地中レーダによる河川堤防内の水分動態の非破壊計測方法

岡山大学環境理工学部		正	竹下祐二
清水建設(株)		正	田尾一憲
岡山大学大学院		学	井元順一
(株)田中地質コンサルタント			田中謙次
広島大学総合科学部	ΤĒ	開發一郎	稲尾真悟

<u>1. はじめに</u>

近年、原位置における地盤の水分量を計測する方法として接触型プ ロープを挿入し、プロープ近傍の土壌水分量を測定するものが市販さ れているが、局所的な水分量の測定には適しているものの広域の地盤 の水分動態測定には有用ではない。また、堤体の水分測定にはできる だけ現場を破壊することなく計測することが重要である。本研究では、 近年構造物下または覆工裏の空洞探査や盛土・堆積物等の層厚の探査



に多用されている地中レーダ(GPR; Ground Penetrating Radar)探査法¹⁾に着目し、これ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、実際の河川堤防にて検討した。

<u>2.計測システム概要</u>

地中レーダ(GPR)は Sensors&Software社の Pulse EKKO1000 を使用し、アンテナ周波数は 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、水位観測パイプおよびTDR 法による電磁波式 土壌水分計を設置した。TDR プローブは 2 線平行式ロッドである。TDR ケーブルテスタは Sony・Tektronix 1502C 型を使用した。

<u>3.堤体実験概要</u>

実験は2級河川黒瀬川(広島県東広島市)の実堤防において、人工降雨実験を行い、降雨下での堤体内水分挙動 を計測した。人工降雨はポンプを使用して黒瀬川から給水し、高さ約3mからシャワーヘッドを用いて降雨(約 80mm/h)させた。図-1に堤体の概要図をまた表-1に物性値を示す。堤頂部から水位観測用の塩ビ製パイプ(深度 3m)を2本埋設してある。TDR プローブは堤頂部から20cm、40cm、60cm、80cm、100cmの深度にロッドの先 端を鉛直下向きに埋設しており、それぞれのプローブ長は8cm、8cm、10cm、18cm、40cm となっている。ロッ ド間隔は3cm である。

<u>4. ウェーブレット解析</u>

ウェーブレット解析を用いて GPR 計測により浸潤面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²⁾。電磁波伝播速度は CMP 測定より求めた 0.11m/ns と設定した。ウェーブレット解析結果を図-2 に示す。例えば図中の凡例には降雨開始からの時間と TDR 計測値が反応した時間を設定した電磁波伝播速度で走時時間に換算した値を示す。20分後の画像では、高いスペクトル値を示す領域と浸潤面の位置が異なっていることが分かる。これは、反射波電圧値の高い部

深度(cm)	飽和透水係数(cm/s)	間隙比 e	間隙率 n (%)	D60	D30	D10	均等係数 U。	曲率係数U。
0	1.1 × 10 ⁻¹	0.51	33.6	0.74	0.24	0.09	8.68	0.90
50	9.1 × 10 ⁻³	0.33	25	1.37	0.41	0.13	10.15	0.91
100	4.2 × 10 ⁻³	0.27	21.5	0.94	0.3	0.11	8.87	0.87
150	2.7 × 10 ⁻³	0.33	24.8	0.49	0.16	0.07	6.90	0.72

表-1 黒瀬川堤防の地盤特性

キーワード : 地中レーダ、非破壊調査、電磁波伝播速度、ウェーブレット解析

連絡先 : 〒700-8580 岡山市津島 3-1-1 TEL 086-251-8153

分に反応したためと考えられる。また、降雨開始後の時間経過に伴って、高い値を示すスペクトル値領域の走時時 間が長くなっていき、浸潤面の降下に伴って反応している様子が分かる。

5.波形解析結果

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。

$$H_{\mu}(t) = ABS \left[F_{\mu}(t) - F_{\mu}(t) \right]$$
(2)

図-3 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。これを評価し $H_n(t)$ のピーク値を示す走時 時間を深度に換算して浸潤面としてプロットする。

また、別の手法として $F_n(t)$ と指数関数との積による方法(SEC; Spreading & Exponential Compensation)³⁾で評価を試みた。開始前に取得した $F_n(t)$ の反射電圧値の 正側のピークを 40ns までプロットし、式(3)により自乗 法で近似する。図-4 に概念図を示す。

 $A_0(t) = a_0 e^{-a(t-t_0)}$ (3)

t: 走時時間(ns) $t_0: 測定開始時間(ns)$

ここで求めた指数関数の の値を用いて、式(4)のように F_a(*t*)に乗じる。

 $G_n(t) = F_n(t) \cdot e^{at}$

この手順による手法で GPR が捉える浸潤面の位置での反射 図 電圧値がより顕著にピークを示すようになる。これらの手法により得られた結果パターンを評価し、ピーク値を示す走時時間を深度に換算して 図-5 にプロットした。図中の 印は、埋設してある TDR プローブが原 位置飽和になった時の時間をその深度での浸潤面の位置と定義した。図 -5 より、GPRによる計測結果とTDR による Wetting Frontの計測結果 がほぼ一致していることから、GPR による浸潤面位置の推定が可能であ るといえる。

<u>6. 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、実際の現場 にお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 行えることを示した。今後は、より複雑な地盤条件下での適用性の検討 を行う必要がある。

謝辞:ウェーブレット解析に際して東京工業大学廣瀬壮一教授よりご指 導をいただいた。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) 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,pp225,1995.

3) Sensor & Software Inc. ; pulse EKKO 1000 RUN User's Guide Version 1.2 ,5-Data Presentation, pp.18~19

(4)









図-4 指数関数近似曲線の算定方法

