

表面波探査および常時微動を用いた ため池堰堤の増幅特性評価

斎藤 章彦¹・長谷川修一²・山中 稔³・香川 慶孝⁴・林 宏一⁵

¹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)

E-mail:asaito@sken.co.jp

²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)

E-mail:hasegawa@eng.kagawa-u.ac.jp

³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)

E-mail:yamanaka@eng.kagawa-u.ac.jp

⁴香川大学 工学部安全システム建設工学科(〒761-0396 高松市林町2217-20)

E-mail:s03t016@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp

⁵応用地質(株) 技術本部技術研究所(〒305-0841 つくば市御幸が丘43)

E-mail:hayashi-kouichi@oyonet.oyo.co.jp

本研究の目的は、表面波探査と常時微動測定によりかんがい用ため池の増幅特性を簡便に求める方法を開発することである。本研究では、ため池の型式を、皿池、台地池、麓池、山池の4つ分類した。堤体の平均S波速度は、沖積平野に位置する皿池では小さく、山間部の麓池や山池で大きくなる傾向が見られたが、基礎地盤を構成する沖積層のS波速度には、ため池の型式による違いはほとんど見られなかった。ため池地点における地盤の卓越周期は、皿池では0.5秒程度と長く、山池では0.2秒以下であった。堤高と堤体のS波速度および卓越周期の関係については正の相関が、また、堤体の卓越周期と増幅率については、負の相関関係がみられ、堤体の増幅特性は、基礎地盤や堤体の振動特性を強く受けることがわかった。

Key Words : *S-wave velocity, irrigated pond, surface wave survey, microtremor, predominant period,*

1. はじめに

香川県は、年降水量が約1,200mmと少ない上、水量豊かな河川も少ないために、昔から農業用水源としてのため池の築造が盛んに行われてきた。現在、香川県内には、約14,600箇所のため池(全国第3位)が存在するが¹⁾、これらため池の多くは、今から約400年前に築造されたものといわれており、中には満濃池のように、8世紀初頭に築造されてから既に1,300年以上も経過したのものもある。そして、ため池は現在でも水田農業に重要な役割を果たしているものの、経年に伴う老朽化が進み、近年では水田面積の減少および個人や小水利組合の管理物が多いという条件下で、必ずしも十分な維持・管理がなされていない状況にある。その上、近年に築造された大規模なものを除けば、大部分が土堰堤による小規模な貯水池であり、構造的にも自然災害による被害を受けやすい条件を有している。災害によるため池の損傷は、構造物の破損や排水域の水害にとどまらず、作付け制限や代替

用水の確保等農業生産へも大きな影響を及ぼすと考えられる。また一方では、洪水時には、ため池の持つ貯水・保水機能により、下流の住宅や公共施設等を守るなど、地域防災上も重要な役割を担っている。

過去に発生した地震被害を見ると、1995年兵庫県南部地震では、1,300箇所以上のため池に被害が生じ²⁾、2004年新潟県中越地震でも560箇所あまりのため池が甚大な被害を受けている³⁾。近年、ため池周辺では都市化が進み、環境が大きく変貌した。さらに、今世紀前半には南海地震をはじめとする巨大地震の発生が予想されている。香川県においても過去の南海地震によって、ため池決壊の記録が残されている⁴⁾。南海地震等による被害を軽減するためには、老朽ため池の耐震診断を早急に実施し、対策を講じる必要がある。

本研究の目的は、かんがい用ため池を対象として、表面波探査により堤体のS波速度分布を求めるとともに、常時微動測定を併用することにより、堤体の耐震性を簡便に評価できる手法を開発することである。

2. 調査方法

(1)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)を多チャンネルで測定・解析することにより、深さ20m程度までの地盤のS波速度を簡便に求める技術である⁵⁾。

図-1に人工振源を用いた表面波探査の探査原理を示す。カケヤ等により地表面を打撃すると弾性波が発生し、地中ならびに地表を伝播していく。このうち、地表近くを横方向に伝播する波が表面波である。

不均質な地盤の表面付近を伝わる表面波は、その波長(周波数)によって伝播速度が変化する。一般の地盤では、深度とともに、弾性波速度が増加するが、表面波は長い波長ほど深部の速度も反映するので、短い波長(高周波数)では速度が低く、長い波長(低周波数)では速度が高くなる。波長による伝播速度の違い、すなわち、分散を逆解析することにより、不均質な地盤のS波速度を求めることができる。

ため池堰堤の天端上に測線を設け、1m間隔に固有周波数4.5Hzの速度型地震計を24個設置した。起振は1mまたは2m間隔でカケヤを用いて行い、起振終了後起振点および受振点を1mまたは2m移動して測定を行った。

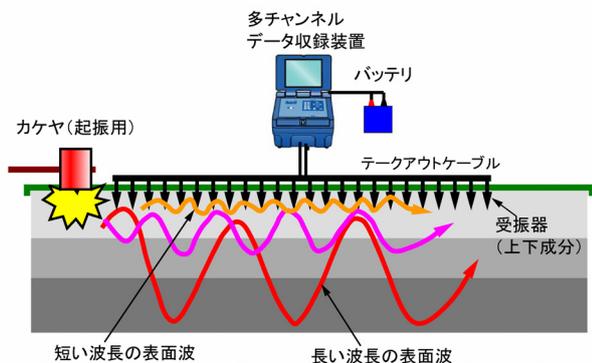


図-1 表面波探査の原理

(2)常時微動測定

微動測定には携帯型記録計(SPC-35N)とサーボ型速度計(VSE-15D)を使用した。堰堤の天端と下流側地盤上で微動の同時測定を行った。サンプリング周波数100Hzで5分間の測定を行った。測定波形の中からノイズの少ない20.48秒間のデータを10個取り出し、成分ごとのフーリエスペクトルを求めた。水平成分と鉛直成分のスペクトル比(H/Vスペクトル比)⁹⁾を算出することにより、堰堤の振動特性(卓越周期)を把握することができる。また、天端と地盤における水平成分のスペクトル比を取ることにより、水平成分の振動の増幅特性を把握することができ

