

擁壁の健全度診断への常時微動計測の適用性について—実測に基づく分析—

Issues on the Ground Health Monitoring of a Retaining Wall using the Microtremor Measurements
-From Field Measurement-

河野真弓	Mayumi KAWANO	(広島大学大学院工学研究科)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究科)
高町茉莉	Mari TAKAMACHI	(広島大学工学院工学研究科)
栗原大	Ooki KURIHARA	(広島大学工学院工学研究科)
小西真実	Mami KONISHI	(元広島大学工学部)

盛土等の土構造物に擁壁が併設されている場合、盛土の降雨時における安定性は、擁壁の排水機能に依存している。本研究では、擁壁が併設されている盛土の低コスト・短期間での健全度診断手法として、擁壁背面土の含水比の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化に着目した。動的FEM解析の結果では、地盤の含水比が増加した場合、擁壁の固有振動数が低下することがわかった。次に、実際の擁壁において常時微動計測による固有振動数の推定を試みたところ、ノイズ等によって固有振動数の推定が困難な場合があることがわかった。また、ノイズの影響のない計測データからは、解析結果とは逆に振動数が増加する可能性が示唆された。

キーワード：固有振動数，含水比，地盤の健全度診断，常時微動 (IGC : C-2)

1. はじめに

盛土等の土構造物に擁壁が併設されている場合、盛土の降雨時における安定性は、擁壁の排水機能に依存している。例えば、2009年8月の駿河湾の地震(M6.5)では東名高速道路牧之原サービスエリア近くの上り線の盛土法面が崩落した。この盛土の崩落原因の検討において、当該地は、道路横断方向に凸、道路縦断方向に凹の地山形状で水が集まりやすい地形・地質条件であったことや、盛土の下部には風化しやすい泥岩が使用されていたこと等が報告されている¹⁾。また、ここで崩落した盛土の法尻部には擁壁が存在しており、地震前の雨水が擁壁背面から抜けきらず、不安定な状態で揺れを受けたことが崩壊の誘引になったという指摘もある²⁾。

これらのことから、盛土、岸壁などの土構造物においては、地盤の健全性を定期的に確認し、必要な対処を講じておく必要があることがわかる。この目的で定期的実施できる調査としては、目視による調査や標準貫入試験、簡易動的コーン貫入試験等がある。しかし、目視による点検では十分な精度は得られず、また、貫入試験では時間とコストが多くかかるという問題点がある。これに対し、常時微動計測による擁壁の固有振動数のモニタリングは、低コスト、短時間での調査が可能であり、健全度診断技術として有望である。

例えば、既往の研究として古川ら³⁾はため池堤体での表面波探査および常時微動計測を行い地盤連成系の卓越周期やせん断波速度構造の把握を行っている。また、秦ら⁴⁾は常時微動計測を利用した道路盛土断面におけるせん断波速度の評価方法を提案している。しかし、擁壁を対象とした検討はなく、また、計測結果の変化量により健全度診断を行おうとした例はない。

著者らは、水の影響による地盤の状態変化と擁壁の固有振動数の変化の関係性に着目し、動的FEM解析を行っている⁵⁾。解析結果では、擁壁背面土の含水比の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化が定量的に示された。

本報告では、実際の擁壁が併設されている盛土において、常時微動計測による固有振動数モニタリングを試みた結果について報告する。

2. 擁壁の固有振動数の変化についての解析的検討

著者らは、擁壁がある場合の盛土について、擁壁の固有振動数の把握によって健全度診断することを考えた⁵⁾。このため、解析プログラムFLIP (Ver.7.1.3)⁶⁾を用いて実スケールの盛土擁壁をモデル化し、擁壁背面土の湿潤密度の増加に伴う擁壁の固有振動数の変化について検討した。解析では、簡単のため盛土・擁壁は全て線形弾性体と仮定している。図-1に土層区分及び参照節点の位置を示す。参照節点を擁壁部の上端下端とし、それぞれの上端下端にお

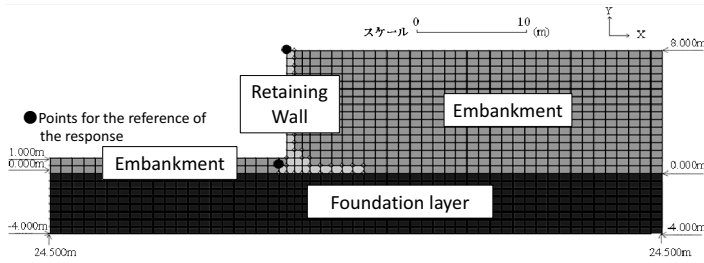


図-1 土層区分及び参照節点の位置

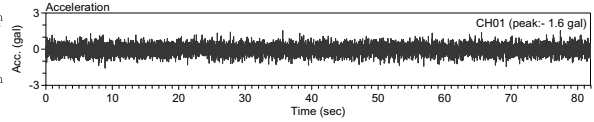


図-2 モデル底面に入力した加速度時刻歴 (ホワイトノイズ)

