

プロ-13 擁壁等の土工構造物の管理水準を考慮した維持管理手法の開発に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：施工技術チーム

研究担当者：宮武裕昭 藤田智弘

【要旨】

土工構造物は自然材料を主体の材料として構築されることから、舗装や橋梁など一定の大規模補修や更新を念頭においた構造物に比べ、計画的な維持管理への取り組みが十分に行われているとは言い難い状況にある。しかしながら、土工構造物においても、鋼材・コンクリート・各種補強材等老朽化による劣化を生じる可能性のある材料が用いられ、また、豪雨や地震動の作用により変形が生じ、設計時点で想定している力学的な条件と異なる状態となっていると考えられる構造物も存在している。道路管理者において戦略的な維持管理を行うためには、こうした変形した構造物が「その時点でどの程度の性能を保持しているか」を点検・評価する手法やこれに対応した補修補強方法等に関する技術の確立が必要である。

昨年度は、走行車両による写真測量の測量精度を検証した。検証の結果、日常的な点検で詳細調査の必要性を判断する選定手法として、写真測量は有効な手段となりうることを確認した。一方で、被写体に寸法が既知のものを設定する昨年度実施した解析方法は、日常的な点検への適用を考えると効率的ではないという課題が残った。そこで、今年度は被写体に寸法が既知のものを設定せずに写真測量を実施する方法の試行と精度の検証を実施した。検証の結果、複数台のカメラで同時撮影する架台を使う方法により効率的に実施できることを確認した。

また、昨年度は、補強土壁にとって致命的な崩壊につながる損傷を検知することを目的に、実大模型実験を実施した。検証の結果、地中レーダーや電気比抵抗探査技術等は、壁面背面の空洞を検知するのに有効な手法となり得ることを確認した。今年度は、壁面背面の空洞と同様、補強土壁にとって致命的な崩壊につながる損傷と考えている補強材の破断を検知することを目的に、実大模型実験を実施した。検証の結果、壁面材の振動特性変化は補強材破断の検知に有効な手法となり得ることを確認した。

本報では、本年度実施した写真測量と実大模型実験の概要を報告する。

キーワード：補強土壁、維持管理、メンテナンスサイクル

1. はじめに

補強土壁は盛土中に補強材を敷設することで垂直に近い壁面を比較的安価に構築できるため、壁高の高いものや他の構造物と隣接する箇所での利用実績が増えてきている。しかし、平成23年の東北地方太平洋沖地震では、橋台背面アプローチ部で補強土壁を使用した箇所の一部で橋台背面の段差により通行が困難となった事例が見られた。補強土壁は、一般的な盛土と比べて修復が困難である。一方、橋梁は渡河部のように迂回路の設置が困難な箇所に設置されることが多いため、一般的に橋台背面の段差（写真-1）は道路交通に与える影響は大きい。補強土壁を事後対応的ではなく計画的に維持管理するために、維持管理手法確立は喫緊の課題と言える。

2. 補強土壁の維持管理手法開発の取り組み

2.1 補強土壁の維持管理手法の提案

道路構造物を計画的に維持修繕するためには、点検、診断、措置の維持管理の業務サイクル（以下、メンテナンスサイクル）の構築が不可欠であると言われている¹⁾。土を主材料とした土工構造物についても同様に、メンテ

ナンスサイクルの構築が求められている。2014年7月の道路法施行規則の一部を改正する省令・トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示の施行により、橋梁・トンネル等は5年に1回の頻度で近接目視により点検を行うことを基本とし、その健全性については4段階に区分することが定められた。土工構造物のうちシェッド・大型カルバート等は、省令・告示の規定に基づいた具体的な点検方法等を示した定期点検要領が示されたが、補強土壁の具体的な点検方法等を示したものはない。



写真-1 橋台背面の段差¹⁾

また、一般的な鋼・コンクリート構造物では、外形の変化がすなわち機能の低下と考える場合が多いが、多くの補強土壁では、ある程度変形を伴うことにより補強効果が発揮される構造物であり、多くの補強土壁は経年的にある程度変形しつつ安定していると考えられるため、外形の変化がすなわち機能の低下と判断することは適切でない。さらに、補強土壁の変状形態の多くは、適切に設計・施工されれば外形の変化を伴いながら緩やかに進行すると考えている。そこで、著者らは以下に示すSTEPで補強土壁の維持管理を実施する試みを検討している。

