

施設研究 ニュース

No. 325 2017. 9. 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

ベイナイトレールにおける 白色層起因シェリング予防削正手法の検討

1. はじめに

近年、レール損傷の抑制を図って開発されたベイナイトレールにおいて、白色層起因シェリングの発生が確認されています。白色層起因シェリングに対してもレール削正は有効であるものの、ベイナイトレールにおいては削正基準が構築されていません。また、普通レールと同様の手法でベイナイトレールを削正すると、ベイナイトレール投入の投資効果が薄れます。これらの理由から、ベイナイトレールにおける白色層起因シェリングを予防するための削正手法について検討しました。

2. ベイナイトレールにおける白色層発生状況

営業線に敷設しているベイナイトレールにおける、白色層の発生状況を明らかにするために、現地調査を実施しました。外観観察により白色層の発生状況を調査し、レール頭頂面の硬さ測定により白色層厚さを推定しました。以下に、これらの結果を示します。

(1) 発生状況

レール頭頂面に 3% ナイタル溶液を塗布し、外観観察を行いました。その結果、白色層は長手方向に連続的な形態や不連続な形態があることを確認しました。そこで、調査箇所における白色層の発生状況を形態に応じて 5 段階に分類し、線形別にまとめました (図 1)。その結果、勾配区間や駅構内において、白色層の発生傾向が高くなっていました。したがって、これらの箇所について優先的にレール削正を実施することで、より効率的に白色層起因シェリングを予防することができます。

(2) 白色層厚さ

レール頭頂面に発生した白色層の表面硬さを測定することにより、白色層の厚さを推定しました。それらの結果を図 2 に示します。

このように、営業線において発生した白色層の厚さは、10~15 μm に多く分布していました。また、ごく少数ではあるものの、30 μm 以上の厚さの白色層も推定され、最も厚いもので約 40 μm でした。これらの結果より、普通レールで実施している深さ 0.1mm の削正を実施することにより、ベイナイトレールの頭頂面に

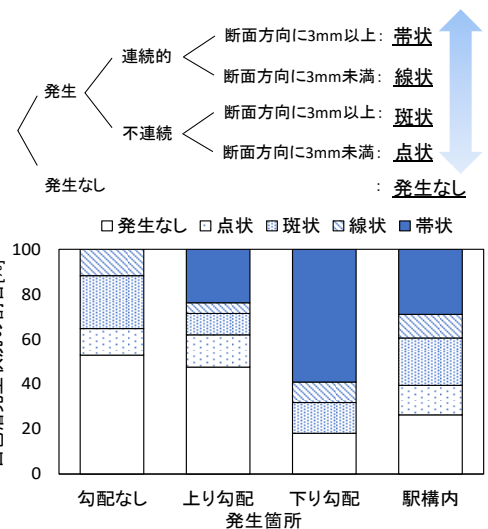


図 1 白色層の発生状況

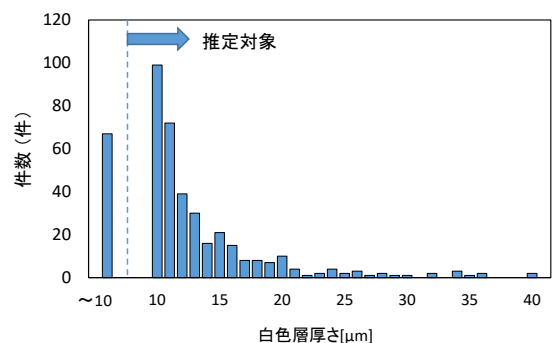


図 2 白色層厚さ推定結果

発生した白色層自体は、完全に除去することができると考えられます。

3. ベイナイトレールにおける白色層起因シェリング予防削正手法の検討

ベイナイトレールにおける白色層起因シェリングの予防削正手法を検討するために、前章で示した白色層の発生状況（形態、厚さ）に基づき、転動疲労試験を実施しました。

(1) 試験条件

転動疲労試験は、車輪・レール高速接触疲労試験装置を用いて、ベイナイトレール材試験輪と車輪材試験輪（以下それぞれ「レール輪」「車輪」とします）を組み合わせて実施しました。試験装置の概略を図3に示します。

本試験で用いた試験輪の径はレール輪がφ350mm、車輪がφ500mmであり、それぞれの断面形状は、60kgレール断面形状とフラット踏面形状を採用しました。またレール輪については、前章で示した営業線における白色層の発生状況をもとに、厚さ10、20、35、50μmの帯状の白色層を転動面に一定間隔で付加しました。

転動時の荷重条件については、85kNの輪重が載荷した接触圧になるよう、ラジアル荷重を設定しました。また微小き裂の発生ならびに進展を促進させるため、試験輪の接触部に水（100ml/min）を滴下しました。試験は、通過トン数が6000万トン、7000万トン、8000万トンになるまで転動させました。

