

施設研究 ニュース

No. 360 2020. 8. 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

路盤改良を適用した既設線省力化軌道の沈下特性

1. はじめに

バラスト軌道における軌道保守の低コスト化を図るため、バラスト道床の間にグラウト材をてん充した既設線省力化軌道¹⁾が開発され、主に首都圏の在来線を中心に敷設されています。しかしながら、一部の既設線省力化軌道では路盤の軟弱化や雨水の排水不良等により、供用後数年で補修が必要となる場合があります。これまでの敷設や補修等の経験から既設線省力化軌道を新たに敷設する場合には排水設備の設置が必須とされているものの、コストに見合った一晩あたりの施工延長を確保することが困難な路盤改良は実施されていない現状があります。

そこで、本研究では、施工性に優れた路盤改良工法を開発するため、実物大軌道模型を用いた繰返し載荷試験により路盤改良を適用した既設線省力化軌道(図1)の沈下特性を評価し、路盤改良を適用した場合の沈下量を試算したので報告します。

2. 路盤改良を適用した既設線省力化軌道の沈下の評価

実物大軌道模型は、 K_{30} 値が $40\text{MN}/\text{m}^3$ の軟弱な路床上に、改良厚 200mm の路盤改良を適用したまくらぎ1本の条件としました。構築した実物大軌道模型の寸法を図2に示します。本模型で模擬した軟弱な路床は、繰返し載荷に対する塑性沈下を評価するため、塑性沈下および弾性変形が生じる上層(粘土層)と、弾性変形は生じるが塑性沈下は生じない下層の2層構造としました。載荷条件は、最小荷重 10kN ～最大荷重 110kN (荷重の全振幅 100kN)、載荷周波数 5Hz 、載荷回数 100 万回としました。併せて、粘土層の構築に使用した粘性土の繰返し三軸圧縮試験(CU)により、実物大載荷試験で得られた沈下量の検証を行いました。実物大載荷試験における路盤改良層下の粘土層に生じる鉛直応力と同程度となるように、鉛直応力の全振幅(載荷荷重) 15kPa 、拘束圧 15kPa 、載荷周波数 1Hz で試験を実施しました。繰返し三軸圧縮試験で得られた鉛直ひずみと載荷回数の関係を図3に示します。同図より、載荷が進むとともに粘土層の鉛直ひずみが

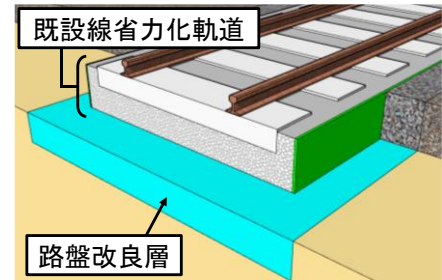
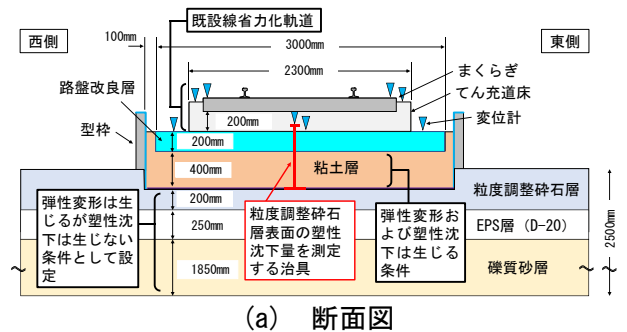
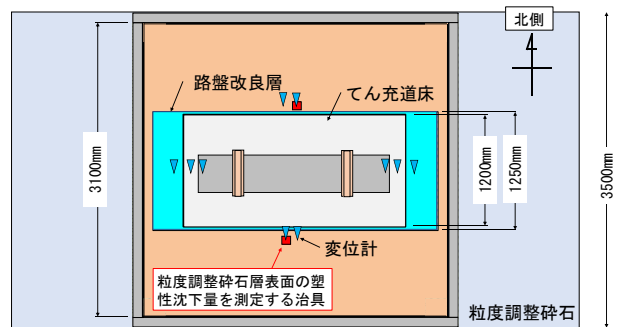