- STEP1 : 日常的な点検により外形の変化を捉える
- STEP2 : 詳細調査により外形の変化を引き起こした要因を検出する
- STEP3 : 外形の変化を引き起こした要因が機能の低下要因かどうかを判断する
- STEP4 : 適切な対策を実施する

2. 2 日常的な点検手法としての写真測量の検証

2. 2. 1 写真測量の概要

前述した維持管理手法では、日常的な点検は何らかの変状を捉えたうえで、継続的に外形のデータを蓄積し、そのデータの差分より外形の変化を捉え、詳細調査の必要性を判断する選定行為となる。そのため、日常的な点検において継続的に実施できる容易な壁面形状計測技術が必要とされる。本節では、日常点検における効率性も鑑みて、被写体に寸法が既知のものを設定せずに、複数台のカメラで同時撮影できる架台を使って、写真測量を試行したので報告する。

写真測量による壁面形状の計測は、1995年に国立研究開発法人土木研究所の屋外実験場に構築した壁高8mのジオグリッド補強土壁に対して実施した。使用機器は、一般的に市販されているデジタル一眼レフカメラ (Nikon D5300) を使い、カメラのレンズは「Nikon AF-S DX NIKKOR 18-140mm f/3.5-5.6G ED VR」を使用した。

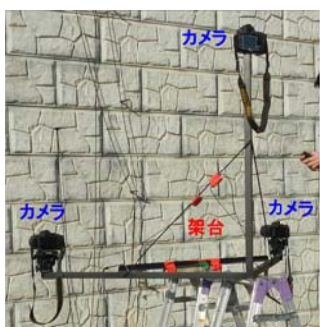


図-1 写真測量で使用したカメラ架台

表-1 カメラの設定条件

焦点距離	35.0mm	露出時間	1/1000 秒
ISO 速度	ISO-10000	絞り	f/16

壁面から8m程度離れた位置から架台に設置した3台のカメラ (図-1) により写真を同時撮影した。カメラの設定は、表-1に示す。

解析は、汎用ソフトウェアを用いた。相互評定は、バンドル法により実施した。また、絶対標定は、架台に設置したカメラの相対距離 (3点の座標) を初期値として与えた。

2. 2. 2 写真測量の結果

図-1は、写真測量により作成した壁面形状の3Dモデルを示す。今回の試行では、高さ約3m、幅約7mの壁面の3Dモデルを作成した。本手法による写真測量の計測精度の検証を以下の二つの方法で検証した。

1) 長さが既知の壁面材の縦および横の長さと比較

壁面材の縦および横の長さは、補強土壁の壁面材の角 (3点) の座標 (図-3) から算出した。写真測量と実際の壁面材の縦および横の長さを比較した結果は、表-2に示す通りであった。計測の誤差は、縦・横ともに1.0cm程度であった。

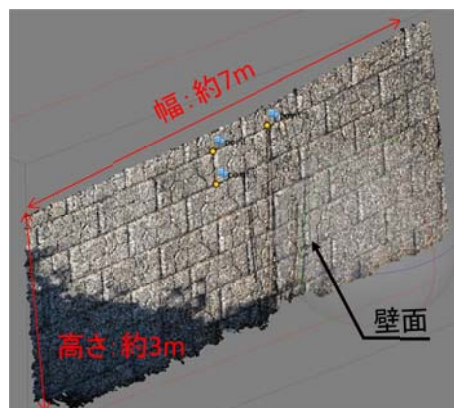


図-2 写真測量で作成した壁面の3Dモデル

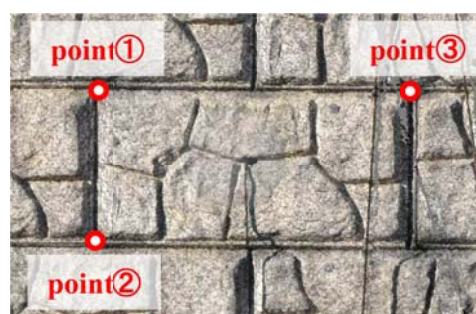


図-3 座標抽出箇所

表-2 計測誤差

	写真測量	実際	誤差
縦の長さ(cm) (point①とpoint②の距離)	48.7	50.0	1.3
横の長さ(cm) (point①とpoint③の距離)	101.1	100.0	1.1

