

EPS盛土を使った堤体横断面の表面波探査

SURFACE WAVE EXPLORATION OF LEVEE CROSS-SECTION WITH EXPANDED POLYSTYROL FILL

杉井俊夫¹・前田健一²・斎藤秀樹³・小林 剛⁴・尾畑 功⁵

Toshio SUGII, Kenichi MAEDA, Hideki SAITO, Tsuyoshi KOBAYASHI and Isao OBATA

¹正会員 工博 中部大学教授 工学部都市建設工学科 (〒487-8501 愛知県春日井市松本町1200)

²正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部都市社会工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

³正会員 理博 応用地質株式会社 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43番地)

⁴正会員 工修 応用地質株式会社 (〒305-0841 茨城県つくば市御幸が丘43番地)

⁵正会員 工修 国土交通省中部地方整備局 三重河川国道事務所 防災対策推進官
(前 庄内川河川事務所 調査・品質確保課長) (〒514-8502 三重県津市広明町297)

The surface wave exploration can apply from the measurement principle only to a flat place, and has been used chiefly as longitudinal section for the embankment survey. Therefore, it was necessary to join a close longitudinal section to measure the cross-section of the embankment. In the present study, the embankment section was made smooth in using the EPS stage (Expanded polystyrol fill), and the possibility of the surface wave exploration of the cross-section of the embankment was examined. It was obtained to be able to measure the S-wave velocity of the cross-section as a result of the verification that used other geophysical explorations and a simplified penetration test.

Key Words : *surface wave exploration, levee cross-section, simplified penetration test, EPS, resistivity exploration*

1. まえがき

地盤の硬軟等を非破壊で調査する物理探査法は40年以上の歴史を持つ。これまで堤防開削や改修調査に、堤防の非破壊調査としてS波速度から地盤の剛性を調べる表面波探査が実施されてきた。表面波探査で得られるS波分布と電気探査で得られる比抵抗分布とのクロスプロットにより、堤体内の地盤構成を把握できるようになり、水位を含む堤防の非破壊調査に大いに利用されるようになってきている。また、2011年の東日本大震災による堤防の部分液化発生による堤体内部の弱部の探査が喫緊の課題となっており、今後、非破壊調査の増加が予想される。表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波（レイリー波）を測定解析することにより地盤のS波速度を求める物理探査法である。不均質な地盤の表面付近を伝わる表面波は波長（周波数）によって伝播速度が変化し、深度とともに弾性波速度が増加する。波長（周波数）による伝播速度の分散を逆解析することにより、S波速度構造を求める方法である。地表面をカケヤなどで

起振し、地盤表面に設置された複数個の受振器で表面付近を伝わる波を観測する。しかし、表面波探査はその計測原理から、平坦な場所にしか適用できず、堤防調査には縦断方向の断面調査として主に利用されてきた。そのため、堤体の横断面を調査するには、縦断方向に複数測線を設ける必要であり、コストだけでなく、補完データを補完することが懸念される。また表面波探査によって得られるS波分布と電気探査の比抵抗分布とのクロスプロットにより、堤体内の地盤構成をも把握できることから、堤体横断面で計測可能な電気探査に対応できる堤体横断面の表面波探査ができることが望ましい。そこで、本論文は堤防断面構造の弱部を把握するために、EPS材を用いた仮設盛土を設置して凹凸部を平坦化し、堤防横断面の表面波探査の可能性を調べた。また、得られた結果について他の物理探査および簡易貫入試験との比較からも検証を行った。

