



不飽和領域の解析方法及び原位置計測手法の研究

櫛原 昇 今井 久* 雨宮 清*
西田 薫*¹ 林 為人*¹ 榊 利博*²

東濃地科学センター
* ハザマ
*¹ (株)ダイヤコンサルタント
*² コロラド大学

資料番号 : 4 - 12

Researches on numerical evaluation and in-situ measurement of an unsaturated zone

Noboru HIRAHARA Hisashi IMAI* Kiyoshi AMEMIYA*
Kaoru NISHIDA*¹ Weiren LIN*¹ Toshihiro SAKAKI*²

Tono Geoscience Center

* HAZAMA Corporation

*¹ DIA Consultants

*² University of Colorado

東濃地科学センターでは、岩盤中への空洞掘削に伴い空洞周辺に生じる可能性のある不飽和領域を把握することを目的とし、平成5年度から不飽和領域の解析方法及び原位置計測手法の確立のための研究を実施してきた。比較的空隙率の大きい堆積岩が分布する東濃鉱山の既存坑道を試験サイトとした。

解析方法の研究では、多孔質媒体として既存の飽和・不飽和浸透流解析コードにより現実的な解が得られた。解析条件を適切に設定するための物性値の算出手法を確立した。原位置計測手法については比誘電率に着目し、TDR法と孔間レーダ法により、岩盤中の含水量をある程度の精度で計測できる可能性を確認できた。

Since 1993, Tono Geoscience Center has been carrying out research into the development of numerical evaluation and in-situ measurement of an unsaturated zone which may be induced in the vicinity of an underground drift due to excavation. The Tono Mine, with a geological formation of a relatively porous sedimentary rock, was chosen as the site for validating these methods.

For the numerical simulation, assuming a porous medium, a realistic solution can be obtained by means of existing saturated-unsaturated groundwater simulation codes. A methodology for determining appropriate material properties has also been established. For the field measurement methods, TDR and cross-hole radar have been shown to be reliable for predicting the water content in rock with an acceptable accuracy.

キーワード

不飽和領域、有効空隙率、体積含水率、水分特性曲線、相対透水系数、サクシオン、比誘電率、TDR、孔間レーダ、電磁波

Unsaturated Zone, Effective Porosity, Volumetric Water Content, Moisture Characteristic Curve, Relative Hydraulic Conductivity, Suction, Relative Dielectric Constant, Time Domain Reflectometry (TDR), Cross-hole Radar, Electromagnetic Wave

1. はじめに

岩盤内に空洞を掘削した場合、その空洞周辺岩盤には空洞壁面からの地下水の蒸発や空洞への強制的な地下水の流出により、不飽和領域が発生する可能性がある。

地下深部の地下水は一般に還元性を示すが、不飽和領域の発生によって酸素を含んだ空気が空洞

周辺の岩盤に侵入することにより、地下水の還元性が失われ、地下水への物質の溶解度が大きくなる。また一旦不飽和領域が発生すると、空洞が再び水で飽和した後もその周辺岩盤に水理特性上、影響がある期間残留する可能性が考えられる。

したがって、岩盤内に空洞を掘削した場合、空洞周辺にどの程度の範囲で不飽和領域が発生する

かを定量的に把握する必要があると考えられるが、岩盤中の不飽和領域の計測手法はもとよりその正確な定義についても明確ではないのが現状である。ただし、土壌を対象とした不飽和に関する基礎的な研究は比較的盛んに行われており、土中の不飽和領域を定量的に把握するための市販の計測装置も出現している。

東濃地科学センターでは、岩盤中の不飽和領域を定量的に把握するための解析技術及び計測手法の確立を最終目的とし、土壌分野の研究成果等も考慮しつつ、平成5年度より次の2項目に関する研究を実施してきた。

不飽和領域の解析方法に関する研究

不飽和領域の原位置計測手法に関する研究

本報告はこの研究の概要と得られた成果及び課題について報告するものである。

2. 不飽和領域の解析方法に関する研究

2.1 研究方針

研究初年度における広範な文献調査の結果、不飽和領域を含む岩盤の含水量分布の解析を行う際のモデル化については、

- 亀裂部分の不飽和浸透特性
- 岩盤マトリックス部の不飽和浸透特性
- 境界条件
- 亀裂部のモデル化

を把握することが必要と考えられた。しかしながら、亀裂の分布や連続性、亀裂中の地下水の流れを把握して研究に取り込むことは現状では困難であるため、本研究については当面上記及びは考慮せず、堆積岩のような多孔質体を対象にすることとした。

2.2 研究成果

平成5年度からの6年間の研究により、堆積岩のような多孔質体に対しては、

- 岩盤の飽和透水係数
- 岩盤の有効間隙率 (= 飽和体積含水率)
- 岩盤の不飽和特性
- その他の境界条件・初期条件

について、適切な試験を実施して条件を設定すれば、既存の飽和・不飽和浸透流解析コードによって、現実的な不飽和領域を含む含水量分布が推定可能であることが明らかになってきた。なお、上記の内では相対的にと の条件設定が解析結果に及ぼす影響が大きいことが判明した。

