

地中レーダによる河川堤防内の水分動態測定に関する考察

岡山大学環境理工学部 正会員 竹下祐二
岡山大学院 学生会員 ○井元順一
清水建設（株） 正会員 田尾一憲
（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 正会員 開発一郎・稲尾真悟

1. はじめに

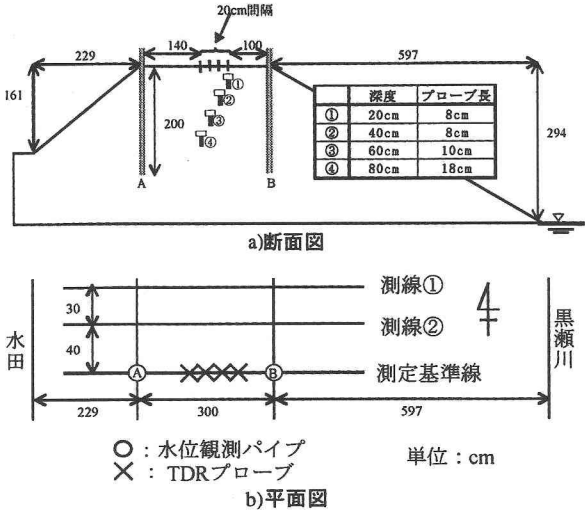
不飽和地盤における浸透問題の定量評価において、不飽和領域での浸透挙動をモニタリングすることが重要である。本研究では、地中レーダ（GPR:ground penetrating radar）探査法¹⁾を用いた不飽和地盤内の水分挙動測定方法の開発を試み、その適用性を実河川堤防（図—1）における人工降雨実験により検討した。

2. 実験概要

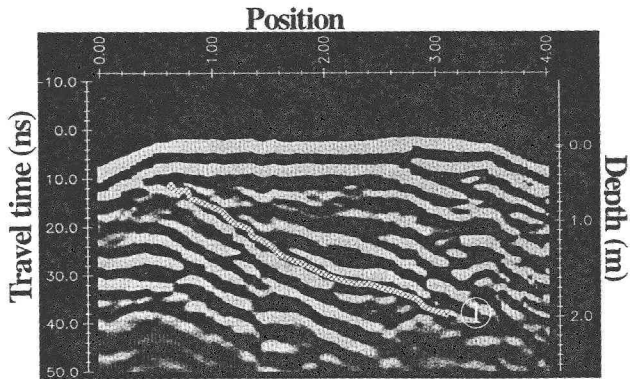
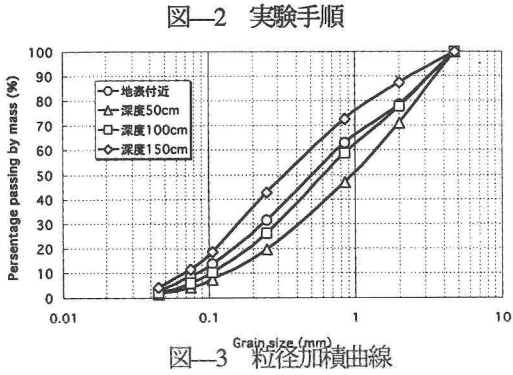
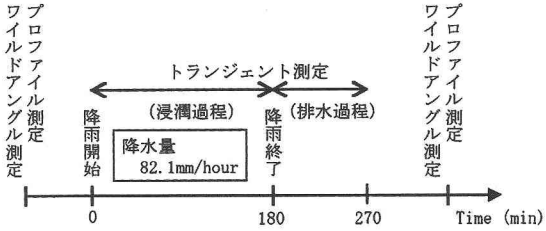
GPR により不飽和地盤における浸潤面の発達を測定するため、実河川堤防にて人工降雨実験を行った。実験手順を図—2 に示す。ワイルドアングル測定で地盤内の電磁波伝播速度を測定し、プロフィール測定で定常水分状態の地盤断面を測定した。また、トランジェント測定では非定常水分挙動を測定した。堤体中には GPR データの評価のために、2 線式の TDR 土壌水分計プローブ²⁾を埋設した。また、堤体物性値として粒径加積曲線を図—3 に示す。室内透水試験による堤体の透水係数は $1 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 程度であった。