(2) 試験結果

設定通過トン数まで転動させた後、レール輪を切断し、白色層ならびにその周辺に発生した微小き裂について、観察しました。各試番において観察された微小き裂の最大深さを表1に示します。

このように通過トン数の増加に伴い、微小き裂の最大深さは増加していることがわかります。特に通過トン数8000万トンまで転動させた試番3においては、深さ440μm程度まで微小き裂が進展しており、他の試番の結果に比べて大きく進展する結果でした。一方、通過トン数6000万トンならびに7000万トンまで転動した試験輪において観察された微小き裂は、いずれも深さ0.1mmまで進展することはありませんでした。これらの微小き裂は、深さ0.1mmの削正を実施することで、いずれも完全に除去することができます。したがって、通過トン数7000万トンあたり深さ0.1mm削正することで、白色層起因シェリングを予防することが期待できると考えられます。なお本試験は限られた条件での結果ではあるものの、試験の特徴として、①接触荷重が著大、②水潤滑により微小き裂の発生と進展を促進、③白色層が発生するまでの時期を無視していることから、営業線に敷設したレールよりもシビアな条件での結果となっています。

4. まとめ

本研究では、ベイナイトレールにおける白色層起因シェリングの予防削正手法について検討しました。その結果、通過トン数7000万トンあたり深さ0.1mmの削正を行うことで、白色層起因シェリングを予防できる見通しを得ることができました。今後は営業線で削正試験を実施し、効果を確認する予定です。

執筆者：鉄道力学研究部 軌道力学研究室 辻江正裕
 担当者：鉄道力学研究部 軌道力学研究室 陳 樺
 材料技術研究部 摩擦材料研究室 松井元英，兼松義一

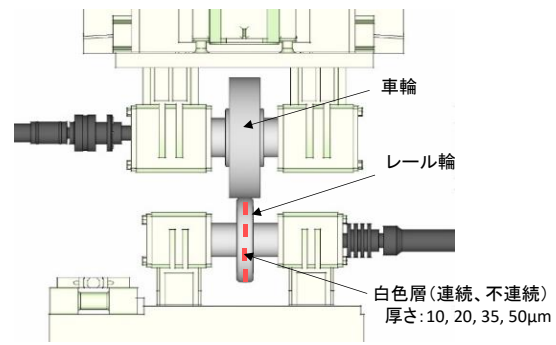


図3 転動疲労試験装置の概略

表1 発生した微小き裂の最大深さ

試番	通過トン数 (百万トン)	最大深さ (μm)
1	60	52
2	70	68
3	80	443

地震時列車走行性に関する線区内弱点箇所の簡易抽出法

1. はじめに

近年の大規模地震の頻発に対し、特に構造物上の地震時列車走行性への関心が高まっています。今後、既設構造物の耐震補強を行っていく上では、構造物自体の耐力や変形性能の向上はもちろんのこと、地震時列車走行性の向上、即ち、脱線リスク最小化を視野に入れた構造物の補強が重要になると考えられます。このような中で、効率的かつ効果的な構造物の補強を実施していくためには、線区内での相対的な弱点箇所となる構造物を特定するとともに、振動変位や不同変位といった脱線の支配要因の影響度を把握し、その影響度に応じた適切な構造物の補強を行う必要があります。そこで本研究では、地震時の構造物の動的応答解析結果のみから、地震時列車走行性に関する線区内での相対的な弱点構造物を把握し、脱線の支配要因を分析可能な手法を提案しました。また、提案手法と詳細な車両走行シミュレーション結果とを比較することで提案手法の妥当性を検証したので紹介します。

2. 地震時列車走行性に関する線区内弱点箇所の簡易抽出法

地震時列車走行性に関する線区内弱点構造物を抽出するために、本研究で新たに提案する「変位制限指標 I_d 」の算出式を式(1)に示します。式(1)の第1項は振動変位での脱線のしやすさを表す項、第2項は不同変位での脱線のしやすさを表す項で、両者を単純に足し合わせることで、その構造物上を車両が走行した際の総合的な脱線のしやすさを表現します。また、各構造物で算出された変位制限指標 I_d を比較することで、線区内での相対的な弱点構造物を抽出することが可能です。

$$I_{d,i} = \delta_i / \delta_{L,i}(T_{eqs}) + \theta_i / \theta_{L,i} \quad (1)$$

ここに、 i は構造物番号、 $I_{d,i}$ は各構造物の変位制限指標、 δ_i は地震時の各構造物の最大変位、 $\delta_{L,i}$ は正弦波5波に対する車両の脱線限界変位(図1参照)、 θ_i は地震時の各構造物間の最大折れ角、 $\theta_{L,i}$ は不同変位に関する車両の脱線限界折れ角です。脱線限界変位 $\delta_{L,i}$ および脱線限界折れ角 $\theta_{L,i}$ は、車両形式ごとに別途算出しておきます。脱線限界変位 $\delta_{L,i}$ は構造物の非線形化の影響を考慮するために、図2に示す割線剛性を用いた等価固有周期 T_{eqs} の関数としています。脱線限界折れ角 $\theta_{L,i}$ も構造物スパンや連数、列車速度の関数となりますが、本研究では既往知見を基に15mradと仮定しています。

