

## 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。

本研究では、補強土壁の維持管理方法の体系化の基本となる劣化の進行をフォルトツリーで検討し、フォルトツリーに示した事象の中で、外観目視では確認できない事象を点検や詳細調査で検知・把握する手法の検証を行った。

本報では、フォルトツリーによる劣化の進行の検討、日常的な点検手法としての写真測量の検証、補強材の破断を検知する詳細調査手法の検証について報告する。

**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

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<sup>1)</sup>。2014年7月の道路法施行規則の一部を改正する省令及び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。

一方で、道路土工構造物については、支障時の影響や復旧のしやすさ等の特性を踏まえ、点検、モニタリング、通行規制等を活用して当面の安全を確保すべきとされている<sup>2)</sup>。

一般的に、道路土工構造物は、適切に設計・施工されていれば、経年的に緩やかな外形の変化を伴いながら安定化すると考えられている。そのため、一般的な鋼・コンクリート構造物では、外形の変化をもって機能の低下を推定しうる場合が多いが、多くの道路土工構造物は、外形の変化を単純に機能の低下と判断することは適切でない。

道路土工構造物は、大規模に崩壊する場合にも緩やかに変形が進行する場合が多い。初期の段階ではのり面や路面の亀裂等が発生し、これらの変状が時間をかけて進行し、最終的に崩壊に至ることが一般的である。これらの初期段階の変状を捉えて措置を講じることができれば、大規模な崩壊を防ぐことができる。道路土工構造物

は数が膨大なことを考えれば、現在直轄国道で行われているような1～2日に一回の日常的な点検で初期段階の変状を見つけ、対応することを基本とした維持管理が合理的である。

著者らが提案する道路土工構造物の維持管理の各STEPは以下の通りとなる。

**STEP1**：日常的な点検により外形の変化の有無を検知

**STEP2**：詳細調査により外形の変化を引き起こした要因を把握する

**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

ただし、道路土工構造物の中でも、特に大規模なもの、被災時の交通影響が重大なものについては、通行止めなどの対応を行わずに済む維持管理の方法を取り入れていく必要がある。

道路土工構造物の中でも補強土壁は、壁高が高いものが多く、近年は橋台背面アプローチ部（以下「アプローチ部」という。）での補強土壁の適用が増えてきている。橋梁は渡河部のように迂回路の設置が困難な箇所を設置されることが多いため、アプローチ部の補強土壁に不具合が生じると道路交通に与える影響は大きい。実際に、平成23年の東北地方太平洋沖地震では、アプローチ部に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一定期間通行が困難となった事例（写真-1）が見ら

れた。さらに、補強土壁は一般的な盛土と比べて修復が困難である。そのため、アプローチ部の補強土壁等は、早期に通行止めなどの対応を行わずに済み維持管理へと移行する必要がある。

通行止めなどの対応を行わずに済み維持管理への移行にあたっては、対象となる構造物の劣化の進行を明らかにする必要がある。劣化の進行とは、ある構造物の劣化の進行を示す事象のつながりである。また、複数の劣化の進行の相互の関係を樹系図で示したものをフォルトツリーと言う。国立研究開発法人土木研究所、防衛大学校、(株) 高速道路総合技術研究所、(一財) 土木研究センター、民間 11 社と「補強土壁の維持管理手法開発に関する共同研究」(平成 26~27 年度) (以下「本共同研究」という。) を実施し、補強土壁のフォルトツリーを作成している<sup>2)</sup>。

図-1 は、フォルトツリーの一例を示す。詳細は後述するが、上面道路の沈下・陥没に係るこれら全ての事象を網羅的に示すものが、フォルトツリーであり、過緊張を起点の要因として、補強材破断の損傷、壁面材の脱落、盛土材の漏出、盛土の空洞化、上面道路の沈下・陥没と進展していくフローの一つが劣化の進行である。