表-1 盛土の解析定数

	土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	水の密度 ρ_w [g/cm ³]	間隙比 e	せん断波速度 V_s [m/s]	含水比 w [%]	湿潤密度 ρ_t [g/cm ³]	せん断剛性 G [kPa]	ヤング率 E [kPa]
Case-1	2.634	1	0.787	90.23	14.61	1.688	1.37E+04	3.65E+04
Case-2				57.69	15.36	1.755	5.72E+03	1.52E+04
Case-3				82.76	16.87	1.720	1.20E+04	3.20E+04

表-2 擁壁の解析定数

ヤング率 E [kPa]	ポアソン比 ν [-]	密度 ρ [g/cm ³]
2.20E+07	0.2	2.3

表-3 原地盤の解析定数

せん断波速度 V_s [m/s]	ヤング率 E [kPa]	せん断剛性 G [kPa]	ポアソン比 ν [-]	湿潤密度 ρ_t [g/cm ³]
300	4.75E+05	1.78E+05	0.333	1.98

ける各応答加速度時刻歴を求め、それを高速フーリエ変換して上端下端のフーリエスペクトルを求めている。そして、上端下端のフーリエスペクトルの比を伝達関数とし、そのピーク振動数を擁壁の固有振動数とした。表-1 に解析ケースを示す。擁壁裏込め土の含水比上昇を再現するため、湿潤密度、せん断剛性、およびヤング率を変化させたケースについて検討を行った。図-2 にモデル底面に入力した加速度時刻歴を示す。解析では、モデル底面に入力加速度として、様々な周波数を均一に含む波形(ホワイトノイズ)を 81.92 秒間入力した。表-2 に擁壁の解析定数、表-3 に原地盤の解析定数をそれぞれ示す。擁壁の解析定数は、擁壁の設計事例集⁷⁾に記載されているものを用いた。盛土のヤング率は河野ら⁵⁾により行われた実験で得られたせん断波速度と含水比の関係(図-3)について、最適含水比(Case-1)および、降雨強度を変えた2ケースの降雨後の含水比(Case-2, Case-3)を使用し、微小なひずみの範囲なので、ポアソン比は一定で変化しないと仮定して、式(1)、(2)により求めた。

$$G = \rho_t V_s^2 \quad (1)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (2)$$

なお、 G : せん断剛性、 V_s : せん断波速度 (m/s)、 E : ヤング率、 ν : ポアソン比である。

解析では、重力加速度を作用させ、地盤を初期応力状態にする初期自重解析を行った後、その結果を用いて地震応答解析を行った。両解析フェーズは同じ構成則を用いており、与えた解析地盤定数も同じである。

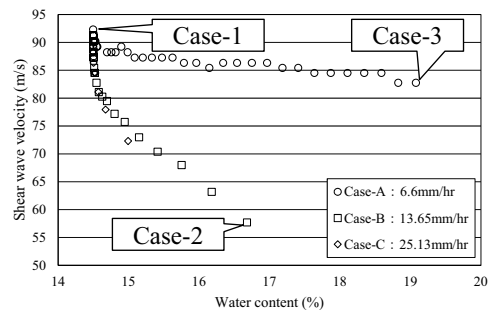


図-3 せん断波速度と含水比の関係⁵⁾

図-4 及び図-5 に擁壁の上端と下端の応答波形のフーリエスペクトルと伝達関数を示す。上端下端のフーリエスペクトルの比から伝達関数を求め、そのピーク振動数を擁壁の固有振動数とした。また、図-6 に、固有振動数と含水比の関係を示す。降雨により含水比が上昇すると、擁壁の固有振動数は低下するという結果が得られた。固有振動数の変化量は5%と32%と大きく、構造物の常時微動におけるピーク振動数は地盤の地下構造を評価する際の常時微動のピーク振動数に比べて明瞭になることから、常時微動計測により固有振動数の変化の把握が可能なレベルではないかと考えた。

3. 現地計測による検討

3.1 使用計器

前章で述べた解析的検討に基づき、現地計測を試みた。計測では速度計(GEONET-1-2S3D)とパソコンを用いた。水平方向2成分(EW方向, NS方向)と上下方向1成分

