地中レーダによる地盤の水分動態の非破壊計測

岡山大学環境理工学部				ΤĒ	竹下祐二
鹿島建設(株)				ĪЕ	小林弘明
岡山大学大学院				学	田尾一憲
(株)田中地質コンサルタ	ント			ΤĒ	田中謙次
広島大学総合科学部	ΤĒ	開發一郎	•	学	稲尾真悟

<u>1. はじめに</u>

不飽和地盤における浸透問題の定量的評価において、不飽和領域 での浸透挙動をモニタリングすることが重要である。本研究では、 地中レーダ探査法を用いた不飽和地盤内の水分動態測定方法の開発 を試み、その適用性を砂質土による堤体模型実験により検討した。

2. 計測システム概要

地中レーダ(GPR)は、Sensors&Software Pulse EKKO1000 を使 用し、アンテナ周波数は225、450MHz を採用した。また、GPR 探 査による水分動態計測データを検証する目的で、TDR 法による電磁 波式土壌水分計を用いた。TDR プローブは3 線式ロッドで、長さ 15cm、直径3.2mm、ロッド間隔2mm で製作したものである。TDR ケーブルテスタはSony・Tektronix 1502C 型を使用した。

3. 堤体模型実験概要

図-1 に示す河川堤体模型において、堤頂部 2 点(A;堤頂南側より 35cm、B;堤頂北側より 20cm)に TDR プローブ6 本ずつを多深度(堤 頂部より 20,50,70,100,130,160cm)に水平に埋設した。それと隣接し て、水位観測パイプを設けた。また、GPR による深度指標のために 堤頂南側より 100cm、堤頂部より中心深度 60cm の位置に 20cm の 塩ビパイプを水平に埋設した。表-1 は堤体模型に使用した広島県産 太田川砂の堤体模型作成直後の物理特性である。

本文では、この堤体模型を用いて外水位を上昇させる実験並びに 人工降雨(30mm/h)による浸透実験を行い、堤体内の水分動態を計測 した結果について報告する。

<u>4. 計測結果</u>

図-2 に電磁波伝播速度(V_p)と体積含水率()の関係を示す。図中の プロットはアンテナ周波数 450MHz を用いた GPR による CMP 測定

¹⁾の結果である。実線は Topp ら²⁾が提案した体積含水率と比誘電率の関係式に代入して電磁波伝播速度、空気中 における光の速度(C)と比誘電率の関係から導かれた式(1)による結果を示した。

$$\boldsymbol{\theta} = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \left(\frac{C}{V_p}\right)^2 - 5.5 \times 10^{-4} \left(\frac{C}{V_p}\right)^4 + 4.3 \times 10^{-6} \left(\frac{C}{V_p}\right)^6 \tag{1}$$

GPR による測定結果は式(1)に近似した結果を得ており、このような校正式を事前に求めておくことで、GPR 計測より算出した電磁波伝播速度から水分量が把握できる。

キーワード : 地中レーダ、水分動態、非破壊試験、電磁波伝播速度、ウェーブレット解析、不飽和地盤 連絡先 : 〒700-8580 岡山市津島 3-1-1 TEL 086-251-8153



表-1 太田川砂の物理特性

乾燥単位体積重量 γ _d (g/cm ³)	1.54
湿 潤 単 位 体 積 重 量 _t (g/cm ³)	1.66
含水比 W _n (%)	7.19
間 隙 率 n	0.42
土 粒 子 密 度 ρ _s (g/cm ³)	2.663
平均粒径 D ₅₀ (mm)	0.89
均等係数 Uc	6.25
曲 率 係 数 U'c	1.38



図-2 電磁波伝播速度 V_pと 体積積含水率の関係

5. ウェーブレット解析による自由水面位置の推定

ウェーブレット解析³⁾を用いて、GPR 計測により 自由水面位置を推定するための判断基準の提案を試 みた。ウェーブレット解析は時間-周波数解析であり、 非定常な観測パターンの評価方法として有用である。 図-3 に外水位の上昇開始 20,50,80,90 分後の水位観 測パイプA近傍の反射波電圧値分布の解析結果を示 す。縦軸は深度を示す走時時間、横軸は周波数であ る。凡例に示す走時時間は水位観測パイプによって 計測された水面位置を電磁波伝播速度 0.11m/ns を 用いて算出したものである。自由水面位置は中間色 から暖色にかける高スペクトル領域として表現され る。高スペクトル領域は20分と80分の結果から縦 軸方向に変化しており、20分と50分、80分と90 分を比較すると横軸方向に変化している。ウェーブ レット解析によれば、走時時間軸と周波数軸方向の 高スペクトル領域の変化状況から水位が上昇してい く過程を推定することが可能であると考えられる。

<u>6. 浸潤面位置の推定</u>

降雨浸透に伴う浸潤面の発達の定量的評価を行うため、 反射波電圧値分布 $F_n(t)(t; 走時時間)$ を用いて検討を試 みた。最大反射波電圧値を地表面とおき、降雨開始後に 計測した $F_n(t)$ と降雨開始前の $F_0(t)$ との変化量を絶対値変 換し、浸潤面の発達評価方法の算定式(2)を提案する。

$$H_n(t) = ABS \left[F_n(t) - F_0(t) \right]$$
⁽²⁾

図-4 に浸潤過程における $H_n(t)$ の経時変化分布図のパターンを示す。 このパターンを評価し、 $H_n(t)$ のピーク値を示す走時時間を深度に 換算して図-5 に 印にてプロットした。図中 印は、TDR 計測値 に変化が生じた時間を浸潤面の位置と仮定したものである。GPR で捉える浸潤面の位置は TDR 計測値と近似しており、浸潤面位置 の推定が可能であるといえる。

<u>7. おわりに</u>

地中レーダ探査で計測された反射波電圧値分布を用いて、自由 水面位置の挙動の推定および浸潤面位置の定量的評価が行えるこ



図-3 ウェーブレット解析による結果







図-5 ウェーブレット解析による結果

とを示した。今後は、現場での適用性や間隙構造に関する検討を行う必要がある。 謝辞:本研究は(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業によって実施しました。また、ウェーブレット

解析に際しては東京工業大学廣瀬壮一教授より助言をいただきました。ここに記して感謝いたします。

【参考文献】1)物理探査学会編;物理探査ハンドブック,第7章 地中レーダ,pp.411~412,1998

2) Topp,G.C.,J.L.Davis&A.P.Annan. : Electromagnetic determination of soil water content : Measurement in coaxial transmissionlines.Water.Resour.Res.16:pp.574-582,1980.

3) 榊原進; 数理科学 ウェーブレットビギナーズガイド,東京電気大学出版局,1995