

補強土壁の予防保全に向けたフォルトツリーの活用について

宮武裕昭・藤田智弘

1. はじめに

道路構造物を計画的に維持管理するためには、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」という。）の構築が不可欠である¹⁾。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²⁾。

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はない。

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変形や亀裂等が発生し、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。

STEP 1 日常的な点検により外形の変化の有無を検知

STEP 2 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

STEP 3 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

STEP 4 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予防保全的な維持管理を取り入れていく必要がある。

2. 予防保全に向けた取組み

道路土工構造物の中でも補強土壁は、壁高が高いものも多く、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、早期に予防保全による維持管理へと移行する必要がある。



写真-1 橋台背面の段差

予防保全への移行に当たっては、対象となる構造物の劣化シナリオを明らかにする必要がある。劣化シナリオとは、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、複数の劣化シナリオ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²⁾。

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シナリオである。

3. フォルトツリーによる劣化シナリオの検討

図-1 は、上面道路の陥没という重大事象に至る劣化シナリオの一部であるが、実際にこのフォルトツリーを予防保全的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・把握できない劣化シナリオがあると、その構造物は予防保全ができない

いとい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、外観目視では発見できない損傷を検知することのできる点検手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。

図-1 から、「補強材破断」、「透水防砂材の消失」、「腐食」、「過緊張」等が直接目視で確認できない事象として挙げることができる。これらの中でも、「補強材破断」は写真-2でも示すとおり、「壁面材の脱落」に至る可能性がある。「壁面材の脱落」は、壁面材が直接第三者に被害を及ぼすだけでなく、脱落箇所から盛土材が漏出し補強土壁の不安定化につながるおそれもある。

そこで、現状の外観目視では検知が難しい「補強材破断」について、日常的な点検により壁面の局所的な変形等のパターン等から破断の兆候を捉え、詳細調査により「補強材破断」箇所を何らかの方法で検知する方法を検討することとした。橋

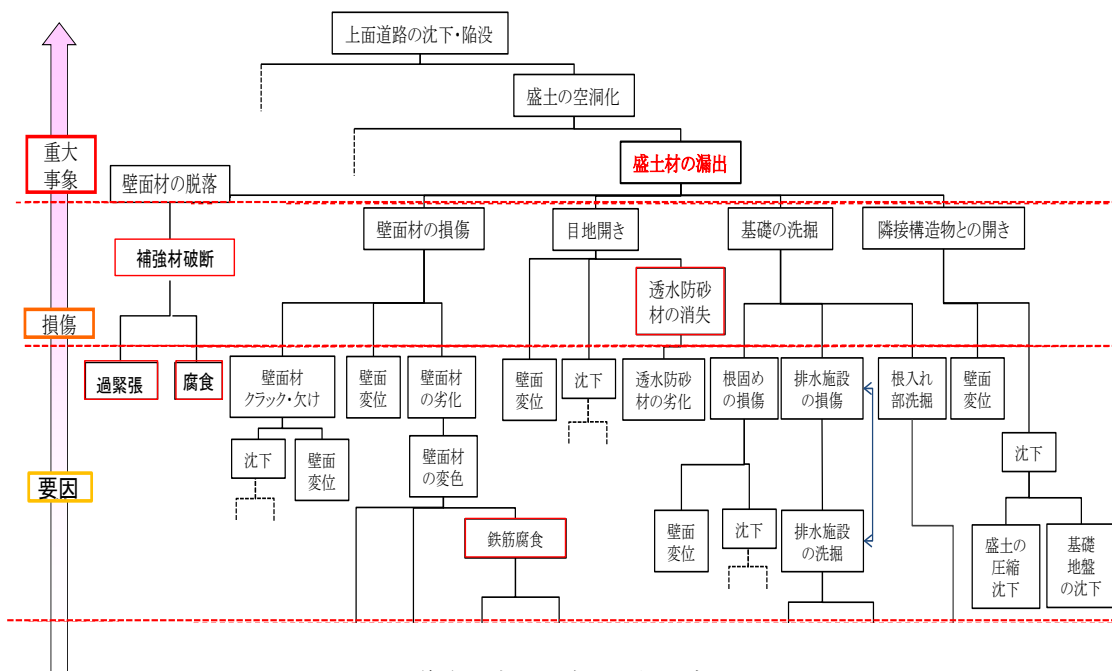


図-1 上面道路の沈下・陥没に係る劣化シナリオ



写真-2 壁面材の脱落事例

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、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、「補強材破断」の検知を目的として本実験により振動特性の評価の実効性を検証した。

