

# レール破断部通過時の軸箱加速度の特徴

## 1. はじめに

無線式列車制御システムの普及に伴い,維持管理コストの大きい軌道回路を使用せず列車の位置を検 知することができるようになりつつあります<sup>1)</sup>.一方で,軌道回路を撤去するためには,軌道回路の代 替となるレール破断検知システムを構築する必要があります.本研究では,安価な装置を使用した車上 式のレール破断検知システムとして,軸箱加速度による方法について検討することとし<sup>2)</sup>,レール破断 部を通過した際の軸箱加速度に関する周波数の特性を調査しました.

# 2. レール開口部の走行試験

レール破断部を通過した際に得られる軸箱加速度の特徴を調査するために,鉄道総研の構内試験線に おいてレール開口部の走行試験を実施しました.締め固められたバラスト軌道の曲線部に図1のような レール開口部を設置し,軸箱支持装置に加速度計を取り付けた試験車両を走行させ,走行中に得られる

軸箱加速度を取得しました.開口部はまくらぎ間の中心に 設置し,開口量は0,30,70mmの3段階です.試験車両 はこの開口部を速度10~40km/hで走行しました.図2,3 にレール開口部および同じ軌道上の継目部(凹凸無し,遊間 10mm)通過時の軸箱加速度の波形,図4にそれらの振幅ス ペクトルを示します.波形を見ると,両者とも,車両通過 に伴う衝撃的な形態となっていますが,振幅スペクトルを



図1 試験のレール開口部(開口 70mm)

見ると、レール開口部においては レール継目部と比較して顕著に 25Hz 付近の周波数成分が大きく なっていることが分かります.レ ール開口部および継目部の波形に 対して 30Hz のローパスフィルタ (LPF)を適用し、その最大値をプロ ットすると図5のようになります. レール開口部については開口量が 大きくなるほど低周波成分の最大 値が増加する傾向にあることが分 かります.また、30Hz の LPF 処 理を施すことで、開口部のみを検 知できる可能性があることが分か りました.



#### 3. レール開口部通過時の軸箱加速度の特徴に関する考察

軸箱加速度は、軌道と車両が一体となって運動する際の振動を反映していると考えられます.いま、 そのような軌道と車両が連成する振動を表現するために、図6のように軌道と車両の各部位をばねと質 点で結合した簡易なモデルを考えます.軌道はよく図6右上に示すようにレールを梁で、その梁を軌道 パッド等のばねが離散支持する力学モデルで表現されますが、振動に寄与する軌道の範囲を表す「有効 長<sup>3</sup>」を使えば軌道を単一の質点として扱うことができ、有限要素法のような複雑な計算なしに振動の 特徴を考えることができます.有効長は定数 β-(k/4EI)<sup>(1/4)</sup> (k は軌道ばね係数、EI はレールの曲げ剛性) を用いて、一般部についてはレールである梁が連続、開口部については不連続であるという仮定の下、 ばねと質量それぞれについて表1の通り計算されます<sup>3)</sup>.一般部と開口部で有効長が異なるのは、梁の 連続/不連続によって軌道のたわみ形状が異なるためです.表2,3 に示す軌道と車両の条件を入力し、 図6の質点のうち、輪軸、レールおよびまくらぎが一体となって振動する固有振動数を求めると、表4 の通り、開口部においては26Hz となり、レール開口部通過時には一般部(48Hz)より低周波の振動が励起 される可能性を示唆しています.ここで、改めて表1を見ると、軌道の有効長は、レール開口部におい てはレールー般部の1/4 になっています.レール破断による軌道ばね係数の低下が質点モデルを用いた 場合には有効長の低下として表現され、その結果として振動系の固有振動数が低下し、軸箱加速度のピ ーク周波数が小さくなると考えられます.



