





図3 グラウト充填不良の例<sup>4)</sup>

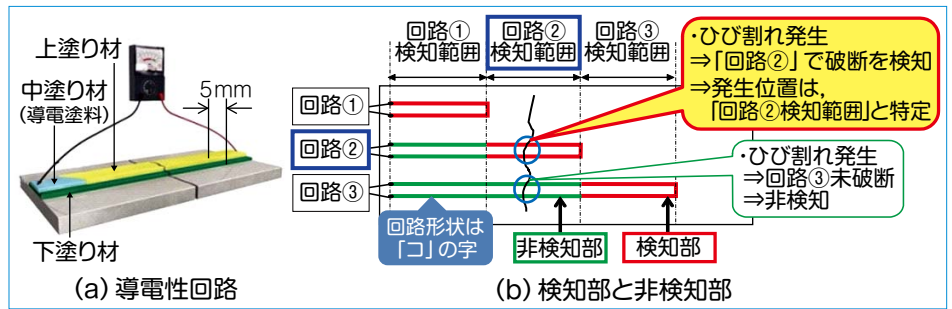


図5 導電性回路の概要

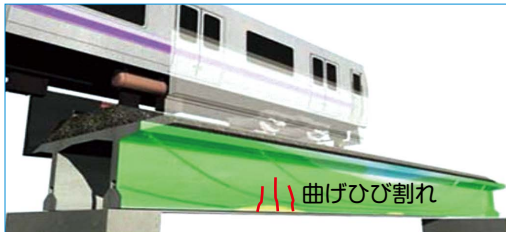


図4 列車通過時の曲げひび割れ

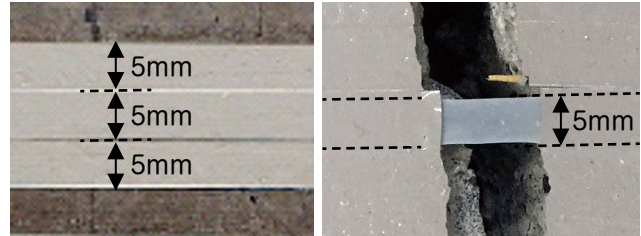


図6 非検知部の概要(ウレタンテープと導電塗料)

ことが重要です。一方で、外的条件に起因する変状が確認された場合には、構造物の安定性に及ぼす影響や進行性を把握することが重要となります。

### 鉄道構造物の実態

図2に新幹線および在来線における構造物延長距離の比率を示します。新幹線においては橋りょうがもっとも多く全体の44%を占め、在来線においては土留め擁壁を含む土構造物が全体の82%を占めます。

総数で10万か所を超える橋りょうは上部工、下部工と検査対象が多く、目視による変状の発見や進行性の評価が困難な場合も少なくありません。また、盛土や切土など土構造物の端部には土留め擁壁が構築されることが多く、全国に20万か所以上存在することが確認されています。

以上から、ここではコンクリート橋りょうのうち、河川橋りょうや道路をまたぐ橋りょうに多く採用され、検査が困難となる場合が多いプレストレストコンクリート橋りょうの変状をいち早く検知するための取り組みと、土留め擁壁の変状が安定性に及ぼす影響を、振動特性を指標として評価する手法<sup>3)</sup>を紹介します。

### プレストレストコンクリート橋りょうの変状を早期検知する

コンクリート橋りょうは、桁の形式として鉄筋コンクリート(以下、RC)桁とプレストレストコンクリート(以下、PC)桁に大別されます。一般的な形式であるRC桁は鉄筋が主に引張力を負担しますが、自重などによりひび割れ(曲げひび割れ)が発生します。また、列車通過時のたわみなどが制約条件となり、RC桁の長さは最大30m程度となります。

一方、PC桁はRC桁を進化させ、あらかじめコンクリートに圧縮力(プレストレス)を与え、最大荷重が作用する列車通過時でも曲げひび割れが発生しない桁形式です。これにより桁の剛性(固さ)を確保し、桁のたわみを抑制します。そのため、RC桁に比べて桁を長くでき、長さ50m程度まで適用可能となります。また、構造をさらに工夫し長さ100mを超える桁も使用されています。

前述したように、PC桁は剛性を確保する点から曲げひび割れを許容しません。しかしながら、図3に示す、施工時において発生する不具合である、PC鋼材周辺のグラウト充填不良がある場合、雨水の侵入などによるPC鋼材の腐食や破断により、耐力が低下し、