2. EPSを使って表面波探査の予備試験

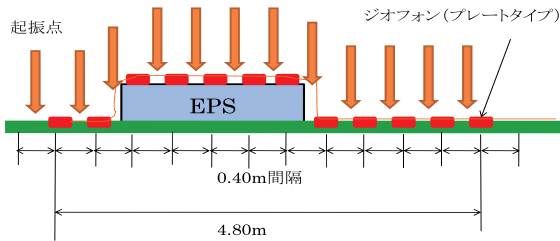


図-1 CASE-1 EPS上を起振する場合

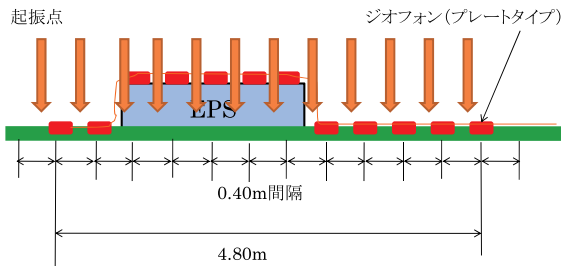


図-2 CASE-2 地表面上を起振する場合

堤防においてEPSステージを仮設することで、懸念されるのがEPS自体による表面波の減衰およびEPSと地面の接触部分の芝生による減衰が懸念される。そこで、事前にキャンパス内の芝生上でEPS板(2m×1m×0.1m)を2枚重ねて表面波探査試験を実施した。試験ケースを図-1、図-2に示す。CASE1ではEPS上をカケヤで起振しながら計測する方法、CASE2では起振点をEPSからずらし地盤面上を起振する方法の2通りで行った。また、得られた結果を静的貫入試験(リバーテクノロジー)により、先端抵抗 q_c を計測した。CASE1とCASE2の場合のS波速度の分布と先端抵抗をそれぞれ図-3～5に示した。CASE1とCASE2を比較してみるとおおよその傾向は西側が緩んでいて東側が締まっている結果となっている。しかし、CASE1では深さ方向には変化が少なく、EPS上を起振する際に、受信器がEPS上で浮き上がることや芝生による密着不十分などの影響があったと推察される。また、図-5の先端抵抗をみるとII、IIIでは浅部から計測最大値を越えているところが現れているが、西側表層が緩く、東側が深度とともにすぐに締まっている傾向にある。芝生は10cmほどの長さがあり、西洋芝の上にEPSおよびプレートタイプの受信器をおいて計測したため、減衰は大きいと考えられるが、図-3に示すように結果についてはおおむね計測できているものと判断できる。今回の予備実験の結果、設置についての密着方法の検討やスパイクタイプの受信器(ピンタイプ)の使用などの改善の必要性を得た。

