

河川堤防浸透点検の一連区間細分化における FDEM 探査の適用事例

パシフィックコンサルタンツ株式会社

若狭 聡

パシフィックコンサルタンツ株式会社

正会員 ○館川 逸朗

株式会社 環境総合テクノス

正会員 片山 辰雄

1. はじめに

近年、全国的に河川堤防の浸透安定に関する詳細点検が実施されてきたが、この点検の際には堤防及び基礎地盤の状況も含めた諸条件から一連区間を設定して代表断面においてボーリング調査・浸透安定検討により安全性を照査している。しかし、長い延長をもつ河川堤防においては一連区間内で地盤状況が変化することがあるため、堤防強化対策の実施に際しては、対策区間を絞り込むことで工事コストが低減可能となる場合もありうる。このためには堤防及び基礎地盤の状況を連続的に把握することが必要となるが、ボーリング調査を高密度で実施することは不経済となる。本論文では、サウンディングや FDEM 探査手法を用い、ボーリング調査と併用することで両者を比較し、堤防強化対策区間の最適化に適用した事例を紹介する。今回は礫主体の堤防・地盤において FDEM 探査結果とボーリング調査結果を対比させて、対象区間の縦断的な土質区分を把握した。

2. FDEM 探査の概要

(1) 基本原理：送信コイルによって地盤内に 1 次磁場を発生させると地盤内に渦電流が生じ、さらにこの渦電流によって 2 次磁場が誘導される。この 2 次磁場の 1 次磁場に対するレスポンスを測定することより地盤の比抵抗を測定するのが EM 法の原理である。FDEM 法は周波数領域 EM 法 (Frequency Domain Electromagnetic Method) であり、周波数を変えて探査深度ごとの見掛け比抵抗を測定する。測定見掛け比抵抗は次式で与えられる¹⁾。

$$\text{測定見掛け比抵抗の式} \quad \rho_a = \frac{\omega \mu_0 s^2}{4} \left[\frac{H_p}{H_s} \right] = 1.974 \times 10^{-6} s^2 f \frac{H_p}{H_s}$$

ここに、 ρ_a ：地盤の見掛け比抵抗 (Ωm)、 ω ：角振動数 $2\pi f$ 、 μ_0 ：真空の透磁率： $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)、 H_s ：2 次磁場強度、 H_p ：あらかじめ検定して求めている 1 次磁場、 s ：コイル間隔(m)、 f ：送信電流の周波数 (Hz)

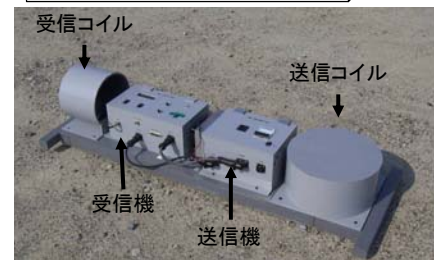
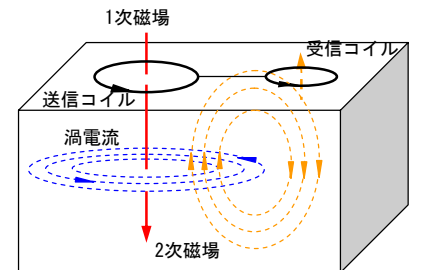


図-1 FDEM 法の基本原理概念図と探査機

(2) 探査データの 1 次元解析方法：手順は、①初期の比抵抗構造と層厚区分を水平多層モデルで設定、②モデルに対する理論磁場応答 (H_s/H_p) を順解析²⁾ で求めて測定磁場応答との残差の二乗和が許容値以下になるまで繰り返し計算、③2 次元比抵抗マッピング演算して比抵抗断面図を作成する。

(3) FDEM 探査解析結果の解釈について：比抵抗は粘土含有量が多いほど比抵抗が小さくなり、同一の砂でも含水量が多いほど比抵抗は小さくなる。礫そのものの比抵抗は高いため、礫が混入すると比抵抗は高くなる。比抵抗断面図による土質区分は、相対的な比抵抗コントラストを基に、一連区間毎にボーリング調査を実施し、この土質区分（室内土質試験結果）と比抵抗値とを対比して“土質毎の比抵抗区分”を設定する。

3. 比抵抗断面図とボーリング調査結果の比較

(1) 一連区間 A のケース：既往点検では沖積粘性土 (Ac) 層に起因する裏法尻の盤膨れが照査基準を満足せず、一連区間が 1660m と長いため、細分化を目的として、裏法尻において Ac 層の分布を把握するためにスウェーデン式サウンディングを 200m 毎に実施した。しかし、礫質土主体のために一部で浅い深度から貫入不能になったことから、貫入不能の 2 エリアで FDEM 探査を実施した。このうちのエリアⅡの結果について以下に述べる。

図-2 にこのエリアの探査結果（比抵抗マップによる推定土層断面図）を示す。

キーワード FDEM 探査, ボーリング調査, 河川堤防点検, 一連区間, 土質区分

連絡先 〒541-0052 大阪市中央区安土町二丁目 3 番 13 号 パシフィックコンサルタンツ株式会社 TEL06-4964-2331

この土層区分はエリア外の既往ボーリング調査地点での試験探査を行い、結果を比較して“土質毎の比抵抗区分”を設定した (A_c : $55 \Omega m$ 以下, D_g : $55 \sim 60 \Omega m$, A_g : $70 \Omega m$ 以上)。

