

①技術研究開発テーマ名	誘電率計測手法を用いた非破壊調査・試験方法による河川堤防の維持管理技術の開発に関する研究
-------------	--

②研究代表者

氏名	所属・役職
竹下祐二	岡山大学大学院環境生命科学研究科・教授

③共同研究者

氏名	所属・役職
小松 満	岡山大学大学院環境学研究科 准教授
斉藤秀樹	応用地質株式会社 技術本部技術研究所

④背景・課題

河川堤防の維持管理においては、河川堤防の地盤工学的特性を定量的に評価することが重要である。特に、河川堤防の耐洪水性能や降雨・河川水による浸透メカニズムを評価するためには、堤防の表層近傍の不飽和領域における浸透特性値を精度良く計測する必要があるが、対象領域が広域に及び、3次元的な調査や計測が必要とされる場合が多く、現在、河川堤防におけるこれらの調査方法は確立されていない。また、河川堤防の数値シミュレーションにおいては、解析領域、土層構成と地盤定数、初期条件、境界条件等の精度向上が重要な課題であり、河川堤防の管理上、フィールドスケールでの定量的な評価が可能な調査方法の開発が必要である。そのためには、河川堤防の構造をかく乱することなく、非破壊状態において、シンプルかつ迅速に広域の地盤工学的特性を計測・評価可能な現場調査方法の確立が望まれる。

⑤技術研究開発の目的

本研究では、地表型地中レーダ(GPR)を用いて、河川堤防表層部分の不飽和領域における地盤状態および浸透特性値の原位置非破壊評価方法の開発を試みる。さらに、電磁波を利用した最新の誘電率計測技術を用いて、簡便な原位置透水試験方法による飽和・不飽和浸透特性値の測定法を提案する。これらの実験・計測事実により、河川堤防の安全性照査に適用できる原位置調査・試験方法の確立と基準化に貢献することを目的とする。

⑥技術研究開発の内容・成果

1. 挿入型土中水分計を用いた原位置定水位透水試験方法

1.1 提案する原位置試験方法

提案する原位置透水試験を図-1.1 に示す。本試験装置は Reynolds と Elrick が開発した Guelph Pressure Infiltrometer¹⁾ (以後、GPI 法と記す) と、多深度で同時に土中水分量が計測可能な挿入型土中水分計を併用した透水試験である²⁾。図-1.1 に示すように、不飽和地盤に数 cm 程度貫入させた鋼製浸潤リング、浸潤リング内より定水位浸透を発生させ、浸透流量を計測するためのマリOTTサイフォン式給水装置、そして浸潤リング中央部分に設置した1本の挿入型土中水分計から構成されるシンプルな試験装置である。

挿入型土中水分計は市販されているプローブ直径 2.8cm、プローブ長 40cm のものを用いた。この土中水分計によれば、深さ方向 10cm 間隔に 4 つのセンサーを有し、同時に 4 計測深度での土中水分量を非定常状態にて測定し、鉛直方向の土中水分プロファイルを評価することが可能である。また、それらの非定常計

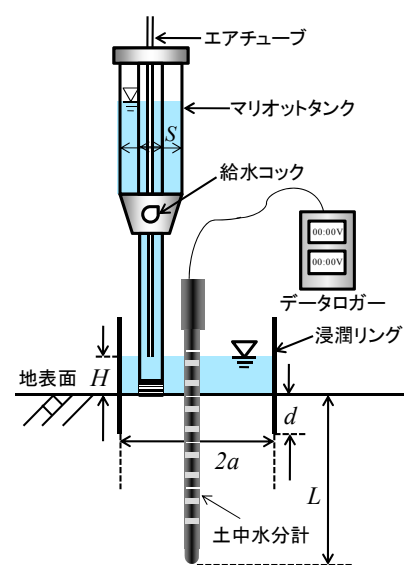


図-1.1 透水試験概念図

測データは、市販のデータロガーにより、図-1.2 に示すような試験中における土中水分量の連続的な記録が可能である。試験後は、数値シミュレーションを用いて、試験中に測定された土中水分量の非定常データを入力し、ヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性の関数モデルの算出を試みる。不飽和浸透特性モデルとして次式に示す van Genuchten³⁾のモデル(以後、VG モデルと記す)を用いた。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (1.1)$$

ここで、 S_e ：有効飽和度、 θ_s ：飽和体積含水率、 θ_r ：残留体積含水率、 k_s ：飽和浸透係数、 α 、 n ：土の種類・状態によって決定されるパラメータ、 $\alpha > 0$ 、 $n > 1$ 、 $m = 1 - 1/n$ である。

本透水試験装置の特徴としては、地盤に挿入設置すべき部品が少ないため、地盤を比較的乱さず、試験装置の設置が容易であること、定水位透水試験と排水試験を同一試験地点で連続的に実施可能であること、そして各構成部品が軽量かつコンパクトであり、可搬性に優れているので、一か所に限らず移動し、数か所で複数回試験できること、計測操作が非常にシンプルであるということが指摘できる。

1.2 透水試験装置

(1) 定水位透水試験装置 (GPI 法)

a) 概要

不飽和地盤における飽和透水係数の測定方法としては、定圧注水を行ない、その定常浸透流量を計測する定常試験方法が試験装置も単純であり、実施も容易と考えられる。本試験では、GPI 法を用いた。GPI 法は、地表面に挿入した単一の浸潤リング内に一定水頭を与え、その時に生じる定常浸潤量 Q_s から、飽和透水係数を測定する原位置透水試験法である。GPI 法により発生する浸潤領域は、浸潤過程で間隙中に取り込まれた封入空気のために完全な飽和状態ではなく、それに近い擬似飽和状態である。そのため、計測される透水係数は、field-saturated hydraulic conductivity K_{fs} (以後、現場飽和透水係数と記す) と呼ばれ、室内透水試験等によって測定される完全な飽和試料での飽和透水係数 K_{ts} (truly saturated hydraulic conductivity) と比較して、小さな値(80~90%)を算出することが指摘されている¹⁾

一般に、不飽和地盤において発生する飽和浸透流は帯水層での完全な飽和状態での浸透流ではなく、封入空気が存在する擬似飽和状態であると考えられ、不飽和地盤の浸透特性を評価する上では、この現場飽和透水係数を設計定数とすることが实际的であるとされている¹⁾。よって、本研究では不飽和地盤の飽和透水係数として GPI 法によって計測された現場飽和透水係数を採用する。

b) 現場飽和透水係数の算出方法

i) 一段階水頭法試験

一段階水頭法試験では、定水位を一段階のみで透水試験を行い、それに対応した定常流量を一つ測定すれば現場飽和透水係数を算出できるので、迅速性と容易さに優れており、短時間で多地点の計測を行えるという利点がある。しかし、現場飽和透水係数を算出する際には、土壌の組織や構造によって決まるパラメータである α^* の感度が大きいため、試験前の時点で α^* を不適切に選定すると、算出した透水係数が真値と大きく異なってしまうという短所がある。GPI 法によれば、現場飽和透水係数 K_{fs} は次式によって求めることが出来る。

$$K_{fs} = \frac{\alpha^* G Q_s}{a \alpha^* H + a + G \alpha^* \pi a^2} \quad (1.2)$$