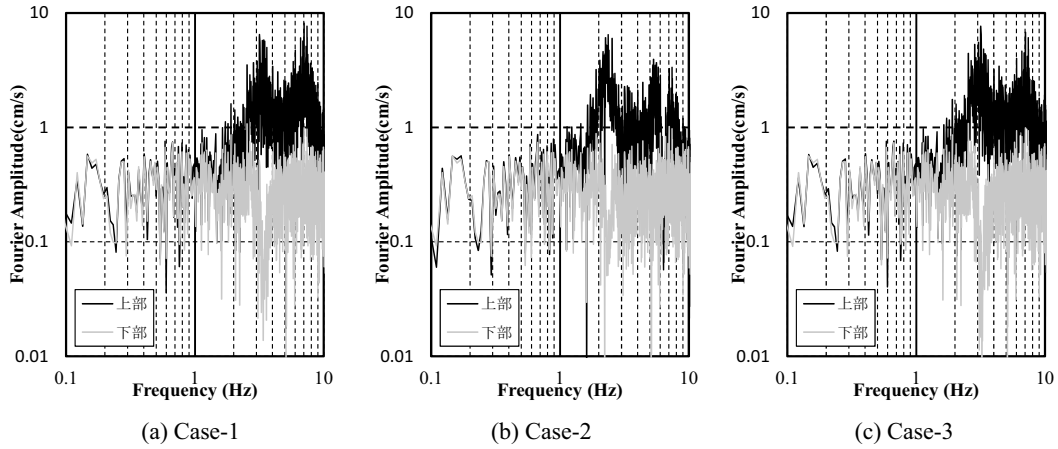


図-4 解析により得られたフーリエスペクトル

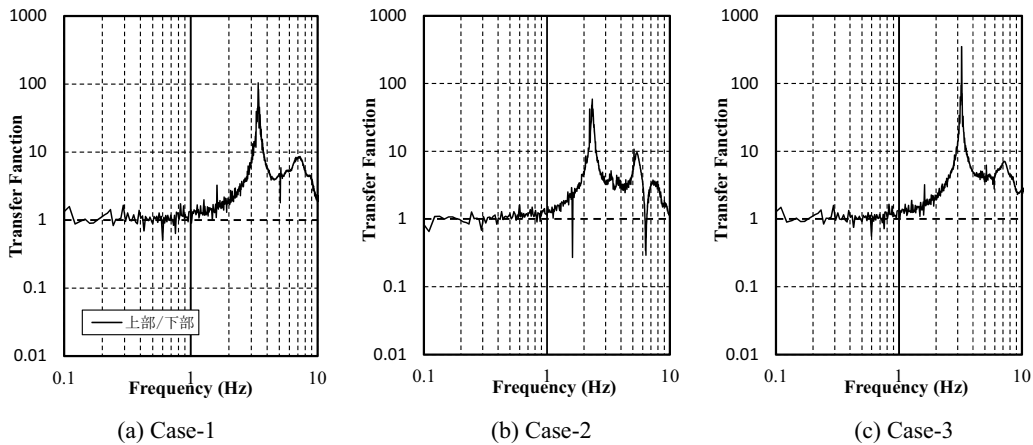


図-5 解析により得られた伝達関数

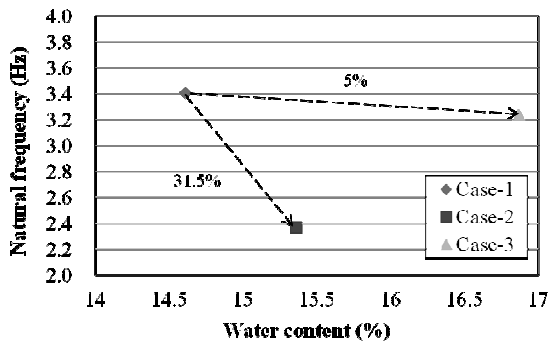


図-6 固有振動数と含水比の関係

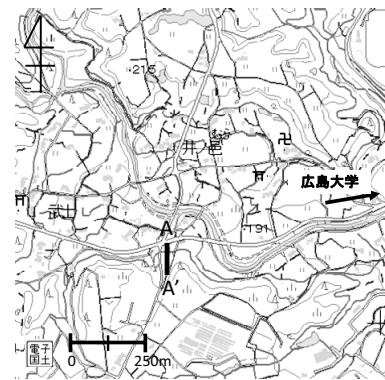


図-7 現地計測位置 A-A' (その1)

(UD 方向), 計 3 成分の同時計測が可能である。測定周波数範囲は 0.5~18 Hz, 感度は 1.0 V/cm/sec, 最大測定範囲は±2.5 cm/sec である。本計測ではゲイン 40 db, サンプリング周波数 100 Hz, ハイカットフィルター 100 Hz という条件とした。計測時には、水準器で水平を確認しながら微動計を計測地点に設置する。また、微動計の向きは、通常の東西南北ではなく、擁壁横断方向に X 軸を合わせた。

3.2 現地計測その 1 (田口地区県道 331 号線沿い)

図-7 に示す広島県の県道 331 号線沿いにある擁壁 (A-A') で計測を行った。計測地点は図-8 に示す約 50m の擁壁の上端部 9 か所および下端部 6 か所とした。計測は、

晴天が続いた 2012 年 5 月 - 6 月に行われた計測結果から、動的 FEM 解析と同様に、擁壁上端部のフーリエスペクトルを下端部のフーリエスペクトルで除することにより伝達関数を求めた。なお、下端部については、6 か所のフーリエスペクトルに差異があまりないことから、その平均値を擁壁下端部のフーリエスペクトルとした。図-9 に平均した擁壁下端部のフーリエスペクトル、図-10 に地点 4 の 3 日分の上端部のフーリエスペクトルを示し、図-11 にそれぞれの伝達関数を示す。ただし、擁壁下端部の計測は、5 月 15 日の 1 日だけの計測とした。図-9 に示す擁壁下端部のフーリエスペクトルにおいて 3.3Hz 程度のピークが