この土質毎の比抵抗区分を用いて比抵抗マップから推定した土層区分は、確認ボーリング (Bor. A-2) の結果とよく合致しており、土質区分は妥当と判断できた。この探査結果から、盛土 (B_s) の下に A_c が分布する区間 (①区間) と A_g が分布する区間 (②区間) に細分化した。

(2) 一連区間 B のケース: 既往点検では低強度の沖積砂質土 (A_s) 層を通過する裏法尻のすべりが照査基準を満足せず一連区間が 690m と長いので、細分化を目的として堤防天端位置で FDEM 探査を実施した。図-3 にこのエリアの探査結果を示す。この土層区分はエリア内のボーリング調査結果 (Bor. B-1) と FDEM 探査結果を比較して“土質毎の比抵抗区分”を設定した (A_c : $55 \Omega m$ 以下, A_s : $55 \sim 75 \Omega m$, D_g : $75 \Omega m$ 以上)。

しかし、この土質毎の比抵抗区分を用いて比抵抗マップから推定した土層区分と B-2 の結果とは、区間全体では B_s (盛土) と A_s の区分が整合しておらず、シルト (A_c 層) と A_s が整合しなかった。これは、表-1 に示すように、探査区間における A_s がシルト質砂であり、 A_c 層のシルトとは物性の差が小さく、比抵抗の差も小さいため境界値設定が不十分なことによる。両方のボーリング調査結果も含めて A_c と A_s の境界値を $58 \Omega m$ と見直すことで、両者の比抵抗値は非常に近いが、FDEM 探査は妥当と判断できた。表-2 に当該地区の土質毎の比抵抗値と一般値・他事例を示す。同一河川でも異なる区間で比抵抗値は異なっており、探査結果を一般値から精度良く土質区分を行うことは困難と判断できる。

4. まとめと今後の課題

○まとめ: 堤防も含めた深度 10m までの地盤状況把握は浸透安定検討の上で重要である。探査結果はボーリング結果と対比することで実用上十分な性土で連続的な土質区分を把握できたと判断できる。ボーリングと FDEM 探査の結果比較で A_c と A_s の判定が一部で異なったが、複数地点で結果比較して精度を上げることで対処可能となった。

○今後の課題: 地形条件により堆積環境が変化することで同一の河川でも異なる区間では“土質毎の比抵抗区分”が変化する。こうした堆積環境変化に対する適切な確認方法の確立は重要な課題である。

謝辞: 本論文をまとめるに当たり、国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所からは貴重な資料を提供していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】 1) Wait, J. R., 1955, Mutual electromagnetic coupling of loops over a homogeneous ground: Geophysics. vol. xx, no. 3 (July 1955), pp. 630-637, 3 figs.

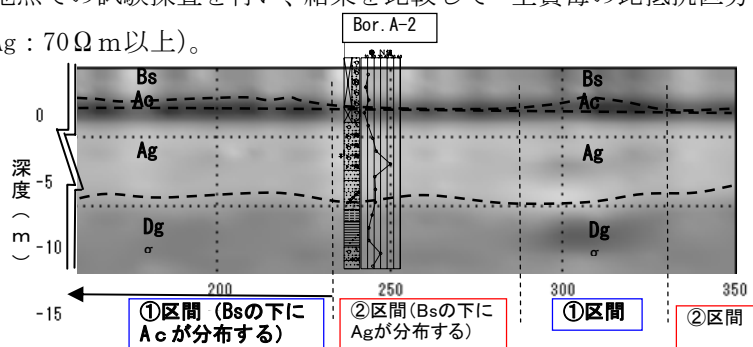


図-2 II エリアの探査結果と細分化区間

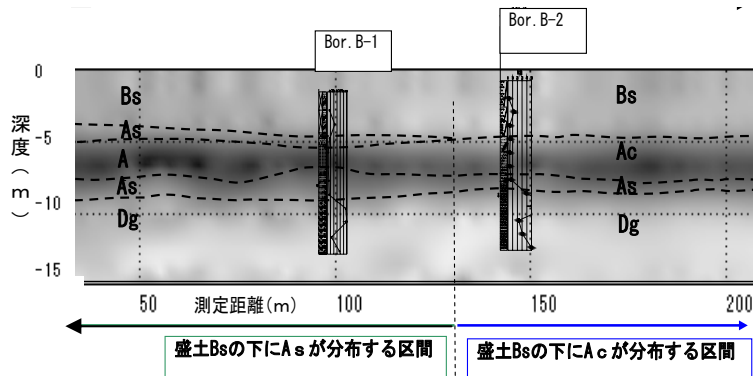


図-3 一連区間 B の探査結果と細分化区間

表-1 A_s と A_c の物理特性の比較

ボーリング地点 Bor.	土層 (土質名)	細粒含有率 (%)	含水比 (%)	土粒子密度 (g/cm^3)	湿潤単位体積重量 (kN/m^3)
B-1	A_s (シルト混り砂)	32.8	17.5	2.774	17.8~19.0
B-1	A_s (シルト質砂)	45.4	31.2	2.689	17.13
B-1	A_c (砂質粘土)	60.2~83.2	27.7~31.0	2.724~2.755	17.8~17.1
B-2	A_c (シルト)	74.9	25.9	2.745	17.9~18.4

表-2 土質毎の比抵抗値の比較 (単位: $\Omega \cdot m$)

土質	一般的な値	他の事例	一連区間A	一連区間B
粘土・シルト	1~100	45以下	55以下	55以下
粘土混じり砂	10~500	—	60~65	—
砂	20~1000	45~75	55~70	55~75
砂礫	20~3000	75以上	70以上	75以上