2) トータルステーションで計測した壁面形状と比較

壁面形状の比較は、壁面材に貼りつけた測量用のプリズム中心点の座標 (図-4) を抽出し、壁面直角方向の座標値を比較した。図-5 にトータルステーションによる測量 (以下、TS 測量) と写真測量の壁面形状計測結果を比較したものを示す。図-6 は、計測誤差に着目し、横軸に写真測量の計測結果を、縦軸に TS 測量の計測結果を示した。最大誤差は 1.1cm, 相関係数は 0.99 という結果となった。



図-4 座標抽出箇所

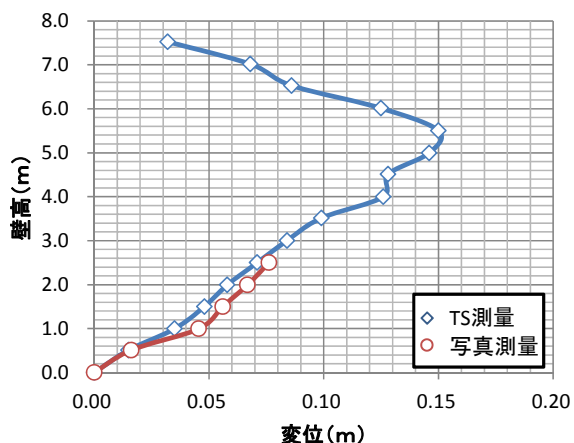


図-5 壁面形状計測結果比較

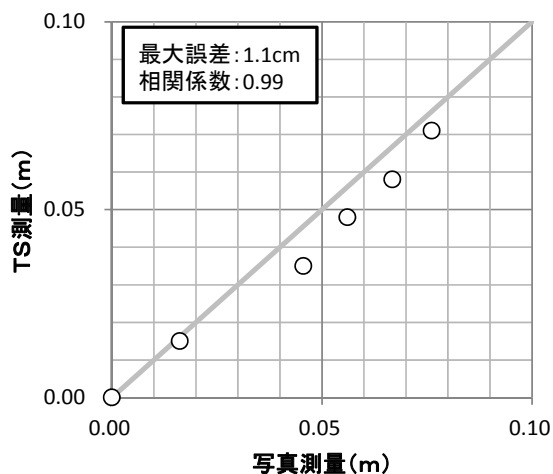


図-6 計測誤差

2. 3 詳細調査手法としての壁面振動計測の検証

2. 3. 1 実大模型実験の概要

前述した維持管理手法では、詳細調査は日常的な点検により外形の変化を捉えた結果、詳細調査が必要と判断したものに対して、外形の変化を引き起こした要因を検出する行為となる。補強材の破断は、致命的な崩壊につながる損傷の一つと考えており、既存の補強土壁に対しても実行可能な補強材破断検知技術が必要とされている。本節では、橋脚やコンクリート擁壁等の健全性診断として実施される振動特性の評価 (以下、本検知手法) に着目し、補強材破断の検知を目的として実大模型実験により本検知手法の実行性を検証したので報告する。

本実大模型実験では、壁高 6m の補強土壁①および② (以下、実大模型) を構築した。実大模型の断面図、正面図を図-7, 図-8 に示す。盛土材は、最適含水比 $w_n=15.6\%$, 最大乾燥密度 1.71g/cm^3 を用いた。突き固め試験 (B-c) の結果は図-9 のとおりであった。表-3 に盛土材の物性値をまとめたものを示す。補強材については、補強土壁①はリブ付きストリップ (引張強さ $490\sim 610\text{N/mm}^2$), 補強土壁②については HDPE 一軸延伸ジオグリッド (製品基準強度 50.0 kN/m) を用いた。壁面材については、補強土壁①はコンクリートスキン (縦×横: $1.5\text{m}\times 1.5\text{m}$), 補強土壁②はコンクリート壁面パネル (縦×横: $1.0\text{m}\times 1.0\text{m}$) を用いた。盛土の締め固めには、自然含水比 $w_n=13.7\%$ の盛土材を用いて 1 層あたりの仕上がり厚を 20cm とし、締固め度が 90% 以上となるように管理した。内部摩擦角 $\phi=30^\circ$, 粘着力 $c=0$ の土質条件に対し、安定照査を実施して補強材の配置を決定した。