図1 路盤改良を適用した既設線省力化軌道



(a) 断面図



(b) 平面図

図2 実物大軌道模型の寸法

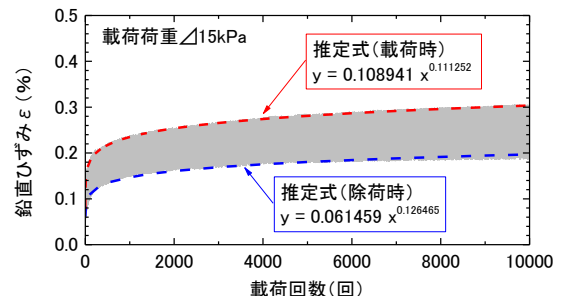


図3 鉛直ひずみと載荷回数の関係

載荷試験における路盤改良層下の粘土層に生じる鉛直応力と同程度となるように、鉛直応力の全振幅(載荷荷重) 15kPa 、拘束圧 15kPa 、載荷周波数 1Hz で試験を実施しました。繰返し三軸圧縮試験で得られた鉛直ひずみと載荷回数の関係を図3に示します。同図より、載荷が進むとともに粘土層の鉛直ひずみが

増加する傾向が得られ、この結果から最大ひずみ（載荷時）および最小ひずみ（除荷時）の増加傾向を求める推定式を提案しました。

繰返し三軸試験で求めた推定式を延長し、粘土層厚400mm に対する粘土層の変位量を算出して実物大載荷試験と比較しました。図4に実物大載荷試験と推定式の粘土層の変位を示します。載荷100万回時の変位は、実物大載荷試験の載荷時で2.13mm、除荷時で0.98mmであり、推定式の載荷時で2.03mm、除荷時で1.41mmでした。除荷時の変位は、推定式の方が実物大載荷試験よりも30%程度大きかったものの、載荷時の変位は、実物大載荷試験と推定式は概ね同程度となりました。

3. 路盤改良効果の試算

前章より、路床土の繰返し三軸試験により既設線省力化軌道の沈下量を概ね推定することができることから、FEM解析および路床土の繰返し三軸試験の結果を基に、路盤改良効果について試算しました。なお、供用期間中における既設線省力化軌道の変位量の算出には、下記の列車条件を設定することとした。

- ・ 1日の列車本数：250本
- ・ 1編成の車両数：10両編成
- ・ 1車両の軸数：4軸

本評価で設定した原地盤は、路盤表面から深さ1500mmまで K_{30} 値が 40MN/m^3 の軟弱な層（以下、軟弱層）が存在し、深さ1500mm以深で K_{30} 値が 110MN/m^3 の高い剛性となる路床を有する条件として、路盤表面から深さ1500mmまでの軟弱層の塑性変形により沈下が生じると仮定しました。本解析では、路盤改良層厚を150mm、200mmおよび250mmとし、比較対象として路盤改良を適用していない条件としました。図5に解析モデルを示します。図6に示した解析結果より、路盤改良を適用することで、路床に作用する鉛直応力は低減することを確認しました。

図7に路床土の繰返し三軸試験から求めた最大ひずみの推定式を用いて得られた、異なる路盤改良厚さに対する既設線省力化軌道の変位の比較を示します。同図より、例えば、供用30年後における既設線省力化軌道の変位は、路盤改良なしで27.8mm、路盤改良厚150mmで17.1mm、200mmで13.8mm、250mmで11.1mmとなりました。

4. おわりに

得られた知見を基に既設線省力化軌道用の路盤改良の設計方法を開発する予定です。

参考文献

- 1) 北条重幸：第二期TC型省力化軌道工事の取組み，新線路，Vol57，No.7，pp.8-11，鉄道現業者，2003。
 執筆者：軌道技術研究部 軌道・路盤研究室 伊藤孝記
 担当者：軌道技術研究部 軌道・路盤研究室 木次谷一平