3. 現地堤防とEPSステージ施工

(1) 対象堤防の概要

対象とした堤防は国土交通省中部地方整備局が管理す

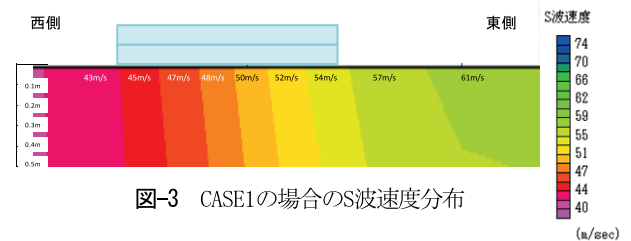


図-3 CASE1の場合のS波速度分布

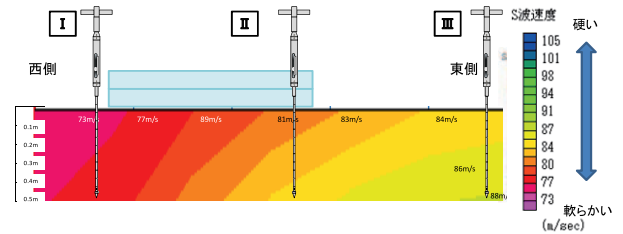


図-4 CASE2の場合のS波速度分布

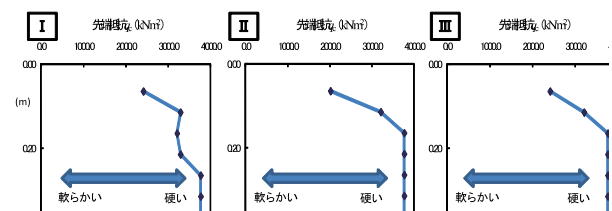


図-5 CASE2場合の先端抵抗 q_c

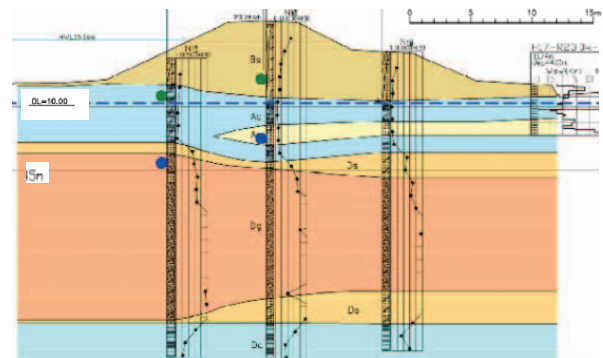


図-6 堤防断面

る庄内川23km右岸堤防で、図-6に断面図を示すように堤内地からの高さが4.6m、小段高2.4mでセグメント2-1礫床区間でAc層の上に盛土された堤防となっている。

また、既往のボーリング資料より、地下水面は堤内地盤から1.5m下程度にあると推定される堤防である。予め、23km地点を横切る縦断方向の表面波探査および電気探査を実施している。表面波探査・電気探査の結果の組み合わせのクロスプロットの結果から、天端3.8m以深の基礎地盤では、S波速度110～160m/s程度でAc層、天端から深度7～8m付近以深では、S波速度200～230m/sのDs層と示されている深度と判断されている。

(2) EPSの設置と表面波探査の概要

堤防断面を平坦化するために、EPS板を(ダウ化工製DX35(2m×1m×0.1m))を緊結金具で地盤とEPSご

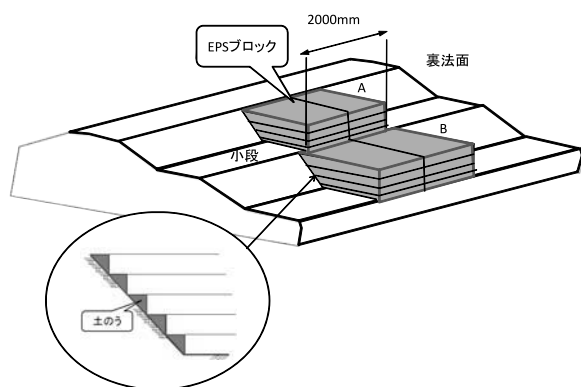


図-7 EPS仮設ステージと土のうによる目地詰め

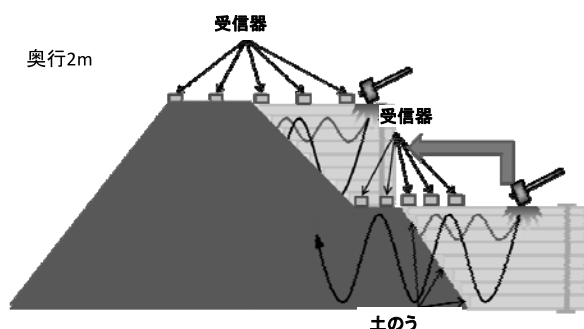


図-8 EPSステージを用いた表面波探査

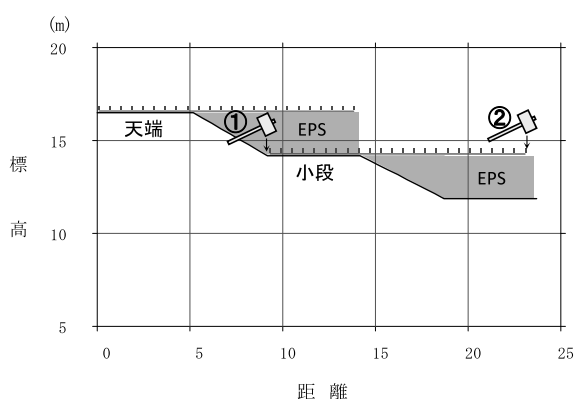


図-9 表面波探査における起振の方法

とをつなぎ、のり面では土のうに砂を詰めて隙間を埋めながら仮設ステージを施工した（図-7）。小段での計測が終わると上部へ移設する形でEPSを再利用した。なお、今回は、下段の結果のみを取り上げる。