補強材の破断については、補強土壁①は腐食や凍上によるストリップの破断を検知することを目的として、ストリップと壁面材の定着を外すことで破断を模擬した。ストリップと壁面材の定着を補強土壁構築後に外せるよう、予め穴あき加工した壁面材を用いてストリップと壁面材を壁面前側で鉄筋と受圧板 (木片) により定着させた (図-10)。補強土壁②は盛土材の沈下等によるジオグリッドの破断を検知することを目的として、ジオグリッドを切断することで破断を模擬した。補強土壁②も補強土壁構築後に熱で切断させるために、予めジオグリッドの壁面近傍にニクロム線を巻きつけた (図-11)。それぞれの補強土壁は、破断が進行することを模擬して、いずれも 3step (図中の①~③) で段階的に破断させた (図-8)。

図-8 に示す位置に起振器 (写真-2) と 1 成分の速度計 (写真-3) を設置し、step 毎に壁面を強制的に振動 (起振器は $1\rightarrow 40\text{Hz}$ にスイープ加振) させて壁面直角方向の速度を計測した。速度計の計測は、タイムステップ $\Delta t=0.005\text{(s)}$ で実施した。

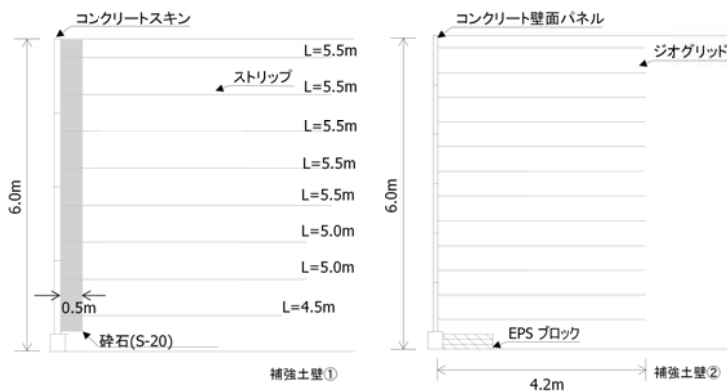


図-7 実大模型の断面図

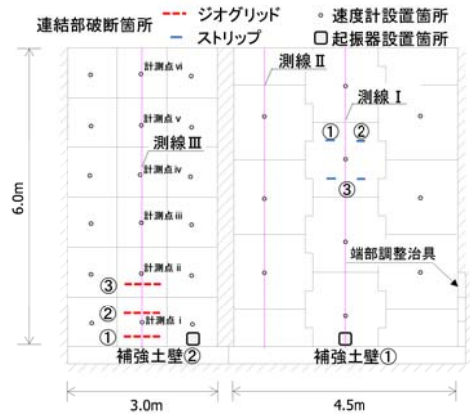


図-8 実大模型の正面図

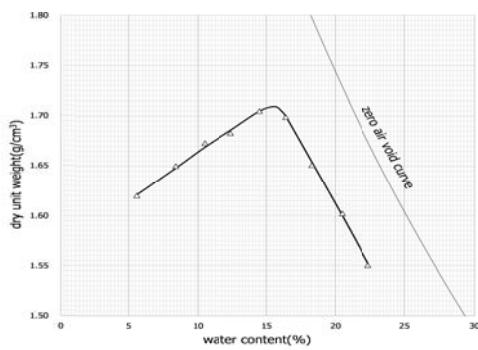


図-9 盛土材の締固め曲線

自然含水比 w_n (%)	13.7	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm³)	1.710
土粒子の密度 ρ_s (g/cm³)	2.678	最適含水比 w_{opt} (%)	15.6
細粒分含有率 F_c (%)	9.9	均等係数 U_c	3.6