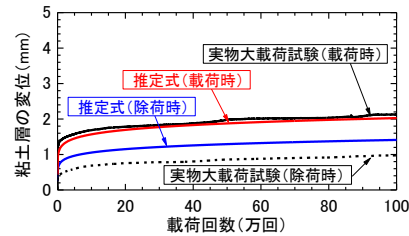


図4 実物大載荷試験と推定式の変位の比較

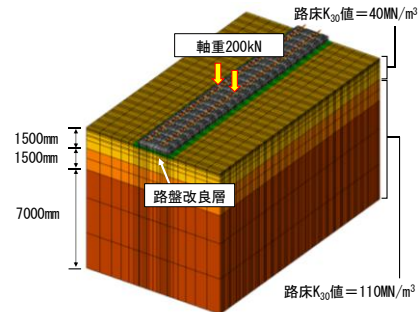


図5 解析モデル

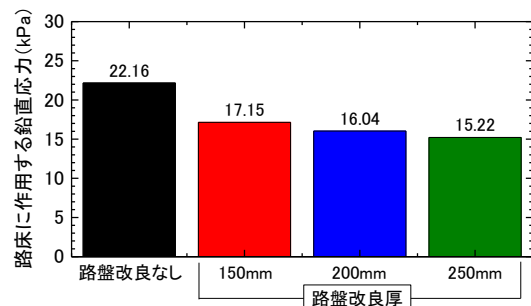


図6 路床に作用する鉛直応力の比較

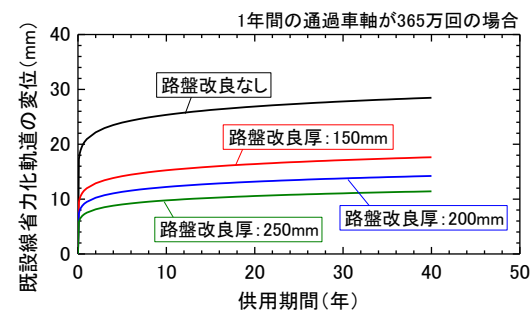


図7 各条件における供用期間中に生じる既設線省力化軌道の変位の比較

軌道検査の測定位置把握への 全球測位衛星システム（GNSS）の適用方法

1. はじめに

車両を用いて線路に沿って連続的に測定される軌道変位などの検査データを保守作業に活用するには、位置を正確に把握することが重要です。

現在の軌道検測車における位置情報の付与方法を図1に示します。検測車では、車輪の回転に応じたパルス信号を処理して走行距離を求め、一定間隔の検測データを作成します。ただし、この検測データには車輪の空転や滑走によるパルス信号の乱れの影響が含まれるため、僅かな位置のずれが生じて

います。そこで、軌道内にデータデポなどのセンサ（地上子）を設置してキロ程を管理し、検測車の車体に搭載したセンサ（車上子）で地上子上の通過を検知して検測データとの同期をとることで、僅かな位置のずれを補正して検測データにキロ程を付与しています。

近年、センシング技術の向上により、営業車両や保守用車を活用して軌道の状態を測定する取り組みが進められていますが、軌道検測車と同じ方法で検査位置を把握するためには、上述したセンサ等の設備を整備する必要があります。そこで本研究では、より簡単に検査位置を把握する方法として、全球測位衛星システム（GNSS：Global Navigation Satellite System）による緯度、経度の計測（以下、「測位」という。）データの活用法を検討し、走行試験による測定精度の検証を行ったので紹介します。

2. 全球測位衛星システム（GNSS）による測位方法

複数の人工衛星から発信された信号を地上で受信し、信号の遅延の差を利用して測位するシステムを衛星測位システムといい、全地球を利用可能範囲とするGNSSと、特定の地域を利用可能範囲とする地域測位衛星システム（RNSS）に分類されます。GNSSには、GPS（米国）、GLONASS（ロシア）、Galileo（欧州）、BeiDou（中国）があり、RNSSには準天頂衛星システムQZSS「みちびき」（日本）、IRNSS（インド）があります。衛星測位システムによる測位方法には、図2に示す単独測位と相対測位があります。単独測位は、1台のアンテナによって測位を行う方法であり、相対測位は、複数のアンテナで4個以上のGNSS衛星を同時に観測してアンテナ間の相対的な位置関係により測位を行う方法です。また、相対測位については、RTK方式（干渉測位ともいい、複数のアンテナと衛星との距離の差を搬送波の位相により求め、アンテナ間の相対位置を決定する方法）とD-GPS方式（ディファレンシャル測位ともいい、複数のアンテナで単独測位を行ってそれぞれの位置情報から相対位置を求める方法）に分けられます。