4. EPSステージを用いた堤防断面の表面波探査

(1) EPSを用いた計測波形

小段側の表面波探査における起振（図-8, 9）と観測波形を図-10, 11に示す。EPS側からの起振した場合②（図-11）ではEPSを伝わる波が速く伝わっていることがこれ

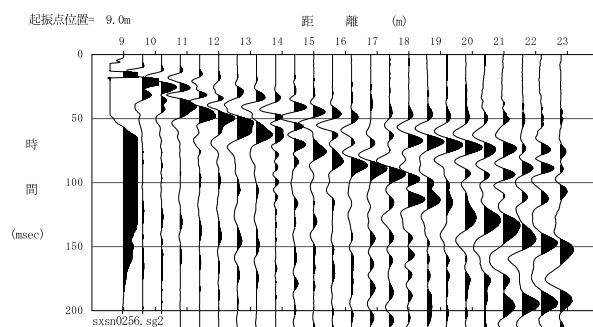


図-10 表面波探査における計測波形（起振①）

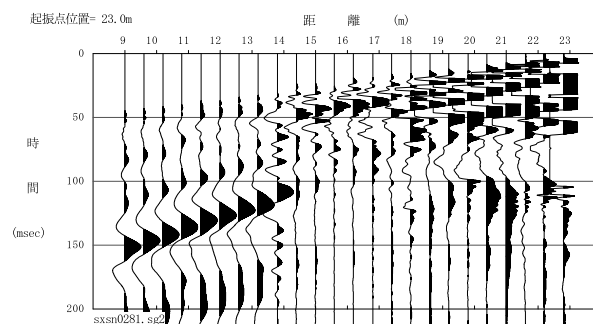


図-11 表面波探査における計測波形（起振②）

よりわかる。また図-10の①の波形に比べ、②の方がEPS内の波形の乱れが大きい。これは、EPS板を喫結金具のみで結束しているために、EPS板間で干渉していることが原因と考える。今後、工場出荷時に接着剤で密着させたEPSブロックタイプのものを使用することで乱れも少なく作業性もアップすると考える。

(2) EPSステージを用いた堤防断面の表面波探査

表面波探査結果であるS波速度分布の小段での別途計測した縦断面方向の結果を図-12、EPSを使用して計測した横断面方向の結果を図-13に示した。赤い波線が縦断と横断が重なる線である。また、図-13中の青色線で囲った右端上部が、EPS盛土部である。EPS部は、S波速度が速く、周辺地盤よりも硬い傾向にある。図-12と図-13の破線部で比較してみると、0-2m深さ（黄色部）まで、比較的締まっており、2-4m深さ（橙色部）では周りより緩い状態が得られ、一致していることが分かった。なお、横断面では180m/s（黄緑）となる層の深度がやや深くなっているが、横断では観測長15m、縦断では観測長45mと観測長に影響する深部の分解能が低下していることが影響していると考えられる。

横断面でのS波速度の結果から、小段法肩部からのり面に向かってS波速度が高い部分（黄色）が確認され、小段はのり面表層部を含めて表層1m～2mは締まった状態あるいは砂質土で構成していることが推察される。一方、小段上などの水平面ごく浅い層では、のり面に比べて軟らかい傾向があることが分かった。

