

物理探査手法を用いたため池堰堤の物性評価

Evaluation of dynamic properties for embankment of irrigation pond by geophysical exploration methods

斎藤章彦*, 山中 稔**, 長谷川修一***, 野田 茂****
Akihiko Saito, Minoru Yamanaka, Shuichi Hasegawa, Shigeru Noda

*工修, 株式会社四国総合研究所, 土木技術部 (〒761-0192 高松市屋島西町 2109-8)

** 工博, 香川大学准教授, 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

*** 理博, 香川大学教授, 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

**** 工博, 香川大学教授, 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20)

In this study, the surface wave exploration and microtremor measurement were carried out at the embankment of irrigation pond. Resultant conclusion are as follows. (1)It became clear that the extraction of high velocity zone which is caused by impervious grout in the embankment was possible and that it was easy to distinguish the boundary between embankment and foundation. (2)The S-wave velocity of the embankment roughly indicated the value of 200-300m/s and N-value of 10-30. (3)Fourier spectral ratios of the horizontal component to the vertical component(called H/V ratio) were calculated and the predominant periods were recognized through them. It was approximately 0.3 second. (4)The S-wave velocity and the predominant period calculated by N-value roughly agreed with them got by the surface wave exploration and the microtremor measurement.

Key Words: surface wave, microtremor, predominant period, irrigation pond

キーワード: 表面波, 常時微動, 卓越周期, ため池

1. はじめに

水田を中心とした稲作農業には, 安定した水資源の確保が不可欠であり, 大きな河川の少ない瀬戸内地方では古来より, 数多くの農業用ため池が築造されてきた. 谷ら¹⁾によると, 記録に残る最古のため池は, 崇神 62 年 (360 年頃) に造られた依網池, 苜坂池, 反折池といわれている. 現在では, 全国に約 21 万箇所存在するといわれている²⁾.

近年, ため池周辺では都市化が急速に進み, ため池の水は, 農業用のかんがい用水としてだけでなく, 生活用水や防火用水としても用いられている. さらに, 地域住民の親水空間, 小動物などの生息空間といったビオトープとしての利用も進んでおり, ため池は, 地域の農業と住民の生活に密接に関わっている.

しかし, ため池の多くは築造年代が古く (多くは江戸時代以前), 老朽化が進んでいるため, 堤体の安定性の低下が懸念されているものが少なくない. 特に, 豪雨や地震などの自然災害の発生時には, このような老朽化したため池に被害が発生する事例が数多く報告されている. 1995 年兵庫県南部地震では, 1,200 箇所以上の農業用ため池が多大な被害を受け, 液状化により崩壊したものもある³⁾. また, 2004 年新潟県中越地震でも 560 箇所余りのため池が沈下や亀裂等の被害を受けている⁴⁾.

今後, 南海・東南海地震をはじめとする大規模地震に備えるためにも, 老朽ため池の改修や地域・地盤特性に応じたため池の耐震対策が課題となっている.

堤体の耐震性評価においては, 堤体の S 波速度構造の把握が不可欠である. そのために, 従来からボーリング孔を利用した PS 検層や標準貫入試験から得られる N 値が用いられているが, これらは 1 次元的情報にすぎず, 2 次元あるいは 3 次元的地盤構造の把握は技術者の判断に頼ってきた. 特に, ため池堤体のように延長が長い土構造物の場合, ボーリングによる方法は, 地盤構造の把握に多大な時間と費用を要することから, 簡便かつ低コストで行える調査手法が求められている. また, 小規模なアースダムであるため池は, 数も多く, 詳細に耐震性を検討することは実用的ではない.

このため, 本研究では, 老朽ため池の簡便な耐震性評価手法の開発を目的として, 手法の検討を行った. 谷⁵⁾は, アースダムを対象として, 地震被害分析から被害要因を把握するとともに, 堤体および基礎地盤の N 値および土質分類から, 簡易耐震診断を行う方法について検討を行っている. しかし, 表面波探査等の非破壊物理探査を用いたため池堰堤の動的物性評価を行った事例は, ほとんど見あたらない. 林ら⁶⁾によって開発された人工振源による表面波探査法は, 近年, 河川堤防⁷⁾や盛土⁸⁾等への適用が試みられ有効性が確認されている. また, 常時微動測定は, H/V スペクトル比を用いることで地盤の卓越周期を安定して推定できること, また増幅特性についても大まかではあるが把握できることが確認されている⁹⁾. 本論文では, これら 2 つの手法を用いたため池堰堤の動的物性評価の可能性について検討した結果について述べる.