3. GNSSによる測位精度の検証試験

GNSSによる測位精度の検証試験を実施した区間の空中写真を図3に示します。本試験では、単独測

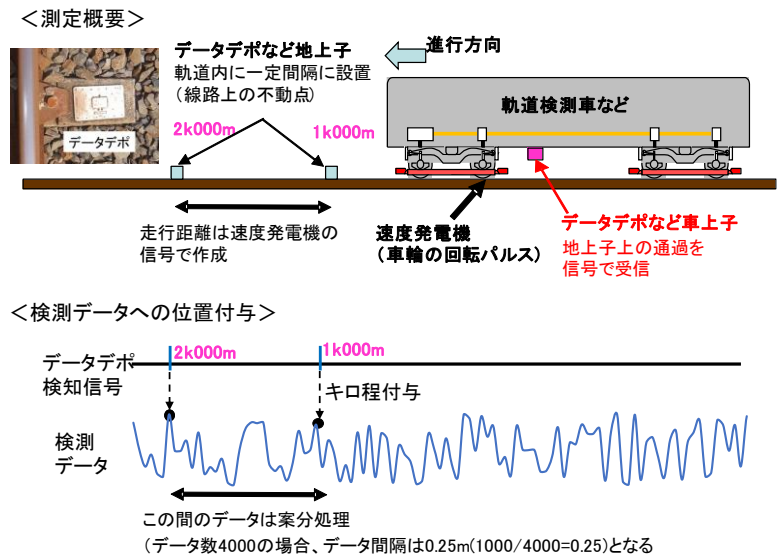


図1 車両を使用した検査データへの位置情報の付与方法



図2 衛星測位システムによる測位

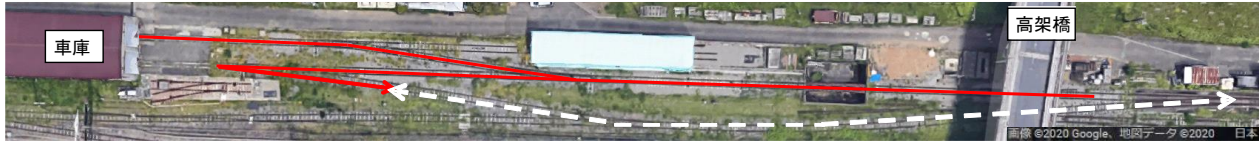
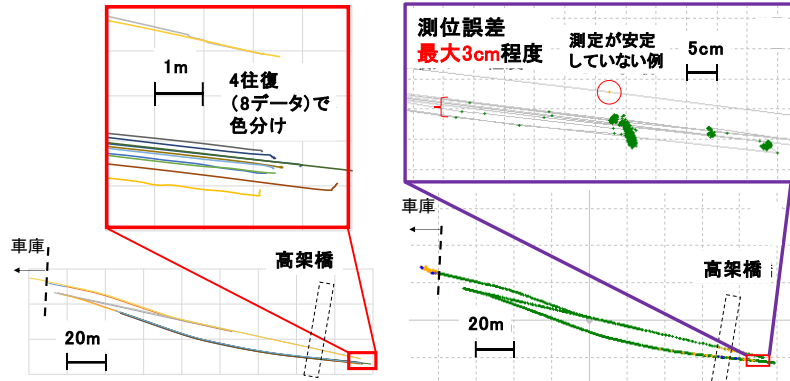


図3 検証試験区間の空中写真とモーターカーの走行経路（写真は Google map より抜粋）

位置用と RTK 方式用の GNSS アンテナをモーターカーの屋根上に設置して、図の点線の区間を 4 回往復走行し、測位誤差を検証しました。また、RTK 方式については、試験実施箇所から約 29 km 離れた事務所の屋上にアンテナを設置し基準局としました。

図 4 に検証試験区間の測位結果を示します。図 4(a) の単独測位については、線路の線形は概ね捉えています。往復走行の折り返し地点を拡大すると測位データには最大で 1 m 程度の差があります。モーターカーは折り返し地点で 5 分程度停止しており、停止時間内に誤差が生じたことを示しています。

一方、図 4(b) の RTK 方式による相対測位については、緑色の点は測位が正しく行えた地点、赤色や黄色の点は測位が不安定（例えば、衛星からの信号の受信が安定していない）な地点であることを示します。



(a) 単独測位 (b) RTK 方式（相対測位）

図 4 GNSS による測位結果

その結果、衛星からの信号が遮断される車庫内を除くと、高架橋（幅員 9 m）付近以外では正しく測位できています。往復走行の折り返し地点を拡大すると、赤丸で囲った区間に 1 点のみ不安定なデータが生じていましたが、これを除くと測位データは 3cm 程度の差に収まっています。また、高架橋付近における RTK 方式による測位データを、Google Earth 上に表示した結果を図 5 に示します。図 4(b) で確認できるように、高架橋の真下付近では測位が不安定なデータが生じていますが、概ね線路上にプロットされていることがわかります。このことから、幅員の狭い高架橋は測位結果への影響が小さく、装置が走行した線路の番線の区別には十分に活用できると考えられます。

したがって、RTK 方式は単独測位に比べて測位精度が良好であり、軌道検測車による軌道変位の検査データが 25cm 間隔であることを考慮すると、軌道の検査位置の把握に活用できると考えられます。



図 5 高架橋付近における RTK 方式による測位結果（写真は Google Earth より抜粋）

4. おわりに

本研究では、簡単かつ安価に検査位置を把握する方法として、様々な分野で活用が検討されている GNSS による測位データの活用法を検討しました。測位精度の検証試験を行った結果、RTK 方式による相対測位は 3cm 以内の精度を実現でき、軌道の検査位置の把握に活用できる可能性が示されました。しかし、GNSS を含む衛星測位システムによる測位は、衛星からアンテナまでの間に高層ビルなどの障害物などが存在すると精度が低下するという課題があります。そのため、今後鉄道環境における QZSS の精度検証や、車両や測定装置から得られるほかのデータを組み合わせたシステムを検討することにより、衛星測位システムによる測位の有効な活用法を提案したいと考えています。

