

図書室

JNC TJ 7400 99-007

掘削影響評価試験の事後調査

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

1999年2月

大成建設株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Naka-gun, Ibaraki 319-1194,
Japan

核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

JNC TJ 7400 99-007

掘削影響評価試験の事後調査

(核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書)

1999年2月

大成建設株式会社

掘削影響評価試験の事後調査

安達 哲也*

要　旨

東濃地科学センターでは昭和62年度以来、東濃鉱山において水平坑道および立坑を掘削し、それに伴い発生する掘削影響の範囲と特性の変化の程度に関する調査研究を実施してきた。この研究により、掘削により岩盤に損傷領域が発生することや掘削工法の違いによりその範囲が異なることが明らかとなった。

本年度は、坑道掘削後の長期的な岩盤の安定性について検討するための基礎データを取得することを目的とし、平成6年度に東濃鉱山北延NATM坑道に設置した計測機器を用い、時間経過に伴って生じる岩盤変位の計測を実施した。その結果、坑道掘削から36カ月後の現在でも岩盤の変形が進んでいる事がわかった。さらに、試験坑道と計測坑道の間のほぼ全域で岩盤が動いている可能性が有ることが示唆された。また、坑道周辺岩盤の不飽和領域の拡がりを把握するための計測手法に関して検討を行うため、室内および原位置試験を実施するとともにこれまでの結果を整理した。その結果、孔間レーダおよびTDR法により岩盤の比誘電率を測定して原位置岩盤の含水量を推定できる可能性が示唆された。

本報告書は、大成建設株式会社が、核燃料サイクル開発機構の委託により実施した研究の成果である。

契約番号：100D0179

サイクル機構担当グループおよび担当者：

東濃地科学センター 地層科学研究グループ 武田 精悦

*：大成建設株式会社エンジニアリング本部エネルギー部

Post-excavation investigation on excavation effects on rock mass around a drift

T. Adachi*

Abstract

In order to quantify the extent of excavation disturbed zone (EDZ) and the mechanical and hydraulic property changes within the EDZ, Tono Geoscience Center has carried out a series of in-situ and laboratory tests at the Tono mine since 1987. The results suggest that the EDZ is induced by excavation and its extent is dependent of the excavation method.

An in-situ rock mass displacement measuring device was installed in the NATM drift in the Tono mine in 1994. In 1998, for evaluating the long-term stability of the rock mass, a set of field data of the rock mass displacement was acquired and discussed. The results showed that the displacement around the drift was still increasing 36 months after its excavation. Furthermore, it suggests that the entire section of the rock mass between the test and measuring drifts is slightly deforming. Further, to quantify the extent of unsaturated zone around the drift, some existing experimental results on the water content measurement were reviewed and discussed. It was shown that cross-hole radar and TDR are the potential methods for measuring the water content in rock mass.

This work performed by Taisei Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

JNC Liaison : Tono Geoscience Center, Geoscience Research Execution Group,

Group Leader, Seietsu Takeda

* : Taisei Corporation , Engineering Division

掘削影響評価試験の事後調査

担当者一覧

実施責任者 姉崎 進

実施担当者 安達 哲也

研究業務担当者 姉崎 進

安達 哲也

鈴木 俊一

掘削影響評価試験の事後調査

目 次

1. 概要	-----	1
1.1 研究件名	-----	1
1.2 研究の目的	-----	1
1.3 研究の範囲	-----	1
2. 岩盤内変位測定	-----	2
2.1 目的	-----	2
2.2 測定機器	-----	2
2.3 測定位置および測定方法	-----	4
2.4 測定結果および考察	-----	6
3. 坑道周辺岩盤の不飽和領域の計測手法の検討	-----	17
3.1 目 的	-----	17
3.2 既存の研究成果概要および問題点	-----	17
3.2.1 弹性波速度、比抵抗、比誘電率	-----	17
3.2.2 比誘電率～含水量の関係	-----	20
3.2.3 T D R 法	-----	22
3.2.4 孔間レーダ探査	-----	40
3.3 平成 10 年度の研究内容および成果	-----	47
3.3.1 T D R 室内実験	-----	47
3.3.2 T D R 原位置測定	-----	51
3.3.3 人工砂地盤における孔間レーダ探査	-----	53
3.3.4 左官砂の $K_a \sim \theta_v$ 関係	-----	53
3.4 まとめ	-----	56
3.4.1 T D R 室内試験	-----	57
3.4.2 T D R 原位置測定	-----	57
3.4.3 孔間レーダ探査	-----	57
3.5 今後の課題	-----	59

掘削影響評価試験の事後調査

図 目 次

図-2.2.1 多点式地中変位計の概要図	2
図-2.2.2 スライディングミクロメーターの概要図	3
図-2.3.1 岩盤内変位の測定位置	4
図-2.4.1 多点式地中変位計による岩盤内変位の経時変化図	8
図-2.4.2 多点式地中変位計による岩盤内変位の分布図	8
図-2.4.3 多点式地中変位計による変位増分	10
図-2.4.4 多点式地中変位計による単位長さ当たりの変位速度	10
図-2.4.5 スライディングミクロメーターによる岩盤内変位の経時変化図	11
図-2.4.6 スライディングミクロメーターによる岩盤内変位の分布図	11
図-2.4.7 スライディングミクロメーターによる変位増分	13
図-2.4.8 スライディングミクロメーターによる単位長さ当たりの変位速度	14
図-2.4.9 岩盤内変位測定孔の地質観察結果	14
図-2.4.10 両計測手法による岩盤内変位の経時変化（試験坑道から 0.5m）	15
図-2.4.11 両計測手法による岩盤内変位の分布図（掘削終了後 1107 日）	15
図-3.2.1.1A 飽和度～弾性波速度の関係（多胡砂岩：H6）	18
図-3.2.1.1B 飽和度～比抵抗の関係（多胡砂岩：H6）	18
図-3.2.1.1C 体積含水率～比誘電率の関係（多胡砂岩：H6）	19
図-3.2.2.1 ネットワークアナライザによる岩石の $K_a \sim \theta_v$ 関係（H9 年度）	21
図-3.2.3.1 典型的な TDR プローブ	22
図-3.2.3.2 TDR プローブ周辺の隙間	23
図-3.2.3.3 TDR 室内実験供試体概要	24
図-3.2.3.4 TDR 法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（明世細粒砂岩：H7,8）	25
図-3.2.3.5 TDR 法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（来待砂岩：H7,8）	25
図-3.2.3.6 TDR 法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（白浜砂岩：H7,8）	26
図-3.2.3.7 TDR 法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（多胡砂岩：H7,8）	26
図-3.2.3.8 TDR 法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（白河溶結凝灰岩：H7,8）	27

図-3.2.3.9 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (田下凝灰岩 : H7,8) -----	27
図-3.2.3.10 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (荻野凝灰岩 : H7,8) -----	28
図-3.2.3.11 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (稻田花崗岩 : H7,8) -----	28
図-3.2.3.12 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (ウェスリー花崗岩 : H7,8) -----	29
図-3.2.3.13 実験供試体概要 (H8) -----	31
図-3.2.3.14 各種設置方法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (白河溶結凝灰岩 : H8) -----	22
図-3.2.3.15 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (明世細粒砂岩 : H9) -----	33
図-3.2.3.16 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (白浜砂岩 : H9) -----	34
図-3.2.3.17 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (白河溶結凝灰岩 : H9) -----	34
図-3.2.3.18 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (田下凝灰岩 : H9) -----	35
図-3.2.3.19 コンクリート供試体の $K_a \sim \theta_v$ 関係 -----	36
図-3.2.3.20 豊浦標準砂の $K_a \sim \theta_v$ 関係 -----	37
図-3.2.3.21 原位置における測定レイアウト (H9) -----	38
図-3.2.3.22 ベンチレーション直前の比誘電率分布 (H9) -----	39
図-3.2.4.1 孔間レーダ探査とTDR法による測定範囲概念図 -----	40
図-3.2.4.2 東濃鉱山孔間レーダ探査概要 (H8) -----	41
図-3.2.4.3 コアより求めた含水量の深度方向分布 (H8) -----	42
図-3.2.4.4 孔間レーダにより得られた比誘電率の深度方向分布 (H8) -----	43
図-3.2.4.5 東濃鉱山孔間レーダ探査概要 (H9) -----	44
図-3.2.4.6 重量法による含水量の深度方向分布 (ベンチレーション前後 : H9) -----	45
図-3.2.4.7 孔間レーダ測定による比誘電率の深度方向分布 (ベンチレーション前後 : H9) -----	45
図-3.3.1.1 導電性シリコン加圧充填型プローブ概念図 (H10) -----	47
図-3.3.1.2 導電性シリコンチューブ拡張密着型プローブ概念図 (H10) -----	48
図-3.3.1.3 シリコン加圧充填型プローブによる $K_a \sim \theta_v$ 関係 (明世細粒砂岩 : H10) -----	49
図-3.3.1.4 シリコン加圧充填型プローブによる $K_a \sim \theta_v$ 関係 (多胡砂岩 : H10) -----	49

図-3.3.1.5 シリコン加圧充填型プローブによる $K_a \sim \theta_v$ 関係		
	(白河凝灰岩 : H10)	----- 50
図-3.3.2.1 原位置 TDR 測定による比誘電率の深度分布 (H10)		----- 52
図-3.3.3.1 人工砂地盤および測定方法の概要 (H10)		----- 53
図-3.3.3.2 砂地盤の散水前後の比誘電率分布		
	(孔間レーダ、ADR 法 : H10)	----- 54
図-3.3.4.1 左官砂 (sand-3) の $K_a \sim \theta_v$ 関係 (H10)		----- 56

掘削影響評価試験の事後調査

表 目 次

表-2.4.1 多点式地中変位計による測定値	9
表-2.4.2 多点式地中変位計による変位増分	9
表-2.4.3 多点式地中変位計による単位長さ当たりの変位速度	9
表-2.4.4 スライディングミクロメーターによる測定値	12
表-2.4.5 スライディングミクロメーターによる変位増分	12
表-2.4.6 スライディングミクロメーターによる 単位長さ当たりの変位速度	13
表-2.4.7 測定手法の比較	16
表-3.2.3.1 各岩種の物性一覧およびプローブ仕様	24
表-3.3.3.1 各種測定方法による比誘電率と体積含水率 (H10)	55

1. 概要

1.1 研究件名

掘削影響試験の事後調査

1.2 研究の目的

東濃地科学センターでは昭和 62 年度以来、東濃鉱山において水平坑道および立坑を掘削し、それに伴い発生する周辺岩盤への掘削影響評価研究を実施してきた。この研究により、掘削により岩盤に損傷領域が発生することや掘削工法の違いによりその範囲が異なることが明らかとなった。

本年度は、坑道掘削後の長期的な岩盤の安定性について検討するために、平成 6 年度に東濃鉱山北延 NATM 坑道に設置した計測器を用いて、時間経過に伴う岩盤変位の計測を実施する。また、坑道周辺岩盤の不飽和領域の計測手法に関する検討を実施する。

1.3 研究の範囲

- (1) 岩盤変位計測
- (2) 坑道周辺岩盤の不飽和領域の計測手法に関する検討
- (3) 報告書の作成・報告会の開催

2. 岩盤内変位測定

2.1 目的

平成6年度に掘削された東濃鉱山北延NATM坑道（機械掘削区間）を対象とし、坑道掘削後の時間経過に伴う岩盤内の変位の把握、および、長期的な岩盤の安定性について検討するための基礎データを取得することを目的とする。

本計測は掘削後定期的に実施されており、今回の計測は坑道掘削後約36カ月後の計測となる。

2.2 測定機器

測定機器は平成6年度に設置した多点式地中変位計およびスライディングミクロメーターを用いた。

（1）多点式地中変位計

多点式地中変位計（（株）東亜測器製：EM-150-6M）の概要を図-2.2.1に示す。

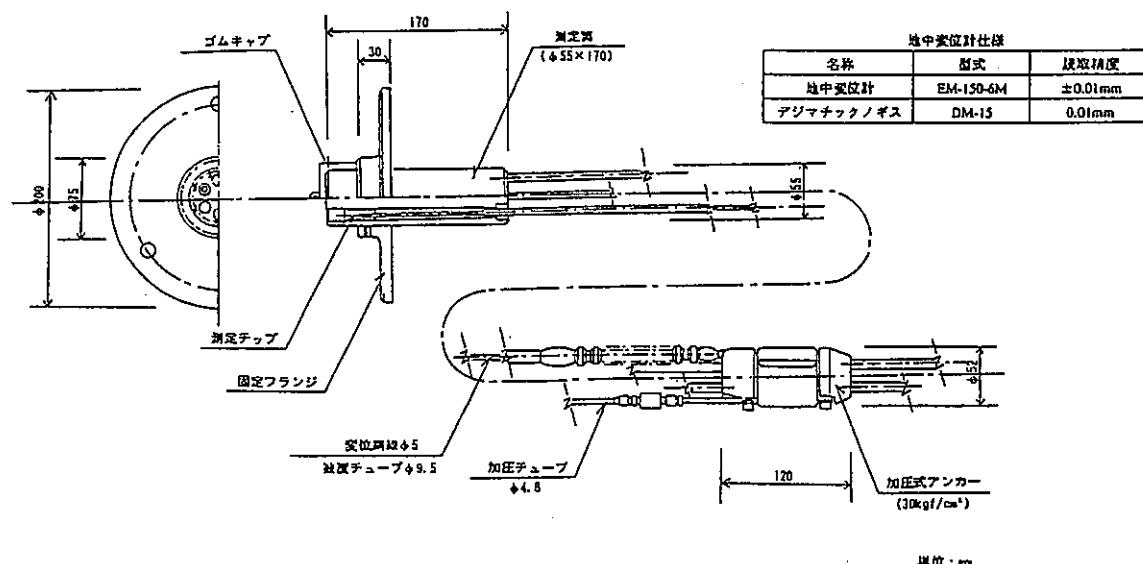


図-2.2.1 多点式地中変位計の概要図

(2) スライディングミクロメーター

スライディングミクロメーター（スイス SOL EXPERTS 社製）の概要を図-2.2.2 に示す。

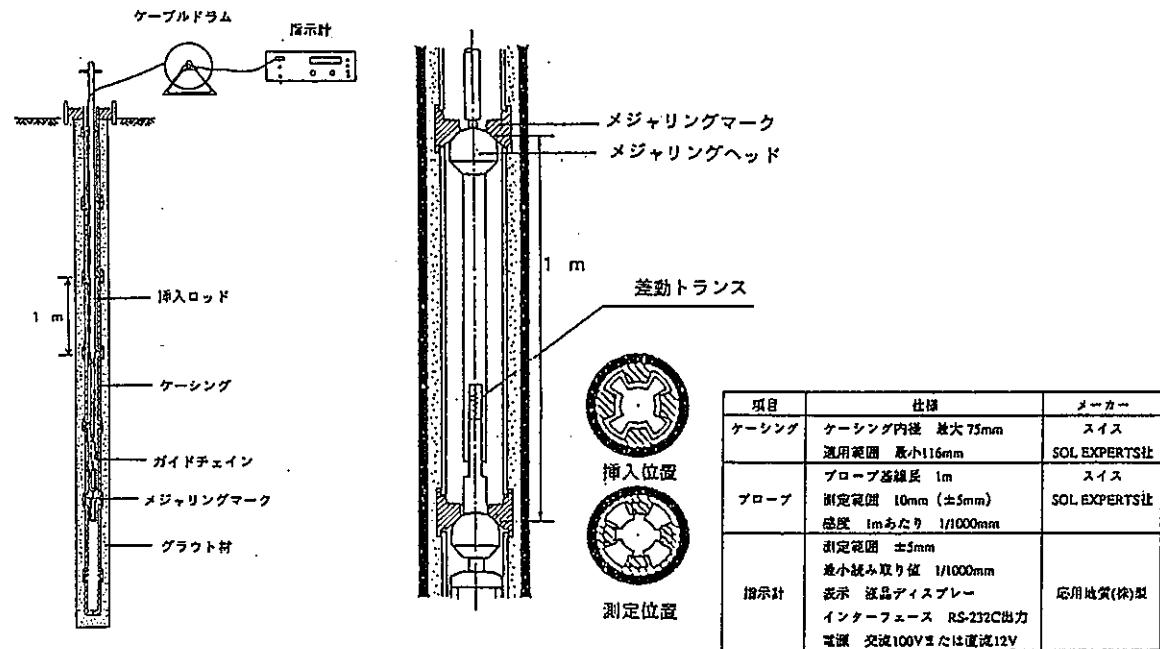


図-2.2.2 スライディングミクロメーターの概要図

2.3 測定位置および測定方法

(1) 測定位置

岩盤内変位の測定位置を図-2.3.1に示す。

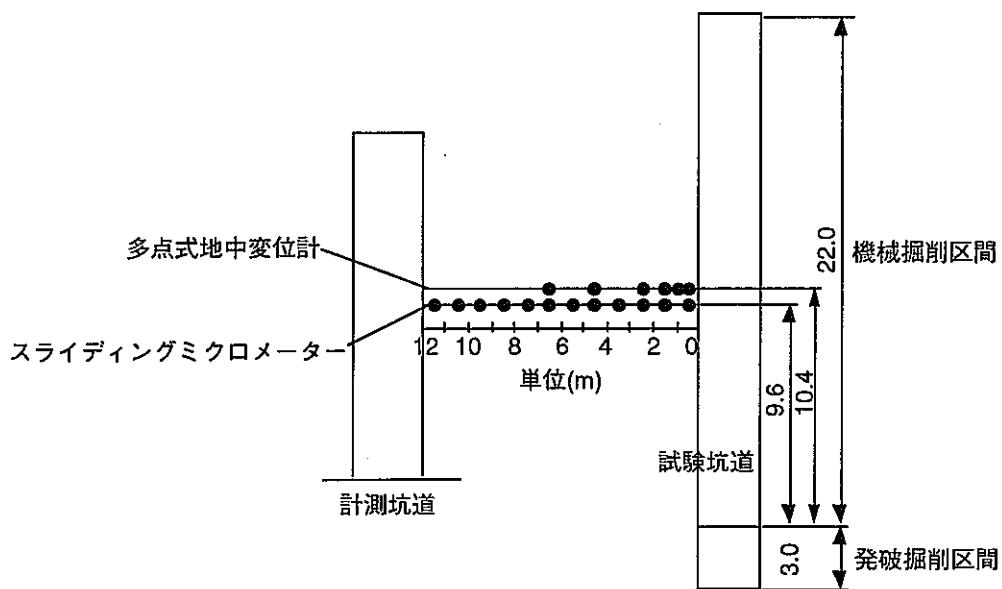


図-2.3.1 岩盤内変位の測定位置

(2) 多点式地中変位計による測定

多点式地中変位計により、MD-1孔内の6測定点（機械掘削坑道壁面からの深度：0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4.5, 6.5m）で測定を行った。

図-2.2.1に示した測定筒内の測定チップの動きをデジマチックノギス(DM-15)にて測定した。測定に際し、ノギスのアタッチメントをフランジの基準面に完全に押さえつけ、傾きや接触面での遊びが生じないようにした。ノギス可動部先端と測定チップが接触するまでノギス可動部を動かし、そのときの表示を読み取った。精度向上のため、1つの測定点について3回連続測定してその値が全て同じであった場合に、その値を測定値として採用した。

(3) スライディングミクロメーターによる測定

多点式地中変位計による測定と同時期に、スライディングミクロメーターによりMD-2孔内の12測定点（深度0.5mから1.0m間隔で11.5mまで）で測定を行った。

測定方法を以下に示す（図-2.2.2参照）。

- ①プローブと指示計をケーブルで接続する。
- ②プローブを孔内に挿入し、差動トランスの電気的安定を待つ（約30分間）。
- ③較正管を用いて補正係数、0点補正值を得る。
- ④岩盤内に設置したケーシング内にプローブを挿入し、プローブの前後のメジャリングヘッドを1mおきのメジャリングマークに密着させたときの長さを作動トランスから読み取る。
- ⑤④の操作を区間の数だけ繰り返し、各区間の長さを測定する。

精度向上のため、1つの測定点について10回程度測定し、測定値の再現性を確認した上で測定値を得た。

2.4 測定結果および考察

平成9年度までの測定データに、今回の測定データを加えて時間と変位の関係を整理した。岩盤内変位の経時変化は、機械掘削開始（1995年10月16日）の直前（1995年10月13日）に測定した値を初期値としている。また、岩盤内変位の分布は、掘削終了の1995年11月22日（0日）から約1年毎に実施された測定結果について整理した（図-2.4.1～図-2.4.4）。

岩盤内変位挙動については、試験坑道掘削時では試験坑道近傍の変位が大きく、坑道壁面から3D以上離れた地点の岩盤は変位しなかった。さらに、計測坑道壁面の長期変位挙動は試験坑道掘削による岩盤内変位より小さいものと考え、計測坑道壁面を不動点とし、岩盤内変位データを整理してきた。しかし、本測定のように長期にわたる変位を測定する場合、基準点自体が動く可能性があることを考慮しなければならない。よって、基準点からの相対変位のみでなく、各測定点の区間毎の変位増分についても整理した。さらに、各測定区間毎の変位では、測定期間、測定区間の長さが異なるため、その大きさを直接比較することが出来ないと考えられることから、単位長さ当たりの変位速度（年平均変化量に換算）も求めた（表-2.4.1～表-2.4.6）。

これらのデータから、坑道の機械掘削後の時間経過に伴う岩盤変位挙動について考察する。

（1）多点式地中変位計による測定結果

多点式地中変位計による測定結果の内、経時変化図を図-2.4.1に、岩盤内変位の分布図を図-2.4.2に示す。

図-2.4.1より、坑道掘削終了後も岩盤内変位は漸増していることがわかる。

図-2.4.2より、試験坑道壁面から6.5m地点で凸状の変位分布になっている。この傾向は441日以降の測定から見られ、1107日目の計測ではさらに大きくなっている。

表-2.4.2、図-2.4.3に各測定区間毎の変位増分を示す。信頼性の高いデータとして、読み取り誤差を考慮し、最小読み取り値の10倍程度の値をよく用いる。このことから、評価に用いる精度を0.1mm（最小読み取り値の10倍）とすると、各測定区間毎の変位増分のほとんどが0.1mm以下の値であることから全体の傾向に着目して考察する。

表-2.4.3、図-2.4.4に、各区間毎の単位長さ当たりの変位速度を示した。この表

より、伸長している区間と圧縮している区間とがあるが、試験坑道と計測坑道の間の岩盤内のほぼ全域で変位している可能性があることがわかる。

図-2.4.9 に示した変位計を設置した岩盤の地質観察図から判断して、伸長区間と圧縮区間との地質および亀裂状況の明確な違いは認められない。岩盤内が一様な変形を示さず、伸長区間と圧縮区間が存在する理由は、現時点では不明である。

図-2.4.2 で上に凸になった、試験坑道から 6.5m の点に着目する。変位速度から見ると特に大きな値を示している訳ではなく、圧縮区間 (4.5m～6.5m) と伸長区間 (6.5m～12.0m) の間に位置しているためにこのような変形を示したと考えられる。この傾向は、計測開始から 51 日以降のすべてに結果に対し表れている。