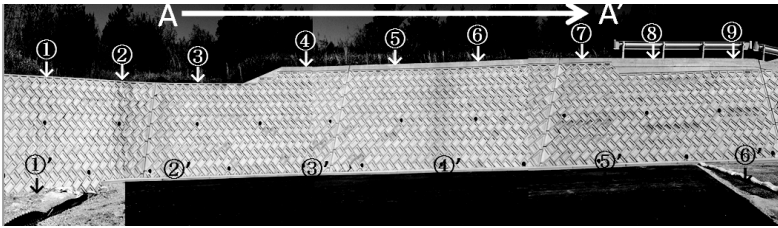


図-8 現地計測地点風景 (その1)

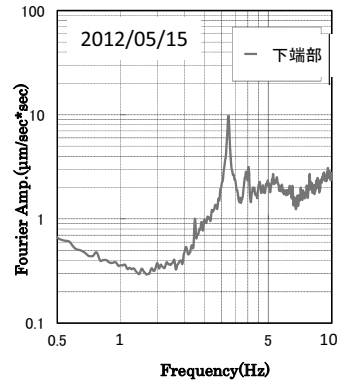


図-9 擁壁下端部のフーリエスペクトル

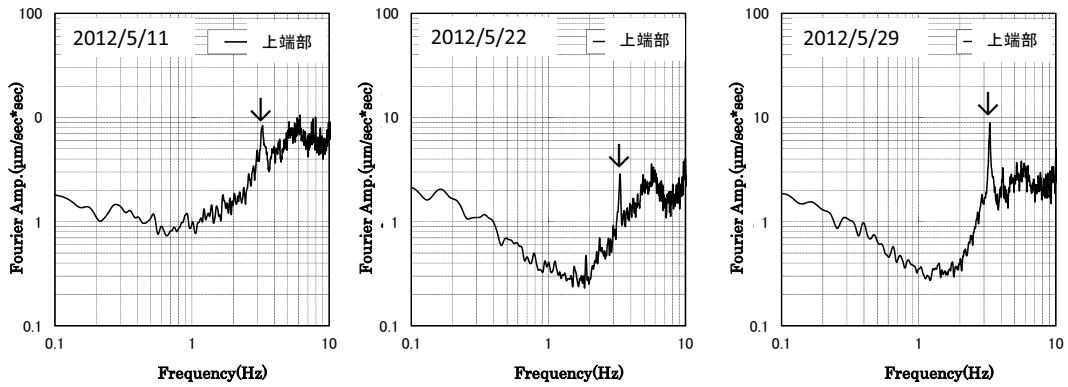


図-10 地点4のフーリエスペクトル

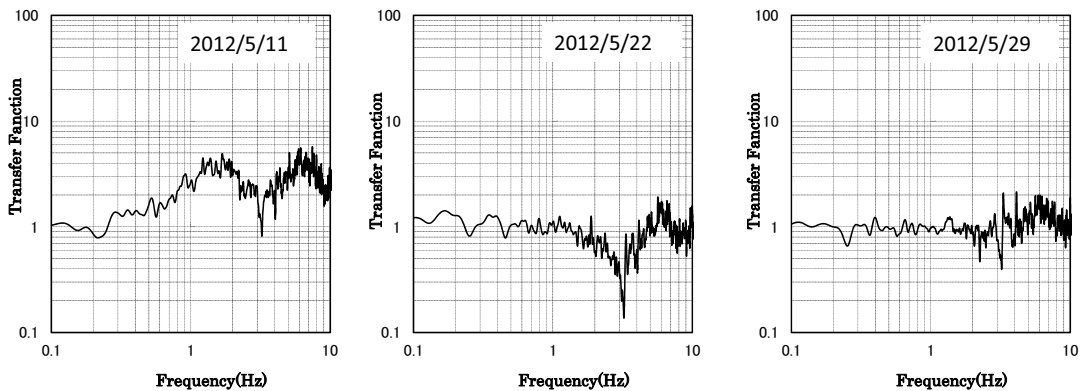


図-11 地点4の伝達関数

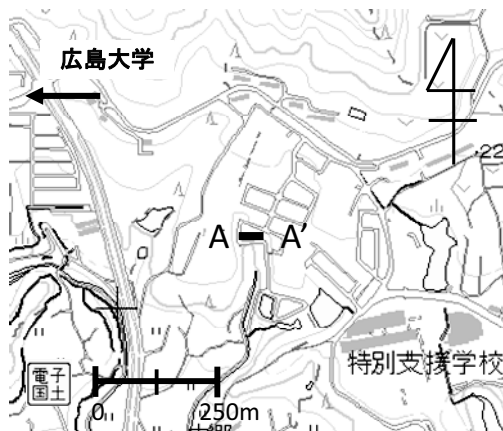


図-12 現地計測位置 (その2)