執筆者：軌道技術研究部 軌道管理研究室 坪川洋友

列車の安全な運行のための風速計の取付け方法

1. はじめに

鉄道沿線には強風を監視するための風速計が設置され、これら風速計で観測された風速値をもとに、抑止や徐行といった運転規制が実施されています。一方で、風速計は橋梁や高架橋、駅構造物などに近接して設置されることが多く、これら構造物の影響を受けて過剰に強められた（または弱められた）風を観測してしまう場合があります。列車の安全な運行のためには、このような風速計のごく近傍だけで生じている風（風速値）ではなく、数 km～数十 km におよぶ規制区間で吹いている風を代表できる風速値で規制することが重要です。そこで本稿では、規制区間で吹いている風を代表できる風速値を得るための風速計の取付け方法を紹介します。

2. 風速計の取付け方法に関する指針

国土交通省の鉄道強風対策協議会より、鉄道沿線での風観測について、風速計の設置場所や取付け方法の考え方、風速計に必要な機能等が風観測の手引きとしてまとめられています。このなかには、構造物の周りには風が加速または減速する領域、乱れが大きい領域などが構造物の影響を受けて形成されること（図1）、風速を過小評価しないように周辺構造物の影響が及ばない取付け高さで線路構造物からの離れを確保して風速計を取付けること、など参考となる記載があります。風速計の新設や増設、移設を検討されている鉄道関係者の皆様で、この風観測の手引きをご覧になったことがない方にはご一読をお勧めいたします。この風観測の手引きは国土交通省のホームページにて、どなたでも閲覧できます。

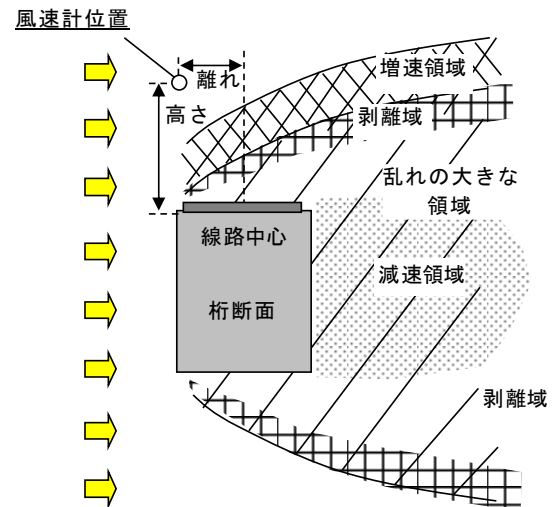


図1 桁断面周りの空気流れ（参考文献1）をもとに作成

3. 具体的な風速計の取付け方法

筆者らは、様々な線路構造物を対象とした風洞試験や現地風観測を通じて、風観測の手引きにある「周辺構造物の影響が及ばない取付け高さで線路構造物からの離れ」を具体的に求めることに取り組んできました²⁾。また、気象庁でも適切な気象観測に必要な環境条件や測器（測定器）の点検のポイントを、気象観測ガイドブック³⁾としてまとめ、一般に公開しています。これらの知見をもとに、鉄道沿線での風速計の取付け方法（チェックポイント）をまとめました。以下にその主な内容を紹介いたします。

（1）都市部、駅周辺部に風速計を取付ける場合

特に都市部や駅の周辺部に風速計を取付ける場合、まずは線路用地外の周辺の環境に注意を払ってください。商業ビルなどの背の高い建物や樹高の高い樹木に近接して風速計を取付けると、風向きによっては風速計が建物や樹木の風下に位置することになり、建物や樹木によって弱められた風を観測してしまいます。沿線でも最も背の高い建物の高さを h とした場合、建物と風速計との間に $10h$ の離れを確保することが可能な箇所に風速

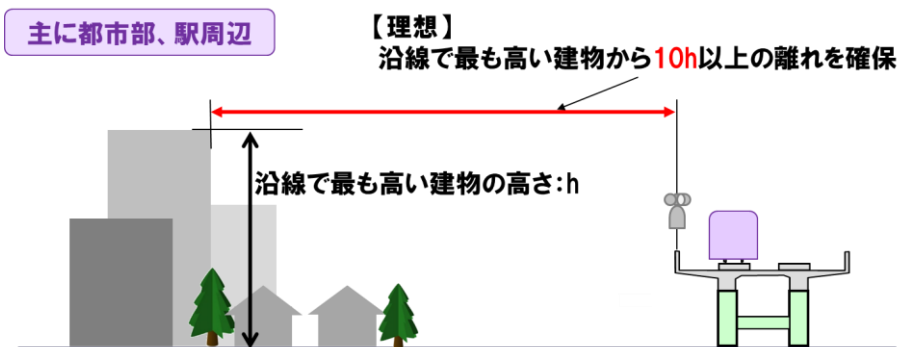


図2 風速計の取付け方法（都市部・駅周辺）

計を取付けるのが理想です (図 2).