2. 調査ため池の概要

2.1 ため池の概要

物理探査手法の適用性を検討する場合、既往調査により詳細な土質構造が明らかになっていることが望ましい。そのような地点として、図-1に示すため池（上水用貯水池）を選定した。このため池は、総貯水容量576千 m^3 、堤高17m、堤頂長約500mの中央鋼土型のアースダムであり、昭和29年に完成した比較的新しいため池である¹⁰。

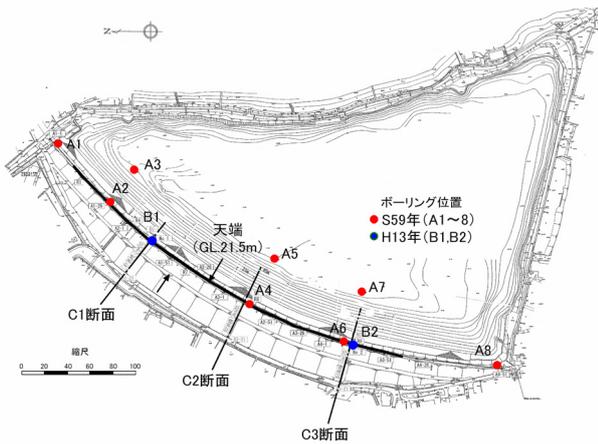


図-1 調査ため池平面図

2.2 堤体の土質構造

調査ため池では、これまでにボーリングをはじめ、レイリー波探査（起振機を使用）や電気探査等が行われており、図-2および図-3に示すように、土質構造が明らかになっている¹⁰。これら調査結果によれば、堰堤の土質構成は、上位から、堤体盛土、基礎地盤（沖積河川堆積物）および基礎岩（風化花崗岩、マサ土）の3層に大別できる。

このうち、堤体盛土は、N値10以下の砂質土主体の上部層と、N値10~20の粘性土主体の下部層からなる。基礎地盤を構成する沖積河川堆積物は、主に砂礫土からなり、N値20以上、層厚

10~15m程度と推定されている。堤体右岸側の地山との境界に存在する崖錐堆積物は、N値30以上と河川堆積物に比べてよく締まった地盤である。堰堤中央部では基盤岩まで達するボーリングがなく詳細な基盤深さは不明であるが、レイリー波探査等からGL-35m程度が基盤深さと推定されている。

左岸側の堤体盛土部は、昭和60年代に地盤改良（セメントミルク注入による遮水グラウト）が施されており、未改良部に比べてN値が倍程度大きくなっている。また、レイリー波探査からS波速度が150m/s以下の低速度帯の存在が確認されている。この領域はN値が極端に小さい箇所に対応している。

