施設研究ニュース
No. 425　2026.1. 1
公益財団法人 鉄道総合技術研究所　施設研究ニュース編集委員会

高解像度カメラの広角撮影による多点同期変位測定

1. はじめに

鉄道橋りょうのたわみは，列車の走行安全や乗り心地に大きく影響するため，古くから設計・維持管理における重要な指標として用いられてきました [1]．従来の変位計やレーザードップラー式速度計 [2]による測定では，橋の下に機器を設置する必要があり，河川橋や架道橋では作業や交通遮断が困難となる場合があります．近年は，高解像度で低価格化したビデオカメラを用い，非接触で多点のたわみを簡易に測定する手法が注目されています．一方，デジタル画像相関法は正面撮影を前提としており，斜め方向からの撮影では射影歪みが問題となります．この歪みを補正しつつ変位へ変換する手法は確立途上です．高解像度カメラ（4K～12K）の普及により，遠隔・広角撮影で広範囲を計測可能となった一方，広角レンズでは画像端部に歪曲収差が生じるという課題があります．

本研究では，1 台の高解像度カメラと一般的な広角レンズを用い，撮影および分析手法の工夫により，列車通過時の橋りょう変位を多点同期で効率的に測定する方法を検討しました [3]．

2. 広角測定による橋りょうの変位推定方法

図 1 に，本研究で提案する撮影動画の処理フローを示します．撮影では複数の評価点を画角内に収めて動画を取得し，分析ではデジタル画像相関法のサブピクセル推定により画素移動量を求めます．広角レンズ特有の射影歪みおよび歪曲収差を補正し，橋りょうの変位に変換する方法を用います．

デジタル画像相関法は，画像の輝度パターンを基に変形前後の対応領域を探索して変位を推定する手法です．粗探索では正規化相互相関により整数画素位置を推定し，サブピクセル推定では関数フィッティングにより 1 画素未満の分解能を得ます．撮影画像は 2 次元のため 1 台のカメラでは 3 次元変位の完全推定は困難ですが，列車通過時の変位は主に鉛直方向で，線路方向は相対的に小さいため，本研究では仰角 40°以下で撮影し，線路方向の変位による誤差を 10%以下に抑えて 2 次元変位を推定するように工夫しました．カメラで斜めから物体を撮影した際，画像の形や位置が実際と異なって見える射影歪みが発生します．評価点毎に異なるこの射影歪みを補正するために，カメラと評価点の位置関係を考慮した独自技術により補正します．さらに，歪曲収差については，画像中心と周辺部の拡大倍率差に起因する樽型ひずみを，歪曲収差率から補正量を算出しました．詳細については文献 3）をご覧ください．