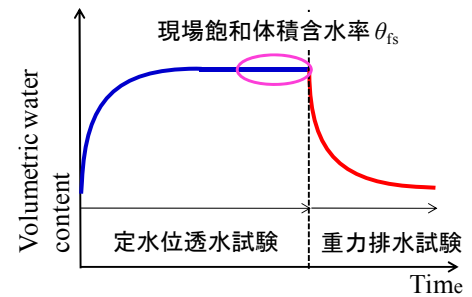


図-1.2 土中水分量の非定常計測データ

$$G = 0.316 \cdot \frac{d}{a} + 0.184 \quad (1.3)$$

ここで、 Q_s ：定常注水流量(cm^3/s)、 H ：浸潤リング内に発生させた定水位(cm)、 a ：浸潤リングの半径(cm)、 d ：浸潤リングの挿入深さ(cm)である。 α^* は、土壌の組織や構造によって決まるパラメータで、Reynolds らの土質分類⁴⁾によって、 $\alpha^*=0.01\sim0.36(1/\text{cm})$ の値が奨励されている。また、 G は無次元パラメータであり、土の不飽和水分特性からも地表面に作用する定水頭の大きさからも独立し、純粋に浸潤リングの幾何構造 d/a に依存する形状係数である。

ii) 二段階水頭法試験

二段階水頭法試験では、一段階目の定水位 H_1 で定常流量 Q_1 を測定したのち、連続して水位を H_2 に引き上げて、その水位での定常流量 Q_2 を続けて測定する。これらの測定値をもとに、現場飽和透水係数 K_{fs} を次式によって求めることができる。

$$K_{fs} = \frac{G}{a} \cdot \frac{Q_2 - Q_1}{H_2 - H_1} \quad (1.4)$$

式(1.4)に示すように、二段階水頭法試験では α^* を用いずに現場飽和透水係数を算出できる。さらに、算出した現場飽和透水係数から式(1.2)より、一段階水頭法で用いる α^* を算出することができる。しかし、この方法は地盤中の空隙や石などの不均質性に影響を受けやすく、算出する α^* が非現実的になってしまう短所が報告⁵⁾されている。また、試験に適した水位差、条件、注意点などは未解明な部分が多いことが現状である。

(2) 土中水分量プロファイルの計測

本試験で用いた土中水分計は Delta-T Devices 社製 Profile Probe PR1/4 と PR2/4 (以後 PR1, PR2 と記す) である。計測時は専用のグラスファイバー製のアクセスパイプに挿入し計測する。土中水分計の1計測点あたりの測定領域は、プローブの半径方向に 6cm 程度、深度方向に 10cm 程度であると報告⁶⁾されており、この体積部分の平均的な土中水分量が計測される。本土中水分計の計測点は、深さ方向 10cm 間隔に 4 点あることから、各計測点における体積含水率の計測値に深度方向の測定領域 10cm を掛け合わせるにより、土中水分計を中心に半径 6cm、深度 40cm の円柱領域における鉛直方向の土中水分プロファイルの非定常挙動が連続的に計測できる。また、計測においてデータロガーにより電圧値を測定する。計測された電圧値は Delta-T Devices 社の校正式より、PR1 では式(1.5)を、PR2 では式(1.6)を用いて体積含水率 θ へ変換した。式中の a_0 、 a_1 は地盤の種類によって決定されるパラメータであり、本研究では、Mineral soils における推奨値である $a_0=1.6$ 、 $a_1=8.4$ を用いた。

$$\theta = \frac{(0.9 + 4.2V + 65.6V^2 - 272.7V^3 + 4.02.9V^4) - a_0}{a_1} \quad (1.5)$$

$$\theta = \frac{1.1 - 5.5V + 67.2V^2 - 234.4V^3 + 413.6V^4 - 356.7V^5 + 121.5V^6}{a_1} - \frac{a_0}{a_1} \quad (1.6)$$

1.3 逆解析手法を用いた不飽和浸透特性値の算出方法

本研究で提案している原位置透水試験方法から不飽和浸透パラメータを原位置で迅速、かつ簡便に測定する方法として、定水位透水試験、排水試験で計測される土中水分量の非定常データを利用する。ここではその水分データを非線形最小二乗法により、VG モデルで同定する逆解析手法を適用し、浸潤・排水過程の水分特性曲線に生ずるヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値を算出する方法を提案する。

不飽和浸透パラメータの逆解析手法としては、原位置透水試験によって計測された不飽和浸透挙

動を数値解析による浸透流解析によってシミュレートし、その浸透挙動をもっとも良好に表現できる不飽和浸透パラメータの関数モデルを同定する方法を用いた。不飽和浸透パラメータの関数モデルは VG モデルを用いる。VG モデルは 5 つの独立した未知パラメータ ($k_s, \alpha, n, \theta_r, \theta_s$) によって構成されている。未知パラメータの推定に際しては、原位置透水試験時に計測される体積含水率 θ の非定常データを目的関数として採用し、次式で示される重み付き残差平方和 $OF(b)$ を最小にする未知パラメータ b を見出す手法を用いる。本研究では n と α を未知パラメータとして算出を試みている。

$$OF(b) = \sum_{j=1}^N \left[w_j \{ \theta_m(t_j) - \theta_c(t_j, b) \} \right]^2 \quad (1.7)$$

ここで、 w は重みであり、添え字 m, c はそれぞれ計測データと浸透流解析によって得られた解析値を表わす。また、 N は計測データ数であり、 t は計測時間である。本研究では、各計測時間における計測データについてはすべて同程度の誤差を含むと考えて、各計測データの重みは $w=1.0$ とした。浸透流解析手法による逆解析ツールとして、市販の有限要素法による飽和・不飽和浸透流解析ソフトウェア HYDRUS-2D⁷⁾を用いた。

2 地表型地中レーダを用いた地盤状態の原位置非破壊評価方法

2.1 地中レーダの特徴

不飽和土の力学特性は土中に含まれる水分量に大きく依存している。そのため、河川災害や自然斜面・盛り土における危険度評価、地盤の降雨浸透問題などの地盤や土壌に関する環境問題や自然災害の解決には、土壌中の不飽和水分動態を定量的かつ迅速に計測することが必要となってくる。近年、原位置における地盤の水分量計測方法として TDR (Time Domain Reflectometry) や ADR (Amplitude Domain Reflectometry) といった、挿入型のセンサーを用いた方法が注目されている。これは直径 2~3mm 程度の複数本のロッドを地盤内に挿入し、その挿入部分の土の誘電率計測値から土壌水分量を算定する方法である。この方法はセンサープローブ周辺の値を計測するものなので、局所的な計測には適しているが、広域における地盤の水分計測に応用することは難しい。その他には比抵抗法や中性子・ガンマー線法による計測もなされているが、比抵抗法では精度の低さ、中性子・ガンマー線法では放射線管理の問題など、最善の方法が確立されていない。

不飽和地盤において非破壊かつ迅速に不飽和水分動態を原位置計測する方法として、本研究では地中レーダ (Ground Penetrating Radar : 以後 GPR と表記する) 計測の適用性と妥当性について評価を行う。GPR はアンテナから発信した電磁波が地中物体から反射してくることを利用して、深度数 m 程度の浅層地盤の調査に用いられてきた。土壌内を乱さずに非破壊で地盤情報を得ることに極めて有用である。しかし、その利用法は埋設物や空洞の探査といった目的が多く、地盤の物性調査への適用法は確立されていない。そこで GPR の長所である非破壊、簡便、迅速を生かした地盤の物性調査の確立が強く望まれている。

2.2 地中レーダの計測手法⁸⁾

GPR 測定は送信アンテナから送信された電磁波が地盤内を伝播し、媒質の誘電率が異なる箇所では反射し、受信アンテナに戻るまでの時間 (往復走時) を計測し、その結果から地盤内の画像化や地盤内を伝わる電磁波の電波速度を計測する方法である。地盤を構成する要素は主として、土粒子・空気・水である。これらの主成分の比誘電率はそれぞれ土粒子 2.5~5、空気 1、水 81 という値をとる。水の比誘電率は土粒子や空気と比べて極めて大きいことから、地盤における比誘電率の変動を最も支配するのは含水量であることがわかる。つまり、GPR で地盤内の比誘電率の変化を計測することによって、地盤内の水分量の変化を計測することが可能である。

(1) プロファイル測定

プロファイル測定は、送信アンテナと受信アンテナの間隔 X を一定に保った状態で地表面上を測線に沿ってほぼ一定の速さで移動させながら測定する方法である。この測定により得られるデータ

は、横軸が水平距離、縦軸が往復走時（Two way travel time）で表される。往復走時 T は電磁波伝播速度により深度 D に換算することができるので、測線下の地下の断面に類したデータ（反射断面記録）となる。