## 図6 車両と軌道の連成振動モデル

表 1	軌道の有効長
-----	--------

	一般部	開口部
ばねの有効長 <i>L</i> k	$2/\beta$	$1/2\beta$
質量の有効長 Lm	$3/2\beta$	3/8 <i>β</i>

表2 車両のパラメータ

輪軸質量 M <sub>3</sub> (kg)	700
レール車輪接触ばね K <sub>3</sub> (N	$2.00 \times 10^{9}$
/m)	
ばね上質量 <i>M</i> 4 (kg)	22140/8 - <i>M</i> <sub>3</sub>
軸ばね <i>K</i> 4 (N/m)	$1.03 \times 10^{6}$

表 3 軌道のパラメータ

まくらぎ間隔 <i>l</i> (m)	0.658
レール質量 <i>m</i> <sub>r</sub> (kg/m)	50.0
まくらぎ質量 <i>m</i> s (kg/m)	80.0
軌道パッド k <sub>p</sub> (N/m)	$110 \times 10^{6}$
まくらぎ支持ばね <i>k</i> 。(N/m)	$48.7 \times 10^{6}$
レールのヤング係数 E(N/m <sup>2</sup> )	$206 \times 10^{9}$
レールの断面二次モーメント	$1.96 \times 10^{-5}$
$I(m^4)$	

表4 連成振動モデルの固有振動数

	一般部	開口部
固有振動数(Hz)	48	26

#### 4. おわりに

レール開口部の走行試験および軌道と車両の連成振動を表現する力学モデルを通して、レール開口部 通過時の軸箱加速度には、一般部と比較して低周波成分が多く含まれることが分かりました.ここで得 られた知見を参考にし、レール継目部の状態評価手法としての適用可能性およびレール損傷検知への活 用についても検討します.

#### 参考文献

- 1) 北野隆康, 岩本功貴, 中村一城: 無線式列車制御システムへのビームフォーミング技術の適用, 鉄道総研報告, Vol.35, No.10, pp.29-34, 2021
- 2) 細田充,相澤宏行,山本隆一:軌道回路に代わるレール破断検知システム,鉄道総研報告, Vol.36, No.3, pp.17-22, 2022
- 3) 佐藤裕, 軌道構造と振動との関係についての理論的考察, 鉄道業務研究資料, Vol.13, No.8, pp.200-224, 1956

執筆者:軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室 相澤宏行

担当者:軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室 細田充,山本隆一

リアルタイムハザードマップシステムの連続稼働試験

#### 1. はじめに

降雨に起因する災害へのソフト対策の 一つとして、わが国の鉄道では降雨に対 する運転規制が用いられています.これ は、駅等に設置された雨量計において規 制値を超える雨量が観測された場合に、 列車の徐行や運転中止などの措置をとる 方法で、これにより豪雨時の鉄道の安全 が確保されています.



しかし、局地的な豪雨は雨量計の設置

## 図-1 リアルタイムハザードマップシステムの概要

間隔より狭い範囲で発生することがあり、駅等の雨量計で十分に捕捉できない可能性が考えられます. また、運転規制により駅等で列車の運転が抑止された後、その周辺で冠水等が生じると、列車が影響を 受ける可能性が考えられます.

これらの課題に対して、鉄道総研では、鉄道沿線の中小河川を対象とするリアルタイムハザードマッ プシステムを提案しています<sup>1)</sup>(図-1).このシステムは、外部機関から配信を受けた降雨予測値等を 用いて浸水・氾濫解析を行い、もし浸水・氾濫の発生が予測された場合には、列車の安全な停止位置を 解析して提案するシステムです。得られた結果は地図上に表示され、ユーザーはインターネット経由で 閲覧できます.また、降雨予測値等は10分ごとに最新のデータに更新され、その都度一連の解析を実施 しており、ユーザーはリアルタイムに解析結果を得ることができます.

本システムを用いた稼働試験を実施し,解析時間等を確認しました.また,浸水・氾濫解析について 予測値と実測値を比較し,解析精度の検討を行いました.本稿では,これらについて報告します.

## 2. 浸水・氾濫解析の概要

本システムでの浸水・氾濫解析では数値標高モデ ルを用いてコンピュータ上に地形を再現し,降雨か ら浸水・氾濫発生までを図-2に示す3ステップで 解析します<sup>2)</sup>. 1つ目のステップは,降雨が地表面 の傾斜に沿って流下して河川に流入するまでを対象 とした解析です. 2つ目のステップは,河川内の流 れの解析です. この解析で得られる河川水位が,河 川堤防の高さを超過する場合に越流が発生すると判 定します. その際, 3つ目のステップとして,越流 した水が地表面の傾斜に沿って広がる浸水・氾濫に 関する解析を実施します.



