

新幹線用レール鋼製ノーズ可動クロッシングの開発

及川 祐也* 寺下 善弘** 伊藤 太初**
松井 元英*** 兼松 義一*** 原田 茂幸#

Development of a Movable Nose Crossing for the Shinkansen Made of Rail Steel

Yuya OIKAWA Yoshihiro TERASHITA Hajime ITO
Motohide MATSUI Yoshikazu KANEMATSU Shigeyuki HARADA

Since there is no gap of the gauge line in the moveable nose crossing, the vehicle can pass through the main line without speed reduction. Therefore, it is essential track structure thanks to which the Shinkansen is running at a high speed. Currently, the moveable nose crossing made of high manganese steel is used for turnouts for the Shinkansen. However, because it is made of cast iron, it is difficult to completely remove the shrinkage cavity. Cracks propagate from the shrinkage cavity, which can lead to damage. However, high manganese steel is difficult to inspect by ultrasonic nondestructive testing, it is not possible to grasp the crack propagation inside the moveable nose crossing. Furthermore, since there is a difference in material between the movable nose crossing and the rails adjacent to it, it is difficult to weld the moveable nose crossing to the front and rear rails. Therefore, we have developed a movable nose crossing made of rail steel which can be welded to the front and rear rails, and can be inspected by ultrasonic testing.

キーワード：ノーズ可動クロッシング，新幹線，レール鋼，熱処理，超音波探傷検査

1. はじめに

ノーズ可動クロッシングは、分岐器内におけるレール交差部の軌間欠線部をなくし、車両が速度を低下することなく基準線（直線）側を通過することができる機能を有している。そのため、新幹線が分岐器の基準線（直線）側を一般区間と同じように高速で走行するためには不可欠な軌道構造である。現在、新幹線が高速で走行する分岐器には、高マンガン鋼製のノーズ可動クロッシングが使用されている。高マンガン鋼は、粘り強く割れにくく、傷が発生しても進展が遅い。また、加工硬化の特性を有するため、車両の通過により荷重を受けると表面の硬さが増し、耐摩耗性が向上するといった特徴がある。ただし、鋳鋼製であることから、製造時に発生する鑄巣と呼ばれる内部の微細な空隙を完全になくすことが難しく、また、超音波による内部の探傷検査が困難なことから、内部傷の進展を把握することができない。さらに、材質が異なるため前後に接続するレールとの溶接が難しい。そこで、国内の現有設備および技術を活用し、超音波探傷検査が可能で、前後に接続するレールとの溶接が容易

となるレール鋼を用いた新幹線用ノーズ可動クロッシングを開発することとした。

2. 構造および熱処理方法の検討

2.1 設計概要

高マンガン鋼製ノーズ可動クロッシングは、図1に示すように主に可動レール、ウィングレールおよびクロッシング構の3要素で構成されている。可動レールは基準線側に断面を小さくした弾性部を設け、転換時にたわむ構造となっている。また、分岐線側の後端は、転換に伴い摺動する燕尾端と呼ばれる構造になっている。前後のレールとの接続については、ウィングレールの基準線側は斜め継目、可動レールの基準線側は伸縮継目、ウィングレールの分岐線側およびクロッシング構は普通継目となっている。なお、一部には前後のレールを接着絶縁継目で接続しているものもある。

開発したレール鋼製ノーズ可動クロッシングは、在来線において敷設実績がある構造を基本として、主に可動レール、ウィングレールおよび大床板の3要素で構成され、大床板の上に可動レールとウィングレールを配置して、座金等で組み付ける構造とした。図2にレール鋼製ノーズ可動クロッシングの構成を示す。可動レールは、基準線側と分岐線側の両方に弾性部を設け、また、クロッシング構と一体化することにより構造の簡素化を図つ

* 軌道技術研究部 軌道構造研究室
** 軌道技術研究部 レール溶接研究室
*** 材料技術研究部 摩擦材料研究室
軌道技術研究部 軌道構造研究室
(現 株式会社峰製作所)