る。なお、スペクトルはバンド幅0.3HzのParzenウィンドウにより平滑化を行った。

3. 調査ため池

香川県内において、現在改修等が予定されているため池を中心に、図-2に示す約40箇所を選定した。選定にあたっては、ため池の立地する地形・表層地質のほか、池の構造や地域性なども考慮して決定した。図-3に香川県における地形分類と調査ため池の位置を、また表-1および表-2に調査ため池の個数を示す。

ため池は谷地形を流れる水を直接せき止めて造られた谷池と、河川や水路から水を引き込んで貯水した皿池に大別される。本研究では、谷池を図-4に示すように立地条件・構造形式により、山池、麓池、台地池に細分類した。山池は山間部の谷をせき止めて築造するため、堤体は高く、堤長は短いものが多い。麓池は山池に比べて勾配の緩い山麓に築堤されるため、山池に比べ堤長が長く、規模は大きい。台地池は段丘の開析谷をせき止めて造られたものである。一方、皿池は、野池あるいは平池などとも呼ばれ、平野部など平坦な地盤上に、周囲を土堰堤で囲った形式であり、一般に堤体が低く、堤長が長い特徴を有する。

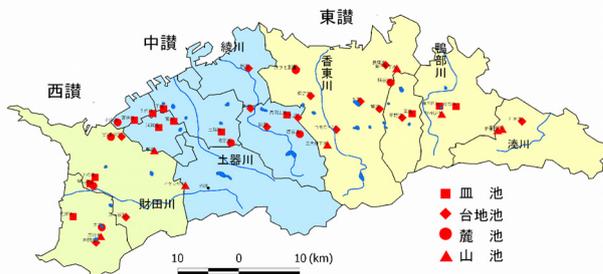


図-2 調査ため池の位置図

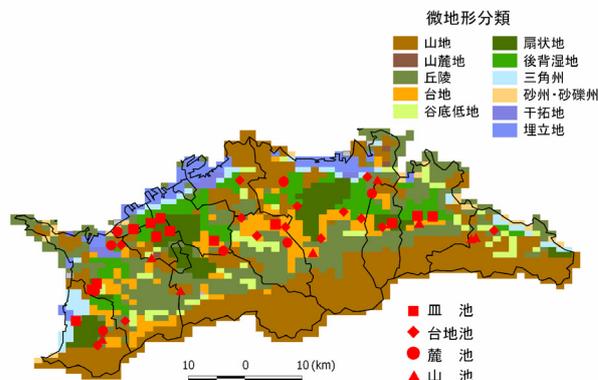


図-3 微地形分類と調査ため池

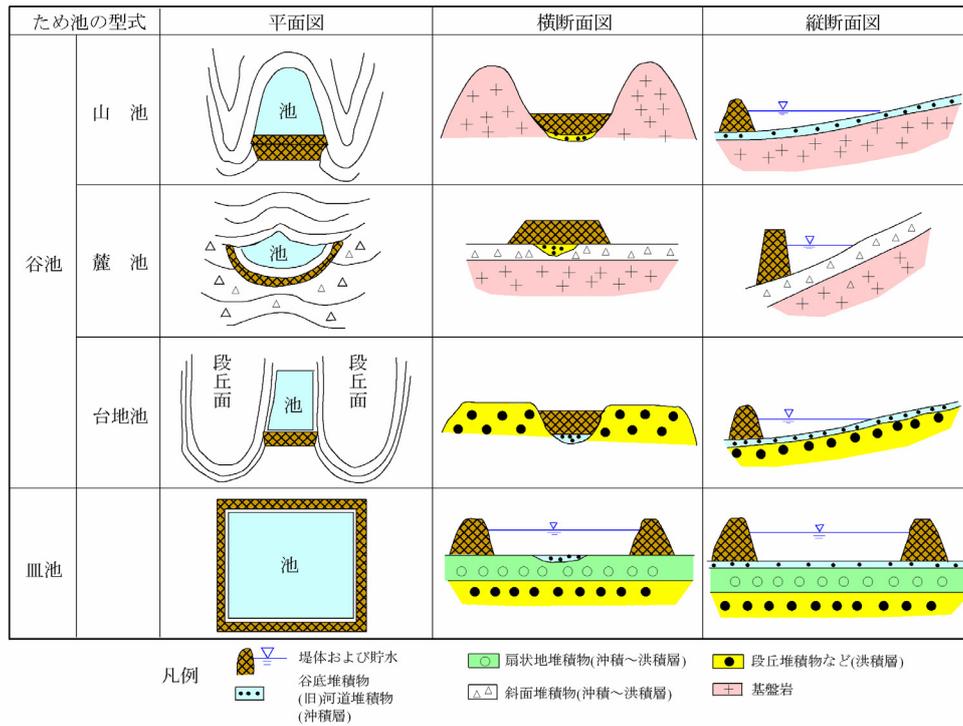


図-4 ため池の分類

表-1 地域ごとの調査ため池数

型式	西讃	中讃	東讃	計
皿池	2	5	3	10
台地池	3	3	7	13
麓池	1	2	5	8
山池	3	3	3	9
計	9	13	18	40

4. 表面波探査結果

(1) 堰堤のS波速度構造

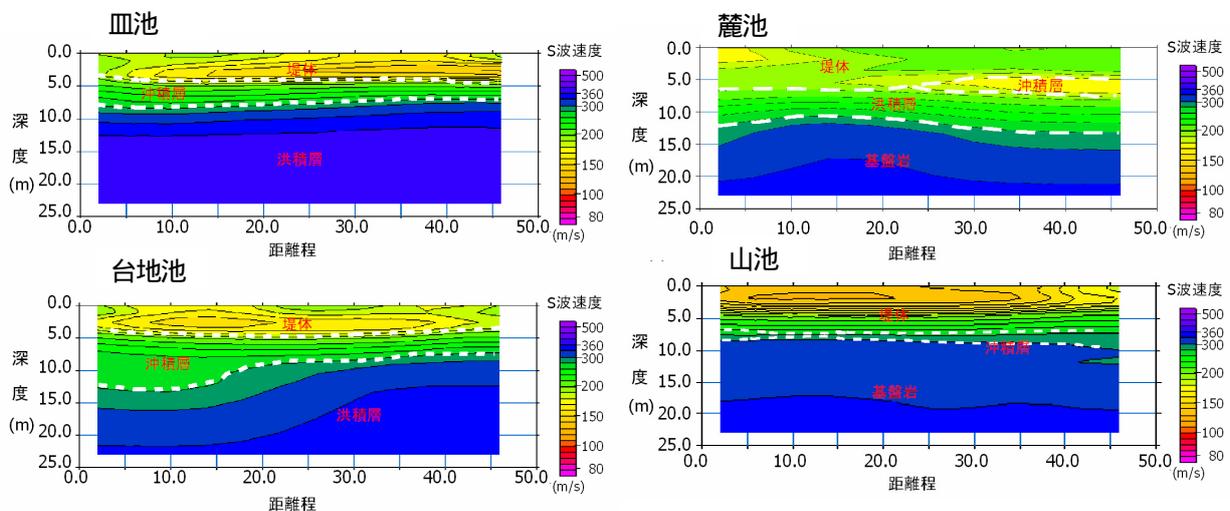


図-5 各ため池型式における代表的な S 波速度分布

図-5にため池の型式と代表的なS波速度分布の例を示す。ここに、沖積層、洪積層、基盤岩の層区分は、ボーリングデータとの対応を考慮して区分したものであり、ため池ごとにS波速度の範囲は異なっている。ただし、基盤岩については、概ね300m/s以上のS波速度層に相当している。皿池および台地池の堰堤のS波速度構造は、概ね3層に区分でき、第1層は堤体盛土、第2層は沖積層、第3層は洪積層にそれぞれ対応する。ただし、台地池については、比較的浅い位置に基盤岩が出現する場合も少数ではあるが存在した。

