

論文 新幹線用レール鋼製ノーズ可動クロッシングの き裂進展

水谷 淳¹・細田 充²・及川 祐也³・山本 隆一⁴

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 レールメンテナンス (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:mizutani.jun.49@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 レールメンテナンス (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:hosoda.mitsuru.75@rtri.or.jp

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 軌道構造 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:oikawa.yuya.41@rtri.or.jp

⁴正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 レールメンテナンス (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail:yamamoto.ryuichi.22@rtri.or.jp

分岐器検査の効率化や交換周期延伸によるコスト低減を目標に開発したレール鋼製新幹線用ノーズ可動クロッシングはレール鋼製であるため超音波探傷が可能であるが、可動レールに傷が発生した場合のき裂進展特性は明らかになっていない。そこで、可動レールのき裂進展試験および解析を実施した。試験は、底部端部に人工傷を放電加工した2種類の一様断面の供試体を用いて実施し、可動レール底部に発生するき裂の進展速度を把握した。さらに、試験で用いた一様断面の供試体をモデル化したき裂なしメッシュに対して解析を実施したところ、2種類の一様断面モデルのき裂進展量の解析結果が試験結果と良く一致した。また、実形状モデルを対象とした解析を実施し、深さ10mmのき裂がき裂進展試験にて破断に至った20mm程度まで進展するのに要する通過トン数を算出した。

Key Words : movable nose crossing, shinkansen, rail steel, crack growth

1. はじめに

新幹線が高速で走行する分岐器には、粘り強く割れにくく、傷が発生してもき裂進展速度が遅いという特徴¹⁾を持つ高マンガン鋳鋼製ノーズ可動クロッシングが使用されている。しかしながら、超音波による内部の探傷検査が困難であることから、定期的な解体検査による表面傷の確認を必要としており、保守管理に多大な労力を要している。そこで、超音波探傷による検査の効率化や交換周期の延伸によるコスト低減を目標として、レール鋼を用いた新幹線用ノーズ可動クロッシング（以下、「当該クロッシング」という）を開発した²⁾。これは従来の高マンガン鋳鋼製ノーズ可動クロッシングと材質が異なるレール鋼であるため、超音波探傷が可能であるが、検査周期を検討するにあたり、レール鋼の可動レールに傷が発生した場合のき裂進展特性を把握する必要がある。

一般部のレールにおけるレール頭部の転がり接触疲労損傷に関する発生過程や進展過程の詳細については、こ

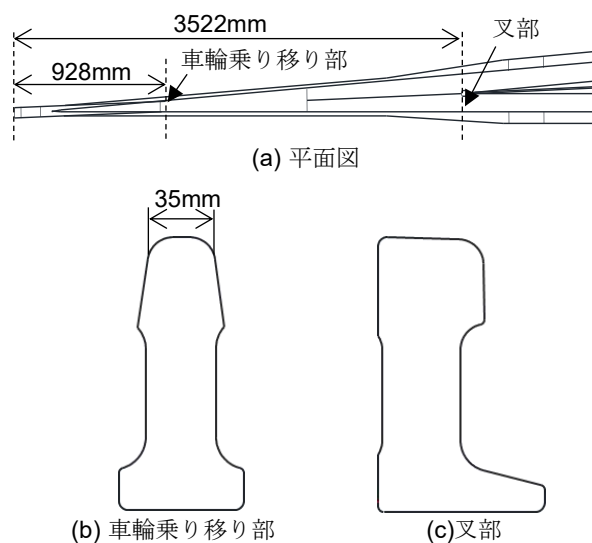


図-1 き裂進展試験および解析を実施する断面

れまでに多くの調査や研究が行われている^{3,4)}。また、クロッシングの損傷についても現状把握が行われている⁵⁾

が、き裂の進展過程に関する研究は十分に行われていない。一般的に、レール底部には引張の応力が作用することから、レール底部にき裂が発生した場合、早期に損傷に至る可能性がある。

そこで、本研究では、可動レール部における2種類の一樣断面形状の供試体によるき裂進展試験およびそれを模擬した解析を実施した。その後、可動レールの実形状モデルに対して、実際の敷設状態を模擬したき裂進展解析を実施し、き裂進展量の推定を行った。なお、評価対象は図-1に示す車輪がウィングレールから可動レールに乗り移る可動レール頭部幅35mm位置（以下、「車輪乗り移り部」という）および叉部の断面とした。これらの部位はいずれも可動レールの中で比較的発生応力が高いと想定され構造上弱点箇所となり得る。