送・受信アンテナ間隔を X (m)，地中における電磁波伝播速度を V (m/ns)，往復走時を T (ns) とすると、三平方の定理より、式 (2.1) が成り立つ。式 (2.1) を展開した式 (2.2) を用いて、反射面までの距離 D を求めることが出来る。

$$\left(\frac{X}{2}\right)^2 + D^2 = \left(\frac{TV}{2}\right)^2 \quad (2.1)$$

ここに、 D ：深度 (m)， T ：往復走時 (ns)， V ：地盤中における電磁波伝播速度 (m/ns)， X ：アンテナ間隔 (m)

$$D = \frac{\sqrt{(TV)^2 - X^2}}{2} \quad (2.2)$$

(2) ワイドアングル測定

ワイドアングル測定（以後 CMP 測定と記す）は、地盤中の電磁波伝播速度を測定する方法である。地表中の一点（Common Mid Point）を中心に送・受信アンテナ間隔を等間隔に徐々に反対方向に移動させながら測定をする。電磁波伝播速度の算定には、式 (2.1) を展開して導いた式 (2.3) を用いる。

$$V = \frac{\sqrt{X^2 + 4D^2}}{T} \quad (2.3)$$

ここに、 V ：地盤中における電磁波伝播速度 (m/ns)， D ：反射面までの深度 (m)

これらの式により、 X^2 - T^2 平面状では、 $1/V^2$ を傾きとした 1 次式で表されるので、データから読み取った T, X を X^2 - T^2 平面状にプロットし、直線近似によりその傾き m を求めることにより、式 (2.4) から反射面までの電磁波伝播速度 V を求めることができる。

$$V = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (2.4)$$

また、式 (2.3) より、 X^2 - T^2 平面の切片の値 T から反射面の深度 D を求めることができる。

$$D = \frac{TV}{2} \quad (2.5)$$

(3) 3次元プロファイル測定

3 次元プロファイル測定は地盤内を 3 次元的に計測する方法である。計測手法としては一定間隔で複数本のプロファイル測定を行ない ($X_0, X_1 \dots X_n$)，それに直行するように複数本のプロファイル測定 ($Y_0, Y_1 \dots Y_n$) を行なうと、3 次元表示されたプロファイル測定画像が計測される。3 次元的に地盤を計測することで、通常のプロファイル測定より層構造の違いや埋設物の大きさを推定しやすくなるという利点がある。

3. 高梁川河川堤防における原位置試験

3.1 原位置透水試験

(1) 透水試験概要

岡山県西部を流れる高梁川左岸の河口から20km600mの河川堤防(写真-3.1)において提案する原位置透水試験を実施し、現場飽和透水係数及び不飽和浸透特性値の算出を試みた。観測点は堤外側に図-3.1に示すように、20km600mの標識を基準にA～Dとし、A～Cでは2段階水頭法による現場飽和透水係数及び α^* の算定を行った。また、観測点Dでは不飽和浸透特性値の算出を目的として土中水分計を挿入した一段階水頭法を行った。データ計測時間について、二段階水頭法試験では一段階目の浸潤で定常流量を計測するまで浸潤させた後、連続して定水位を5cm上げ、二段階目の定常流量を測定するまで浸潤を行っ



写真-3.1 原位置試験場所（高梁川河川堤防）

た。土中水分計を挿入した一段階水頭法試験では定常流量を計測し、さらに土中水分計の計測値から表層の土中水分量が現場飽和状態になっていることを確認するまで浸潤させた後、蒸発を避けるためにリング内をビニールシートで覆い、連続して排水試験を行った。

現場透水係数の算定に用いるリング挿入深さは図-3.2に示すように斜面に対して d_1 、 d_2 の平均値を採用し、定水位 H はリング内での水位の平均値を採用した。実験で用いたリングは観測点A～Cでは半径 a は5.5cm、観測点Dでは6.7cmのものを用了。

(2) 原位置透水試験結果

a) 二段階水頭法試験

試験結果を表-3.1に示す。表-3.1の観測点B、Cで二段階水頭法を2回行った結果から算出された現場飽和透水係数は、1回目より2回目の方が低い値が得られた。またA～Cのそれぞれ算出された現場飽和透水係数には大きな差異はなく、2段階水頭法による現場飽和透水係数の算出は良好に行えたのではないかと考えられる。しかしながら、各観測点で2段階水頭法により算出された α^* には非現実的な値もあり、今回の試験による対象地盤の α^* の推定は難しいと考えられる。この原因としては、試験地盤は写真-3.1で示すように植生を有しており、それらの不均質性が影響したことと、図-3.2に示すようにリングの挿入深さが非対称であるため形状係数 G に影響を与えていることが考えられる。観測点Cに関しては、比較的現実的な α^* が算出できており、これらは d_1 、 d_2 の値に他の観測点に比べ大きな差がないためだと考えられる。そして、一段階水頭法では観測点Cで算出された α^* を用いて現場飽和透水係数の算出および不飽和浸透特性値の推定を行った。

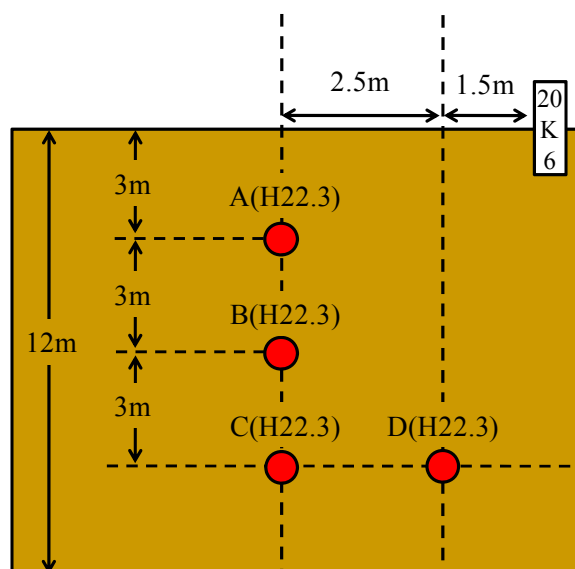


図-3.1 観測点の設置

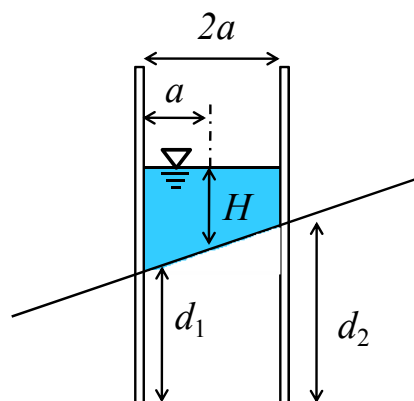


図-3.2 リングおよび定水位の設定方法

表-3.1 透水試験結果

Site	$H(\text{cm})$	$d_1(\text{cm})$	$d_2(\text{cm})$	2段階水頭法						1段階水頭法	
				1回目			2回目			$Q_{fs}(\text{cm}^3/\text{s})$ $k_{fs}(\text{cm/s})^i)$	
				$Q_{fs}(\text{cm}^3/\text{s})$	$k_{fs}(\text{cm/s})$	$\alpha^*(\text{cm}^{-1})$	$Q_{fs}(\text{cm}^3/\text{s})$	$k_{fs}(\text{cm/s})$	$\alpha^*(\text{cm}^{-1})$		
A	3	3.8	9.3	0.294	2.24E-03	1.467					
	8			0.404							
B	3	3.3	6.8	0.176	2.03E-03	-0.268	0.073	5.17E-04	1.027		
	8			0.294			0.103				
C	3	3.3	4.5	1.468	2.14E-03	0.015	0.294	1.33E-03	0.088		
	8			1.561			0.352				
D	5	3	7.5							0.528	1.20E-03

b) 一段階水頭法試験

表-3.1の観測点Dで算出された現場飽和透水係数は、A~Cで算出された値と有意な差はなく、一段階水頭法による現場飽和透水係数の算出は良好に行えたのではないかと考えられる。