麓池では、4層に区分でき、第1層から第3層については、皿池・台地池と同じであるが、第4層は、基盤岩に対応する。山池については、概ね3層に区分でき、第1層が堤体盛土、第2層が沖積層、第3層が基盤岩に対応する。ただし、沖積層が現れないため池もあった。

(2) 堤体のS波速度

図-6にS波速度の地域別分布を示す。定量的な評価を行うにあたっては必ずしも十分な調査数ではないが、以下のような傾向が見られる。

皿池については、平均S波速度は、地域によらず概ね120～200m/sの範囲に分布している。台地池では、東讃・中讃地域で120～200m/sに分布するのに対して、西讃地域では140～240m/sと若干大きくなっている。麓池のS波速度は160～320m/sと広範囲に分布している。山池のS波速度は、西讃地域で150～300m/sであるのに対して、東讃・中讃では140～260m/sの範囲に分布している。

図-7に、S波速度から今井の回帰式($V_s=97.0N^{0.314}$)⁷⁾を用いて算定した推定N値断面図の例を示す。図中に示した標準貫入試験値とも概ね対応していることがわかる。

表-2にため池の各型式における平均的なS波速度を示す。堤体の平均S波速度は、平野に位置する皿池や台地池で小さく、山間部に位置する麓池や山池で大きくなっており、立地条件や構造形式による違いが認められる。

表-2 ため池の型式と平均S波速度

型式	平均S波速度(m/s)	
	堤体	沖積層
皿池	168	243
台地池	162	220
麓池	201	244
山池	190	246

(3) 基礎地盤(沖積層)のS波速度

図-8に堰堤の基礎地盤に相当する沖積層の平均S波速度の分布を示す。

皿池では、西讃・中讃に位置するため池の平均S波速度が200～300m/sの範囲に分布しているのに対して、東讃では180～300m/sと遅くなっており、地域的な差が現れている。台地池では、地域によらずほぼ200～260m/sの範囲に分布している。

麓池では、西讃地域で240～280m/sであるのに対して、東讃・中讃地域では220～260m/sと若干遅くなっている。山池では、160～300m/sの遅いグループと、260～300m/sの速いグループに大別される。

表-2に示したように沖積層のS波速度は、台地池で若干小さな速度値となっているが、それ以外のため池型式では、ほぼ同程度のS波速度(245m/s)を示しており、型式による差は見られない。