4. 補強材破断に関する実大模型実験

4.1 実験の概要

本実験は、STEP2 における詳細調査で「補強材破断」を検知することの実効性を検証することを目的として、以下の手順で実施した。

- ①補強土壁の実大模型作成
- ②補強材の破断の再現
- ③補強材破断検知の実効性の検証

①強土壁の実大模型作成

本実験では、まず始めに健全な状態の壁高 6m の補強土壁（以下「実大模型」という。）を構築した。実大模型の断面図、正面図を図-2、図-3 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 の一般的に締固めに適した砂質土を用いた。補強材については、高密度ポリエチレン一軸延伸ジオグリッド（製品基準強度 50.0kN/m ）を用いた。壁面材は、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。

②補強材の破断の再現

補強材の破断は、基礎の洗掘を起因とする盛土材の沈下等によるジオグリッドの破断を想定して、下段部のジオグリッドを切断した。補強土壁構築

後に補強材を切断させるために、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(写真-3)。模型を構築した後にニクロム線に通電し、熱によって、いずれも3段階(図-3の①～③)で段階的に破断させた。

③補強材破断検知の実効性の検証

本実験では起振器により壁面を起振させて、3段階で実施する補強材破断が検知可能かどうかを検証した。起振器の仕様は、加振力 200N 、最大振幅 15mmp-p 、最大加速度 285m/s^2 のものを用いた。図-3に示す位置に設置した起振器(写真-4)により、15分程度かけて $1\sim 40\text{Hz}$ へと徐々に振動数を変化させたスイープ正弦波により壁面垂直方向に壁面を起振し、起振時の壁面垂直方向の壁面の振動を、速度計(写真-5)により計測した。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。「補強材破断」を検知可能かどうかは、計測点 i ~ iv の振動特性が段階毎に変化するかどうかで検証した。計測点 i ~ iv は図-3 に示す通りで、補強材破断を実施する壁面(計測点 i、ii)と補強材破断を実施しない壁面(計測点 iii、iv)で計測した。本実験では、起振器を機械制御しても全く同じものを起振させることができないため、多少変化する起振器の振動の影響を取り除くために振動特性はスペクトル比に着目することとした。スペクトル比は起振器を設置した壁面のスペクトルに対する各計測点 i ~ iv のスペクトルの比とした。

また、一般的に構造物の健全性診断の際には固有振動数の変化に着目することが多いので、図-2に示す位置に速度計を設置して常時微動を計測して盛土を含む実大模型全体の固有振動を取得した。