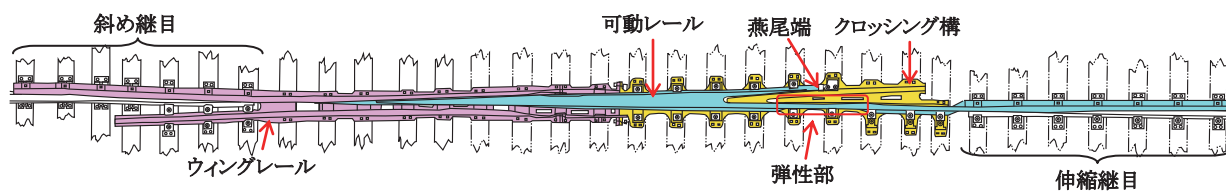


図1 高マンガン鋼製ノーズ可動クロッシングの構成

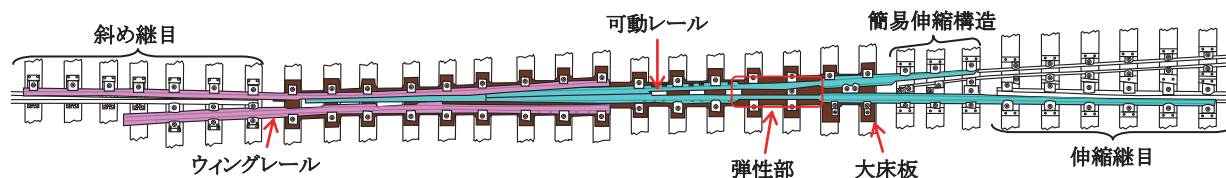


図2 レール鋼製ノーズ可動クロッシングの構成

た。前後のレールとの接続部は、基準線側およびウイングレールの分岐線側は高マンガン鋼製ノーズ可動クロッシングと同様に斜め継目、伸縮継目および普通継目としているが、溶接継目に変更することも可能である。可動レールの分岐線側については、燕尾端に変えて簡易伸縮構造とした。なお、今回の開発対象は、新幹線用18番片開き分岐器に使用するノーズ可動クロッシングとした。

2.2 主な構成要素

2.2.1 可動レール

図3に示す可動レールは、ポイント部のトングレールなどに用いられる80Sレールをアーク溶接で接合した二又レールと、特殊断面形状の100kgクレーンレールをガス圧接にて接合している。

転換時における可動レールの動作をスムーズにすることと発生応力を小さくするため、基準線側と分岐線側の両方に弾性部を設けた。また、後端部の構造について、基準線側は新幹線用伸縮継目と同様な構造とした。ここ

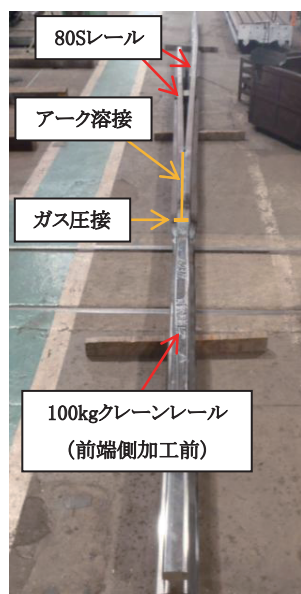


図3 可動レール



図4 大床板

で、後続のレールについて、高マンガン鋼製はトングレールになっているのに対し、レール鋼製では受けレールにしている。これは、後続のレールの伸縮に伴う軌間の変化をなくすことを目的としている。分岐線側は後述の転換性能を確認するための解析および試験の結果から、転換時に発生する可動レールのレール長手方向への移動を吸収するために簡易伸縮構造とした。なお、レール鋼を用いていることから基準線側は溶接継目に変更することも可能である。さらに、可動レールの底部には、転換装置との接続のため、ロッド取付け金具を溶接している。

2.2.2 ウイングレール

ウイングレールは、可動レールにも使用している80Sレールを加工して製作している。前端側の構造について、基準線側は高マンガン鋼製と同様に斜め継目になっているが、溶接継目に変更することも可能である。また、分岐線側は60kgレール形状に鍛造している。

2.2.3 大床板

図4に示す大床板は、1枚の鋼板から切削加工して製作している。万一、可動レールが折損した場合は、重大な事故につながる恐れがあることから、列車通過時において可動レールに発生する応力を極力軽減するために、可動レールのほぼ全体を1枚の床板で支えている。また、溶接箇所をなくせるため、溶接に伴うひずみや残留応力は発生しない。なお、可動レールを支持する箇所形状は、3.2節で述べる離散支持と全体支持のタイプとした。