(2) スライディングミクロメーターによる測定結果

スライディングミクロメーターによる測定結果の内、経時変化図を図-2.4.5 に、岩盤内変位の分布図を図-2.4.6 に示す。

図-2.4.5 より、岩盤内変位は傾向として漸増していたが、今回の計測では減少する結果となった。しかし、その変化量が小さいことから、今後の計測を継続し、より多くのデータより平均的な傾向を判断する必要があると考えられる。

図-2.4.6 より、岩盤内変位の分布は、0.5m～4.5m の区間では連続性のよい分布となっているが、5.5m～11.5m の区間では凹凸のある連続性の悪い分布となっている。

特に、今回の計測では 4.5～5.5m の区間で減少しており、これが図-2.4.3 に示した岩盤内変位が減少傾向になった原因と考えられる。

表-2.4.5、図-2.4.7 に各測定区間毎の変位増分を示す。信頼性の高いデータとして、読み取り誤差を考慮し、最小読み取り値の 10 倍程度の値をよく用いる。このことから、評価に用いる精度を 0.01mm (最小読み取り値の 10 倍) とすると、各測定区間毎の変位増分は 0.01mm 程度またはそれ以下の値であることから全体の傾向に着目して考察する。

表-2.4.6、図-2.4.8 に、各区間毎の単位長さ当たりの変位速度を示した。この表より、今回の結果では、坑道壁面から離れた試験坑道と計測坑道の中心付近では圧縮傾向となっている。しかし、坑道壁面付近は伸長傾向にあると考えられる。また、試験坑道側と計測坑道側で大きな差がないことから、計測坑道壁面も変位している可能性があると考えられる。

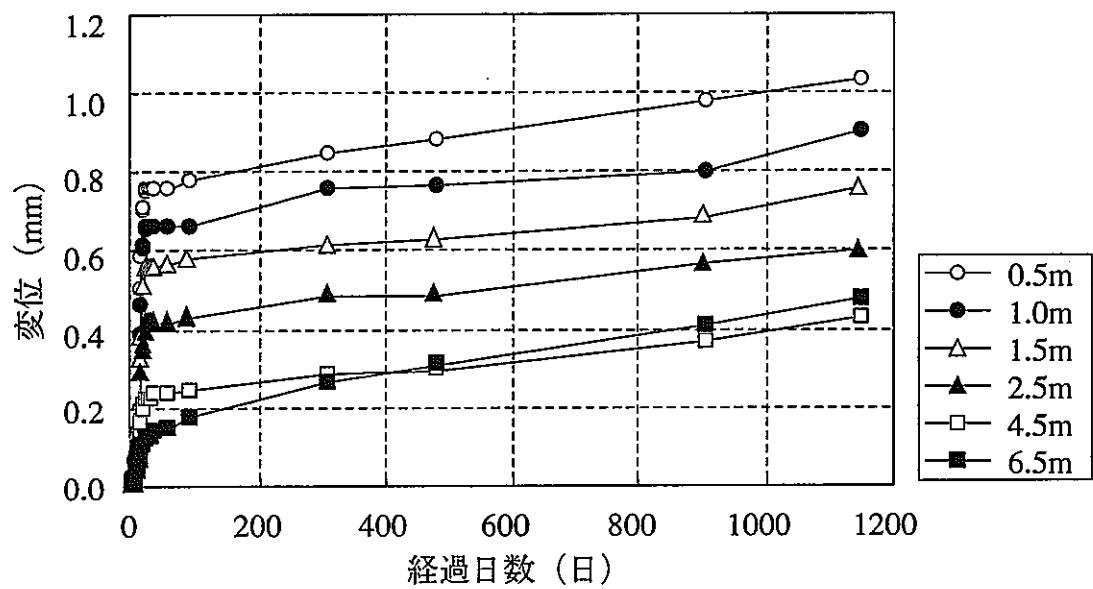


図-2.4.1 多点式地中変位計による岩盤内変位の経時変化図

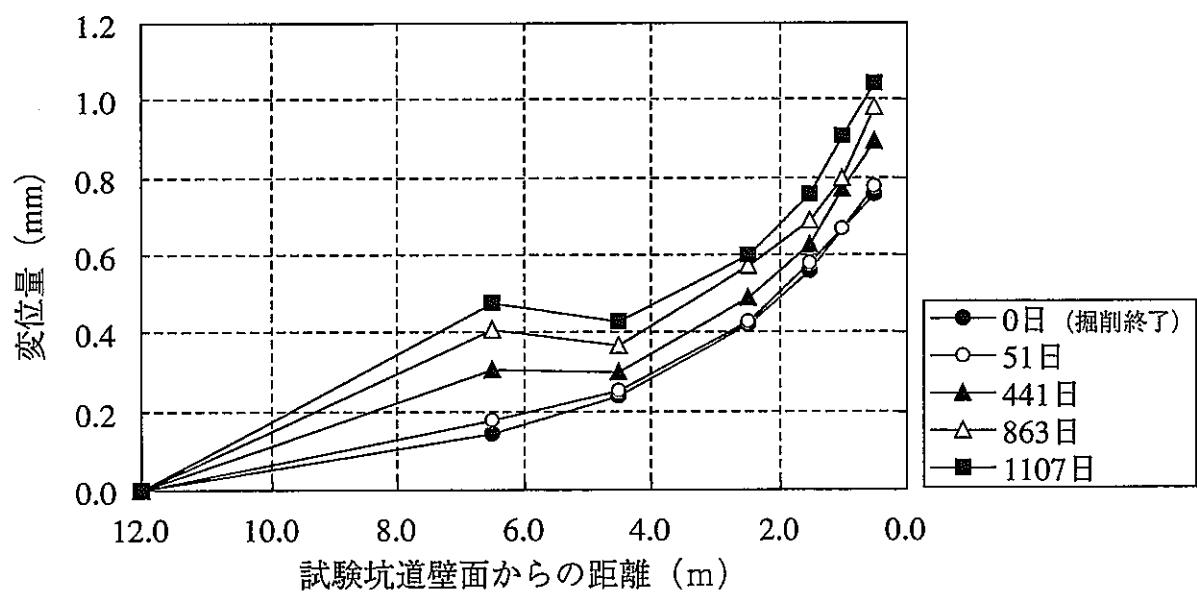


図-2.4.2 多点式地中変位計による岩盤内変位の分布図

表-2.4.1 多点式地中変位計による測定値

試験坑道から の距離 (m)	掘削終了からの経過日数				
	0日	51日	441日	863日	1107日
	変位 (mm)				
0.5	0.76	0.78	0.89	0.98	1.04
1.0	0.67	0.67	0.77	0.80	0.91
1.5	0.56	0.58	0.63	0.69	0.76
2.5	0.42	0.43	0.49	0.57	0.60
4.5	0.24	0.25	0.30	0.37	0.43
6.5	0.14	0.18	0.31	0.41	0.48
12.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

表-2.4.2 多点式地中変位計による変位増分

測定区間	前回測定時からの日数増分 (day)			
	51	390	422	244
	前回測定時からの変位増分 (mm/m)			
0.5~1.0	0.04	0.02	0.12	-0.10
1.0~1.5	-0.04	0.10	-0.06	0.08
1.5~2.5	0.01	-0.01	-0.02	0.04
2.5~4.5	0.00	0.00	0.01	-0.01
4.5~6.5	-0.02	-0.04	-0.02	0.00
6.5~12.0	0.01	0.02	0.02	0.01

表-2.4.3 多点式地中変位計による単位長さ当たりの変位速度

測定区間	前回測定時からの日数増分 (day)			
	51	390	422	244
	単位長さ当たりの変位速度 (mm/m/year)			
0.5~1.0	0.286	0.019	0.104	-0.150
1.0~1.5	-0.286	0.094	-0.052	0.120
1.5~2.5	0.072	-0.009	-0.017	0.060
2.5~4.5	0.000	0.005	0.004	-0.022
4.5~6.5	-0.107	-0.037	-0.013	-0.007
6.5~12.0	0.052	0.022	0.016	0.019

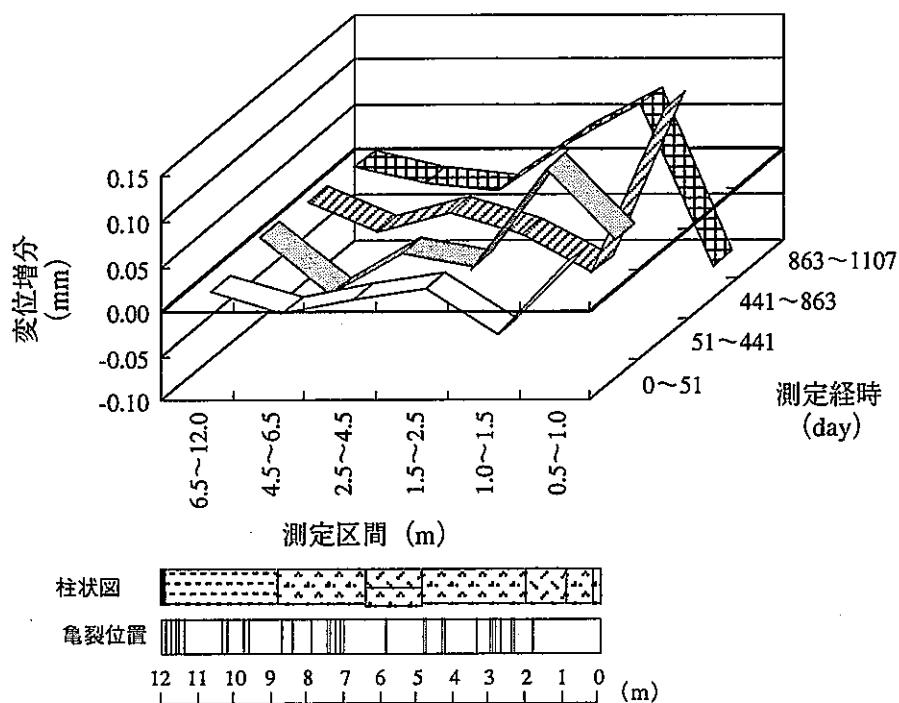


図-2.4.3 多点式地中変位計による変位増分

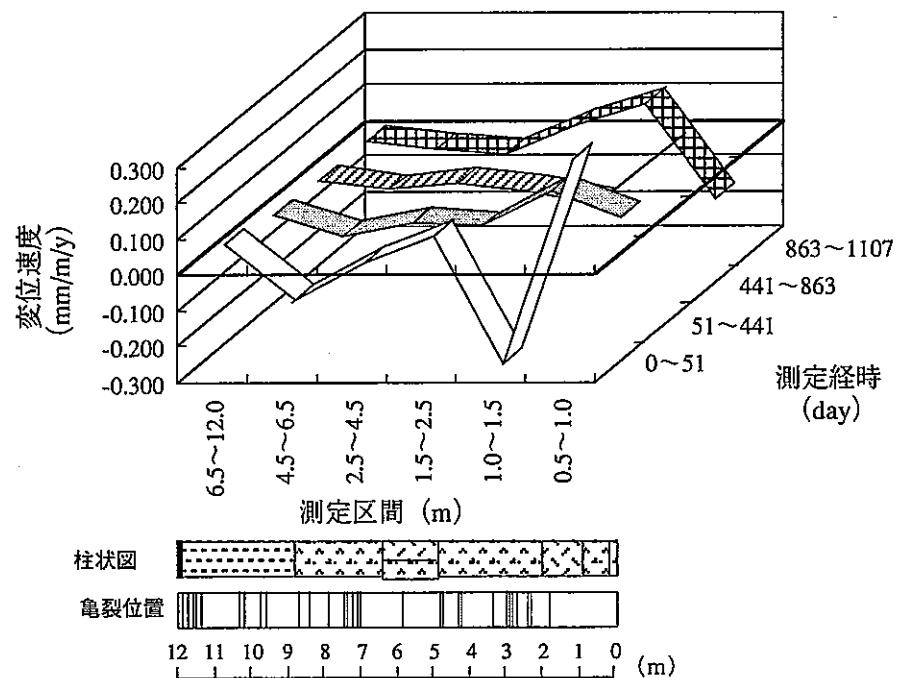


図-2.4.4 多点式地中変位計による単位長さ当たりの変位速度

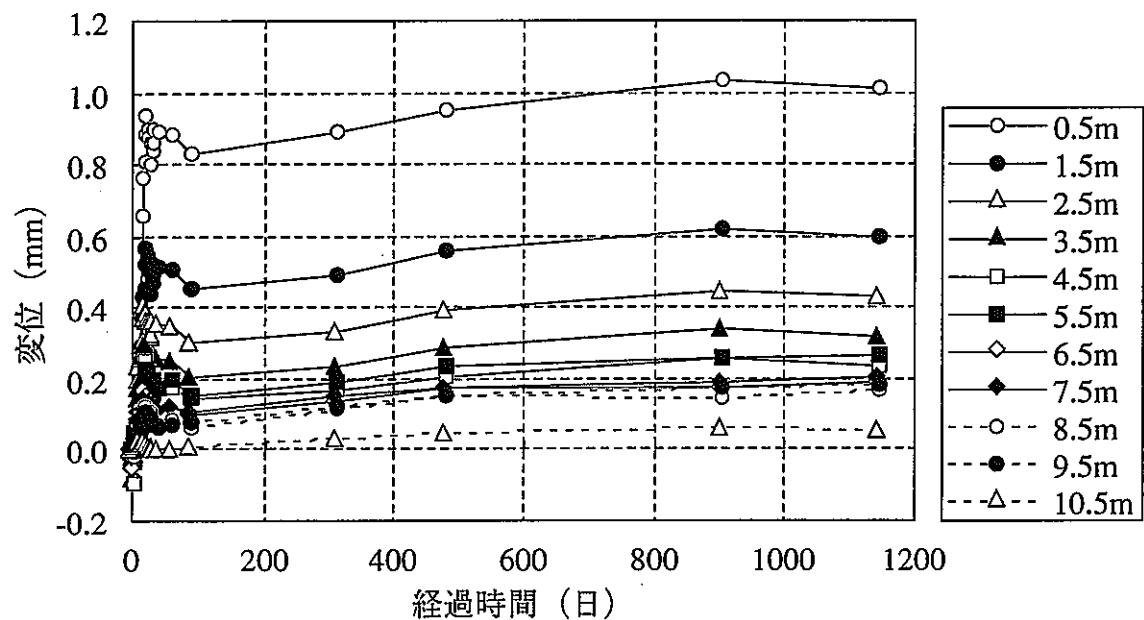


図-2.4.5 スライディングミクロメーターによる岩盤内変位の経時変化図

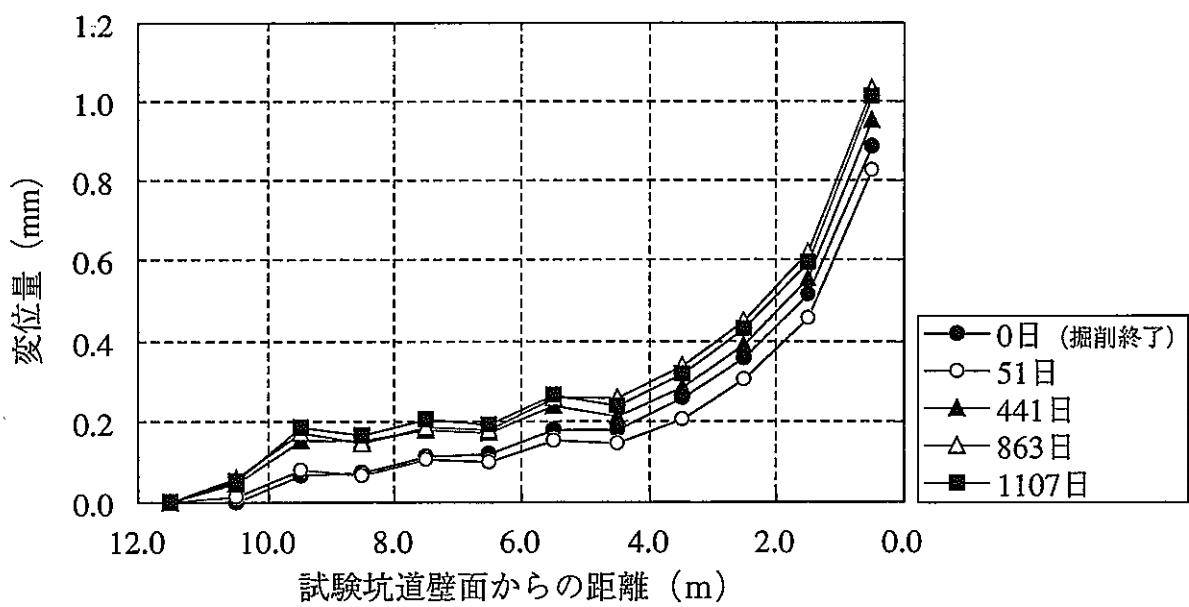


図-2.4.6 スライディングミクロメーターによる岩盤内変位の分布図

表-2.4.4 スライディングミクロメーターによる測定値

試験坑道から の距離 (m)	掘削終了からの経過日数				
	0日	51日	441日	863日	1107日
	変位 (mm)				
0.5	0.890	0.830	0.952	1.034	1.012
1.5	0.518	0.458	0.557	0.621	0.596
2.5	0.358	0.305	0.392	0.448	0.430
3.5	0.256	0.208	0.287	0.341	0.321
4.5	0.182	0.144	0.21	0.256	0.240
5.5	0.179	0.154	0.236	0.261	0.263
6.5	0.117	0.100	0.174	0.178	0.189
7.5	0.112	0.107	0.179	0.188	0.205
8.5	0.070	0.064	0.153	0.143	0.165
9.5	0.066	0.078	0.155	0.173	0.184
10.5	0.003	0.014	0.045	0.061	0.056
11.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

表-2.4.5 スライディングミクロメーターによる変位増分

測定区間	前回測定時からの日数増分 (day)			
	51	390	422	244
	前回測定時からの変位増分 (mm)			
0.5~1.5	-0.001	0.024	0.018	0.003
1.5~2.5	-0.007	0.012	0.008	-0.007
2.5~3.5	-0.004	0.008	0.002	0.001
3.5~4.5	-0.011	0.014	0.007	-0.003
4.5~5.5	-0.013	-0.016	0.021	-0.018
5.5~6.5	-0.008	0.008	0.021	-0.009
6.5~7.5	-0.012	0.002	-0.004	-0.006
7.5~8.5	0.002	-0.017	0.018	-0.005
8.5~9.5	-0.018	0.012	-0.028	0.012
9.5~10.5	0.000	0.046	0.002	0.016
10.5~11.5	0.012	0.031	0.016	-0.006

表-2.4.6 スライディングミクロメーターによる単位長さ当たりの変位速度

測定区間	前回測定時からの日数増分 (day)			
	51	390	422	244
	単位長さ当たりの変位速度 (mm/m/year)			
0.5~1.5	-0.007	0.022	0.016	0.005
1.5~2.5	-0.050	0.011	0.007	-0.010
2.5~3.5	-0.029	0.007	0.002	0.002
3.5~4.5	-0.082	0.013	0.006	-0.005
4.5~5.5	-0.089	-0.015	0.018	-0.028
5.5~6.5	-0.057	0.007	0.018	-0.014
6.5~7.5	-0.089	0.002	-0.004	-0.009
7.5~8.5	0.014	-0.016	0.016	-0.008
8.5~9.5	-0.129	0.011	-0.024	0.017
9.5~10.5	0.000	0.044	0.002	0.024
10.5~11.5	0.082	0.029	0.014	-0.009

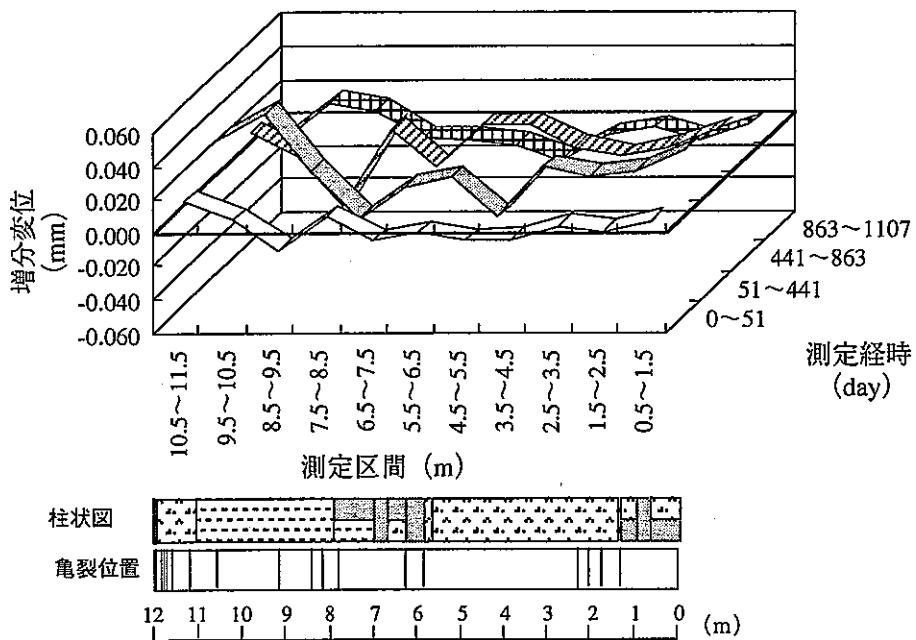


図-2.4.7 スライディングミクロメーターによる変位増分

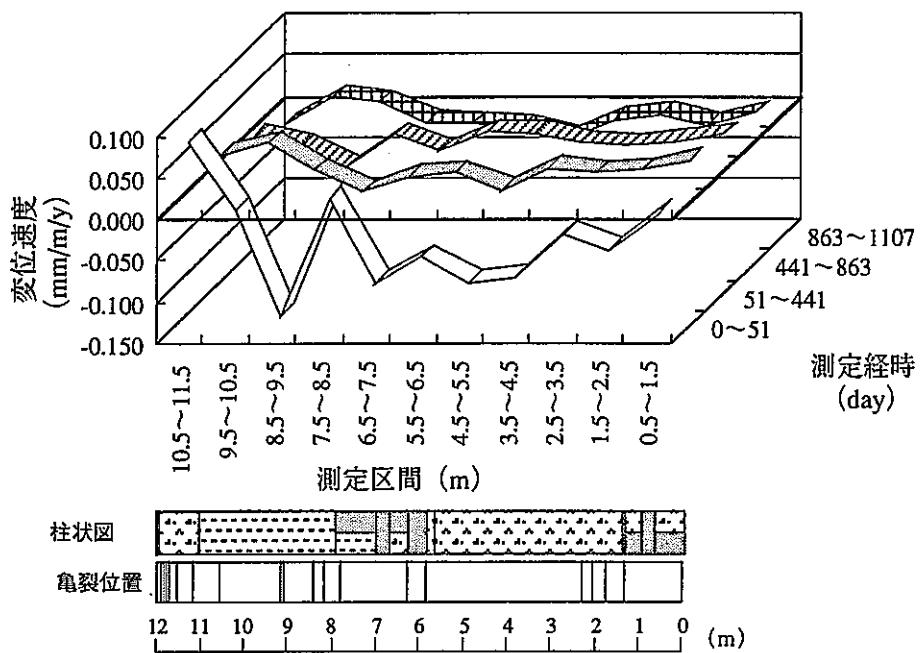


図-2.4.8 スライディングミクロメーターによる単位長さ当たりの変位速度

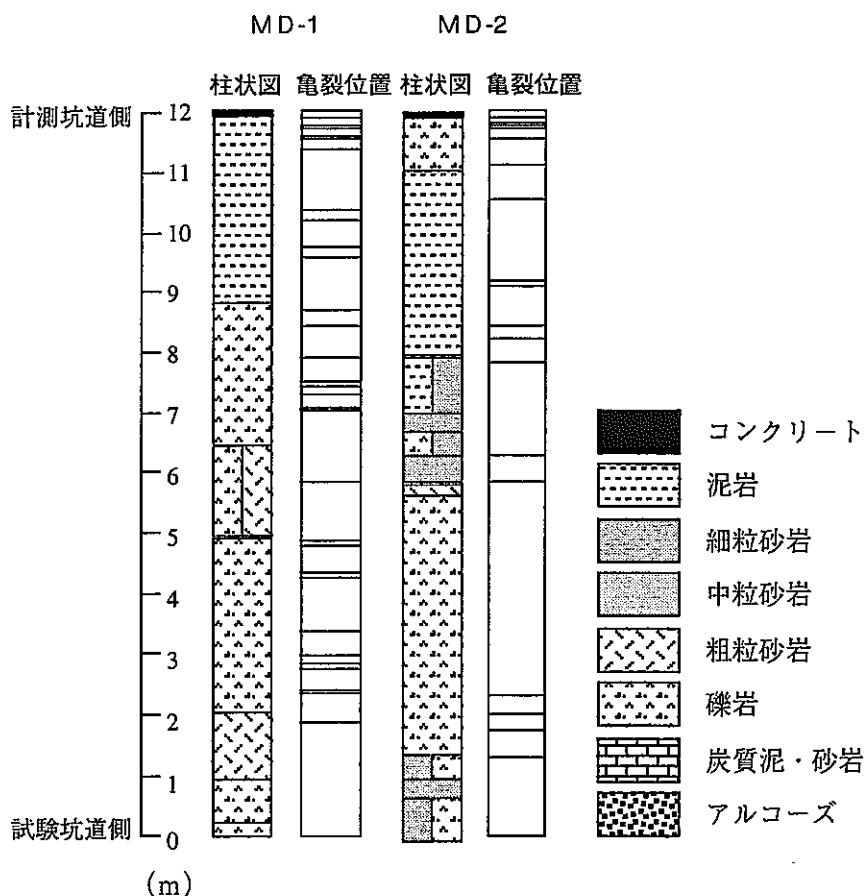


図-2.4.9 岩盤内変位測定孔の地質観察結果
(MD-1:多点式地中変位計, MD-2:スライディングミクロメーター)