境界条件としては、坑道からの蒸発量や上部からの涵養量、初期条件としては地下の間隙水圧等

であり、実測あるいは推定によって求められる。岩盤の飽和透水係数は原位置または室内透水試験によって求められ、有効間隙率は室内試験等により求められる。岩盤の不飽和特性については従来の土壌を対象とした方法が適用可能かどうかも含め、室内試験等により詳細に検討を行った。その結果を以下に述べる。

2.3 岩盤の不飽和特性

岩盤の不飽和特性とは、不飽和状態(飽和度 0 ~ 100%)における以下の2つの曲線で示される関係である。

水分特性曲線：飽和度(または体積含水率)とサクシオンとの関係。

相対透水係数曲線：飽和度(または体積含水率)と相対透水係数との関係。

これらの関係を表す概念図を図1に示す。サクシオンとは負の間隙水圧で、一般的には土壌や岩石のマトリックスが水分を吸着する、主として表面張力に起因する力である。相対透水係数とは、飽和時の透水係数を1.0としたときの不飽和状態における透水係数の相対値である。なお飽和度と

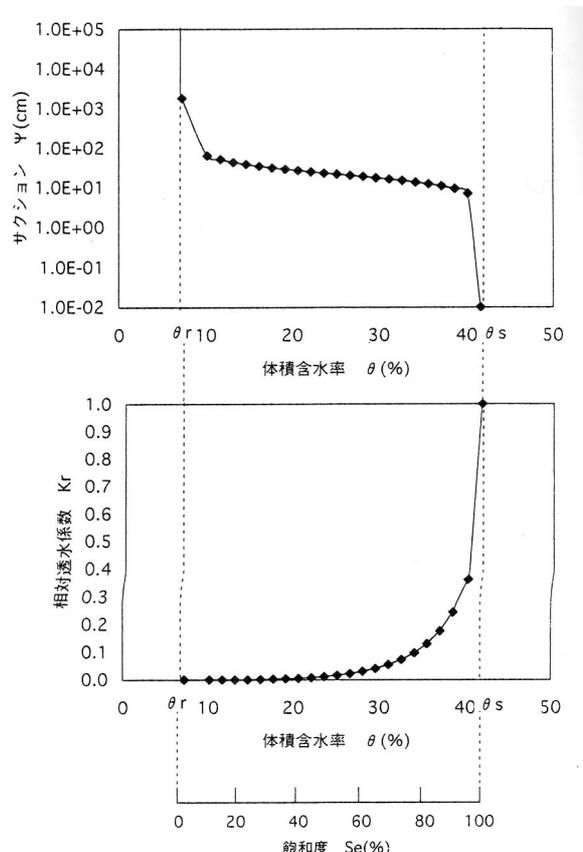


図1 体積含水率とサクシオン及び相対透水係数の関係例

体積含水率との関係は一意的であり、次式により両者は互いに換算できる。

$$Se = (s - r) / (s_{sat} - r) \quad \dots\dots$$

- Se : 飽和度
- s : 体積含水率
- s : 飽和体積含水率 (= 有効間隙率)
- r : 最小体積含水率

上記及びの2つの関係を表現する式として、下記2つの式で示されるvan Genuchtenの式(以下VG式とする)がある。

$$Kr = Se^{1/2} \{1 - (1 - Se^{1/m_2})^{m_2}\}^2 \quad \dots\dots$$

$$m_1 = 1 - 1/n_1, m_2 = 1 - 1/n_2 \quad (n_1, n_2 > 1)$$

- ψ : サクシオン
- Kr : 相対透水係数
- Se : 飽和度
- n₁, n₂ : パラメータ

このVG式は本来土壌の分野で適用され、とSeの関係が判れば一意的にKrとSeの関係も求まるものであるが、VG式の岩盤への適用を検討した結果、土壌と異なり2つの式のパラメータnを上式のようにn₁とn₂に分けて、-Se、Kr-Seそれぞれの関係を独立に求める方が、実際の岩盤中の飽和・不飽和浸透特性をより正確に表現できることが判明した。

n₁を水分特性曲線のパラメータ、n₂を相対透水係数のパラメータ、合わせてこの3つを不飽和パラメータといい、これらのパラメータを求めることにより岩石の不飽和特性が決定される。

2.4 不飽和パラメータの決定方法

各パラメータを求める概略手順を示す。

水分特性曲線のパラメータ、n₁

供試体を用いたpF試験(サクシオンと含水率の関係を求める室内物理試験)によって、体積含水率(または飽和度Se)とサクシオンとの関係を求める。またこの試験時に飽和体積含水率sと最小体積含水率rも求める。pF試験は土柱法、加圧板法、サイクロメータ法を組み合わせで行う。