(2) 駅舎など建物の屋上や橋梁、高架橋に風速計を取付ける場合

駅舎など建物の屋上や橋梁・高架橋は風速計がよく取付けられる場所です。建物の屋上の場合には、屋上面から取付ける建物の高さの 0.35 倍以上の高さを確保し、屋上面の端部ではなく可能な限り中心部に取付けることが理想的です (図 3)。また、橋梁・高架橋の場合には、遮風体の厚みを H とした場合、遮風体の上端から風速計の可動部までの高さを $1H$ 以上確保することが理想的です (図 3)。

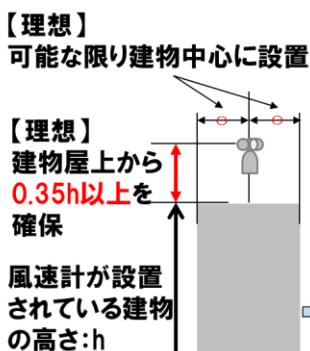
(3) トラス橋や既設の柱に風速計を取付ける場合

トラス橋や線路用地内の既設の柱に風速計を共架する場合には、トラス橋の上部材や斜材の幅 ($d1$, $d2$), 既設柱の幅 d をもとに、これらの幅の 3 倍以上の離れを確保して風速計を取付けることが理想的です。

4. おわりに

鉄道の風速計は、様々な沿線の環境の下で、様々な鉄道構造物に近接して取付けられることが多いため、必ずしも理想的な環境で強風監視ができるとは限りません。しかしながら、本稿で紹介しましたポイントに留意して風速計を取付けて頂くことで、より規制区間を代表する強風の監視に近づけることができます。このことは適切な運転規制による列車の安全運行にとっても重要です。ぜひ一度、自社の風速計の取付け状況を確認してみてください。

駅舎の屋上に取り付ける場合



橋梁・高架橋に取り付ける場合

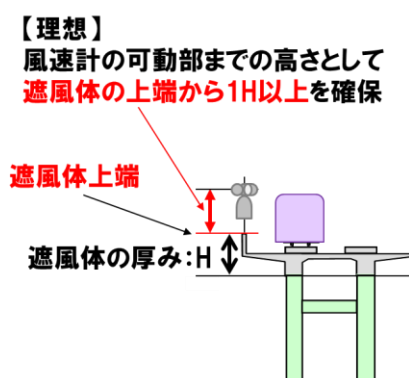
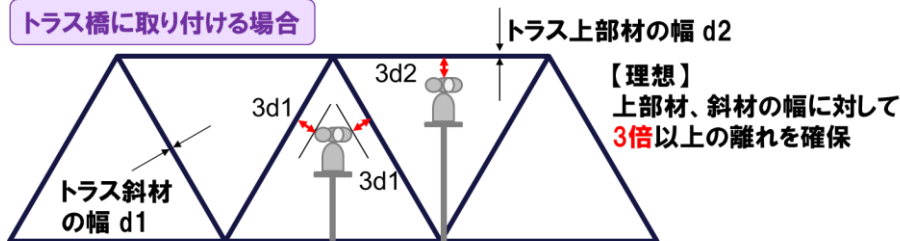


図 3 風速計の取付け方法 (駅舎などの屋上、橋梁・高架橋の場合)

トラス橋に取り付ける場合



既設柱に共架する場合

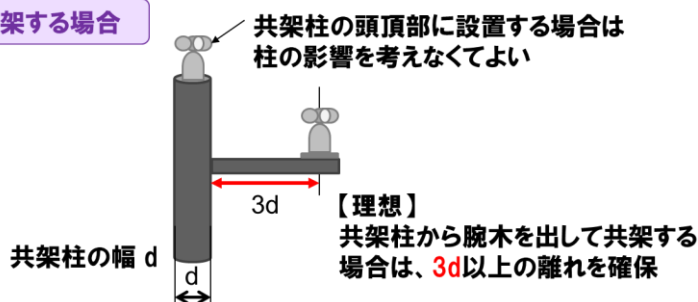


図 4 風速計の取付け方法 (トラス橋や既設柱へ共架する場合)

【参考文献】

- 1) 鉄道強風対策協議会：風観測の手引き，2006 (<https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha06/08/080912/02.pdf>)
- 2) 荒木ほか：構造物周りの風速計位置が観測に及ぼす影響の評価，鉄道総研報告，Vol.25, No.7, pp.43-48, 2011
- 3) 気象庁：気象観測ガイドブック，2018 (https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/kansoku_guide/guidebook.pdf)