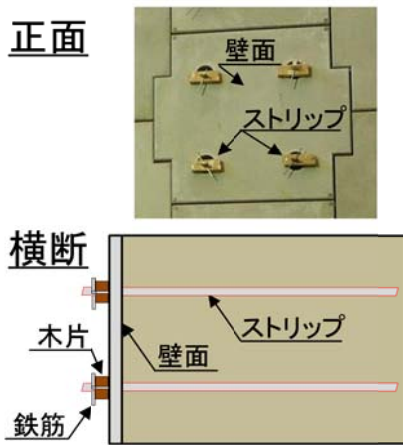


図-10 ストリップの定着方法

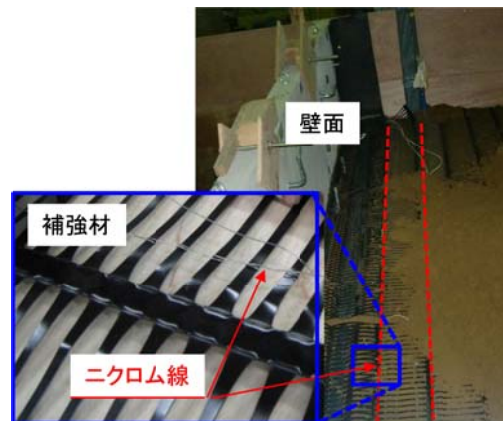


図-11 ジオグリッド切斷の仕掛け



写真-2 起振器



写真-3 速度計

2. 3. 2 実大模型実験の結果

構造物の損傷を評価することを目的としたモード特性の同定は、多くの研究者により実施されている^{たとえは2)}。本研究でも、式(1)に示す通り、計測した補強土壁の速度応答のスペクトル密度関数マトリックスを特異値分解する方法で、補強土壁のモード特性の同定³⁾を行った。

$$\hat{G}_{yy}(j\omega) = USU^H \dots \dots (1)$$

ここに、 $\hat{G}_{yy}(j\omega)$: パワースペクトル密度行列、 $U = [u_1, u_2, \dots, u_m]$: 特異ベクトル u からなるユニタリ行列、 S : 対角行列、 H : 共役転置行列、 m : 計測点数とする。また、 U は複素数のベクトルであり、1次の特異ベクトル u_1 はモード形状の近似解 (以下、モード形状) を示す。

3step で実施した破断の前後で、前述の方法によりモード形状を抽出した。

図-12 はパワースペクトル密度行列の特異値の分布を示す。破断させたストリップを含む測線 I は、図に示す i ~ iii の3箇所で見られる顕著なピークが確認できる。i および iii は step による有意な差は見られないが、ii は step3 のみでピークが立つことを確認した。一方、破断させたスキンを含まない測線 II では、i ~ iii で step による有意な差は確認できない。測線 III では、iv ~ vi の3箇所で見られる顕著なピークが確認できる。

図-13, 14 に、それぞれのピーク毎にモード形状を示す。図より、i および iv のモード形状およびモード振幅に有意な差は確認できない。一方、図より iii, v, vi のモード振幅には若干の差異が確認できる。また、図-12において、測線 I の step3 のみで顕著なピークを示した ii のモード形状は、破断を実施したスキンのみが局部的に折れ曲がるような振動モードとなることを確認した。測線 II の step3 の ii のモードには局所的な折れは見られない。

次に、モード形状の変化を定量的に評価するために、測線 III を例としてモード形状の振幅比を図-15に示す。モード形状の振幅比は、対象測線の最下段の計測点 i と最上段の計測点 vi のモード振幅値をそれぞれ x 軸 (A1), y 軸 (A2) にプロットした。図から、周波数約 25Hz および 30Hz では破断ありと破断なしで明瞭な差が生じることが確認できた。破断ありと破断なしのモード形状の振幅値が約 10Hz で明瞭な差が出ずに、25Hz および 30Hz で明瞭な差が生じた理由としては、補強土壁背面の盛土自体が約 10Hz に大きなピーク強度を有する (図-16) ために、約 10Hz 程度の低次モードは盛土の挙動が支配的となっている一方で、補強材破断のような部材の局所的な損傷は、25Hz や 30Hz の比較的高次モードの変化として現れることが考えられる。

