

堤体横断面調査のための可動型軽量盛土を利用した表面波探査

中部大学 正会員 杉井俊夫 名古屋工業大学 前田健一
三重河川国道事務所○尾畑 功 (前 庄内川河川事務所)
庄内川河川事務所 黒田英伸
応用地質株式会社 斎藤秀樹 小林 剛

1. はじめに

東日本大震災発生時の堤防の部分液状化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。非破壊調査の一つである表面波探査は、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り、堤防でも利用されてきている。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、堤体の横断面を測るには、縦断方向に密に実施し繋ぎ合わせることをしなければならなかった。本研究は、堤防横断面構造を把握するために、EPS（Expanded polystyrol fill：発砲ポリスチロール盛土）を用いて移動可能な仮設盛土を設置することで堤防横断面を平坦化し、表面波探査の適用を実堤防で試みたものである。

2. 表面波探査

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^{1),2)}。図-1のように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、一般に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。

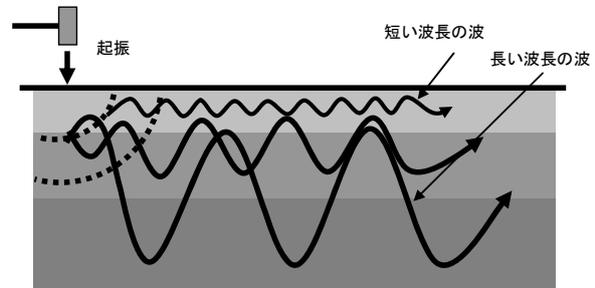


図-1 表面波の伝播

3. 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る庄内川 23km 右岸堤防で、図-2 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、河道特性を示すセグメント区分³⁾で 2-1 礫床区間にあり、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

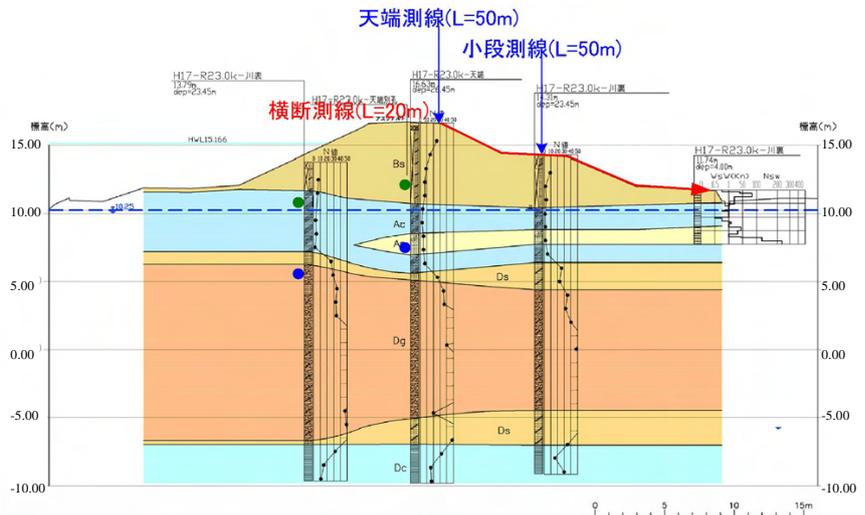


図-2 調査対象堤防の断面

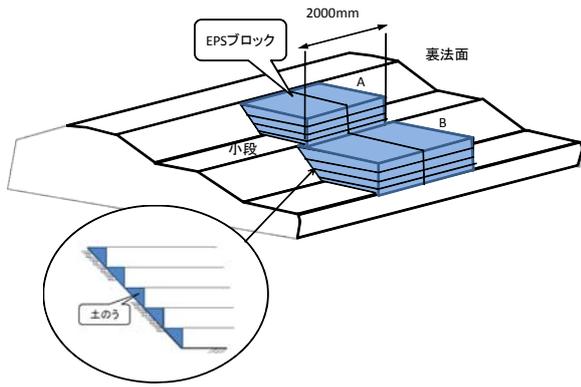


図-3 EPS 仮設ステージと土のうによる目地詰め

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、3.8m以深の基礎地盤では、S波速度 110~160m/s 程度でAc層、深度7~8m付近以深では、S波速度 200~230m/s に増加しDs層と示されている深度と判断されている。