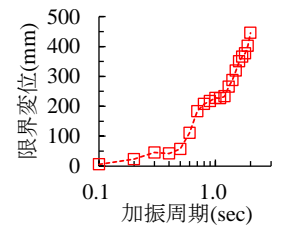


図1 脱線限界変位の例

3. 提案手法の妥当性検証

提案手法の妥当性を検証するために、約4.8kmのモデル線区を対象に、車両と構造物の動的相互作用を考慮した地震時の車両走行シミュレーション結果と本提案手法の比較を行いました。図3にモデル線区の構造物の力学モデルを、図4にモデル線区の構造物諸元を示します。入力地震動にはG2地盤用のL2スペクトルI地震動を用いました。また、車両走行シミュレーションでは、車両は新幹線12両編成(編成長300m)、列車速度は320km/hとし、モデル線区全体に対する地震時列車走行性を評価するために、走行開始位置を300mずつシフトさせて検討を実施しました。

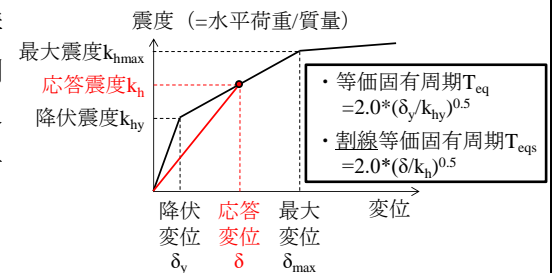


図2 割線等価固有周期 T_{eqs} の概念図

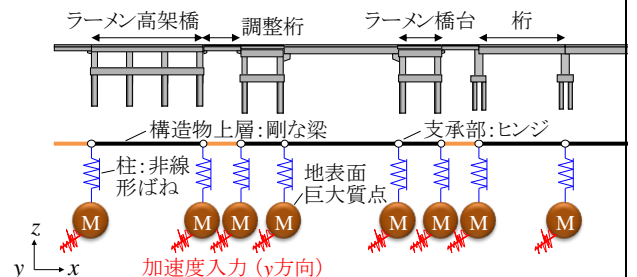


図3 モデル線区の構造物の力学モデル

図5に地震動の地表面入力加速度PGAを100~600galとした場合の、各構造物の最大変位と最大折れ

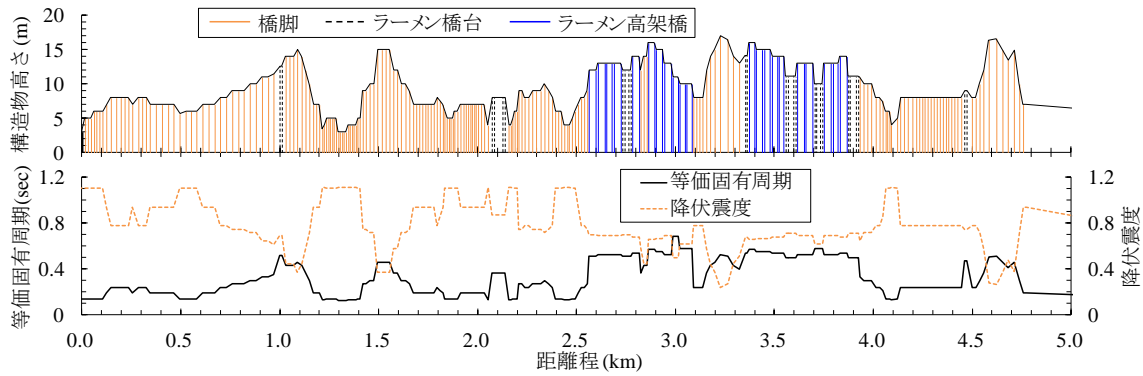


図4 モデル線区の構造物諸言

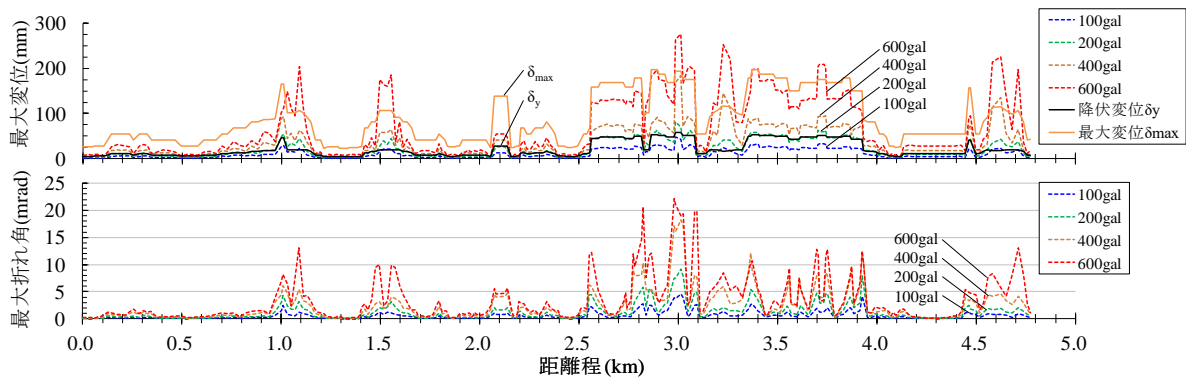


図5 モデル線区の各構造物の応答値(入力地震動:L2スペクトルI(G2))

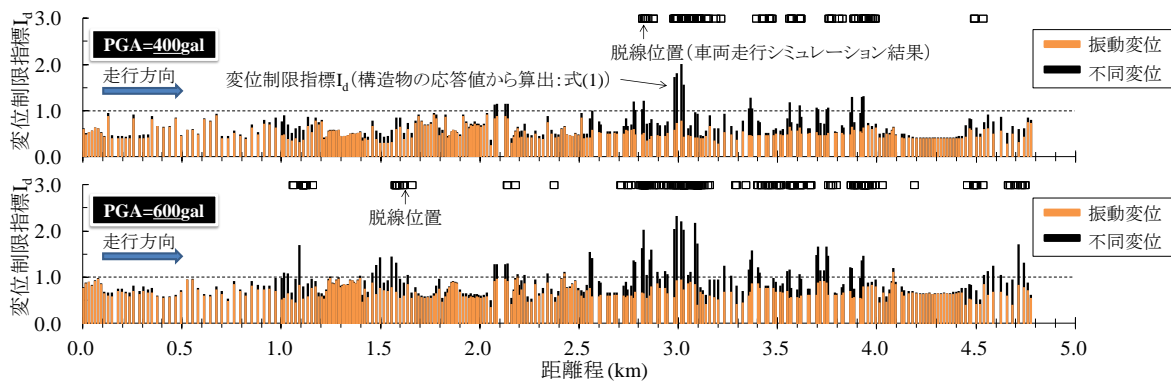


図6 車両走行シミュレーションによる脱線位置と変位制限指標 I_d との関係(入力地震動:L2スペクトルI(G2))

角を示します。図より、PGA=200gal程度で多くの構造物が降伏しはじめること、降伏した構造物の前後や隣接する構造物との等価固有周期差が大きくなる箇所では角折れが増加していることが分かります。