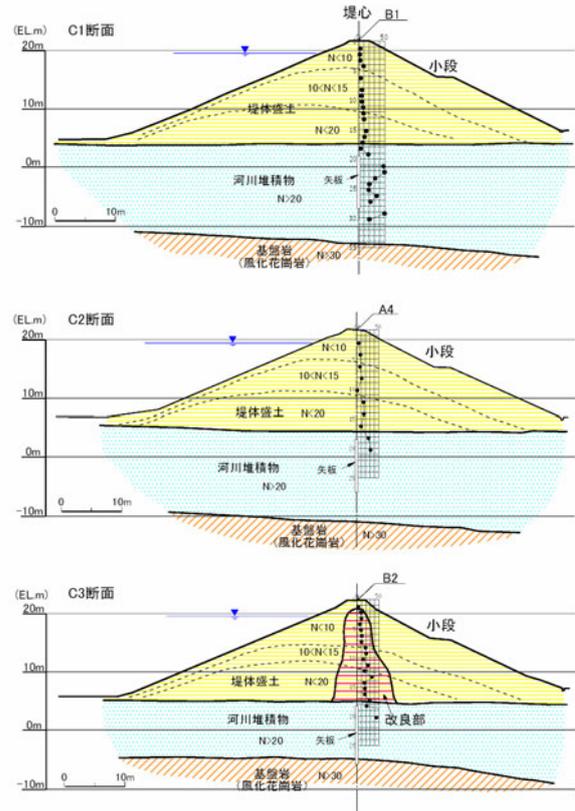


図-2 各断面における土質横断面

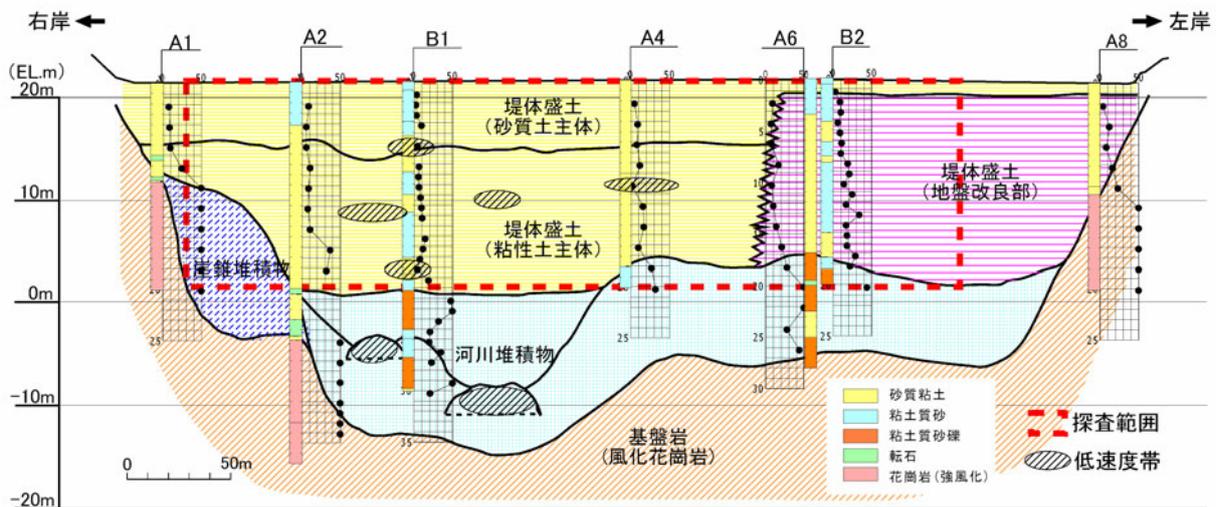


図-3 堰堤中心部における土質縦断面

3. 表面波探査によるS波速度構造の推定

3.1 表面波探査の概要

表面波探査は、地表面に沿って伝播する表面波を観測し、その分散性を利用して地盤構造、特にS波速度の地盤内の変化を推定する手法である¹⁾。

表面波を発生させる振源としては、起振器によって地盤を振動させる方法と打撃などにより、衝撃波を発生させる方法がある。

既往のレイリー波探査は、起振機および2個の検出器を直線上に配置し、段階的に周波数を変えた振動を地盤に与え、周波数ごとに、検出器を通過する波の伝播時間を測定することにより速度を算出するものであり、探査深度は40m程度である。

これに対して、今回使用した表面波探査は、図-4に示すように、カケヤにより地表面を打撃し、地表付近を伝わる表面波を多チャンネル(24ch)で測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤のS波速度分布を求める方法である。起振機を用いる方法に比べて、探査深度は劣るものの、広範囲を迅速かつ低コストで調査できること、2次元的なS波速度構造を簡単に把握できる利点がある。

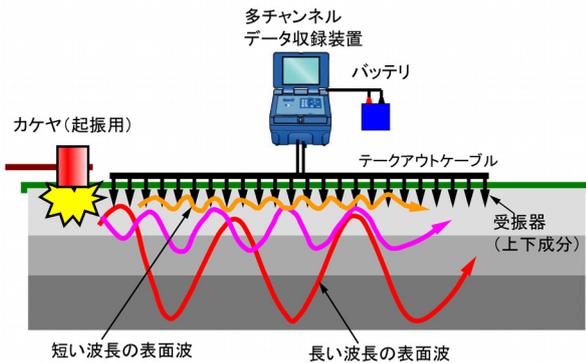


図-4 表面波探査の概念図⁶⁾

3.2 測定方法

表面波探査の解析は、水平成層の仮定のもとで行われるため、測線はなるべく水平に設置することが望ましい。そこで、高盛

土への適用例⁸⁾から、ため池堤体においても堤軸方向に測定を行えば、この条件は満たされるものと考えられる。測定は図-1に示す堤体天端上の測線(L=350m)で実施した。地表面に1m間隔で固有周波数4.5Hzの速度型地震計を24個設置し、2m間隔でカケヤを用いて起振を行った。

3.3 探査結果および考察

図-5に表面波探査の解析結果から得られたS波速度構造を示す。堤体のS波速度は、表層2m程度は170~200m程度の低速度を示すが、大部分のS波速度は、概ね200~300m/sの値を示す。左岸側の盛土部は、S波速度が300m/s以上と大きくなっている。この区間は、地盤改良箇所に対応しており、S波速度構造の変化から地盤改良範囲を推定できる可能性を示している。後述のように、既往のレイリー波探査では、地盤改良部のS波速度は、300~450m/sと推定されており、今回の探査結果は、これとよい対応を示している。

また、右岸側GL-10m以深にみられるS波速度300m/s以上の部分は、崖錐に対応している。

以下に探査結果についてまとめる。

①GL.0~-5m 区間

表層のS波速度は概ね170~200m/sで大きな変化は見られない。特に地表面近くにはS波速度が170m/s程度の低速度層が存在する。この範囲は、既往調査結果から砂質土主体の上部盛土層に相当するものと考えられる。

