

論文 損傷抑制を目的とした固定クロッシング 乗移り部の形状開発

高橋 浩市朗¹・渡邊 真一¹・米原 善秀¹・道辻 洋平²・桑名 和希²
・瀧川 光伸³・久保 奈帆美⁴・牧野 哲也⁵

¹正会員 東京地下鉄株式会社 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: k.takahashi.c3c@tokyometro.jp

²非会員 茨城大学 工学部機械システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市成沢町 4-12-1)
E-mail: yohei.michitsuji.031@vc.ibaraki.ac.jp

³正会員 株式会社日本線路技術 エンジニアリング事業部 (〒120-0026 東京都足立区千住旭町 42-3)
E-mail: m-takikawa@kk-nsg.co.jp

⁴正会員 日鉄レールウェイテクノス株式会社 鉄道評価試験部 (〒554-0024 大阪市此花区島屋 5-1-109)
E-mail: kubo-naomi@nsrt.nipponsteel.com

⁵非会員 株式会社大同キャスティングス 生産本部 (〒455-0022 名古屋市港区竜宮町 10)
E-mail: MAKINO@d-cast.jp

車輪がクロッシングを通過する際、ノーズレールとウイングレール間に軌間線欠線部が存在するため衝撃荷重が発生する。著者らが東京地下鉄線内に敷設されたクロッシングを調査した結果、塑性変形によるレール頭頂面の落込みが複数のクロッシングで確認された。クロッシング通過時に発生する繰返し衝撃荷重は、レール頭頂面に顕著な落込みを引き起こす場合があることから、き裂発生要因の1つであると推察された。

以前より、軌間線欠線部で発生する衝撃荷重の緩和手法として、クロッシング二段勾配形状の有効性は確認できている。しかし、東京地下鉄では相互直通運転の実施により車輪踏面の統一が難しく、複数の車輪踏面に対応した形状が求められる。そこで本研究では、複数の車輪踏面に対応したクロッシング乗移り部の形状を考案し、衝撃抑制効果を検証した。

Key Words: rigid crossing, plastic deformation, impact control, vehicle dynamic simulation, vibration analysis

1. はじめに

クロッシングは、車輪フランジが他のレールを横断する個所に設置される。車輪フランジがレールを横断するには、フランジウェイを確保する必要がある¹⁾が、そのためにノーズレールとウイングレール間に軌間線欠線部を設けており、通過時に大きな衝撃荷重が発生する。クロッシング通過時に発生する繰返し衝撃荷重は、レール頭頂面に顕著な落込みを引き起こす場合があることから、き裂発生要因の1つであると推察された。

著者らが東京地下鉄線内に敷設されたクロッシングを調査した結果、塑性変形によるレール頭頂面の落込み(図-1)が複数のクロッシングで確認された。過去には、営業線に敷設されたクロッシングにおいて、き裂の

発生に至るケースが確認されており、再発防止に向けた取り組みを進めている。

以前より、軌間線欠線部で発生する衝撃荷重の緩和手法として、クロッシング二段勾配形状の有効性^{2,3)}は確認できている。しかし、東京地下鉄では相互直通運転の



図-1 レール頭頂面の塑性変形

実施により車輪踏面の統一が難しく、複数の車輪踏面に対応した形状が求められる。そこで本研究では、複数の車輪踏面に対応したクロッシング乗移り部の形状を考案し、衝撃抑制効果を検証したので報告する。

2. 乗移り部形状の考案

(1) 対象クロッシングと車輪踏面形状

type1 踏面と type2 踏面の 2 種類の車輪踏面形状を有する路線を対象に、10# 固定クロッシングにおける乗移り部の断面形状を検討した。type1, 2 踏面の形状比較結果を図-2 に示す。

(2) コンセプト

当該路線における type1 踏面を有する車両の通過頻度は、全車両の通過頻度の約 9 割を占める。そのため、まずは type1 踏面に対応した二段勾配を設定し、次に type2 踏面と二段勾配の乗移り点における干渉を緩和するため、レール長手方向の勾配を設定する（以下、3 次元二段勾配クロッシング）。

(3) 3 次元二段勾配形状

二段勾配として、ノーズレールとウイングレール頭頂面 GC 側に 1/24、ウイングレール頭頂面 FC 側に 1/12.2 の勾配を取り付けた。レール長手方向には、1/62.5 の勾配を 50N（ノーズレールの頭部幅が 50mm の箇所を示す。同様に、ノーズレールの頭部幅が 40mm、30mm の箇所をそれぞれ 40N、30N と記載する。）～30N 位置に設定した。

(4) 設計思想

a) 二段勾配の設定

二段勾配の取り付け方法を 2step に分けて以下に示す。

Step1 では、二段勾配における上段の勾配設定を行う。単一勾配クロッシングを走行時、type1 踏面を有する車両は、30N～20N 間での乗移りが確認されている⁴⁾。乗移りの開始点が 30N 位置であることから、30N 位置でウイングレールに接触している type1 踏面に最適な勾配を設定することで、円滑な乗移りが期待できる。以上より、