写真-1 橋台背面の段差

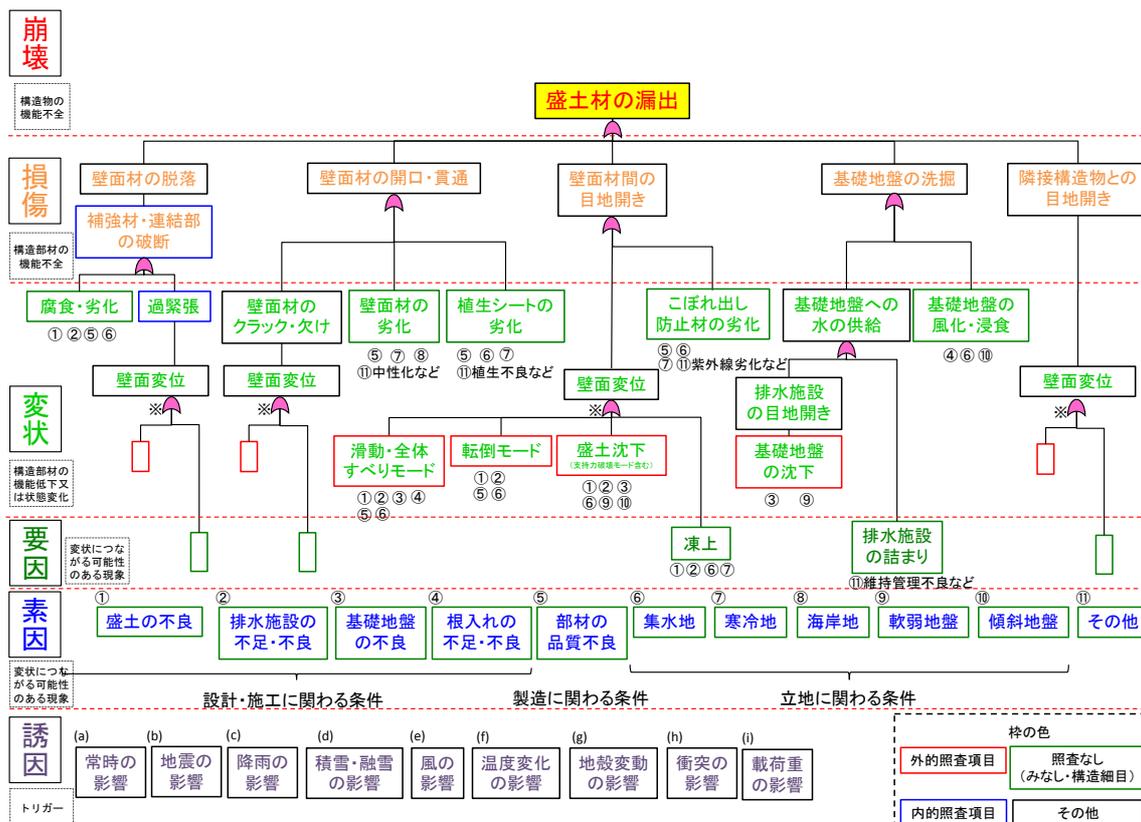


図-1 補強土壁のフォルトツリー

## 2. フォルトツリーによる劣化の進行の検討

図-1は、盛土材の漏出という重大事象に至る劣化の進行の一部であるが、実際にこのフォルトツリーを補強土壁の維持管理に活用するためには、このフォルトツリーに示した事象をどのように検知・把握するかが重要である。もしもいかなる手段をもってしても検知・把握できない劣化の進行があると、その構造物は維持管理ができないと言うことになってしまう。

上述の通り、大多数の道路土工構造物については、事後対応的に維持管理を行うことが効率的であると考えられており、重要な構造物であっても補強土壁のみを特別な方法で維持管理を行うことは実効的ではない。そこで前に示したSTEPにおけるSTEP 1までは補強土壁も通常の道路土工構造物と同じく日常的な点検によって外形の変化を検知し、STEP2の詳細調査の段階から予防保全的な維持管理を行うことを考えた。

この場合、日常的な点検は外観目視による点検であるので、外観目視と併用して実施できる簡便な手法でかつ補強土壁の健全性の指標になりうるものを測定することのできる点検手法の有無が補強土壁の維持管理の鍵となる。そこで、本研究では補強土壁の健全性の指標として壁面変形の推移に着目し、日常的な点検でパトロールカーの屋根に搭載することを想定して、架台に固定した3台のカメラによる同時撮影を行う代わりに、被写体に縮尺を必要としない写真測量方法の精度の検証を行った。また、点検での不可視箇所を損傷を検知することのできる詳細調査手法の有無も補強土壁の維持管理の鍵となる。図-1のフォルトツリーの整理より、構造部材が機能しなくなっている損傷事象の中でも「補強材・連結部の破断」は、外観目視等では検知が難しい。そこで、本研究では「補強材・連結部の破断」箇所を何らかの方法で検知する方法の検討を行った。

### 3. 日常的な点検手法としての写真測量の検証

#### 3.1 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いうえで、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) を用い、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。

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-2) 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。