4. EPS ステージを用いた堤防断面の表面波探査

(1) EPS の設置と表面波探査の概要⁴⁾

堤防断面を平坦化するために、EPS板 (DX35 (2m × 1m × 0.1m)) を緊結金具で地盤とEPS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-3)。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(図-4)。

(2) 計測された波形

小段側の表面波探査における起振位置を図-5に、と観測波形を図-6, 7に示す。EPS側からの起振した場合②(図-7)ではEPSを伝わる波が速く伝わっていることがこれよりわかる。また図-6の①の波形に比べ、図-7の②の方がEPS内の波形の乱れが大きい。これは、EPS板を緊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。

(3) EPSステージを用いた堤防断面の表面波探査

別途計測した小段縦断面方向の表面波探査結果を

図-9、EPSを使用して計測した横断面方向の結果を図-10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-10中の青色線で囲った右端上部が、EPS盛土部である。EPS部は、周辺地盤より硬いため、S波速度が速く表れている。図-9と図-10を比較してみると、0-2m深さまでS波速度が130-160m/s程度と比較的締まっ

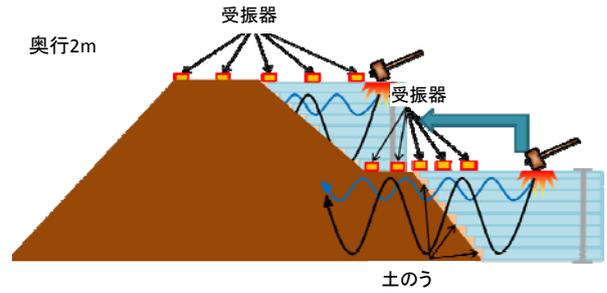


図-4 EPS ステージを用いた表面波探査⁴⁾

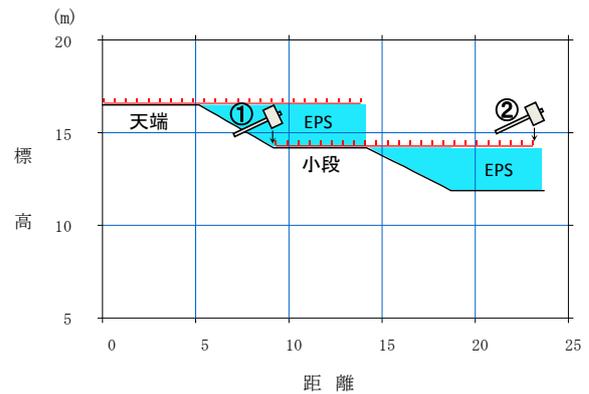


図-5 表面波探査におけるEPSと起振位置

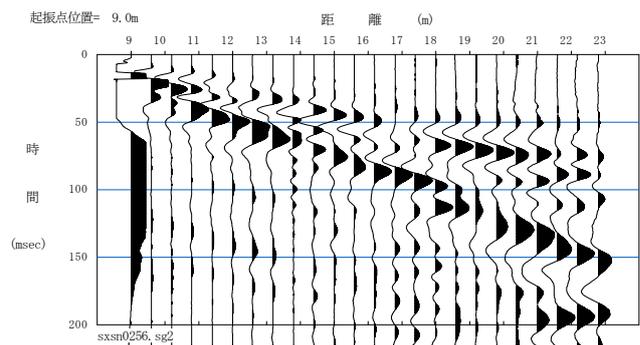


図-6 表面波探査における計測波形(起振位置①)