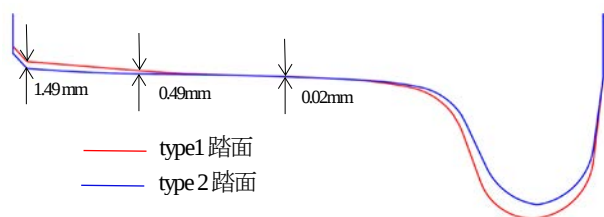


図-2 type1, 2踏面の形状比較

上段の勾配を 1/12.2 と設定した。

Step2 では、二段勾配における下段の勾配設定を行う。type1 踏面を有する車両が乗移りを開始する 30N 位置で、車輪踏面とノーズレールの密着性良好な勾配を求めた。その結果、下段の勾配を 1/24 と設定した際に車輪踏面とノーズレールの隙間が 0.0067mm と小さく、密着性良好な状態であることが確認できた⁵⁾。

b) 二段勾配の効果

単一勾配 (1/20) 及び二段勾配 (1/12.2-1/24) クロッシングと type1 踏面の接触解析結果を図-3 に示す。二段勾配化により車輪踏面とウイングレールの隙間は、全接触解析位置において減少していることから、乗移り時の衝撃抑制が期待できる。また、10N, Cr 交点位置においては一点接触から 23mm 間の面接触へと変化しており、接触面圧の低下が期待できる。

c) type2 踏面のウイングレール干渉

二段勾配 (1/12.2-1/24) クロッシングと type2 踏面との接触解析結果を図-4 に示す。図-4 より、40N 位置において type2 踏面とウイングレールが 1.6mm 干渉することが明らかとなった。これは、作図上ノーズで接触していることを前提としているため生じる干渉ではあるが、背向走行時 45N～40N 間での乗移りの際に、ウイングレールは車輪から大きな衝撃を受けると考えられる。また、乗

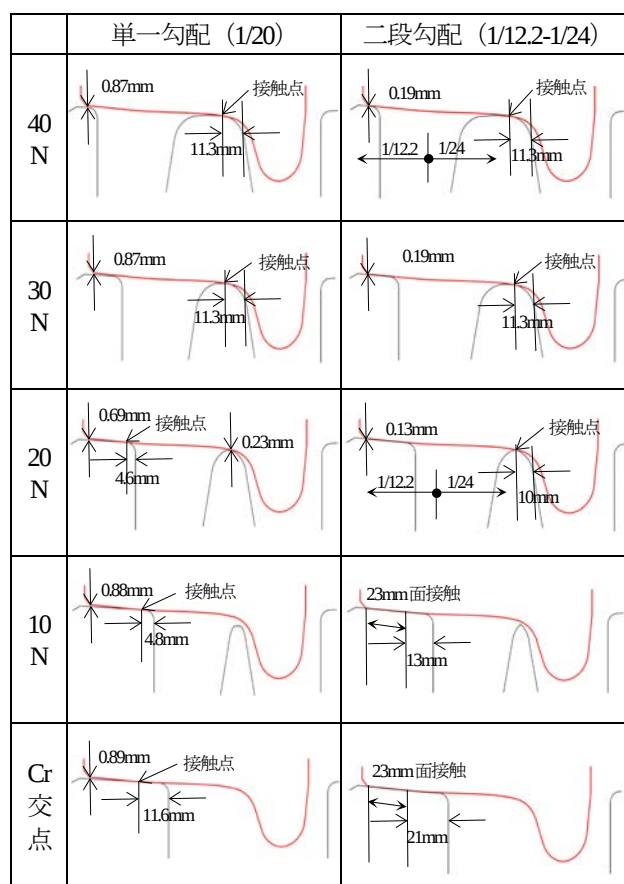


図-3 type1 踏面の接触解析結果

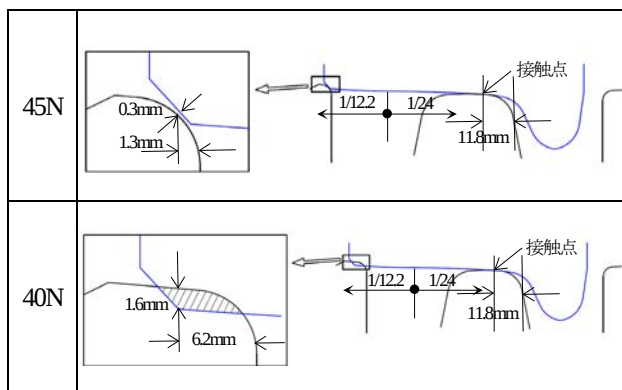


図-4 type2踏面の接触解析結果

移り点での衝撃は、図-2 に示すように type2 踏面が、type1 踏面に比べ最大 1.49mm 低い形状となっているため、背向走行時ウイングレール後端で乗り移ることに起因すると考えられる。

d) 縦勾配の設定

type2 踏面とウイングレールの乗移り点で生じる干渉を防ぐため、ウイングレール後端から前端に向けて長手方向に上り勾配を取り付けた（以下、3 次元二段勾配クロッシング）。図-5 に上り勾配取付け範囲を示す。3 次元二段勾配クロッシングにおける勾配取付け方法を以下に示す。2 章 4 節 a 項で説明した step1, 2 に加え、長手方向の上り勾配を取り付けるため step3 を加えることで 3 次元二段勾配クロッシングの形状検討を行った。2 章 4 節 c 項で述べた通り、背向走行時 40N 位置において車輪とウイングレールが 1.6mm 干渉している。この干渉抑制を目的に、40N～30N の 100mm 間で 1.6mm の高低差を設けるため、長手方向に 1/62.5 の勾配を 50N～30N 位置に設定した。

e) 縦勾配の効果

3 次元二段勾配クロッシングと type1, 2 踏面の接触解析を行った。上り勾配が取り付けられている 45N, 40N, 35N に着目した接触解析の結果を図-6 に示す。図中の点線で描かれたクロッシングは二段勾配形状を、実線で描かれたクロッシングは 3 次元二段勾配形状を表している。type2 踏面の接触解析の結果から、車輪踏面とウイングレールが干渉することなく乗り移っていることを確認で

