) 試験装置の概要

坑道周辺の水理特性を詳細に把握するために測定区間長10cmから透水試験が可能な短区間透水試験装置を製作した。本試験装置の特徴は、次のとおりである

- ・ 区間長10cm～50cm(10cm $\pm 7\%$)の短区間での透水試験が可能である。
- ・ $10^{-2} \sim 10^{-10}\text{cm/s}$ オーダーに対応する広範囲な透水係数の測定が可能である。
- ・ 移動式である。

10cmの短区間に所要の圧力をかけて測定を行うためには、この種の試験に多用されているインフレーション方式のパッカーではパッカーゴムの変形長、口金長で約10cmが必要となりこの区間長に対応できない。このため、本試験装置では、ゴムの塊をプローブ軸方向に圧縮させた際に生ずる半径方向の変形により岩盤との密着を図るメカニカルパッカー方式を採用することで、測定区間長10cmを確保した(図-2)。パッカーの遮水性はアクリルパイプでの性能試験、健岩部での注入状況より確認した。

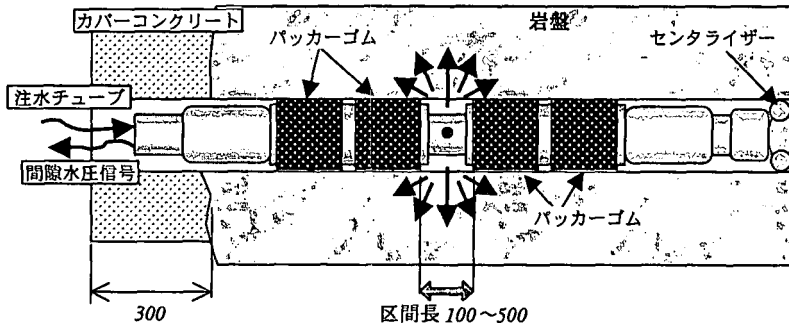


図-2 短区間透水試験器の概要

また、低透水部を含む広範囲な透水係数を測定するため4本の径の異なる注水タンク(H=100cm,D=0.6,2,6,15cm)を用意し、透水量に応じて注水タンクを切り替えることにより $10^{-2} \sim 10^{-10}$ cm/s オーダーに対応した透水係数の測定を可能とした。

(2) 試験結果

試験は2回に分けて実施した。第1回はD孔において試験装置の適用性を確認する目的で実施した。このため、一部データを取得していない区間がある。第2回はボーリング削孔後約半年後にU孔において追加データを取得する目的で実施した。測定区間長は坑壁部近傍が密になるように設定した。また、透水試験・蒸発量試験に先立ち、BTV並びにCCDカメラによる割れ目観察を実施した結果、坑道壁面近傍で開口幅0.5mm以上の明瞭な開口割れ目が認められた。これらは、コア観察における割れ目面の状態から発破掘削時に生じた割れ目であると判断された。また、孔壁からの深度が50cm以深では、開口幅が0.5mm以下の微細な割れ目が主に礫境界および層面で観察された。

短区間透水試験から求められた透水係数及び割れ目がまたがっている区間を併記したものを図-3に示す。透水係数の算出は、下式に示すパッカー法の関係式(西垣誠, 1986¹⁾)を用いた。

$$Q = \frac{2\pi L k \Delta H}{\sinh^{-1}(L/2r_w)} \quad (1)$$

ここで Q : 流量, r_w : 井戸半径, k : 透水係数, L : 透水試験区間長, ΔH : 試験区間内における水圧増分

深度方向の透水係数の変化に着目すると、U孔における坑壁表面0~40cmで4オーダー、D孔における坑壁表面0~20cmで5オーダー程度高くなっている。

これらの区間では、試験時に孔口から50~100cm離れた坑壁の割れ目からのリークが認められた。このことから、表面部での高い透水性は割れ目に起因し、ある程度連続して存在していると考えられる。コア観察によると当該区間の地質は深部と同様であり、さらに、この区間に存在する割れ目面は掘削の影響によって生じたものと判断されるものが多い(7本中6本)ことから、掘削の影響で坑壁表面付近の岩盤に割れ目が形成され、透水性が上昇したと考える。