(3) 測定手法の比較

多点式地中変位計とスライディングミクロメーターによる測定結果のうち、試験坑道から 0.5m の岩盤内変位の経時変化を図-2.4.10 に、また、掘削終了後 1107 日経過時点での岩盤内変位の分布図を図-2.4.11 に示す。

図-2.4.10 より、坑道掘削終了の前後で計測手法により変位量に差があるが、100 日以降は、両手法ともほぼ同様な値で、変位が増加する傾向を示している。また、図-2.4.11 に示すように掘削終了後 1107 日経過時点で、計測坑道壁面（基準点）と試験坑道から 0.5m の点の間の変位は、多点式地中変位計で 1.04mm、スライディングミクロメーターで 1.012mm であり、ほぼ等しい値を示している。しかし、計測坑道と試験坑道の中心付近では変位量が異なっている。

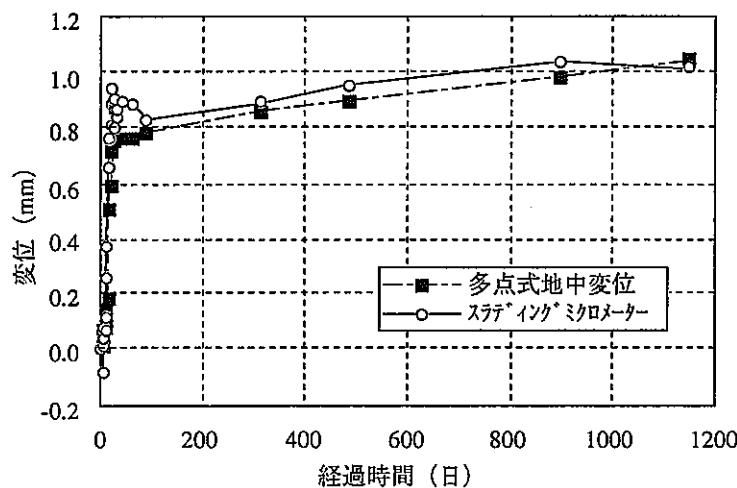


図-2.4.10 両計測手法による岩盤内変位の経時変化（試験坑道から 0.5m）

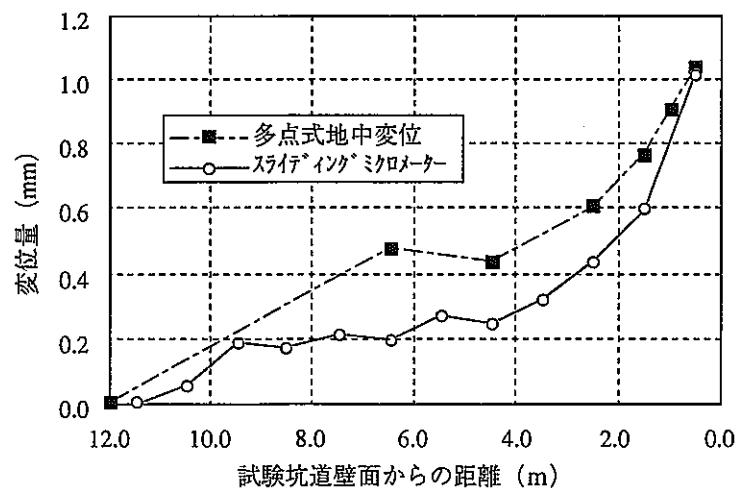


図-2.4.11 両計測手法による岩盤内変位の分布図（掘削終了後 1107 日）

これまでの計測から得られた知見より、多点式地中変位計とスライディングミクロメーターのそれぞれの計測手法の特徴を比較し、表-2.4.7に示した。この表に示すように、両手法にはそれぞれ長所と短所があると考えられる。よって、両手法の適用性を考える場合、これらの長所・短所を考慮し、調査目的および条件等に適した手法を採用するべきであると考えられる。

表-2.4.7 測定手法の比較

	多点式地中変位計	スライディングミクロメーター
計測手法	坑道壁面に設置された測定チップの動きをデジマチックノギスで計測する。簡便である。	専用の計測器を用いる必要があり、非常に注意深く測定器を取り扱わなければならず、測定にも時間がかかる。今回は水平方向の変位の計測であり、メジャリングヘッドとメジャリングマークの接触状況の影響で測定値の再現性が悪かった。
最小読み取り値	0.01mm	0.001mm
測定区間	アンカーで固定された任意の点と変位計測のヘッドとの区間の変位を直接計測する。これにより、測定区間全体の変位を計測することが出来るため、全体の動きを把握することに適している。	1m毎に測定を行う。これにより岩盤内の局所的な挙動を把握することに適している。全体の動きを把握するためには、全測定値を合計して求めることができる。
測定点数	1本の観測孔で測定できる点数に限りがある。	1m間隔の測定となるが、測定点数に限りはない。
人的測定誤差	独立した測定区間を計測しているため、ある測点で人的誤差を含んだ場合でも、他の測点に影響を与えない。全体の動きの把握には影響が少ないと考えられる。	一つの測定点においては、独立した計測をしているため、ある測点での人的誤差は、他点に影響を与えない。しかし、測定区間全体の変位を把握する場合は、全測定値を合計するため影響を与える。

3. 坑道周辺岩盤の不飽和領域の計測手法の検討

3.1 目的

岩盤内に坑道を掘削した場合、その周辺岩盤には不飽和領域が発生する可能性がある。この不飽和領域では酸素を含んだ空気の侵入により岩盤の酸化還元状態が変化し、これに伴い岩盤中の亀裂が閉塞して透水性が変化したり、化学的な物質移行特性が変化することが考えられる。土壤の分野においては不飽和現象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計測手法に関する研究は成果が現れ始めてきている。本章では、岩盤中の不飽和領域を原位置にて計測するための手法について、既存および平成10年度の研究成果などをもとに検討し、得られた成果概要、問題点、今後の課題などをまとめるものとする。

3.2 既存の研究成果概要および問題点

3.2.1 弾性波速度、比抵抗、比誘電率

東濃地科学センターでは、岩盤中に掘削した坑道周辺に発生すると考えられる不飽和領域の拡がりを原位置にて計測するための手法に関する研究を平成5年度より実施してきた。同研究では、弾性波速度（P波、S波）、比抵抗、比誘電率が岩石中の含水量によって変化する性質を利用して、これらの物理量より含水量を推定することを試みた。図-3.2.1.1A～Cに多胡砂岩を用いた室内実験結果の一例を示す。数種類の岩石試料を用いた室内実験の結果、弾性波速度、比抵抗は岩種間のばらつきが大きいこと、また下図のようにある範囲の含水量に対して物理量の変化が非常に小さいなどの現象がみられた。一方、比誘電率は含水量とともに有意に変化し、岩種間のばらつきも他の物理量に比べて小さかった。以上より、岩石中の含水量を推定するには、上記3つの物理量のうち比誘電率が最も有効であるとの結果を得た。

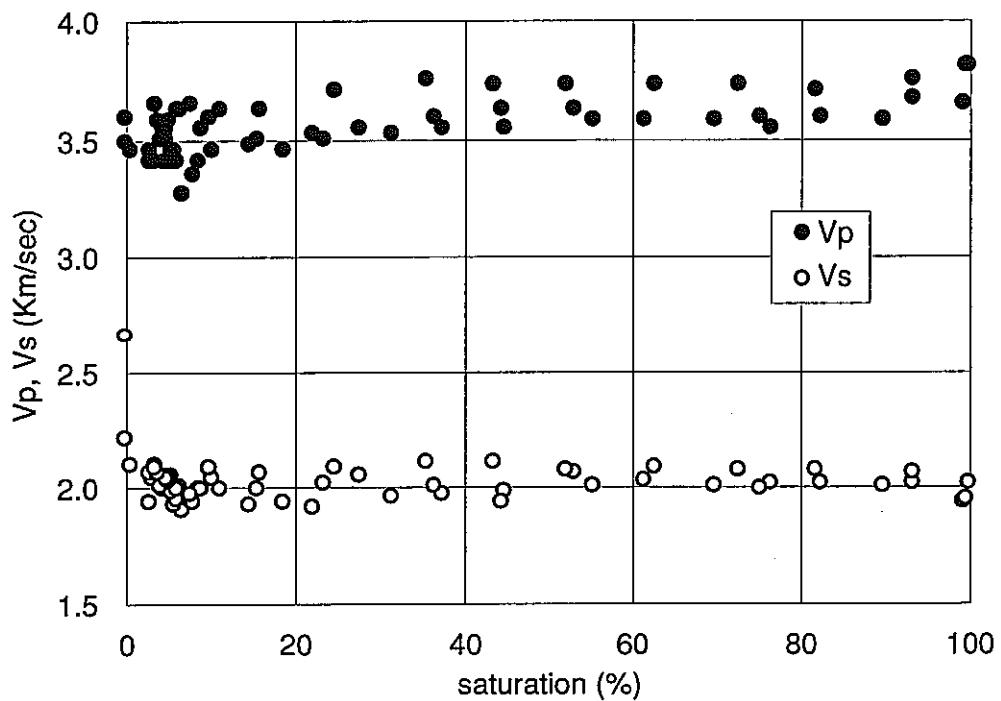


図-3.2.1.1A 飽和度～弾性波速度の関係（多胡砂岩：H6）

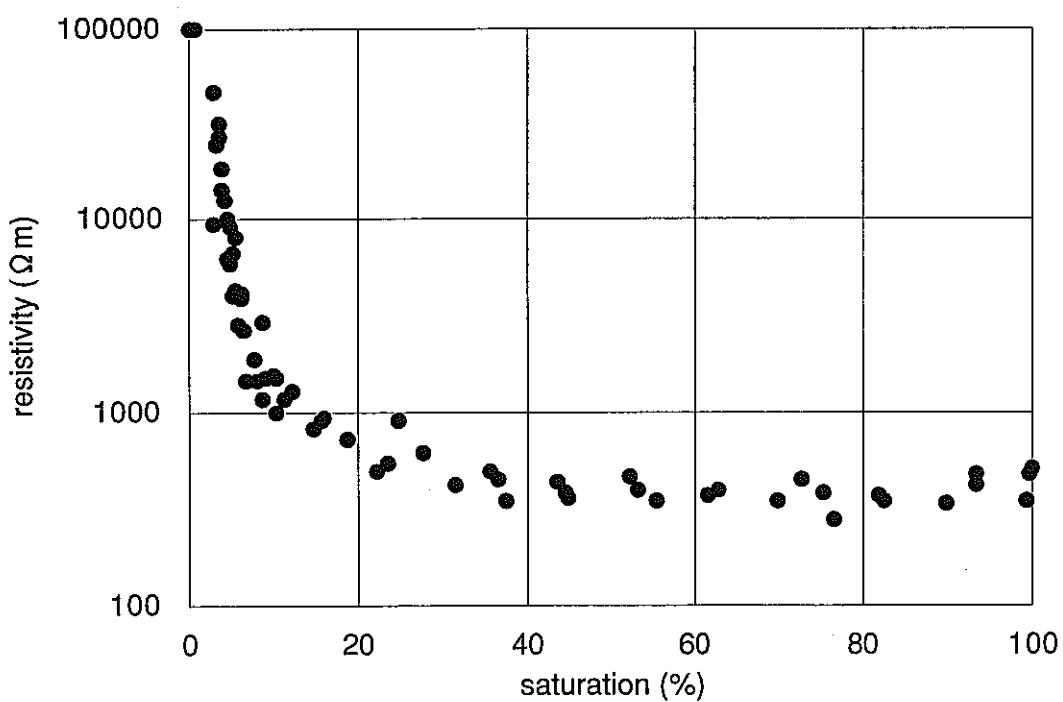


図-3.2.1.1B 飽和度～比抵抗の関係（多胡砂岩：H6）

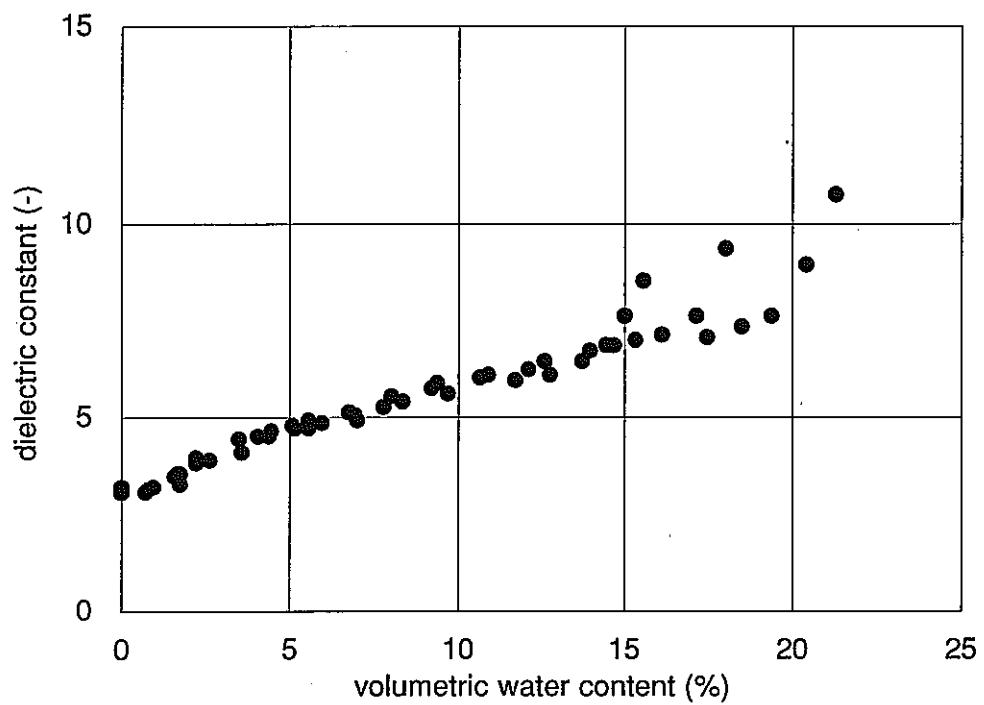


図-3.2.1.1C 体積含水率～比誘電率の関係（多胡砂岩：H6）

3.2.2 比誘電率～含水量の関係

前節の室内実験では、比誘電率が含水量の変化とともに有意な変化を示し、これを測定して含水量を推定することが可能であることが示唆された。ここではまず、岩石の比誘電率が含水量に敏感に反応する理由を考える。土壤の分野では 20 年ほど前から土の含水量 θ_v と比誘電率 K_a の関係は土質の違いによらず次の 3 次式で表されることを実験的に示した。この式は信頼性が高く、現在でも最も頻繁に使われている。

$$K_a = 3.03 + 9.3 \theta_v + 146 \theta_v^2 - 76.7 \theta_v^3 \quad (1)$$

このほか上記の関係を表すモデルとして次式に示すような α mixing model とよばれる半経験式がある。ここで、 K_{air} 、 K_{water} 、 K_{solid} はそれぞれ空気 (=1)、水 (=81)、土粒子 (=4~7) の比誘電率、 n は有効空隙率である。これは土は気相、液相、固相の 3 相からなる混合体であり、各相の比誘電率がその体積の割合に応じて土の見かけの比誘電率に寄与すると考えるものである。経験的に $\alpha=0.5$ とすると実験値とよく一致することが知られている。水の比誘電率は空気、土粒子のそれと比べて大きいため、3 相の混合体としてのみかけの比誘電率は含水量に依存する。

$$K_a^\alpha = (n - \theta_v) K_{air}^\alpha + \theta_v K_{water}^\alpha + (1 - n) K_{solid}^\alpha \quad (2)$$

岩石試料を用いた実験において比誘電率が含水量の変化によって有意に変化するのは、岩石も土と同様、空気、水、固体の 3 相からなりこれら個々の比誘電率は土のそれとほぼ同じであるためと考えられる。

図-3.2.2.1 に、ネットワークアナライザを用いて計測した 4 岩種の岩石の含水量と比誘電率の関係を前述の α mixing model により求めた関係とあわせて示す。ネットワークアナライザとは直径 50mm、厚さ 4mm 程度の円盤状に整形した岩石試料のインピーダンスを計測して比誘電率を求めるもので、岩石の比誘電率測定に通常用いられる手法である。ただし、同手法は試料の高精度の整形が必要であるため、原位置計測には適さない。

図より、岩石の比誘電率は土と同様に含水量の変化によって有意に変化しているこ

とがわかる。 α mixing model によって岩石の $K_a \sim \theta_v$ 関係が概ね把握できているが、含水率が高い範囲では計算値より小さい傾向がみられるようである。また、土の $K_a \sim \theta_v$ 関係は Topp 式によって一義的に表すことができるのでに対し、岩石の場合は各岩種ごとに得られる曲線は若干異なる。これは、岩石は土に比べて有効空隙率の範囲が大きく、有効空隙率が小さいほど固体の比誘電率の寄与率が大きくなり曲線が上にシフトするためと推定される。したがって、比誘電率から岩盤中の含水量を精度よく推定するためには各岩種ごとにキャリブレーションをするのが望ましい。

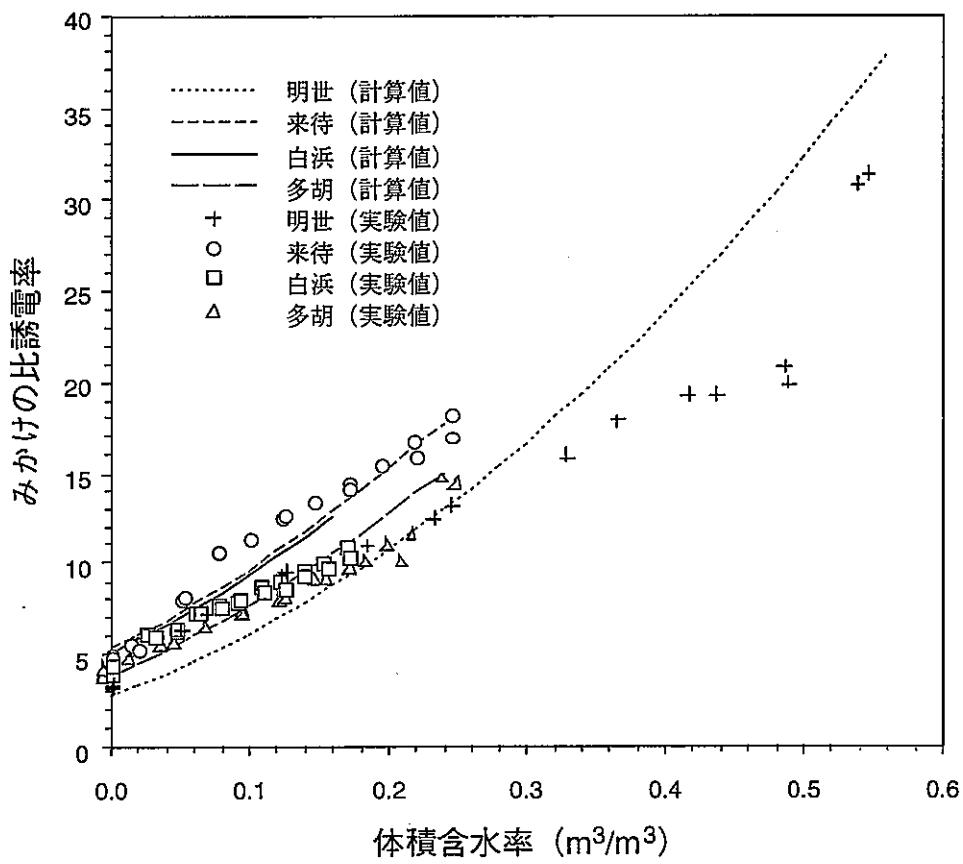


図-3.2.2.1 ネットワークアライザによる岩石の $K_a \sim \theta_v$ 関係 (H9 年度)

3.2.3 TDR法

(1) 原理

Time Domain Reflectometry (TDR) 法は、Topp et al. [1980] の研究以来土壤の分野では広く含水量測定に使われている手法である。それまで使われてきた γ 線法や中性子法と同等の精度をもちながら、放射線源を用いず簡易で経済的な手法である。測定装置は、パルスジェネレータとオシロスコープ、そしてプローブとよばれるセンサー部分からなる。プローブの構造は非常に簡単なもので、通常は図-3.2.3.1 に示すように同軸ケーブルに 2 ~ 数本の金属ロッドを接続したものである。このプローブを計測しようとする物質の中に挿入し、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伝播する速度を計測する。電磁波の周波数が 10MHz-3GHz の範囲ではある含水量における比誘電率 K_a は周波数に関係なくほぼ一定で、伝播速度 v と比誘電率 K_a の間には $v = \frac{c}{\sqrt{K_a}}$ なる関係 (c : 光速) があることが知られている。光速は定数であるため、伝播速度を測定すれば物質の比誘電率が求まるのである。比誘電率と前述の $K_a \sim \theta_v$ 関係から物質の含水量を推定するというものである。

