論文 レール鋼製ノーズ可動クロッシングの補強手法

新井 逸郎1・渡邉 真一2・西田 達矢3・西田 博貴4

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: i.arai.k4y@tokyometro.jp

²非会員 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: si.watanabe@tokyometro.jp

³正会員 株式会社峰製作所 技術研究所 (〒811-3102 福岡県古賀市駅東4-1-1) E-mail: Tatsuya Nishida@mine-s.co.jp

⁴正会員 株式会社峰製作所 技術研究所 (〒811-3102 福岡県古賀市駅東4-1-1) E-mail: Hiroki Nishida@mine-s.co.jp

レール鋼製ノーズ可動クロッシングの可動レール股部には、列車荷重による応力が集中し、損傷に至る 場合がある.著者らが東京地下鉄線内に敷設された関節式レール鋼製ノーズ可動クロッシングを調査した 結果、損傷は可動レール股部の列車通過側とは反対側で発見される傾向にあり、可動レール股部の曲げ破 壊が原因であると推察された.

そこで本研究では、補強手法として「裏波ビード除去」及び「可動レール股部への間隔材挿入」を考案 し、FEM解析と可動レール載荷試験の両面から各補強効果を検証した.さらに、検証過程において新たに 2つの課題を発見し、追加試験によってそれらを解決した.まず、「間隔材挿入時に初期応力が発生す る」という課題に対し、応力のモニタリングを伴う間隔材の組付け試験によって評価した.また、「可動 レールと床板の隙間によって可動レールにたわみが生じ、股部への応力が増加する」という課題に対し、 隙間条件を変化させた載荷試験によって、たわみ量と発生応力の相関関係を分析した.

Key Words : movable nose crossing, loading test, FEM analysis, rail steel, penetration bead

1. はじめに

関節式レール鋼製ノーズ可動クロッシングは、列車通 過方向に合わせ関節部を支点としてノーズ部が転換する 構造を持つ¹⁾.この構造によって欠線部がなくなり、列 車通過時の騒音や振動を低減させることができる^{2,3,4}. しかし、在来線におけるレール鋼製ノーズ可動クロッシ ングの敷設後、ノーズ部がき裂や折損に至るケースが確 認された.著者らが東京地下鉄線内において関節式レー ル鋼製ノーズ可動クロッシング(以下、「対象クロッシ ング」)を調査した結果、き裂や折損はノーズ部の列車 通過側とは反対側で発見される傾向にあり、可動レール の曲げ破壊が原因であると推察された⁵.

可動レールへの応力集中に着目した既往研究は乏しい ため,著者らは対象クロッシングの補強手法を考案し, 補強効果及び補強手法導入時の課題点について検証して きた⁰.本論文ではそれらの検証を詳細に分析し、追加 で実施した試験結果を含め,得られた知見を整理するこ とで補強手法を確立し,保守管理上の留意点を提案した.

2. 現地調査から得られた知見

対象クロッシングは、50Nレールによって構成された 8番関節式レール鋼製ノーズ可動クロッシングである。 著者らが対象クロッシングを調査した結果、き裂や折損 は可動レールにおいて列車通過側とは反対側で発見され る傾向が見られた.この傾向は、同時期に敷設された4 台の対象クロッシングのうち3台で同様に確認された.

また,敷設済みの対象クロッシング可動レール股部に ひずみゲージを貼付け,列車通過時の応力を測定したと ころ,基準線側通過時は股部内部基準線側,分岐線側通 過時は股部内部分岐線側に最大主応力が発生した.しか し,列車通過側の反対側においても可動レールの股部で 引張応力の発生が確認された.これは可動レール股部に 曲げ応力が発生しているためであると推察された⁵.

著者らは、対象クロッシングにおけるき裂や折損の防 止には可動レール股部の補強が効果的であると考え、 「裏波ビード除去」及び「可動レール股部への間隔材挿 入」という2種類の補強手法を考案した.