2.3 ロッド取付け部

転換装置と接続するため、可動レールにロッド取付け金具を設置する必要がある。このロッド取付け金具は、鋳造品である高マンガン鋼製の場合、一体で成形しているが、レール鋼製の場合、溶接する必要がある。敷設実績のある在来線のものでは、図5(a)に示すように、可動レール底部への溶接に伴う熱影響を極力小さくするため、レール底面に厚さ25mm程度のバターリング溶接を施した後、アーク溶接にてロッド取付け金具を接合し

ている。しかし、厚さ 25mm のバタリング溶接には多大な労力を必要とすることから、バタリング溶接を必要としない接合方法として、図 5 (b) に示すように、T 形のロッド取付け金具をレール底面に直接アーク溶接で接合し、レール底面を溶接後に切削加工する方法を提案した。また、ロッド取付け金具の溶接の始末端部については、溶接欠陥を生じる懸念があることから、切削加工で仕上げることによって除去している。

これらの溶接方法で製作したロッド取付け部について、転換時の作用力を想定した繰り返し载荷試験を実施した。その結果、いずれの場合も 200 万回の载荷に対して未破断であり、また、浸透探傷検査においてもき裂の発生は認められなかった。したがって、溶接施工性などを勘案し、新たに提案した T 形のロッド取付け金具をレール底面に直接溶接する方法を採用することとした。

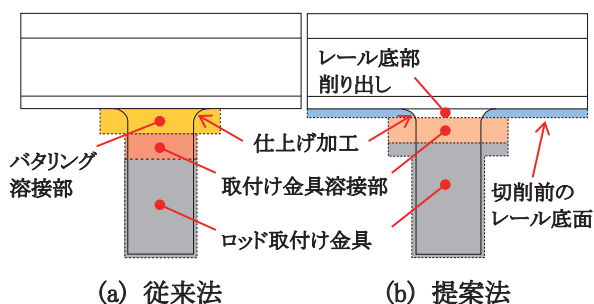


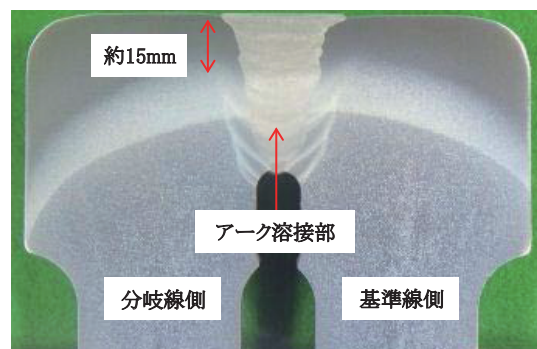
図5 ロッド取付け金具の溶接方法

2.4 熱処理方法

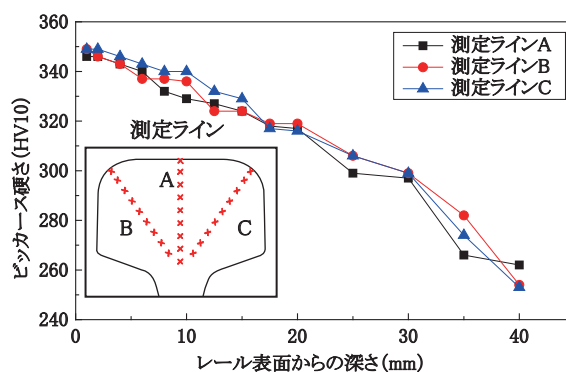
レール鋼で製造した可動レールの耐摩耗性を向上させるためには、レール頭部に熱処理を施す必要がある。その際、基準線側と分岐線側の二又に分かれる可動レールの熱処理を複数回に分けて行くと、車輪と接触するレール頭部に熱の影響を受けた領域と受けない領域の境界部（以下「焼き境」という）が形成される。当該箇所は周辺部よりも硬さが低くなるため、局所的な摩耗の原因となる場合がある。また、2本の 80S レールをアーク溶接で接合した箇所は断面が大きく、硬化深さが得られにくいことから、断面形状に応じた熱処理条件を選定する必要がある。