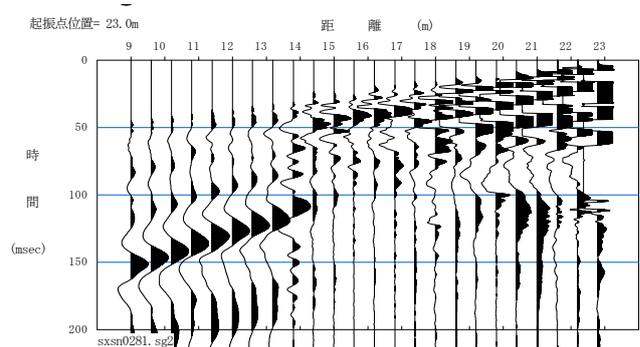


図-7 表面波探査における計測波形(起振位置②)

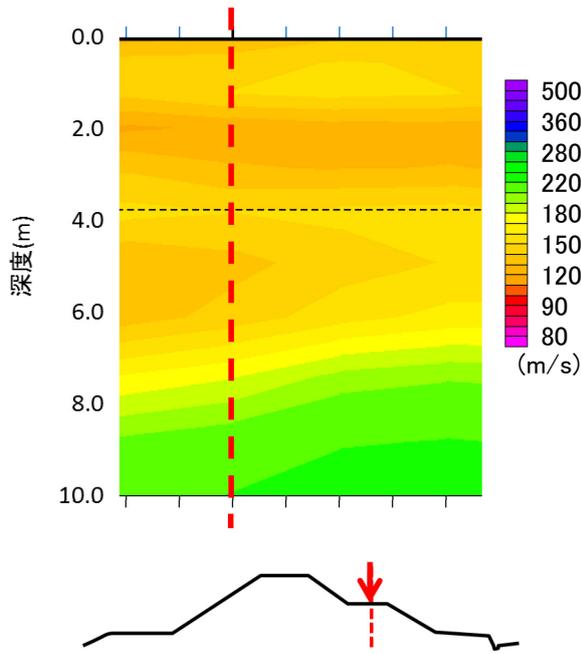


図-8 堤防縦断面の S 波速度の一部と調査箇所

ており、2-4m深さでは緩い状態が得られ、一致していることが分かった。横断面（図-9）では180m/sとなる層の深度がやや深くなっているが、深部ほど分解能が下がっていることが原因と推察される。

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。

5. 他の物理探査手法との検討

(1)電気探査による検証²⁾

次に計測された S 波速度構造（図-10）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、含水比が少ない土質と考えられる。図-11 は比抵抗値 ($\Omega \cdot m$) 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ので、別途、電気探査中に河川水を散水させ、散水開始時の比抵抗を基準に比抵抗の変化率(%)を求めたのが、図