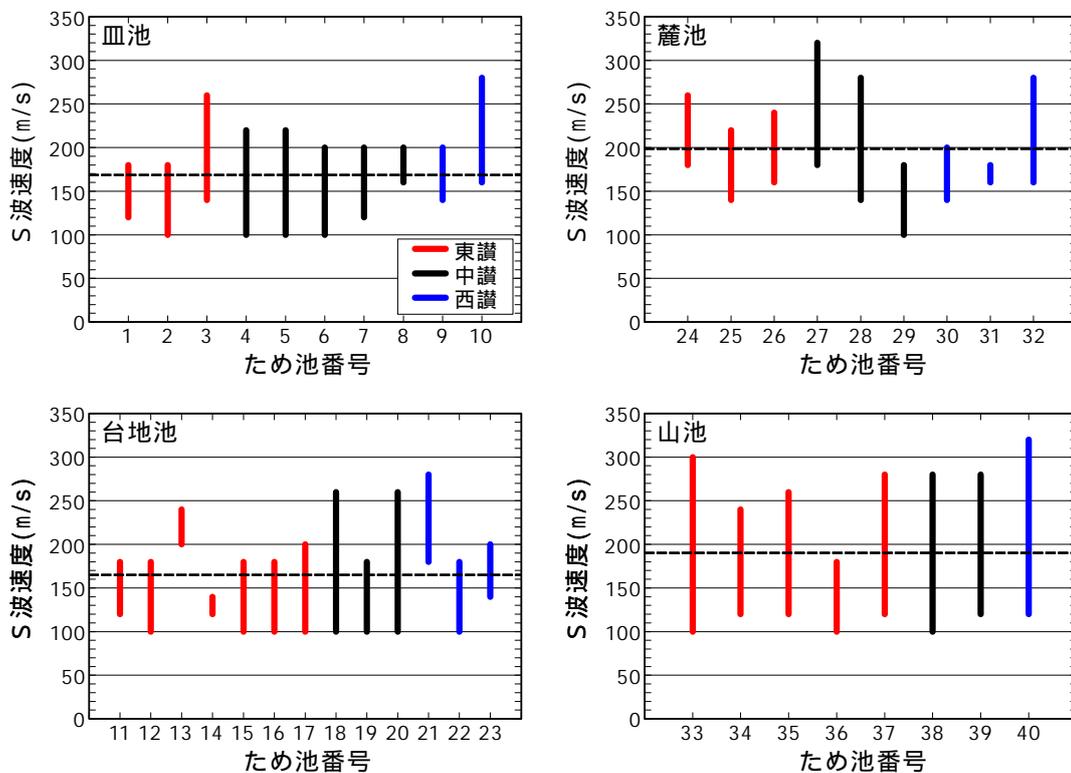


図-6 ため池の堤体におけるS波速度分布

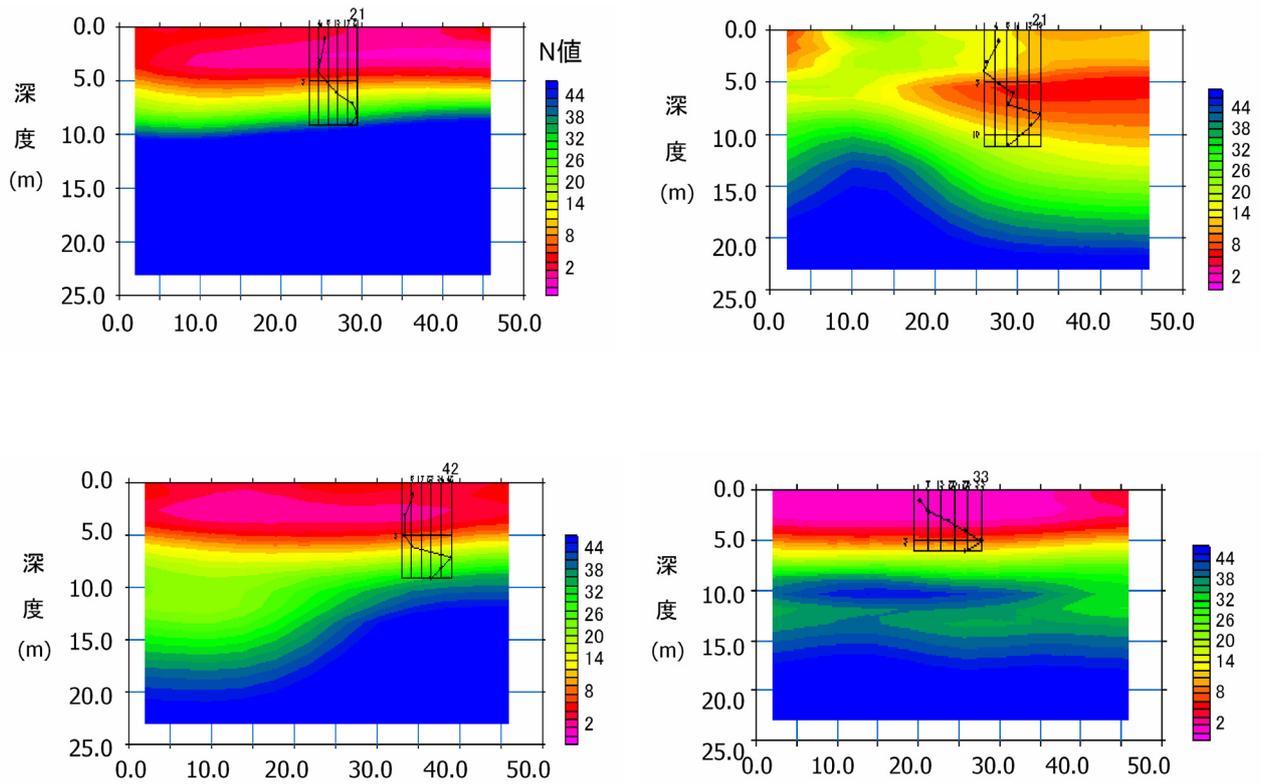


図-7 推定N値断面図

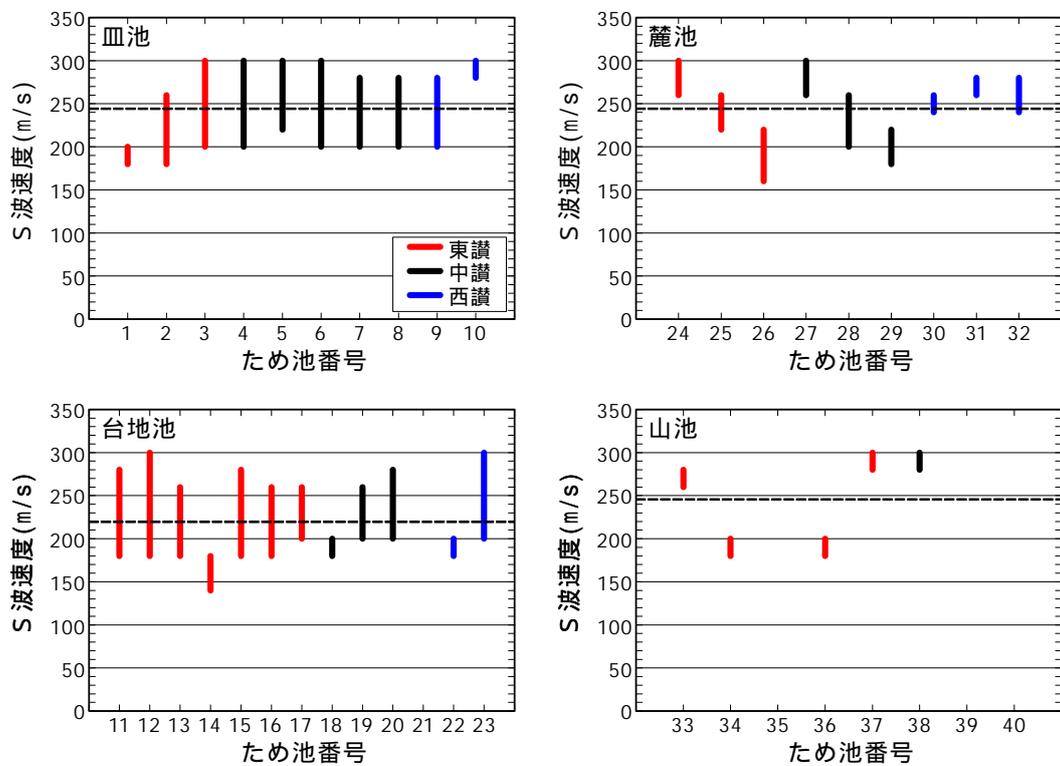


図-8 ため池基礎地盤におけるS波速度分布

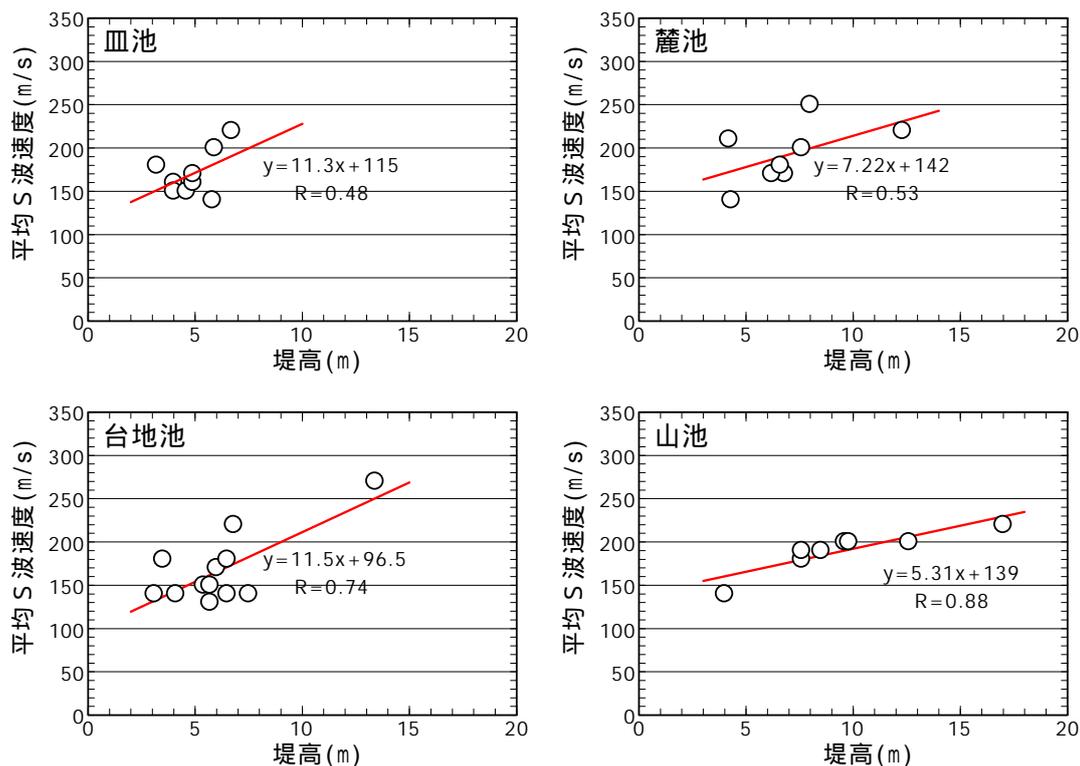


図-9 堤高と平均S波速度の関係

(4) 堤高とS波速度の関係

図-9は、堤高と平均S波速度の関係のため池型式別に整理したものである。どの型式においても、堤高が高くなるにつれて平均S波速度は大きくなる傾向が見られる。しかし、回帰直線の勾配は、皿池や台地池で大きく、山池ではこれらに比べて小さい。この図は、ため池の型式と堤高から、堤体の平均S波速度を簡便に推定できる可能性を示すものとして大変興味深い。今後、調査数を増やすことにより、精度向上を図るとともに、定量的な評価が可能になるものと考えている。