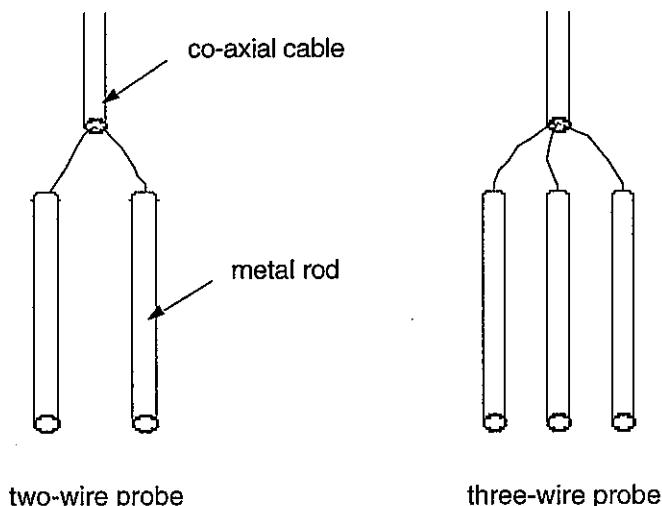


図-3.2.3.1 典型的な TDR プローブ

Hokett et al. [1992] によれば、精度よく計測するためにはプローブと物質とは隙間なく接していなければならない。土壤に対しては、プローブを叩き込むことによって比較的容易に隙間をなくすことができる。しかし、岩石のような固体に設置する場合は、あらかじめ削孔したガイド孔に設置することになる。Knight [1992] は、理論的にロッ

ド表面近傍に測定感度の高い領域が集中することを示した。これは、ロッドと岩石の間に隙間が存在した場合、これが測定精度に影響する可能性があることを示す。

Annan [1977]、Ferre et al. [1996] は、この隙間が水で満たされている場合より、空気で満たされている場合の方が測定精度への影響が大きいことを示した。この特性は、TDR法により精度よく測定するために重要なものである。これまでの既往の計測および研究は土壌を用いたものに限られていた。土壌ではプローブをたたき込むことにより隙間をなくすことができるため、この点はあまり重要視されなかった。一方、TDR法を岩石に適用する場合、あらかじめ削孔したガイド孔の精度により図-3.2.3.2に示すような隙間ができる可能性が考えられる [Sakaki et al., 1998a]。測定精度への影響を最小限にするためには、この隙間が残らないようにプローブを設置する必要がある。次節以降に、プローブの設置方法と比誘電率～含水量の関係についての実験およびその結果について述べる。

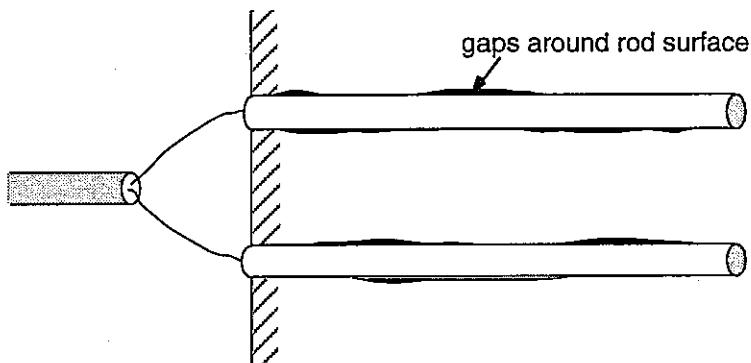


図-3.2.3.2 TDRプローブ周辺の隙間

(2) 打ち込み型プローブ

TDR法を岩石に適用するにあたって、プローブをあらかじめ削孔したガイド孔に若干径が大きな金属ロッドを打ち込むことによって設置した。これにより、隙間は最小限になるものと仮定した。表-3.2.3.1に、各岩種の物性一覧およびプローブ仕様を示す。図-3.2.3.3に、室内実験供試体の概要を、図-3.2.3.4～12には9種類の岩石試料に対してTDR法を用いて室内にて含水量～比誘電率の関係を求めた結果[Sakaki et al., 1998a]を示す。

表-3.2.3.1 各岩種の物性一覧およびプローブ仕様

Formation name	Rock type	Specimen code	Wet bulk density (Mg/m ³)	Dry bulk density (Mg/m ³)	Effective porosity (%)	Probe description		
						Number of rods	Rod length (mm)	Rod diameter (mm)
Akeyo	fine sandstone	AS-1	1.69	1.16	53.5	2	100	5.8, 6.0
		AS-2	1.69	1.15	54.0	2	100	5.9, 6.1
Kimachi	sandstone	KS-1	2.22	2.00	21.3	3	100	5.6, 5.6, 5.7
		KS-2	2.21	1.99	21.7	3	100	5.6, 5.6, 5.6
Shirahama	sandstone	KS-3	2.22	1.99	22.1	3	100	5.3, 5.2, 5.3
		KS-4	2.25	2.03	22.1	2	100	5.2, 5.6
Tako	sandstone	SS-1	2.40	2.27	13.4	3	100	6.0, 6.0, 5.8
		SS-2	2.40	2.27	13.2	3	100	5.8, 6.0, 5.9
Shirakawa	welded tuff	TS-1	2.24	2.01	23.0	2	100	5.3, 5.4
		TS-2	2.24	2.01	22.7	2	100	5.3, 5.2
Tago	tuff	SW-1	2.24	2.00	24.7	3	100	5.5, 5.6, 5.6
		SW-2	2.25	2.01	24.0	3	100	5.6, 5.6, 5.6
Ogino	tuff	SW-3	2.25	2.00	24.6	2	100	5.3, 5.4
		SW-4	2.27	2.03	23.4	2	100	5.2, 5.3
Inada	granite	TT-1	2.07	1.76	31.3	2	100	6.0, 6.0
		TT-2	2.07	1.75	31.7	2	100	5.8, 5.8
Westerly	granite	OT-1	1.94	1.65	28.6	2	100	5.6, 5.9
		OT-2	1.94	1.65	28.3	2	100	5.4, 5.5
Weston	granite	IG-1	2.63	2.62	0.99	3	100	7.2, 7.4, 7.2
		IG-2	2.63	2.62	1.06	3	100	7.5, 7.4, 7.4
Weston	granite	WG-1	2.66	2.65	1.38	2	90	7.6, 7.7
		WG-2	2.65	2.64	1.42	2	90	7.6, 7.6

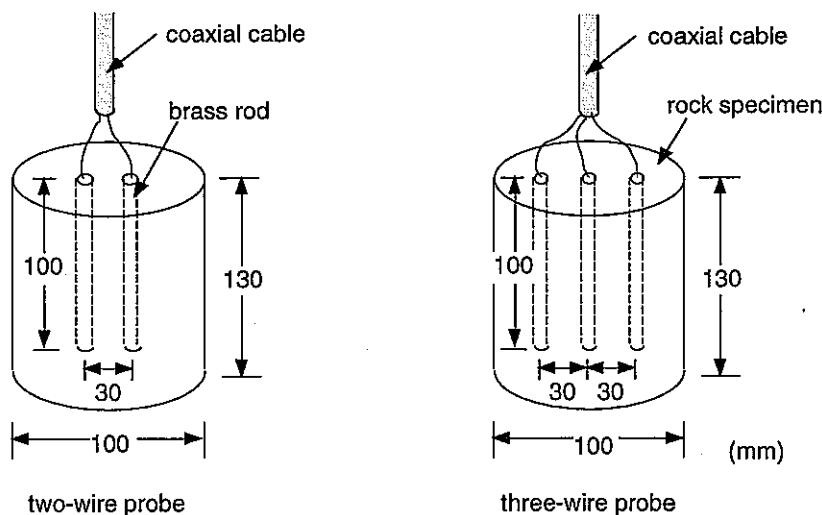


図-3.2.3.3 TDR室内実験供試体概要

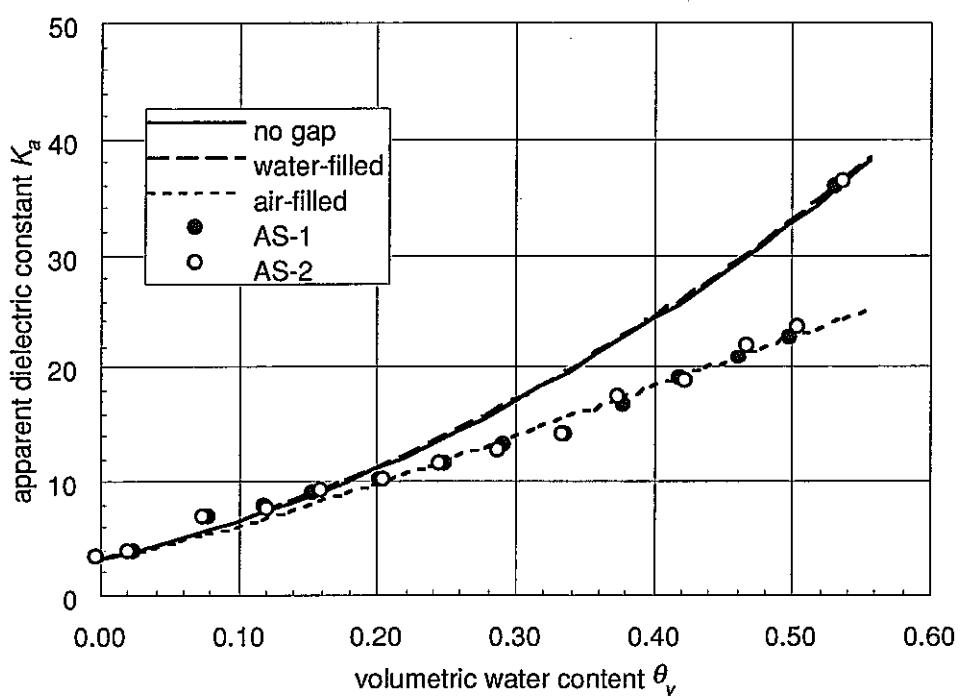


図-3.2.3.4 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（明世細粒砂岩：H7,8）

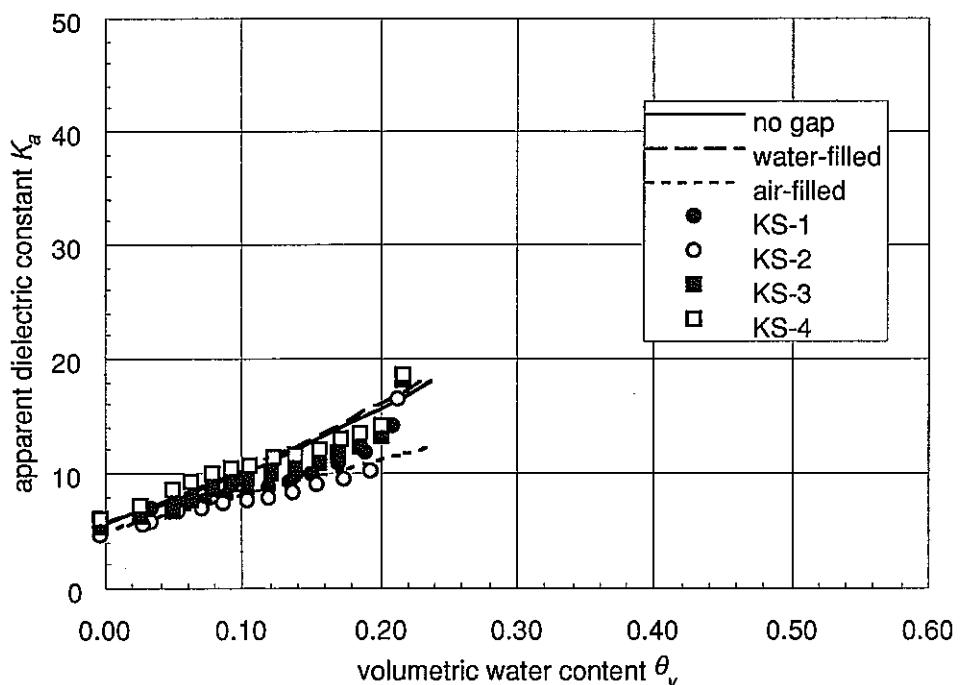


図-3.2.3.5 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（来待砂岩：H7,8）

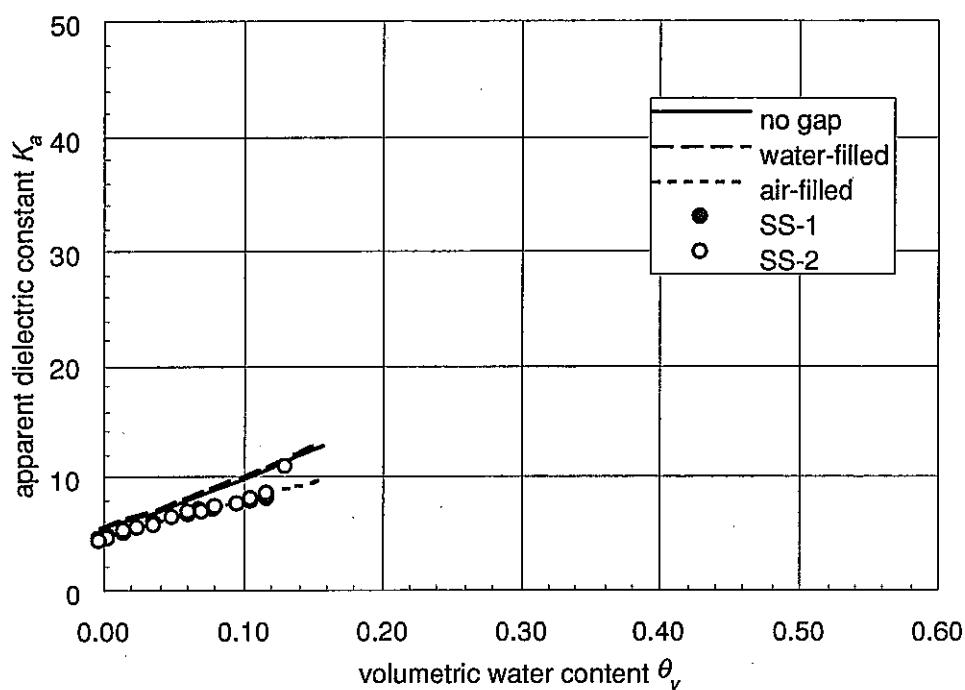


図-3.2.3.6 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (白浜砂岩 : H7,8)

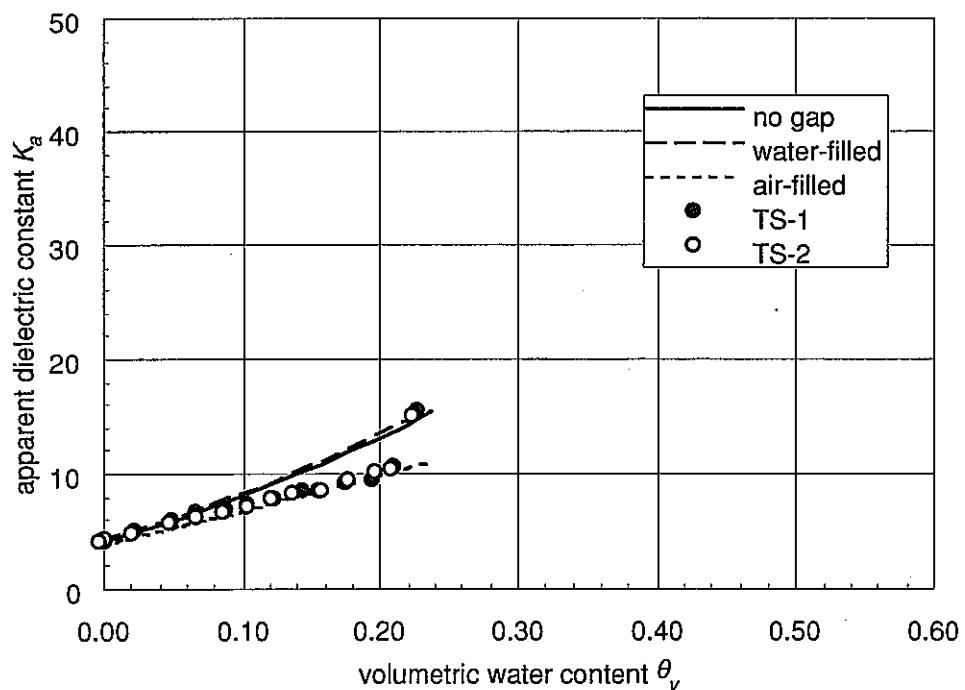


図-3.2.3.7 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (多胡砂岩 : H7,8)

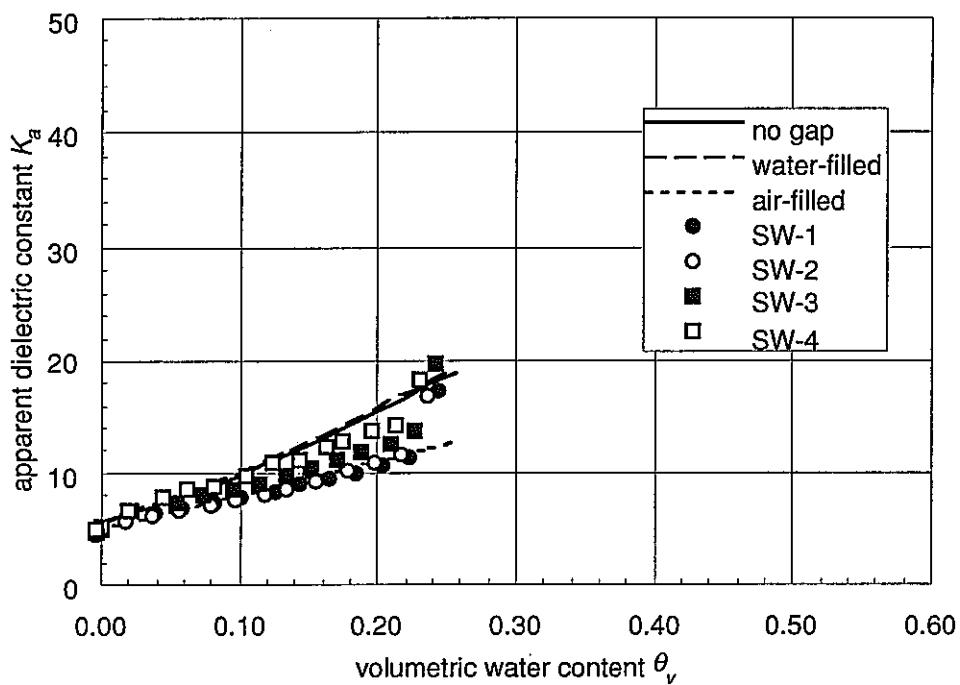


図-3.2.3.8 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (白河溶結凝灰岩 : H7,8)

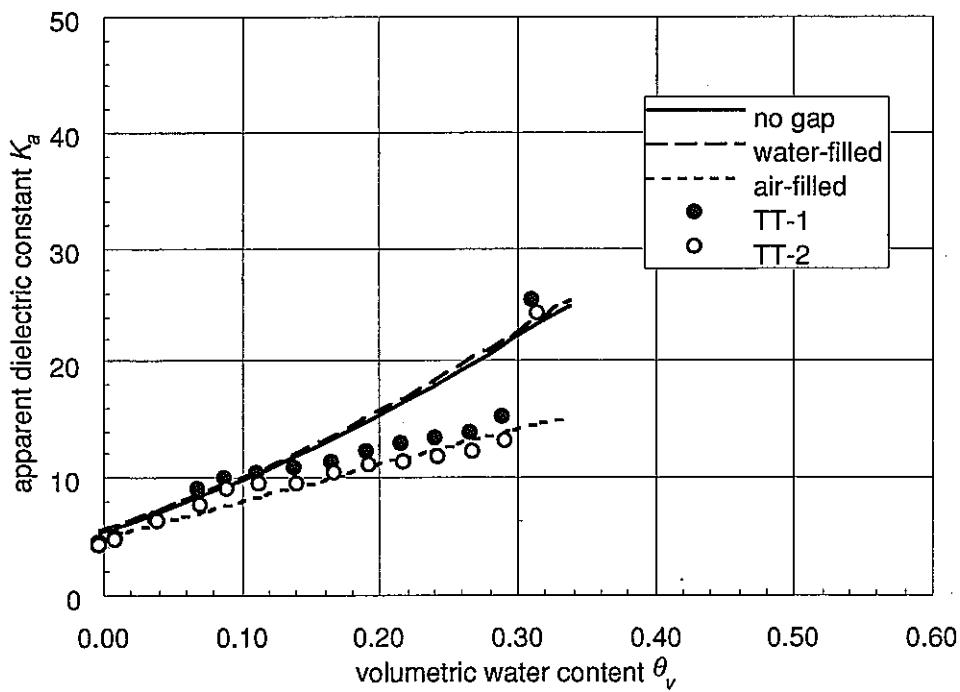


図-3.2.3.9 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (田下凝灰岩 : H7,8)

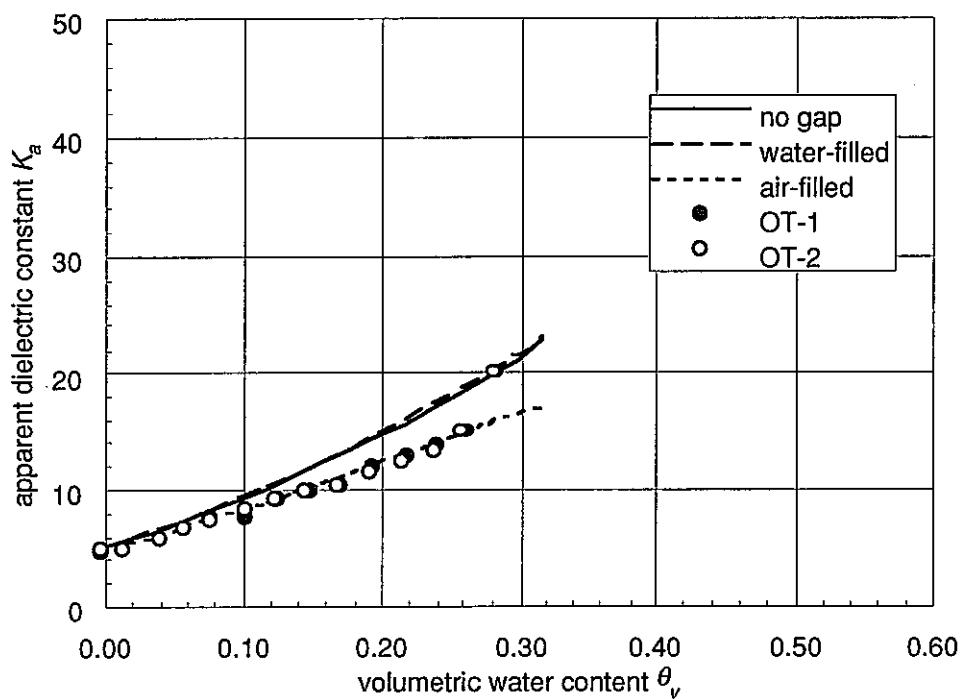


図-3.2.3.10 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (荻野凝灰岩 : H7,8)