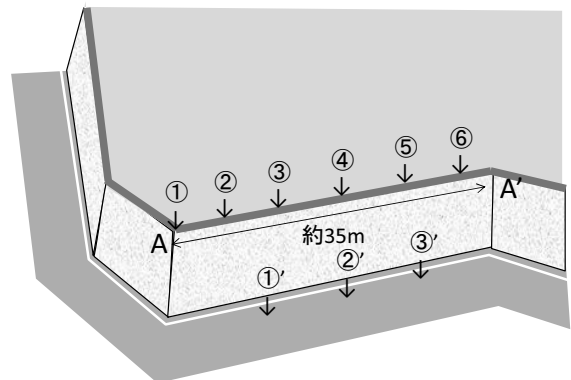


図-13 現地計測地点 (その2) 概要

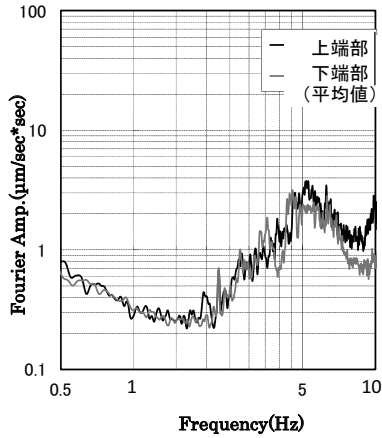


図-14 地点3のフーリエスペクトルの一例

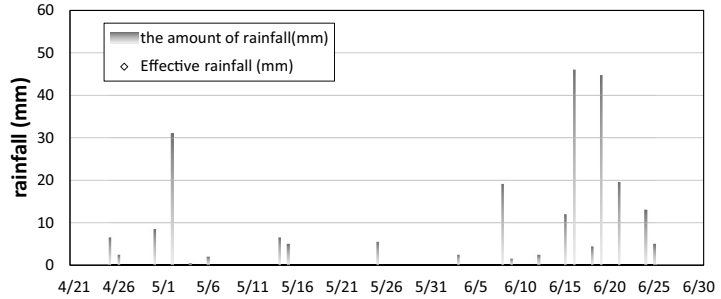


図-15 5月27-6月28日の時間降雨量⁸⁾と実効降雨

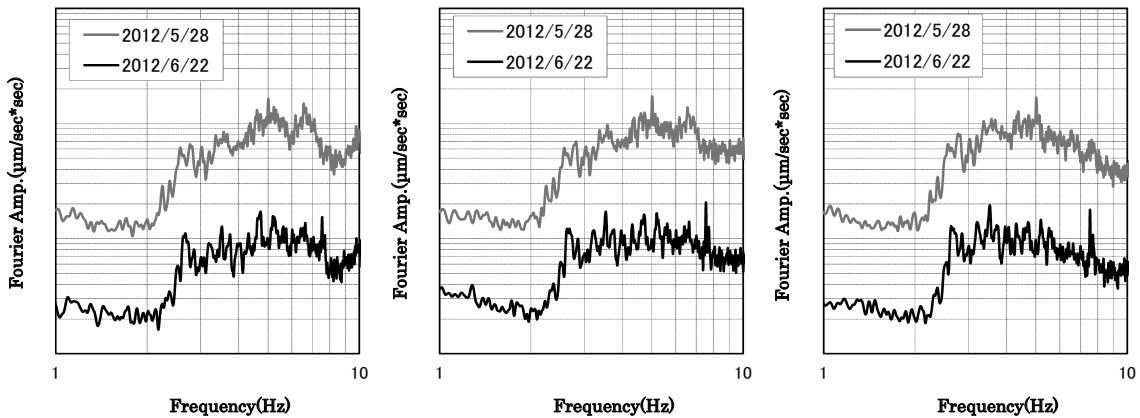


図-16 地点4-6（上端部）X軸方向におけるフーリエスペクトル

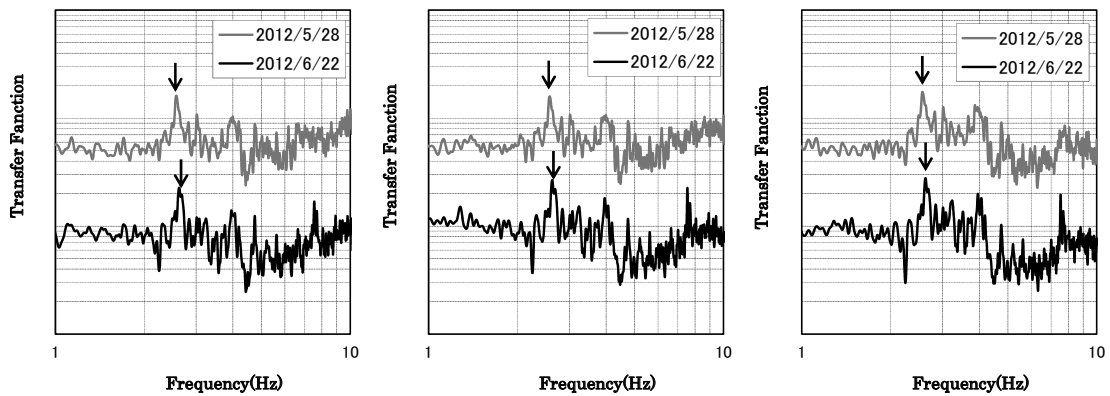


図-17 地点4-6（上端部）X軸方向における伝達関数

表れている。これは、工場などの外部振動により発生する人工的なノイズと考えられる。図-10に示すように、下端に比べると不明瞭ながら、上端で計測した3日すべてにおいて発生している。しかし、このノイズの原因を特定することはできなかった。この人工的なノイズのため伝達関数に明瞭なピークが存在せず、S/N比が低下したため、固有振動数の推定が難しい結果となった(図-11)。このように周辺からの人工的なノイズによって擁壁の固有振動数を推

定できない地点があり、これは手法の実用化において解決すべき課題の一つであるといえる。

3.3 現地計測その2（田口地区公園）

図-12に示す田口地区の公園でも計測を行った。この地点の擁壁は図-13に示すように下部には道路が併設されている。計測地点は擁壁上端部6か所および擁壁下端部3か所とした。田口地区県道331号線沿いの擁壁と同様に、下

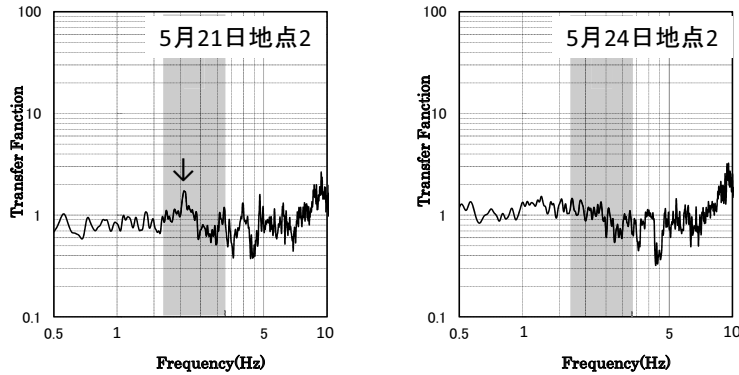


図-18 ピークが明瞭に表れた例(左)と不明瞭であった例(右)

端部については、3か所のフーリエスペクトルの平均値を擁壁下端部のフーリエスペクトルとした。図-14に地点3のフーリエスペクトルの一例を示す。田口地区県道331号線沿いの擁壁と比べて擁壁下端部に人工ノイズによる乱れがないことがわかる。擁壁上端部の計測は2012年5月-6月の15日間とした。計測は常に13時-14時の間とした。ただし、擁壁下端部の計測は6月27日の1回のみである。