堤高が8m程度より低い場合には、平野部に築造される皿池や台地池は山間部に造られる麓池や山池に比べてS波速度は小さくなっている。8m程度より高くなると、山池よりも皿池や台地池の方が大きくなっている。

ところで、ため池の型式により、堤体のS波速度に違いが現れる理由として、堤体材料の種類および締め固めなどの施工方法の影響が考えられる。すなわち、山間部の山池では、良質な材料が少なく、人力による締め固めが十分に行われていない可能性がある。特に堤高が高くなるにつれて、その可能性が大きくなることを考えると、山池において、堤高が高くなっても強度がそれほど上がらないという傾向は説明できる。この点に関しては今後、土質試験等により明らかにしていきたい。

5. 常時微動測定結果

基礎地盤の微動記録から得られたHVスペクトル比は、地盤の固有の振動特性を近似的にとらえているものと考えられている⁹⁾。そこで地盤の1次卓越周期を読み取った。ここで、堤軸方向をY方向、堤軸直角方向をX方向とし、地盤の1次卓越周期をX方向とY方向の平均とした。また、地表面水平方向に対する堤体天端における水平方向のフーリエスペクトル比(H/Hスペクトル比)から、堤体の卓越周期と増幅率を読み取った。堤体が破壊する方向はX方向である可能性が高いと考えられるため、X方向のみを考慮した。H/Hスペクトル比のピーク周期を堤体の卓越周期とし、そのピーク値を増幅率とした⁸⁾。

表-3にため池の型式と地盤の卓越周期の関係を示す。皿池地点では、地盤の卓越周期は0.2～1.2秒と広範囲にわたっている。これに対して山池地点の地盤の卓越周期は、0.13～0.2秒と短い。台地池や麓池では、ほぼ0.2～0.6秒程度の卓越周期を示す。これらの結果は、各ため池が存在する地点の地形条件や表層地質条件等を強く反映しているものと考えられる。

なお、微動測点数は、27箇所である。表面波探査箇所数と異なるのは、地形的な条件や、表面波探査と測定時期がずれたことにより、すでに改修が行われていて測定ができなかったことによる。

表-3 ため池型式と地盤の卓越周期

型式	地盤の卓越周期(sec)
皿池	0.18 ~ 1.14 (0.53)
台地池	0.09 ~ 0.85 (0.34)
麓池	0.18 ~ 0.54 (0.31)
山池	0.13 ~ 0.20 (0.17)