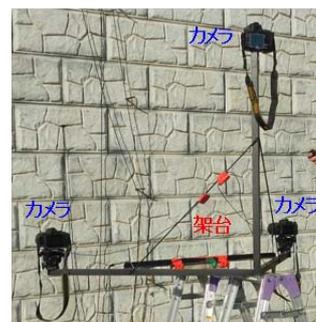


図-2 写真測量で使用したカメラ架台

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

#### 3.2 写真測量の結果

図-3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-4) 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。

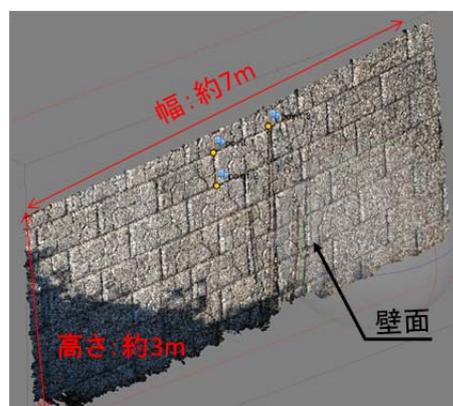


図-3 写真測量で作成した壁面の3Dモデル



図-4 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-5) を抽出し、壁面直角方向の座標値を比較した。図-6 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-7 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-5 座標抽出箇所

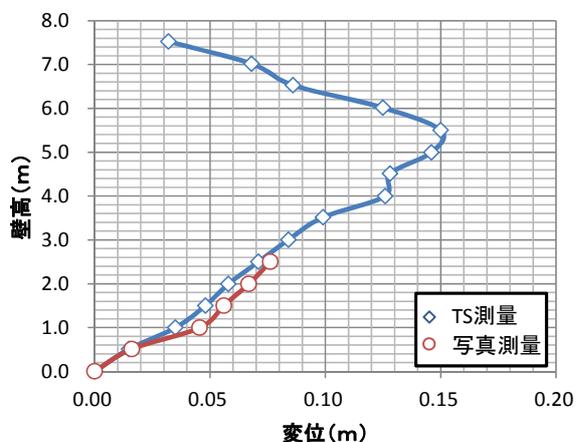


図-6 壁面形状計測結果比較

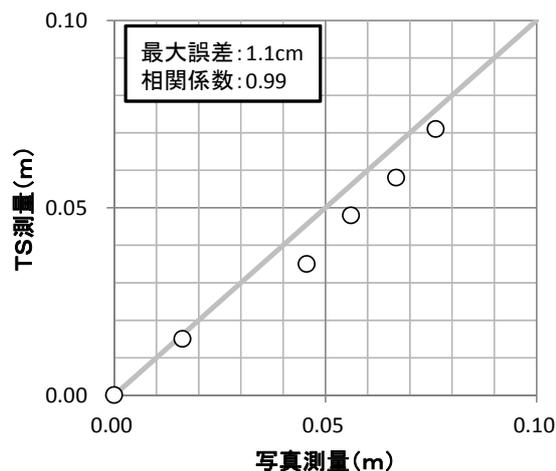


図-7 計測誤差

4. 補強材の破断を検知する詳細調査手法の検証

4. 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-8、図-9 に示す。盛土材は、最適含水比  $w_n=15.6\%$ 、最大乾燥密度  $1.71\text{g/cm}^3$  を用いた。突き固め試験 (B-c) の結果は図-10 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  $50.0\text{ kN/m}$ ) 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  $20\text{cm}$  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

壁面材を壁面前面側で鉄筋と受圧板（木片）により定着させた（図-11）．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-12）．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-9）．

図-9 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→40Hz 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  $\Delta t=0.005(s)$  で実施した．

