

レール折損時における応急処置後の 列車徐行速度向上の可能性

片岡 宏夫* 西宮 裕騎* 土井 久代**

A Study on Increasing Running Speed Limited Due to Installing Emergency Rail Cramp at a Spot of Rail Failure

Hiroo KATAOKA Yuuki NISHINOMIYA Hisayo DOI

Slow running speed of train on track installing emergency rail cramp at a spot of rail failure was decided empirically and the ground has not been made clear. Therefore, we carried out field tests, laboratory test on track installing emergency rail cramp of Yasuda-type, and also static loading tests in a laboratory on track installing emergency fish-plating apparatus. Vehicle running safety and strength of track components were studied based on the tests results. As a result, we clarified that the maximum 70km/h slow running speed was allowable on the meter gaged long welded track installing those emergency apparatuses in the tangent or the curved sections of over 500m radius.

キーワード：応急処置器，補強継目板，レール折損，徐行速度，開口量

1. はじめに

レール折損時の列車の徐行運転は，列車遅延・運休の原因の一つとなっている。レール応急処置を施した場合の列車の徐行運転速度は経験的に決められており，その根拠はかならずしも明確ではない。また，レールが横裂で折損した箇所に横裂用レール応急処置器を取り付けた場合の列車通過時の車両・軌道の挙動および部材強度は明確にされていなかった。

そこで，図1に示す安田式横裂用レール応急処置器（以下，「応急処置器」という。）を用いた場合に，従来の30～45km/h程度の徐行速度を70km/hまで向上する可能性を検討した。また，その結果を参考にして補強継目板を取り付けた場合の安全性を評価した。

なお，本研究では，評価対象を徐行運転による列車の遅延および運休の影響が大きいロングレール区間で曲線半径500m以上の軌道とした。レール開口量は，ロングレールの破断時の開口限度として一般的に用いられている70mmとした。また，折損部のレール交換を当日の夜間に行うことを前提として，応急処置を施した後に折損部を1日通過する軸数を想定した。

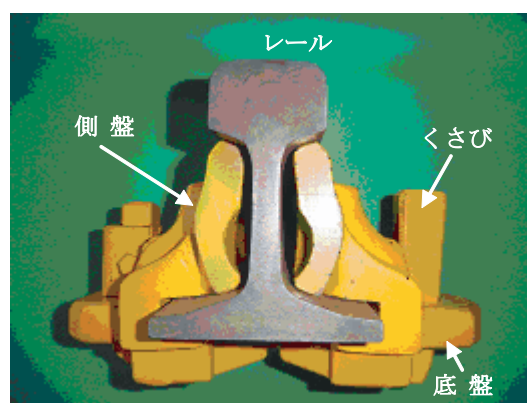


図1 安田式横裂用レール応急処置器

2. 応急処置器を取り付けた場合の検討¹⁾

2.1 応急処置器の部材強度評価法

対象とした応急処置器は図1に示すように，レールを側盤で挟み底盤にくさびを打込むことで側盤を締めつけ，レールを支持する構造となっている。応急処置器の部材強度を評価するには，取り付け時および列車通過時に応急処置器に発生する応力を把握する必要がある。そのため，応急処置器を取り付けたレール折損部について静的応力解析および静的载荷試験を実施し，その結果を基に応急処置器の部材強度の評価方法を検討した。

応急処置器の材質はFCD450-10のダクタイル（球状黒鉛）鋳鉄（以下，FCDと略す。）である。応急処置器に

* 軌道技術研究部（軌道構造）

** 鉄道力学研究部（車両力学）

特集：軌道技術

発生する応力分布を調べるため、図2に示す応急処置器を取り付けたレール折損部の解析モデルを構築し、静的応力解析を実施した。輪重、横圧の比率を変えて载荷した結果、図3に示すようにA～C点の応力が大きくなるのが推定された。

また、70mmの開口部を設けた試験軌きょうの静的载荷試験を行った結果、応急処置器の応力は取り付け時に塑性域に達しており、塑性域における応力変動に対する評価が必要となった。

そこで、応急処置器取り付け時の応力を図4に示すようにFCDのひずみ-応力曲線²⁾より推定した。FCD450の引張強度と時間強度を用いて耐久限度線図を作成し、応急処置器の各測点に発生した応力変動の最大値と取り付け時の応力を含めた平均応力を耐久限度線図上にプロットして照査し、強度の評価を行うこととした。許容限度は、折損部を1日通過する軸数を約2万軸と想定し、安全余裕として3倍の約6万軸通過するものとして、10⁵回時間強度とした。

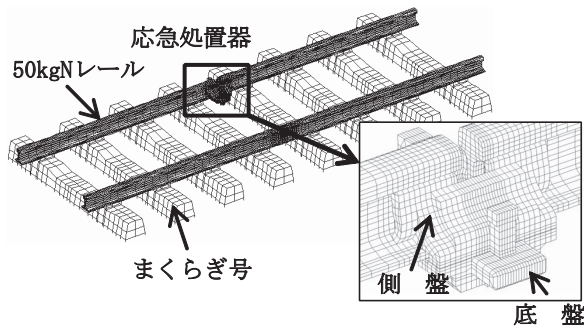


図2 レール折損部の解析モデル

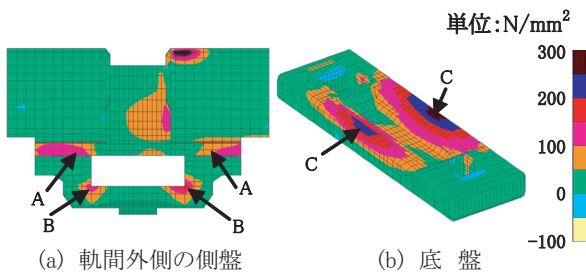


図3 応急処置器の最大主応力分布 (輪重 75kN, 横圧 60kN 载荷時)