()内数値は平均値

図-10に堤高と堤体の卓越周期の関係を示す。データにはばらつきがみられるが、堤高が高いほど堤体の卓越周期が長くなる傾向がみられる。

図-11に堤高と堤体の増幅率の関係を示す。堤高が高くなると堤体の増幅率が大きくなる傾向はみられるが、卓越周期ほど明瞭ではない。

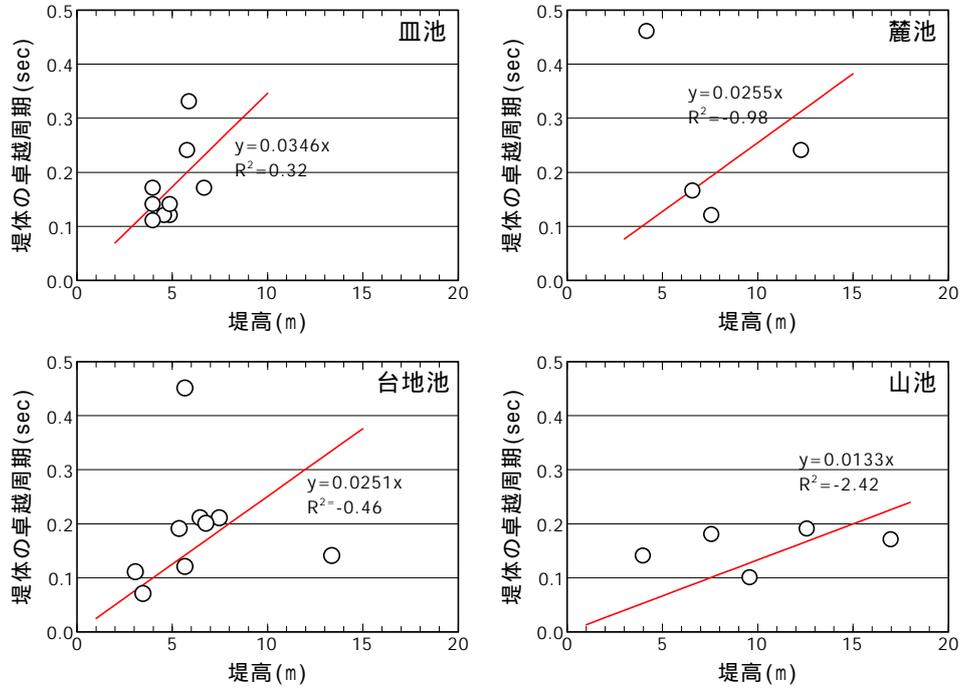


図-10 堤高と堤体の卓越周期の関係

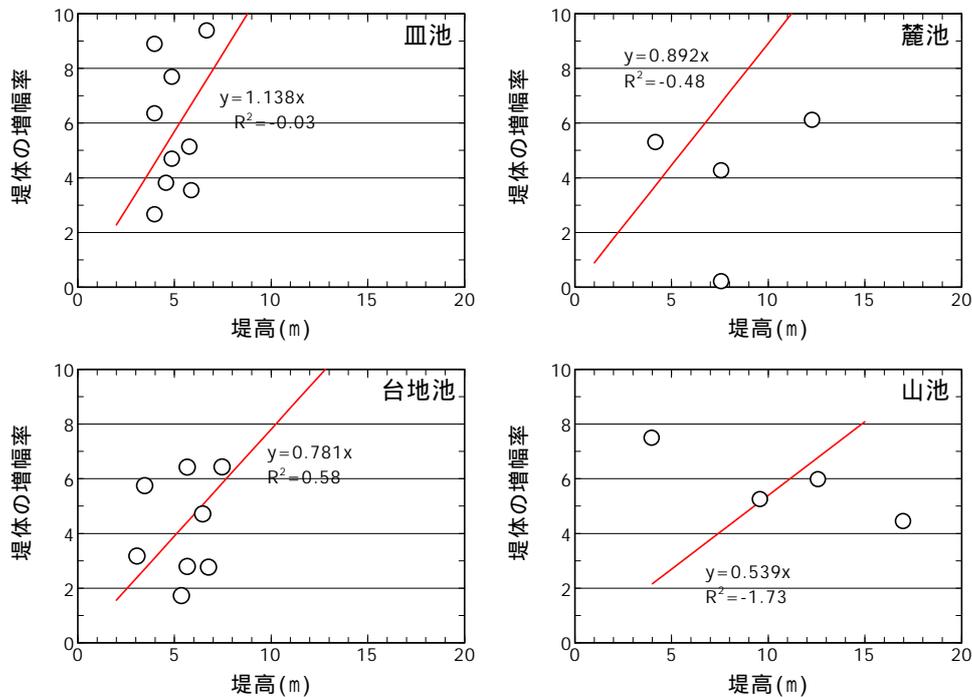


図-11 堤高と堤体の増幅率の関係

図-12に堤体の卓越周期と堤体の増幅率の関係を示す。図中直線は、全体的な傾向を把握するため、全データを用いて求めた回帰式を示している。一般の建築物では周期が長い方が増幅率は大きいですが、ため池堤体の場合には、卓越周期が短い方が増幅率が大きくなっている。また、図-13に地盤の1次卓越周期と堤体の増幅率の関係を示す。図-12と同様、ばらつきが大きく相関はよくないが全体的には、地盤の卓越周期が長くなると、堤体の増幅率が小さくなる傾向は伺える。

以上からため池堤体の増幅特性は、基礎地盤や堤体の振動特性によって影響を受けていることがわかる。特に、皿池は、他のため池型式に比べてその影響が大きいようである。

堤体の締固め(密度)指標であるS波速度と揺れやすさ指標である卓越周期は、いずれも堤高やため池型式と相関関係が見られた。そこで堤体の卓越周期とS波速度の関係について整理すると図-14のようになる。いま、ひとつの試みとして卓越周期が長く、かつS波速度が遅いものを耐震性の低いグループ、卓越周期が短く、かつS波速度が速いものを耐震性の高いグループと考えることができ、たとえば図の破線によってそれを判別すること

ができる。この境界線をどこに引くかは今後の課題である。

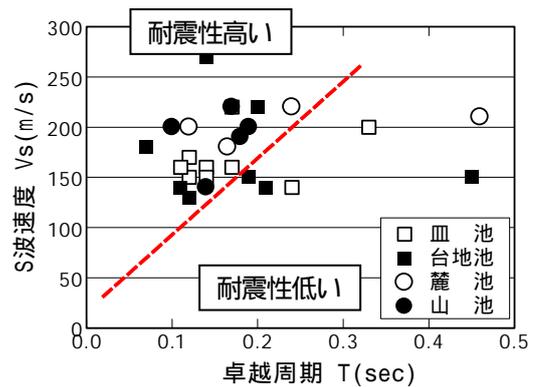


図-14 堤体の卓越周期とS波速度の関係

7. まとめ

ため池堰堤の簡易耐震性評価手法の開発を目指して、香川県内約40箇所のため池を対象として、表面波探査、常時微動測定により堤体および地盤のS波速度分布および卓越周期を求めた。その結果、以下の知見が得られた。