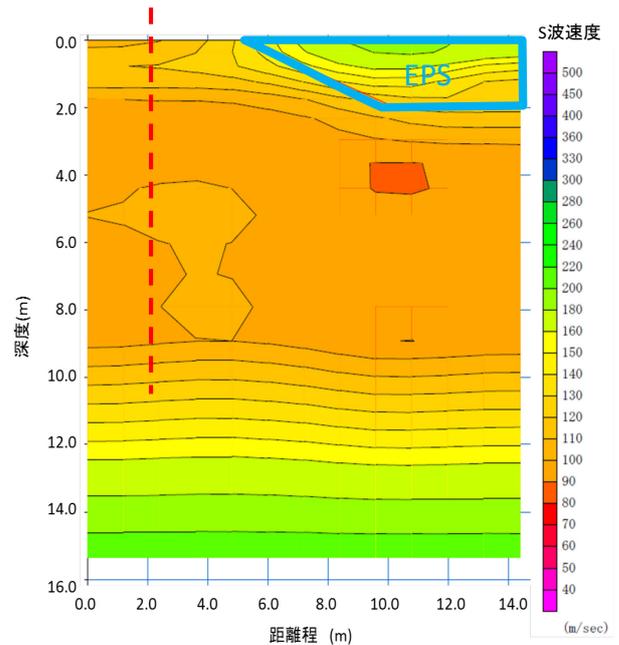


図-9 堤防横断面の S 波速度と調査箇所

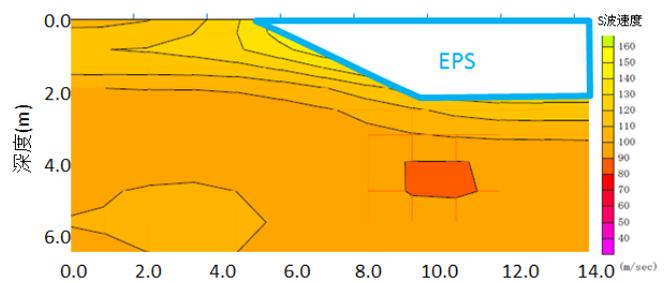


図-10 EPS 盛土利用した表面波探査結果 (S 波速度)

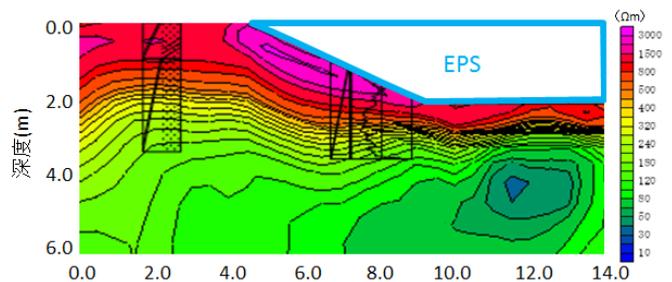


図-11 比抵抗値分布

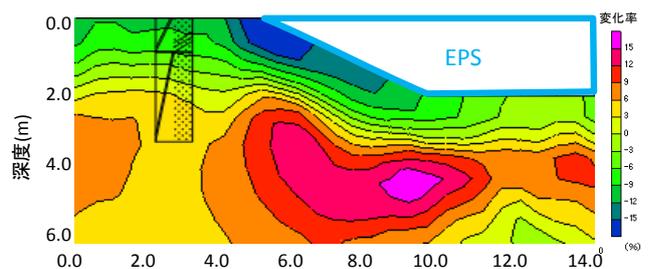


図-12 比抵抗値の変化率

-12 である。ここでの比抵抗値の変化率とは t 時刻の比抵抗値から散水開始時の比抵抗値の差を散水開始時の比抵抗値で除したあたである。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の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わかり、粘性土などの透水係数の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-10）を比較すると、小段肩およびのり面の浅層部が硬く（図-10 の黄色部、図-11 の赤色部）、深くなると軟らかい層の分布することが比抵抗探査結果からもわかり、築堤における盛土の様子を表れているものと推察される。のり尻部 2m 以下に S 波のやや遅い部分が表れているが、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を示している。これらの結果から、EPS 盛土を使った表面波探査の結果は、概ね他の物理探査結果とも整合していることが分かった。

(2) 地下レーダーによる検証

図-13 には地下レーダーの横断面の結果を示す。表層の盛土の境界が明瞭に捉えられており、のり面部の簡易貫入試験の結果（ゆるみ範囲）と図-11 の電気探査の高比抵抗部および地下レーダー探査の反射強度が強い範囲（明色）が一致していることがわかる。また、のり面に腹付けされた盛土

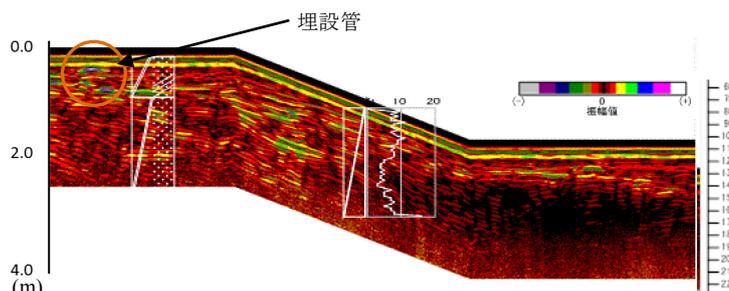


図-13 地下レーダーによる計測結果

の境界も捉えられている。地下レーダー探査の結果では、左上部の○に示す部分に埋設管がお皿をひっくり返した反射パターンが現れ検出されているが、先の図-11 の電気探査では、保護管はポリエチレン製で電流が流れにくいため、高比抵抗として検出されている。図-13 より地下レーダー探査で埋設管の位置を正しく捕らえていると判断される（埋設深度は 30cm～50cm 程度）。下段ののり面の法尻下部に見られる低比抵抗は、地下水位以下の粘性土を捕らえていると考えられ、地下レーダー探査の結果でも、深度 1 m 以深では電磁波が減衰して反射波が小さく（黒色）なっていることから、地下水位以下は比抵抗が低いことと一致している。