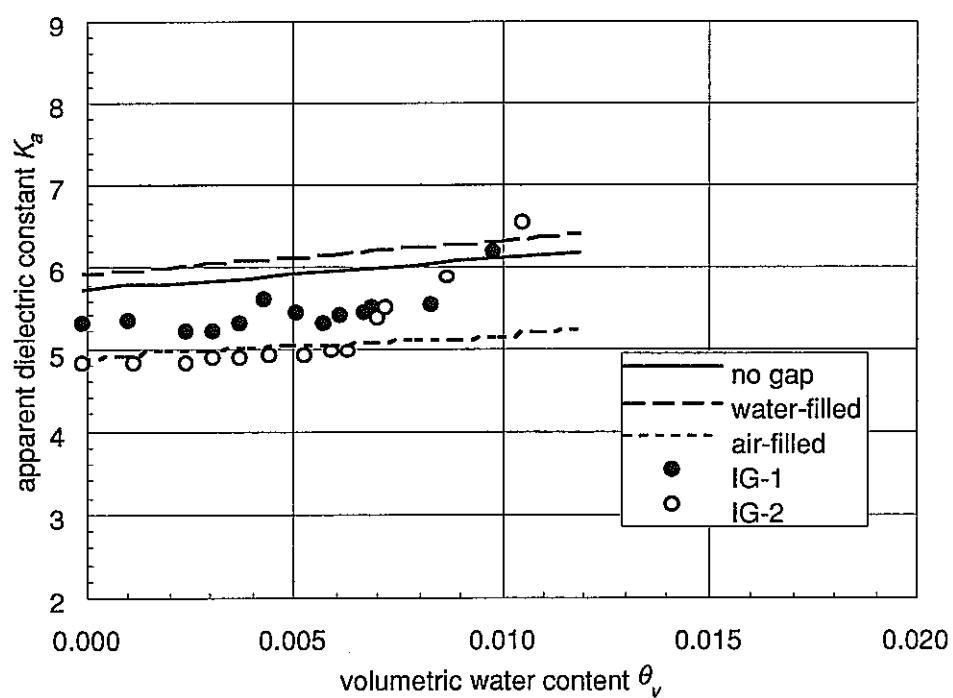


図-3.2.3.11 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (稲田花崗岩 : H7,8)

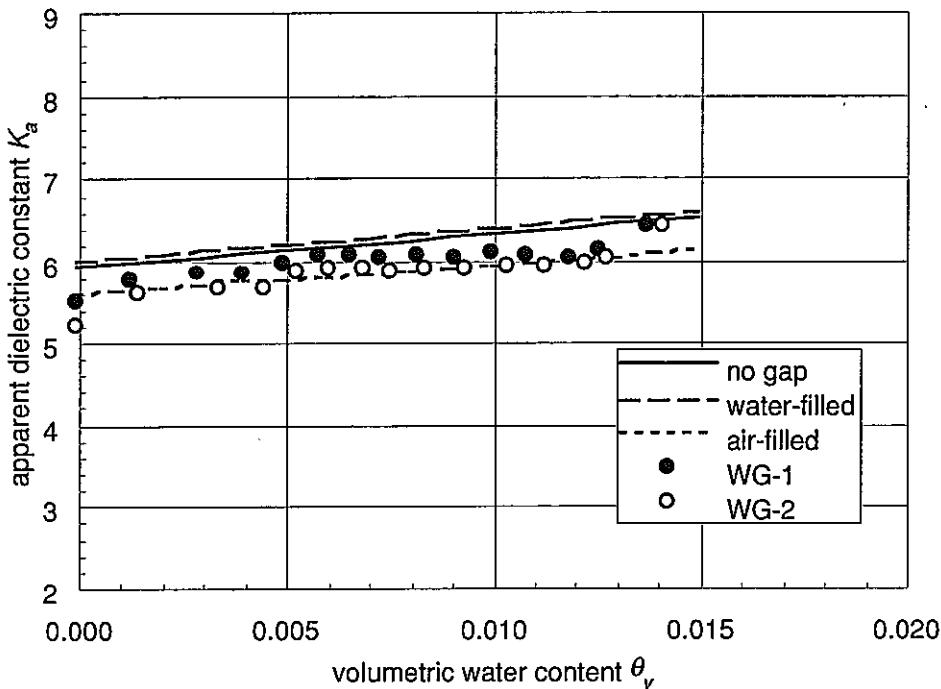


図-3.2.3.12 TDR法による $K_a \sim \theta_v$ 関係 (ウェスリー花崗岩 : H7,8)

図中実線は、ロッド～岩石間に隙間がない場合の $K_a \sim \theta_v$ 関係を α mixing model により求めたものである。破線は隙間が水で満たされた場合、点線は隙間が空気で満たされた場合の計算値を示す[Annan, 1977, Ferre et al., 1996]。隙間の幅は各岩種ごとに計測値の傾向を概ね表現できるようにフィッティングにより求めた。その値は 0.1～0.3mm であり、これは図-3.2.3.2 に示したような実際は不均一な隙間の平均的な幅と考えることができる。

9 岩種のほとんどに共通の傾向として、100%飽和時の計測値はロッド～岩石間に隙間が水で満たされた場合の計算値と一致し、それ以外の計測値は隙間が空気で満たされた場合を想定した計算値と一致する。隙間の幅は前述の通り 0.1～0.3mm であり、これは岩石試料のマトリックス部の空隙のスケールにくらべ大きい。したがって、完全飽和時には隙間を含む全ての空隙は水でみたされているが、含水量が少なくなるにつれて、隙間中の水はマトリックス部のより大きなサクションにより吸い取られてしまう。このため、100%飽和時以外は隙間が空気で満たされたと想定した計算値と一致するものと考えられる。

以上の結果より、原位置の不飽和領域を計測する場合にロッド～岩石間に隙間が存在すると、これが空気で満たされ見かけの比誘電率が過小評価され測定精度が低下す

る可能性が考えられる。したがって、プローブ挿入方式のTDR法を岩盤に適用する場合には、ロッドと岩盤の間に隙間が残らないよう細心の注意を払ってプローブを設置しなければならない。以上より、あらかじめ削孔したガイド孔に若干大き目のロッドを打ち込む方法では、隙間の影響を除去することは困難であると思われる。

(3) 多孔質材料による隙間充填型プローブ

隙間を完全になくすためには、1) ガイド孔の仕上り精度の向上、2) 隙間を岩石に類似した物質で充填、3) 隙間を金属に類似した物質で充填、の3つの方法が考えられる。1) の方法は最も経済的に不利であると考えられるため、2) および3) について検討を実施した。まず、2) の方法として、隙間を人工の多孔質材料で充填して測定精度への影響を調べた [Sakaki et al., 1998b]。実験は図-3.2.3.13に示すような白河溶結凝灰岩ブロックに5種類6個のプローブを設置して実施した。プローブ1は通常の打ち込み型、2～4は約1mmの隙間をそれぞれ石膏、セメントペースト、ペントナイトで充填した。プローブ5および6はブロック表面に接着剤で貼り付けたものである。接着剤の厚さが影響しないようにできるだけブロック方面を平滑に仕上げ、接着剤の量を少なくするように注意した。岩石ブロックの有効空隙率は約24%である。

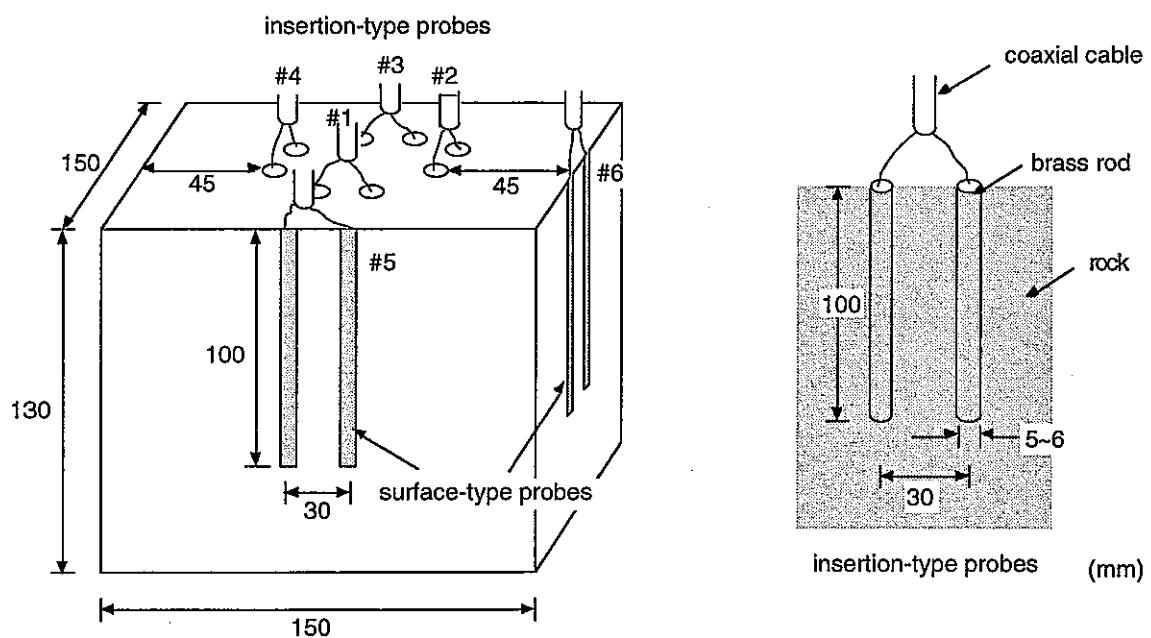


図-3.2.3.13 実験供試体概要 (H8)

プローブを設置した後、ブロックを完全飽和させ各プローブで計測を実施する。ブロックを所定の重さになるまで乾燥させて再度計測を実施する。この作業を完全に乾燥するまで繰り返した。その時の各ブロックでの比誘電率の計測結果を図-3.2.3.14に示す。

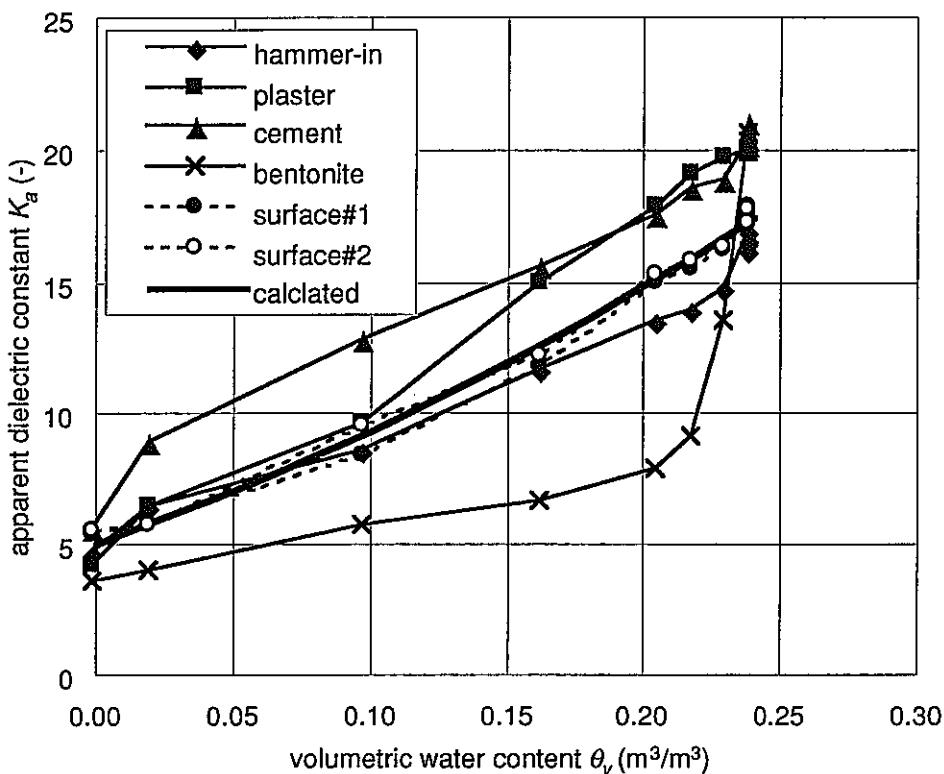


図-3.2.3.14 各種設置方法による $K_a \sim \theta_v$ 関係（白河溶結凝灰岩：H8）

石膏、セメントペーストで隙間を充填した場合は、全体的に比誘電率を過大評価する傾向が見られた。この原因として、石膏とセメントペースト自体の有効空隙率がそれぞれ 68%、33% と岩石のそれよりも大きく、ロッド表面付近の測定感度が高い部分に含水量が大きい部分が存在した可能性が考えられる。また、ベントナイトを充填した場合、飽和時には石膏などと同様に比誘電率は過大評価されたが、その後急激に小さな比誘電率を示した。これは、ベントナイトが含水量の減少に伴い乾燥収縮をおこし、この部分に空気が侵入したためと考えられる。隙間が空気で満たされると前述のように測定精度への影響が大きい。同実験では、ロッド直徑 5mm に対して隙間幅 1mm という比較的大きな隙間を想定したためこのような結果が得られた可能性も考えられるが、少なくとも今回の実験条件下では隙間を多孔質材料で充填することで測定精度をあげることはできなかった。

一方、表面貼り付け型プローブについては、打ち込み型の結果および α mixing model による推定値とよく一致し、供試体の表面が平らであれば貼り付けるだけで精度よく計測できる可能性があることがわかった。今後、表面貼付け型プローブについても検討を実施していく必要がある。

(4) 導電性材料による隙間充填型プローブ

前節の結果より、隙間を多孔質材料で充填する方法では測定精度を十分に向上させることが困難であることが分かった。本節では、隙間を導電性シリコンで充填した場合の測定精度への影響を調べた。岩石試料は明世細粒砂岩（AS-3, AS-4）、白浜砂岩（SS-3）、白河溶結凝灰岩（SW-5）、田下凝灰岩（TT-3）を用いた。プローブ設置を含めた実験手順も打ち込み型と全く同じである（図-3.2.3.3）。ただし、打ち込み時にロッド表面に導電性シリコンを塗布した。これにより、微小な隙間がこのシリコンで充填されるものと仮定した。図-3.2.3.15～18に、各岩種における $K_a \sim \theta_v$ 関係を従来の打ち込み型の結果と併せて示す。

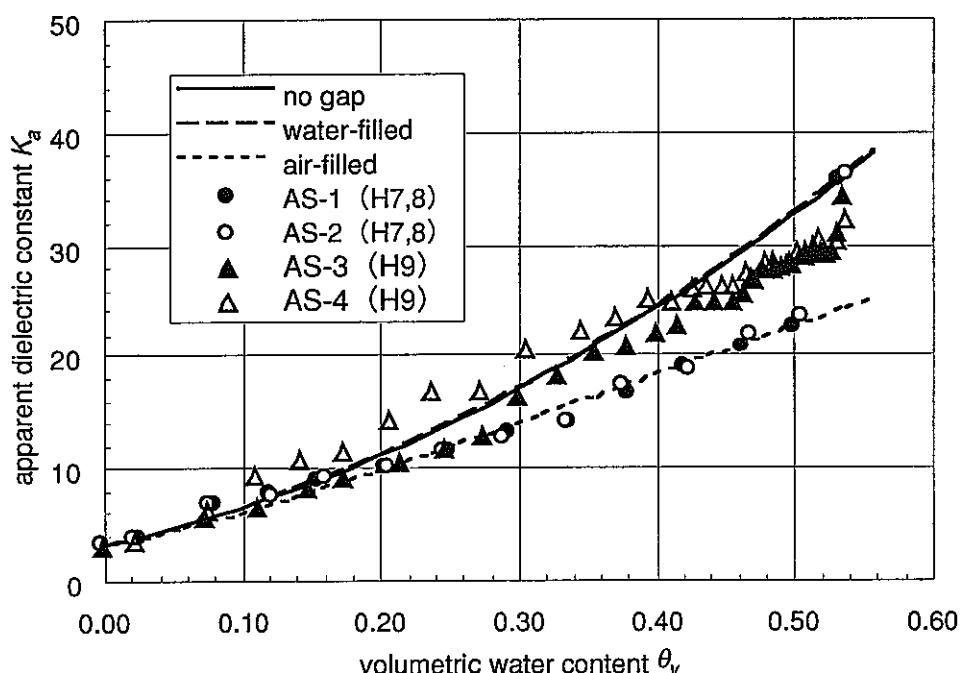


図-3.2.3.15 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係（明世細粒砂岩：H9）

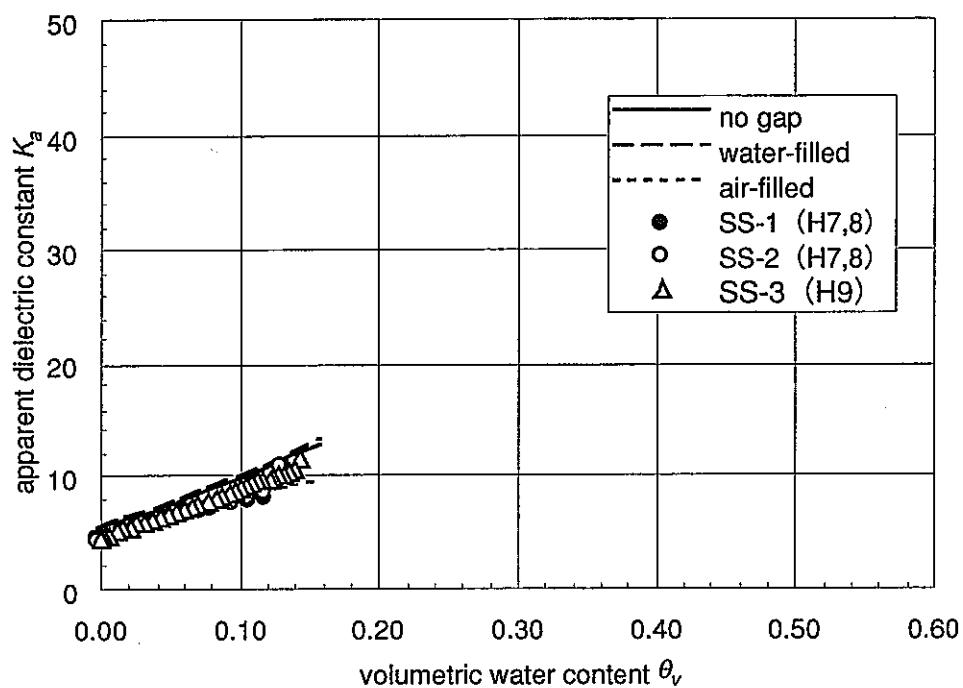


図-3.2.3.16 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係（白浜砂岩：H9）

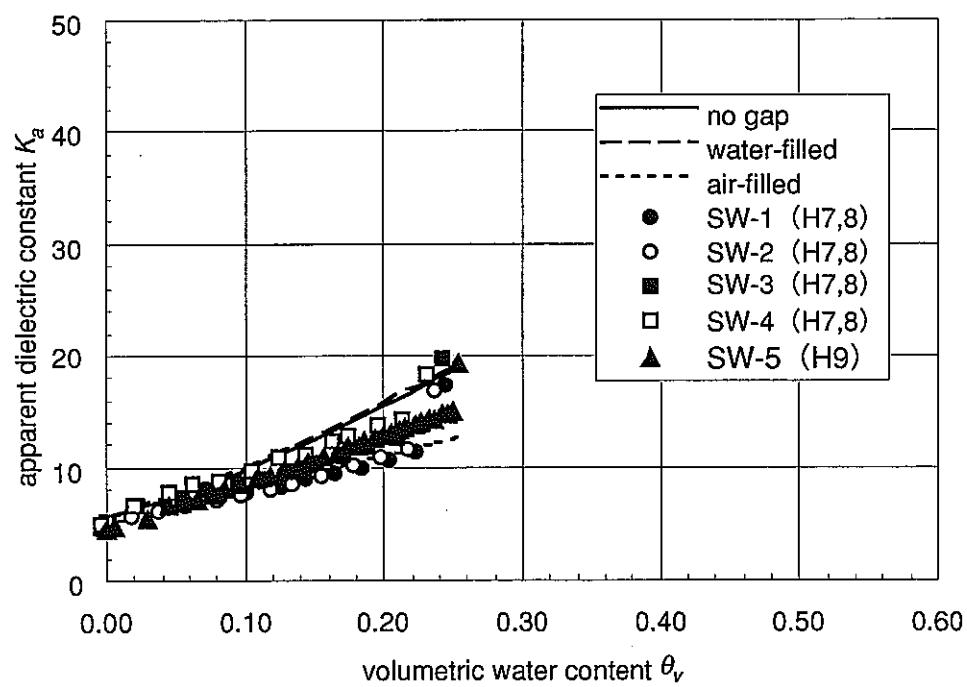


図-3.2.3.17 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係（白河溶結凝灰岩：H9）

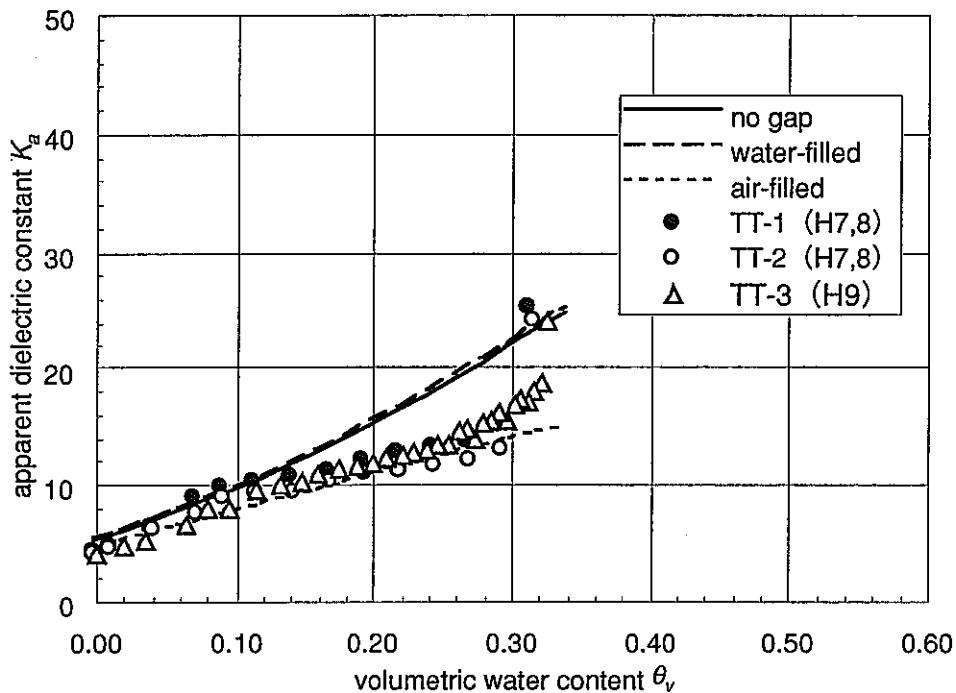


図-3.2.3.18 導電性シリコン充填による $K_a \sim \theta_v$ 関係（田下凝灰岩：H9）

従来の打ち込み方式では、飽和時から不飽和に移行する際に比誘電率が急激に減少し、これが $K_a \sim \theta_v$ 関係で不連続点として現れていた。今回の実験では、飽和付近での挙動を詳細に調べるために、含水量の変化の刻みを小さくした。したがって、この付近のデータが前年度までの結果に比べて密になっている。田下凝灰岩では、従来の打ち込み型とほぼ同様な結果が得られた。明世細粒砂岩および白河溶結凝灰岩では、 $K_a \sim \theta_v$ 曲線が若干上にシフトして、飽和付近の不連続幅が小さくなっている。白浜砂岩においては、この不連続点がほとんど見られず、 α mixing model による推定値とほぼ一致した。これは、従来の打ち込み型で見られた飽和付近の不連続点が隙間に空気が侵入して起こっているという仮定が正しいことを裏付ける一つの根拠である。ただし、この影響をなくすために、プローブ打ち込み時にロッド表面に導電性シリコンを塗布するという方法では、平均的には隙間を減らすのに効果はあるものの完全には除去しきれない。今後は、導電性シリコンの隙間への充填方法についてさらなる検討が必要と思われる。