3. 裏波ビード除去

(1) 裏波ビード除去の概要

対象クロッシングの可動レールは70Sレールから製作 され、2本のレールを切削した上で長さ方向にアーク溶 接し、ノーズ先端部がガス圧接で接続される.アーク溶 接時に可動レール股部中央に生じる肉盛り部は図-1に示 すように溶接後も残り、裏波ビードと呼ばれる.そこで、 可動レール股部の構造をフラットにし、応力を分散させ るべく、図-1のように裏波ビードの除去を行った.

(2) FEM解析

裏波ビード除去による補強効果を検証するため,FEM 解析を行った.図-2にFEM解析で使用した可動レールモ デルの全体図及び股部付近の拡大図を示す.モデル全体 は14mmのメッシュで分割した.ただし,股部の端部付 近は,より詳細な応力分布を確認するため,メッシュサ イズを2mmとした.支持条件として,可動レール底面の 床板接触位置に鉛直ばね定数2.13×10⁷Nmの弾性支持を 設定した.FEM解析の載荷点は,股部近傍の0mm位置 と,車輪の乗り移り位置である1,300mm位置とした.載 荷荷重は実列車荷重より40kNとし,引張方向を正とし て最大主応力を確認した.応力確認位置は可動レール股 部にA~Dの4点を設定した.A点及びB点が可動レール 股部中央の裏波ビードを挟んで載荷点と反対側,C点及 びD点が載荷点側である.

図-3及び図-4にFEM解析結果を示す. モデル1が裏波 ビードを除去していないモデルであり,モデル2が裏波 ビードを除去したモデルである.図-3より,0mm位置載 荷時にはモデル1とモデル2における最大主応力に明確な 差は確認されなかった.一方で,図-4より,1,300mm位 置載荷時には,裏波ビードを除去したモデル2の方がわ



図-1 裏波ビード除去



図-2 FEM解析モデル

ずかに最大主応力が小さかった.したがって,可動レー ル端部寄りに載荷した場合のみ,裏波ビード除去による 応力低減効果がわずかに得られた.

図-5及び図-6にFEM解析における応力集中位置を示す. これらの結果から、モデル1とモデル2では、0mm位置載 荷時と1,300mm位置載荷時で応力集中位置がC, D点側か らA, B点側へ逆転したことが分かった. これは、載荷 点が可動レール上を股部から端部へ移動するにつれて、 股部に曲げ応力が発生したためであると考えられる.



図-6 応力集中位置(1,300mm位置載荷時)

(3) 疲労試験

FEM解析結果を踏まえ,裏波ビード除去の効果をさら に検証すべく疲労試験を行った.FEM解析によって,載 荷時の可動レールの曲げが考えられたことから,本試験 では可動レールの曲げ破壊を想定した.試験体は可動レ ールから股部付近を切り出したものとし,裏波ビードの あるもの(パターン1)と除去されたもの(パターン2) の2パターンを使用した.図-7に試験体を示す.可動レ ールの曲げを想定するため,試験体の一方を固定し,反 対側に載荷した.発生応力は試験体股部に貼付けたひず みゲージによって測定した.このひずみゲージで測定さ れる主応力から疲労試験機の荷重を制御し,発生する主 応力が0からの片振り全振幅(引張側)となるようにし た.

載荷速度を10Hz,最大繰り返し数を200万回とし,寿 命判定については、レール股部ひずみゲージの最大主応 力が試験開始から10%変化した回数もしくは200万回ま で達した場合は200万回を破壊繰返し数とした.

図-8に疲労試験結果を示す. 試験結果から, 裏波ビードを除去したパターン2の方が, 裏波ビードのあるパターン1よりも応力集中が緩和される傾向が確認された. FEM解析では発生応力低減効果が小さかった裏波ビード除去であるが,本試験では大幅な応力低減効果が得られた. 裏波ビードを除去したパターン2では, 最も低い疲労強度で180MPaであった.