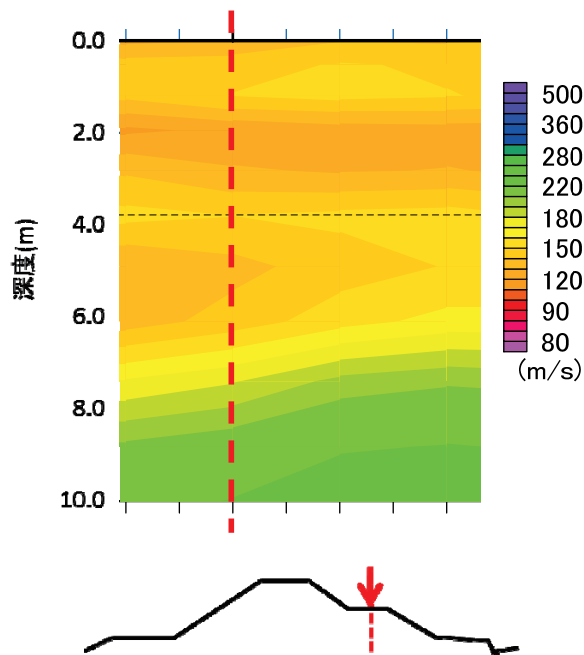


図-12 堤防縦断面のS波速度の一部と調査箇所

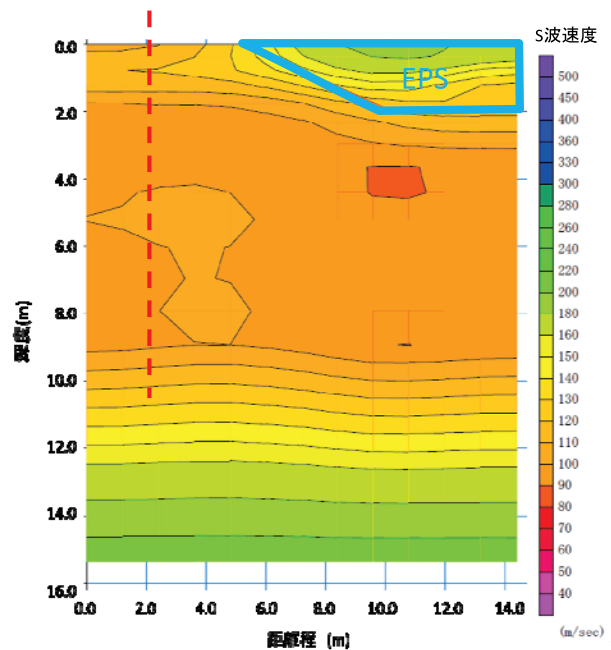


図-13 堤防横断面のS波速度と調査箇所

5. 比抵抗値による結果の検証

次に計測されたS波速度構造と電気探査による比抵抗値構造から結果の検証を行った。比抵抗値は、その値が大きいほど電流が流れ難く、水分が少ない土質と考えられる。図-14.2が比抵抗値(Ω)の分布を示したものである。のり面では比抵抗値が高く、砂礫が多いことが推察できる。また、のり尻下部右側で低比抵抗値が現れており、水分が多い土質であることが考えられる。また、比抵抗値だけでは分かりにくいため、別途、電気探査中に河川水を散水させ、散水停止後の比抵抗を基準に比抵抗の変化率(%)を求めたのが、図-14.3である。負符号の変化率は、比抵抗値が大きくなった、すなわち水分量が減ったことを示す。のり面は負の変化率と水分が減少しており、砂質または砂礫といった透水係数が大きな土質であることがわかる。一方、のり尻下部1.5-2m深さでは水分量が増加していることが得られており、粘性土などの透水係数が低い土質が存在する可能性を示唆する結果が得られている。これらの結果とEPSを用いた表面波探査の結果(図-14.1)を比較すると、小段肩およびのり面の浅層部が硬く(図-14.1の黄色部、図-14.2の赤色部)、深くなると軟らかい層が比抵抗探査結果からも推定されており、堤体内部よりも表層部が硬く締め固められていることが推察される。図-14.1でEPS下より深さ2m程にS波のやや遅い部分が表れているが、図-14.2の見かけの比抵抗値においても比抵抗の小さい部分があり、いずれも軟らかい土質の可能性が得られている。これらの

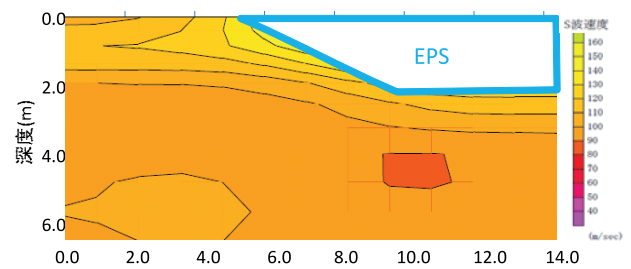


図-14.1 EPS盛土利用した表面波探査結果 (S波速度)