3. 定常水分状態での堤体構造検知

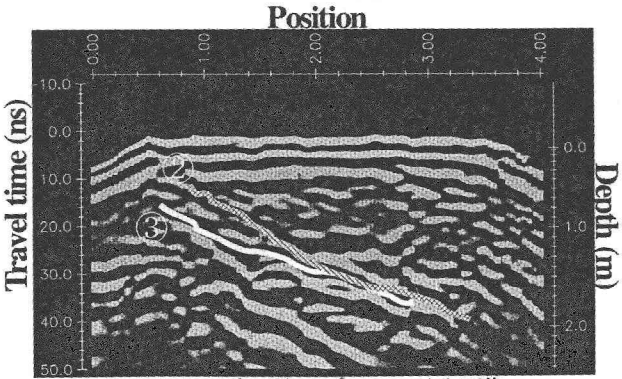
プロフィール測定結果を図—4、図—5 に示した。図中の反射面①と反射面③は同じ層境界を表している。反射面②は降雨の前後を比較するため、反射面①を図—5 に重ね合わせたものである。降雨後では、堤体内の水分量が増加したため地盤内の電磁波伝播速度が遅くなり、往復走時時間が長くなったために反射面③は反射面②より低下している。また、今回の実験現場の人工堤防は自然堤防の上に成形されたので、図中で反射面が地表面に対し斜めになっている。



図—1 堤体概要



図—4 降雨前のプロフィール画像



図—5 降雨後のプロフィール画像

4. 非定常水分挙動の計測

トランジェント画像を図—6 に示し、点線で電磁波の反射電圧値から読み取った浸潤面の挙動を記している。降雨開始と同時に浸潤面が位置を降下させ、また、3 時間の降雨を終了後に浸潤面が上昇していき、タイムラグは認められない。

5. 画像における深度指標の精度

地盤内において電磁波伝播速度 V は、体積含水率 θ に大きく影響を受けるため深度によって異なる (図—7)。図中の式は Topp³⁾ が示した θ と比誘電率 ϵ_r の関係式 (1) と、 ϵ_r と V の関係式 (2) から ϵ_r を消去した式である。

$$\theta = 5.3 \times 10^{-2} + 2.9 \times 10^{-2} \epsilon_r - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_r^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_r^3 \quad (1)$$

$$\epsilon_r = \left(\frac{C}{V} \right)^2 \quad (2)$$

ここで、 C は空気中における光の速度である。

しかしながら、トランジェント画像は常に一定の V を用いて描かれているので、誤差が生じてしまう。そこで、TDR の測定結果を元に V - T グラフ (T : 往復走時時間) 作成し、地盤内における V の変化を考慮した浸潤面の深度を算出し図—8 に示す。図—8 では電磁波が伝播した距離は、斜線部または灰色部分の面積で表される。ただし、横軸は往復走時時間であるので、浸潤面の深度は面積の $1/2$ となる。図—8 の斜線部の $1/2$ の面積が V を常に一定と考えた場合、つまりトランジェント画像で描かれている浸潤面の深度を表し、灰色部分の面積の $1/2$ が地盤内での V の変化を考慮した浸潤面の深度を表すことになる。図—9 は上記の二つを計測時間ごとに比較したものである。傾向は一致しているものの、最大で約 20cm の差が認められる。