可動レール頭頂面の目標硬さは熱処理レールの HH340 と同等のピッカース硬さ 360 ± 10HV 程度とした。また、硬化深さは JIS E 1303 「鉄道用分岐器類」で規定される断面硬化層の形状に準拠し、レール頭頂面から深さ 15mm 以上とした。これらの条件を満足し、焼き境を形成しないような熱処理方法を提案し、熱処理品質を確認した。図 6 に可動レールの中で一番大きな断面を有する位置でのマクロ金属組織と硬さ分布を示す。硬化深さが得られにくい大断面箇所においてもレール頭頂面から深さ 15mm 以上の硬化層を有していることと、レール頭頂面の硬さが概ね目標を達成していることを確認し

た。また、その他の断面においても、硬化深さおよびレール頭頂面硬さは同様の傾向であることを確認した。



(a) マクロ金属組織



(b) 硬さの測定位置と測定結果

図6 可動レールの熱処理品質

3. 性能評価

3.1 転換性能

3.1.1 可動レール単体での検討

可動レールを転換したときの応力および変位を把握するため、可動レール単体を対象として、転換時の動作を模擬した解析および転換試験を実施した。解析に用いた有限要素モデルを図 7 に示す。転換条件は、可動レールの後端を基準線側および分岐線側ともに締結して固定した場合（以下「条件①」という）と、基準線側のみ締結して固定した場合（以下「条件②」という）とした。

解析と転換試験の結果を表 1 に示す。条件①について、解析では分岐線側の弾性部に著大な応力が発生し、レール

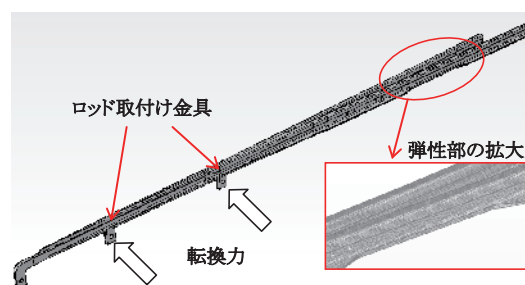


図7 可動レールの有限要素解析モデル

特集：軌道技術

ル弾性部の許容応力度の目安値である 137N/mm^2 ¹⁾ を大幅に超過した。転換試験では分岐線側の後端を締結したが、可動レールの分岐線側後端部におけるレール長手方向の変位（以下「分岐線ふく進」という）が分岐線側開通（以下「反位」という）時には 2.0mm となっており、実際には完全に固定することができなかった。また、可動レールを元の位置まで転換し、反位から基準線側開通（以下「定位」という）状態に戻したが、分岐線ふく進は 0mm に戻らず、弾性部応力についても初期値に戻らなかった。条件②では、解析と転換試験ではほぼ同等の値となり、弾性部応力については、基準線側と分岐線側で均等に発生していることと許容応力度の目安値を大きく下回ることを確認した。また、可動レールを定位に戻したところ、弾性部応力および分岐線ふく進は初期値に戻ることを確認した。

以上の結果から、条件①のように可動レールの後端を基準線側および分岐線側ともに締結して完全に固定することは困難で、仮に固定できたとしても可動レールに発生する応力が著大になることがわかった。したがって、条件②のような状況で転換するために、可動レールの分岐線側の後端に分岐線ふく進を吸収する簡易伸縮構造を設けることとした。

表1 可動レールの転換に関する解析と試験結果

条件		弾性部応力 (N/mm^2)		分岐線 ふく進 (mm)
		基準線	分岐線	
① (基・分固定)	解析	0.2	235.2	0
	試験	76.5	84.6	2.0
② (基のみ固定)	解析	71.5	71.8	2.7
	試験	81.8	73.3	2.5

3.1.2 簡易伸縮構造

簡易伸縮構造には転換により発生する分岐線ふく進を吸収する機能が必要である。そこで、伸縮継目の構造を参考にトングレールと受けレールから構成されるものとして設計した。解析および試験の結果から、必要な行程量は 3mm 程度であるが、製作精度等の観点から行程量