2. 一樣断面形状の供試体によるき裂進展試験

(1) 試験条件

可動レール底部に発生するき裂の進展速度を把握するため、図-1 (b), (c)に示した2種類の一樣断面形状の供試体を作製し、き裂進展試験を実施した。本試験では図-2に示すレール曲げ疲労試験機を用いて、支点間隔1,000mmの片振り3点曲げにて载荷した。なお、供試体の長さは1,200mmとした。表-1に試験条件を示す。供試体の底部端部には、図-3に示すように、長さ7mm（一部5mm）の人工傷（1/4円状のスリット）を放電加工によって設けた。一般的に、レール底部には引張の応力が作用することから、き裂の変形様式は開口型（モードⅠ）を想定した。载荷条件は、人工傷が供試体に対して垂直方向に伸びるように、人工傷の真上から垂直に载荷した。また、载荷荷重の大きさは、予備载荷と本载荷の2種類に区別した。予備载荷は、人工傷を自然な形態のき裂に移行させることを目的に、き裂が10mmまで進展する間で実施した。载荷荷重の大きさは、人工傷導入断面のレール底面における応力振幅が140N/mm²となるよう設定した。そして、予備载荷の実施後に供試体が破断するまで本载荷を実施した。载荷荷重の大きさは、予備载荷と同箇所の応力振幅が100N/mm²となるよう設定した。これらは、矩形断面の物体の角に存在する1/4円形状のき裂に応力が作用した場合の応力拡大係数を求める理論式⁹⁾を用いて、おおよその試験時間を見積もった上で決定した。ここでは、普通レールのレール頭部を下にした状態における疲労試験において、き裂長さが25～30mmの間で脆性破壊する結果が得られていたことを参考として⁴⁾、本载荷の载荷回数が40万回程度でき裂長さが25mm程度となる応力振幅として設定した。なお、これらの応力振幅はき裂がない状態での値である。载荷周波数は4.16

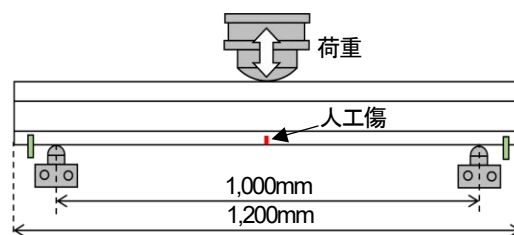
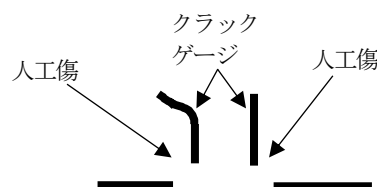


図-2 き裂進展試験の状況

表-1 試験条件

供試体		人口傷の 長さ(mm)	曲げ応力(N/mm ²)	
			予備载荷	本载荷
車輪 乗り移り部	A1	7	最小：88	最小：88
	A2	7	最大：228	最大：188
	A3	7	振幅：140	振幅：100
	A4	5	応力比：0.39	応力比：0.47
叉部	B1	7	最小：84 最大：224	最小：84 最大：184
	B2	7	振幅：140 応力比：0.38	振幅：100 応力比：0.46



(a) 乗り移り部

(b) 叉部

図-3 人工傷およびクラックゲージの位置

Hzとした。また、き裂進展量はクラックが25.2mmまで測定可能な共和電業製のクラックゲージ（KV-25B）およびアダプタ（KVA-1A）を使用して測定した。クラックゲージは供試体の人工傷の底面側と底側面側に2枚ずつ貼付した。なお、人工傷の端部とクラックゲージのグリッド線の1本目が1mm離れた位置にくるように貼付し、クラックゲージのベースが人工傷と重なっても良いこととした。また、2枚目のクラックゲージはベース寸法が1枚目と一致するように貼付した。

(2) 試験結果

図-4に試験後の破面の例を示す。人工傷を中心に四分円状に疲労破壊領域が広がり、その後、脆性破壊領域に移行している。図-5に供試体底面のクラックゲージによるき裂進展試験結果を示す。ここでは底面における人工傷を含めたき裂長さが10mmに達した時点からの载荷回数とき裂長さの関係を示した。なお、A2の载荷回数30万～65万回は計測機器の不具合によりデータの収録不良が発生したため、点線にて表記している。