c) 不飽和浸透特性値の推定

観測点Dで測定した土中水分量の経時変化を図-3.3に示す。図-3.3の土中水分量の計測データを用いて、上述した数値解析手法により不飽和浸透特性値の推定を試みた。数値解析で用いた解析モデルを図-3.4に示す。Lは各計測深度の7cmまたは17cmを入力した。この解析領域を浸透流解析ソフトウェアに付属の要素網作成ツールを用いて節点数945、要素数1769の三角形要素に分割した。表層部分近傍での最小メッシュサイズは約1cmである。また、初期体積含水率は土中水分計で測定した深度では実測値を入力し、それより深い深度ではシミュレーションに影響を及ぼさないよう、計算簡略化のために一定とした。そして、浸潤過程で土中水分量の計測データに対してフィッティングを行った結果を図-3.5に、算定された水分特性曲線を図-3.6に示す。シミュレーションでは各深度での土中水分量の増加開始時の挙動を十分にシミュレートできていない。これは試験地盤を均質な地盤とみなしたシミュレーション結果であり、実際の試験地は写真-3.1より植生を有している地盤であるため、植物根などの不均質性がシミュレーション結果に影響しているのではないかと考えられる。そして、土中水分量増加開始時の非定常データは不飽和浸透特性値への影響が大きいと考えられるため、算定された水分特性曲線の信頼性はあまり高くはないと考えられる。したがって、今後不飽和浸透特性値の推定を精度よく行うためには不均質性を考慮した数値解析を行う必要があると考えられる。

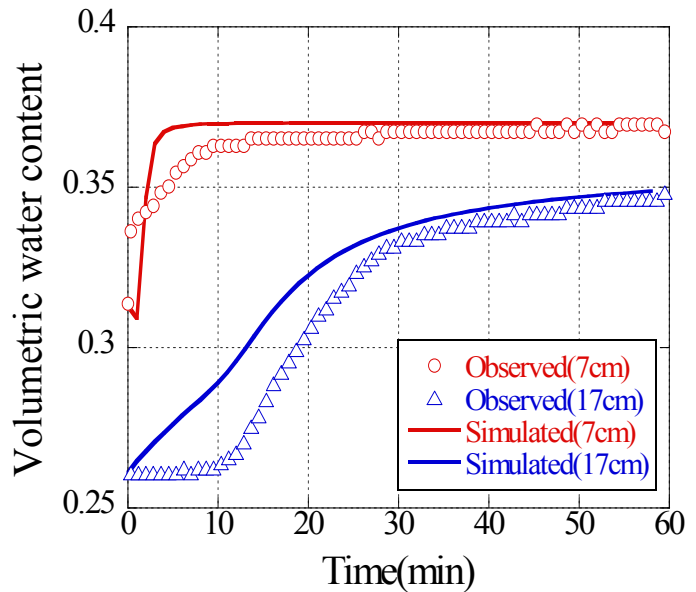


図-3.3 計測された土中水分量の経時変化

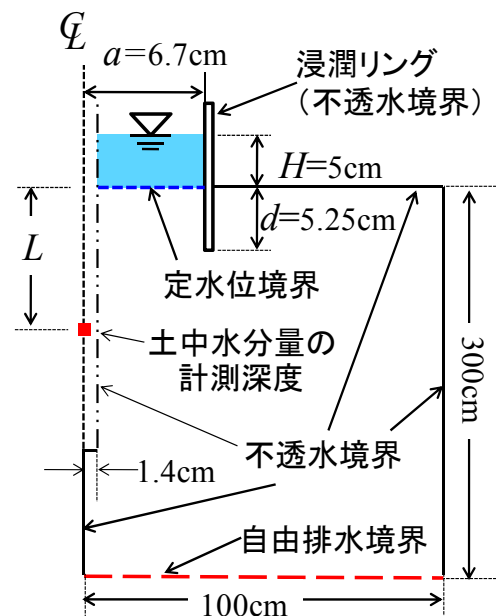


図-3.4 数値解析モデル

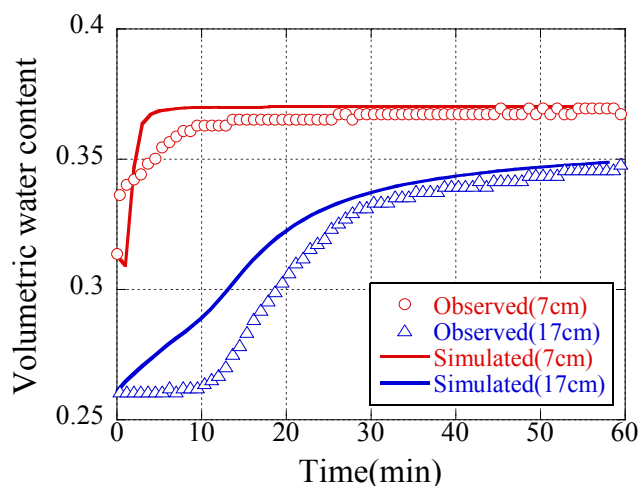


図-3.5 土中水分量の解析値と実測値

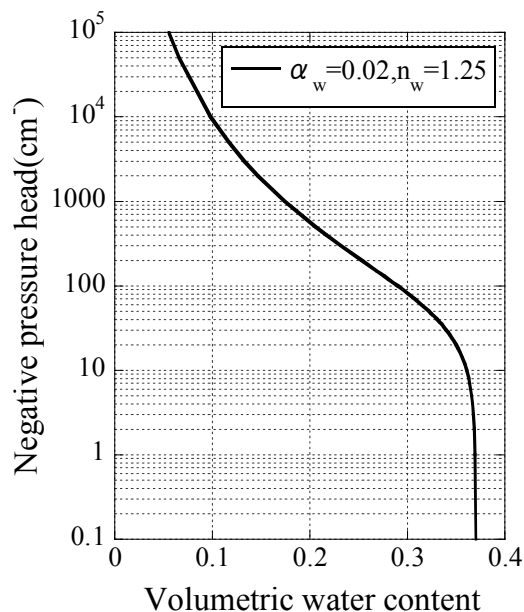


図-3.6 算定された水分特性曲線

3.2 地中レーダによる河川堤防調査

(1) GPR 計測概要

岡山県高梁川河川堤防 20k600m 地点において、地中レーダの3次元プロファイル測定とCMP計測を実施した。実施日は2010年11月30日(火)である。河川堤防の天端部分に3m×10mの計測サイトを2箇所設定して、3次元プロファイル測定を実施した。それらの状況を、図-3.7に示す。また、表-3.2に計測条件を示す。3D-1 サイトは、サイト中央下部に取水パイプが設置されている。

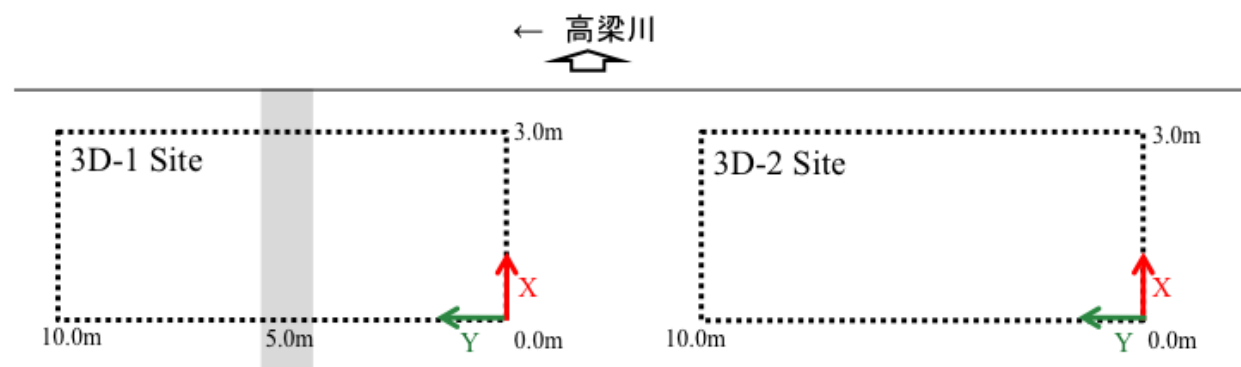


図-3.7 3次元プロファイル計測サイト

表-3.2 3次元プロファイル測定条件

ファイル名	種類	周波数	レンジ	ピッチ	測線	備考
3D-1	3D Profile	400MHz	70ns	0.25m	3m*10m	パイプあり
3D-2						

CMP 計測の測定条件を示す。CMP は 3D-2 サイトにおいて、図-3.8 のように測線を 3 本設定して実施した。各測線において、2 回ずつ、すべて同条件で計測を行った。