図6に、PGA=400gal, 600galにおける車両走行シミュレーションによる脱線位置と式(1)から算出された変位制限指標 I_d との関係を示します。図より、変位制限指標 I_d がおよそ1を超えた構造物箇所でも車両走行シミュレーションにおいても脱線が生じていることが確認できます。また、本モデル線区における弱点構造物は3.0km付近に存在していることや、その弱点構造物箇所では振動変位の影響よりも不同変位(角折れ)の影響が支配的であることも分かります。このように本提案手法により、車両走行シミュレーションを行うことなく、線区内の弱点構造物箇所の抽出や脱線の支配要因を評価可能となります。

4. まとめ

地震時の構造物の動的応答解析結果のみから、脱線に対する振動変位及び不同変位の寄与や、線区内での弱点構造物を抽出可能な手法を提案しました。今後、本提案手法に関する検討ケースを増やすことで、更なる精度検証および精度向上に努めていきたいと考えています。

執筆者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 後藤恵一

担当者：鉄道力学研究部 構造力学研究室 上半文昭, 渡辺勉, 松岡弘大

鉄道高架橋地震時損傷検知システムの構築

1. はじめに

地震後の鉄道構造物の被害調査（図1）は、徒歩巡回による目視等で行われます。このとき、検査員が確実に構造物の損傷状況を把握することが重要であり、そのためにはある程度の時間が必要となります。また近年、一般的な構造形式である鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン高架橋に対し、耐震性能向上を目的とした鋼板巻立て補強が施され、目視による損傷状況の確認が困難なRC柱が増えております。このような背景から、地震時に効率的かつ高精度にRCラーメン高架橋群の損傷を検知できるシステムを開発しました。

地震時にRCラーメン高架橋の柱端部に生じる柱の最大の傾き（最大応答部材角）と、柱に発生する損傷の程度（損傷レベル）の関係は概ね把握されています（図2）。そのため、最大応答部材角を効率的に測定できれば、地震後早期に柱の損傷レベルを評価することが可能となり、復旧作業の必要性や列車運行の可否判断を正確に行うことが可能となります。