以上より、当該岩盤では坑壁表面付近の数10cmの範囲ではあるが、掘削による影響を受け坑道周辺岩盤の透水性が母岩に比して極端に高くなる傾向があることが確認された。これは、先に述べた弾性波速度の低下領域の2mに対して範囲が小さい。この原因としては、透水試験を実施した個所が2カ所と少なく全体を代表したものとはいえないことや、探査の精度等が考えられるが、その他に、透水性と弾性波速度の関係がリニアに対応しないことが原因となっている可能性もある。従って、この関係を今後明確にしていける必要がある。

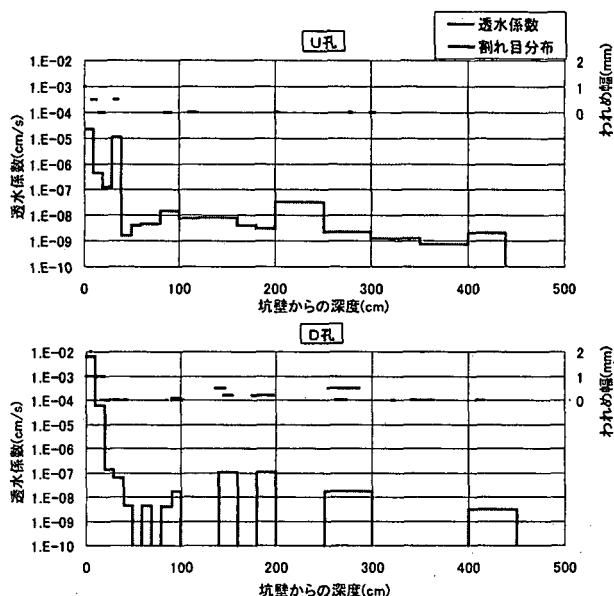


図-3 透水試験結果

4. 蒸発量試験

(1) 試験装置の概要

蒸発量試験²⁾では、ダブルバックカーにより仕切られた区間での蒸発量を測定するベンチレーション方式の装置を作製した。測定は、シリカゲルで除湿した相対湿度 13% 程度の乾燥した空気を送気し、入気・排気の温度・相対湿度・流量から、それぞれに含まれる水分量を算出する。

本試験装置の特徴は次のとおりである。

- ・ 区間長を短く設定できる (10,20,50cm)。
- ・ 区間長を短くすることで、亀裂性岩盤における割れ目を有する区間と、割れ目を有さない区間のコントラストを明確にできる。

測定を概念を図-4 に示す。

(2) 試験結果

D 孔における試験では、坑壁表面から深度 1m を 10cm ピッチ (10 区間)、深度 1~2m を 20cm ピッチ (5 区間)、深度 2~5m を 50cm ピッチ (6 区間) の合計 21 区間を測定した。蒸発量測定時の経時変化の例を図-5 に示す。連続的な送気によって蒸発量が計測された区間 (ex:180-200 区間) は 3 区間のみであり、その他の区間では蒸発量がしばらくすると 0 となる結果になった。蒸発量が 0 になるまでの時間に着目すると、この時間が相対的に長い区間 (ex:20-30cm 区間) と短い区間 (ex:60-70cm 区間) があった。前者の区間は、BTV 観察で割れ目が認められた区間とほぼ一致していたため、当初考えた測定方法では検出できない程度の水分が供給されている可能性が想定された。そこで、これらの区間では、入排気の水分量の差が見掛け 0 となった時点で一端送気を停止し、一定時間後に再び送気を開始し、その時に測定された蒸発量と停止時間の関係から蒸発量を算定することとした (図-6)。この試験で計測される蒸発量は、送気停止から送気開始後再び蒸発量が 0 にな