②GL.-5~-18m 区間

S波速度は、200m/sから300m/sへと深度とともに次第に大きくなる層構造を呈している。粘性土主体の下部盛土層に相当するものと考えられる。

③GL.-18m 以深

S波速度は300m/s以上の値を示している。GL.-18m付近に出現する顕著な速度境界は、堤体盛土と基礎地盤との層境界に対応するものと考えられる。

④低速度帯

既往のレイリー波探査で見られたような低速度帯は、今回の探査結果からは確認できなかった。

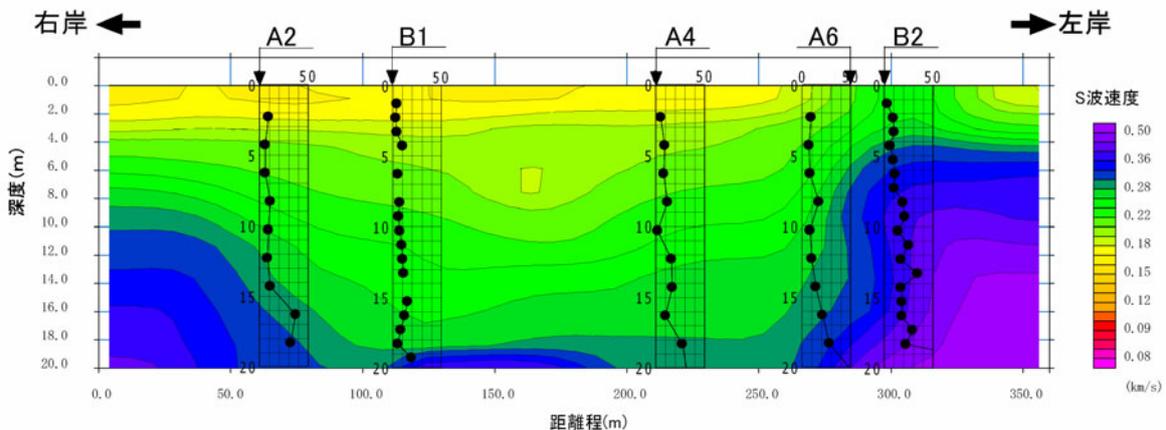


図-5 表面波探査解析結果 (S波速度構造)

図-6は、Imaiら¹²⁾による国内のさまざまな地盤（埋立土、沖積層、洪積層、第三紀層）に対して標準貫入試験から得られたN値とPS検層によるS波速度との関係を示したものである。砂質土（黒塗りマーク）と粘性土（白抜きマーク）とは若干傾向が異なり、同一のN値に対して粘性土は砂質土よりも高いS波速度を示している。図には、今回表面波探査から得られたS波速度と標準貫入試験によるN値との関係（赤丸）をあわせて示した。

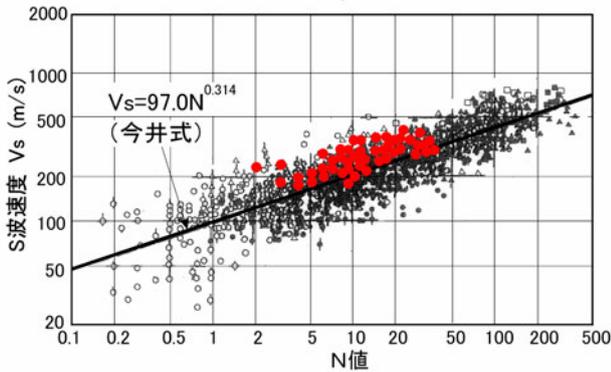


図-6 N値とS波速度の関係¹²⁾

両者の関係は、土質や調査方法の違いなどもありやや傾向が異なっているが、概ね既往データのばらつきの範囲内にある。そこで、図に示した回帰式を用いてS波速度からN値に変換した。図-7に以上のようにして求めた推定N値断面図を示す。推定N値は、標準貫入試験による結果よりも若干大きくなっているが、概ね傾向は一致している。実測N値を用いた変換式を用いることにより適合性は向上するものと考えられる。

図-8にこれら探査結果より推定される土質断面図を示す。また、表-1に得られた解析結果と既往資料との比較から得られたS波速度と土質の対応を示す。ため池堰堤の土質構造は、S波速度構造から、堤体盛土（砂質土主体）、堤体盛土（粘性土主体）、基礎地盤の3層に区分することが可能である。

表-1 S波速度と対応する土質構造

	S波速度 (m/s)	層厚 (m)	推定 N 値	対応する土質
第1層	170~200	5~8	~10	堤体(砂質土)
第2層	200~300	10~13	10~30	堤体(粘性土)
第3層	300~	—	>30	基礎地盤 堤体(改良部)