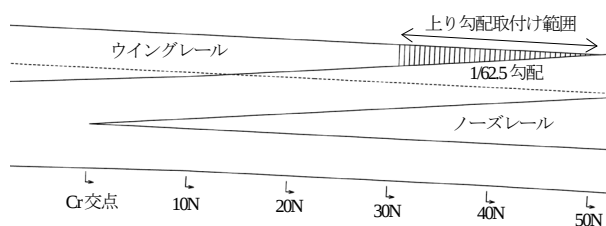


図-5 3次元二段勾配における上り勾配取付け範囲

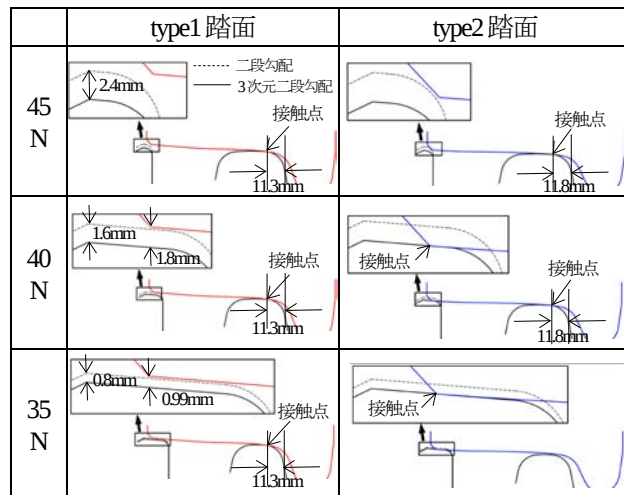


図-6 3次元二段勾配における type1, 2踏面の接触解析結果

きた。なお、3次元二段勾配クロッシングと type1踏面との隙間は大きくなるが、次章の車両走行シミュレーションにて、乗移りには影響を及ぼしていないことを確認している。

3. 車両走行シミュレーション

(1) 解析モデルの概要

マルチボディダイナミクス (MBD) シミュレーションを利用し、3 次元二段勾配クロッシングの評価を実施した。本研究では、MBD 解析ソフトである SIMPACK を使用した。

(2) クロッシングのモデル化

解析にあたり、SIMPACK 上にクロッシングモデルを作成した。モデル化の対象となる 3 次元二段勾配クロッシングは、断面方向だけでなくレール長手方向にも形状が変化することから、0.01m 間隔でレール断面を作成した。なお、断面形状の作成には、CAD 設計ソフトウェアである SOLIDWORKS を使用した。作成した断面を SIMPACK 上で 0.01m おきに配置し、隣り合う断面形状を線形補完することで、クロッシングのモデル化（図-7）

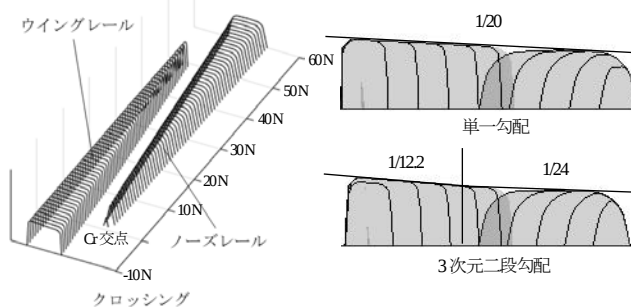


図-7 クロッシングのモデル化

を実施した。主レール及びガードレール形状に関しても、同様の手法でモデル化を実施した。

(3) 鉄道車両のモデル化

車両諸元を表-1に示す。車両は、1車体、2台車、4輪軸から構成される一車両モデルとした。なお、モデルに使用した台車は、ボルスタ台車である。作成した鉄道車両モデル例及び車輪踏面形状をそれぞれ図-8、図-9に示す。

(4) 解析条件

解析条件を表-2に示す。走行ルートは、走行頻度の高い基準線側を対象とした。輪踏面形状及び走行方向をパラメータとし、単勾配（以下、改良前）及び3次元二段勾配（以下、改良後）クロッシング形状に対して解析を実施するため、解析条件は計8通りとなる。

表-1 車両諸元

車体質量[kg]	15845
台車枠質量[kg]	1298
輪軸質量[kg]	869
ボルスタ質量[kg]	672
台車間距離[m]	13.8
固定軸距[m]	2.3
車体重心高さ[m]	1.986
台車枠重心高さ[m]	0.56
車輪踏面形状	type1踏面, type2踏面

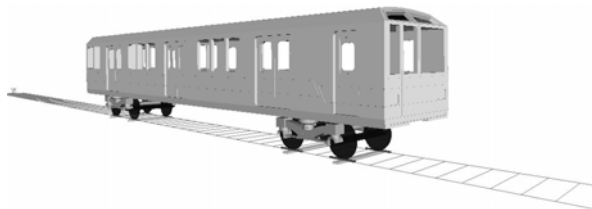


図-8 鉄道車両モデル例



図-9 車輪踏面形状のモデル

表-2 解析条件

走行速度	5 [m/s]	
摩擦係数	0.4	
解析ステップ	2500 Hz	
走行ルート	基準線側	
車輪踏面形状	type1 踏面	type2 踏面
走行方向	対向	背向
クロッシング形状	改良前	改良後