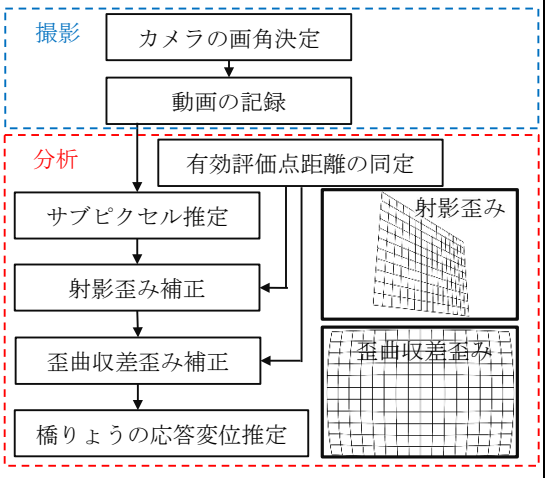

図 1　撮影動画の処理フロー

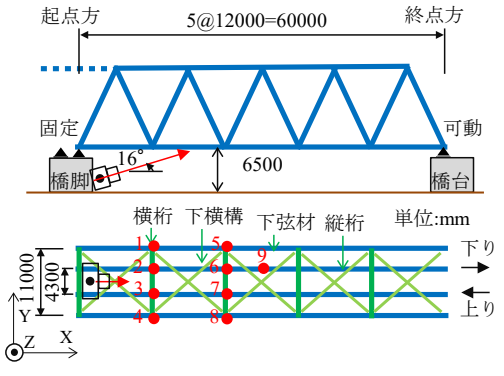

図 2　橋りょう A の概要と評価点

3. 実橋りょうへの適用

図 2 に，提案手法を適用した実橋りょう A の一般図と評

価点を示します．対象はスパン 60 m の複線単純トラス橋で，曲線半径は 4000 m です．縦桁・横桁の床組を有した構造で，横桁間隔は 12 m，軌道はバラスト軌道です．カメラは起点側の橋脚付近に設置し，Blackmagic URSA Mini Pro（解像度 12288×6480 pixel，60 fps）を使用しました．評価点は画像内の特徴的な箇所であれば自由に設定可能ですが，本稿では床組の縦桁・横桁交差部 9 点の結果を紹介します．

図 3 に撮影画像を示します．評価点はボルトやマンホールなどエッジが明瞭な箇所を選定し，撮影距離は 13～60 m，空間解像度は 1～6 mm/pixel，サブセットサイズは 128 pixel 平方としました．

図 4 に，下り線列車通過時（速度 277 km/h，10 両編成列車）の各評価点の鉛直変位を示します．撮影画像から得られた変位波形（**図 4** の適用前）には，約 15 Hz の微振動が含まれました．これは橋脚近傍に設置したカメラの自己振動と考えられます．地盤や支点反力に起因する高周波・低周波振動の影響を考慮し，15 Hz のローパスフィルターで高周波成分を除去しました．その結果（**図 4** の適用後），下り線側下弦材で約 3 mm，上り線側で約 1.5 mm のたわみが確認され，スパン中央ほど変位が大きい傾向が見られました．多点同期計測により，鉛直変位に加えてねじり特性や部材変形特性の把握も可能であることを確認しました．

図 5 に妥当性の検証結果を示します．評価点 6 および 9 の鉛直変位について，非接触式速度計（U-doppler）と画像解析（DIC Proposed）を比較した結果，波形と最大値（約 3 mm）は概ね一致しました．列車通過前後には DIC で 0.2～0.3 mm の自己振動が確認され，縦桁のような微小変位では S/N 比の低下により影響が顕著になることが分かりました．