当該地点では、計測期間中に降雨があった。図-15に5月27日-6月28日の時間降雨量と降雨の影響を示す指標として実効降雨を示す。なお、使用した降雨データは、計測地点から最寄りの東広島気象台(気象庁⁸⁾)のデータを使用し、実効降雨については、式(3)により算出している。

$$R_w = \sum \alpha_{li} \cdot R_{li} \quad (3)$$

ここで、 R_w :実効降雨(mm)、 R_{li} : i 時間前の1時間降雨(mm/h)、 α_{li} : i 時間前の減少係数($=0.5^{i/T}$)、 T :半減期(時間)である。図-15では計測日の正午時点の実効降雨を図示し、半減期は72時間とした。図-16に地点4-6(上端部)X軸方向におけるフーリエスペクトルを、図-17に地点4-6(上端部)X軸方向における伝達関数を示す。なお、5月28日のフーリエスペクトル及び伝達関数は見やすくするためすべての値に5を乗じY軸方向に平行移動させている。図-16のフーリエスペクトルを見ると、概形には違いがなく、常時微動に定常性があることが確認できる。しかし、図-17の伝達関数のピークの値は微かに異なり、降雨直後の6月22日の固有振動数は地盤の重量や剛性の変化によって、降雨前の5月28日の値と若干ながら異なっている可能性が見て取れる。

4. 推定した固有振動数と降雨の関係

田口地区公園の計測事例では、伝達関数において2-3Hz付近に明瞭なピークが見られたことから、5月28日の伝達関数のピーク値を基準とし、振動数1.75-3.25Hzの範囲に伝達関数のピーク値がある場合のみ、そのピーク値の振動数を固有振動数とした。図-18にピークが明瞭に表れた例と不明瞭であった例を示す。表-4に各地点の固有振動数の値を示す。

表-4を見ると、6地点のうち、伝達関数のピーク値を抽

表-4 各地点の固有振動数の値

	測定数	ピーク検出数	成功率(%)
地点 1	15	9	60.0
地点 2		9	60.0
地点 3		8	53.3
地点 4		6	40.0
地点 5		5	33.3
地点 6		8	53.3