測定で得られたψ-t曲線を、VG式で近似させて、n₁を同定する。

相対透水係数のパラメータn₂

手順を図2に示す。

コア供試体により非定常蒸発量試験(図3)を行い、蒸発量Evを実測し、サクシオン

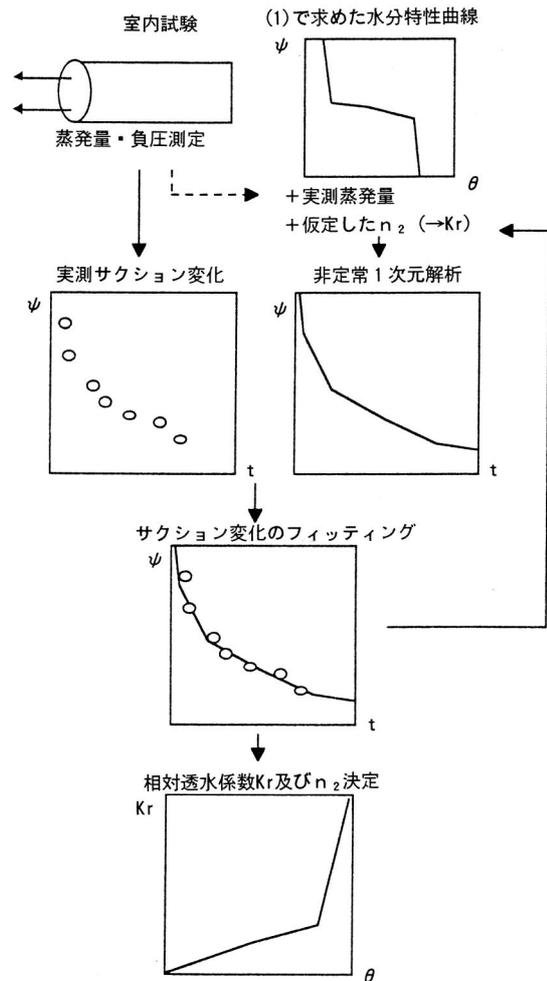


図2 相対透水係数のパラメータn₂を求める手順

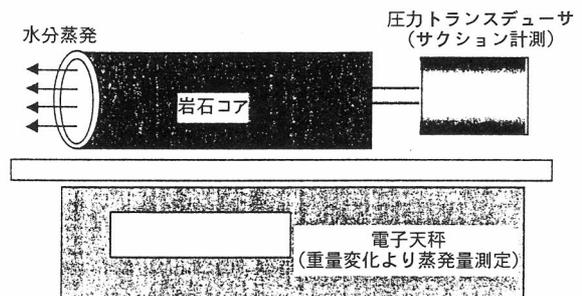


図3 コア供試体による非定常試験方法

の経時変化ψ-t関係をプロットする。

n₂を仮定した上でVG式によるKrとψで実測した蒸発量Evを境界条件として非定常解析を実施し、体積含水率の経時変化ψ-t関係を求める。さらにψ-tで得られたψ-t関係を用いて、得られたψ-t関係からψ-t曲線を求める。

のψ-t関係を最も良く近似する曲線を

の手順で求め、 n_2 を同定する。

2.5 解析事例

岩盤内に坑道掘削によって生じる不飽和領域の予察的解析を2次元モデルにて行った。

図4に解析モデルを示す。ここでは土被り150m、直径3mの坑道掘削を想定し、解析条件を下記のように設定した。このうち境界条件は比較的現実的な値を設定し、岩石の物性値は白浜砂岩供試体による室内試験結果で得られた値を用いた。

- 上面からの地下水涵養量 = 0.001mm/day
- 坑道からの蒸発量 : $E_v = 2.0$ (mg/m²/s)
- 飽和透水係数 : $K_s = 1.00E-8$ (cm/s)
- 飽和体積含水率 : $s = 0.15$
- 最小体積含水率 : $r = 0.00$
- 水分特性曲線パラメータ : $\alpha = 1.01E-3$
- " : $n_1 = 1.237$
- 相対透水係数パラメータ : $n_2 = 3.651$

負圧が生じる領域を不飽和領域とすると、解析結果は図5に示すとおり、坑道周辺に約1mの不飽和領域が生じることが予測される結果となった。

2.6 解析方法における問題点及び課題

現状では下記の問題点が残されており、将来的に解決すべき課題といえる。

原位置での検証の必要性

現状では原位置試験エリアである東濃鉱山の第1計測坑道周辺岩盤に不飽和領域が発生していないため、物性値や境界条件が明らかで不飽和が発生しているエリアでの原位置試験による検証を行