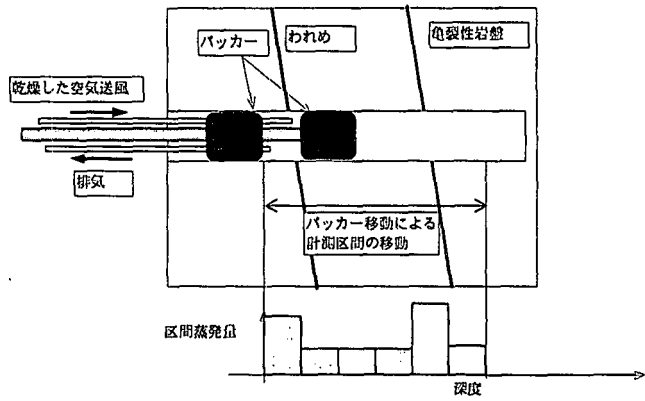


図-4 ベンチレーション方式による蒸発量試験の概念図

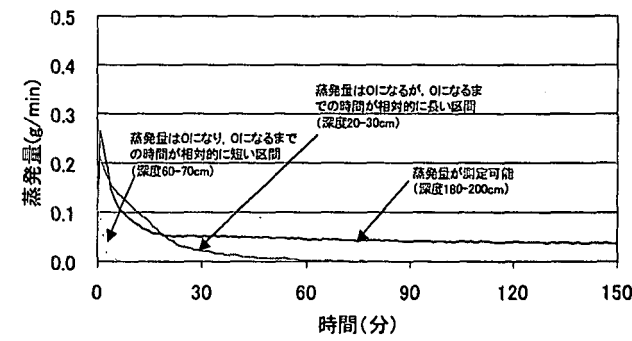


図-5 蒸発量の経時変化の例

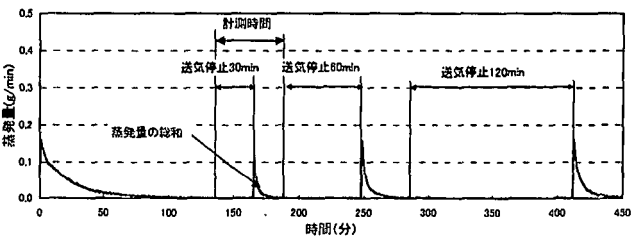


図-6 間欠的な送気による蒸発量の測定例

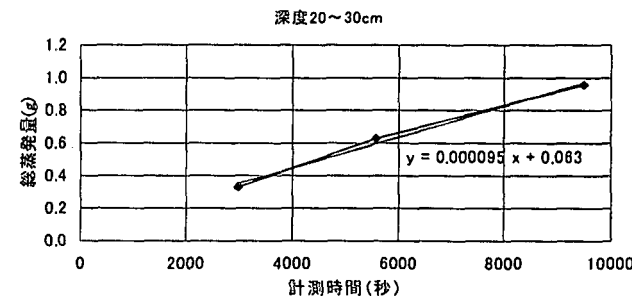


図-7 計測時間と総蒸発量の関係

るまでの時間に測定区間に供給された水の量と考えられる。この時の時間と総蒸発量の関係を図-7に示す。総蒸発量は時間にほぼ比例していることから、一定時間で一定の水分量が孔内へ供給されていると判断され、この傾きから蒸発量を算出することとした（以降間欠法と呼ぶ）。D孔については、主に割れ目のある区間を主体として5区間、割れ目の全くない区間で1区間選定し間欠法で測定を実施した。

一方、U孔における蒸発量試験は透水試験と同様に削孔後約半年後に行った。また、U孔における測定は全区間(19区間)で間欠法にて実施した。U孔、D孔における蒸発量試験結果を図-8に示す。

蒸発量が多い区間(ex; U孔 200-250cm, D孔 180-200,250-300cm)では割れ目が認められる。また、割れ目が全くない区間(ex; U孔 40-80cm, D孔 60-70cm)では0.001g/min程度と蒸発量は少ない。