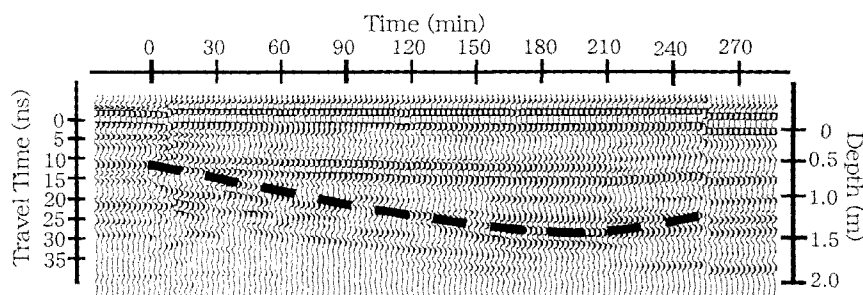
6. おわりに

本研究で得られた知見をまとめると以下のようなものである。

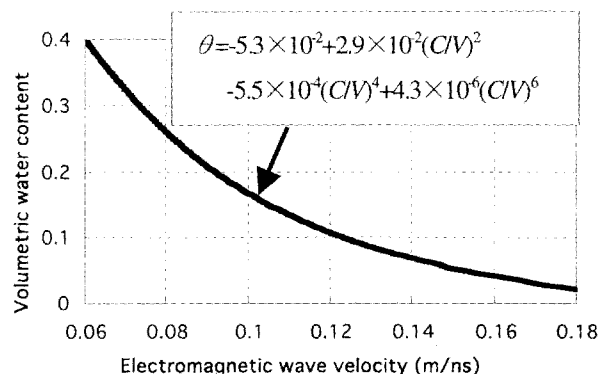
- (1) 地中レーダにより実堤防地盤内の構造や水分挙動が非破壊かつタイムラグなく検知できた。
- (2) 今回の実験現場では電磁波伝播速度の扱い方によって、最大 20cm 程の差が生じることが分かった。
- (3) TDR 等を用いて地盤内部の誘電率の分布を計測すれば、地中レーダによる深度探査の精度が向上する。

【参考文献】

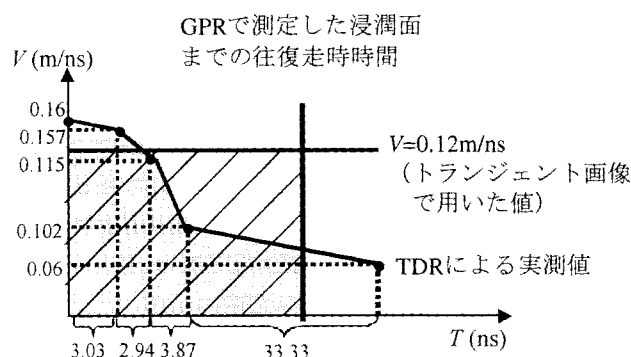
- 1) 物理探査学会：第 7 章「地中レーダ」, 物理探査ハンドブック, pp.401-421, 1988
- 2) 安原正也, 他：電磁式土壌水分計—中性子水分計に代わる新しい水分計—, 地質ニュース 430 号, pp.17-27, 1990
- 3) Topp, G.C., et al.: Measurement in coaxial transmission lines, water. Res. Res. 16, pp.574-582, 1980



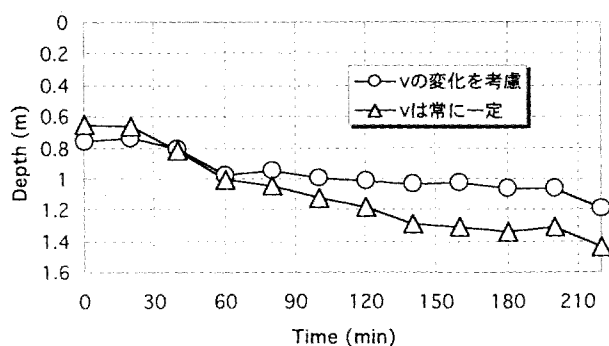
図—6 トランジェント画像



図—7 電磁波伝播速度と体積含水率の関係



図—8 電磁波伝播速度グラフ
(計測開始直後の例)



図—9 浸潤面の算定深度の比較