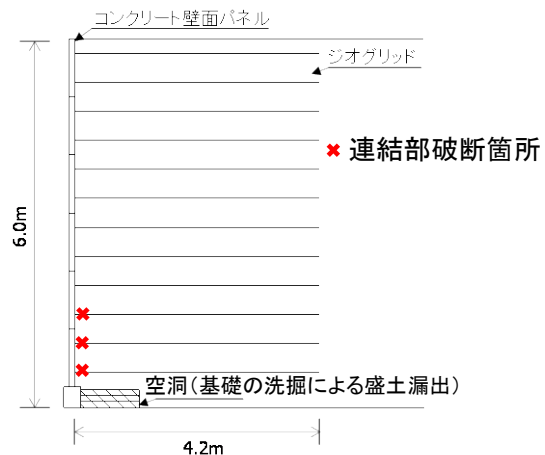


図-2 実大模型の断面図

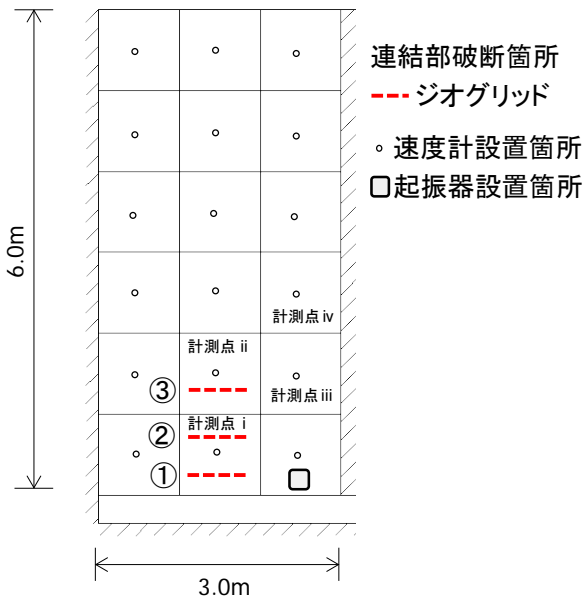


図-3 実大模型の正面図



写真-5 速度計

4.2 実験の結果

図-4～7 は、それぞれ計測点 i ～ iv の段階毎のスペクトル比を示す。図から 20Hz 以下のスペクトル比の分布は、全ての計測点において段階間で顕著な変化が生じないことを確認した。一方で、20～30Hz のスペクトル比の分布は、補強材破断を実施した計測点 i または ii は補強材破断を実施していない iii または iv と比べて段階間で顕著に変化することを確認した。つまり、本実験で補強材破断により振動特性が変化することを確認した。振動特性の評価は、補強材破断を検知する有効な手法になりうる。

また、図-8は常時微動を計測して、盛土を含む実大模型全体のスペクトル分布を計測した結果を示す。盛土を含む実大模型全体としては、10Hz 程度の振動数にピークをもつ振動をしていることを確認した。本実験において顕著なスペクトル比の変化を確認した振動数は20Hz以上であり、盛土の固有振動数10Hzではなく、それよりも大きな振動数帯域が変化することを確認した。これは、補強材破断等の補強土壁を構成する部材の局所的な損傷は、固有振動数の変化ではなく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。

一方で、30～40Hzのスペクトル比の分布は、補強材破断を実施した計測点 i または ii だけでなく、補強材破断を実施していない iii または iv においても段階間で変化することを確認した。さらに、計測点 i や ii に関しても、それぞれの計測点の壁面で補強材破断を実施していなくても、上下の壁面の補強材破断を実施した際にも、スペクトル比が変化することを確認した。これは、壁面の振動特性は、補強材破断を実施していない壁面についても、隣接する壁面の補強材破断の影響を受けることを示唆するものである。