5. 蒸発量のメカニズムに関する検討

(1) 動水勾配に伴う蒸発量変化測定試験の概要

蒸発量試験で得られた蒸発量は、毛細管現象による供給と動水勾配による供給が考えられるが、どちらの影響が大きいものかは測定値から読みとれない。そこで、当該岩盤において動水勾配に伴う蒸発量変化測定試験を行い、その結果からこのメカニズムを考察した。この試験は2孔間で連続性を有すると判断された割れ目が観察された区間でU孔から水を注水し、D孔にて蒸発量を測定する試験である。試験の概要を図-9に示す。

(2) 試験結果

U孔（深度200-250cm, $k=3.3 \times 10^{-8}$ cm/s）における注水時の圧力とD孔（深度250-300cm, $k=1.7 \times 10^{-8}$ cm/s）における蒸発量の経時変化を図-10に示す。D孔で測定された蒸発量は、U孔における注水圧力の上昇に

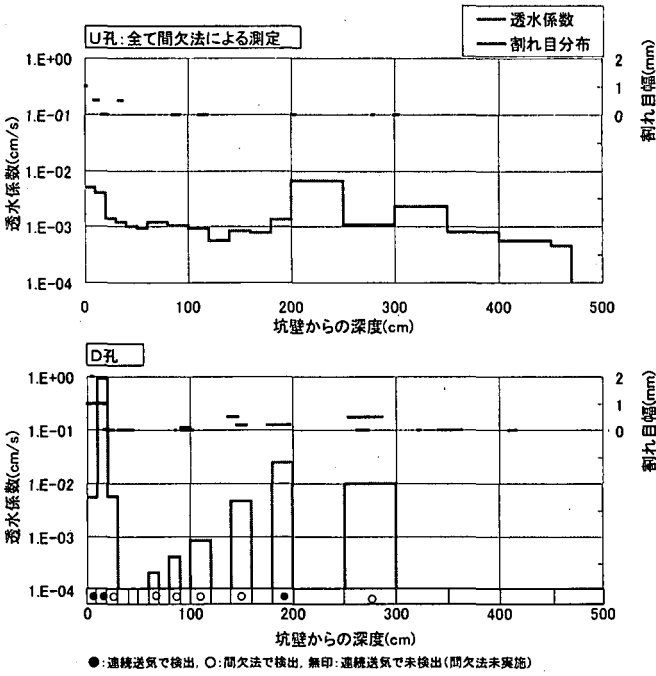


図-8 蒸発量試験結果

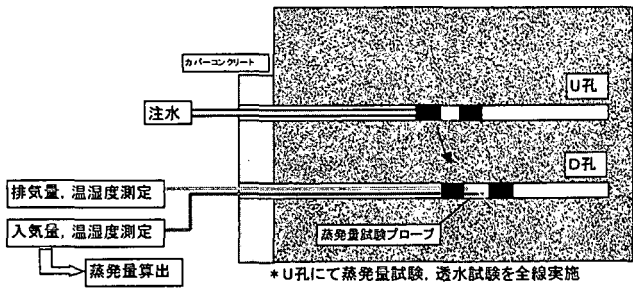


図-9 動水勾配に伴う蒸発量変化測定試験の概要

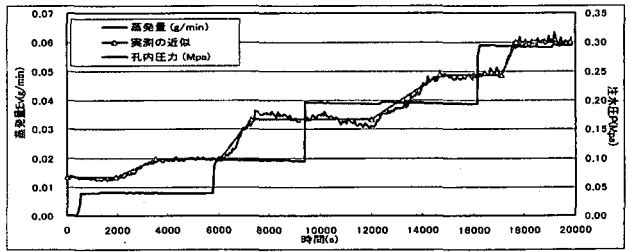


図-10 蒸発量と注水圧力の経時変化

伴って増加している。注水圧力と蒸発量の関係を図-11に示す。

蒸発量は、注水圧力にほぼ比例して増加しており、動水勾配の増加に応じて蒸発量が増加していることを示していると判断される。このことから、当該岩盤のような割れ目が水みちとして機能している岩盤における蒸発量試験結果は、割れ目等を介してダルシー則に基づき供給された水量を主に測定していると考えられる。