図 3　撮影画像

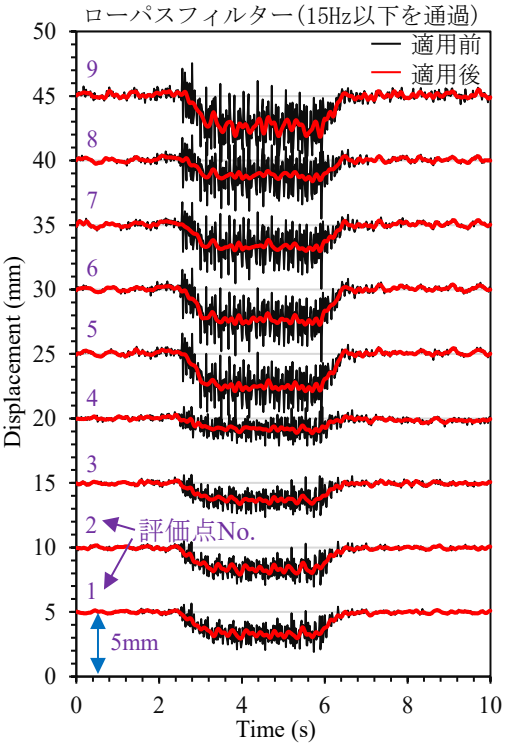

図 4　各評価点の鉛直方向の変位

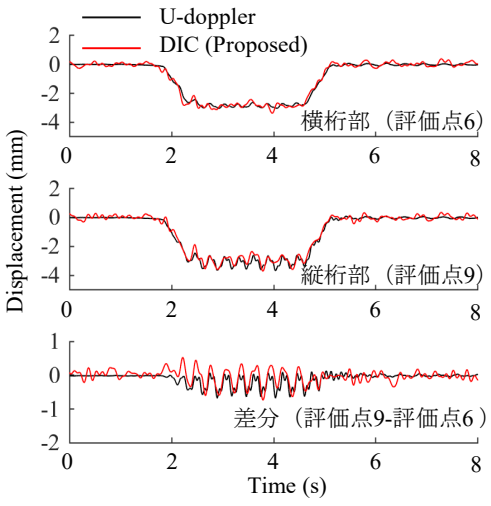

図 5　提案方法の妥当性

4. おわりに

本稿では，鉄道橋りょうの列車通過時変位を多点同期で測定する技術について紹介しました．本手法により，1 台の高解像度カメラによる広角撮影画像から橋りょう全体の変位挙動を評価することが可能です. 今後は, 鉄道沿線から 10～20m 程度の距離にカメラを設置した場合に影響を受ける地盤振動や，風・車両などによる外乱を補償するためのキャンセリング手法の研究に取り組みます．

参考文献

1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006.
2) 上半文昭 : 構造物診断用非接触振動測定システム「 U ドップラー」の開発，鉄道総研報告， Vol. 21， No. 12，pp. 17-22，2007.
3) 徳永宗正，北川晴之，池田学: 高解像度カメラの広角測定を用いた鉄道橋りょうの列車通過時変位の多点同期測定によるモード同定，構造工学論文集 A, No.70, pp.289-302, 2024.

執筆者：鉄道力学研究部　構造力学研究室　徳永宗正
担当者：鉄道力学研究部　構造力学研究室　北川晴之

スラブ軌道各部補修の手引きの改訂

1. はじめに

1965 年から本格的な開発が進められたスラブ軌道は，山陽新幹線の新大阪～岡山間の建設以降，新幹線の標準軌道として本格採用され，保守の省力化に大きく寄与してきました．しかし，一部の区間では厳しい環境条件のもとで部材の補修を余儀なくされた区間もありました．

そこで，比較的損傷・劣化の事例が多いとされるてん充層および軌道スラブの外周部に見られる欠損や，軌道スラブのひび割れ等について，その補修方法や補修要否の判定の目安についてまとめられた「スラブ軌道各部補修の手引き（1989 年 12 月）」が発刊されました．その後も，スラブ軌道の持続的な維持管理を行うことを目的として，劣化損傷した突起の対策工，入手が困難になった額縁補修用補強材の代替品，劣化範囲が広範囲に及ぶてん充層を対象とした大断面補修工法，寒冷地に適用可能な隙間補修用 CA ミルクの開発等，様々な検討結果を本手引きに反映してきました（**図 1**）．

近年は，主に寒冷地に敷設されているスラブ軌道を対象として，現地で確認されている軌道スラブ断面修復部の再劣化の状況等から，軌道スラブの欠損およびひび割れに対するより効果的な補修方法を開発しました[1)]．本稿では，それらの検討結果を追加した本手引きの改訂内容について紹介します．

2. 寒冷地における軌道スラブ断面修復部の劣化メカニズム

寒冷地の明かり区間に敷設されている軌道スラブ（タイプレート式）では，凍害によって主に外周部に欠損が生じる場合があります．そのような箇所では，本手引きに示されている樹脂モルタルを断面修復材として用いる断面修復や，エポキシ樹脂による表面被覆等の補修が行われていますが，経年した補修箇所では断面修復部の剥落等の再劣化や表面被覆部におけるより深い欠損が生じています．

そこで，樹脂モルタルによる断面修復を模擬したコンクリート供試体の凍結融解試験および付着試験を実施したところ，凍結融解の繰り返しによって，徐々に断面修復部における断面修復材（樹脂モルタル）－軌道スラブ間の付着強度が低下することが分かりました．**図 2** に断面修復部の劣化メカニズムを示します．

一方，軌道スラブの外周部に見られる欠損を想定し，軌道スラブ側面からタイプレートの縁までを欠損させた供試体に対して締結部の水平載荷試験（**図 3**）を実施したところ，設計荷重に対して耐力上の問題はないことを確認しました．

3. 軌道スラブの新たな補修方法の提案

上記を踏まえ，寒冷地における軌道スラブの欠損に対しては，断面修復を行わず，軌道スラブの劣化の進展を抑制することを目的として，「シラン・シロキサン系表面含浸材」を塗布することを提案しました．