執筆者：防災技術研究部 気象防災研究室 荒木啓司

担当者：防災技術研究部 気象防災研究室 福原隆彰，高見和弥

列車通過時の橋梁振動が電車線路設備に与える影響

1. はじめに

一部の新幹線において、列車通過時の橋梁の振動により電柱や架線などの電車線路設備が大きく振動し、線条やコネクタが破損する事例が報告されています¹⁾。これまで電車線路設備にのみ着目した検査や評価により、必要に応じて電柱への支線や振動抑制部材の導入など、振動低減対策が施されてきました。ただし、電車線路設備の被害発生状況は、橋梁種別や電柱の建植位置により異なることから、例えば図1のように列車通過時の橋梁振動が電柱振動を介して電車線路設備に影響を及ぼしていると想定されます。ここでは、電車線路設備の被害状況を説明したうえで、このような橋梁振動と電車線路設備の振動の関係に着目した検討結果を紹介します。

2. 電車線路設備の被害状況

高速鉄道橋上の電車線路設備の被害は、トロリ線とちょう架線を電氣的に接続するコネクタの破損と線条類（架空地線や AT 保護線）の破損に大別されます。線条類の破損は、電柱が桁端に建植され、列車通過時に橋梁および電柱が大きく振動する箇所を確認されています。一方、コネクタ破損箇所では、列車通過時に橋梁およびコネクタ自体が大きく振動する一方で、電柱はほとんど振動しない場合も報告されています。以上より、①電車線路設備の被害は列車通過時の橋梁振動が大きい、すなわち、走行列車の加振振動数と橋梁の固有振動数が近接して生じる橋梁の共振が影響すること、そのうえで、②線条類の被害は、電柱振動が増大する電柱の共振も影響因子であること、③コネクタ破損は電柱の共振には依らず、橋梁振動とコネクタの共振が影響すること、が推察されます。また、これらの調査結果と各種試験結果を踏まえて、橋梁の共振発生の有無に着目した線条およびコネクタの対策要否判定フローが提案されています²⁾。

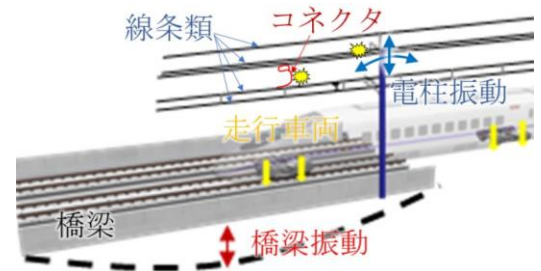


図1 橋梁振動と電車線路設備被害の概念図

3. 橋梁と電柱の振動の関連性

図2は、電車線路設備の被害要因である電柱振動と橋梁振動の関係を分析するための橋梁と電柱の連成モデルの例を示します。本モデルは電柱を有する橋梁モデルの上を移動荷重列としてモデル化した車両が走行することで、列車通過時の橋梁および電柱の振動を再現します。支間長 21.1m の H 鋼埋込みコンクリート桁と桁端に建植された電柱天端の計算値と測定値の比較を図3に示しますが、電柱天端の加速度および桁中央の変位は計算と測定で良好に一致します。構築した橋梁と電柱の連成モデルの諸元を変更し、桁支間長や電柱の建植位置が線条類の破損の主要因である電柱天端の最大変位（全振幅）に及ぼす影響を分析しました。