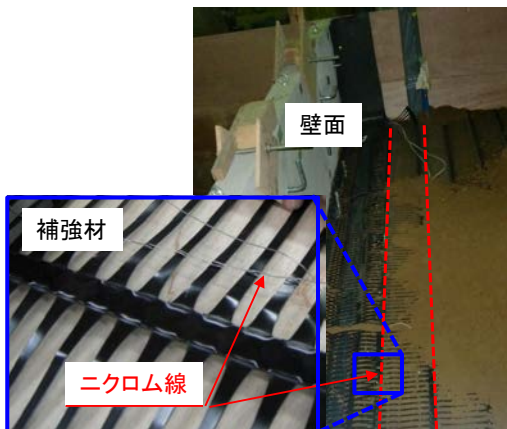


写真-3 補強材破断の仕掛け



写真-4 起振器

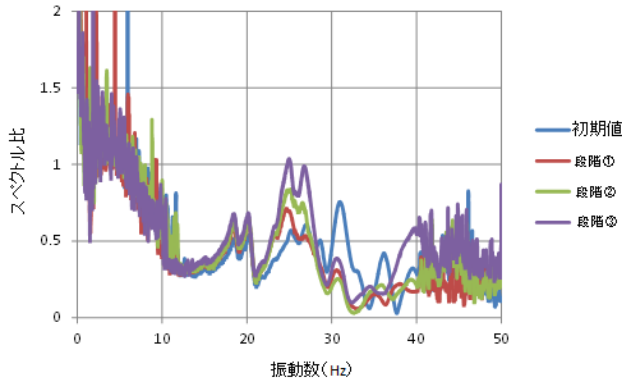


図-4 計測点 i のスペクトル比

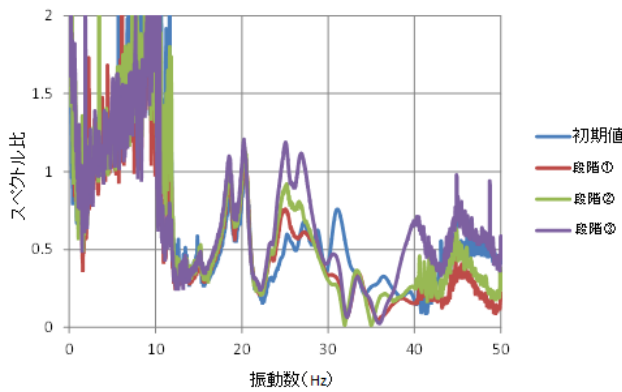


図-5 計測点 ii のスペクトル比

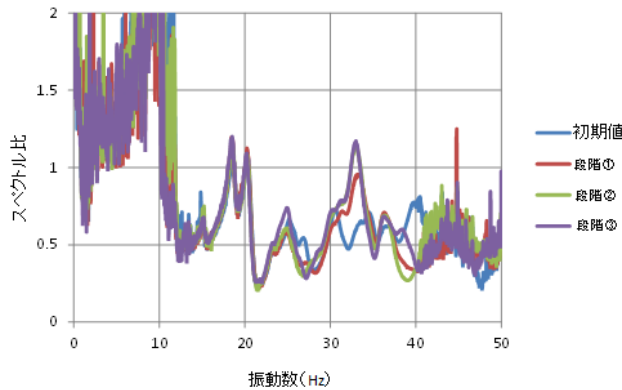


図-6 計測点 iii のスペクトル比

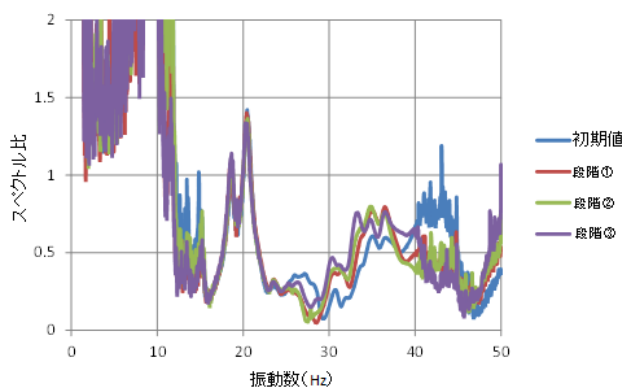


図-7 計測点 iv のスペクトル比

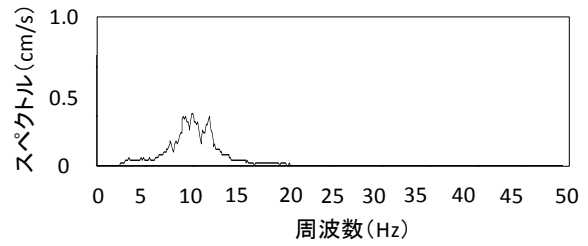


図-8 スペクトル分布

5. まとめ

本報では、アプローチ部の補強土壁の早期の予防保全への移行を目的に、予防保全に向けた取り組み、フォルトツリーによる劣化シナリオの検討、補強材破断に関する実大模型実験について報告した。以下に、まとめを示す。

- ・予防保全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。
- ・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スペクトル比が、補強材破断により変化することを確認した。
- ・「補強材破断」により変化するスペクトル比の振動数帯域は、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

本報文では、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、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

本報文の作成にあたっては、「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）の共同研究メンバーに多大なるご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 道路のメンテナンスサイクルの構築に向けて、平成 25年6月、社会資本整備審議会 道路分科会道路メンテナンス技術小委員会
- 2) 宮武裕昭、藤田智弘：補強土壁における点検手法の構築に向けた取組み、土木技術資料、第57巻、第8号、pp.14～17、2015

宮武裕昭



土木研究所地質・地盤
研究グループ施工技術
チーム 上席研究員
Hiroaki MIYATAKE

藤田智弘



土木研究所地質・地盤
研究グループ施工技術
チーム 研究員
Tomohiro FUJITA