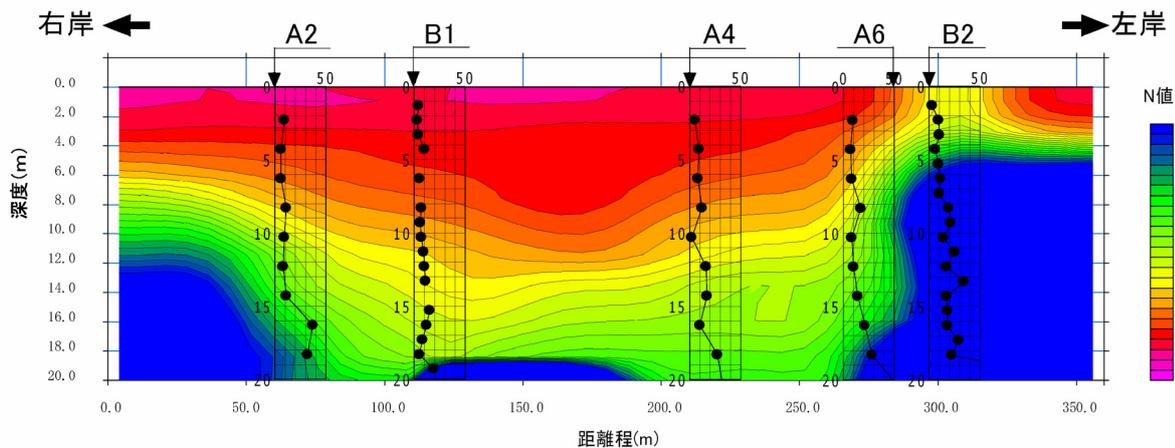


図-7 推定N値断面図

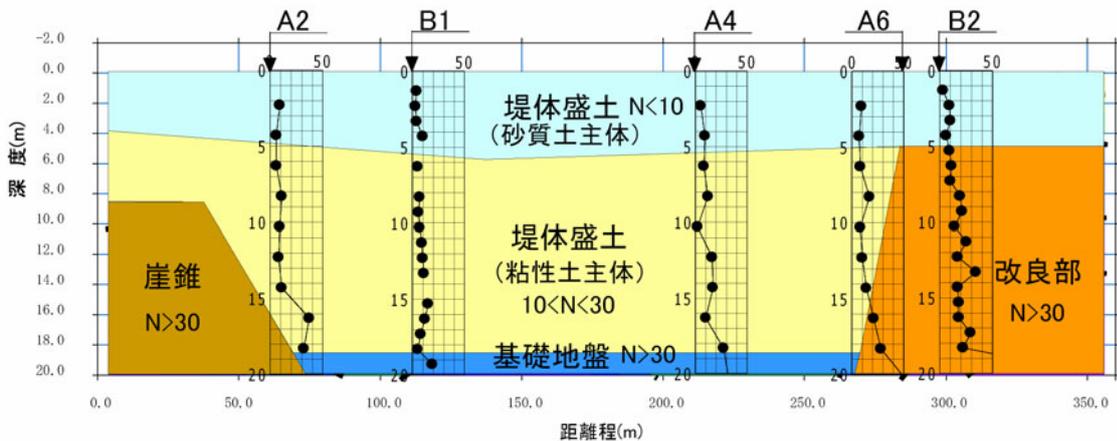


図-8 推定土質断面図

図-9 は既往のレイリー波探査結果と今回の表面波探査結果を比較したものである。図より、今回の探査結果は、地表面近くで若干S波速度が大きくなっているが、両者は非常によい対応を示していることが確認できる。

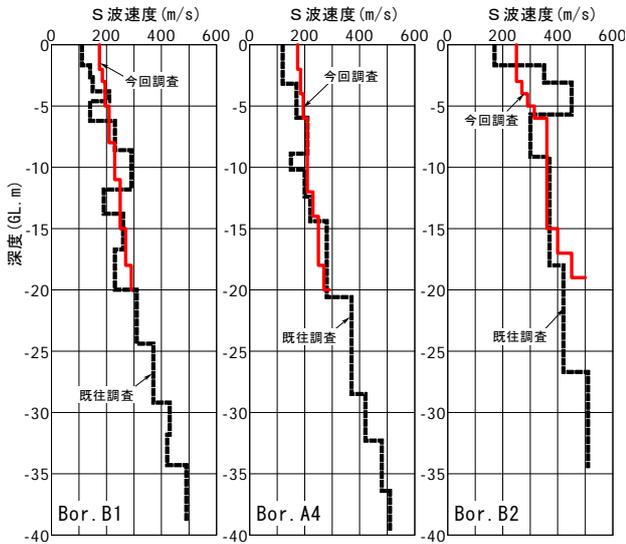


図-9 既往調査結果との比較 (S波速度分布)

4. 常時微動測定による卓越周期の推定

4.1 微動測定の概要

ため池堤体の振動特性を把握するため、常時微動測定を行った。常時微動の測定には、0.1~70Hz まで計測可能な3成分サーボ型速度計（東京測振機製、VSE-15D）と携帯型記録計（SPC-35N）を用いた。周波数総合特性としては、0.3~30Hz の間でフラットな特性を有している。

微動測定は、図-10に示すように堤体天端上に、右岸側から左岸側に向けて合計15測点を設定した。各測点に速度計を置き、1地点当たりサンプリング周波数100Hzで3分間ずつ2回の測定を行った。センサーの方向は、堤軸直交方向（以下、上下流方向）、堤軸方向および鉛直方向とした。