(5) コンクリート供試体による導電性シリコンの影響の確認

前節では、岩石試料を用いて導電性シリコンの測定精度への影響を調べた。しかし、岩石試料では、完全に隙間を除去した供試体の作成が困難であるため、ここではコンクリートを用いた。供試体は以下の3つを用意し、岩石供試体と同様に飽和状態から含水量を逐次減らして比誘電率を測定した。

供試体1：型枠にプローブを設置してからセメント打設（隙間なし）

供試体2：コンクリート固化後にガイド孔を削孔しプローブを叩き込む

供試体3：供試体2と同じ、プローブ設置時にロッド表面に導電性シリコンを塗布

図-3.2.3.19に上記3供試体の $K_a \sim \theta_v$ 関係を示す。隙間がない供試体1では、飽和付近で、岩石を用いた室内実験にみられたような不連続な現象はみられない。一方、ガイド孔にプローブを設置した供試体2および3では、飽和付近で急激に比誘電率が変化する現象がみられる。導電性シリコンを充填した供試体3の方が若干不連続点が小さくなっているが、有意な違いとはいえない。岩石実験と同様、導電性シリコンをロッド表面に塗布するという方法が、隙間にシリコンを充填するには十分な方法ではないためと思われる。

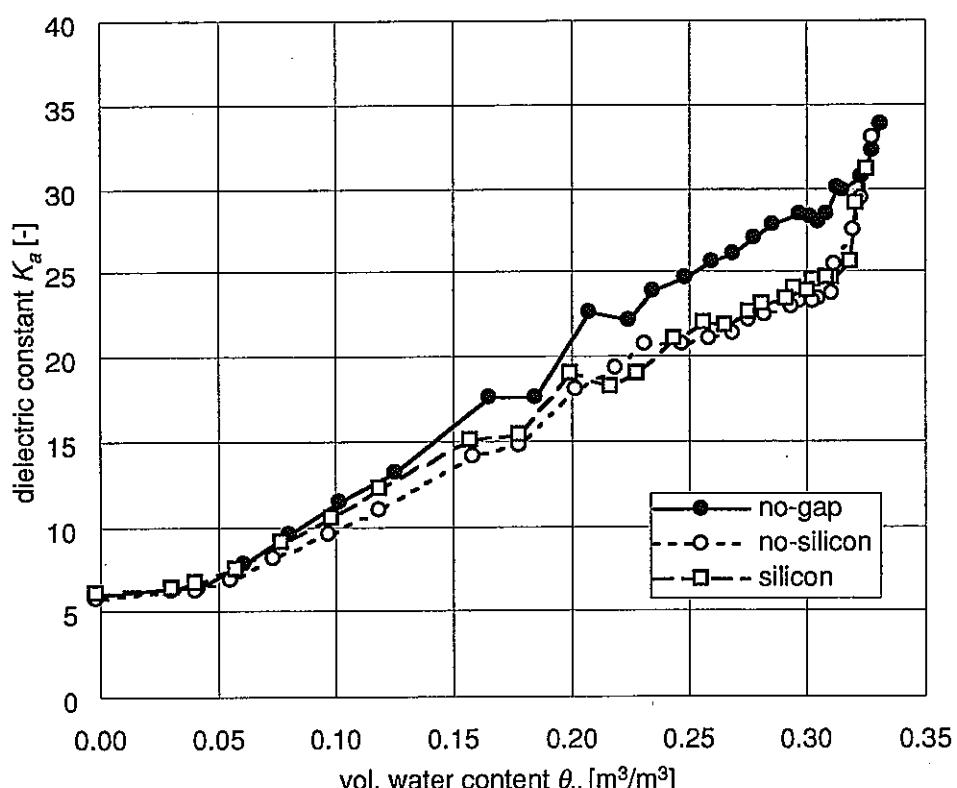


図-3.2.3.19 コンクリート供試体の $K_a \sim \theta_v$ 関係

(6) 豊浦標準砂を用いたTDR測定

TDR法は既に土壤に対しては頻繁に利用されていることは前記の通りである。本節では、これまで実施してきたTDR測定法の妥当性を確認するために、豊浦標準砂を用いて K_a ～ θ_v 関係を求め、これを既往の研究成果を比較する。プローブと砂の間には隙間がないように注意しながらプローブを設置した。

図-3.2.3.20に、実験より得られた豊浦標準砂の K_a ～ θ_v 関係とTopp et al. [1980]が求めた数種類の土における関係とを併せて示す。図より、体積含水率15～30%の範囲において豊浦標準砂の方が若干小さ目の比誘電率を示すが、全体的には既往の成果と一致しているといえる。また、岩石に見られるような飽和付近の不連続現象も見られない。これは、プローブと砂の間に隙間が生じないように設置したためと考えられる。以上より、これまで実施したTDR室内実験の測定法は特に問題ないものと考えられる。

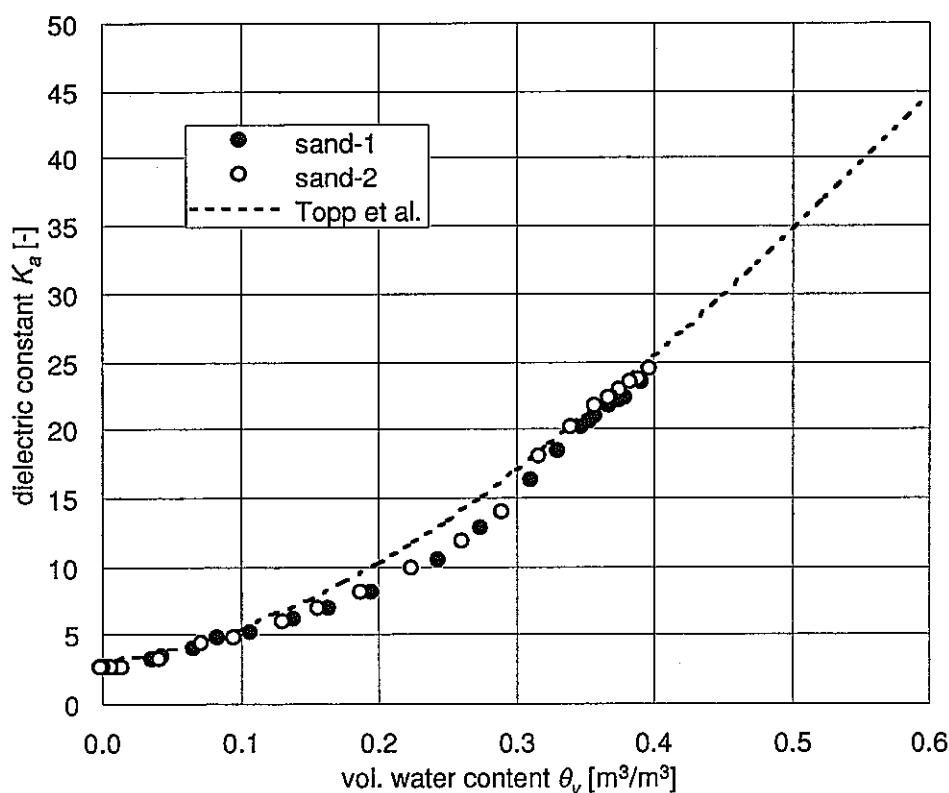


図-3.2.3.20 豊浦標準砂の K_a ～ θ_v 関係

(7) 原位置 T D R 測定

平成 9 年度は、東濃鉱山第 2 立坑第 1 計測坑道において初めて T D R 法を原位置に適用した。坑壁から 0.0m、0.5m、1.0m、1.5m、2.0m、2.5m まで 6 本の挿入型プローブを設置した。また、坑壁表面に貼付け型プローブを設置した。挿入型プローブの設置にあたっては隙間の影響を最小限にするために、前述のロッド表面に導電性シリコンを塗布する方法を用いた。プローブ設置から数回測定を実施し、定常状態になった思われる時点でベンチレーションにより岩盤内に不飽和領域を発生させることを試みた。図-3.2.3.21 に原位置の測定レイアウト、図-3.2.3.22 にベンチレーション直前の比誘電率分布を示す。

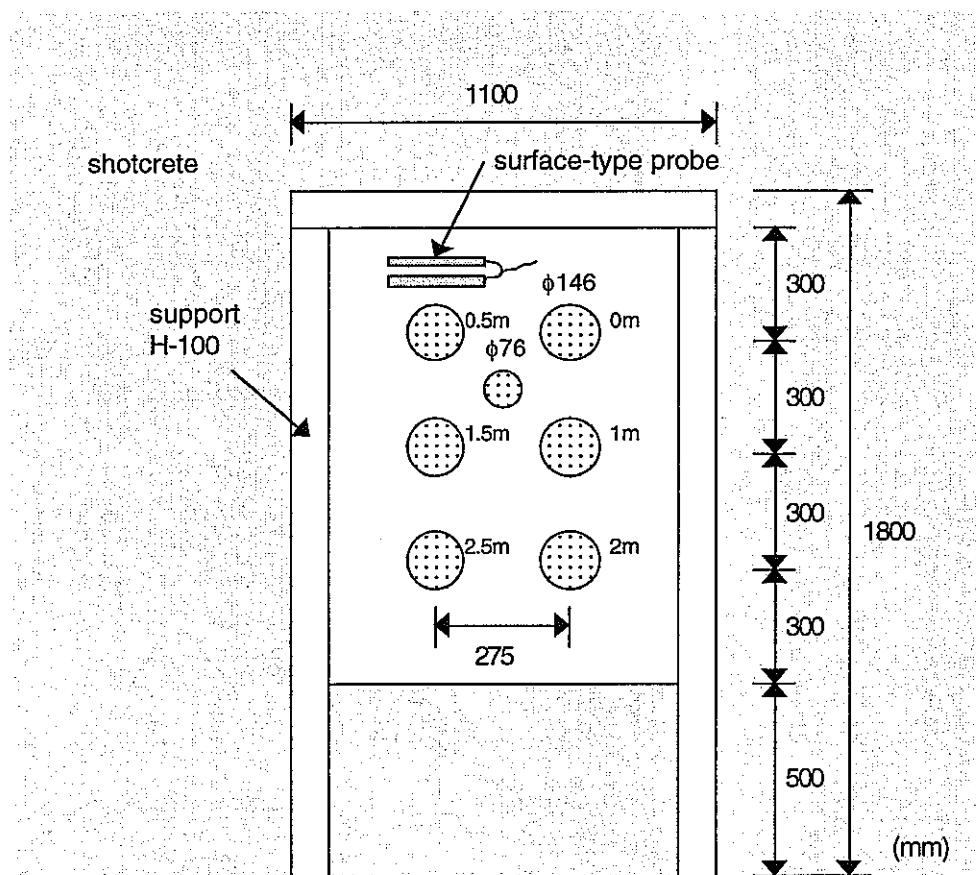


図-3.2.3.21 原位置における測定レイアウト (H9)

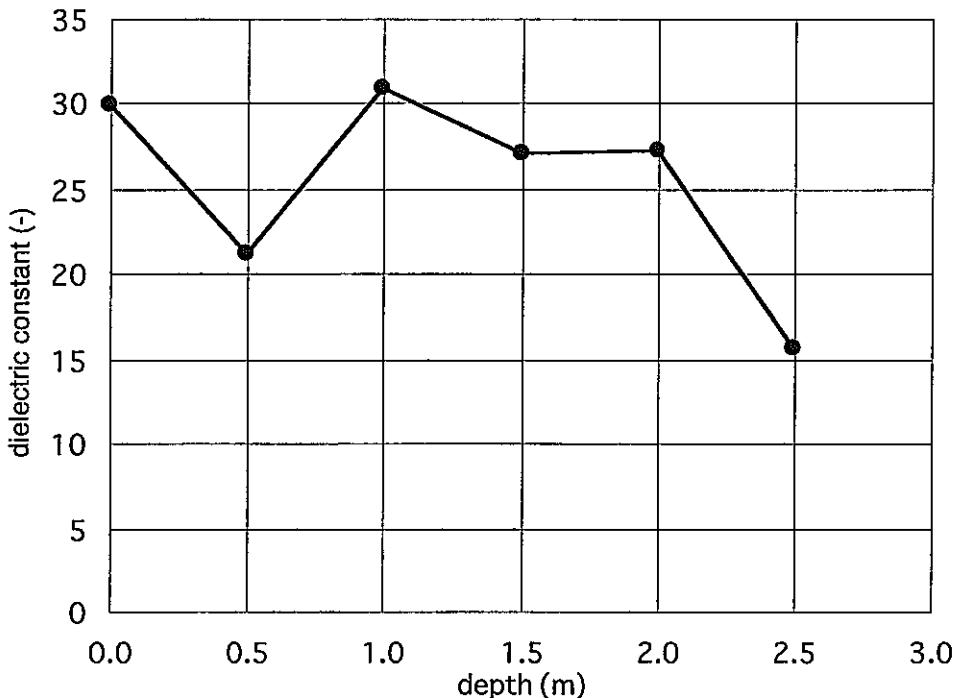


図-3.2.3.22 ベンチレーション直前の比誘電率分布 (H9)

コアを用いた重量法により含水量測定の結果、ベンチレーション前の現地の岩盤は全ての測定深度で飽和状態であることがわかった。したがって、室内試験より求めた $K_a \sim \theta_v$ 関係によれば比誘電率は 35 前後の値を示さなければならない。しかし、上図から分かるように全ての計測値は過小評価されている。これは、前節で示したように、導電性シリコンをロッド表面に塗布する方法が隙間の影響を除去するのに十分でないことを示すものと考えられる。

ここでは示さなかったが、プローブ設置直後には、小さいもので 10 程度の比誘電率を示すものも見られた。これが、時間の経過とともに大きな値を示すようになってきた。設置直後に空気で満たされていた隙間の一部が地下水で満たされたためと考えられる。

坑壁の吹付けコンクリートを剥がしてベンチレーションを行ったが、その効果が見られずコアを用いた重量法および TDR 測定によって不飽和領域は検出できなかつた。原位置における TDR 法の不飽和領域測定法としての適用性を調べるために、室内実験の結果と同様プローブの設置方法についてさらなる検討が必要である。また、これを実証するため、原位置試験サイトの選定およびベンチレーション方法についても検討を加える必要がある。

3.2.4 孔間レーダ探査

孔間レーダ探査は、2本のボーリング孔の片方に発信源、もう一方に受信源を設置して地盤や岩盤中の電磁波の伝播速度を測定する手法である。電磁波の伝播速度を測定するという点がTDR法との共通点である。図-3.2.4.1にTDR法と孔間レーダ探査の測定範囲の概念図を示す。TDR法は所定の設置深度まで掘削したアクセス孔の孔底にプローブを設置し、プローブ周辺のごく狭い範囲を測定する。一方、孔間レーダ探査はボーリング孔間の図中影部の2次元的な範囲を測定する。したがって、ある範囲の含水量分布を測定するためにTDR法ではプローブを複数設置する必要があるのに対し、孔間レーダ探査ではその必要がないという長所がある。ここでは、孔間レーダ探査により岩盤中の含水量をどの程度推定できるのかを調べた結果について述べる。

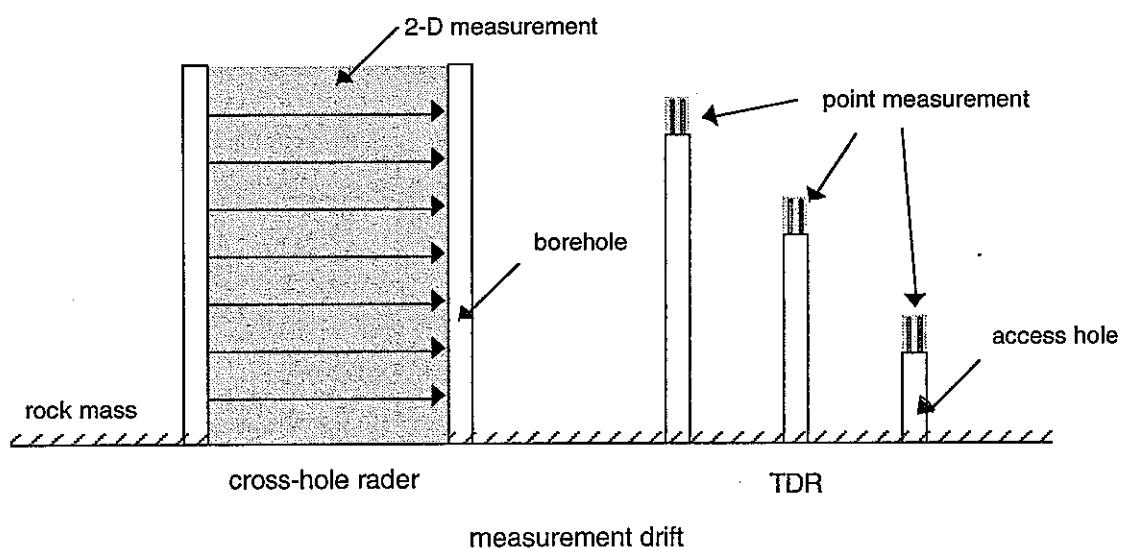


図-3.2.4.1 孔間レーダ探査とTDR法による測定範囲概念図

(1) 平成 8 年度

平成 8 年度には、東濃鉱山第 2 立坑第 1 計測坑道の側壁に掘削された CR-1,2 孔を用いてレーダ探査を実施した（図-3.2.4.2）。ボーリング孔長は 10m であるが、不飽和領域が存在する場合は孔壁より 1~2m と予測されたため、測定範囲は孔壁から 75m までとした。電磁波パルスの中心周波数は 80MHz である。この周波数においては岩盤の比誘電率は周波数に依存せず、電磁波伝播速度 v と比誘電率 K_a の間には、 $v = \frac{c}{\sqrt{K_a}}$ の関係がある。

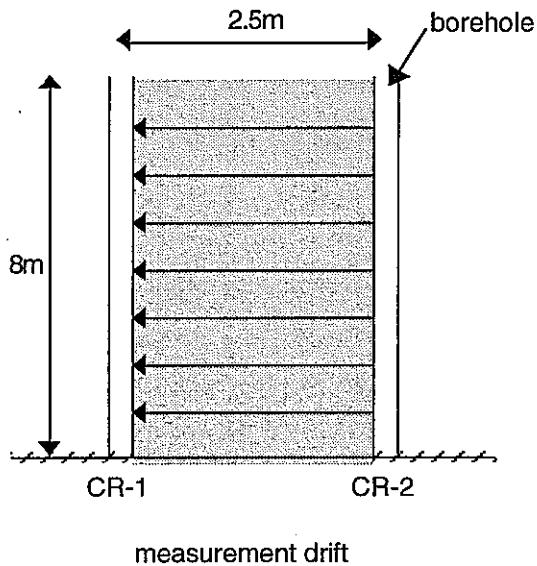


図-3.2.4.2 東濃鉱山孔間レーダ探査概要 (H8)

事前に実施した原位置の岩石試料の自然含水量や伝導率などの室内試験結果を検討した結果、電磁波パルスが減衰しても受信側に到達できるように孔間距離は 2.5m とした。図-3.2.4.3 に、ボーリング孔掘削時に採取したコアを用いて室内にて重量法により求めた含水量の孔壁からの深度方向分布を示す。図-3.2.4.4 には、孔間レーダにより得られた電磁波伝播速度より上式にて求めた比誘電率の孔壁からの深度方向分布を示す。

コアを用いた室内試験結果より、原位置岩盤の有効空隙率は約 52%、飽和度は坑壁からの距離にかかわらず 100% であった。孔間レーダの結果では、坑壁から 2.5m 以

深では、比誘電率が37前後の値を示している。これは、TDR法により求めた含水量と比誘電率の関係から考慮するとほぼ飽和を示しており、コア試験の結果と一致する。一方、坑壁から2.5mまでの比誘電率はコア試験では全ての深度で飽和していたにもかかわらず孔間レーダの結果では小さくなっている。この原因として、孔間レーダ測定時に電磁波が孔口から外の空気を伝播したものが受信されたものと考えられる。今回の測定では、測定範囲内の岩盤がすべて飽和していたため孔間レーダ測定により不飽和領域は検出できなかったが、深度2.5m以深の孔間レーダにより得られた比誘電率が飽和状態を示し、採取したコアの含水量測定結果と一致したことおよび、比誘電率は含水量とともに変化することから、原位置岩盤に不飽和領域が存在した場合には孔間レーダによりそれを測定できる可能性があることを示すものと考えられる。同調査では、原位置試験の場所選定に課題が残された。

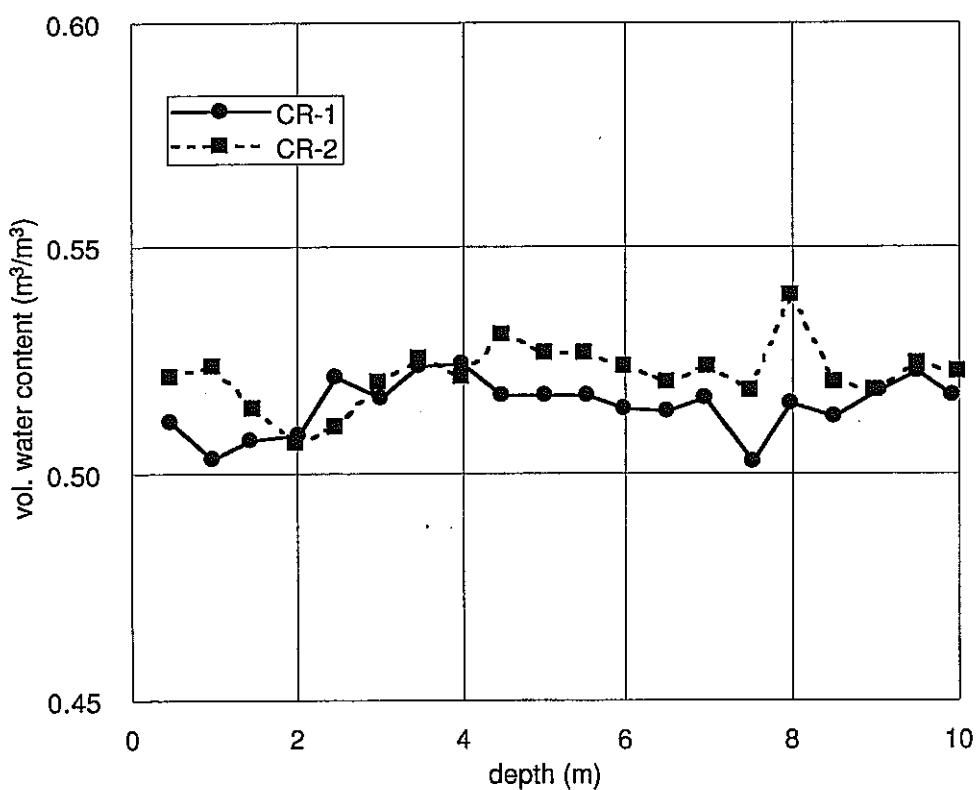


図-3.2.4.3 コアより求めた含水量の深度方向分布 (H8)