(5) 評価指標

評価指標は、輪重、軸箱振動加速度及び面圧とした。輪重とは、1つの車輪がレール面に対して垂直に及ぼす力のことである。本論文では P [kN] と表し、最大輪重を $P_{\max}$ [kN] とする。軸箱振動加速度とは、軸箱の上下方向振動加速度のことである。本論文では、 Z [m/s^2] と表し、絶対値の最大値を $|Z_{\max}|$ [m/s^2] とする。本研究で扱う面圧は、Hertz の弾性接触理論⁹⁾に基づき、接触領域が楕円であると仮定し、接触領域内の最大面圧を $N_{\max}$ [GPa] とする。

(6) 解析結果

a) 輪重

対向走行時における type1, 2 踏面の輪重変動を、それぞれ図-10、図-11に示す。また、背向走行時における

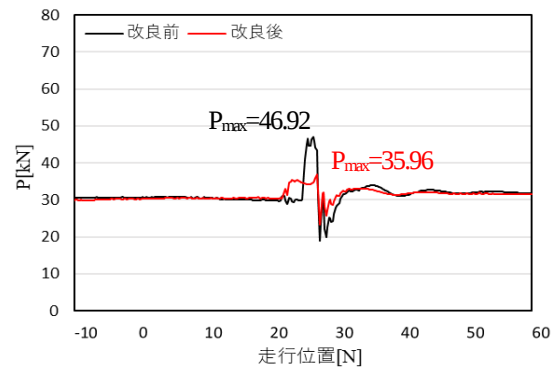


図-10 type1踏面の輪重変動（対向）

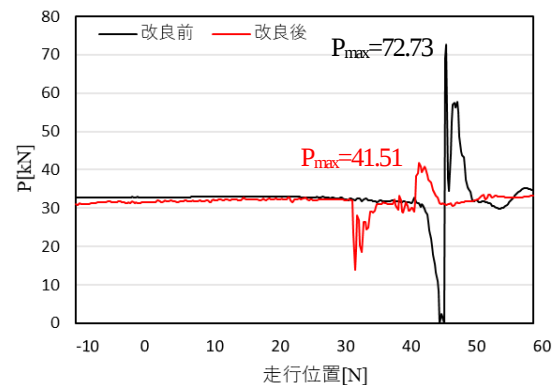


図-11 type2踏面の輪重変動（対向）

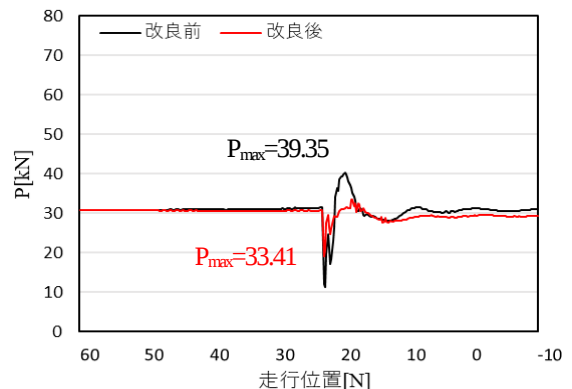


図-12 type1踏面の輪重変動（背向）

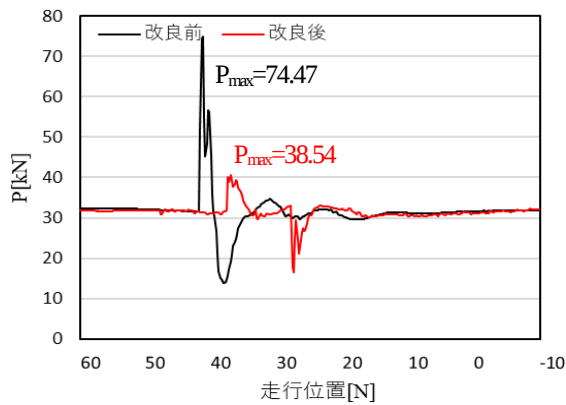


図-13 type2踏面の輪重変動（背向）

type1, 2 踏面の輪重変動を、それぞれ図-12, 図-13 に示す。対向・背向走行時共に、両踏面で改良による輪重変動抑制効果を確認することができた。特に、type2 踏面の輪重変動抑制効果は、対向・背向共に非常に大きい。これは、形状検討時の長手方向の勾配取付けによる効果であると考えられる。

b) 軸箱振動加速度

対向走行時における type1, 2 踏面の軸箱振動加速度を、それぞれ図-14, 図-15 に示す。また、背向走行時における type 1, 2 踏面の軸箱振動加速度を、それぞれ図-16, 図-17 に示す。背向・対向走行時共に、両踏面で改良により軸箱振動加速度の発生を抑制することができた。