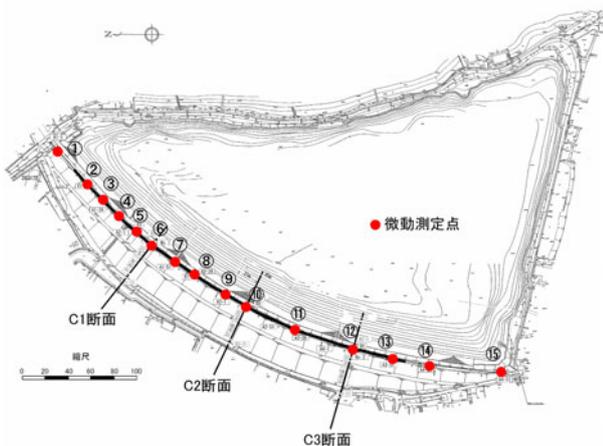


図-10 微動測定位置

測定した微動記録（速度波形）を20.48秒に区分し、ノイズの少ない部分を10個抽出し、フーリエスペクトルを求め、バンド幅0.3HzのParzen Windowにより平滑化した。微動観測記録から地盤振動特性を効率的に抽出する方法として、中村によるH/Vスペクトル比¹³⁾を用いる。この方法は、水平動と上下動のフーリエスペクトル比がピークを示す周期やH/V比の値から、地盤の卓越周期や増幅倍率を推定するものである。堰堤では、上下流方向の振動が卓越するものと考えられることから、H/Vスペクトル比は上下流方向と上下方向の比で整理した。

4.2 堤体の振動特性

既往の研究¹⁴⁾から、本ため池堰堤の振動周期は、0.4秒程度以下と推察される。そこで、堤体の振動特性を抽出するため、以下では周期範囲を0.1<T<1.0秒に限定して分析を行った。堤体全長にわたるH/Vスペクトル比の分布（コンター図）を図-11に示す。図中赤の破線は、H/Vスペクトル比の等値線の尾根部を結んだ稜線を示す。図より、周期は右岸側測点①での0.18秒から堤体中央部に向けて次第に長くなり、測点⑧および⑨では0.4秒程度の値を示す。その後左岸側にかけて短くなり、左岸側測点⑮では0.27秒程度を示す。

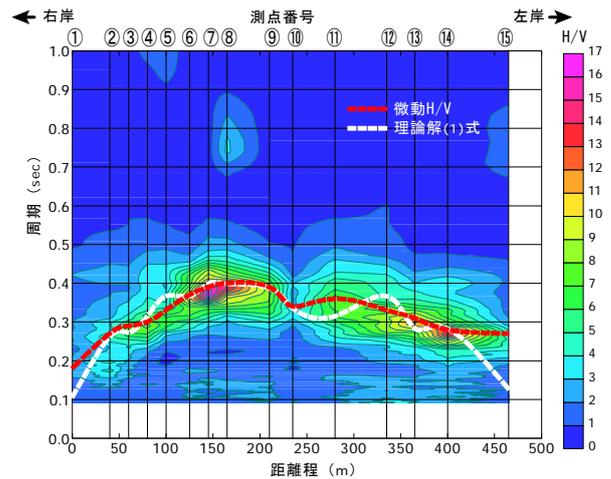


図-11 H/V スペクトル比の分布

堤長Lが堤高Hに比べて非常に大きい場合(L/H>4)には、その挙動は2次元的と考えられる¹⁵⁾。本ため池ではL/H>10であり、3次元的挙動よりも2次元的挙動が卓越するものと考えられる。さらに、堤高Hの三角形断面を持つ土堰堤の2次元せん断自由振動周期Tは、(1)式で表される¹⁵⁾。ただし、せん断波速度cは一定とする。

$$T = \frac{2\pi H}{c\lambda_s} = 2.62 \frac{H}{c} \quad (1)$$

ここに、

H: 堤高

c: せん断波速度

λ_s : s次の定数($\lambda_1 = 2.4048$)

(1)式より各測点での周期を求めると白い破線のようになる。ここで、堰堤の高さ H は基礎地盤を含めた基盤までの深さとした。また、せん断波速度は、図-5に示すように、各断面で深度方向に変化しているが、堤体および基礎地盤の平均的なS波速度として各断面とも $c=250\text{m/s}$ と仮定した。実測による卓越周期と理論周期を比較すると、堰堤中央部ではほぼ同じ変化をしており、仮定したS波速度がほぼ妥当であることがわかる。断面①および②付近でやや違いが見られるが、その理由として、用いたS波速度あるいは基盤深度の影響が考えられる。これより、各断面における卓越周期は基盤深さの影響を強く受けていることが指摘できる。しかし、左右岸地山近くでは大きく異なっており、地山による拘束条件が影響していることが示唆される。