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、小段の裏のり尻下部右側、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率では、左の天端のり肩からのり尻部まで 2m 以深で変化が多いが右側では変化率が低く、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、小段の裏のり尻下部を中心に、SH 型簡易貫入試験を実施した。ここで示されていない上の小段には、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、埋設物がないことを確認している。そこで図-14 に示すように深さ 4m 弱までの貫入試験を SH 型貫入試験装置⁵⁾で行うこととした。

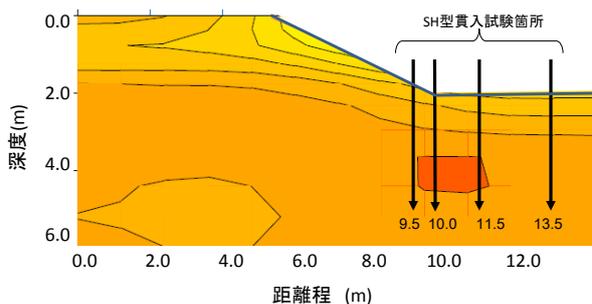


図-14 SH 貫入試験の貫入地点

ここで、表面波探査の結果の妥当性を検証するために、小段の裏のり尻下部を中心に、SH 型簡易貫入試験を実施した。ここで示されていない上の小段には、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、埋設物がないことを確認している。そこで図-14 に示すように深さ 4m 弱までの貫入試験を SH 型貫入試験装置⁵⁾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、小段のり尻部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、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-16 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、表層は川裏側へ行くほど、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のり尻下部1.0m~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 (0.7~1.7m

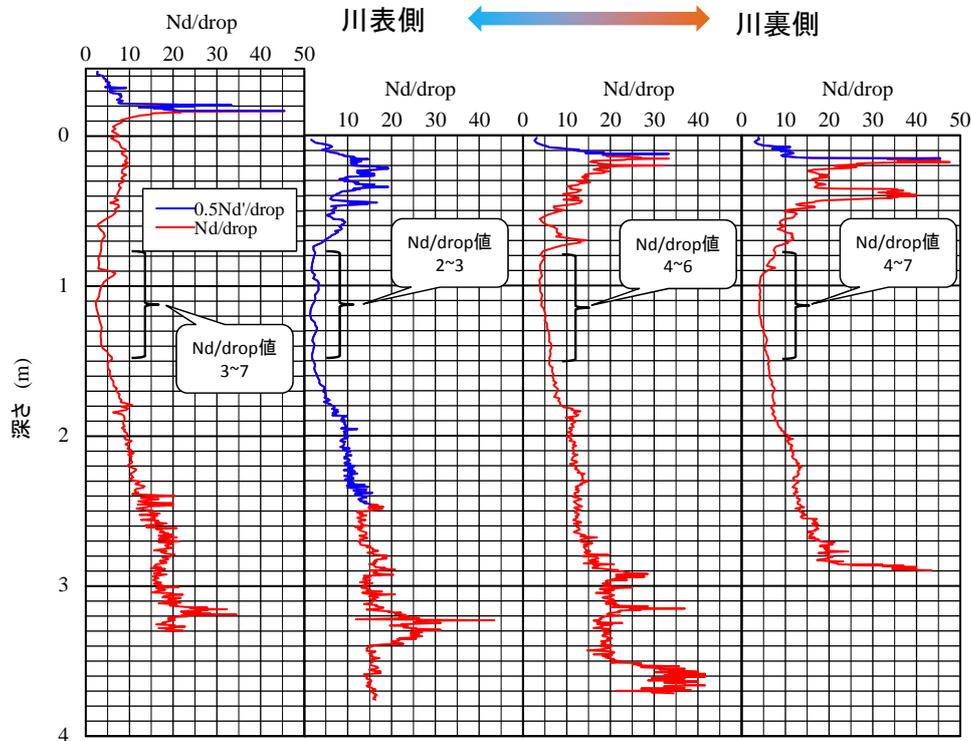


図-15 SH型貫入試験結果 (4本)