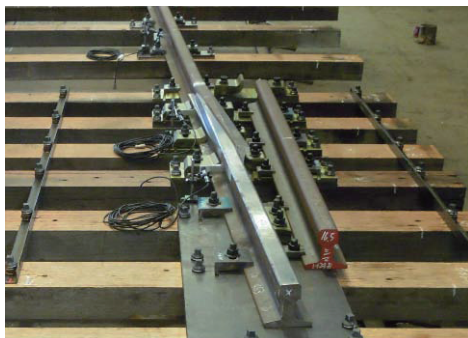


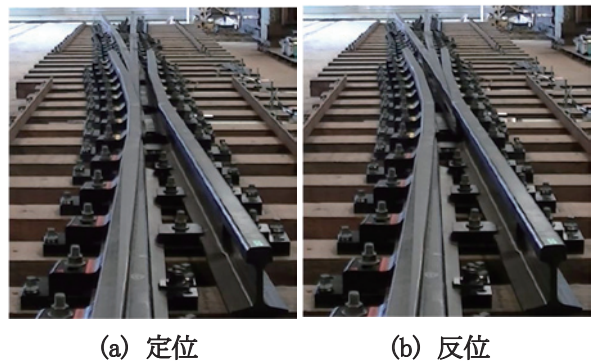
図8 試作した簡易伸縮構造

を 17mm とした。図8に簡易伸縮構造の試作品を示す。この試作品を用いて分岐線ふく進が発生した時の挙動を確認した結果、問題なく機能することを確認した。なお、高マンガン鋼製には、この簡易伸縮構造と同様の機能を有する構造として燕尾端があるが、燕尾端は特殊な構造をしているため隙間等の調整が難しいのに対して、簡易伸縮構造は伸縮継目の構造と同等であることから、容易に調整が可能である。

3.1.3 組立状態における転換試験

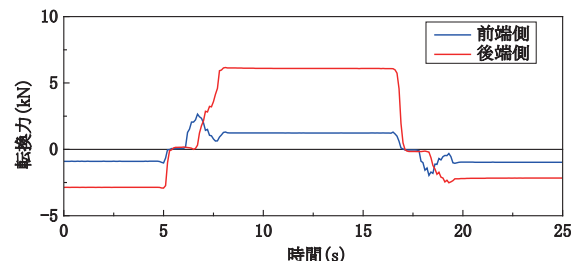
レール鋼製ノーズ可動クロスング全体を試作し、転換試験を実施した。試験では、可動レールを図9(a)に示す定位の状態から図9(b)に示す反位の状態まで転換し、再度転換して定位の状態に戻し、その際の転換力、可動レールの弾性部応力および分岐線ふく進の測定を行った。なお、転換には電気転つ機を用いた。

試験結果を図10に示す。転換力の最大値については先端側が 2.8kN 、後端側が 6.3kN であることから、公称最大転換力が 10kN であるTS形転つ機で問題なく転換できることを確認した。弾性部応力と分岐線ふく進については、可動レール単体の転換試験と同等であり、基

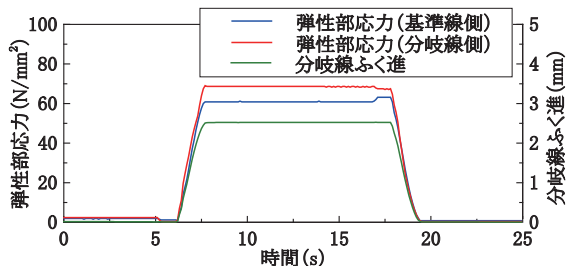


(a) 定位 (b) 反位

図9 組立状態における転換試験状況



(a) 転換力



(b) 弾性部応力と分岐線ふく進

図10 組立状態における転換試験結果

準線側の弾性部応力が 63.2N/mm^2 、分岐線側の弾性部応力が 69.1N/mm^2 、分岐線ふく進が 2.5mm であった。また、可動レールとウィングレールの隙間については、新幹線の分岐器機能検査において不良と判断される先端部 0.5mm 以上、先端部以外の箇所 1.0mm 以上とならないように調整できることを確認した。

3.2 施工性の検証

レール鋼製ノーズ可動クロッシングの施工性を検証するため、試作品を鉄道総研の日野土木実験所に試験敷設した。敷設の手順は以下のとおりである。

- (1) 製作工場において仮組立を行い、印付けをした後、解体して搬送する。
- (2) 敷設箇所の軌きょうを撤去する。
- (3) 隣接する軌道の上にくらぎを並べ、大床板をまくらぎに固定する。
- (4) 基準線側のウィングレールを取付ける。
- (5) 可動レールを取付ける。
- (6) 分岐線側のウィングレールを取付ける。
- (7) 軌きょうを撤去していた敷設箇所に据え付ける。
- (8) パラストを挿入し、軌道整備を実施する。