表-3.3 CMP 測定条件

ファイル名	周波数	レンジ	ピッチ	測線	備考
CMP-1	400MHz	50ns	0.1m	4m	Line①
CMP-2	400MHz	50ns	0.1m	4m	Line①
CMP-3	400MHz	50ns	0.1m	4m	Line②
CMP-4	400MHz	50ns	0.1m	4m	Line②
CMP-5	400MHz	50ns	0.1m	4m	Line③
CMP-6	400MHz	50ns	0.1m	4m	Line③

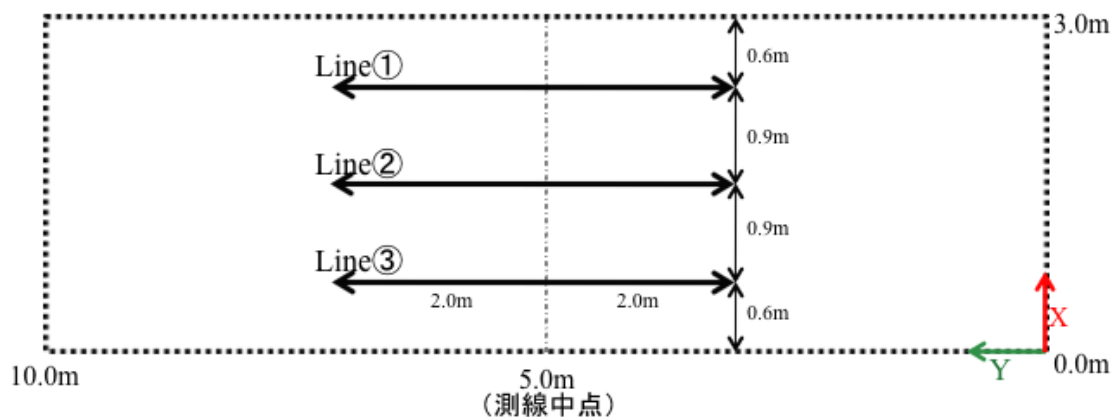


図-3.8 CMP 測線図

(2) CMP 計測結果

CMP 測定の結果として、CMP-2 と CMP-4 の結果をそれぞれ表-3.4 と表-3.5 に示す。ここで、Topp の式を用いて電磁波伝播速度より体積含水率に換算した。それらを図-3.9 と図-3.10 に示す。

表-3.4 CMP 測定結果 (CMP-2)

	V(m/ns)	D(m)	ϵ_r	θ
反射面1	0.091	0.486	10.806	0.202
反射面1-2	0.092	0.759	10.557	0.197
反射面2-3	0.103	0.901	8.477	0.156
反射面3-4	0.122	1.148	6.053	0.103
反射面4-5	0.111	1.411	7.278	0.131
反射面5-6	0.102	1.592	8.580	0.158

表-3.5 CMP 測定結果(CMP-4)

	V(m/ns)	D(m)	ϵ_r	θ
反射面1	0.095	0.503	9.929	0.185
反射面1-2	0.098	0.746	9.462	0.176
反射面2-3	0.101	0.911	8.838	0.163
反射面3-4	0.118	1.252	6.475	0.113
反射面4-5	0.116	1.629	6.641	0.117

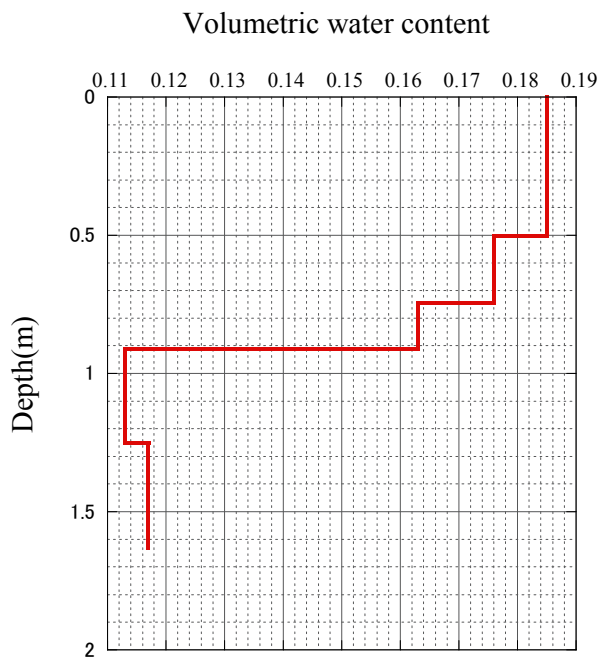


図-3.9 体積含水率分布(CMP-2)

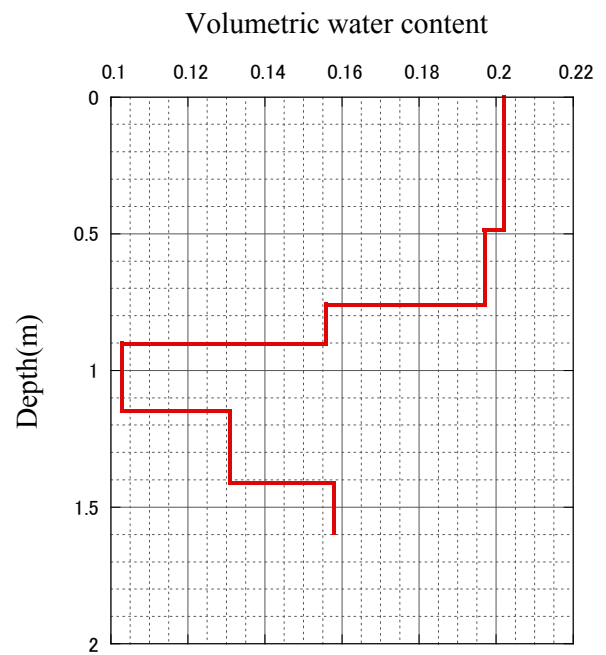


図-3.10 体積含水率分布(CMP-4)

(3) 3次元プロファイル計測結果

3D プロファイル画像として、サイト 3D-1 の状況を図-3.11 に示す。深度換算には CMP-2 の反射面 1 の $\epsilon_r=9.929$ を用いた。Y 方向 5m 付近を見ると、堤防のアスファルト部分が反応していることがわかる。表層部から地下 5m ほどに取水パイプがあるようです。この 3D 計測ではパイプ位置を捉えてはおらず、地面とアスファルトの違いを捉えているものと考えられる。また、サイト 3D-2 の状況を図-3.12 に示す。深度換算には 3D-1 と同様に $\epsilon_r=9.929$ を用いた。3D -1 と 3D-2 共通して、深度 0.9m あたりを境に全体の色合い（電磁波の振幅の大きさ）が違っていることが見受けられる。前述の CMP 測定の結果より、体積含水率が大きく変化する深度も 0.9m 付近と考えられたため、ここが一つの大きな層境界であると考えられる。