本稿では、地震時における高架橋群の損傷状態を推定する「地震時損傷検知システム」の概要、ならびに本システムに用いている「最大応答部材角測定装置」の概要について紹介します。

2. 地震時損傷検知システムの概要

図3にシステムの全体概要を示します。RCラーメン高架橋の柱に設置した最大応答部材角測定装置（詳細は後述）により、地震時における線路方向・線路直角方向の2方向の応答部材角を測定します。測定データは、消費電力の小さい無線（ZigBee等）を用いて装置近傍に設置したパソコン（システムPC）に自動的に伝送します。システムPCは、設計時等に事前検討した各構造物の非線形応答解析結果のデータベースを有しており、伝送された最大応答部材角の測定データと、システムPC内のデータベースから構造物の損傷状態を推定します（図4）。なお、システムPCの操作は、無線LAN（Wi-Fi等）を利用して、遠隔地に設置した操作PCより遠隔操作することを想定しています。

本システムは、装置を設置した柱だけでなく、装置を設置した高架橋の他の部材や、数kmにも及ぶ高架橋群全体の損傷状態を推定できる点に特徴があります。

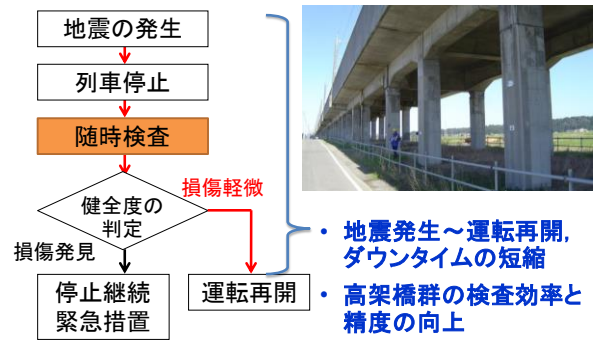


図1 地震時の構造物検査

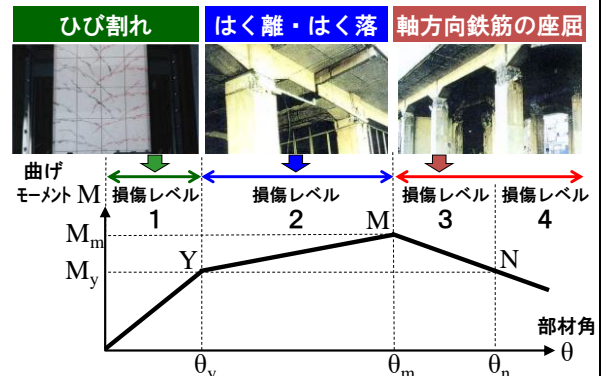


図2 部材角と損傷レベルの関係

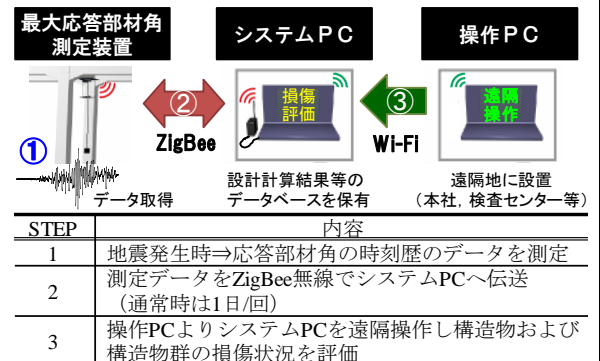


図3 地震時損傷検知システムの全体概要

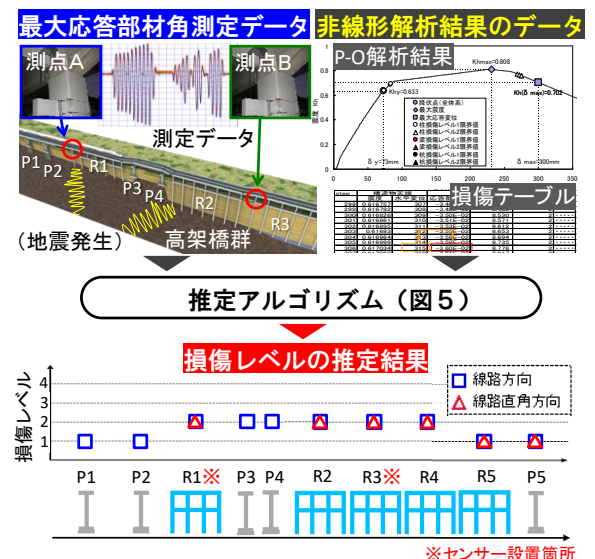


図4 高架橋群の損傷レベル推定イメージ

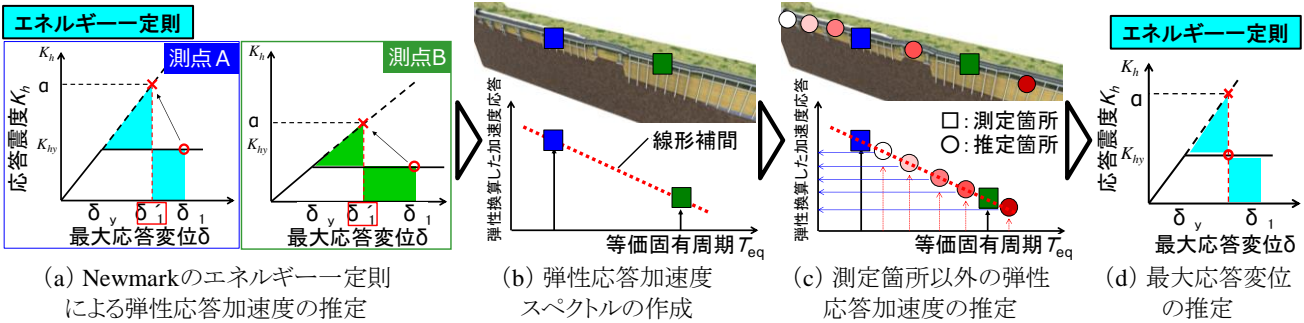


図5 損傷レベルの推定アルゴリズム

損傷レベルの推定アルゴリズムを図5に示します。まず、最大応答部材角測定データと損傷テーブルより、装置を設置している構造物の弾塑性応答変位を求めます。次に、エネルギー一定則に基づいて弾性換算し、弾塑性応答スペクトルを作成します。この弾塑性応答スペクトルを用いて装置が設置されていない各構造物の弾塑性応答加速度を推定し、エネルギー一定則や変位一定則に基づいて塑性換算することで各構造物の最大応答変位を算出します。最後に、損傷テーブルを用いて損傷レベルを推定します。