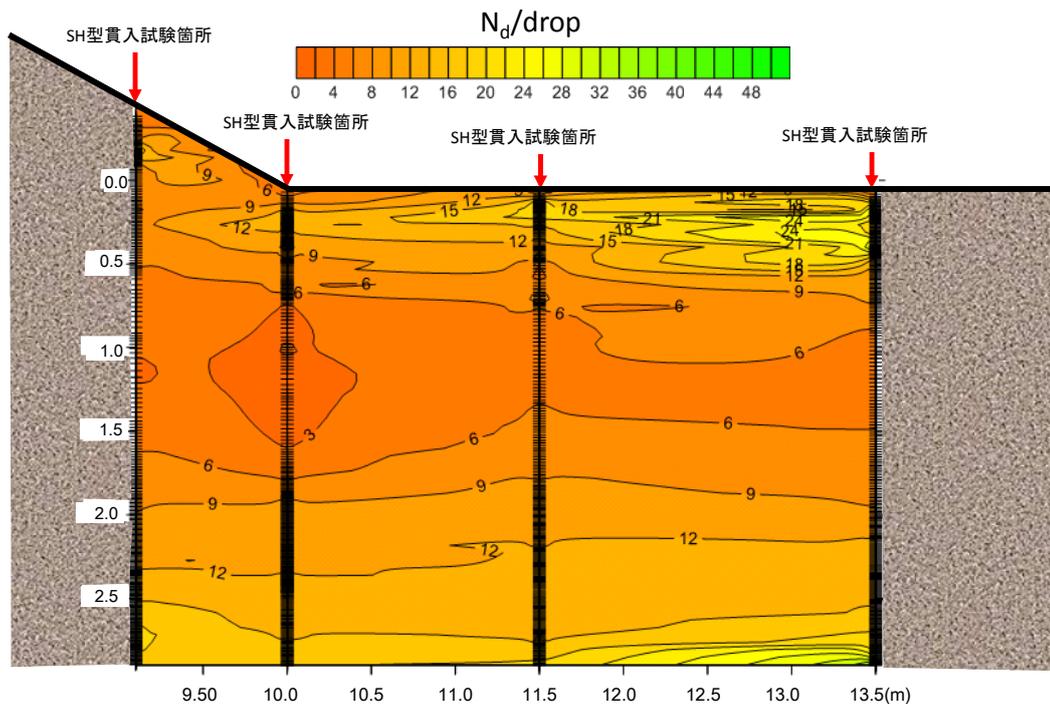


図-16 SH型貫入試験で得られた $N_d/drop$ のコンター図

の $N_d=2\sim 3$ 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、15mの水平距離であったため、深部での分解能が低下しズレが現れた点を考慮し、今後は、EPS板でなく、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を考えられる。

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、計測結果は概ね他の調査法結果を説明できており、計測の可能性が得られた。今後、EPSブロックの使用法や被災時の早急な診断や付帯構造物周りの評価など、改善することにより、簡便で堤体横断面のS波構造を得ることが実用化できると考えられる。

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) 地盤工学会（2001）：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.
- 2) 土木研究所・物理探査学会（2012）：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），4.1-4.12.
- 3) 末次忠司（2009）：河川の減災マニュアル，技法堂出版，p.3.
- 4) 杉井俊夫・横井達矢(2011)：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.
- 5) 表土層調査技術研究会（2009）：斜面崩壊対策におけるSH型貫入試験調査基準，pp.1-9.