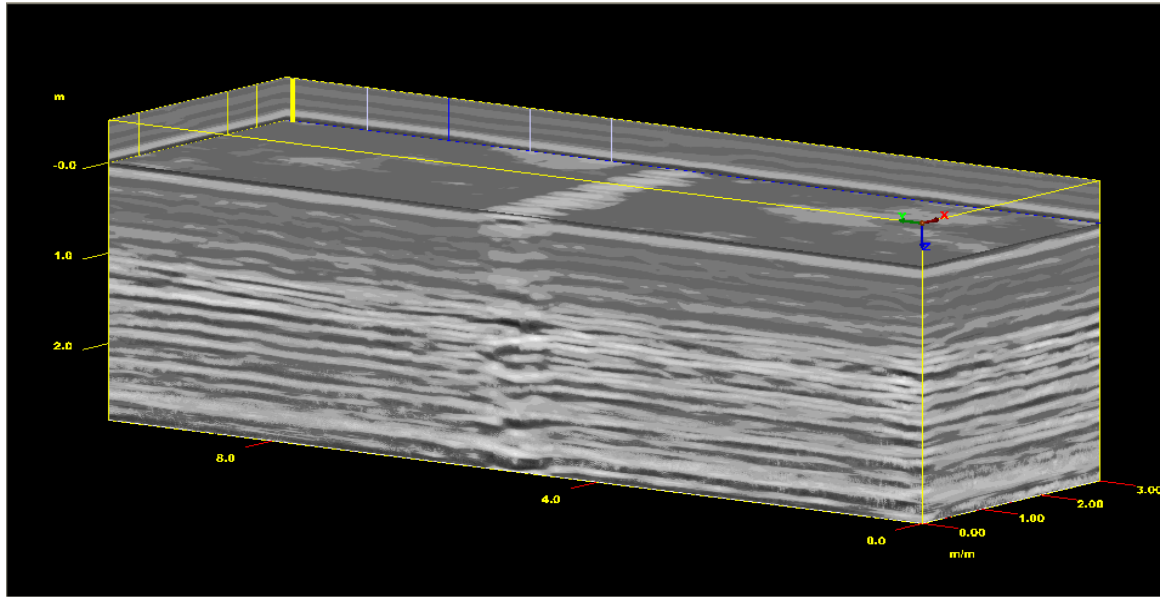


図-3.11 3次元プロファイル画像(サイト 3D-1)

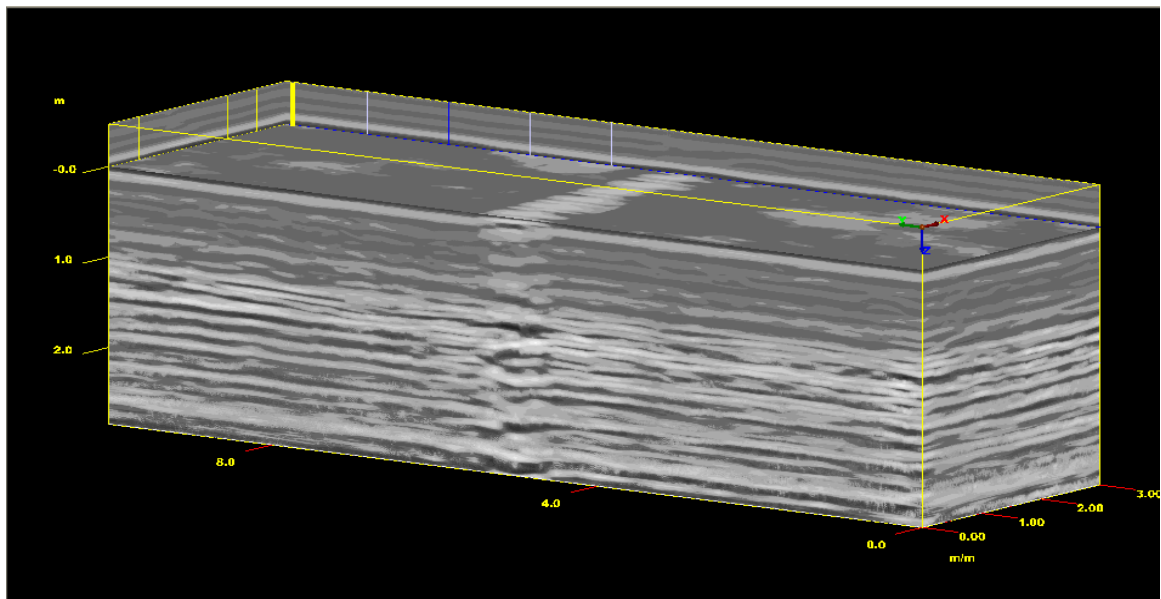


図-3.12 3次元プロファイル画像(サイト 3D-2)

4. 地中レーダを用いた不飽和地盤における原位置透水試験

4.1 原位置透水試験の概要

地表型地中レーダ(GPR)を用いて、河川堤防表層部分の不飽和領域における地盤状態および浸透特性値の原位置非破壊評価方法を開発することを目的として、不飽和砂質土地盤に一定流量の浸潤を行って不飽和浸透流を発生させ、浸潤前線の非定常挙動を GPR によって地表面から非破壊状態で計測する透水試験方法を提案した。GPR による測定データの妥当性は数値シミュレーションおよび均質な砂丘砂地盤において原位置浸透実験を実施した結果によって検討した。

原位置透水試験は鳥取大学乾燥地研究センターの実験温室内に設けられた自然乾燥状態にある砂丘砂地盤において実施した。透水試験では、一定流量の浸潤による不飽和浸透流を発生させ、浸潤前線の非定常挙動を GPR により地表面から非破壊状態で計測を行った。GPR 計測では同一測線

上において、アンテナを一定時間毎に移動させて測線直下の断面の反射挙動を計測するプロファイル測定とアンテナを定点に固定し、その定点直下の反射挙動の経時変化を連続的に計測するトランジェント測定との2種類の計測を実施した。

4.2 定流量透水試験

(1) 試験装置および計測方法

図-3.13 に透水試験の装置概要を示す。GPR プロファイル計測測線長は 2m であり、それと直交するように多孔質フレキシブルパイプ(長さ 180cm,直径 2cm のユニホース分散器)を 15cm 間隔で 4 本設置した定流量浸潤装置を表層 3cm 程に水平に埋設する。用いたアンテナ周波数 400MHz である。また、挿入型土中水分計(挿入長 40cm)を用い、体積含水率の経時変化を 5 秒毎に計測した。試験時間は注水を 120 分間行い、注水停止後引き続き排水試験を 60 分間行う。GPR プロファイル測定では、アンテナを入れたそりを測線上に設置した木製のレール上を移動させることで、再現性のある計測を実施した。