3. 最大応答部材角測定装置

最大応答部材角測定装置(図6)は、RC ラーメン高架橋の梁に固定する計測部、柱に固定する応答部、これらを結ぶ測定棒で構成されます。計測部および応答部は、損傷による変形が想定される範囲(塑性ヒンジ区間)を避けた位置に設置します。測定棒は、計測部の治具を介して地震時の柱の応答に追従します。本装置は、設定した構造物の応答加速度(100gal程度)以上になると計測を開始し、XY方向ともに50Hzのピッチで連続的に60秒程度測定することを基本とした構造です。装置の稼働に必要な電源は、太陽光パネルにより蓄電した電力を用いることとしています。

計測部の構造は、これまでに機械式センサにより最大応答部材角を直接的に計測する装置(旧装置)や、動的測定が可能な応答部材角測定装置(プロトタイプ)、プロトタイプを改良した装置(改良タイプ)を開発し、測定精度について検討しています。図7は正弦波および模擬地震波を与え、入力値と測定値を比較したものです。旧装置では不感帯領域がありましたが、図8に示すように0.003(rad)以下の微小な部材角の測定も可能となり、さらに測定精度も向上しています。これにより、地震時に“部材が損傷していない”という判断に資する情報を得ることも可能です。

4. おわりに

本稿では、地震時における高架橋群の損傷状態を推定する「地震時損傷検知システム」と、RC ラーメン高架橋柱の最大応答部材角を測定できる「最大応答部材角測定装置」の概要について紹介しました。なお、本システムは2017年2月より実鉄道構造物での試験運用を開始しています。

執筆者：構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室 濱上洋平
 担当者：構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室 仁平達也・濱上洋平

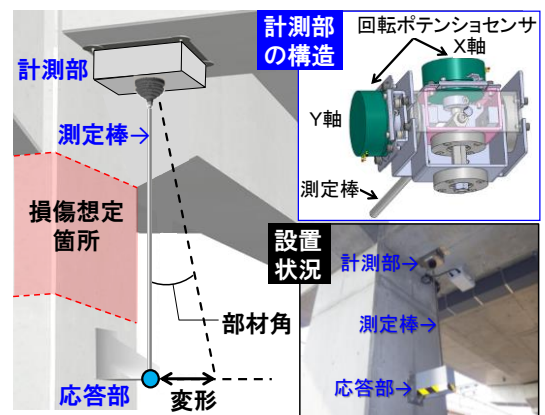


図6 最大応答部材角測定装置の概要

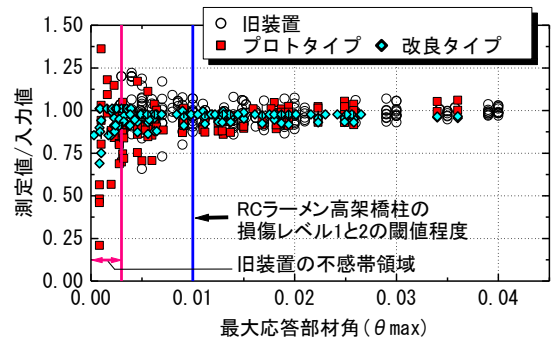


図7 測定精度(測定値/入力値)