さらに、疲労破壊後の試験体より、裏波ビード除去は 疲労き裂の進展状況にも影響を与えることが分かった. 図-9が疲労試験後の試験体の写真である.試験体に磁粉 探傷検査を行った結果、どちらの試験体パターンにおい ても、載荷側でなく、固定側からき裂が発生しているこ とが確認された.このことから、可動レールの曲げによ って股部に負荷がかかっていたと推察された.加えて、 試験体パターンごとに異なる形でき裂が進行していたこ とが分かった.裏波ビードがあるパターン1は溶接部に 沿ってき裂が端部まで達している一方で、裏波ビードを 除去したパターン2は、き裂は発生しているものの、進 行が途中で止まっていることが確認された.よって、裏 波ビード除去によりき裂の発生が妨げられていることが 明らかになった.疲労試験から、裏波ビード除去が可動 レールの補強手法として効果的であることが確認された.

4. 可動レール股部への間隔材挿入

(1) 間隔材挿入の概要

可動レール股部を補強するため、レールを溶接し可動 レールを製作した後、股部に鋼製の間隔材をボルトで組 付けた.可動レールに間隔材を挿入した様子を図-10に



図-7 疲労試験の試験体



図-8 疲労試験結果



図-9 疲労試験後の試験体



図-10 間隔材挿入の様子

示す.間隔材は、可動レールを構成する2本のレールを 一体化させ、曲げを抑え、列車荷重を可動レール全体で 受けることを目的としている.また、この間隔材により、 可動レールが折損した場合でも、可動レールを構成する レールの分割を防ぎ、脱輪防止の役割も期待される.

間隔材の長さは設計寸法310mmで,間隔材を貫通する 2本のボルトにより可動レールに組付けられる.間隔材 の断面形状は接するレールの形状とほぼ一致するように 製作されており,可動レール股部から端部側へ約550mm ほどの位置に固定される.

(2) FEM解析

可動レール股部への間隔材挿入による補強効果を検証 するため、FEM解析を行った. FEM解析における可動レ ールのモデル、載荷点及び応力確認位置は図-2と同様で ある. また, 各解析条件も3章2節の通りである. 図-11 及び図-12に0mm位置載荷時及び1,300mm位置載荷時の FEM解析結果を示す. モデル1が間隔材による補強を行 っていないモデルであり、図-3及び図-4のモデル1と同 じものである.また、モデル3が間隔材によって補強さ れたモデルである.いずれのモデルも裏波ビードを除去 していない. 0mm位置載荷時と1,300mm位置載荷時のい ずれも、間隔材を挿入したモデル3はモデル1よりも股部 発生応力が大幅に低減されていた.特に、1,300mm位置 載荷時の発生応力はわずかであった.一方で,裏波ビー ド除去についてのFEM解析時に確認された応力集中位置 の逆転は、本解析時には見られなかった. これは、間隔 材によって可動レール股部の曲げ剛性が向上したためで あると考えられる.

(3) 載荷試験

間隔材挿入による補強効果を実物で検証するため、載荷 試験を行った.本試験では工場内でバラスト道床とまく らぎを再現した模擬路盤の上に可動レール試験体を設置 し、可動レール上の異なる4点P1~P4に対して載荷した.



使用した可動レール試験体は、間隔材で補強されたもの と、補強されていないものの2種類である. どちらの試 験体も裏波ビードの除去は行っていない.

本試験の写真を図-13に示す.また、本試験の載荷点を図-14に示す.載荷点Plが可動レール股部に最も近い 載荷点であり、P2、P3、P4と可動レール端部寄りとなる ように設定した.いずれの載荷点も、可動レールを構成 する2本のレールのうちー方のレール上に設定した. FEM解析における0mm位置に近い載荷点がP1、1,300mm 位置に近い載荷点がP3である.

載荷時に可動レール股部に発生する応力は,股部に貼 付けた3軸のひずみゲージによって測定した.ひずみゲ ージで測定された値は,図-15の中心線で区切られ,載 荷点と反対側のレール上の①側と,載荷側のレール上の ②側に分けて分析した.載荷荷重は設計荷重104kNとし た.設計荷重とは,対象クロッシング敷設箇所を通過す る列車荷重として許容されうる最大値であり,1つの車 輪にかかる最大輪重の1.3倍を根拠としている.