出することができたのは最大で6割、最小で3割という結果となった。この要因として、ノイズによって伝達関数のピーク値が不明瞭となる場合があることがあげられる。次に、各計測日の固有振動数(■)と、降雨量(棒グラフ)、実効降雨(◆)を整理したものを図-19に示す。固有振動数は日によってばらついている。また、固有振動数が求まらなかったものはN/Aで示している。図-20に固有振動数と実効雨量との関係を示す。なお、図上のRは相関係数、 R^2 は決定係数を示している。決定係数が小さくバラつきが大きいため判断は難しいが、全地点とも相関係数は正の値であり、解析と逆に固有振動数は降雨の影響で増加している可能性が示唆されたといえる。

5. まとめ

本報告では、擁壁が併設されている盛土の低コスト・短期間での地盤の健全度診断手法の提案を行うため、解析的検討に基づき、現地計測を試み、結果を示した。実際の擁壁における固有振動数の変化について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 人工的なノイズが定期的に発生しており、常時微動の計測が困難な地点が存在する。
- (2) 解析結果とは逆に、降雨の影響によって擁壁の固有振動数は増加している可能性がある。

以上の事から、常時微動計測による擁壁の固有振動数モニタリングのためには、

- (1) 人工的なノイズの除去方法の検討
- (2) 固有振動数が変化するメカニズムのさらなる検討が必要であることがわかり、今後の課題である。

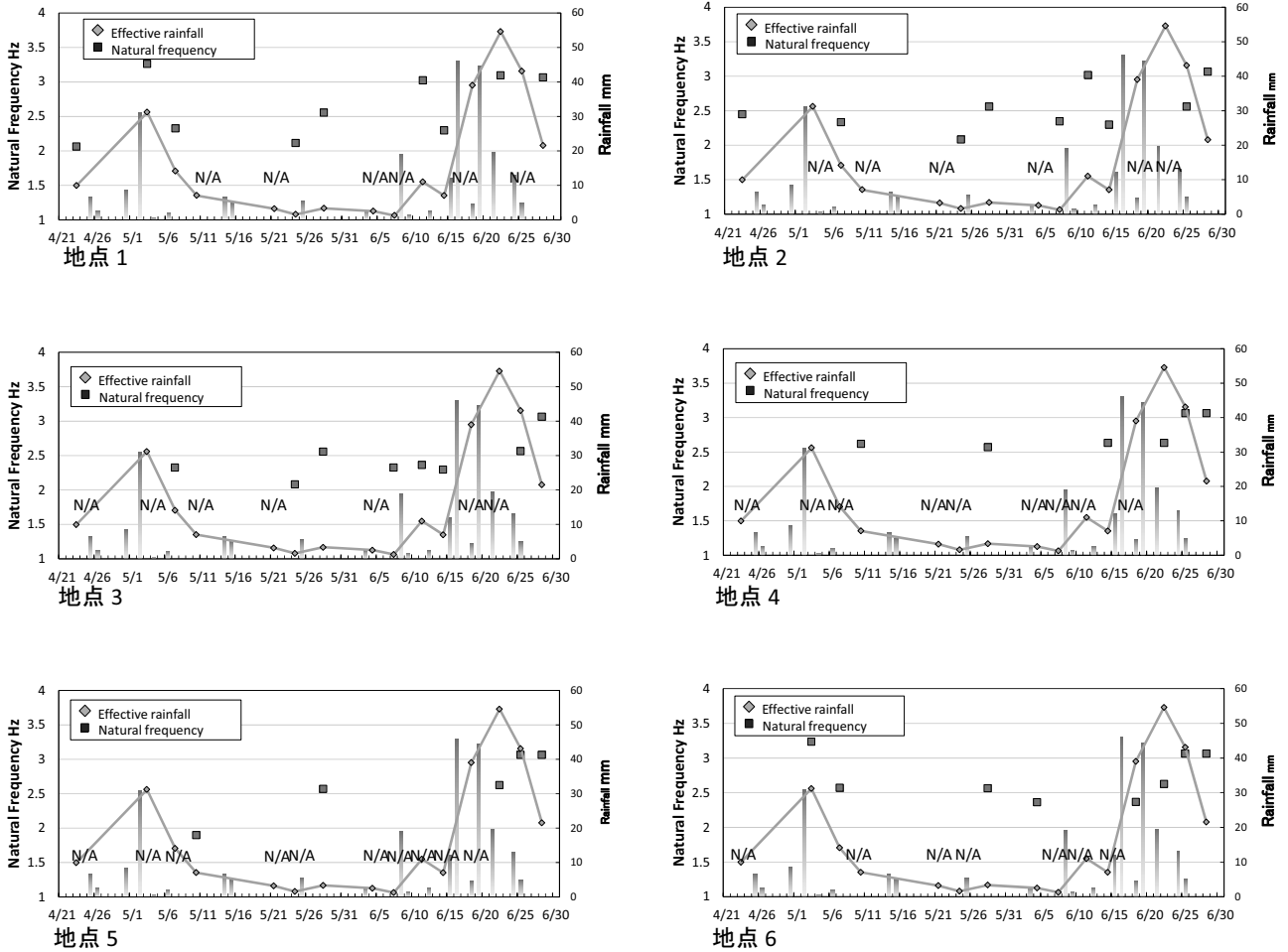


図-19 各地点の固有振動数，降雨量および実効降雨⁸⁾

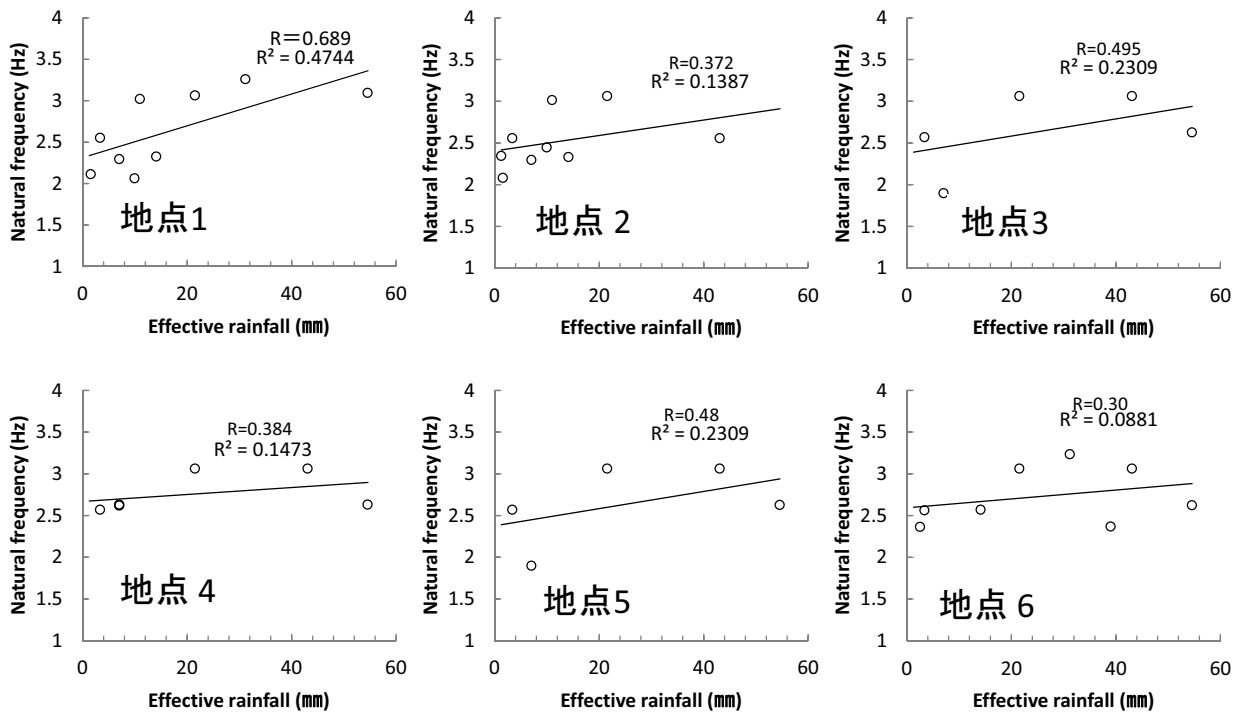


図-20 固有振動数と実効雨量との関係