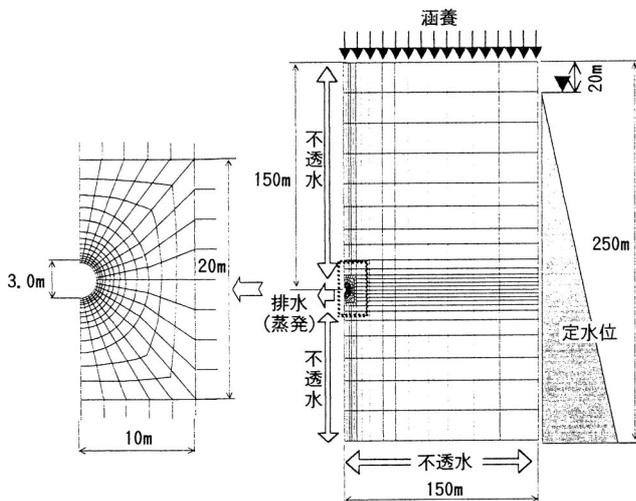


図4 解析領域及び設定境界条件

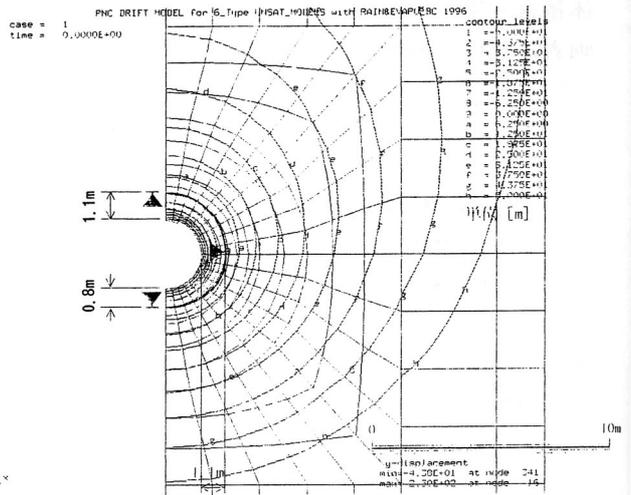


図5 解析結果

う必要がある。

地質の不均質性の考慮

本研究では前述の研究方針のとおり、堆積岩を念頭においた均質な多孔質媒体を対象とするものであったが、実岩盤は実際には岩種・岩相や亀裂分布の局所的な違いに起因する不均質性を有しているのが一般的であり、今後は岩盤の不均質性を考慮した解析方法の開発を行う必要が考えられる。

3. 不飽和領域の原位置計測手法に関する研究

3.1 室内試験による原位置計測手法の選定

原位置岩盤が地下水で飽和しているかどうかは、対象箇所の岩の体積含水率が有効間隙率に等しいかどうかで判断できる。岩の有効間隙率は試料を用いた一般的な比重・吸水率試験等で比較的容易に求めることができるため、不飽和領域の計測手法としては岩盤中の体積含水率を求める方法を開発すれば良いことになる。

岩盤中の含水率を調査する方法としては、現状では重量法がある。これは、対象部の岩石コアをサンプリングし、コアボーリングによる掘削水の影響を除去するためコア周囲を剥削した後に室内含水量試験を実施するものであるが、測定の間隔がボーリングしてコアを採取する必要があるため、また同一箇所の含水率の経時的な変化を計測することができない。このため、本研究では物理探査的手法を利用して岩盤の含水率を計測する手法を開発するものとした。

含水状態によって変化する物理量として、既存の文献調査等から音波速度、比抵抗、比誘電率を抽出し、平成6~7年度に多胡砂岩、白河熔結凝

灰岩、来待砂岩、白浜砂岩、稲田花崗岩の5岩種の供試体を用いてこの3種の物理量と含水率との関係の比較を行った。その結果、比誘電率測定結果が最も岩の含水率と相関があり精度良く岩盤の含水状態を推定できるものと判断し、以後は比誘電率に着目して計測手法の研究を進めた。なお、比誘電率とは対象媒質の誘電率と真空の誘電率との比であり、媒質を伝播する電磁波速度より計算できる物理量である。

3.2 岩盤中の比誘電率計測方法

比誘電率を用いた計測方法として、従来土壌の含水率計測に用いられているTDR (Time Domain Reflectometry) 法を岩盤の含水率計測に適用する方法及び、不飽和領域の面的な拡がりを計測できる可能性のある孔間レーダの2方法を検討対象とした。本研究では上記2方法について、その適用性を室内試験・原位置試験等により評価した。

3.3 TDR法による比誘電率測定原理

TDR法は、電磁波の伝播速度と一意的な関係にある比誘電率が媒質の含水率に強く依存する性質を利用して、土壌の含水率計測に利用されるようになったものである。

本研究ではこのTDR法を岩盤の含水率計測に適用させる研究を実施した。写真1にTDR計測装置を示すが、パルスジェネレータとオシロスコープ、そしてプローブと呼ばれるセンサー部分からなる。プローブは新製し、他は市販装置を使用した。プローブの構造は同軸ケーブルに2本の金属ロッドを接続したもので、このプローブを計測しようとする媒質中に挿入し、パルスジェネレータから発信された電磁波パルスがプローブを介して媒質を伝播する速度を計測する。媒質の比誘電率は下記式のように真空中の電磁波速度と媒質中の電磁波速度の2乗の比で表わされる。