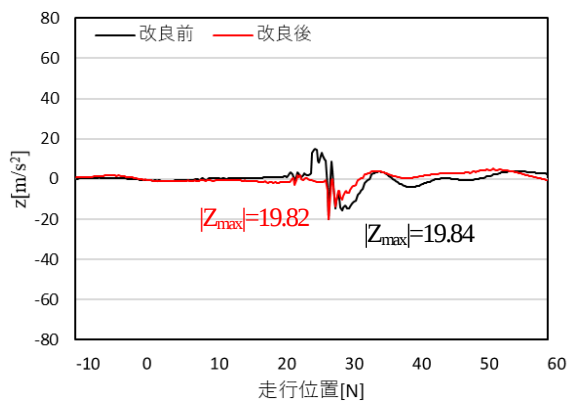


図-14 type1踏面の軸箱振動加速度（対向）

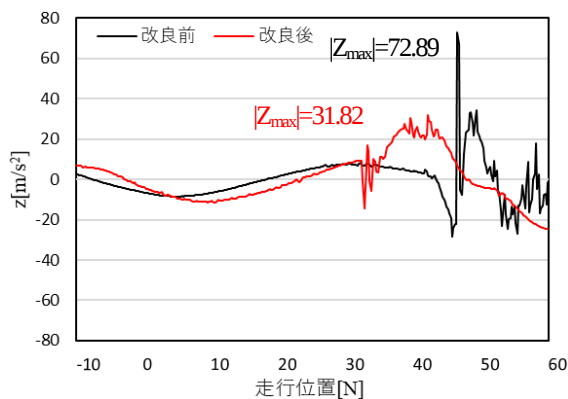


図-15 type2踏面の軸箱振動加速度（対向）

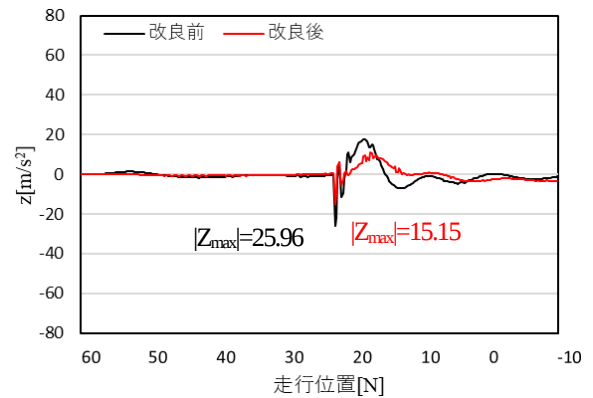


図-16 type2踏面の軸箱振動加速度（背向）

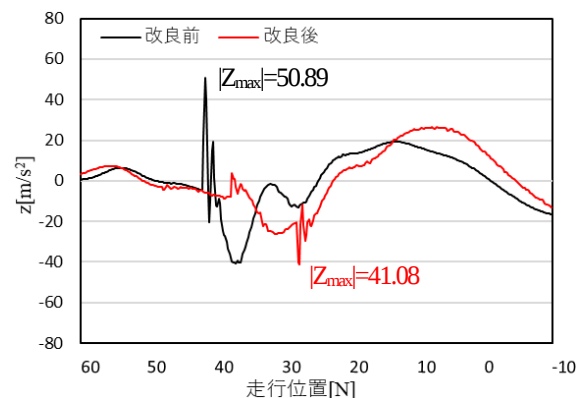


図-17 type2踏面の軸箱振動加速度（背向）

c) 面圧

対向走行時における改良前後の type1, 2 踏面の面圧カラーマップを図-18 に示す。type 1 踏面のウイングレール部に着目すると、接触面積の大幅な増加により、接触面圧を軽減することができた。一方、ノーズレール部では、乗移り開始位置がノーズレール先端側に移動したことで、接触面圧が増加した。続いて type 2 踏面のウイングレール部に着目すると、ノーズレールへの乗移り開始位置が変化したことで接触面圧の軽減に成功した。

背向走行時における改良前後の type1, 2 踏面の面圧カラーマップを図-19 に示す。type 1 踏面のウイングレール

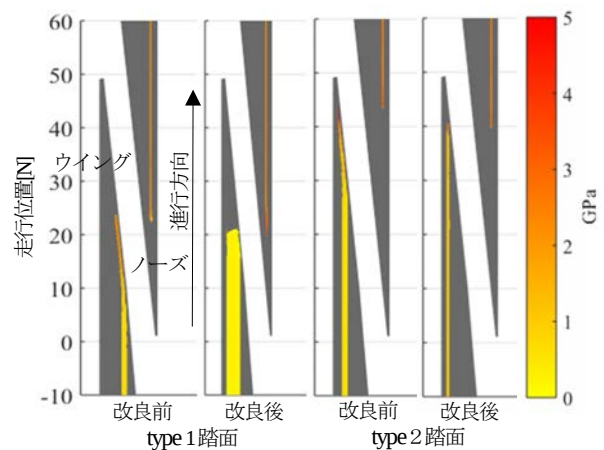


図-18 type1, 2踏面の面圧カラーマップ（対向）

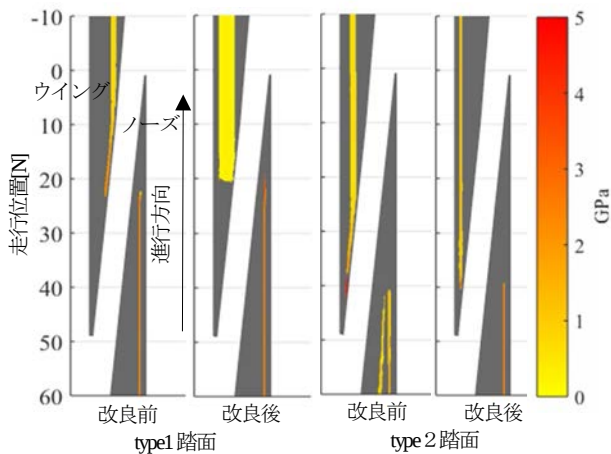


図-19 type1, 2踏面の面圧カラーマップ (背向)