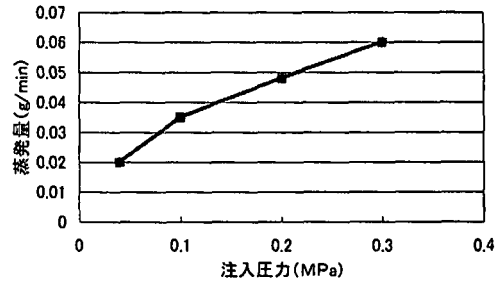


図-11 蒸発量と注水圧力の関係

6. 透水試験と蒸発量の関係に関する考察

U孔における透水係数と蒸発量の関係を図-12に示す。両者の関係は不明瞭であるが、前述の試験結果から割れ目の存在が蒸発量や透水係数に影響を与えていることを考え、割れ目の存在する区間を抜き出して整理した。ここでの深度方向の変化に着目すると、透水係数は4オーダー程度に減少しているのに対して、蒸発量は1オーダー程度の減少にとどまっている。

今、割れ目の存在する区間においては、割れ目内のみ水が流れると考えると、流量 Q は以下の式で表現できる。

$$Q = \frac{2\pi \Delta h}{\log(R/r)} \frac{\rho g a^3}{12\mu} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 ρ : 水の密度、 g : 重力加速度、 μ : 水の粘性係数、 a : 割れ目幅、 h : 水頭、 r : 井戸半径、 R : 影響範囲である。

透水試験は、試験区間内の圧力を高め、ボーリング孔から出る水の量を測定するものであり、蒸発量試験はボーリング孔内の圧力を0にして、孔内に湧出した水の量を測定するものである(図-13)。すなわち、それぞれの流量は以下の式で表すことができる。

$$Q_m = \frac{2\pi (P - P_0)}{\log(R/r)} \frac{\rho g a^3}{12\mu} \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$Q_e = \alpha \frac{2\pi (P_0 - 0)}{\log(R/r)} \frac{\rho g a^3}{12\mu} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 Q_m は透水試験時の注水量、 Q_e は蒸発量試験における蒸発量、 α は飽和にかかる係数である。完全に飽和状態の時は $\alpha=1$ 、不飽和で完全に乾燥した状態は $\alpha=0$ となる。今、影響範囲 R を一定とすると、