図-3 稼働試験

流域A

\*降雨予測値のダウンロード後、解析結果

を閲覧可能となるまでの時間の平均値

(B) 稼働試験での解析に要した時間

流域B

#### 3. 稼働試験

特徴の異なる2流域を対象に、稼働試験を実施し

ました (図-3(A)). 流域 A は面積が約 61km<sup>2</sup>で,都市域にあり,地表面がアスファルト等で覆われて います. 流域 B は面積が約 240km<sup>2</sup>で,水田や林地が広がっています.

流域B:水田·林地 240km<sup>2</sup>

(A)対象流域

#### 施設研究ニュース No.389 2023.1.1

本システムでは 10 分毎に降水量予測値等の配信を受けるため,配信後 10 分以内に解析処理が完了することが,システムが安定に動作するための条件です.図-3(B)から,解析に要した平均時間は 5 分以内であることが分かり,この条件を満たすことを確認しました.また,わが国の自治体管理である中小河川の 8 割以上は流域面積が 200km<sup>2</sup>未満<sup>4)</sup>で,これは流域 B と同程度です.そのため,本システムは自治体管理の中小河川には概ね適用できると考えられます.

## 4. 精度検証

解析精度の検証例として,流域Bにおいて,浸水が生 じた降雨事例を対象とした再現解析結果を図-4に示し ます.図では,流域内の河川の水位の実測値と,解析値 を比較しています.この図から,解析値は実測値をよく 再現しており,降雨発生後に河川水位が上昇し,その後 低下する結果が得られていることが分かります.

また,解析で得られた浸水範囲を図-5に示します.図 では,国土地理院が空中写真等から推定した浸水範囲<sup>3)</sup> と比較しています.図から,解析結果は,国土地理院に よる浸水範囲とよく一致していることが分かります.



(A)浸水範囲<sup>3)</sup>

(B)再現解析結果

図-5 国土地理院による浸水範囲の推定結果 <sup>3)</sup>と再現解析結果の比較例

推定浸水深

0m

1m

2m

3m

# 4. おわりに

リアルタイムハザードマップの稼働試験を実施し,解析時間が5分未満であることを確認しました. また,浸水・氾濫解析が,実測値等をよく再現していることを確認しました.引き続き,豪雨災害に対 する鉄道の強靭化に向け,ハザードの予測,評価,表示・伝達方法等の改良を進めます.

本報告の内容の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP(戦略的イノベーション創造プロ グラム)「レジリエントな防災・減災技術の強化」(管理法人:JST)により実施したものです.

# 参考文献

1) 浦越拓野:降雨量予測値を用いた豪雨時鉄道減災システム,施設研究ニュース, No.344, pp.3-4, 2019.
2) 馬目凌:局所的強雨における鉄道沿線の流出・氾濫影響評価手法,施設研究ニュース, No.340, pp.3-4, 2018.

3) 国土地理院: 令和元年(2019年)10月の低気圧に伴う大雨に関する情報, https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/

R1\_10gatsuheavyrain.html, 2022 年 10 月 24 日閲覧.

4) 中小河川計画検討会:中小河川計画の手引き(案), 1999.

執筆者:防災技術研究部 地質研究室 浦越拓野 担当者:防災技術研究部 地質研究室 河村祥一 防災技術研究部 地盤防災研究室 渡邉諭,馬目凌,深野雄三

# 新たな試験を用いたのり面工安定性評価手法

#### 1. はじめに

鉄道沿線の切土のり面に施工されたのり面工(吹付モルタル工・張コンクリート工)では経年に伴う 変状や崩壊が発生することがあります.これらの原因を把握して健全性を評価するためには,のり面工 背面の地山の風化状態を把握することが重要となります.一方,鉄道沿線の膨大な数の斜面を対象とす る場合には,簡便な調査により評価可能な方法が求められます.そこで,のり面工背面地盤の風化の進 行による土砂化の程度やその深度などを把握する手段の開発を目的として,作業性がよくかつ安価に実 施できる原位置試験として,簡易動的コーン貫入試験(以下,既往試験という)を応用した「自由打撃 貫入試験」を開発するとともに,この試験結果からのり面工の安定性を評価する手法を提案しました.