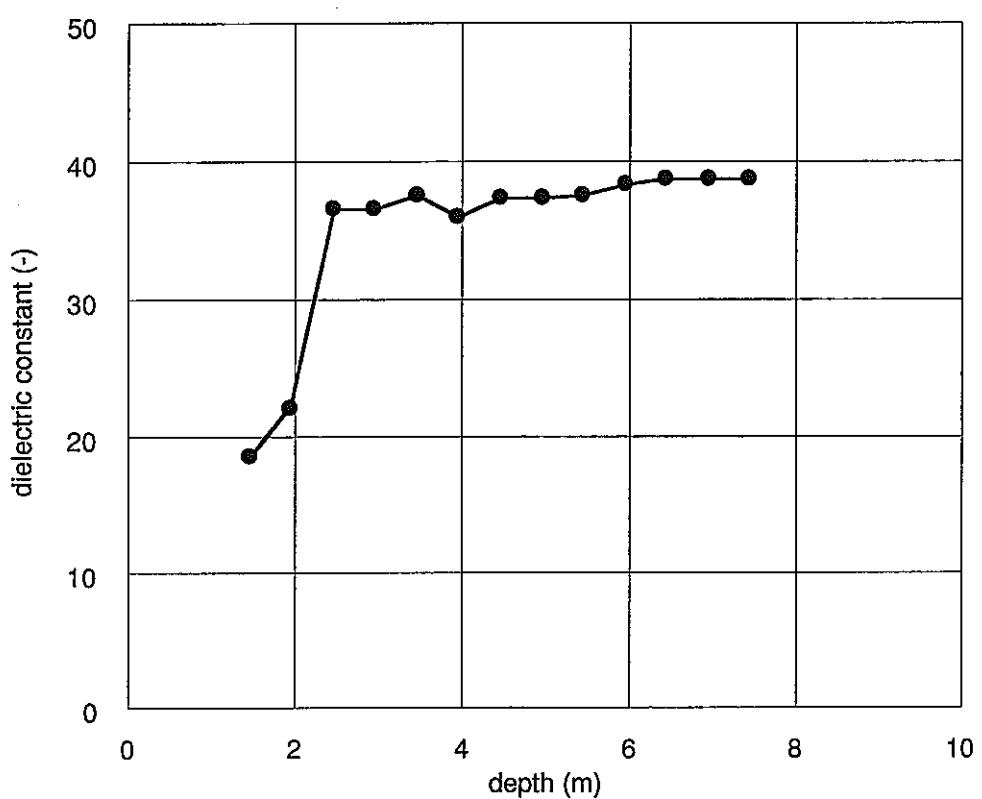


図-3.2.4.4 孔間レーダにより得られた比誘電率の深度方向分布 (H8)

(2) 平成9年度

平成9年度は前年度と同様、東濃鉱山第2立坑第1計測坑道内に新たにボーリング孔（SI-9,10孔）を掘削し、ベンチレーションにより岩盤を強制的に乾燥させて不飽和領域を発生させることを試みた。8mのボーリング孔の中間地点まで送風管により乾燥した空気を送風し、孔口から湿った空気を排出する方法を用いた。孔間距離はベンチレーションがより効果的になるように1mとした（図-3.2.4.5）。電磁波の中心周波数は80MHzと150MHzの2種類を用いた。重量法による含水量測定および孔間レーダ測定はベンチレーション前後の2回実施した。

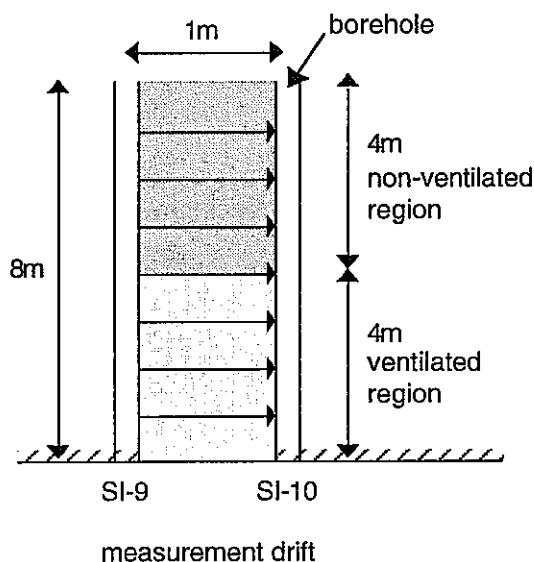


図-3.2.4.5 東濃鉱山孔間レーダ探査概要（H9）

図-3.2.4.6にベンチレーション前後の重量法による含水量の孔壁からの深度方向分布を示す。図-3.2.4.7には、ベンチレーション前後の孔間レーダ測定による比誘電率の深度方向分布を示す。SI-9,10孔は発信、受信に用いた孔である。SI-16孔は、ベンチレーション終了後にSI-9,10孔の中間位置に掘削したものである。

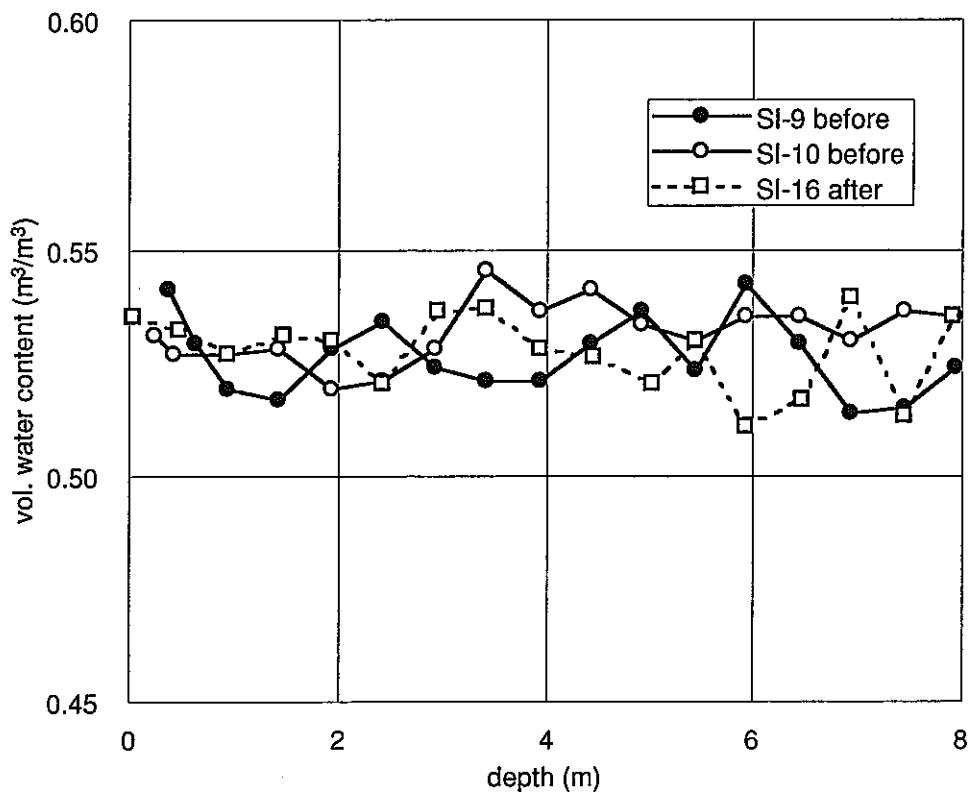


図-3.2.4.6 重量法による含水量の深度方向分布（ベンチレーション前後：H9）

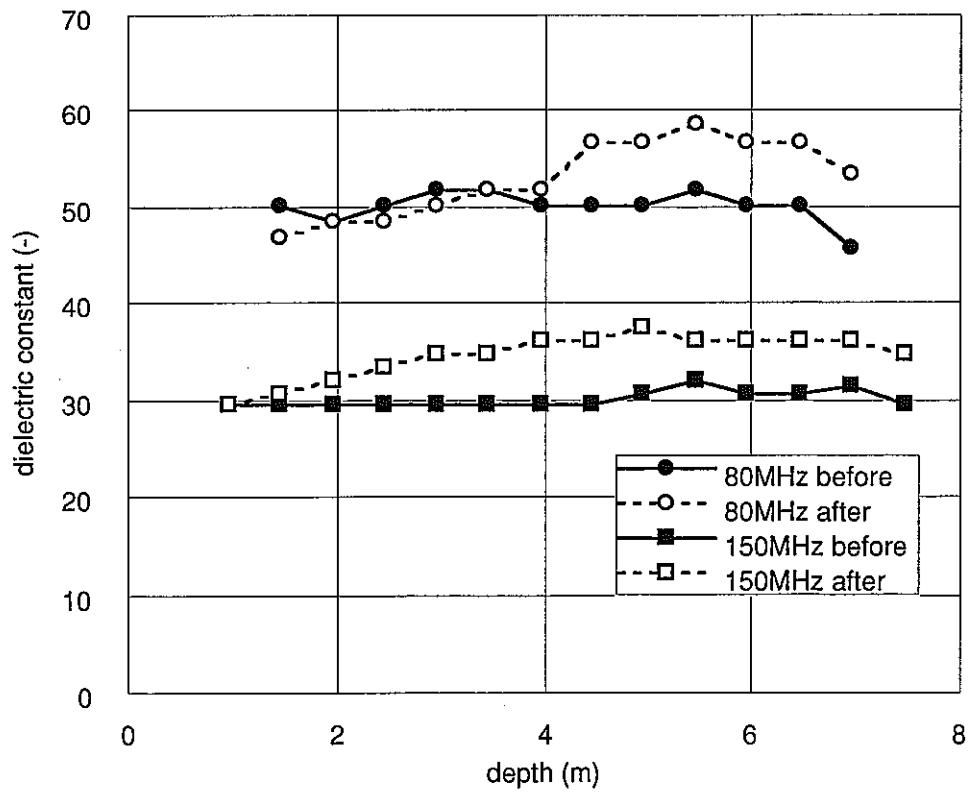


図-3.2.4.7 孔間レーダ測定による比誘電率の深度方向分布（ベンチレーション前後：H9）

重量法による含水率の測定結果より、ベンチレーション前は岩盤は飽和状態にあること、ベンチレーション後も測定範囲の中心位置にあたる SI-16 孔の位置ではベンチレーションの効果がみられず飽和状態であることがわかった。孔間レーダによる比誘電率の分布をみると、80MHz の場合で 50 以上の値を示し、150MHz の結果では約 30 ~35 程度を示した。比誘電率が 50 以上というのは現地の岩石の空隙率を考慮すると大きすぎるため、データに何らかのエラーが含まれている可能性が考えられる。ベンチレーション前後での比誘電率の変化は明瞭ではないが、全体的な傾向としてベンチレーション前は深度方向の比誘電率分布はほぼ一定なのに対し、ベンチレーション後は孔口に近い部分で相対的に比誘電率が小さくなっている。これは、ベンチレーションの効果により同領域に若干の不飽和領域が発生している可能性を示す。本来は、4m 以深でのベンチレーション前後の比誘電率は変化せず、4m 以浅でのベンチレーション後の比誘電率がベンチレーション前に比べて小さくなるはずである。ベンチレーション後の結果のみを見ると定性的には正しい傾向を示していると思われる。しかし、ベンチレーション前の結果を併せて比較すると、含水量がほとんど変化しないと思われる 4m 以深で比誘電率が増加している。これについては、データの読み取り精度などにも若干の検討の必要があると思われる。

同調査では、ベンチレーション後のボーリング孔周辺の含水率がどのようにになっていたかを調べていないため、これ以上の考察はできなかった。平成 8 年度の調査と同様に、不飽和領域が存在していれば計測できる可能性は示唆されたが、調査位置の岩盤がほぼ飽和しているためこれを確認することはできなかった。

3.3 平成 10 年度の研究内容および成果

平成 5~9 年度の研究成果をうけて、平成 10 年度は、1) TDR プローブ周辺の導電性シリコンの充填方法に関する室内実験、2) 改良した設置方法による原位置でのプローブ設置および測定、3) 人工砂地盤を用いた孔間レーダ探査、の 3 項目について実施・検討することとした。以下にそれぞれの概要および結果について述べる。

3.3.1 TDR 室内実験

ガイド孔に TDR プローブを設置した従来の室内実験では、ロッドと岩石の間の微小な隙間に侵入した空気の影響によりみかけの比誘電率が過小評価される問題が残った。この隙間を多孔質材料で充填した場合は、測定精度は十分に向上しなかった。一方、隙間を導電性シリコンで充填した場合は、定性的には測定精度を向上させることができた。しかし、平成 9 年度に実施したプローブ設置時にロッド表面に導電性シリコンを塗布する方法では十分に隙間を除去することができなかった。平成 10 年度は、以下の 2 つの方法により導電体で隙間を充填することを試みた。

<方法 1> 導電性シリコン加圧充填型プローブ

図-3.3.1.に示すように、ガイド孔の内径にほぼ一致する外径を持つ金属管およびその内径と等しい外径をもつ金属棒を用いる。管の中に導電性シリコンを充填し、これをガイド孔に挿入する。次に、この管に金属棒をゆっくりと加圧挿入し、先端よりシリコンを隙間に充填する。最後に坑壁側に出てきたシリコンを除去する。

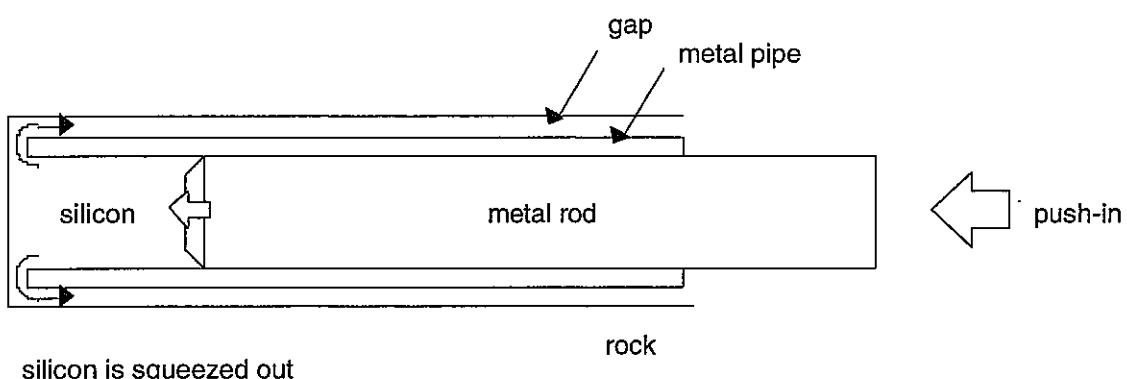


図-3.3.1.1 導電性シリコン加圧充填型プローブ概念図 (H10)

<方法2> 導電性シリコンチューブ拡張密着型プローブ

図-3.3.1.2に示すように、ガイド孔の内径とほぼ等しいか若干小さ目の外径を持つ導電性シリコンチューブ、その内径にみあった外径を持ったC型管、その内径より若干大きい外径を持つ金属棒を用いる。シリコンチューブにC型管を挿入したものをガイド孔に挿入する。次に、金属棒をC型管に叩き込む。チューブの厚さが適当であれば、C型管が広がることでチューブが孔壁に密着すると仮定した。

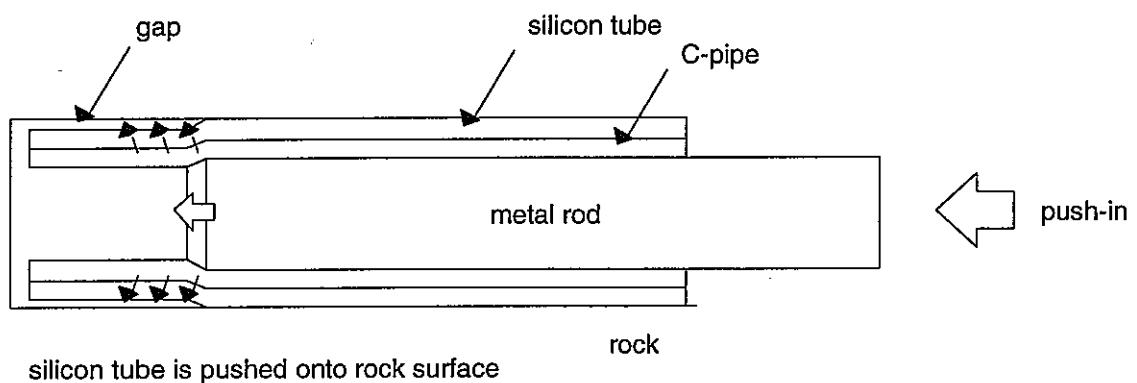


図-3.3.1.2 導電性シリコンチューブ拡張密着型プローブ概念図 (H10)

これらのプローブの適用性は従来と同様の室内実験により検証した。上記の方法で3種類の岩石試料にプローブを設置し、含水量を変えながら比誘電率を測定した。図-3.3.1.3～5に方法1により得られた明世細粒砂岩（AS-5）、多胡砂岩（TS-5）、白河溶結凝灰岩（SW-6）の $K_a \sim \theta_v$ 関係を従来の叩き込み、およびシリコン塗布の結果と併せて示す。

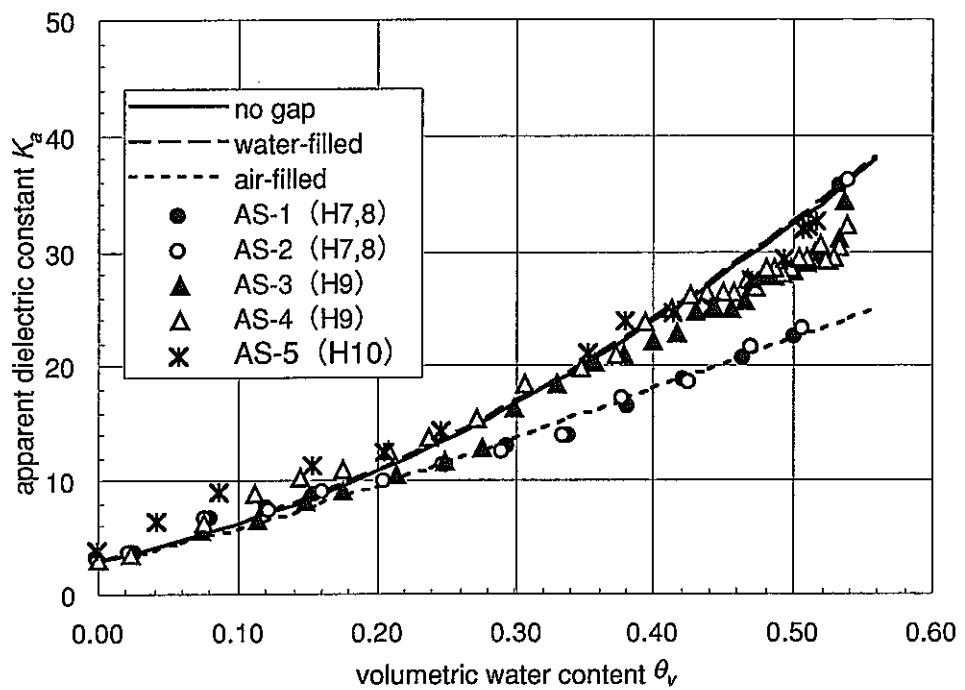


図-3.3.1.3 シリコン加圧充填型プローブによる $K_a \sim \theta_v$ 関係（明世細粒砂岩：H10）

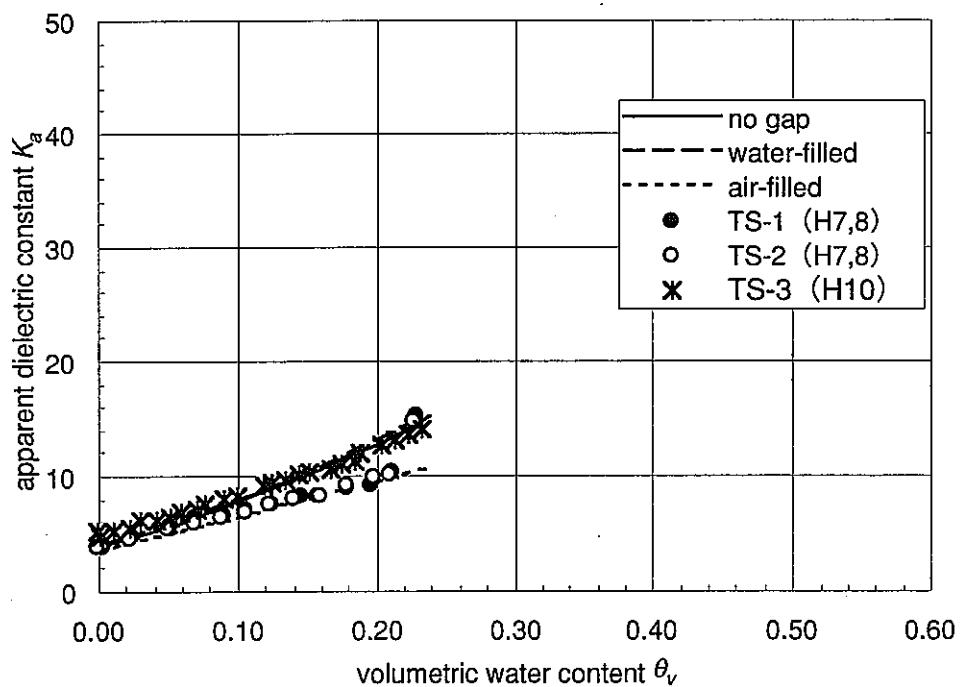


図-3.3.1.4 シリコン加圧充填型プローブによる $K_a \sim \theta_v$ 関係（多胡砂岩：H10）

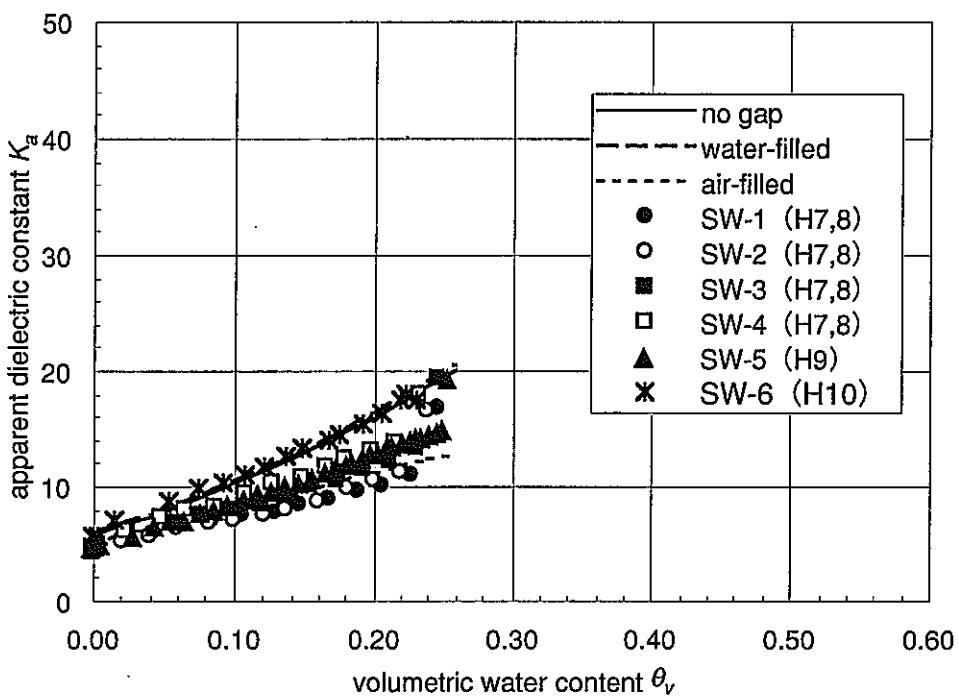


図-3.3.1.5 シリコン加圧充填型プローブによる $K_a \sim \theta_v$ 関係（白河凝灰岩：H10）

図より、明世細粒砂岩ではまだ若干の問題が残るもの、多胡砂岩、白河凝灰岩ではシリコン加圧充填型プローブにより従来の叩き込みによる設置でみられた飽和付近の不連続点がなくなっている。これは、シリコンがうまく隙間に充填され隙間に侵入した空気による比誘電率の過小評価の影響がほぼ取り除かれたためと考えられる。 $K_a \sim \theta_v$ 関係の全体的な傾向は(2)式の α mixing model による推定値とほぼ一致している。同設置手法はまだ手間が若干かかるなどの課題も残るが、平成6~9年度の室内実験で見られた飽和付近での $K_a \sim \theta_v$ 関係の不連続現象の原因がプローブと岩石試料との間の隙間に侵入した空気であったことがほぼ確認できたことは大きな進歩である。今後は、さらに容易にプローブを設置できるような設置方法あるいはプローブ仕様について検討していく必要があるものと考えられる。