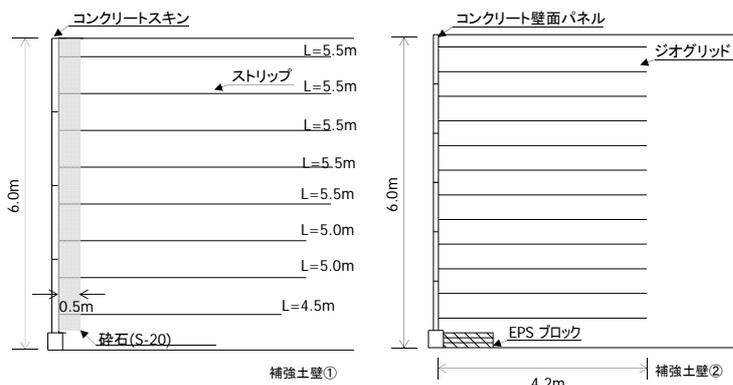


図-8 実大模型の断面図

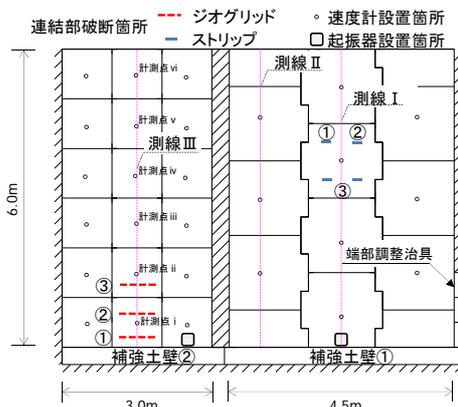


図-9 実大模型の正面図

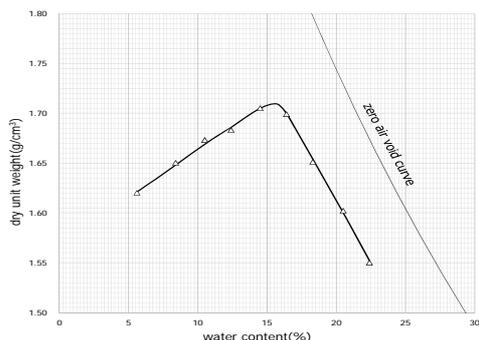


図-10 盛土材の締固め曲線

表-3 盛土材の物性値

自然含水比 $w_n$ (%)	13.7	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.710
土粒子の密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.678	最適含水比 $w_{opt}$ (%)	15.6
細粒含有率 Fc (%)	9.9	均等係数 $U_c$	3.6

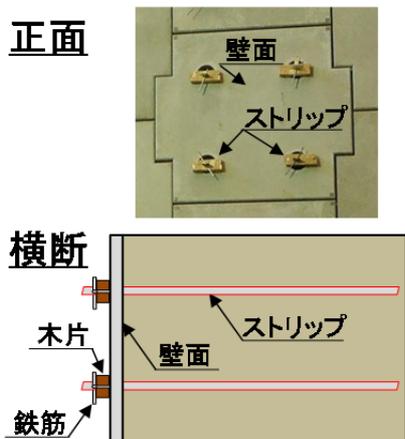


図-11 ストリップの定着方法

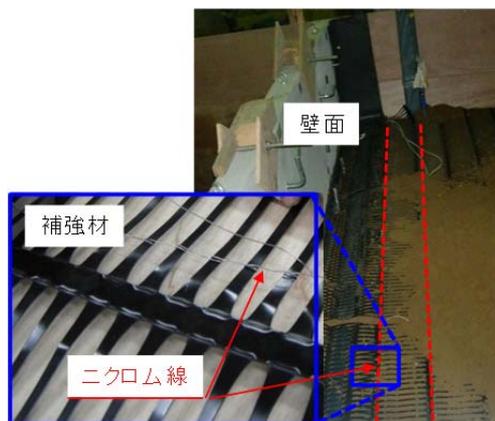


図-12 ジオグリッド切断の仕掛け



写真-2 起振器



写真-3 速度計

#### 4. 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<sup>たとえ12)</sup>。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<sup>9)</sup>を行った。

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

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-13 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 箇所で顕著なピークが確認できる。

図-14, 15 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-13 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所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-16 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-17) 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。