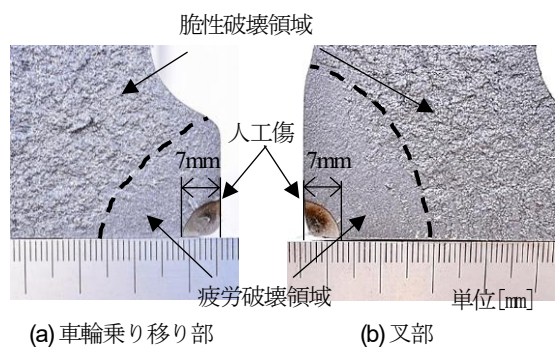


図-4 破断面

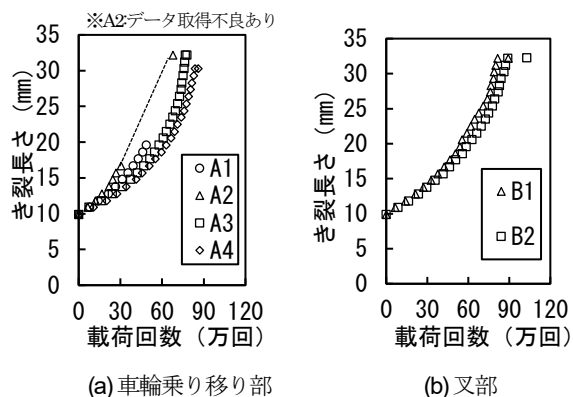


図-5 载荷回数とき裂長さの関係

A1のみ 20mm程度で破断し、その他の供試体は32mm程度で破断した。供試体が破断に至る限界き裂長さについては、応力拡大係数の状態等の更なる検討が必要である。また、き裂が進展し、き裂長さが増加するのに伴い曲線の傾きが増加しており、き裂進展速度が速くなる傾向を示した。

3. 一様断面モデルのき裂進展解析

き裂進展試験で用いた2種類の一様断面形状の供試体をモデル化したき裂なしメッシュに対して、仮想き裂進展法⁷⁾と自動メッシング機能を有したき裂進展解析システムFINAS/CRACKを用いた有限要素法による解析を実施した。ここでは図-6に示す四面体二次要素のモデルを用いた。ソルバーにはFINAS/STARを用いた。本手法は、レール頭部横裂のき裂進展速度の推定精度向上の一環として、レールを用いた基礎的なき裂進展試験や実軌道を模擬したモデルによるき裂進展シミュレーションが実施され、レールのき裂進展解析における妥当性が検証されたものである⁴⁾。