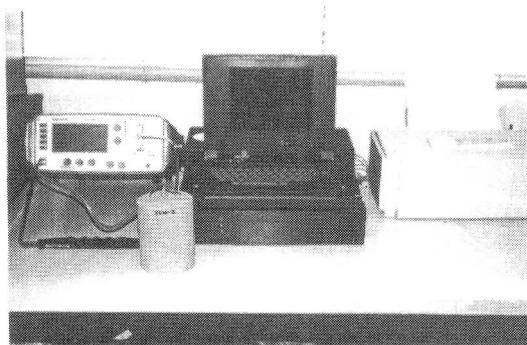


写真1 TDR計測装置

$$= (C/V)^2 = (V_{\text{air}}/V)^2 \times \epsilon_{\text{air}} \dots\dots$$

- ：媒質の比誘電率
- ϵ_{air} ：空気中の比誘電率 (1)
- C：真空中の電磁波速度 ($= 3 \times 10^8 \text{m/s}$)
- V：媒質中の電磁波速度
- V_{air} ：空気中の電磁波速度 (C)

3.4 TDRの適用性評価に関する室内試験

平成7年度より合計9岩種の岩石供試体を用いて、供試体の含水率を飽和度100%から0%まで変化させながら比誘電率を測定し、体積含水率(及び飽和度)と比誘電率の関係を求める室内試験を実施した。

TDRプローブを設置した供試体形状を図6に示す。直径100mm、高さ130mmの円柱供試体上面に直径5mmの孔をダイヤモンドビットで穿孔し、それよりわずかに大きい径で長さ100mmの真鍮の棒状のプローブ2本を孔に叩き込んで設置した。

9岩種のうち、東濃鉱山の新第三紀堆積岩である明世砂岩の計測結果を図7(AS-1、AS-2)、白河熔結凝灰岩の結果を図8(SW-1、SW-2)、ウェスターリー花崗岩の結果を図9(WG-1、WG-2)にそれぞれ示す。プロットされた点はいずれも飽和度100%近傍の体積含水率において比誘電率の値が急激な変化を見せている。

土壌や岩の比誘電率と体積含水率との関係を表す式としては、3相 ミキシングモデルと呼ばれる下記式が知られている。これは土壌や岩石は空気・水・固体の3相からなっており、各相の比

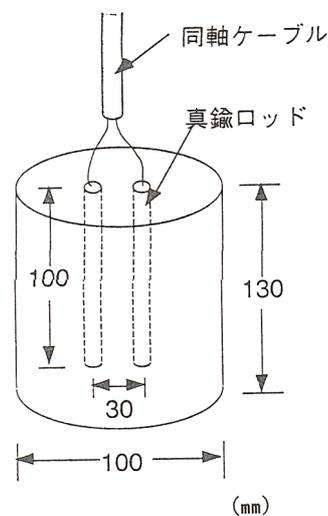


図6 TDR室内試験供試体

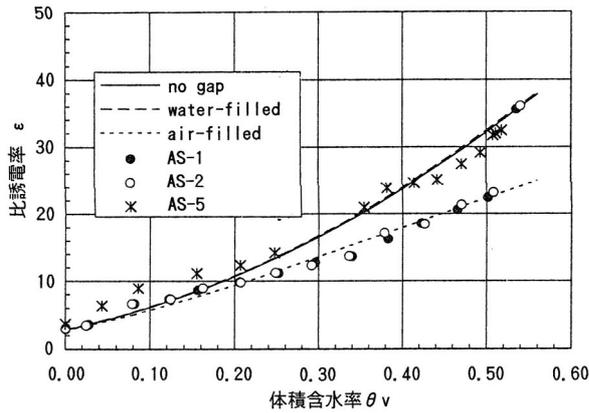


図7 TDR室内試験結果(明世砂岩)

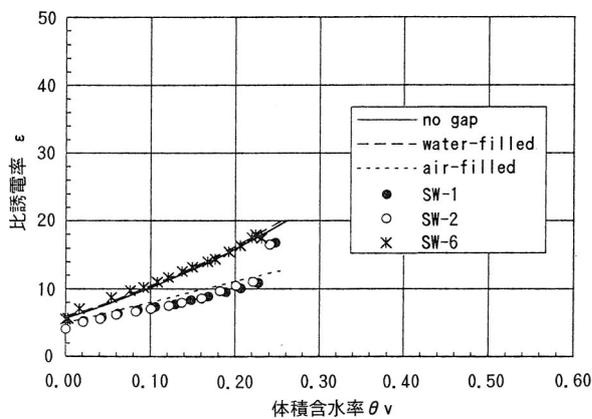


図8 TDR室内試験結果(白河熔結凝灰岩)