謝辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究（B）課題番号 22760358 の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 中日本高速道路株式会社：東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会報告，2009，
http://www.c-nexco.co.jp/images/press_conference/44/12797178954e004ffa764cb.pdf，2012.10.22.
- 2) 小長井一男，有田毅，松村有見子：2009年8月11日駿河湾を震源とする地震の被害調査，生産研究，調査報告，vol.61，No.6，pp.73-82，2009.
- 3) 古川将也，森伸一郎：地震被害を受けた既存ため池堤体の微動応答特性と堤体内部構造の対応，第45回地盤工学研究発表会発表講演集，No.477,pp.953-954,2010.
- 4) 秦吉弥，一井康二，村田晶，野津厚，宮島昌克，常田賢一：常時微動計測を利用した道路盛土のせん断波速度の評価 - 2007年能登半島地震で被災した能登有料道路を例として - ，日本地すべり学会誌，Vol.48, No.6, pp.318-325, 2011.
- 5) 河野真弓，村上陽平，湯浅香織，柴尾享，北出圭介，一井康二：せん断波速度の変化に着目した地盤の健全の診断技術に関する基礎的研究，地盤工学会中国支部論文報告集 Vol.30, No.1, pp.77-84, 2012.
- 6) FLIP 研究会：FLIP（Ver.7.1.3）取扱説明書，
<http://www.meisosha.co.jp/flip/index.html>，2012.1.20.
- 7) 村上有誠：擁壁の設計と施工計画－解説と実務計算例，理工図書，384p，2002.
- 8) 気象庁：広島県東広島市2012年4-5月の気象データ，
<http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html>，2011.11.30.

（2013年6月24日 受付）