部に着目すると、接触面積の大幅な増により、接触面圧を軽減することができた。一方、ノーズレール部では、乗移り開始位置がノーズレール先端側に移動したことで、接触面圧が増加した。続いて type 2 踏面のウイングレール部に着目すると、ウイングレールへの乗移り開始位置が変化することで接触面圧の軽減に成功した。一方、ノーズレール部では二点接触から一点接触になることで、面圧は増加した。

4. 営業線における追跡調査

(1) 追跡調査概要

車両走行シミュレーションにより、改良形状の有効性を確認できたことから、営業線での追跡調査を実施した。改良前後の新品クロッシングを本線に敷設し、1 年間の継続的な調査により、改良形状の経時的な有効性評価を実施した。調査箇所の概要を表-3に示す。

(2) 材料調査

a) 材料調査概要

材料調査として、摩耗量測定及び照り面幅測定を①～⑦断面(図-20)で実施した。なお、長手方向に 100mm 間隔での測定を実施した。

表-3 調査箇所概要

	改良前	改良後
年間通過トン数	30,760,179t	29,173,644t
レール種別	50kg レール	
走行速度	40～55km/h	
クロッシング材質	マンガン製	
まくらぎ種別	合成	
道床種別	コンクリート	
締結方式	タイププレート	
番数・形状	10 番・片開き	

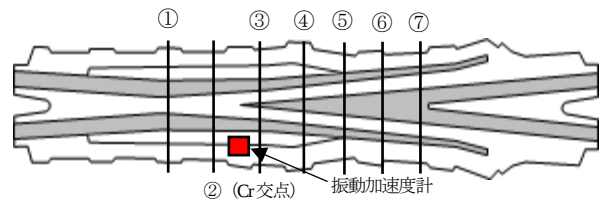


図-20 材料調査及び振動加速度計設置位置

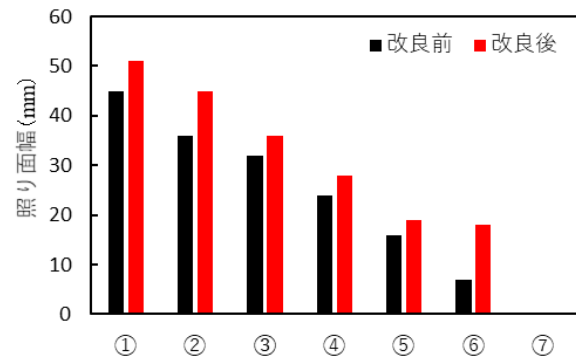


図-21 照り面幅測定結果 (対向)

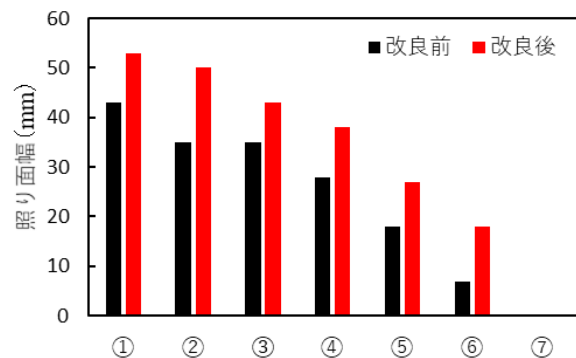


図-22 照り面幅測定結果 (背向)

b) 摩耗量

敷設 12 か月後における改良前後のクロッシングの摩耗量を調査した。摩耗量の測定には、レール断面測定器 CALIPRI を使用した。改良前後での摩耗差は最大でも 1mm 程度と非常に小さく、顕著な差は表れなかった。耐摩耗性の評価を定量的に行うためには、より長期での調査を実施する必要があると言える。

c) 照り面幅

対向及び背向走行時におけるウイングレールの照り面幅測定結果を、それぞれ図-21、図-22 に示す。改良前と比較して改良後の方が、10mm 程度照り面幅が増加していることから、接触箇所の分散による損傷及び摩耗の抑制が期待できる。

(3) 振動加速度測定

a) 測定概要⁷⁾

営業線敷設後の改良前後のクロッシングに対して、振動加速度測定を実施した。振動加速度計の取付け位置は、乗移りが想定される箇所に最も近いまくらぎ間中央のクロッシング底部(図-20)とした。

b) 測定データ解析結果

測定データから乗移りに起因する振動のみを抽出し、乗移り時の振動加速度最大値を対象とした。さらに、車両や走行条件のばらつきを考慮し、頻度分布及び最頻値で比較した。なお、対象のデータ総数は、それぞれの条件（車輪路面及び進行方向）につき 400 件（10 編成，10 車両，4 軸）である。対向及び背向走行時の振動加速度最大値の頻度分布をそれぞれ図-23、図-24 に示す。縦軸