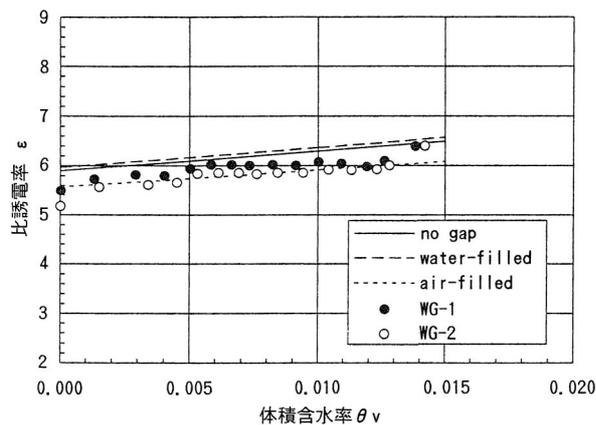


図9 TDR室内試験結果(ウェスター花崗岩)

誘電率はその体積割合に応じて全体の見掛けの比誘電率に寄与する、と考えるものである。

$$= (n - v) \text{ air} + v \text{ water} + (1 - n) \text{ solid} \dots$$

: 対象物質の見掛けの比誘電率

- v : 体積含水率
- n : 対象物質の有効間隙率
- air : 空気の比誘電率 (= 1)
- water : 水の比誘電率 (= 81)
- solid : 固体部分の比誘電率
(岩石では一般的に 4 ~ 7)
- : 形状係数 (= 経験的に 0.5)

図7～9中の実線は設置したプローブと岩石の間に隙間がない場合を式によって計算した結果である。またFerre, et al. (1996)はTDR計測におけるプローブ周囲の隙間の影響に関する研究を行っており、その研究結果から得られた式に基づき、空気で満たされた隙間がわずかにある場合と、水で満たされた隙間がわずかにある場合の計算値を図7～9中の点線及び破線で示す。(隙間量はプロットされた点をベストフィッティングするように与えられている。)これらの図より、実測された $\epsilon - \theta_v$ 関係は、飽和状態では破線の、不飽和状態では点線の計算結果にほぼ一致することから、設置されたプローブと岩石の間にわずかな隙間が存在し、それが測定結果に影響していると考えられた。

このため平成10年度はプローブの改良を行った。改良型プローブは図10に示すように金属管とその内径に等しい外径を有する金属棒とからなっている。設置手法は、予めペースト状の導電性シリコンを充填した金属管を岩石に穿孔した孔に挿入し、その中に金属棒をピストン状に押し込んで導電性シリコンを管外面と岩内面の隙間に回り込ませて完全に充填させるものであり、この方法によりプローブを設置した供試体に対して再度室内試験を行った。その結果は、明世砂岩では図7のAS-5、白河熔結凝灰岩では図8のSW-6に示すとおりであり、実測値は図中のミキシングモデルにより計算された実線とほぼ一致しており、プローブと岩石の間の隙間の影響がほぼ取り除かれたものと考えられる。

室内試験によってこのような体積含水率と比誘電率の正確な曲線関係(キャリブレーションカー

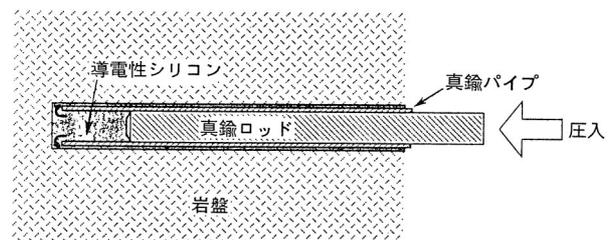


図10 平成10年度改良型TDRプローブ設置方法

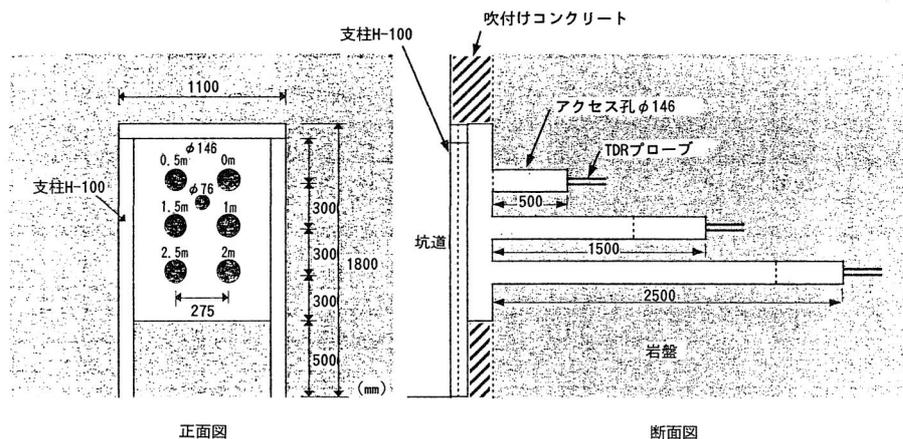


図11 TDR原位置試験レイアウト

ブ)を求めておけば、原位置試験で得られた比誘電率から岩盤の体積含水率、そして飽和度を求めることができる。しかし、図9のウェスターリー花崗岩のような有効間隙率の小さい岩種では、両者の関係を示す曲線の傾きが小さいため、キャリブレーションカーブから含水率を算出する場合、比誘電率の測定誤差に伴う体積含水率の同定誤差が相対的に大きくなる。