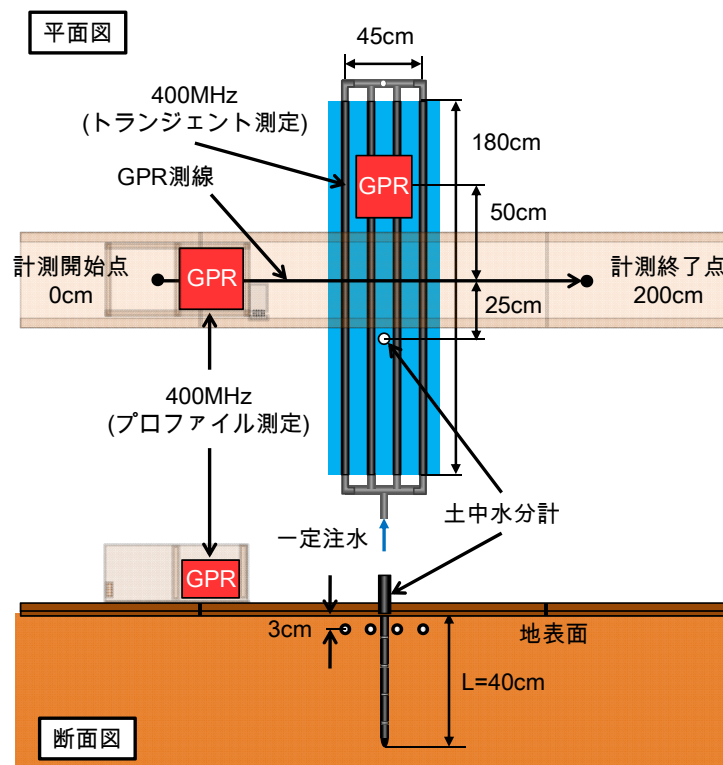
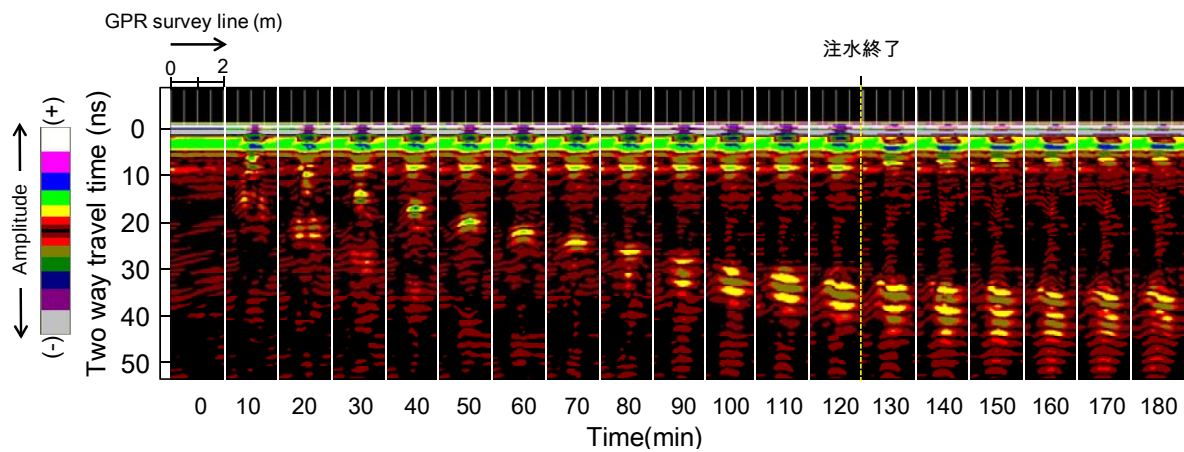


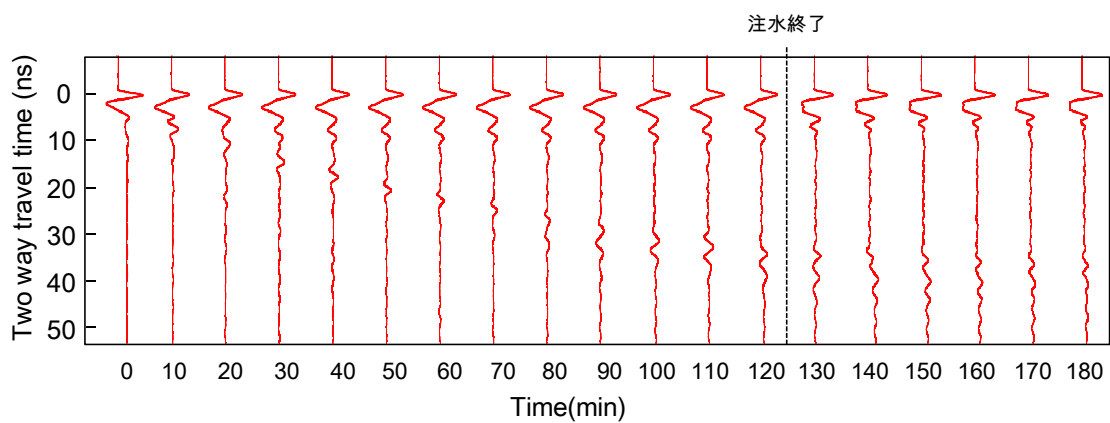
図-3.13 GPR を用いた定流量浸透試験

(2) 計測結果

GPR プロファイル測定より得られた地盤内の2次元断面画像を図-3.14(a)、注水領域中央部の電磁波反射波形を図-3.14(b)に10分毎で表示した。各計測時における反射波のピーク位置は単調に降下しており、その降下傾向は注水を終了した120分以降で緩くなるため、この反射は浸潤前線位置を捉えたものと考えられる。また、トランジェント測定より得られた計測画像データを図-3.15に示す。注水終了の前後において、反射波の降下傾向の違いが見られた。したがって、プロファイル測定、トランジェント測定のどちらにおいても、乾燥状態の砂丘砂地盤において地盤内の不飽和浸透挙動を定性的に計測することができていると考えられる。



(a) 2次元断面画像



(b) 電磁波反射波形

図-3.14 GPR プロファイル測定画像

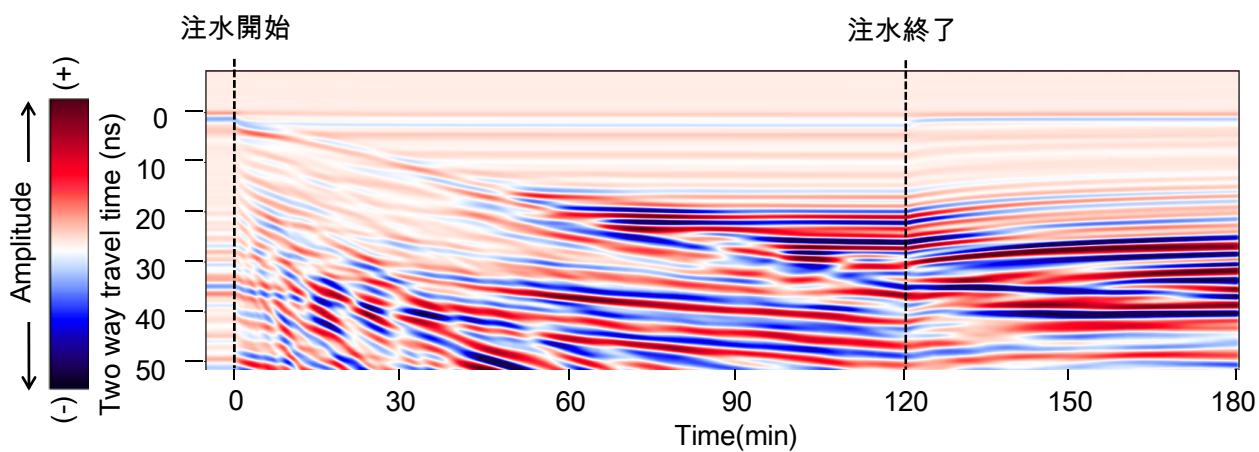


図-3.15 GPR トランジェント測定画像

4.3 地中レーダを用いた浸潤前線位置の算定

(1) 電磁波反射波形の Peak の読み取り

今回の試験において往復走時の定量的評価を行うために電磁波反射波形より浸潤前線位置をとらえたと考えられる反射 Peak の読み取りをプロファイル測定、トランジェント測定ともに注水開始から排水終了まで5分毎に行った。

プロファイル測定では、計測時間毎に電磁波反射波形を抽出し、浸潤前線位置の算定を行う。電磁波反射波形のはじめに現れる正の明確な Peak を地表面で起こった反射(地表波)として地表波の位置を往復走時 0ns と設定した。断面画像から注水試験中は浸潤前線位置が重力浸透によりほぼ一定速度で下方に移動している反射波形の Peak を探し、浸潤前線位置を予測する。トランジェント測定においても同様に、測定から得られる電磁波反射の経時変化から電磁波反射波形を抽出し、浸潤前線位置の算定を行う。定点直下における電磁波反射の経時変化より往復走時の 0 付近から下方に移動している+の振幅を探し、浸潤前線位置を予測する。定点直下における電磁波反射の経時変化から注水開始から排水終了まで5分毎に電磁波反射波形を抽出し、反射波形のうち正の Peak を浸潤前線位置として往復走時(ns)を読み取る。

(2) 往復走時の深度換算

測定結果から求めた浸潤前線位置を往復走時から深度へ換算するためには電磁波伝播速度を算定する必要がある。電磁波伝播速度算定に使用する比誘電率の値は、原位置透水試験の注水領域内に設置した土中水分計から得られた値を用いる。