基盤岩($V_s=450\text{m/s}$ 以上)を基盤として算出した堰堤-基礎地盤系の伝達関数を一次元重複反射解析により求めた結果を図-12に示す。堤体および基礎地盤のS波速度は図-9に基づき設定した。図より H/V スペクトル比の卓越周期と伝達関数による値は概ね一致することから、堰堤-基礎地盤系の一次固有周期は常時微動を用いて簡便に把握できることがわかった。また、堰堤の振動は基礎地盤の影響を強く受けること、基盤岩までの深度に応じて1次固有周期が変化することがわかる。

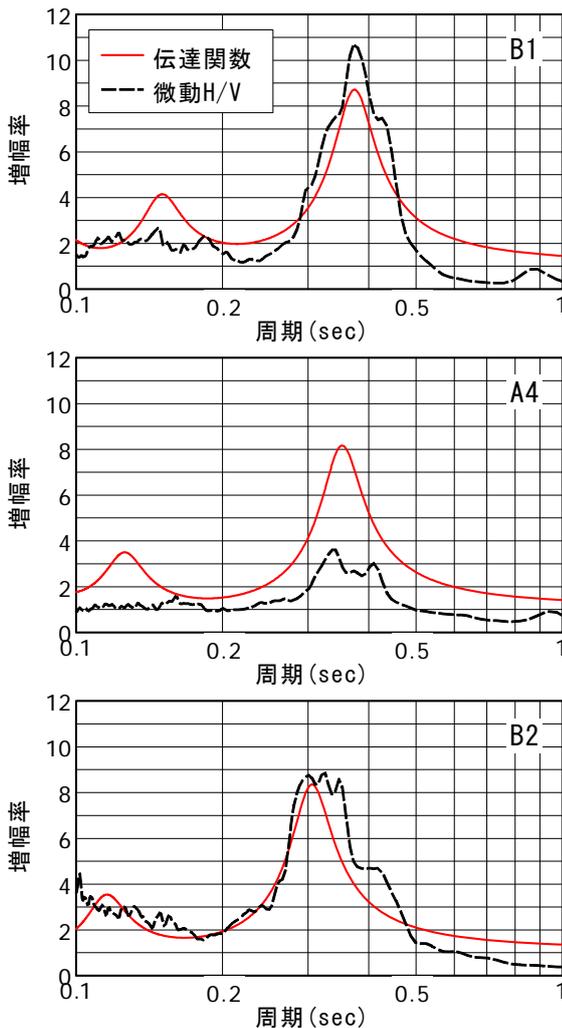


図-12 堰堤-支持地盤系の一次固有周期の比較

5. 堰堤の簡易耐震性評価

堰堤の地震被害は、地震動特性と堤体および基礎地盤の振動特性に大きく依存する。振動特性を表す指標として、地盤の平均S波速度、卓越周期および増幅率が考えられる。

S波速度は、地盤の締まり具合(密度、剛性)を表す指標であり、S波速度が遅い(剛性が低い)ほど地盤は揺れやすく、被害が生じやすい。また、卓越周期は地盤が軟らかいほど、また層厚が厚いほど長くなることから、剛性と層厚を反映した指標と考えられる。そこで、これらの指標を用いて堰堤の耐震性を相対的に評価できるものと考え、そのイメージを図-13に示す。すなわち、平均S波速度が同程度の堰堤でも、基礎地盤の影響を受けて卓越周期や、増幅率に違いが現れることが予想されるため、図の左上にプロットされるものは、右下にプロットされるものより剛性が大きく、層厚も小さいことから耐震性に優れていると評価できる。これにより、堰堤ごとあるいは断面ごとの相対的な耐震性評価が可能になる。改修計画や耐震対策立案にあたって優先順位を決める必要がある場合など非常に有効と考えられる。今後、多くのため池で同様の測定をおこなってデータを蓄積するとともに、過去の被害事例を分析することにより、被害の有無をこれらの指標を用いて判断することも可能と考えられる。

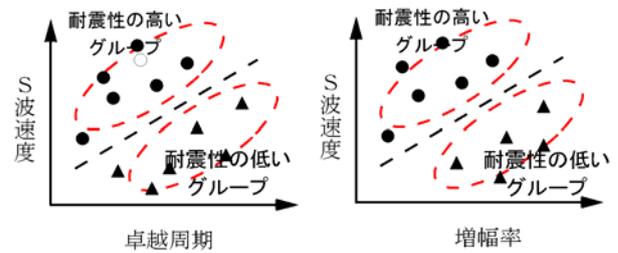


図-13 ため池堰堤の簡易耐震性評価(イメージ図)

表面波探査によって求められたS波速度は、既往の換算式を用いてN値に換算することができることから、ボーリングによらず地盤の締まり具合を簡易に評価できる。そのような方法として図-7に示した推定N値断面図と表-2に示すTerzaghi-PeckによるN値と相対密度の関係¹⁶⁾を用いて、堤体の締まり具合について検討する。本ため池堤体は、砂質土主体の上部堤体はS波速度による推定N値が10以下でやや密度が小さいものの、粘性土主体の下部堤体は推定N値が10~30であることから、堤体の締まり具合としては、標準的な状態にあると考えられる。