3.5 TDR原位置試験

平成9年度より、サイクル機構東濃地科学センターの東濃鉱山において、TDRプローブを用いて原位置試験を行った。試験位置は第2立坑第1計測坑道側壁であり、プローブ設置レイアウトは図11に示すとおりである。設置位置の岩種は明世砂岩であり、坑道壁面は常時湿潤状態であるため不飽和領域は生じていないと推定された。同坑道の吹付けコンクリートを除去した箇所に、プローブを設置するためのアクセス孔 146mmを壁面からの深度0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5mの5箇所掘削し、深度0mを含めて6深度でのアクセス孔底に長さ300mm、直径約10mmのTDRプローブを設置した。なおアクセス孔内面は水分の蒸発を防ぐためコーティングを行った。

平成9年度の計測では前述したプローブと岩盤との隙間の影響により、有意な結果を得ることができなかった。平成10年度は前述改良型ピストン状プローブを設置した(深度2.0mは前年度設置したプローブが引抜けなかったため設置できず)。

比誘電率計測結果を図12に示す。比誘電率計測値は35~40程度の値を示し、経時変化も比較的安定していた。また試験位置から採取した岩石コアを用いた室内試験で得られた $\epsilon - \nu$ 関係(図7)から飽和度100%での比誘電率は35前後を示すこ

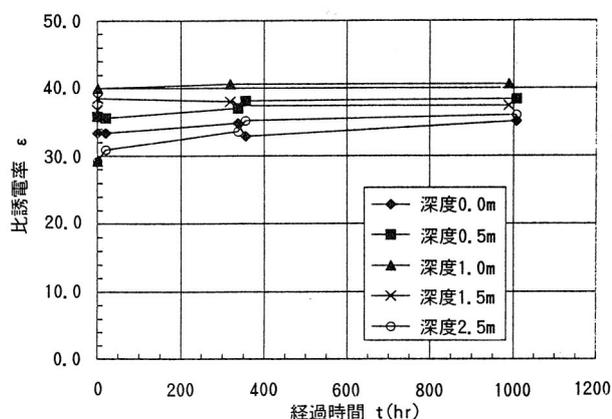


図12 TDR原位置試験比誘電率経時変化

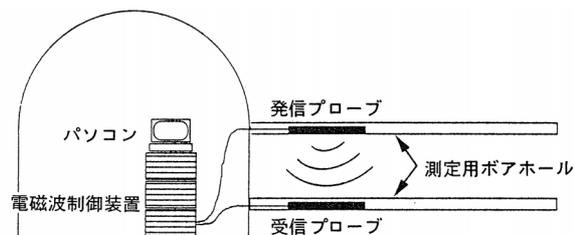


図13 孔間レーダ法による計測概念図

とから、ばらつきはあるものの今回の原位置測定ではほぼ対象岩盤の飽和度(100%)を測定できたと考えられる。

3.6 孔間レーダ法による比誘電率測定原理

孔間レーダは2本のボーリング孔の一方に発信装置、他方に受信装置を挿入して岩盤中に電磁波を伝播させて発・受信点間の電磁波速度を測定し、それにより岩盤の比誘電率を算出する手法である。算出した比誘電率から岩盤の体積含水率を求める点はTDR法と共通である。図13に孔間レー

ダ計測の概念図を示すが、装置は発信プローブ、受信プローブ、電磁波制御装置等からなる。TDRが局所的な含水量分布を計測するのに対し、孔間レーダはボーリング孔間の平均的な電磁波速度を測定するものであり、ある平面内の含水量分布を把握できる利点を有する。

3.7 孔間レーダ原位置試験

平成9年度にTDR原位置試験同様、東濃鉱山第2立坑第1計測坑道側壁において、孔間レーダ原位置試験を実施した。試験位置はTDR原位置計測試験の近傍である。同坑道の吹付けコンクリートを除去した箇所に、水平方向に1mの離隔で76mm、長さ8.0mのボーリング孔を2本穿孔し、その中にレーダプローブを挿入し、0.5m間隔で深度方向の電磁波速度分布を測定した。使用したレーダプローブの電磁波の中心周波数は150MHzである。

測定結果を図14に示す。同図より、測定範囲の比誘電率は深度によるがほぼ30で一定である。前述した室内試験の飽和度100%の比誘電率(35)と比較すると、若干小さめの値となっている。なお深度1mより浅い部分の測定はできなかったが、その理由はレーダプローブ自体の長さが約1mあるため、それ以浅ではプローブから発信される電磁波の一部が岩盤中ではなく空中を伝播するためである。

3.8 原位置測定手法の課題と今後の開発方向

TDR、孔間レーダ共通の課題

岩種によって比誘電率と体積含水率の関係($\epsilon - v$ 曲線)は異なる。また同一岩種でも場所によって $\epsilon - v$ 曲線はある程度ばらつく。このため、原位置で得られた比誘電率データから正確に