3)、(4)式より

$$\alpha = \frac{Q_m (P - P_0)}{Q_e P_0} \quad \dots \dots \dots (5)$$

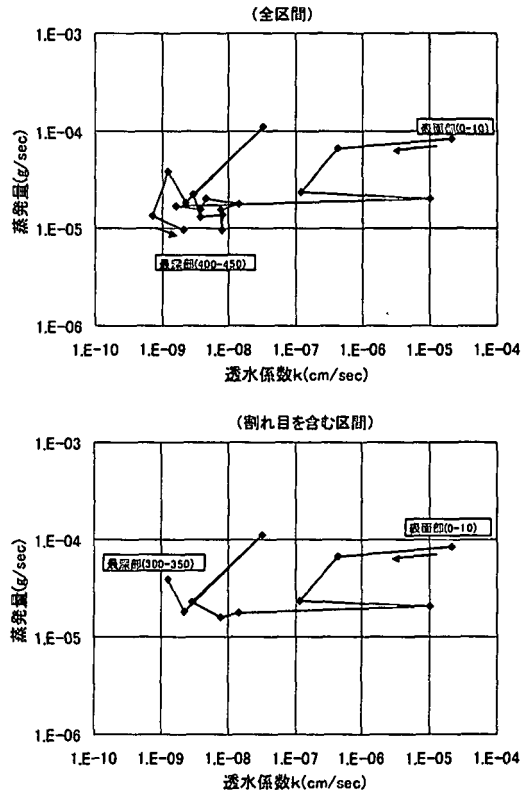


図-12 蒸発量と透水係数の関係

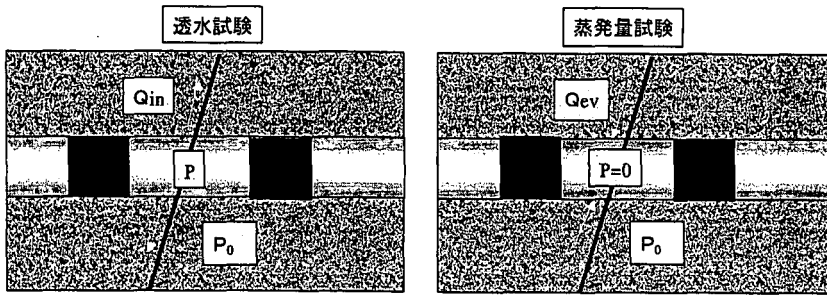


図-13 蒸発量と透水試験

となり、 α を測定値から算出することができる。

(5)式より算出したU孔、D孔の α の深度方向分布を図-14に示す

α の傾向は、次のとおりである。

- ・ 深度が深くなるにつれて大きくなる傾向にある。
- ・ ボーリング削孔直後に測定したD孔の方が削孔後約半年経過後に測定したU孔よりも α が大きい傾向にある。
- ・ 明瞭な割れ目がある区間は相対的に α の値が小さい傾向にある。

これらの傾向は、坑道周辺岩盤で想定される一般的な不飽和の傾向を示すものと考えられる。以上より透水試験と蒸発量試験を同一箇所で行い評価することで実測が困難とされている不飽和帯の範囲を推定することが可能と考えられる。

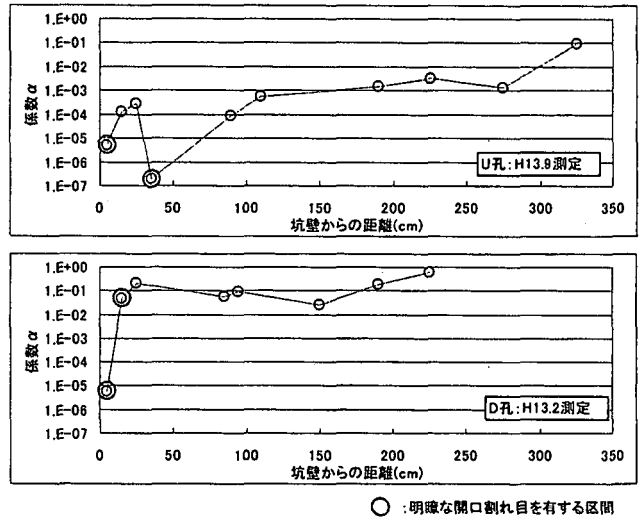


図-14 深度方向の α の分布

7. まとめ

- ① 掘削影響領域の水理特性を詳細に把握するため区間長 10cm から測定可能な透水試験装置と蒸発量試験装置を作製し、原位置試験により適用性を確認した。
- ② 硬質堆積岩での原位置試験の結果、坑道表面部が掘削の影響により生じた割れ目が原因となって透水性が坑壁表面から深度数十 cm の範囲で 4~5 オーダー程度地山深部に比較して高くなっていることが確認された。これは、弾性波探査の速度低下領域(2m)よりも狭い範囲である。
- ③ 動水勾配に伴う蒸発量変化試験の結果、硬質堆積岩での蒸発量試験測定値は主に割れ目から供給される水量であると考えられる。
- ④ 透水試験と蒸発量試験を同一箇所で行い評価することで、不飽和帯の範囲を推定する手法としての適用可能性を示した。

【参考文献】

- 1) 西垣誠：単孔式原位置透水試験の整理（その2），地下水と井戸とポンプ，pp.15-24，1986
- 2) 吉沢達夫，渡辺邦夫ら：Evaporation Logging Systemの改良と原位置での適用検討，第55回土木学会年次講演会