曲げひび割れが発生する可能性があります。このひび割れは、図4に示すように、列車通過時において桁下面に瞬間的に発生し、常時にはひび割れが閉じることが想定されます。一方、グラウト充填不良箇所は外観検査からは不明であることなどから、発生位置を事前に把握することは困難となります。

ところで、既設PC桁の性能は、設計計算の再現(以下、再現計算)により性能の把握が可能となります。そのため、列車通過時にPC桁下面に発生する曲げひび割れ発生位置を検知することができれば、再現計算の結果から維持管理を行う上で重要なPC桁の残存耐力を把握することが可能となります。そこで、曲げひび割れ発生時に電気的回路がOFFとなる、導電性回路を用いたモニタリングシステムを開発しました。

### 導電塗料を用いたモニタリングシステムの取り組み

導電性回路は、図5に示すように、異なる検知性能を有する銀含有の導電塗料などを組み合わせて、ひび割れ範囲の特定を可能としました。具体的には、ひび割れ幅が0.2mm程度で破断する範囲(以下、検知部)と、検知部よりも大きなひび割れ幅(0.4mm以上程度)

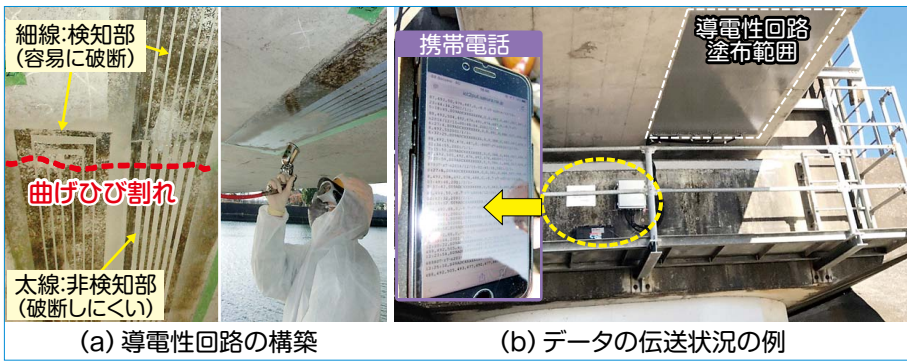


図7 実PC桁での実施状況

で破断する範囲(以下、非検知部)を設け、設置機器の関係からコの字型に導電性回路を配置することで、各回路の検知範囲を設定し、ひび割れ発生範囲を特定する回路としました。なお、検知部は、トンネルのひび割れ検知システムなどに実績がある塗料を使用し、非検知部は、図6に示すように、ウレタンテープに導電塗料を塗布することで、導電塗料と同様の導電性を有し、可能な限り破断時のひび割れ幅を大きくすることを可能にしました。

モニタリングシステムは、列車通過時に応答する加速度センサーをトリガーとして、ひび割れ発生時に生じる回路破断にともなう抵抗値の変化を測定し、要素試験などで設定したしきい値を上回る回数(以下、カウント値)を数えて、カウント値から損傷状態を推定します。得られたデータは、SDカードに保存されるとともに、携帯電話回線により伝送され、インターネット上で確認できる構成としています。

なお、計測装置や導電性回路の不具合が発生してもシステムが稼働できるように、同一範囲に複数ラインを構築して誤検知を防止しています。図7に実構造物での構築状況を示します。

### 土留め擁壁に生じる変状

土留め擁壁には多様な構造形式が存在しますが、旧国鉄時代から標準図に基づいて構築されてきたもたれ壁や石積み・ブロック積み壁が全体の75%

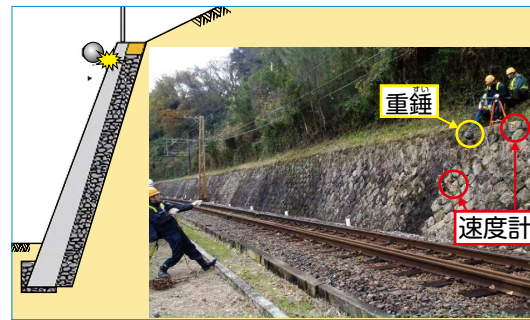


図9 土留め擁壁の衝撃振動試験

を占めることがわかっています。

石積み・ブロック積み壁を例として、土留め擁壁に生じる変状の例を図8に示します。土留め擁壁に生じる変状は壁体材料や付帯構造物の経年劣化に起因する場合と、構造物の安定性に影響を及ぼす外的条件に起因する場合に大別できます。