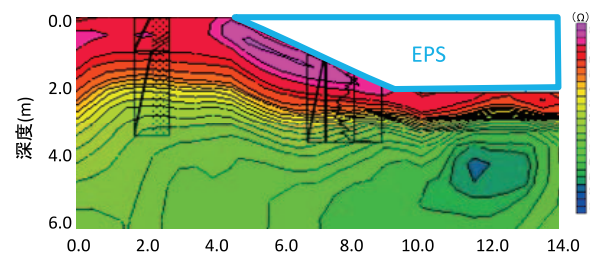


図-14.2 比抵抗値分布

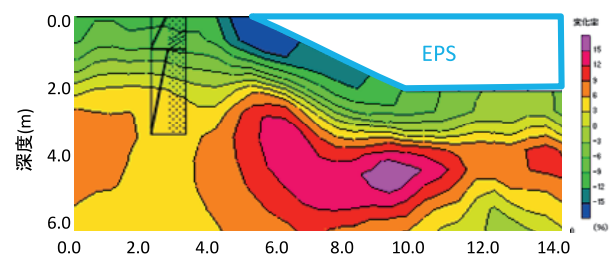


図-14.3 比抵抗値の変化率

結果から、EPS盛土を使った表面波探査の結果は、他の物理探査結果と整合していることが明らかとなった。

6. 簡易貫入試験による地盤の硬軟の検証

EPSステージを用いた堤防横断面の表面波探査および電気探査の結果、小段のり尻下部右側、約1-2m弱の深さに、周辺よりもS波速度が遅い軟らかい層らしいものが検知されている。電気探査でも低比抵抗値が得られており、散水時の比抵抗値の変化ではのり尻先直下に変化が多いがその反対では変化率が低く、浸透水の流れが妨げられているように見える箇所があった。そこで、表面波探査の結果の妥当性を検証するために、小段のり尻下部を中心に、SH型簡易貫入試験を実施した。図中左の小段には、光ケーブルが埋設されているのを確認しているが、今回の水平距離10m程度においては埋設物の調査の結果、特になことを確認している。そこで深さ4m弱までの貫入試験をSH型貫入試験装置⁴⁾で行うこととした。

(1) SH型貫入試験の概要

標準貫入試験や簡易貫入試験は、貫入量に対する打撃数で地盤の硬軟を評価する方法であるが、SH型貫入試験は、3kgまたは5kg（3kg+2kg（着脱式））のハンマーを落下させた時の貫入量から換算し（Nd/drop 値として）評価する方法で、斜面の表層崩壊などの軟らかい地盤での調査に使用されてきた。Nd/drop 値とは、質量5kg のハンマーを500±10mm の高さから自由落下させ、コーンを100mm 貫入させるのに要する打撃回数で、次式を用い

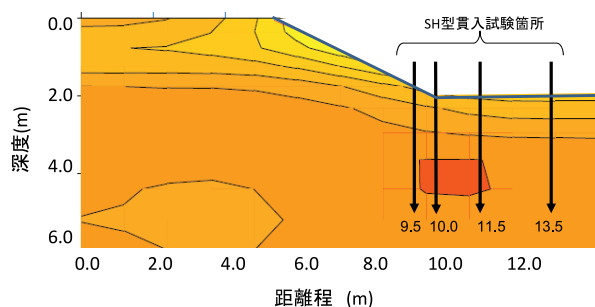


図-15 SH貫入試験の次実施(4本)

て1 打撃ごとにNd/drop 値を求める。

$$\text{Nd/drop} = \frac{100(\text{mm})}{(3+2)\text{kgハンマー1打撃のコーン貫入量}} \quad (1)$$