試験敷設が完了した状態を図 11 に示す。新幹線の分岐器における仕上がり基準²⁾内に敷設することができ、問題なく施工できることを確認した。



図 11 試験敷設状況

3.3 発生応力および変位

列車通過時におけるレール鋼製ノーズ可動クロッシングに発生する応力および変位を確認するため、有限要素解析、鉛直荷重試験および走行試験を実施した。また、大床板上の可動レールを支持する上板の形状について、在来線用のレール鋼製ノーズ可動クロッシングや高マンガン鋼製ノーズ可動クロッシングの構造を参考とした分散支持と、可動レールの発生応力を軽減するため、支持面積を極力大きくした全体支持のタイプを提案し、比較することとした。分散支持と全体支持の上板の形状を図 12 に示す。

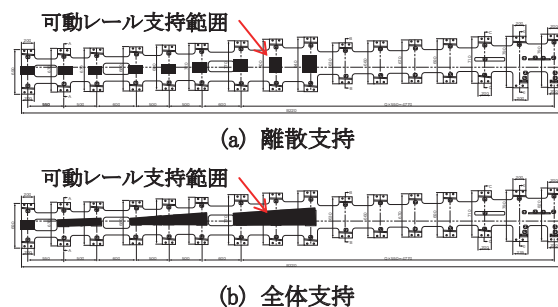


図 12 大床板上の上板の形状

3.3.1 有限要素解析

分散支持および全体支持における輪重荷重時の可動レールに発生する応力および変位を把握するため、有限要素法による静的解析を実施した。モデル化の範囲は、可動レール、ウィングレール、大床板および座金とし、4 面体要素でメッシュを作成した。なお、ヤング率は $2.1 \times 10^5\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比は 0.3 とし、境界条件として各部材間には接触、大床板の底部にはばね要素を定義している。また、可動レールは定位の状態としている。輪重は静的輪重を 85kN 、変動輪重係数を 1.3 とした場合の設計作用である 110.5kN とし、荷重位置は分散支持と全体支持で荷重点直下における可動レールの支持条件が異なる断面の 2 箇所とした。解析モデルを図 13 に示す。

解析結果を図 14 に示す。可動レールに発生する最大主応力については、分散支持と全体支持のどちらも分岐器内で使用するレールに対する許容応力度の目安値である 196N/mm^2 ¹⁾ を大きく下回っており、さらに、全体支持の方が荷重位置 A では約 30% 、荷重位置 B では約 15% 小さくなった。可動レールの上下変位については、全体支持の方が荷重位置 A、B とともに約 10% 小さくなった。

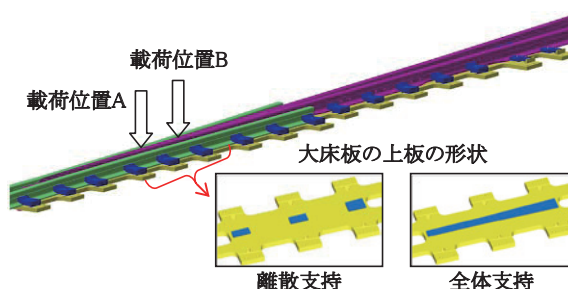


図 13 解析モデル

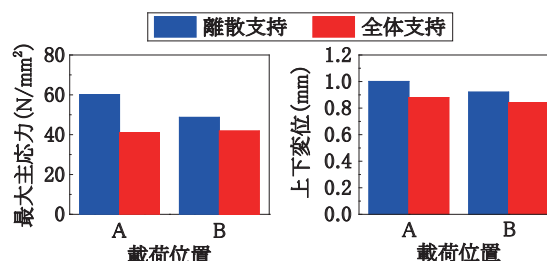


図 14 可動レールの応力・変位の解析結果

特集：軌道技術

3.3.2 鉛直载荷試験および走行試験

試験敷設したレール鋼製ノーズ可動クロッシングに対して、移動式軌道動的载荷試験装置を用いた鉛直载荷試験とモーターカーを用いた走行試験を実施した。なお、試験敷設品には転換装置を設置していないため、可動レールを定位の状態に固定して鉛直载荷試験および走行試験を実施した。鉛直载荷試験の状況を図15に示す。