表面波探査によりため池堤体および基礎地盤のS波速度を簡便に推定することができる。特に、今回使用した人工振源を用いた表面波探査は、20m程度までのS波速度を求めることができる。ため池堰堤は10m程度以下の小規模なものが多いことから、最適と考えている。堤体のS波速度は平野部に位置する皿池で遅く、山間に位置するため池ほど速くなる傾向が見られる。基礎地盤(特に沖積層)のS波速度は、ため池の立地条件や地形条件による違いは特に認められなかった。常時微動によるH/Vスペクトル比から求められる地盤の卓越周期は、ため池の立地条件や地形条件と良い対応を示した。すなわち、皿池地点では卓越周期が0.5秒程度と長く、山池では0.2秒前後と短い。堤高と堤体の卓越周期の関係については、堤高が高いほど卓越周期が長くなる傾向が認められた。堤体の卓越周期と増幅率の関係については、堤体の卓越周期が短い方が、増幅率が大きくなる。

以上、今回の測定結果から、堤体の締固め(密度)指標であるS波速度と揺れやすさ指標である卓越周期は、いずれも堤高やため池型式と相関関係が見られることから、これを指標として耐震性の高いグループと低いグループに分けることが可能と考えられる。今後、測定データを蓄積することにより、これらの関係を明らかにしていく予定である。

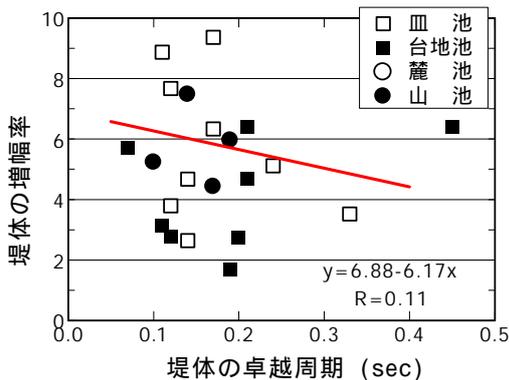


図-12 堤体の卓越周期と増幅率の関係

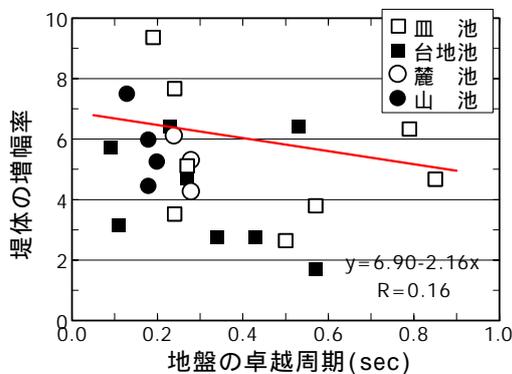


図-13 地盤の1次卓越周期と堤体の増幅率の関係

謝辞：本研究に際して、香川県土地改良事務所の方々からは貴重な調査データをご提供いただくとともに、調査にあたってはいろいろ便宜をはかっていただきました。また、農林水産省中国四国農政局香川農地防災事務所からは改修ため池の堤体材料をご提供いただきました。これら関係各位に感謝の意を表します。

なお、本研究の一部は平成18年度科学研究費補助金基盤研究(C)「老朽化したため池堤体の非破壊探査技術による耐震性評価手法の開発」(研究代表者：長谷川修一)を使用いたしました。

- 4) 満濃池土地改良区：満濃池史 満濃池土地改良区50周年記念誌，美巧社，pp.108-114，2001.
- 5) 林 宏一，鈴木晴彦，斎藤秀樹：人工震源を用いた表面波探査の開発とその土木地質調査への適用，応用地質技術年報，No.21，pp.9-39，2001.
- 6) 中村 豊：常時微動計測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.4，pp.18-27，1988.
- 7) Imai, T. & Tonouchi, K. : Correlation of N-Value with S-Wave Velocity and Shear Modulus, Proceedings of the 2nd ESPT, pp.67-72, 1982.
- 8) 佐伯嘉隆，森 伸一郎，福村耕平：道路盛土における地震動増幅に関する常時微動測定，第41回地盤工学研究発表会講演集，pp.1875-1876，2006.

参考文献

- 1) 香川県環境森林部：平成18年度香川県環境白書，2006. (2007.4.6 受付)
- 2) 中島正憲，谷 茂：兵庫県南部地震による被災ため池の改修，土木施工，Vol.38，No.6，pp.64-69，1997.
- 3) 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.

EVALUATION OF MOTION AMPLIFICATION OF SMALL EARTH DAM BY SURFACE WAVE SURVEY AND MICROTREMOR MEASUREMENT

Akihiko SAITO, Shuichi HASEGAWA, Minoru YAMANAKA ,
Yoshitaka KAGAWA and Koichi HAYASHI

The objective of this study is to estimate the motion amplification of bank of irrigation ponds by surface wave exploration and microtremor measurement. In this study, four types of the irrigation ponds were classified.

S-wave velocity of bank is small in the ponds situated in plain and large in the ponds situated in the foot of the mountain or mountain. However, with regard to S-wave velocity of alluvium, the difference in types of the ponds is small.

The relation between S-wave velocity of bank and height of bank has positive correlation. Similarly, the relation between predominant period and height of bank has positive correlation. But, the relation between amplification and predominant period of bank has negative correlation.

Motion amplification of bank is strongly affected by the vibration characteristics of the foundation and the bank.