図-13 可動レール載荷試験の様子



図-14 可動レール載荷試験の載荷点



図-15 ひずみゲージ貼付け状況

載荷試験結果を図-16~図-19に示す.各グラフ縦軸は 主応力の値であり、引張応力が正、圧縮応力が負である. ゲージ①、②で測定された最大主応力及び最小主応力の 値から、①(側に②)側よりも大きな引張応力がかかってい たことが分かった.①(側は載荷点の反対側であるから, この結果より、載荷時に可動レール股部の非載荷側に生 じる最大主応力が大きくなる傾向が確認された.

本試験では、間隔材によって補強された可動レールの 方が、補強されていない可動レールよりも発生応力が小 さくなる傾向が確認された.特に、可動レール端部寄り のP2~P4載荷点においては、間隔材による顕著な応力低 減効果が確認された.可動レールへの補強の有無にかか わらず、P2載荷点において発生応力が最大となった.こ れは、股部近傍のP1載荷点や端部寄りのP3、P4載荷点と 比べ、P2載荷点に荷重がかかった時の方が可動レールの 曲げを生じやすいためであると考えられる.

本試験結果によって間隔材挿入の効果が確認された一 方で,試験過程及び間隔材の製作において以下2点の新 たな課題が生じた.

・課題1:可動レールに間隔材を挿入する際,図-20のように可動レール股部を押し広げるため,初期 応力が発生することが分かった.

図-17 載荷試験結果 (P2載荷時)

図-19 載荷試験結果 (P4載荷時)

図-20 間隔材挿入状況

・課題2:可動レールとその下の床板の間に隙間がある場合,荷重を受けた際に可動レールにたわみが生じ,可動レール股部により大きな応力が集中することが判明した.

これらの課題を検証すべく、それぞれ以下のような追 加試験を実施した.

- ・課題1に対して:応力を測定しながらの間隔材組付け 試験を実施した.
- ・課題2に対して:可動レールと床板の間の隙間条件を 変化させた載荷試験を実施した.

可動レールへの間隔材挿入時の初期応力について検証 するため、応力を測定しながら可動レール股部に間隔材 を組付ける間隔材組付け試験を行った.本試験は、間隔 材組付け時に発生する可動レール股部の応力を管理しな がら間隔材を組付ける方法の確立と、その実現性につい て確認することを目的とした.

試験概要を図-21に示す.この間隔材組付け試験では, 間隔材をサンプル1~4の4つ製作し,可動レール股部に 発生する応力をひずみゲージによって測定しながら組付 けした.どの間隔材サンプルも設計寸法より大きい形状 で製作された.間隔材の股部側端面の設計幅が59mmで あるのに対し,サンプル1の幅が61mm,サンプル2の幅 が62mm,サンプル3及び4の幅が63mmであった.それぞ れ可動レールへの挿入及び間隔材削正を繰り返しながら, 自然な組付けとなるようにした.自然な組付けとは,可 動レールを定置した状態で,間隔材を手動で可動レール 股部方向へ押し込んでいき,動かなくなる位置まで挿入 することであり,勢いをつけて挿入することや工具等を 使用し強制的に股部方向~挿入することは含めない.

間隔材組付け試験結果を表-1に示す.4つのサンプルにおける組付けで測定された最大初期応力は18.0MPaであった.各サンプルで測定された初期応力にはばらつきがあったものの,初期応力をモニタリングしながら組付けすることで,例えば目安値として初期応力の上限を20.0MPaと設定しても,必ず上限を下回るよう組付け可能であることを確認した.

サンプル	初期応力(MPa)
1	8.9
2	13.9
3	18.0
4	17.1

6. 可動レールと床板の隙間についての検証

(1) 隙間の影響評価

可動レールと床板の間の隙間が可動レール股部発生応 カに与える影響について分析するため、改めて可動レー ル試験体への載荷試験を行った.本載荷試験では、模擬 路盤の上に可動レール試験体を設置し、可動レール股部 付近のレール・床板間にあらかじめ隙間を設けることと した.隙間による影響を評価するため、可動レール試験 体に対する裏波ビード除去及び間隔材の挿入は行ってい ない.したがって、本試験における可動レール試験体と、 間隔材の補強効果を確認するために行った既述の載荷試 験における試験体の違いは間隔材の有無のみである.