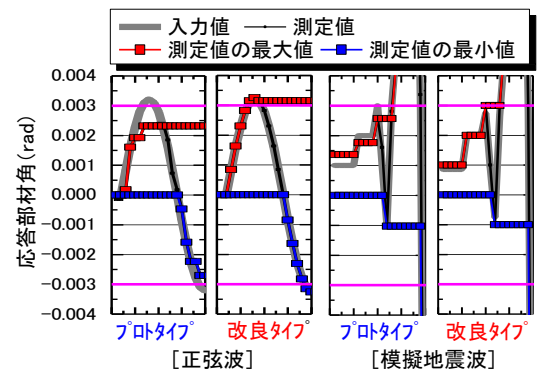


図8 0.003(rad)以下の範囲の応答

レール損傷時の徐行速度の検討

1. はじめに

レール損傷時における列車の運転中止や徐行運転は、列車の運休や遅延の大きな原因の一つとなっています。この運転中止や徐行速度等の条件は、開口量や軌道状態等によって経験的に定められていて、鉄道事業者間で異なっています。運転規制の適切な設定は、安全を確保しつつ輸送障害を最小限に留める観点から重要だと考えられます。そこで、レールが損傷して開口し、やむを得ず応急処置を施さない状態で列車を通す場合を想定し、徐行速度や開口量等が走行安全性に与える影響をシミュレーションしました。

2. 計算条件

本検討では、バラスト軌道上のレール開口部を在来線旅客車両が走行する場合を対象とし、走行速度や曲線半径・カント等の軌道線形、レール開口量、軌道変位の各因子が車両と軌道に与える影響を調べました。

解析条件を表1に、レール開口部の設定を図1に示します。去り側のレール変位が増加し、乗り移りに関して厳しい条件となるよう、レール開口部は列車進行方向の受け側まくらぎに近い位置に設定しました。

軌道変位は曲線中の乗り上がり脱線に大きな影響を及ぼす平面性変位を設定しました。軌道変位量については過去に日本国有鉄道にて定められた動的軌道変位量を参考とし、5m 平面性変位を 16mm, 18mm, 21mm の3パターン設定しました。

解析モデルは過去に実車走行試験などと比較して妥当性を確認して構築したものを用いました。レール開口部の複雑な車輪・レール間の接触現象を評価するため、自動車の衝突解析に用いられるシミュレーション手法を用いて解析しました。

3. 走行安全性の評価指標

走行安全性の評価は、脱線係数が目安値 0.8 を超過する継続時間(以下、「脱線係数超過時間」とします)とレール頭部左右変位を用いました。脱線係数超過時間は過去の研究から走行安全上問題ないとされている 15msec 以内を目安値としました。なお、この目安値を超過しても、ただちに脱線を意味するものではありません。また、レール頭部左右変位は軌間拡大の観点から検討された許容値 7mm を用いました。

4. 解析結果

①列車速度・曲線半径

列車速度・曲線半径について、脱線係数とレール変位の最大値を図2に示します。脱線係数超過時間は曲線半径に関わらず、列車速度の増加に伴って大きくなる傾向を示し、最大 12msec 程度でした。

表1 解析条件

項目	諸元
車両	在来線旅客車両
車両総重量	34t
車輪踏面形状	修正円弧踏面
走行速度	15~45km/h
レール	50kgNレール
軌間	1,067mm
カント	0~105mm
軌道変位	平面性16mm
軌道構造	PC6号9形
軌道パッドばね定数	60MN/m
レール支持間隔	600mm

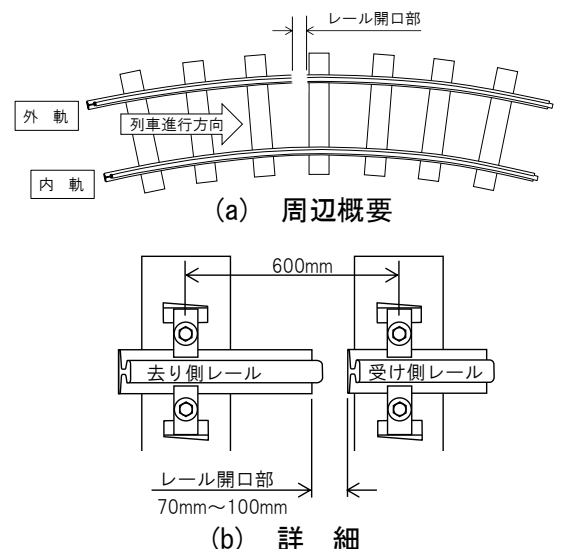


図1 レール損傷時の開口部の想定

したがって、今回検討した範囲内では 15msec を下回りました。レール頭部左右変位は列車速度との相関が確認されたものの、許容値 7mm を下回りました。

②レール開口量・曲線半径

レール開口量を変化させた場合の脱線係数とレール変位の最大値を図3に示します。脱線係数超過時間とレール頭部左右変位はレール開口量の増加による変化はほとんどありませんでした。検討した範囲内では脱線係数超過時間は最大 8msec 程度であり、走行安全上の問題は生じないと考