一般的には土留め擁壁の安定性が損なわれることにより生じる変状が重要な問題となりやすいですが、安定性に関わる変状の検知とその進行性を把握することが重要となります。

そこで、鉄道事業者のご協力をいただき、土留め擁壁の安定性に関わる変状の検知手法としての衝撃振動試験の適用性を検証しました。

### 衝撃振動試験と評価指標の提案

図9に土留め擁壁に対する衝撃振動試験の実施状況を示します。橋りょう下部構造物の場合、構造物の天端を重錘(一般的には30kg)により打撃し、地震振動を励起したうえで構造物の応答をセンサーで計測し、周波数解析を行って得られる固有振動数の値で構造

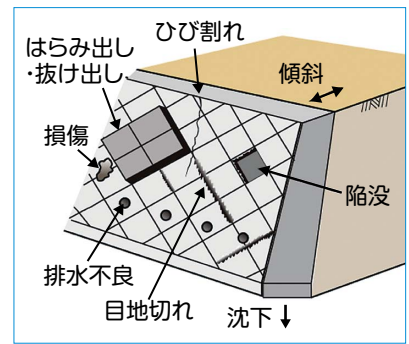


図8 石積み・ブロック積み壁に生じる変状の例

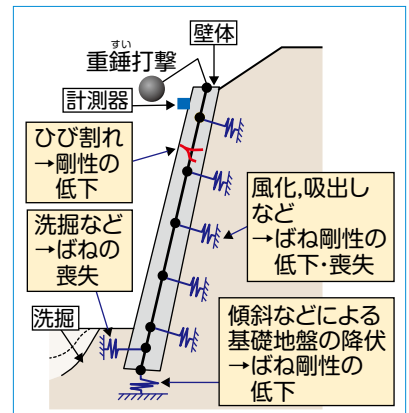


図10 変状にともなう振動特性変化のメカニズム

物の健全度を診断します。

土留め擁壁の場合には、図10に示すように、背面地盤の拘束の影響で自由振動が励起されにくい上に、振動モードが複雑となるために、固有振動数を指標とした健全度診断が困難なことが課題でした。一方で、図11に試験結果の一例を示すように、不健全な土留め擁壁では、振幅スペクトルが全体的に大きく、とくに低振動数帯域において卓越する傾向が強いことが確認されていました。

そこで、図12に示すように、衝撃振動試験の結果得られる応答速度の振幅値の大きさ(スペクトル面積, SA:図12中、ハッチング部分)と、低振動数帯域において卓越程度(スペクトルスコア, SS:図12中、全体に占めるハッチング部分の比率)を指標として、土留め擁壁の健全度を診断する手法を提案しました。