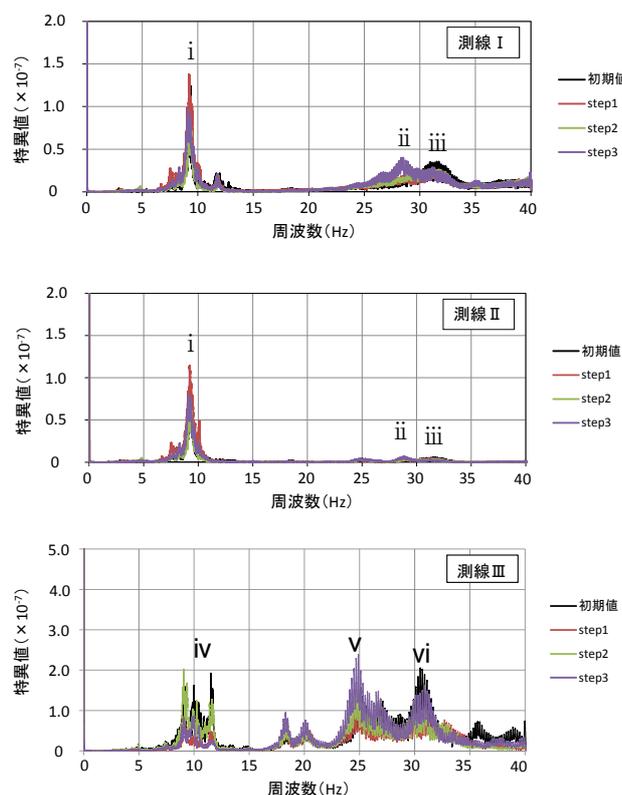


図-13 パワースペクトル密度行列の特異値

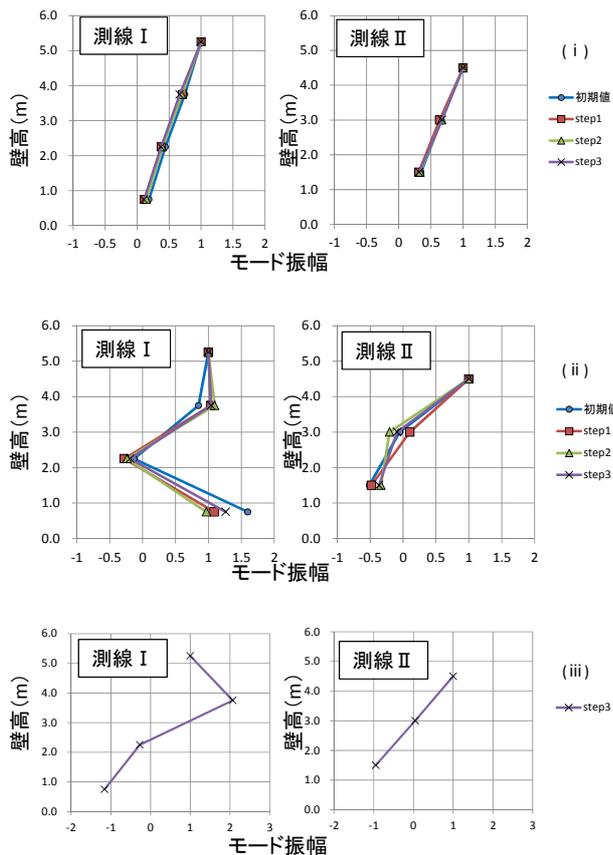


図-14 測線 I・II のモード形状

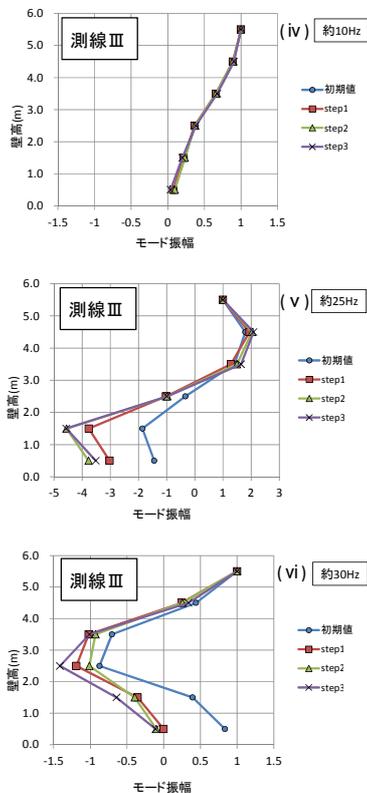


図-15 測線IIIのモード形状

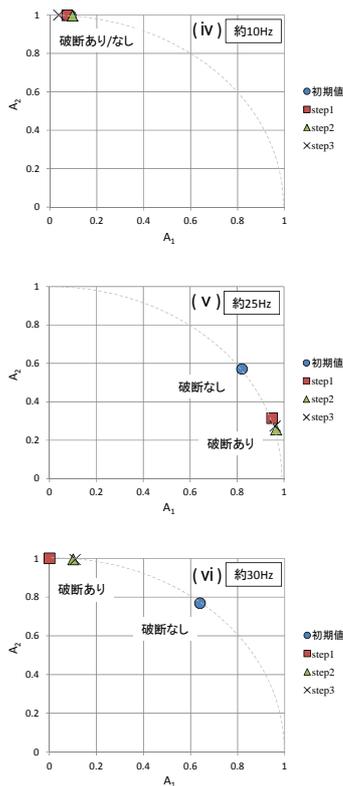


図-16 モード形状の振幅比 ( $A_1^2 + A_2^2 = 1$  で正規化)