(1) 解析条件

荷重はレール頭部から鉛直方向に繰り返し作用させ、荷重の大きさは試験と同様に、き裂なしメッシュモデル

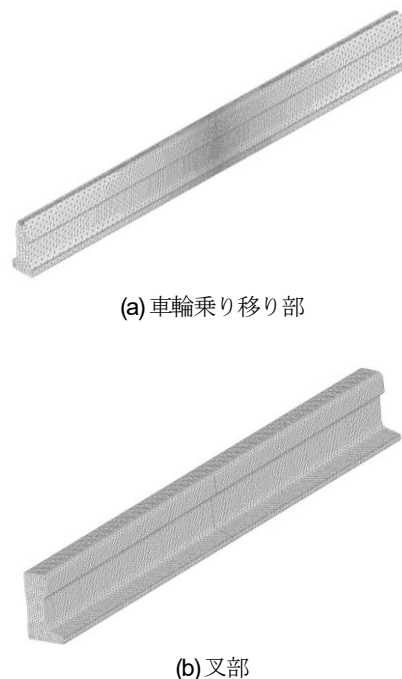


図-6 き裂進展解析モデル形状図

表-2 各部の化学成分

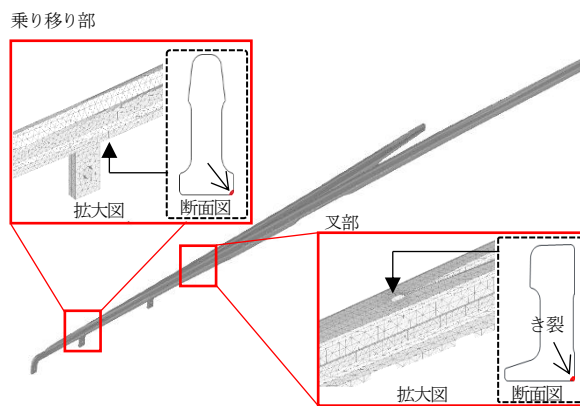
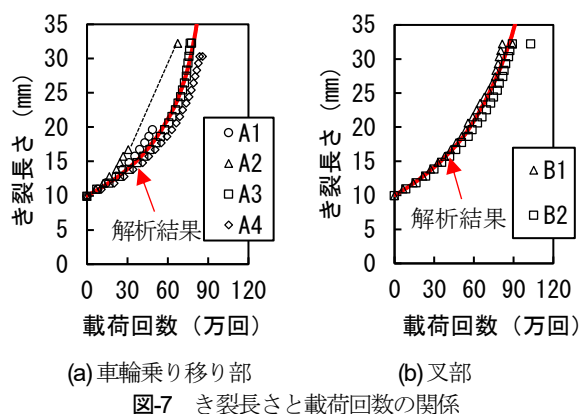
	規格	化学成分 (%)				
		C	Si	Mn	P	S
乗り移り部	NSSMC STD. CR100K MOD	0.60 ～ 0.75	0.10 ～ 0.30	0.70 ～ 1.10	0.035 (max)	0.040 (max)
叉部	JRS80S-SQ	0.63 ～ 0.75	0.15 ～ 0.30	0.70 ～ 1.10	0.030 (max)	0.025 (max)
(比較用)	普通レール JIS E1101-2001	0.63 ～ 0.75	0.15 ～ 0.30	0.70 ～ 1.10	0.030 (max)	0.025 (max)
	HH340 レール JIS E1120-2007	0.72 ～ 0.86	0.10 ～ 0.55	0.70 ～ 1.10	0.030 (max)	0.020 (max)

の初期き裂導入断面のレール底面において応力振幅が 100N/mm^2 になるように設定した。境界条件は支点間隔 $1,000\text{mm}$ のレール支持位置においてレール上下変位を拘束し、長手方向はレール支持位置の底面中心部1点を拘束した。き裂の変形様式は開口型（モード I）を想定し、き裂進展則は、応力比 R の影響を考慮できる以下の式(1)で表す Walker 則を用いた。

$$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-n}} \right)^m \quad (1)$$

ただし、 ΔK ：応力拡大係数範囲 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)、 a ：き裂進展量 (m)、 N ：荷重サイクル数、 R ：応力比（=最小応力／最大応力）。

なお、 m, n, C は材料定数である。当該クロッシングの可動レールは 100kg クレーン（CR100K MOD）および 80S レール（JRS80S-SQ）を使用し、各レール頭部を対象に熱処理（HH340 相当の硬さ）と矯正を実施して作成している。表-2 に 100kg クレーンレール、80S レール



ールおよび比較用として普通レール，熱処理レールの化学成分をまとめた．これらのレールの化学成分は若干異なっている．一方で，先行研究において，普通レールと熱処理レールでは，レール鋼種によるき裂進展特性の違いはないことが示されている⁴⁾．そのため本解析では，車輪乗り移り部および叉部は，普通レールとき裂進展特性が同じであると仮定して，材料定数は普通レールから算出した値⁴⁾を用いた ($C=3.85 \times 10^{12}$, $n=0.62$, $m=3.0$) ．

(2) 解析結果

試験およびき裂進展解析から得られた載荷回数とき裂長さの関係を図-7に示す．試験結果のばらつきはあるが，全体の特徴として試験と解析の結果は良く一致し，き裂長さの増加に伴い，き裂進展速度が速くなる傾向を把握した．そのため，本解析モデルを用いて一様断面形状の供試体によるき裂進展試験を模擬できると考えた．

4. 実形状モデルのき裂進展解析

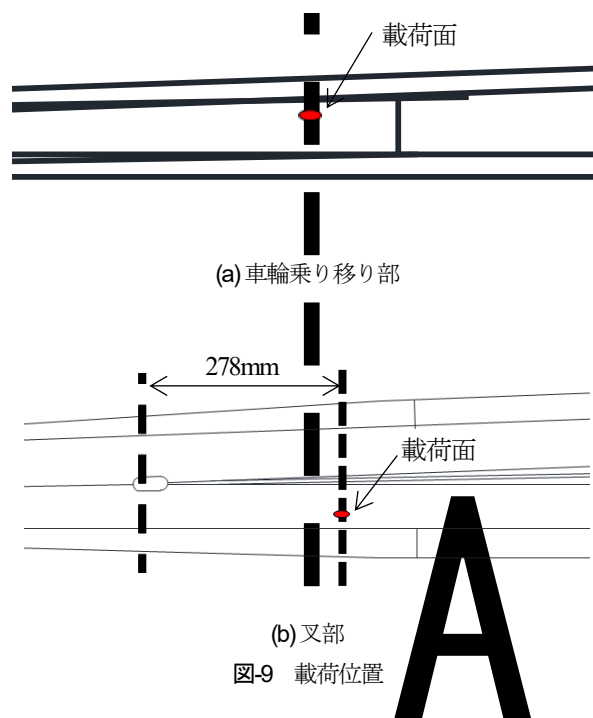
今回用いた解析手法は，前述の通り，レールのき裂進展解析においてそのモデルの妥当性が検証されたものであり，さらに，前章で示した通り，評価対象とした可動レールの乗り移り部および叉部の一様断面モデルにおいて解析結果と試験結果が良く一致した．また，本解析手法は，一様断面形状のき裂進展解析のみならず，断面形状が変化する一般的な構造物にも広く用いられている⁹⁾．このことから，断面形状が変化する実形状の可動レールについても，き裂進展の挙動を推定できると考えた．そこで，図-8に示す可動レール全体モデルを用いて，乗り移り部および叉部について実際の敷設状態を模擬したき裂進展解析を実施した．