えられます。またレール頭部左右変位は許容値 7mm を下回りました。

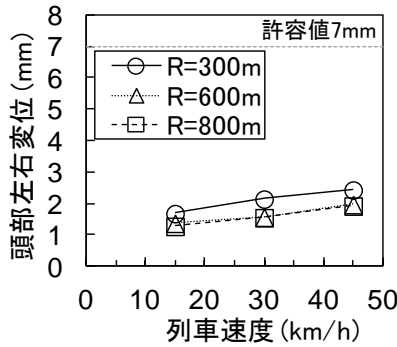
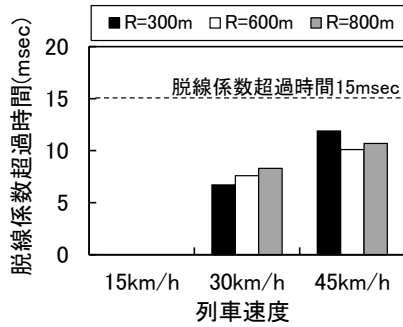
③平面性変位

平面性変位量を増加させた場合の検討結果を図4に示します。脱線係数超過時間は各曲線半径ともに平面性変位量の増加に伴って大きくなる傾向を示し、曲線半径 300m、カント 105mm の条件では全てのケースにおいて 15msec を上回りました。一方、レール頭部左右変位は平面性変位量の増加によって変動しませんでした。

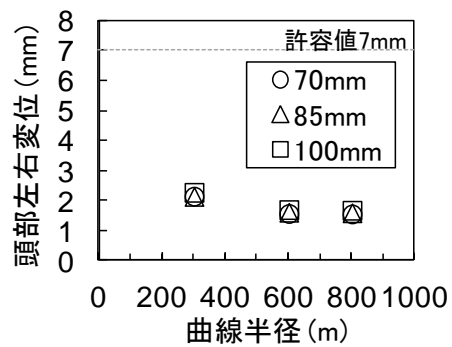
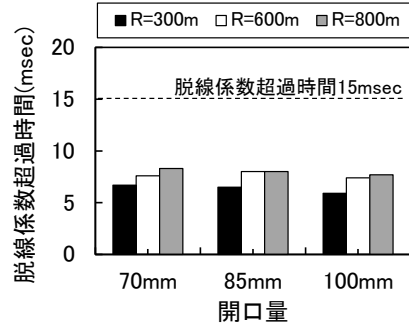
5. おわりに

本検討の結果、列車速度や曲線半径がレール開口部通過に与える影響が大きく、開口量の影響は少ないことが分かりました。今後は、レール継目部が損傷した場合や、道床状態が悪く浮きまくらぎが発生している条件での影響評価を実施していく予定です。

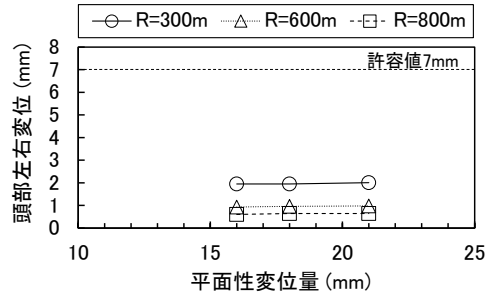
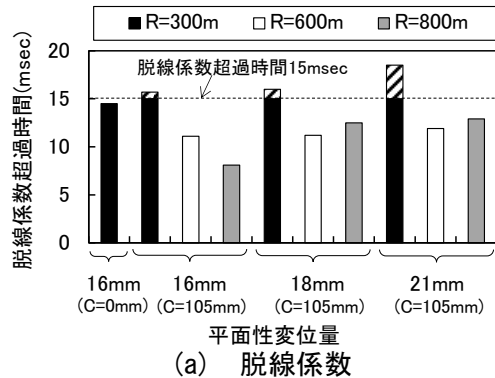
執筆者：軌道技術研究部 軌道構造研究室 西宮裕騎
 担当者：軌道技術研究部 軌道構造研究室 片岡宏夫



(a) 脱線係数 (b) レール頭部左右変位
 図2 列車速度と曲線半径の影響



(a) 脱線係数 (b) レール頭部左右変位
 図3 レール開口量の影響



(a) 脱線係数 (b) レール頭部左右変位
 図4 平面性変位の影響 (速度30km/h)

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：渡辺 健 【(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：谷川 光 【(公財) 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道・路盤】