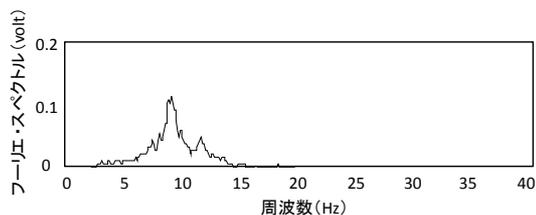


図-17 常時微動による盛土のフーリエスペクトル分布

## 5. まとめ

本報では、アプローチ部の補強土壁の早期の維持管理手法確立を目的に、フォルトツリーによる劣化の進行の検討、日常的な点検手法としての写真測量の検証、補強材の破断を検知する詳細調査手法の検証について報告した。以下に、まとめを示す。

- ・維持管理の基本となる補強土壁のフォルトツリーを作成した。
- ・フォルトツリーに示した事象をどのように検知・把握するかが重要であり、外観目視では発見できない損傷を検知することのできる詳細調査方法の有無が予防保全による維持管理への移行の鍵となる。
- ・検証の結果、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。

- ・現状の外観目視では検知が難しい「補強材破断」について、何らかの起振に対する構造物の振動特性を評価する方法に着目し、本実験により振動特性の評価の実効性を検証した。
- ・検証の結果、起振器により壁面を起振させた時のモード形状の振幅比が、補強材破断により変化することを確認した。
- ・「補強材破断」により変化するモード形状の振幅比の振動数帯域は、固有振動数付近ではなく、比較的高次の振動数に着目する必要があることを示唆する結果が得られた。

## 6. 今後の課題

本報では、フォルトツリーの活用について、概念的なものを示したが、今後、フォルトツリーを基に実効性のある維持管理方法を提案するために、以下の取り組みを実施していく必要がある。

- ・フォルトツリーの精度向上
 

現場で発生した補強土壁の損傷事象等を基に、フォルトツリーの事象に漏れがないことをチェックする必要がある。事象に漏れがあれば、フォルトツリーに取り入れ、熟度を高めていく必要がある。
- ・点検手法の具体化
 

日常の点検で何を着目点とすべきかを示したガイドラインを作成する必要がある。具体的には、作成したフォルトツリーを基に、様々な補強土壁の立地条件を想定して、目視できる事象と目視できない事象を分類する。さらに、目視できない事象については、その事象発生の痕跡となる目視できる事象に置き換えて点検で検知できるように、目視点検の着目点を整理する必要がある。また、フォルトツリーを基に検知した事象からシナリオを推定するために必要な情報を整理するための、点検個票を整理する必要がある。
- ・診断技術の具体化
 

各事象の要因となるものを把握するための診断方法を体系的に整理する必要がある。具体的には、フォルトツリーを基に、各事象に対して診断可能な既存の診断技術があるかどうかの整理を行う。診断技術がない

ものについては、診断方法を新たに開発していく必要がある。

- ・措置の体系化
 

予防保全による維持管理に移行させるために、フォルトツリーに挙げた事象を検知したあとの対応についても検討しておく必要がある。具体的には、フォルトツリーを基に、ある事象が発生した時に、事象発生の要因も踏まえた適切な措置方法を整理する必要がある。措置の方法がない事象については、事象を発生させないような構造にするか、措置の方法を新たに開発していく必要がある。

また、検証した架台に固定した3台のカメラによる同時撮影を行う代わりに、被写体に縮尺を必要としない写真測量方法については、所要の精度で計測するための計測方法やカメラの必要スペック等を整理する必要がある。

実大模型実験で検証した（何らかの起振に対する構造物の）振動特性を評価する手法については、補強材破断を実施していない壁面でも隣接する壁面の補強材の破断に伴い、スペクトル比が変化することを確認され、詳細な破断位置の特定までは至らなかった。補強材破断箇所等を適切に判断するためには、今後、様々な補強材破断破断条件の補強土壁に対する振動計測データの蓄積と変化する振動数帯域の分析が必要である。

## 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.

In this research, deterioration scenarios which were the basis of schematization for maintenance of reinforced soil wall were organized by fault tree. And the inspection or survey methods for invisible events by visual inspection were studied. This report introduces the study for deterioration scenario of reinforced soil walls, the study for the photographic measurement as inspection method, and the study for the survey method of reinforcement material fractures.