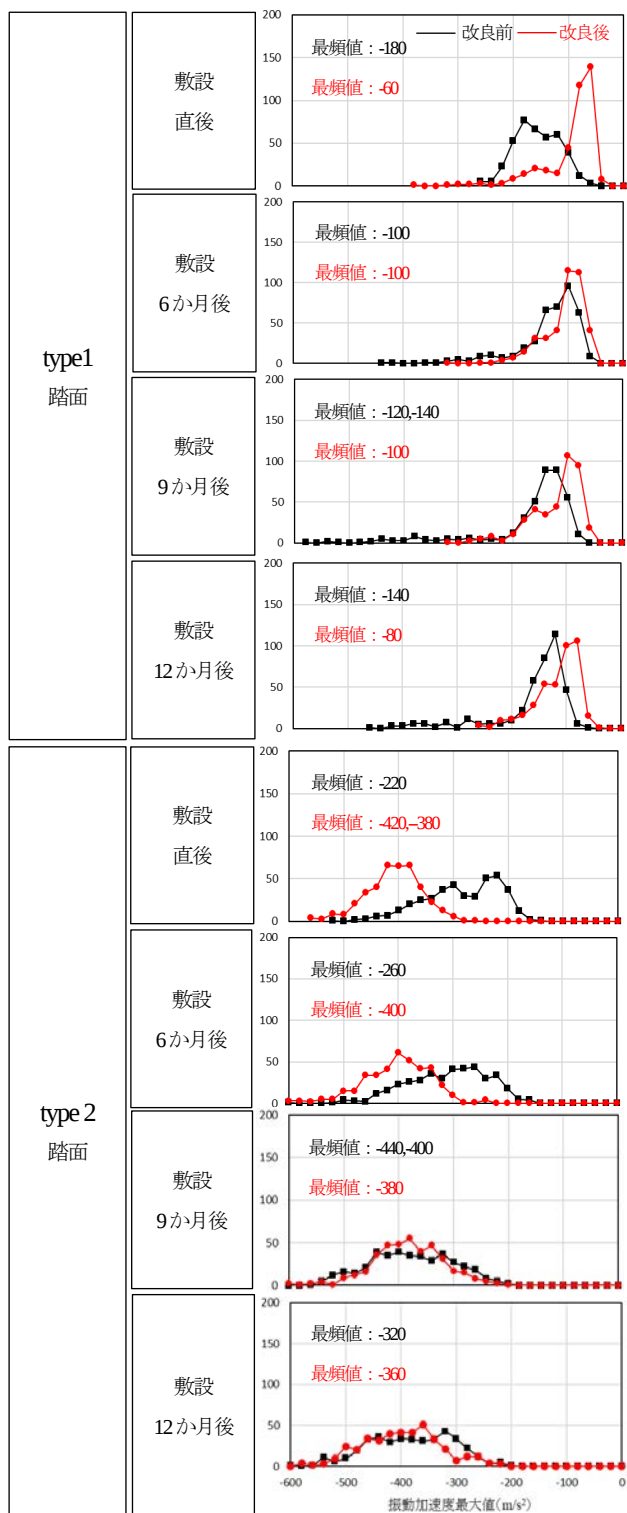


図-23 振動加速度最大値の頻度分布（対向）

は度数、横軸は振動加速度最大値を表しており、階級の幅は 20 に設定した。振動加速度最大値の負符号は鉛直上向き方向の振動加速度を表している。

対向走行における type1 踏面の解析結果に着目すると、いずれの期間も改良後の方が振動加速度最大値の最頻値は同等もしくは小さく、改良による振動抑制効果を確認することができた。対向走行における type2 踏面の振動加速度最大値の最頻値は、敷設直後は改良後の方が大き