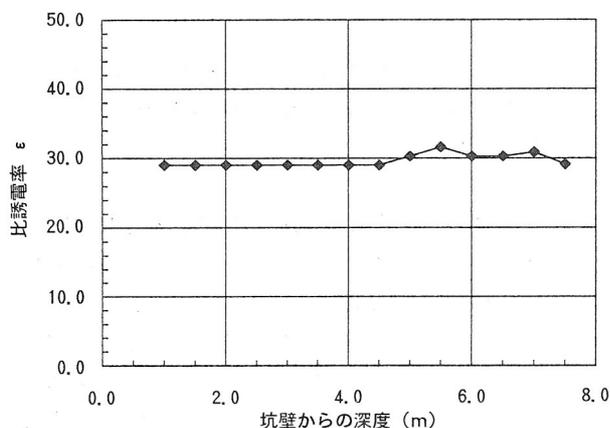


図14 孔間レーダ原位置試験結果

体積含水率及び飽和度を求める場合には、その岩種ごと、さらになるべく当該箇所近傍の供試体による室内キャリブレーション試験を実施し、

- $\epsilon - v$ 曲線を事前に求めておく必要がある。

キャリブレーション試験ができない場合及び厳密な結果が必要とされない場合は、当該岩種の有効間隙率が求めれば、前述の ミキシングモデルにより $\epsilon - v$ 曲線を想定することはできるが、その信頼性を検証するためにはさらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

TDR法の課題

原位置岩盤にTDRプローブを設置する方法としては、プローブとその設置孔との間に隙間を生じさせずにより正確な比誘電率を測定できる見通しは立ったが、棒状のプローブを原位置岩盤の所定の深度に設置する作業はかなり困難であり、実用化を考慮した場合はこの点を改善する必要があると考えられる。

孔間レーダ法の課題

レーダプローブ長の制約により坑道壁面近傍の測定が不能という問題は、坑道周辺に発生する不飽和領域は大きくても1m内外であることを考えると、改良が必要であると考えられる。

今後の開発の方向

今後はTDR法等を不飽和領域を計測するための実用的な手法・装置とするために、下記事項に留意して開発を進めていく必要があると考えられる。

原位置に設置が容易なプローブの開発

TDR法の棒状プローブに替わり、原位置での設置が容易で、かつ孔間レーダの利点である深度方向の含水量分布の把握が可能であるようなプローブの開発が必要である。

他の計測手法との比較・検討

土壌水分量計測手法としては、TDR法の他にもFDR法、ADR法などがあり、岩盤含水量計測手法としての適用性についてそれぞれの特徴を把握し、より適したものが使用できないか検討する必要がある。

実用性の考慮

将来実用に供することを考慮すると、計測装置の長期耐久性等について検討していく必要がある。

キャリブレーションの不要化ないし簡略化

比誘電率データから体積含水率そして飽和度を求めるために、現時点では同岩種供試体による室内試験によりキャリブレーションカーブを求める必要があるが、かなりの時間と手間を要するため、

ミキシングモデルの信頼性の向上等により、同試験の不要化ないし簡略化について検討する必要がある。

4. おわりに

平成5年度から6年間にわたり、不飽和領域の解析方法及び原位置計測手法について研究を行ってきた。

解析方法についての研究成果としては、堆積岩のような多孔質媒体に限定し、亀裂の存在を考慮しなければ、解析に必要な条件を適切に設定することにより、既存の解析コードにより解析が可能であることが明らかになった。また解析パラメータについてもそれを決定する試験手法をほぼ確定した。

原位置計測手法についての研究成果としては、比誘電率という物理量に着目し、計測手法としてはTDRと孔間レーダという方法により、岩盤中の含水量をある程度の精度で計測できる可能性を確認できたが、実用的な計測技術を確立する段階には至っていないのが現状である。

今後は解析方法については不飽和領域が発生している原位置における検証、計測手法については原位置設置が容易で信頼性が高く、実用性を考慮した装置の改良及び開発を行う必要があると考えられる。

謝辞

本研究にあたり、貴重な御助言を頂いた岡山大学西垣誠教授並びに埼玉大学渡辺邦夫教授に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 西田 薫, 林 為人 他: “比誘電率を用いた岩石の含水量計測の試み”, 第99回物理探査学会講演会予稿集(1998).
- 2) 雨宮 清, 今井 久 他: “砂岩の不飽和浸透特性の測定(その1: サクシオンに着目して)”, 土木学会第53回年次学術講演会概要集(1998).
- 3) 佐藤稔紀, 今井 久 他: “砂岩の不飽和浸透特性の測定(その2: 相対透水性係数に着目して)”, 土木学会第53回年次学術講演会概要集(1998).
- 4) P.A.Ferre, D.L.Rudolph, et al.: “Spatial averaging of water content by time domain reflectometry: Implications for twin rod probes with and without dielectric coatings”, Water Resources Research, Vol.32, p.271-279 (1996).
- 5) T.Sakaki, K.Sugihara, et al.: “Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock”, Water Resources Research, Vol.34, p.2623-2631 (1998).