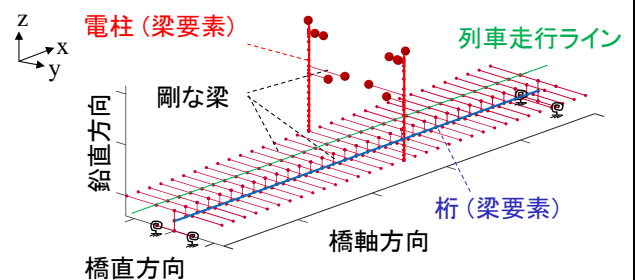


図2 詳細モデル（桁中央に電柱を建植した例）

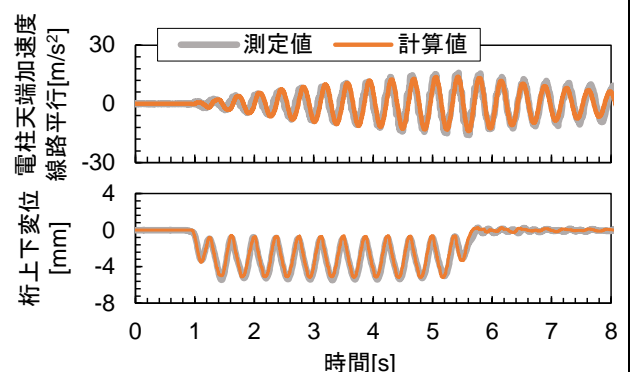


図3 測定値と計算値の比較
（桁端に電柱を建植した場合）

図4に、電柱天端の全振幅変位の最大値を示します。なお、列車は16両編成(軸重170kN)とし、360km/hまで1km/h刻みで計算したうえで、電柱天端変位が最大となる場合を示しています。また、桁端では線路平行方向、桁中央では線路直角方向の電柱振動がそれぞれ卓越しますが、全体傾向を俯瞰するため、ここでは3方向の変位を合成した値を示しています。橋梁の曲げ剛性は高速鉄道コンクリート橋の概ねの下限となる $55L_b^{-0.8}$ (L_b :支間長)を基本としました。得られた結果を整理すると以下の3点がわかります。①電柱の種類や桁支間長によらず、桁端に建植された場合に電柱天端変位が最も大きくなります。②電柱種別で比較すると、コンクリート柱よりも鋼管柱の電柱天端変位の方が大きい傾向にあります。そのほかに、同じ電柱種別でも最大変位が特に大きい支間長が存在します。これらは、電柱と橋梁の固有振動数が近接するため、橋梁と電柱の共振が重複することで電柱天端の最大変位が急増していることを確認しています。共振の発生は橋梁や電柱の固有振動数により決まることから、③橋梁と電柱の固有振動数の比が1に近い場合に橋梁と電柱の共振の重複により電柱天端の変位が急増します。なお、架線類の質量などを考慮した鋼管柱の固有振動数は2.5~3Hz程度となりますが、この固有振動数は支間長40~50m程度の高速鉄道コンクリート橋の固有振動数と近接する傾向にあります。また、この固有振動数の構造物が共振する列車速度は230~260km/h程度であり、概ね整備新幹線の営業最高速度付近となるため、特に注意が必要となります。

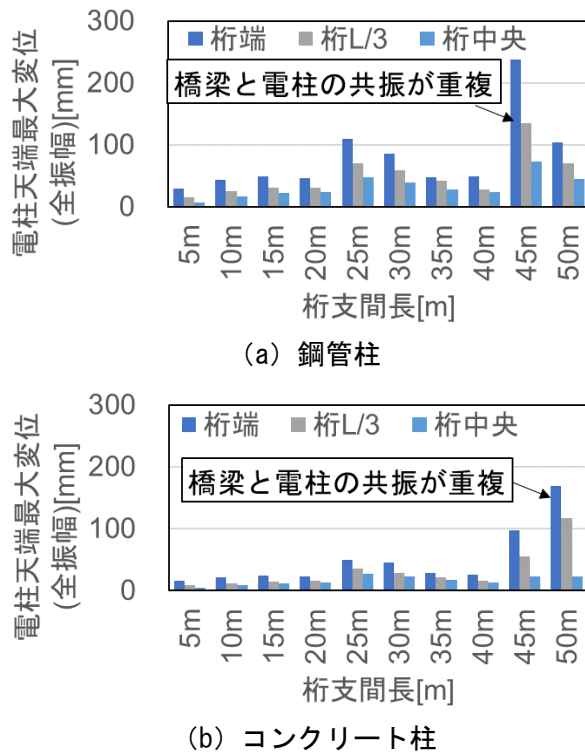


図4 建植位置が電柱天端変位に及ぼす影響

4. おわりに

本稿で紹介した結果は、電柱が建植された橋梁に着目した電車線路設備の点検や対策の効率化のほか、例えば共振発生が予測される橋梁上では桁端への電柱建植を避けるなど、電車線路設備の保全に配慮した新規高速鉄道橋の設計にも活用できます。現在、検討結果の一般化と実務活用のための簡易評価手法の構築を進めています。また、共振橋梁を走行車両上で測定したデータから効率的に抽出する手法²⁾の開発についても進めており、今後、順次報告していく予定です。

- 1) 常本瑞樹：列車通過時の高架橋振動による電車線路設備の損傷低減対策，第333回鉄道総研月例発表会，2019年9月24日（発表資料：<https://www.rtri.or.jp/events/getsurei/2019/mr333.html>）
- 2) 鉄道総研 HP：大きな振動が生じる橋りょうの車上計測による抽出法を開発，プレスリリース，2020年7月10日（https://www.rtri.or.jp/press/is5fli000000hw6v-att/20200710_001.pdf）

執筆者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 松岡弘大
 担当者：電力技術研究部 電車線構造研究室 常本瑞樹

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に掲載いたします。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】（http://www.rtri.or.jp/rd/rd_news.html）にアクセスしてください。

発行者：小林 裕介 【(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：辻 滉樹 【(公財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 気象防災】