シラン・シロキサン系表面含浸材は，コンクリート内の水分の蒸発を阻害せず，コンクリート表面に撥水機能を付与することが可能

Ⅰ	CAモルタルによるてん充層および突起周辺部補修
Ⅱ	合成樹脂によるてん充層および突起周辺部補修
Ⅲ	軌道スラブの欠損部の補修
Ⅳ	軌道スラブのひび割れの補修
Ⅴ	軌道スラブ移動拘束装置設置
参考	補修要否の判定の目安

図 1　「スラブ軌道各部補修の手引き」の構成

図 2　断面修復部の劣化メカニズム

な補修材料です．別途実施した，軌道スラブから採取した角柱供試体の凍結融解試験により，シラン・シロキサン系表面含浸材を塗布することで相対動弾性係数がほとんど低下せず（300 サイクルで 90%以上），凍結融解抵抗性が向上することが分かりました．

なお，寒冷地における軌道スラブのひび割れに対しても，ひび割れ幅が 0.5mm 未満の場合はシラン・シロキサン系表面含浸材を塗布することとしました．ひび割れ幅が 0.5mm 以上かつ 2.0mm 未満の場合は，シリコーン樹脂系または弾性ポリマーセメント系の水蒸気透過型弾性被覆材を塗布します（ひび割れ幅が 2.0mm 以上の場合は，ひび割れ部の形状に応じて，低粘度樹脂の注入等を併用します）．

この他，寒冷地のトンネル内や温暖地に敷設され，凍害以外の要因によって欠損が生じた軌道スラブの断面修復用の補修材として，樹脂モルタルよりも比較的安価なポリマーセメントモルタルの適用を提案しました．ここでは，トンネル内に敷設される軌道スラブ（座面式）の肩部のはつり面にクロス状の溝を設けたうえで，ポリマーセメントモルタルで断面修復することにより，材齢 2 時間で列車を通過させることができることを確認しました（図 4，図 5）．

4. おわりに

本稿で示した軌道スラブに対するより効果的な補修方法は，本手引きの第Ⅲ章および第Ⅳ章に追加されます．本手引きの改訂版の発刊は 2026 年 4 月頃を予定しています．

本手引きが，スラブ軌道を維持管理されている皆さまの業務の一助となれば幸いです．

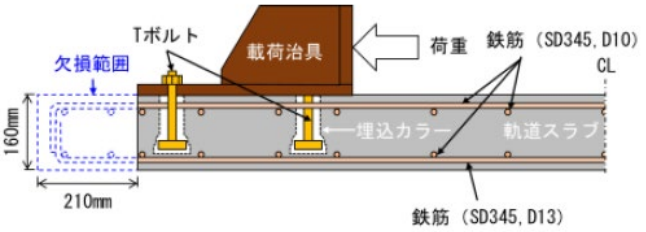

図 3　締結部の水平載荷試験（レール直角方向）

図 4　はつり面におけるクロス状の溝
（深さ:約 2㎜，間隔:約 25㎜）

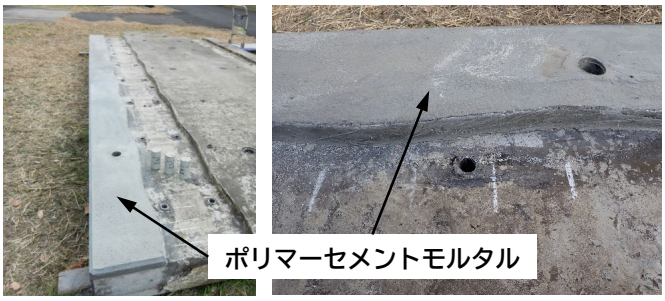

図 5　ポリマーセメントモルタルによる
断面修復

参考文献

1) 北条優，高橋貴蔵，髙橋成汰：軌道スラブ種別および劣化機構に対応した補修方法，第 28 回鉄道工学シンポジウム論文集，Vol.28，No.1，pp.62-94，2024.7