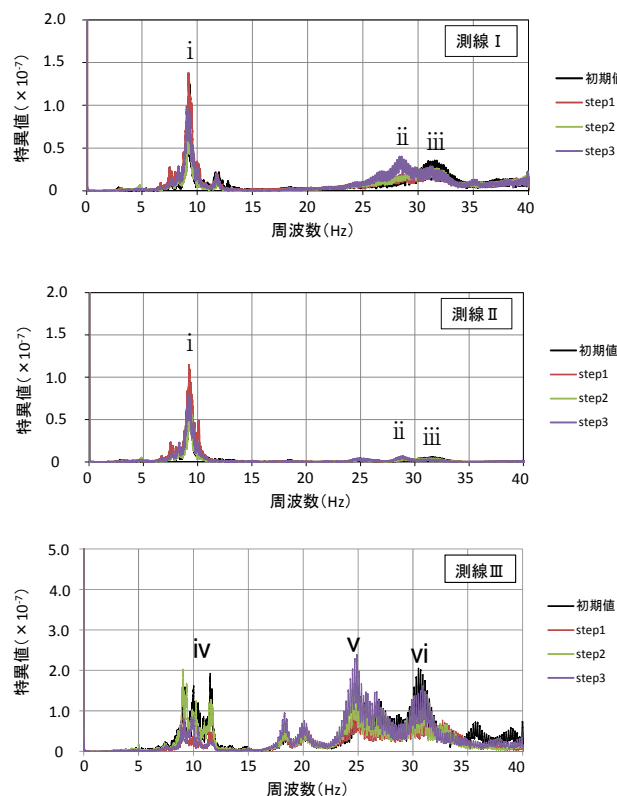


図-12 パワースペクトル密度行列の特異値

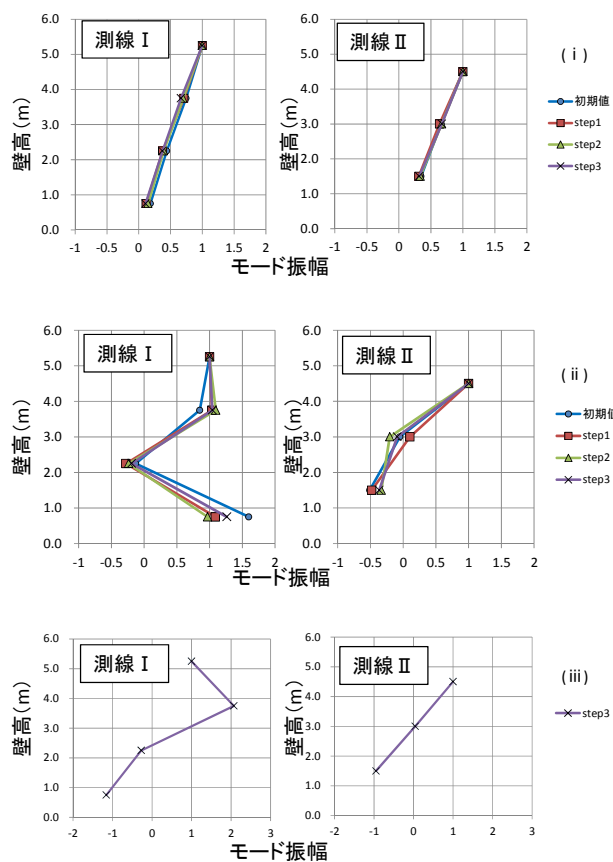


図-13 測線 I・II のモード形状

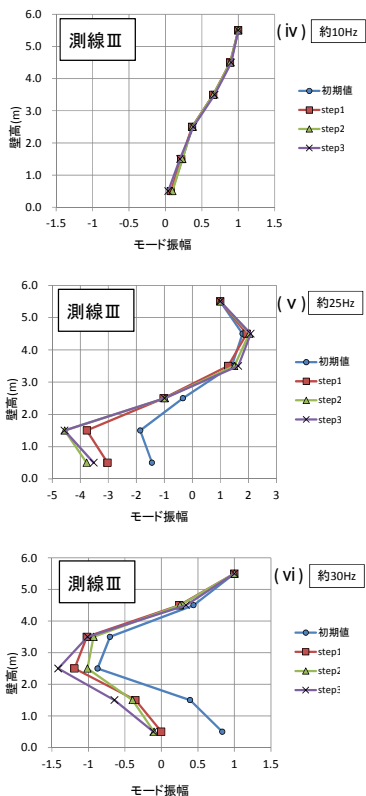


図-14 測線IIIのモード形状

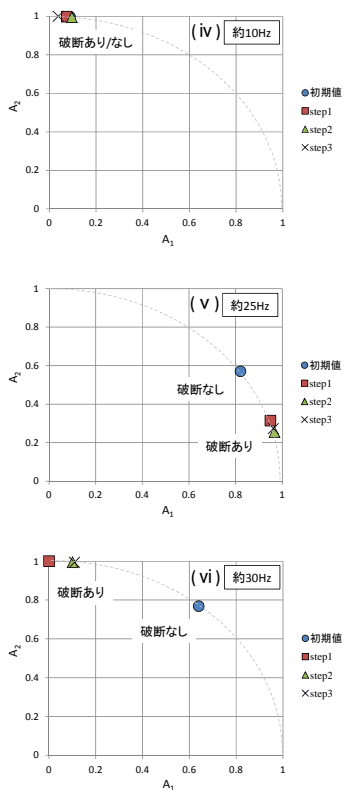


図-15 モード形状の振幅比 ($A_1^2 + A_2^2 = 1$ で正規化)

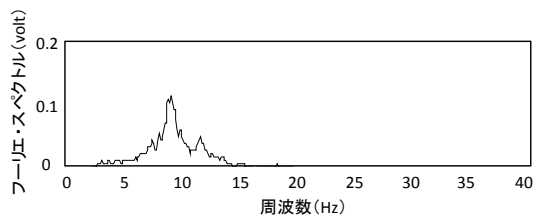


図-16 常時微動による盛土のフーリエスペクトル分布

3. まとめと今後の課題

補強土壁を計画的に維持管理するため、写真測量と実大模型実験の概要を報告した。以下に、まとめと今後の課題を示す。

【日常的な点検手法としての写真測量の検証】

本検証により、複数台のカメラで同時撮影できる架台を使うことで、被写体に寸法が既知のものを設定せずに写真測量が実施可能であることを確認した。本検証では、3台のカメラによる同時撮影により、測量精度は概ね1.0cm程度で計測することが可能であることを確認した。

今後は、日常の点検時に架台を車両等に搭載して写真測量を実施する際の撮影距離やカメラの設定等の実務上のノウハウについて取りまとめる必要がある。

【詳細調査手法としての壁面振動計測の検証】

本検証により、起振器振動による壁面の振動特性は補強材の破断により変化することを確認した。また、補強材の破断による補強土壁の壁面の振動特性の変化は、基本モードではなく高次のモードに着目する必要があることを示唆する結果が得られた。

今後は、詳細調査時に計測した壁面の振動特性から破断の有無を判断する具体的な指標や計測方法のノウハウについて取りまとめる必要がある。

謝辞

本研究は、補強土壁の維持管理手法開発に関する共同研究の共同研究者に多大なるご協力をいただきました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 平成16年(2004年)新潟県中越地震土木施設災害調査報告,国土技術政策総合研究所研究報告,第27号,土木研究所報告,第203号,2006.
- 2) 上半ら: 微動計測を利用した地震時構造物損傷度検査手法,生産研究,54巻6号,2002.
- 3) Brinkeret.al: Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition, Smart Mat Struct10:441-445,2001.

Development of maintenance for earth structure with consideration for the control level

Abstract

It is hard to say that sufficient designing maintenance is conducted to earth structures in comparison to pavements or bridges, because the earth structures consist mainly of natural materials. However, materials which are potentially deterioration are used even for the earth structures. Some earth structures deformed by heavy rains or earthquakes, and the deformed earth structures may not have assumed performance in design. For strategic maintenances, it is necessary to develop maintenance methods for the deformed structures.

Last year, accuracy verification of photographic measurement on running vehicle was conducted. It is confirmed that photographic measurement can be effective tool to judge the need of further investigation. It remained a problem of inefficiency for daily inspection by using photographic measurement because already known scales on the object are needed. In this year, photographic measurement without known scales on the object was tested. In the result efficient photographic measurement can be conducted by using camera mount which can take multiple photos simultaneously.

And, real scale model test was conducted to detect damages lead to fatal collapse. In the result, Ground Penetration Radar or electric resistance method can be effective method to detect cavity behind wall faces. In this year, real scale model test was conducted to detect fractures of reinforcement materials. In the result, vibration measurement of wall faces can be effective method to detect fracture of reinforcement materials.

This report introduces the photographic measurement and the real scale model test.