(1) 解析条件

解析条件を表-3に示す．き裂進展解析システムは

表-3 解析条件

		断面形状	
		車輪乗り移り部	叉部
荷 重	載荷面形状	だ円 (長軸 12.0mm×短軸 6.0mm)	
	大きさ	60kN	
	位置	き裂直上 (図-9(a))	まくらぎ直上 (図-9(b))
	き裂導入断面 の最大主応力	81.5N/mm ²	79.8N/mm ²
	ばね定数	500 N/mm	12.5 N/mm
き裂進展則		Walker 則	



FINAS/CRACKを使用し，ソルバーはMSC Nastranとした．載荷面は車輪とレールの接触を模擬し，長軸12.0mm，短軸6.0mmのだ円とした．荷重の大きさは，走行試験にて測定した一般部の輪重の大きさから60kNとした．載

荷位置は、図-9に示すように、乗り移り部はき裂直上とし、又部は又部後端側の基準線側とした。境界条件として、可動レールの大床板が接する底面にばねを設置した。ばね定数は、き裂導入断面に走行試験にて発生した車輪乗り移り部底部および又部底部における主応力の最大値が発生するように定めた。き裂の変形様式は開口型（モードⅠ）を想定し、き裂進展則は前述と同様のWalker則を用いて、材料定数は普通レールと同様にした。

(2) 解析結果

図-10にき裂長さと通過トン数の関係を示す。なお、き裂長さは底面のき裂進展量から算出し、通過トン数は軸重を11トンとして算出した。き裂進展速度は、き裂長さ20mm程度までは乗り移り部、又部共にほぼ同じであるが、その後、乗り移り部のき裂進展速度が速くなっている。これは、図-11に示すように、き裂進展に与える影響が大きいき裂近傍のレール長手方向の引張応力が、乗り移り部は底部中央に近づくほど高く、又部は初期き裂導入部の一部のみが高いためと考える。本試算では、超音波探傷においてき裂の検知が可能と想定される深さ10mmのき裂が、前述のき裂進展試験にて破断に至ったもののうち最もき裂深さの浅かった20mm程度まで進展するのに要する通過トン数は、約3,500万トンであった。

現在新幹線で使われている高マンガン鋼製ノーズ可動クロッシングは、分岐器細密検査の検査周期を累積通過トン数1億トンまで2回／年、累積通過トン数1億トン以降は4回／年としている。例えば年間通過トン数が3500万トンの区間であれば、これまでと同様に2回／年の周期で超音波探傷検査を実施することにより、折損前にき裂を検知することが十分に可能である。また、現在実施している分岐器細密検査と比較して超音波探傷検査は労力を要しないため、より高頻度に検査をしたとしても実務上において有益であると考えられる。

なお、き裂進展の挙動には残留応力による影響が大きく関わる事が明らかとなっているが⁴⁾、過去に可動レールの残留応力を測定した例はなく、与えるべき残留応力の値が不明なため、本解析では残留応力を考慮していない。可動レール底部に引張の残留応力が存在している場合、き裂進展速度がより速くなると考えられる。今後、残留応力分布を詳細に把握し、残留応力を考慮した解析を実施する必要がある。