また、軟らかい地盤では3kgハンマー1打撃ごとに、次の式のNd' /drop 値を求める。

$$\text{Nd' /drop} = \frac{100(\text{mm})}{3\text{kgハンマー1打撃のコーン貫入量}} \quad (2)$$

さらに、Nd/drop 値とNd' /drop値を統一して表現するために次の関係を使用する。

$$\text{Nd/drop} = 0.5\text{Nd' /drop} \quad (3)$$

(2) SH貫入試験の結果

今回、小段のり尻下部の確認をするため、図-15のようにのり尻部（10.0m）を中心に計4本貫入することと

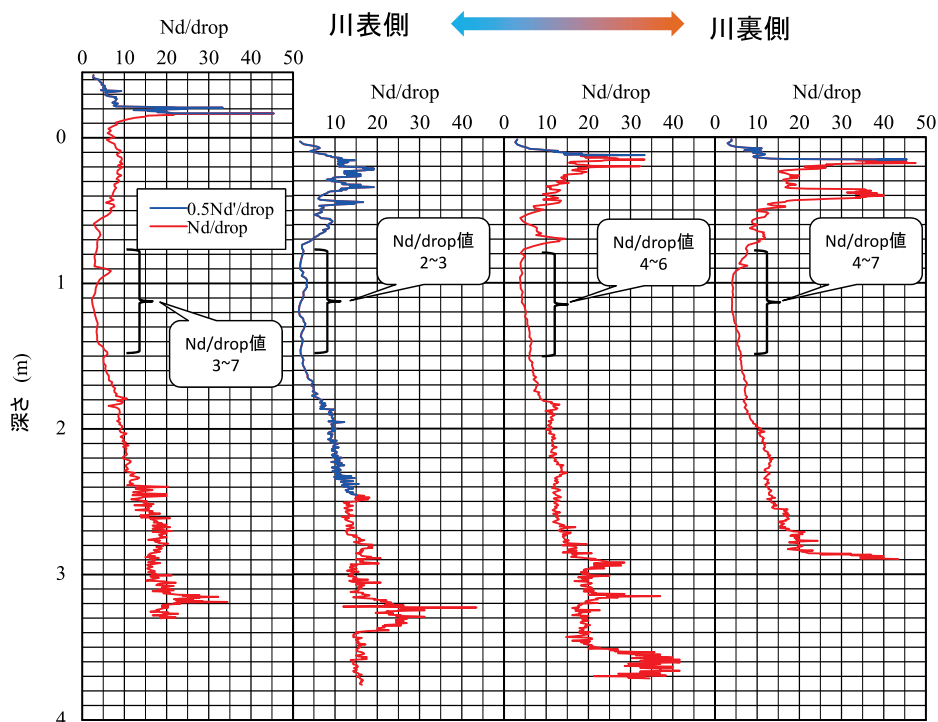


図-16 SH型貫入試験結果（4本）

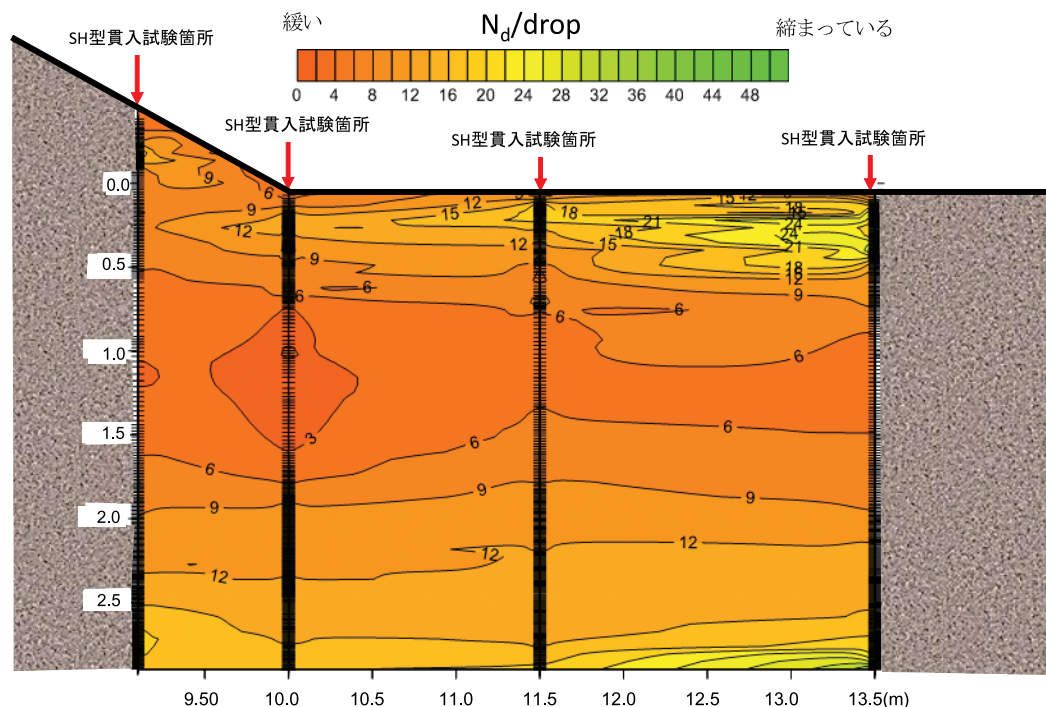


図-17 SH型貫入試験で得られたNd/dropのコンター図

した。のり尻下部（水平位置10.0m）で地表から1-2mの間で、Nd/drop値が2-3と非常に低く、緩い層の存在をSH貫入試験結果からも得られた。また、のり尻部から川裏側へ行くほど、Nd/drop値が大きくなり、硬い傾向になることがこの結果から読み取れ、図-14の一部軟らかい土質を確認できた。

次に、得られた4本のNd/drop値を使って、Nd/drop値のコンター図をクリギング法により求めたのが図-17である。SH型貫入試験の深さがそれぞれ違うため、深さ2.9mまでのデータを用いて統一した。この図より、表層は堤内側（図中右）へ行くほど、礫に当たったためか、ばらつきが大きくコンターが複雑になっているが、深さ1.0-1.5m付近に緩い層が分布していることが見える。