執筆者：軌道技術研究部　軌道・路盤研究室　渕上翔太
担当者：軌道技術研究部　軌道・路盤研究室　高橋貴蔵，藤川理沙子

塩化カリウム溶液によるスレーキング抑制効果の検討

1. はじめに

スメクタイトのような膨潤性粘土鉱物を含む軟岩は，乾燥とその後の吸水により細片化（スレーキング）しやすいことが知られています．スレーキングはトンネルの盤ぶくれや斜面崩壊等の要因となる場合があり，これらの対策として地山にロックボルトを打設することがあります．ロックボルトを打設する際には削孔水を使用したボーリング掘削を行うことが多いですが，削孔水が孔壁周辺の岩石のスレーキングを促進させ，孔壁の崩壊や孔の閉塞等が生じる可能性があります．既往研究では，スメクタイトを含む岩石を高濃度の塩化カリウム（KCl）溶液に浸漬することでスレーキングをある程度抑制できることが報告されています[1)]．ただし，岩石の乾燥程度と KCl 溶液のスレーキング抑制効果の関係については十分には検討されていません．そこで本研究では，岩石の乾燥程度や KCl 溶液の濃度がスレーキング抑制効果に及ぼす影響を把握することを目的とした，岩石の強度試験を実施しました．

2. 試験方法

試験対象として，スメクタイトを 18%程度含有する[1)]，新潟県上越市の露頭から採取した新第三紀の泥岩を用いました．この露頭は渓床に位置し，さらに採取後の岩石はラップを用いて梱包したため，試験に供するまで岩石はほぼ飽和状態であったと考えられます．

試験の流れを**図 1** に示します．まず，採取した岩石から直径 25mm，高さ 50mm を標準とする円柱形供試体を作製し，これらを恒温恒湿槽（温度 20℃，湿度 60%）で乾燥させました．乾燥時間は，異なる飽和度の供試体を用意するため，乾燥なし，1 時間，4 時間の 3 通りとしました．その結果，供試体の飽和度は，乾燥なしで約 100%，1 時間乾燥で約 86%，4 時間乾燥で約 73%となりました[2)]．乾燥後，供試体を 72 時間浸漬しました．浸漬溶液は純水，1mol/L KCl 溶液（1M KCl），2mol/L KCl 溶液（2M KCl）の 3 種類を用いました．乾燥時間と浸漬溶液の各組合せ（**表 1** の 9 パターン）について，それぞれ 3 供試体を用いました．浸漬後，超音波パルス透過法によって P 波速度を測定した後，一軸圧縮試験を実施しました．ただし，一軸圧縮試験の実施が困難な供試体については針貫入試験を実施し，P 波速度または針貫入勾配と一軸圧縮強さとの関係[2)]から一軸圧縮強さを推定しました．

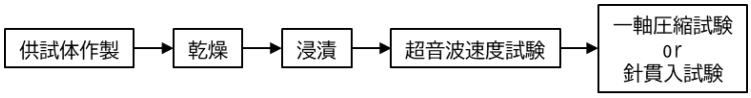

図 1　試験手順

表 1　乾燥・浸漬の試験パターン

浸漬溶液 ＼ 乾燥時間	純水	1M KCl	2M KCl
乾燥なし（飽和度約100%）	パターン1	パターン2	パターン3
1時間（飽和度約86%）	パターン4	パターン5	パターン6
4時間（飽和度約73%）	パターン7	パターン8	パターン9

3. 試験結果と考察

3.1　浸漬後の供試体の状態

浸漬後のスレーキング程度の整理結果を**表 2** に，パターン 1，4，7，8，9 の浸漬後の供試体の例を**図 2** に示します．パターン 1 では，供試体の外観にほとんど変化がみられませんでした．パターン 4，8，9 では，供試体に割れ目や上下端部の欠損がみられるものの，概ね円柱形の原形を留めていました．パターン 7 では，最もスレーキングが顕著で，供試体は多数の小片に分離していました．また，パタ