### 提案指標による評価

図13に石積み・ブロック積み壁を

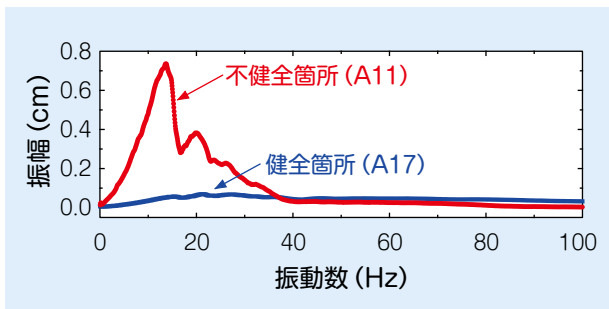


図11 衝撃振動試験結果の一例

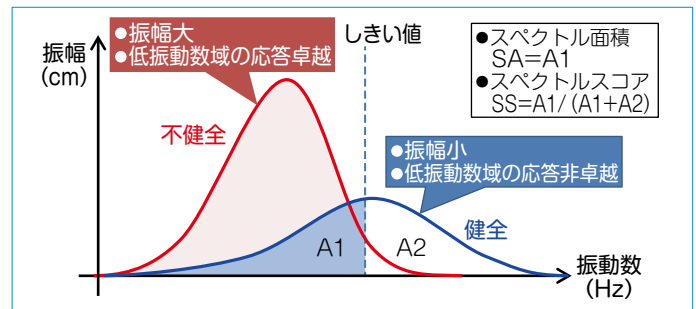


図12 提案指標の概念図

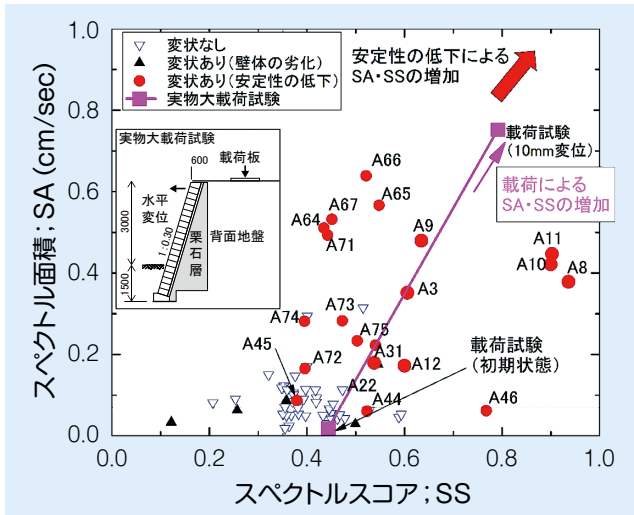


図13 石積み・ブロック積み壁への適用

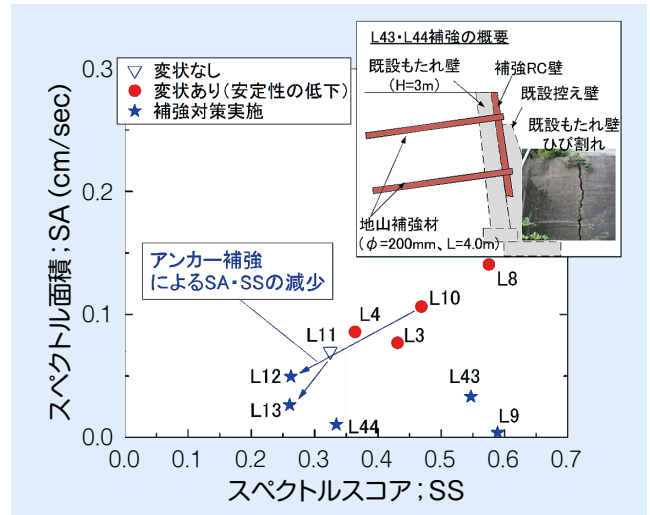


図14 もたれ壁への適用

対象として実施した衝撃振動試験全68ケースにおけるSA・SSの値と、変状の有無の関係を示します。安定性の低下をともなう変状が確認された石積み・ブロック積み壁(図13中、赤丸で表示)では、SA、SSの値が大きい傾向が確認されます。

また、同図には高さ3mのブロック積み壁に対する実物大載荷試験の結果もあわせて示していますが、変状の進展にとまないSA・SSが増大する傾向が明らかです。

もたれ壁に関する同様の検証結果を図14に示します。図14には、変状したもたれ壁と地山補強やグラウンドアンカーによる補強を実施した箇所の比較結果を中心に示しています。対策工を実施した箇所については、SA・SSの値が小さく、グラウンドアンカーによる対策前後の値を示したL10とL12およびL11とL13の比較からも、擁壁の安定性向上にとまない、SA・SS

値が低下する傾向が確認できました。

以上から、構造物の安定性に関わる変状の検知、進行性の把握に対して衝撃振動試験が有効であることが確認されました。今後は、鉄道事業者の皆様のご協力をいただきながら、試験結果を蓄積することで構造形式や高さに応じたSA・SS値のしきい値の設定法について、検討を進めていきたいと考えています。

### おわりに

PC桁モニタリングシステムについては、列車通過時の曲げひび割れという、目視検査での確認が困難であるものの、性能を評価する上で有意義な変状を検知することを目的に構築しました。

また、振動特性を用いた土留め擁壁の健全度の評価については、目視による検査・診断を補足し、定量的な指標により土留め壁の安定性の変化をとらえる手法として提案しました。

これらの研究成果が鉄道構造物の維持管理の一助となれば幸いです。

なお、本報告に記載した内容のうち、PC桁モニタリングシステムに関する研究開発は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。[RRR]

### 文献

- 1) 小島芳之：鉄道施設の検査・診断技術の最前線, RRR, Vol.74, No.2, pp.4-7, 2017
- 2) たとえば、鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) 基礎構造物・抗土圧構造物, 丸善出版, 2007
- 3) 西村昭彦, 棚村史郎：既設橋りょう橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989
- 4) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針, プレストレストコンクリート工学会, 2016
- 5) 中島進, 篠田昌弘, 阿部慶太：振動特性を利用した既設石積み壁・もたれ壁の健全度診断に関する研究, 土木学会論文集C(地圏工学), Vol.71, No.4, pp.254-271, 2015