また、EPS盛土を用いた表面波探査の結果では、1.3～2.5m深さにおいて、のり尻から堤内側にS波速度が小さい軟らかい部分があったが、深い部分ではやや位置的なズレはあるが確かに軟らかい部分が存在していることがSH貫入試験結果からも得ることができた。今回の横断面の表面探査では、観測水平距離が15mであったため、深部での分解能が低下しズレが現れた。今後は、EPS板ではなく、EPSのブロック状で板間の干渉を低減することで精度を上げることができるものと考えられる。

7. まとめ

EPSによる仮設盛土で断面を平坦として表面波探査を行った結果、断面のS波分布を計測することができ、縦断面との比較、電気探査およびSH貫入試験結果との比較

からも検証を行ったところ、計測法が可能であることが得られた。今回のように、EPSにより部分平坦化することで、地表部とEPS内部のS波分布から表面波探査のチェックにもなる。今後、移設が簡便なEPSブロックを使用することで、施工も容易、再利用によるコスト削減なども期待できる。以上のことから本手法は、被災時の早急な診断や付帯構造物周りの評価などにも、簡便で堤体横断面のS波構造を得ることに貢献できると考える。

謝辞：本研究は、河川技術研究開発制度・地域課題研究（2009-2011年度）の補助を受けました。また、本実験でお世話になりました応用地質㈱の馬場干児氏、熊谷茂一氏、河合桂司氏、河口建設㈱の鶴留修治氏、地盤防災ネットワークの村田芳信氏、岐阜大学客員教授の浅野憲雄氏他、関係者各位に記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 地盤工学への物理探査技術の適用と事例，地盤工学会，pp.351-388，2001.
- 2) 土木研究所・物理探査学会：河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き（案），4.1-4.41，2010.
- 3) 杉井俊夫・横井達矢：EPSステージを用いた堤防横断面への表面波探査の適用，第46回地盤工学研究発表会，pp.1091-1092，2011.
- 4) 表土層調査技術研究会：斜面崩壊対策におけるSH型貫入試験調査基準，pp.1-9，2009.

（2012.4.5受付）