本試験の概要を図-22に示す.本試験の載荷点は,間 隔材挿入の効果を検証した際の載荷試験において股部発 生応力が最大となった点(図-14のP2載荷点)とした. 本試験では,間隔材で補強されていない試験体に対して, 図-22のA~C点において可動レールと床板の間の隙間量 を載荷前に0-9mmまで変化させながら設計荷重104kNを 載荷した.可動レール股部に発生する応力はひずみゲー ジによって測定した.ひずみゲージの貼付け状況は図-15と同様である.

図-22のB点において、可動レール及び床板の変位量、 すなわち沈み込み量を変位計によって測定した.これは、 載荷荷重の増加に伴って可動レールと床板の間の隙間が 変化する様子を確認し、載荷荷重あるいは発生応力と隙 間量の相関関係を得ることを目的としている.変位計の 不動点は、試験体上方に設置されたH形綱とした.

試験の結果,A点及びB点単独で隙間が生じると,股 部の発生応力が増加することが確認された.隙間量が増 加すると発生応力も大きくなるが,一定の隙間量となっ た後は,A点及びB点の隙間量をさらに増加させても, 発生応力に大きな変化は確認されなかった.

連続隙間条件下での試験結果を図-23及び図-24に示す. 各グラフ縦軸は引張応力を正とした最大主応力の値である.また,各グラフ横軸の「隙間条件」は,図-22におけるA~C点それぞれの隙間量を表している.例えば,隙間条件「A2B2C0」はA点の隙間を2mm,B点の隙間を2mm,C点の隙間を0mmに設定した条件であることを意

味する.隣り合った床板に連続して隙間が生じると、単 独での隙間条件時よりも大きな応力が股部に発生するこ とが確認された.発生応力が最大となったのは3連続で 隙間を設けた条件「A3B3C2」であった.一方で、隙間 のない条件「A0B0C0」時には発生応力が最小となった.

単独隙間条件下では、一か所での可動レール沈み込み 量に上限があり、可動レールが床板に接触した後は床板 の支持効果が発揮されたと考えられる.連続隙間条件下 では、隙間の増加に伴って発生応力も増加し続けたこと から、可動レールのたわみ余地が大きく、可動レールと 床板が十分に接触しなかったと推察された.

また,隙間のない条件下では,可動レールと床板が接触した状態で一体挙動し,可動レール底面を引っ張りとする曲げ応力がほとんど発生しなかったと考えられる.

図-25に条件「A3B3C2」時のB点における可動レール 変位量と床板変位量を示す.載荷荷重65kN付近におい て各変位量の差分である相対変位の変化量が0となった. これは,載荷荷重65kN付近で可動レールと床板の隙間 がなくなり,床板の支持効果が発揮されたためであると 考えられる.

以上より,可動レール股部への応力集中を緩和するためには可動レールと床板を接触させる必要があり,特に隙間を連続させないことが重要であると考えられる.

(2) 間隔材によって補強された場合の隙間影響評価

間隔材で補強された試験体に対しても同様に隙間条件 を変更しながら載荷試験を行った.この試験は、連続隙 間条件下において間隔材による補強がどの程度効果的で あるかを検証することを目的とした.本試験で使用した 可動レール試験体は、裏波ビード除去を行っていない.

図-26に間隔材で補強された可動レールにおける試験 結果を示す.グラフ縦軸は引張応力を正とした最大主応 力の値である.全ての隙間条件において,間隔材で補強 された可動レールの方が間隔材のない可動レールよりも 発生応力が小さかった.よって,可動レールと床板の間 に隙間がある条件下でも,間隔材挿入による股部発生応 力の低減効果が確認された.補強された可動レールにお ける最大発生応力は「A3B3C2」時の78.9MPaであり,こ れは補強されていない可動レールで「A0B0C0」時に測 定された最小発生応力94.8MPaよりも小さい値であった.