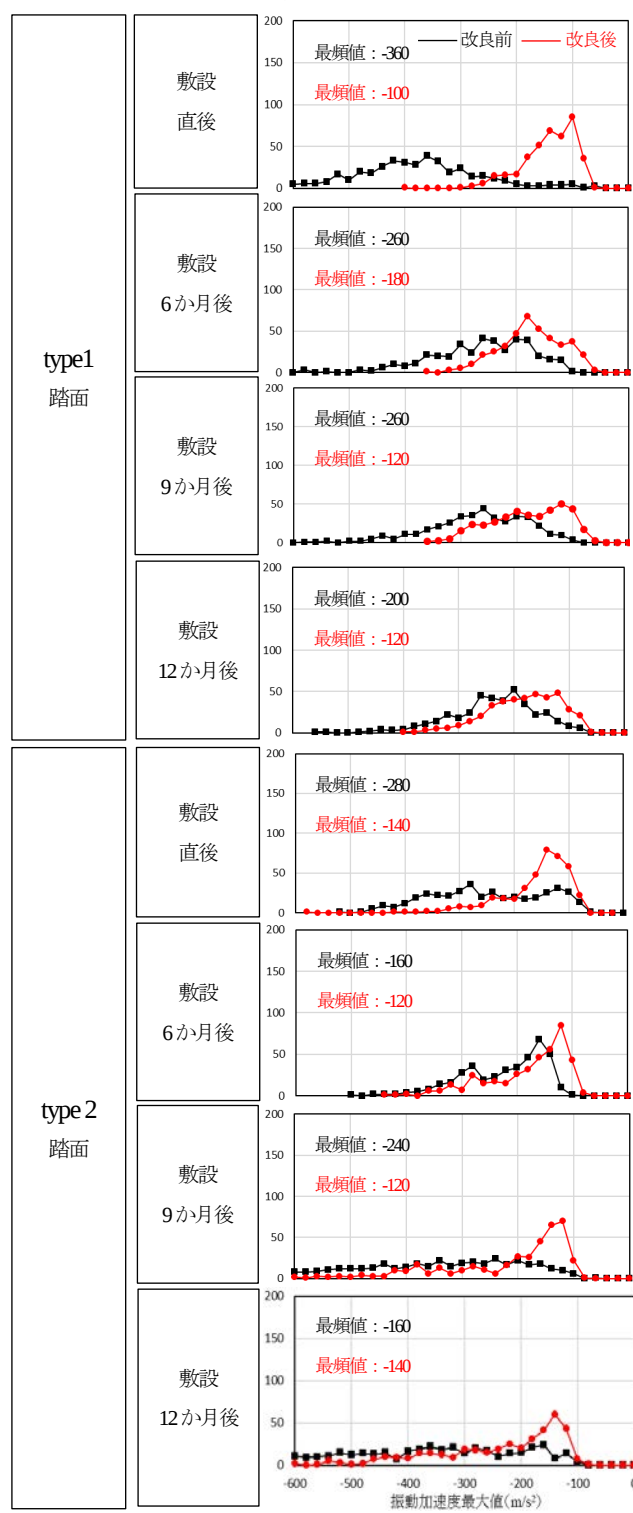


図-24 振動加速度最大値の頻度分布（背向）

いものの、時間の経過に従い改良前の値が大きくなっており、12 か月後には改良前後の差が小さくなる。また、type 2 踏面を有する列車の通過本数は、全体に占める割合のうち 1 割程度となっており、type 2 踏面における対向走行時の振動の増加が、クロッシングの損傷に与える影響は小さいと言える。

続いて、背向走行における type 1, 2 踏面の解析結果に着目する。いずれの期間も改良後の方が振動加速度最大値の最頻値が小さく、改良による振動抑制効果を確認することができた。

5. おわりに

固定クロッシングの損傷抑制を目的に、乗移り部の形状改良を実施し、以下の結果を得た。

- ・2 種類の車輪踏面形状に対応したクロッシング乗移り部の形状改良を実施した。

- ・改良形状の効果を確認するため、車両走行シミュレーションを実施した結果、乗移り時に伴う衝撃の発生を抑制できることが確認された。また、乗移り時におけるウイングレール部の面圧に関して、大きな抑制効果を確認できた一方で、一部条件ではノーズレール部の面圧増加が確認された。

- ・改良形状を試験敷設し、追跡調査を実施した結果、一部条件を除き、乗移り時の振動を抑制できることが確認された。

本研究では、10# 固定クロッシングを対象に追跡調査を実施し、乗移り時に発生する振動加速度データを解析

することで、改良形状の振動抑制効果について、概ね良好な結果を得ることができた。3 次元二段勾配形状の設計手法は他番数でも同様であり、他番数においても同様の結果が期待できる。一方、敷設 12 か月後における改良前後での摩耗差は最大でも 1mm 程度と非常に小さく耐摩耗性の評価を定量的に行うためには、より長期での調査を実施する必要があることから、今後も継続して追跡調査を実施する。

参考文献

- 1) 佐藤泰生：分岐器の構造と保守－増補改訂版－，pp.117，日本鉄道施設協会，2018。
- 2) 原幸一郎：車輪踏面を考慮したクロッシングの開発，新線路，Vol.67，No.9，pp.15-18，2013。
- 3) 森健矢：二段勾配クロッシングの保守・管理に関する取組み，新線路，Vol.71，No.3，pp.18-21，2017。
- 4) 高橋浩市朗，米原善秀，渡邊真一，道辻洋平，小山寿明，牧野哲也：3 次元二段勾配クロッシングの導入に伴う形状検討と走行シミュレーションによる評価，第 26 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集，pp.106-109，2019。
- 5) Yoshihide Yonehara, Itsuro Arai, Takaaki Fujioka, Yohei Michitsuji, Toshiaki Koyama, : The research on the new profile of crossing optimized for different type of wheel shapes, *Railway Engineering* 2019.
- 6) 保線工学編集委員会：保線工学＜上＞，pp.138-141，2016。
- 7) 塩田勝利，清水紗希，及川裕也：マンガンクロッシングの振動加速度による損傷状態の検知に関する基礎検討，土木学会第 72 回年次学術講演会，VI-439，2017。

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

DEVELOPMENT OF THE SHAPE OF THE RIGID CROSSING TRANSFER PART FOR THE PURPOSE OF SUPPRESSING DAMAGE

Koichiro TAKAHASHI, Sinichi WATANABE, Yoshihide YONEHARA,
Yohei MICHITSUJI, Kazuki KUWANA, Mitsunobu TAKIKAWA,
Naomi KUBO and Tetsuya MAKINO

When the wheel passes through the crossing, an impact load is generated because there is a gap in gauge line between the nose rail and the wing rail. As a result of investigating the crossings laid in the Tokyo Metro Co.,Ltd. subway line, the authors confirmed that the top surface of the rail was depressed due to plastic deformation in some crossings. The repeated impact load generated when passing through the crossing may cause a remarkable drop on the top surface of the rail, so it was presumed to be one of the causes of cracks

The effectiveness of the crossing two-step gradient shape has been confirmed as a method of mitigating the impact load generated by a gap in gauge line. Although the shape corresponding to the wheel tread is required, it is difficult to unify the wheel treads due to mutual direct operation. Therefore, in this study, we devised the shape of the crossing transfer part corresponding to multiple wheel treads and verified the impact suppression effect of the devised shape.