5. おわりに

本研究では、可動レール部における2種類の一様断面形状の供試体によるき裂進展試験およびそれを模擬した

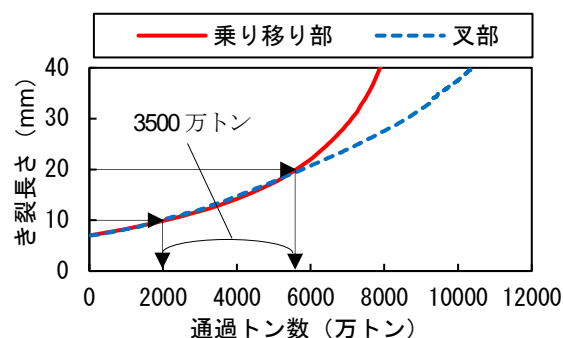


図-10 き裂長さと通過トン数の関係

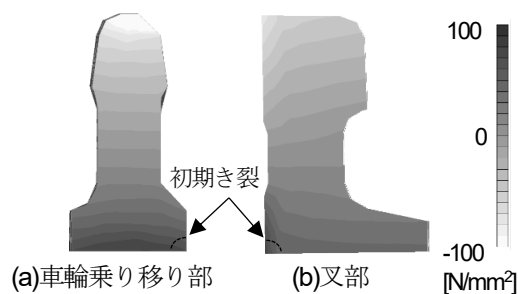


図-11 き裂導入断面のレール長手方向応力

解析を実施した。その後、可動レールの実形状モデルに対して、実際の敷設状態を模擬したき裂進展解析を実施し、き裂進展量の推定を行った。結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 開発したレール鋼製ノーズ可動クロッシングの構造上弱点となり得る可動レールの車輪乗り移り部および又部の断面を対象にき裂進展試験および解析を実施した。試験により、き裂長さが増加するのに伴ってき裂進展速度が速くなる傾向を把握した。また、解析結果は試験結果とよく一致した。
- (2) 可動レールの実形状をモデル化したき裂進展解析を実施し、乗り移り部および又部に発生したき裂の進展速

度を試算した結果、き裂進展速度は乗り移り部の方が速く、深さ10mmのき裂がき裂進展試験で破断に至った20mm程度まで進展するのに要する通過トン数は約3500万トンであった。

参考文献

- 1) 秋田貢一，坂田創，柏谷賢治，三沢啓志：高マンガンオーステナイト鋼の疲労き裂進展挙動と X 線フラクトグラフィ，材料，Vol.49，No.7，pp.722-728，2000。
- 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) 柏谷賢治，石田誠：レール横裂成長速度予測モデル，鉄

- 道力学シンポジウム, No.7, pp.79-84, 2003.
- 4) 細田充, 水谷淳, 山本隆一, 片岡宏夫: 熱処理レールのき裂進展速度の推定, 鉄道総研報告, Vol.33, No.2, pp17-22, 2019.
 - 5) 水江達也, 立川正勝, 小西俊之: レール製クロッシングとマンガンクロッシングの現状把握, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.21, pp63-66, 2017.
 - 6) Murakami.Y et al. STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK Volume2 Committee on Fracture Mechanics The Society of Materials Science Japan, Pergamon, pp714-715,1987.
 - 7) Horst G. Delorenzi : Energy release rate calculations by the finite element method, Engineering Fracture Mechanics, Volume 21, Issue 1, pp 129-143, 1985.
 - 8) 森猛, 木村直登: 圧縮繰返し応力を受ける面外ガゼット溶接継手の疲労き裂発生・進展挙動と疲労強度, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.1, 278-287, 2017.
- (2020.4.3 受付)

CRACK PROPAGATION OF THE MOVABLE NOSE CROSSING FOR THE SHINKANSEN MADE FROM RAIL STEEL

Jun MIZUTANI, Mitsuru HOSODA, Yuya OIKAWA and Ryuichi YAMAMOTO

The new nose movable crossing for the Shinkansen, which was developed with the aim of improving the efficiency of inspection and reducing costs by extending the replacement cycle, is made of rail steel, so ultrasonic flaw detection is possible. However, the crack propagation characteristics of the movable nose crossing has not been clarified. Therefore, crack propagation tests and analyses of that were performed.

The tests were carried out using two types of test pieces of uniform cross-section with electric discharge machining of artificial flaws at the bottom. The propagation rate of cracks generated at the bottom of the movable rail were measured and that became faster as the cracks became larger. Furthermore, the crack propagation analyses were carried out on the same model as the test pieces used in the tests. The analysis results of the two types of uniform cross section models agreed well with the test results.

In addition, an analysis was carried out on a real shape model. The tons of traffic required for a crack with a depth of 10 mm to propagate to about 20 mm, which led to fracture in a crack propagation test, was calculated.