#### 2. 自由打撃貫入試験の概要

本試験は既往試験を応用したもので、試験機をのり面 工の水抜き孔等を通じて横方向に貫入し、人力によって 重錘(5kg)を水平方向へ繰り返し打撃し、ロッドが地盤 に 0.1m 貫入した時の打撃回数により地盤強度に関連す る試験値 (N<sub>e</sub>値) を取得するものです (図 1, 図 2, 図 3). 本試験の特徴として,試験者に依存する打撃速度 v のバ ラつきを抑えるため、打撃ルールとして打撃周期S(sec/ 往復),打撃走行距離 L(m)を一定に定めています.本 試験により図4のような試験結果が得られ,のり面工背面地 盤の土砂化の程度とその範囲を把握することができます. さ らに詳細な試験値の取得が求められる場合には、貫入ロッド の中間部に打撃力計測センサーを接続して、ハンマーによる ロッド打撃時の打撃荷重を計測します. これにより、計測し た打撃荷重と標準的な打撃荷重の関係から試験者毎に異なる 打撃力を定量的に補正することができ、試験者に依存する試 験結果の誤差をより小さくすることができます.

ここで、新試験より得られる試験値 (Ne 値) を既往試験値 (Nd 値) へ換算することができれば、地盤の劣化度を判断する上で 様々な既往の知見を利用することができます.そこで、風化地 盤を模した地盤に対して打撃条件や先端コーン径を試験条件 とした室内貫入試験を行い、この結果を基に換算理論式として Nd=0.43Neを提案しました.同理論式を用いることで Ne 値を Nd 値へ換算することができます.

上記の  $N_e \sim N_d$  換算理論式の妥当性を検証する目的で, 地質の異なる自然斜面において既往試験と新試験を実施 し,両者の試験値を比較しました.(図 5).現地試験から 得られた  $N_e \sim N_d$ の回帰式は,真砂土の場合は  $N_d=0.37N_e$ で あり,関東ロームの場合は  $N_d=0.35N_e$ でありました.室内 試験より得られた理論式と現地試験の回帰式には類似性 が認められ,  $N_e \sim N_d$  換算理論式には一定の信頼性が得られ



打撃力計測センサー (オプション) 専用重錘 貫入ロッド

図2 自由打撃貫入試験機写真



図3 自由打撃貫入試験の様子



ることが分かりました.

# 自由打撃貫入試験の結果に基づいたのり面工 安定性評価手法

自由打撃貫入試験結果からのり面工(張コンクリート エ)の安定性を評価する「土砂層厚斜面安定性ノモグラ ム」の計算ツールを開発しました.同ノモグラムの利用 においては、土砂層厚  $D_{es}$ ,斜面高さ H,のり面工勾配  $\theta$ ,のり面工厚 T,内部摩擦角  $\varphi$ ,土砂層湿潤密度  $\gamma_t$ の現 地情報に基づいて安定性の評価を行います(図 6).ここ

で、土砂化層厚 D<sub>es</sub>は自由打撃貫入試験等によって測定され、目安として、同試験より得られる換算 N<sub>d</sub>値が 10以下(過去の切土のり面崩 壊事例を参考に決定)となる領域を D<sub>es</sub>と判断します.

計算ツールは、上記項目に関する現地調査結果を入力することで、 図7の様なノモグラムを自動的に描画します.同ノモグラムではの り面工厚T等を条件とした複数の判断基準線が示されており、判断 基準線は張コンクリート工の力学的な安定性に関わる安全率Fsが同 ーとなる組み合わせ条件の境界を示しています(図7ではFs=1.5). 実用においては、φ, γtには現地の土質から類推される標準的な 値を入力し、さらに現地調査に基づいて現地条件に近い判断基準

線を選定した上で,現地で測定したのり面工背面の土砂 化層厚  $D_{es}$  とのり面勾配  $\theta$  との関係をプロットします. この時,同プロットが選定した判断基準線に対して右上 に配置された場合には,のり面工は不安定,左下の場合 は安定と判断されます.具体例として図7にのり面工厚 T=0.1m ののり面工で実施した3箇所の試験結果を示し ていますが,3箇所中1箇所が不安定領域に位置するこ とが分かります.このように現地の安定性を効率よく判 断することができます.

#### 4. まとめ

本研究では、のり面工背面地盤の劣化度を適切かつ簡易 に判定する新たな試験の開発を行い、その結果に基づいた

のり面工の安定性評価を行うツールを開発しました.今後は,現地での適用試験を実施し,同手法の高 精度化等現場のニーズに応じた改良を継続的に検討していきます.



「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】(<u>http://www.rtri.or.jp/rd/rd\_news.html</u>)にアクセスしてください.

発行者:中村 貴久 【(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:杉山 祐耶 【(公財)鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 軌道管理】