鉛直载荷試験の結果のうち、ロッド取付け金具の直上に100kNの鉛直荷重を与えたときの大床板の底面の最大主応力と変位を表2に示す。



図15 鉛直载荷試験の状況

表2 ロッド取付け金具直上载荷時の大床板の底面の最大主応力と変位

载荷位置	最大主応力 (N/mm ²)		上下変位 (mm)	
	離散支持	全体支持	離散支持	全体支持
前端側	31.7	36.8	0.12	0.24
後端側	15.4	14.2	0.21	0.17

大床板の上板の形状が離散支持と全体支持のどちらであっても、強度および走行安全性に問題となるような大きな応力や変位が発生しないことを確認した。前述の解析結果と併せて考慮すると、大床板の上板の形状については、可動レールの応力および変位を軽減することができ、さらに、製作工程において切削作業を大幅に省略することができる全体支持のタイプを採用することとした。

走行試験では、輪重約40kNのモーターカーを最高速度約30km/hで走行させた。その結果、各部に発生する応力および変位が鉛直载荷試験において40kNを载荷したときの結果と概ね一致したことから、著大な輪重や横圧が発生しておらず、可動レールとウィングレールの車輪乗り移り部、前端側の斜め継目および後端側の伸縮継目を問題なく通過していることを確認できた。

3.4 超音波探傷検査

試作したレール鋼製ノーズ可動クロッシングについて、手押し式の超音波レール探傷器（PRD-300：東京計器レールテクノ株式会社製）を用いて探傷試験を実施した。その結果、図16に示すように、可動レールとウィングレールの車輪乗り移り部では、超音波の送受信が途切れて底面エコーが得られない1m程度の探傷不能領域

が存在するものの、その他の区間では一般区間と同様に超音波による探傷検査が可能であることを確認した。なお、ガス圧接部、アーク溶接部およびロッド取付け金具の影響により、傷がなくても疑似エコーおよび形状エコーが得られることを認識しておく必要がある。

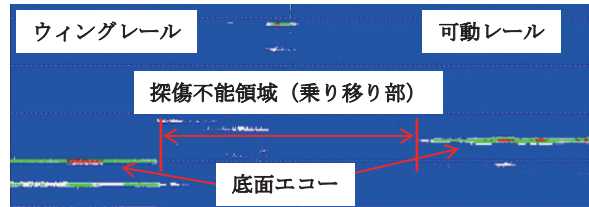


図16 探傷試験結果の一例（垂直探傷）

4. おわりに

超音波探傷検査が可能で、前後に接続するレールとの溶接が容易となる新幹線用レール鋼製ノーズ可動クロッシングを提案し、各種性能確認を実施した。それらをまとめると以下のとおりである。

- (1) 国内の現有設備および技術を活用し、可動レール、ウィングレールおよび大床板から構成される新幹線用レール鋼製ノーズ可動クロッシングを提案した。
- (2) 可動レールの底面に直接ロッド取付け金具を溶接する新たな方法を提案し、強度を確認するとともに、レール頭部に焼き境が形成されない熱処理方法を提案し、HH340レールと同等の頭頂面硬さが得られることを確認した。
- (3) 転換試験により、TS形転てつ機で問題なく転換できること、および弾性部応力が許容応力度の目安値を大きく下回ることを確認した。
- (4) 試験敷設により、新幹線の仕上がり基準内に施工することができ、施工性に問題がないことを確認した。
- (5) 鉛直载荷試験および走行試験により、強度および走行安全性に問題となるような大きな応力や変位が発生しないこと、および車輪乗り移り部等を問題なく通過できることを確認した。
- (6) 車輪乗り移り部を除いて一般区間と同様に超音波探傷検査が実施できることを確認した。

なお、実用化にあたっては、新幹線車両が通過する軌道への試験敷設等を実施する必要があると考える。

文献

- 1) 佐藤泰生:分岐器の構造と保守, 日本鉄道施設協会, p.375, 1987
- 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 軌道構造, 丸善, p.198, 2012