図-3.16 に原位置透水試験の土中水分計から得られた比誘電率経時変化を示す。注水開始後30分以降では、土中水分計のすべての深度が反応している。更に60分から注水終了の120分までは定常状態に到達している。非定常時における比誘電率の上昇を加味することが困難であったため定常状態になった各チャンネルの平均値を本試験における深度換算に用いる比誘電率とした。したがって、60分から120分の土中水分計の比誘電率の値を平均し、地盤の湿潤状態の比誘電率とした。それにより、電磁波伝播速度換算に使用する比誘電率として16.57を算定した。算定した比誘電率より、電磁波伝播速度を0.074m/nsと算出した。この電磁波伝播速度を用いて、浸潤前線位置を往復走時から次式により深度へと換算する。図-3.17に深度の経過時間毎の深度の浸潤前線位置を示す。浸潤前線位置はどちらもトランジェント測定の方がプロファイル測定より全体として少ない往復走時をとるが、概ね近い傾向で推移している。

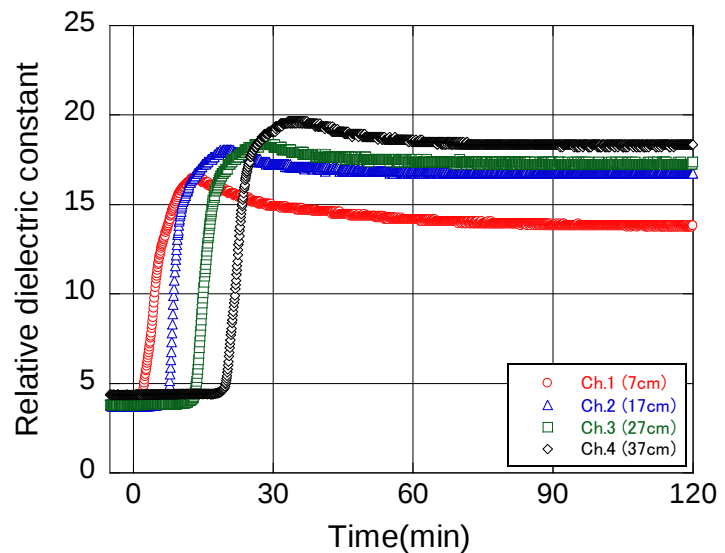


図-3.16 比誘電率の経時変化

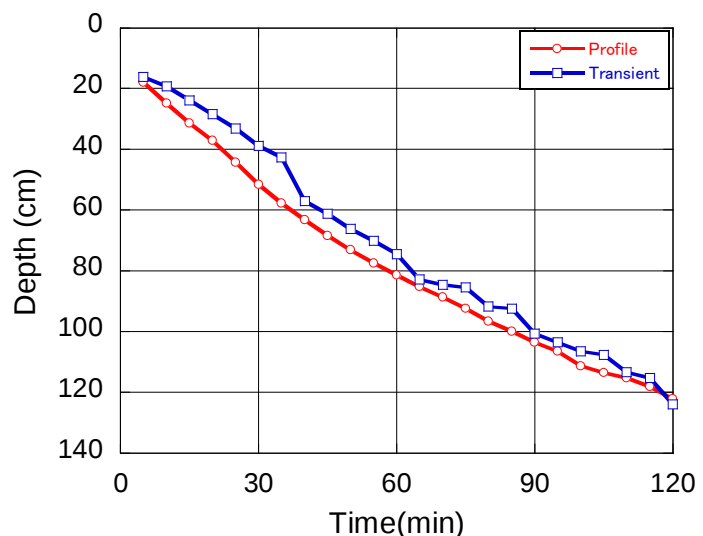


図-3.17 浸潤前線位置（深度）の経時変化

5. まとめ

本研究で得られた成果を以下にまとめる。

(1) 平成 21 年度は、国土交通省岡山河川事務所によって実施された河川堤防詳細点検業務データに基づいて現地視察を行い、本研究の実施場所として、高梁川左岸 20k600m 地点を選定した。試験対象地点において原位置透水試験および挿入型土中水分センサーを用いた土中水分量の原位置測定を実施して、堤防表層近傍における現場飽和透水係数の算出と保水性の調査を行った。

(2) 平成 22 年度は、国土交通省岡山河川事務所によって実施された河川堤防詳細点検業務データに基づいて選定された高梁川左岸 20k600m 地点において、GPR プロファイル測定による非破壊探査を実施し、河川堤防浅層領域の 3 次元可視化を行った。また、自然降雨や人工散水によって堤防表面から発生した不飽和浸透挙動を GPR でトレースし、堤防浅層領域の飽和・不飽和浸透特性値を簡便かつフィールドスケールにて計測評価する方法を開発するための基礎的な検討資料を得るために、均質な不飽和砂地盤における散水試験データを用いて、浸潤前線位置の非定常挙動計測における GPR プロファイル測定の適用可能性を吟味した。

(3) 平成23年度は、本研究で試作された原位置調査・試験システムを使用して、河川堤防において原位置試験の実施を目的とした予備実験を実施した。自然乾燥状態にある均質な砂地盤に一定流量の浸潤を行って地盤内に不飽和浸透流を発生させ、浸潤前線の非定常挙動をGPRによって地表面から非破壊状態で計測する透水試験方法を提案した。GPRによる測定データの妥当性は数値シミュレーションおよび均質な砂丘砂地盤において原位置浸透実験を実施した結果によって検討した。その結果、GPRより計測された電磁波反射波形を数値シミュレーションで再現することにより、逆解析的に不飽和浅層地盤の浸透特性値を推定できる可能性を有していることを示した。

【参考文献】

- 1) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E.: Ponded infiltration from a single ring: I. Analysis of steady flow, Soil Science Society of America journal, 54, pp.1233-1241, 1990.
- 2) 竹下祐二・森井俊広：土中水分計測データを用いた簡便な原位置試験方法による不飽和砂質土地盤の飽和・不飽和透水係数の測定，土木学会論文集 62, pp.831-839, 2006.
- 3) van Genuchten, M.Th : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal, 44, pp.892-898, 1980.
- 4) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説，pp.413-420, 2004.
- 5) 森井俊広・井上光弘，竹下祐二：プレッシャーインフィルトロメータ法の測定理論に関する実験および数値計算による検討，農業土木学会論文集，206, pp.19-27, 2000.
- 6) 井上光弘：プロファイルプローブによる土壌水分測定とその応用，第 57 回農業土木学会中国四国支部講演要旨，pp.113-114, 2002.
- 7) Rassam, D., Simunek, J. and van Genuchten M. Th. : Modeling Variably Saturated Flow With HYDRUS-2D, International Ground-water Modeling Center, 2003.
- 8) 物理探査学会：第 7 章「地中レーダー」，物理探査ハンドブック，pp.417-419, 1998.

⑦今後の課題・展望（本技術研究開発で得られた成果を踏まえ、成果のさらなる発展や河川行政への活用に向けた、今後の課題・展望等を具体的に記載ください）

河川堤防の維持管理においては、河川特性（セグメント区分、堤防の比高、堤体・基礎地盤の土質条件、洪水継続時間等）が浸透に対する安全性に与える影響を比較分析し、今後の浸透対策を効率的・効果的に行うための方法を検討することが重要である。浸透に対する河川堤防の安全性の検討手法として、数値シミュレーションが多用されているが、河川堤防のモデリングにおいては、解析領域、土層構成と地盤定数、初期条件、境界条件等の精度向上が重要な課題であり、河川堤防の管理上、フィールドスケールでの定量的な評価方法についての検討が必要である。そのため、原位置調査や室内土質試験を実施して、今後の浸透対策を効率的・効果的に行うための河川堤防のモデリング支援技術の構築および確立が要求されている。

そのためには、浸透に対する既存の安全性点検結果や被災履歴等を吟味して、河川堤防の地盤工学的特性が浸透に対する安全性に与える影響や感度を分析し、河川堤防の安全性評価のためのモデリング技術を支援するための原位置堤防調査および室内土質試験技術の構築および確立が急務であると思われる。