表-2 Terzaghi-PeckによるN値と相対密度の関係¹⁶⁾

N 値	相対密度
0~4	非常に緩い (very loose)
4~10	緩い (loose)
10~30	中位の (medium)
30~50	密な (dense)
>50	非常に密な (very dense)

6. まとめ

以上、本研究ではため池堰堤を対象として、これまでほとんど事例がなかった物理探査手法を用いた動的物性評価の可能性について検討した。すなわち、堤体および基礎地盤の2次元的なS波速度構造の把握、ならびに振動特性の把握を目的として表面波探査および常時微動測定を行い、既往の調査結果と比較することにより、各手法の適用性・有効性を確認した。本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- ①表面波探査により、堤体内に施工された地盤改良に起因すると考えられるS波速度の大きいゾーンを検出することができた。また、堤体盛土部と基礎地盤の境界を明瞭に判別することができた。表面波探査手法は堤体の土質構造調査に効果があることが確認できた。しかし、低密度層や弱層部等の局所的な低速度帯を抽出することはできなかった。今後、分解能の向上をはかるとともに適用限界等詳細な検討が必要である。
- ②表面波探査結果は、既存のボーリング結果と概ね整合しており、N値とS波速度の相関もよく、堤体および基礎地盤の強度をある程度把握できることが確認できた。
- ③常時微動測定により、堤体の振動特性を簡便に把握できることがわかった。その結果、対象としたため池堰堤の基本周期は概ね0.3秒と推定された。また、各測点における卓越周期は基盤深さの影響を強く受け、堤軸方向に大きく変化することがわかった。これは、堰堤中央部では左右の揺れの違いにより大きなせん断ひずみが生じる恐れがあり、線状の土構造物の耐震安定性を考える上で重要な知見と考えられる。ため池堰堤の中には堤体が大きく湾曲したものも多いため、今後、多点同時観測を行うことにより、堰堤の振動モード等を把握する必要がある。
- ④表面波探査から得られる堰堤の平均S波速度と常時微動測定による卓越周期および増幅率の関係をを用いて堰堤ごとの相対的な耐震性を簡便に評価できる可能性を示した。このような整理は、改修計画等にあたって優先順位を決める上で有効と考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたって、調査箇所および貴重な資料をご提供いただいた高松市水道局の関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷 茂, 堀 俊和: 日本におけるため池を含めた農業用フィルダムの地震災害に関する研究, 農業工学研究所報告, 第37号, pp.51-90, 1998.
- 2) 農林水産省構造改善局地域計画課: ため池台帳(全国集計編), 1991.
- 3) 谷 茂: 兵庫県南部地震によるアースダムの被害について, 大ダム, No.160, pp.10-15, 1997.
- 4) 関川 力: ため池および養鯉施設の被害, 基礎工, Vol.33, No.10, pp.97-100, 2005.

- 5) 谷 茂: 既存アースダムの地震被害と安全性評価について, 大ダム, No.140, pp.32-50, 1992.
- 6) 林 宏一, 鈴木晴彦, 斎藤秀樹: 人工振源を用いた表面波探査の開発とその土地地質調査への適用, 応用地質技術年報, No.21, pp.9-39, 2001.
- 7) 岡田 聡, 林 宏一, 泊 耕一, 井上宗雄, 藤野 隆: 表面波探査の河川堤防への適用例, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.39-40, 2003.
- 8) 中山文也, 林 宏一, 石田章司: 高盛土のS波速度構造把握への表面波探査の適用, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.143-144, 2001.
- 9) 中村 豊: H/V スペクトル比について, 物理探査学会地震防災研究会資料, 2007.7.
- 10) 斎藤章彦, 山中 稔, 長谷川修一, 向谷光彦: 人工振源を用いた表面波探査法のため池堤体および河川堤防への適用例, 最近の地盤調査・試験法と設計・施工への適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.17-22, 2006.
- 11) (社)地盤工学会: 地盤調査法, pp.103-104, 1997.
- 12) Imai, T. & Tonouchi, K.: Correlation of N-Value with S-wave Velocity and Shear Modulus, Proceedings of the 2nd ESPT, pp.67-72, 1982.
- 13) 中村 豊: 常時微動に基づく表層地盤の地震動特性の推定, 鉄道総研報告, Vol.2, No., pp.18-27, 1988.
- 14) 岡本舜三: 耐震工学, オーム社, 1971.
- 15) 畑中元弘: 土堰堤の振動に関する3次元考察—自由振動について—, 土木学会誌, Vol.37, No.10, pp.1-6, 1952.
- 16) Terzaghi, K. & Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, 1948.

(2007年9月18日受付)