表 2　浸漬後のスレーキング程度

パターン	1	2	3	4	5	6	7	8	9
スレーキング程度	無	無～小	無～小	小～中	小	無～小	大	小～中	小～中

（本研究におけるスレーキング程度の判断基準）

無：変化なし　　小：少しの割れ目や供試体端部の小規模な欠損が見られる

中：明瞭または多数の割れ目や供試体端部の欠損が見られるが，供試体は概ね原形を保っている

大：供試体が多数の小片に分離し，原形が判別できない

ーン 2，3，5，6 では，供試体にほとんど変化がみられないか，割れ目や上下端部の欠損が少しみられる程度でした．

3.2　岩石試験の結果

各試験パターンにおける浸漬後の一軸圧縮強さ（3 供試体の平均値）を図 3 に示します．乾燥なしの場合，一軸圧縮強さは平均して 2.5～3.0MPa であり，どの溶液に浸漬した場合も乾燥時間が長いほど一軸圧縮強さが低下しました．特にパターン 7 では，一軸圧縮強さが 0MPa にまで低下しました．一方，同じ乾燥時間で比較すると，KCl の濃度が高いほど一軸圧縮強さが大きい結果となりました．すなわち，KCl 濃度が高いほどスレーキングによる強度低下を抑制できることが確認されました．これらの結果は，概ね目視で確認されたスレーキング程度と同じ傾向でした．また，パターン 6 に比べてパターン 9 では一軸圧縮強さが大きく低下していたことから，飽和度 73%程度まで乾燥させた場合，その後浸漬する溶液中の KCl の濃度を 2mol/L 程度まで高めても，十分に強度の低下を抑えられていないと考えられます．

図 2　試験後の供試体の例

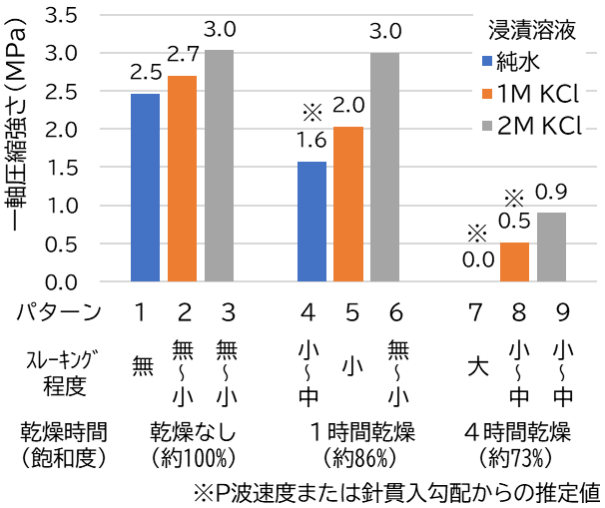

図 3　強度試験結果

4.　今後の展望

本試験結果から，KCl 溶液にはスメクタイトを含む岩石試料のスレーキングやそれに伴う強度低下を抑制する効果があり，KCl の濃度が 2mol/L 以下の範囲では，濃度が高いほど効果が大きいことが確かめられました．この性質を活用し，スレーキング性を有する軟岩からなる地山にロックボルト用のボーリング孔を削孔する際に KCl を含む削孔水を用いることで，孔壁周囲の岩石のスレーキングを抑制できることが期待されます．特に，地山の初期飽和度が低く，削孔水による著しいスレーキングの発生が懸念される場合は，2mol/L 程度以上の濃度の KCl 溶液がスレーキングの抑制に有効と考えられます．ただし，実現場への導入には，KCl 溶液による塩害を考慮した詳細な濃度の設定方法の検討が必要であり，これに関しては今後の検討課題です．

参考文献

1) 西金佑一郎，石田良二，橋本みゆき：各種溶液によるスレーキング抑制効果に関する検討，日本応用地質学会令和 6 年度研究発表会講演論文集，pp.43-44，2024

2) 久河竜也，西金佑一郎，石田良二，橋本みゆき：塩化カリウム溶液によるスレーキング抑制効果に関する検討，第 51 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.297-302，2025

執筆者：防災技術研究部　地質研究室　西金佑一郎

担当者：防災技術研究部　地質研究室　久河竜也

編集委員会からのお知らせ：2014 年度より施設研究ニュースの pdf データを鉄道総研HPに掲載しています．詳しくは，鉄道総研HPのトップページから【研究開発】⇒【研究ニュース】⇒【施設研究ニュース】(https://www.rtri.or.jp/rd/news/)にアクセスしてください．

発行者：田中　博文　【(公財) 鉄道総合技術研究所　施設研究ニュース編集委員会　委員長】

編集者：西脇　博也　【(公財) 鉄道総合技術研究所　防災技術研究部　地盤防災研究室】