3.3.2 TDR原位置測定

平成9年度には、東濃鉱山第2立坑第1計測坑道においてTDR法を初めて原位置に適用した。しかし、プローブ周辺に残った隙間に空気が侵入しこれが測定精度に影響（比誘電率の過小評価）をした可能性があること、原位置の岩盤は地下水の供給が多くここで用いたベンチレーションにより不飽和領域を発生させることができなかつた、などの問題点を残した。平成10年度は、9年度に設置したプローブを除去後ガイド孔を清掃し、前節に示した方法1の導電性シリコン加圧充填型プローブを設置した。また、ベンチレーションにより同計測坑道の岩盤に不飽和領域を発生させるだけの蒸発量が生じるかどうかを調べることを主目的として、より強力と思われるベンチレーション方法を用いた。

図-3.3.2.1に、設置後(98/12/3)～ベンチレーション開始(99/1/20)～ベンチレーション後(99/1/22)までの比誘電率の深度分布を示す。有効空隙率54%の原位置岩盤が飽和していると仮定すると、理論上は約36程度の値を示すはずである。プローブ設置直後の比誘電率の値は、平成9年度は9～30程度の小さな値を示したのに対し、平成10年度は29～37の値を示している。この値は、室内実験から得られた $K_a \sim \theta_v$ 関係によれば飽和度で80～100%の値を示しており、プローブに導電性シリコンを塗布しただけの平成9年度の挿入方法に比べると測定精度が向上しているものと推定される。

一方、設置後は時間の経過とともに全ての挿入型プローブにおいて比誘電率が35～41の範囲まで若干上昇した。この値は、岩盤が完全に飽和したと想定した場合の値(36程度)と同等かやや上回るものである。比誘電率がやや上回った原因として以下ののような可能性が考えられ、今後信頼性の高い原位置測定を実施するためには、この原因の究明が必要と考えられる。

- プローブガイド孔の余掘り部分やプローブと交差する亀裂にシリコンが侵入し、見かけのプローブ長が実際より長くなっている。
- プローブに接した部分のケーブル内に水が侵入している。

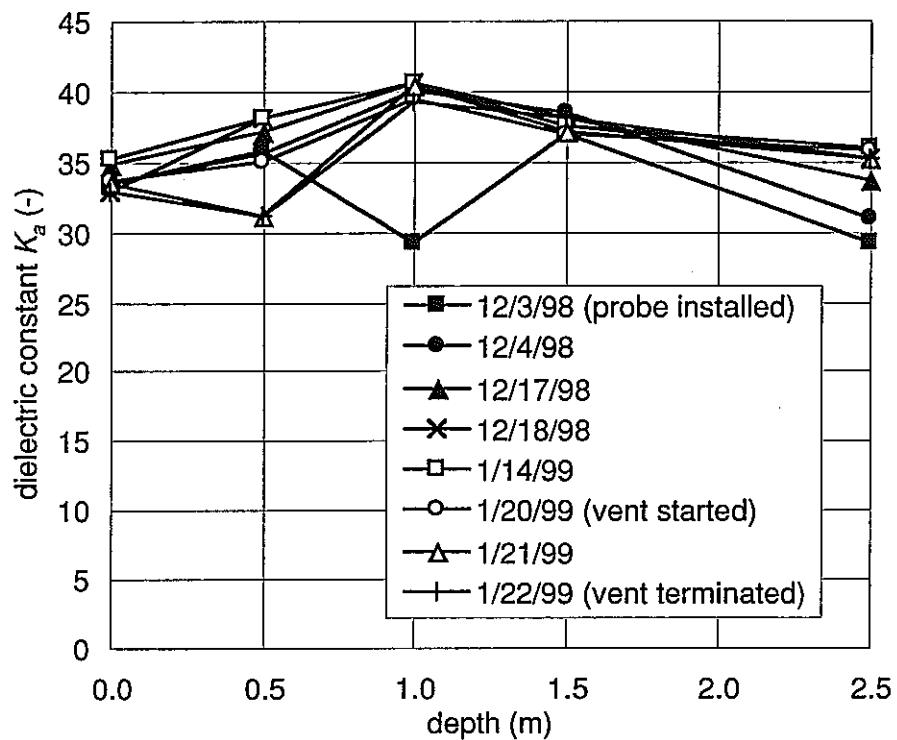


図-3.3.2.1 原位置TDR測定による比誘電率の深度分布 (H10)

3.3.3 人工砂地盤における孔間レーダ探査

平成 8 年度および 9 年度に東濃鉱山第 2 立坑第 1 計測坑道内にて実施した孔間レーダ探査においては、原位置岩盤の地下水の供給が多く採用したベンチレーション方法では、不飽和領域を発生させることができなかった。しかし、原位置岩盤が飽和しているという測定結果はコアを用いた重量法の結果と一致した。レーダを含めた誘電法は岩盤中の水分量に反応し、ここで計測された水分量が飽和時の含水量と一致したことから、不飽和領域が存在した場合、その水分量を測定できる可能性は示唆された。

平成 10 年度は、人工砂地盤を用いて不飽和領域を発生させ、これをどの程度検出できるか調べることとした。前述のように、土と岩石の誘電特性（含水量～比誘電率の関係）は同じ関数では表すことはできない。しかし、比較的類似した挙動を示すことがわかっているため、砂地盤で不飽和領域が測定できれば岩盤内でも測定可能であると考えられる。

図-3.3.3.1 に、実験に用いた砂地盤および測定方法の概要を示す。人工的に盛土、転圧した砂地盤（空隙率約 42%、初期体積含水率約 18%）の上面の一部に散水し、地盤内に地下水面ができるような状態を造る。散水量については事前に実施した数値解析により設定した。この地下水面を横切るように設置したボーリング孔（塩ビ管）を用いて散水前中後に孔間レーダ探査を実施する。また、孔間に設置した ADR、TDR プローブなどにより、実際の砂地盤の含水量を測定し、これを孔間レーダの結果と比較する。

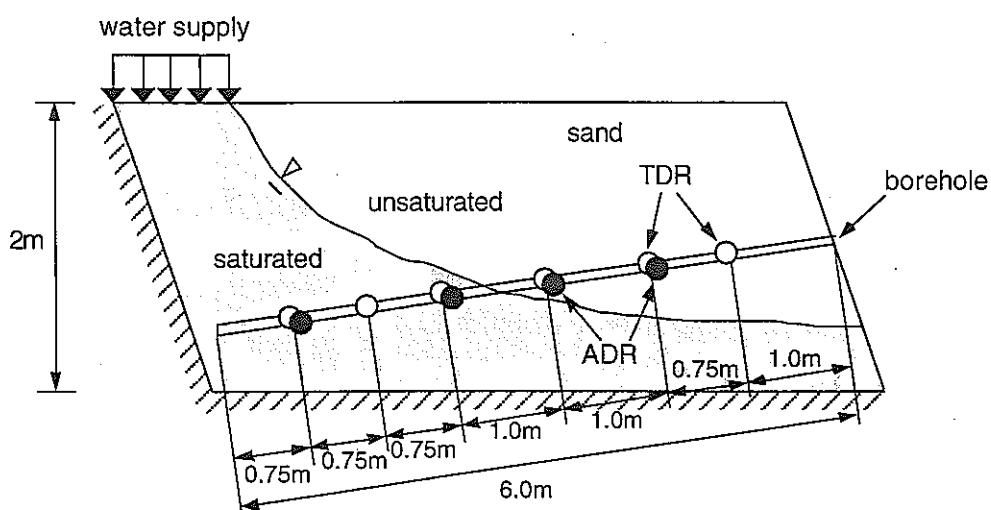


図-3.3.3.1 人工砂地盤および測定方法の概要 (H10)

図-3.3.3.2 および砂地盤内に設置したA D R プローブおよび孔間レーダより得られた散水前および途中における砂地盤の比誘電率の孔口からの深度方向分布を示す。散水前より散水終了まで合計8回のレーダ測定を実施した。A D R 測定は深度方向4箇所にて15分おきに実施しており、レーダ測定と同時刻のものを併せてプロットした。

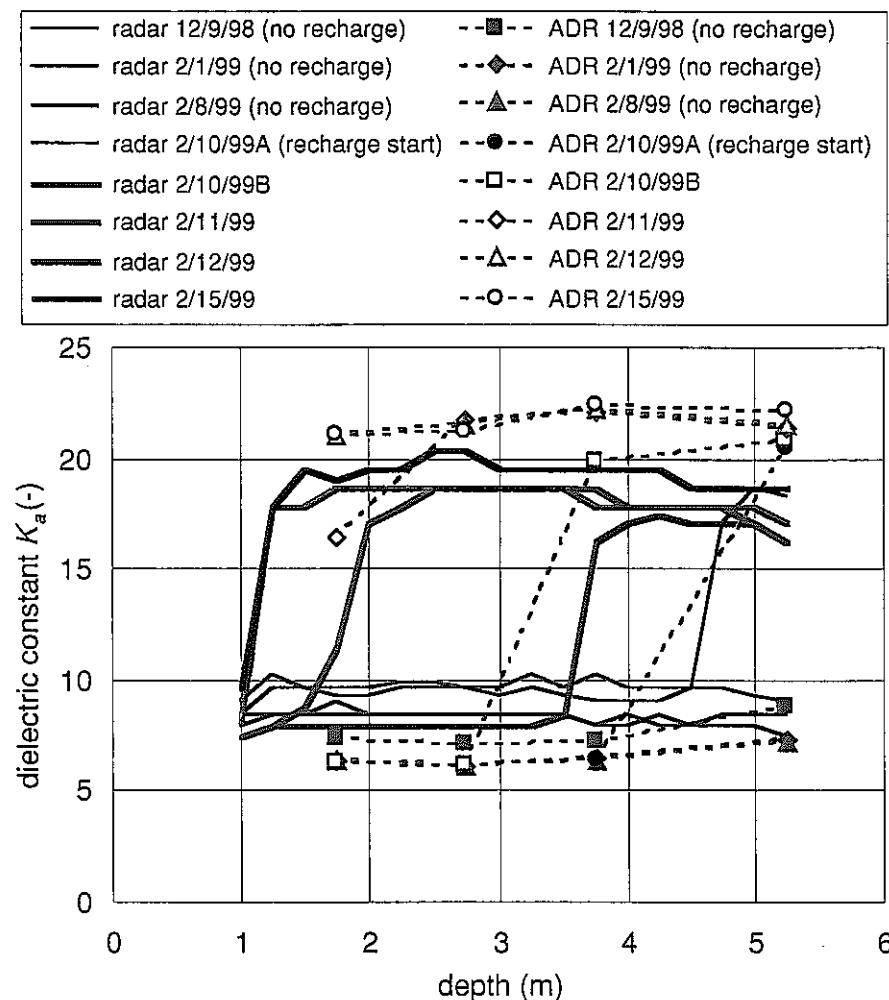


図-3.3.3.2 砂地盤の散水前後の比誘電率分布（孔間レーダ、A D R 法：H10）

以上の結果の散水前後の比誘電率と Topp 式によってこれらの値を体積含水率に換算した値を表-3.3.3.1 に示す。

表-3.3.3.1 各種測定方法による比誘電率と体積含水率 (H10)

	散水前	散水後
重両法	N/A (18%)	N/A
孔間レーダ	9 (18%)	18 (31%)
ADR	6 (12%)	22 (36%)
TDR	7 (14%)	24 (39%)

数値に若干のばらつきは見られるが、その傾向は概ね一致していることがわかる。上図では、地下水水面がボーリング孔を横切っていく状況がADRおよびレーダの両方で確認できており、その時刻もほぼ一致している。これらの結果では、上記の方法により不飽和領域とその含水分布を精度よく定量的に把握できたとはいえないものの、不飽和領域の広がりを定性的に把握するには十分な精度を有しているものと考えられる。今後は、上記データで見られた手法間の測定値のばらつきの原因を究明していく必要があるものと考えられる。

3.3.4 左官砂の K_a ～ θ_v 関係

前節のレーダ探査に用いた左官砂について室内にて比誘電率と体積含水率の関係 (K_a ～ θ_v 関係) を求めた。計測手法には TDR 法を用いた。図-3.3.4.1 に、その結果を豊浦標準砂の結果 (sand-1, 2) と併せて示す。

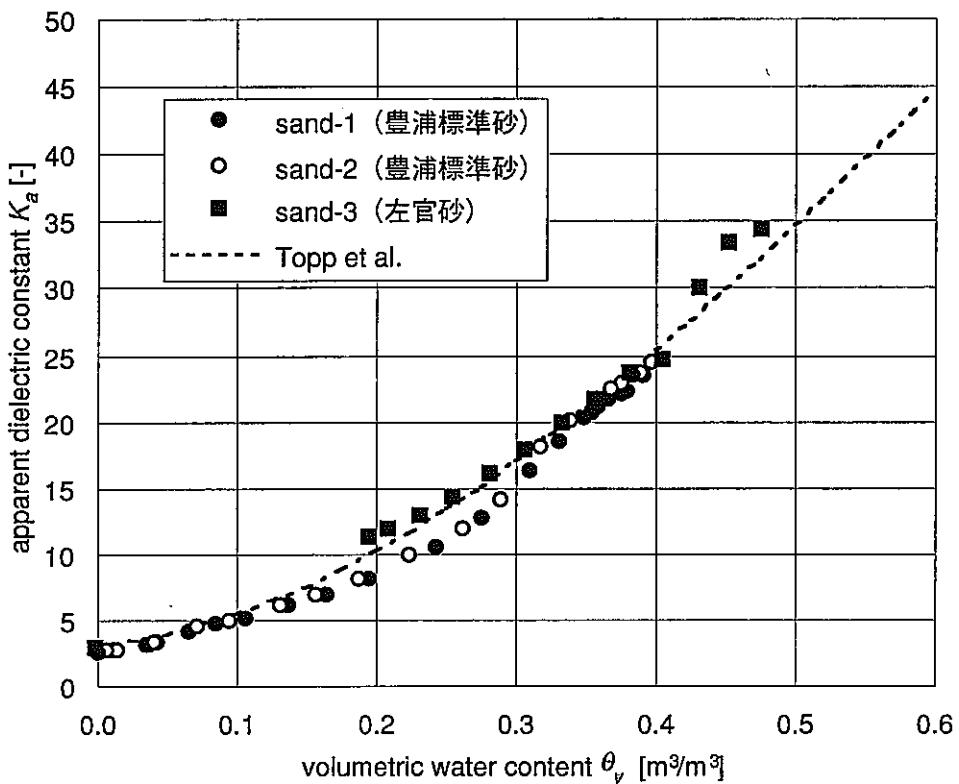


図-3.3.4.1 左官砂 (sand-3) の K_a ～ θ_v 関係 (H10)

体積含水率 20%以下の範囲において何らかの原因によりデータが正しく取得できなかった。しかし、得られたデータはほぼ Topp 式と一致しており、左官砂についても Topp 式が有効であることが分かった。飽和付近では比誘電率が若干過大に評価されているが、空隙率を一定に保ちながら砂を完全に飽和させるのは困難であるなどに起因するものと思われる。例えば、完全飽和の砂は液状に近く、粒子同士の結合力が不飽和の場合より小さく空隙率が若干大きくなつたとすればその分含水量は大きくなるので、比誘電率も大き目に評価される。この現象は、前述した岩石における試料とプローブの隙間による飽和付近での不連続現象とは異なる性質のものである。

3.4 まとめ

3.4.1 TDR室内試験

プローブと岩石試料との間の隙間に強制的に導電性シリコンを充填させる方法を用いた。プローブ叩き込みのみ、プローブ表面に導電性シリコン塗布などの方法で見られた含水量～比誘電率関係における飽和付近での不連続点がみられなくなった。これは、同方法により隙間がほぼ導電体で充填され、そこに侵入した空気の影響がなくなったためと考えられる。プローブの挿入速度など注意を要する点もあるが、測定精度の向上は図れたと考えられる。今後はより容易かつ隙間がない設置方法について検討していく必要があると考えられる。また、岩石の誘電特性について最近の研究動向を調査し、現在得られている成果と比較してみるのも一つの成果の確認方法である。

3.4.2 TDR原位置測定

室内試験と同様にプローブと岩石試料との間の隙間に強制的に導電性シリコンを充填させる方法によりプローブを設置した。設置直後より時間の経過とともに比誘電率が上昇し、原位置岩盤が飽和していると仮定した場合の 36 と同等または若干上回る値 (35~41) が得られた。同様なプローブ設置手法を用いた室内試験ではこのような問題は見られなかった。原位置での設置は困難であったため、何らかの問題が生じていることが考えられる。今後は、この比誘電率の過大評価の原因を究明する必要があるものと考えられる。

挿入型プローブはその設置の困難さゆえ、原位置にはあまり適さない。パッカ一式プローブはその問題点を改良し、既存のボーリング孔壁を利用して計測できるようにしたものである。平成 10 年度の予備的な適用試験では、ある程度の適用性が確認できたため、挿入型プローブと並行してパッカ一式プローブの仕様や設置手法について検討していくことが必要である。

3.4.3 孔間レーダ探査

人工砂地盤に散水することにより人工的に発生させた不飽和領域に孔間レーダを適用した。当初は定常状態において測定範囲内に地下水位が位置する予定であったが、測定範囲は地下水位下となった。しかし、地下水位が上昇していく過程で測定範囲内で飽和－不飽和領域の境界をレーダにより確認することができた。また、TDR、A

D R、重両法による含水量測定の結果と比較した。その結果、レーダによる地下水位の位置と A D R による地下水位の位置はほぼ一致した。また、T D R、A D R、孔間レーダでの地下水面上下での含水量の値の結果若干のばらつきがみられたものの定性的にはよく一致した。よって、孔間レーダにより不飽和領域のひろがりを測定することができる事が確認できた。今後は、手法間でみられた計測値のばらつきの原因を究明する必要がある。

3.5 今後の課題

岩盤中の不飽和領域の計測についての研究は、スイス (NAGRA) やアメリカ (DOE) で実施されている。これらの研究機関でも、岩石の比誘電率が土と同様に含水量によって変化する特性に着目しており、具体的な計測手法の開発を進めている。岩石の比誘電率～含水量の関係は弾性波速度や比抵抗などの物理量に比べると岩種によるばらつきが小さいため、不確定要素が多い原位置の計測には最も適した物理量であると考えられる。我が国においてもこれまでの比誘電率に着目した研究成果をうけ、その計測手法について今後研究をさらに進めることが必要である。

本研究では、原位置岩盤の比誘電率を計測する方法として、孔間レーダー探査およびTDR法に着目した。平成10年度までの研究で、孔間レーダ探査では飽和した岩盤における調査では岩盤が飽和していることを検出でき、人工砂地盤では不飽和領域を概ね測定することができた。TDR法に関する研究では、岩石とプローブの隙間に導電性シリコンおよび導電性シリコンチューブを用いた方法により隙間に侵入した空気の影響をほぼ取り除くことができた。

実際に坑道周辺に発生している不飽和領域は既存の計測事例や数値解析より坑壁から1～2m程度と推定される。孔間レーダではプローブ長が短いもので1m前後あり、この1～2mの比誘電率の変化を捉えるにはこのプローブ長が障害になることも考えられる。また、坑壁近傍の測定については空気中を伝搬する波を計測するなどの問題点もある。したがって、孔間レーダによって坑壁近傍の不飽和領域を把握するためには、測定装置の改良が必要であると考えられる。

TDR法については、シリコン加圧充填型およびチューブ拡張密着型の2種類の設置方法について室内試験を実施した。今後さらに数種類の岩石試料への適用および検証が必要となる。原位置測定で比誘電率が過大に評価された原因も明らかにする必要がある。パッカー式プローブについては、現在明らかになっている問題点に対しその原因を明らかにし、どのような対策があるのかを検討する必要がある。

これまでの研究成果をうけて、平成11年度の実施内容として最も適すると思われる項目を以下に列挙する。

- 人工砂地盤において、レーダ、ADR、TDR、重量法での比誘電率（体積含水率）にばらつきが生じた原因の究明。例えば、

レーダ：波形読み取りに誤差などはないか、

ADR：キャリブレーションは正しくできているか、

TDR：キャリブレーションは正しくできているか、など。

- シリコン加圧充填型、チューブ拡張密着型などによる白浜砂岩、田下凝灰岩など、H9までに調査した9岩種のうち平成10年度に計測を実施しなかった試料についてさらに $K_a \sim \theta$ 関係を求め、手法の適用性の再確認。
- 原位置TDR測定で、比誘電率が過大評価された原因の究明（プローブ挿入により岩盤に亀裂が生じた可能性など）。
- 原位置により適すると考えられるパックプローブの原理、仕様、問題点の再検討。
- 原位置計測の継続とベンチレーション方法の検討。
- 岩石の誘電特性に関する最近の研究動向、文献調査（特に石油探査の分野）。

参考文献

- Annan, A. P., Time-domain-reflectometry - Air-gap problem for parallel wire transmission lines, report of activities, part B; Pap. 77-1B, pp. 59-62, Geol. Surv. Of Canada, Ottawa, 1977.
- Ferre, P. A., D. L. Rudolf, and R. G. Kachanoski, Spatial averaging of water content by time domain reflectometry : Implications for twin rod probes with and without dielectric coatings, Water Resour. Res., 32, 271-279, 1996.
- Hokett, S. L., J. B. Chapman, and C. E. Russell, Potential use of time domain reflectometry for measuring water content in rock, J. Hydrol., 138, 89-96, 1992.
- Knight, J. H., Sensitivity of time domain reflectometry measurement to lateral variations in soil water content, Water Resour. Res., 28, 2345-2352, 1992.
- Sakaki, T., K. Sugihara, T. Adachi, K. Nishida, and W.R. Lin, Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock, Water Resour. Res., 34, 2623-2631, 1998a.
- Sakaki, T., T. Kikuchi, T. Adachi, K. Nishida, and W.R. Lin, Comparison of accuracy and practicality of installation methods of time domain reflectometry probes for rock water content measurement, Proceedings of the 42nd Japan Geotechnical Symposium, 19-24, 1998b.