図-25 B点における変位量

図-26 間隔材で補強された場合の載荷試験結果

7. 補強手法の評価

各試験結果を踏まえ,裏波ビード除去及び可動レール 股部への間隔材挿入という2種類の補強手法について定 量的に評価した.著者らが行った各試験結果から,以下 の各点が明らかになった.

- ・図-8の疲労試験結果から、裏波ビード除去によって、 200万回の繰り返し載荷時に可動レール股部における 発生応力180MPaまでの疲労強度が得られた.
- ・図-26の隙間影響についての載荷試験結果から,間隔 材挿入によって,最も厳しい隙間条件下であっても最 大発生応力が78.9MPaまで低減された.
- ・表-1の間隔材組付け試験結果から,間隔材組付け時に 発生する初期応力は最大18.0MPaであった.

ここで、例えば安全率を2として、疲労強度180MPaから股部発生応力78.9MPaに2を乗じた値を引くと22.2MPaとなる.加えて、間隔材組付け試験結果から、間隔材挿入時の初期応力をモニタリングしながら製作することにより、初期応力を20.0MPa以下に抑えての間隔材挿入が可能であることが判明している.よって、本研究により十分な耐力を有する対象クロッシングを実現する補強手法が確立された.

ただし、敷設された関節式レール鋼製ノーズ可動クロ ッシングにおいて、本研究における試験条件を超えるよ うな隙間を発生させぬよう保守管理する必要がある.特 に、連続隙間が生じないように注視することが重要であ る.

今後は、本研究における2種類の補強手法を導入した 対象クロッシングを敷設し、追跡調査を実施する.

8. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである.

- ・本研究において対象としたレール鋼製ノーズ可動クロ ッシングの補強手法として、裏波ビード除去及び可動 レール股部への間隔材挿入を考案した。
- ・構造解析や疲労試験及び載荷試験から各補強手法を検 証した結果,考案された補強手法を組み合わせること により,可動レール補強効果が十分に得られることが 確認された.
- ・可動レールと床板の間に連続隙間を発生させぬように
 するという保守管理上の留意点を提案した.

参考文献

- 佐藤泰生:分岐器の構造と保守-増補改訂版-, pp.128-136,日本鉄道施設協会,2018.
- 2) 及川祐也, 寺下善弘, 伊藤太初, 松井元英, 兼松義一, 原 田茂幸:新幹線用レール鋼製ノーズ可動クロッシン グの開発, 鉄道総研報告, Vol.29, No.8, pp.5-10, 2015.
- 3) 庄野真也,花田寿隆:在来線用ノーズ可動クロッシングの開発について,鉄道技術連合シンポジウム講 演論文集, Vol.18, 2011.
- 4) 住吉賢治,楠田将之,山口義信:レール鋼製ノーズ 可動クロッシングの開発,第15回鉄道技術・政策連 合シンポジウム,2008.
- 5) 松尾東,渡邉真一,劒持尚樹,西田達矢:レール鋼 製ノーズ可動クロッシングの構造解析,土木学会第 73回年次学術講演会,VI-928, 2018.9.
- 6) 新井逸郎,渡邉真一,髙橋浩市朗,西田達矢,西田 博貴:レール鋼製ノーズ可動クロッシングにおける 補強手法の検討,第26回鉄道技術連合シンポジウム 講演論文集,pp.364-367,2019.

(2020.4.3 受付)

EVALUATION OF THE REINFORCEMENT OF MOVABLE NOSE CROSSING MADE OF RAIL STEEL

Itsuro ARAI, Sinichi WATANABE, Tatsuya NISHIDA and Hiroki NISHIDA

When trains are passing on a turnout with a movable nose crossing made of rail steel, the nose rail receives the train load convergently. In worst case, that train load would be a cause of the nose rail failure. In this paper, authors propose reinforcement methods for the movable nose rail.

A penetration bead was removed to distribute train load, and a reinforcing material was installed on the nose rail to prevent the failure. Then, to verify these reinforcement methods, FEM analysis and loading tests were conducted. Furthermore, authors evaluated additional matters of concern that an initial stress by the installation of the reinforcing material, and the stress on the movable nose rail caused by a gap between movable rail and base plate.