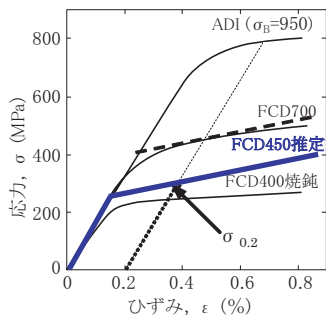


図4 FCDのひずみ-応力曲線²⁾

2.2 走行試験

2.2.1 試験概要

走行安全性および部材強度を確認するため、図5に示す曲線半径500m相当の実軌道においてレール折損部を模擬した開口部を設定し、103系電車(2両編成)の走行試験を西日本旅客鉄道株式会社と共同で行った。

車輪の踏面形状はフランジ角が65°の修正円弧踏面形状である(図7参照)。また、車両重量について空車時と積車時の条件を設定した。軸重は空車時では93kN、積車時では114kNであった。速度は10～70km/hまで10km/h毎とし、空車および積車状態にて走行した。試験結果を評価するにあたり、表1に示す軌道および応急処置器の条件を前提とした。

図6に試験区間における軌道変位を示す。通り変位設定後、開口部Cでは10m弦正矢量が36mmであり、これは曲線半径350mに相当する。

測定項目は、車上測定による輪重、横圧、地上測定によるレール頭部左右食違い量、レール頭部左右変位、

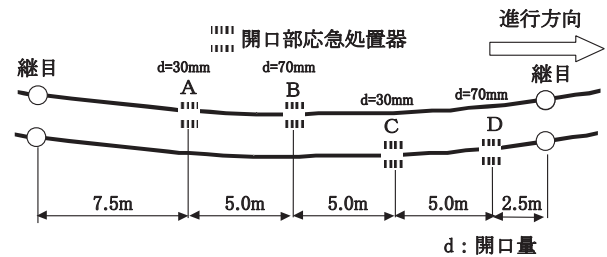


図5 走行試験軌道の測定部位

表1 評価の前提条件

軌道	<ul style="list-style-type: none"> ○ 著大な軌道変位がないこと ○ 応急処置器取り付け後、軌道が同じ状態を維持していること ○ 損傷が連続していないこと ○ 損傷の範囲が70mmを超えていないこと
応急処置器	<ul style="list-style-type: none"> ○ レール折損時の使用履歴のない応急処置器を使用すること

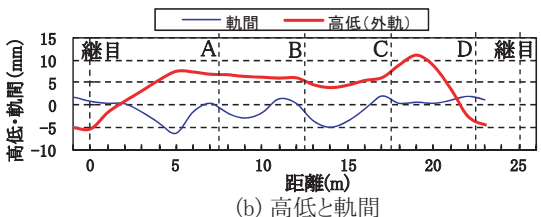
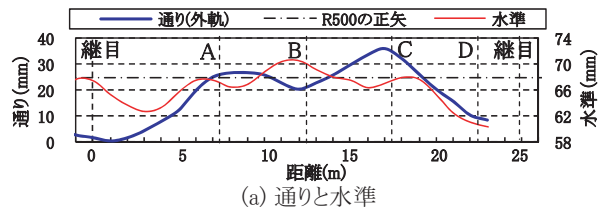


図6 応急処置器取り付け時の軌道変位

レール応力、締結ばね応力および応急処置器応力（図3のA, B, C点）である。

レール頭部左右食違い量については、レール開口部で乗り移りの際に図7に示すフランジの直線部分を越えてフランジ先端部の曲線部分（B点より下方）で接触すると、レールと車輪の接触角が急激に小さくなり、限界脱線係数も急激に小さくなり危険である。そこで、レール頭部左右食違い量は、車輪が最もレールに寄ったときのレールと車輪側の接触点と想定されるフランジの半径が14mmとなる下端点A点とB点の水平距離まで許容されると考え、各種踏面形状に対してこの値を求めた。その結果、AB間の水平距離の最小値は修正円弧踏面の4.3mmであり、許容値を4mmとした。

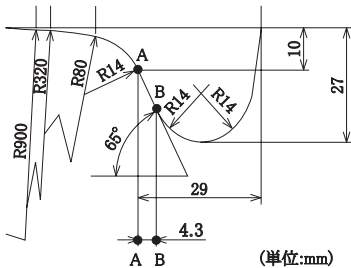


図7 修正円弧踏面のフランジ形状

2.2.2 試験結果

測定結果の例として、図8に外軌側開口部における脱線係数を、図9に内軌側開口部における輪重減少率を示す。開口部Cに角折れが生じており、速度の増加に伴い脱線係数が増加する傾向がみられた。速度70km/hの走行試験結果を調べると、横圧（Q）のピークは輪重（P）より後に発生しており、乗り移り直後のQ/Pは、図10の例に示すように、開口部Cでは0.3程度であり、他の開口部A,B,Dではほぼ0であった。

試験の結果、表2に示すように、脱線係数および輪重減少率は目安値以下であり、レール変位、応急処置器および軌道部材の強度はすべて許容限度値内であった。本試験の軌道条件で103系電車の70km/h以下の速度では、走行安全性、軌道部材の強度に関して問題はないと考えられる。

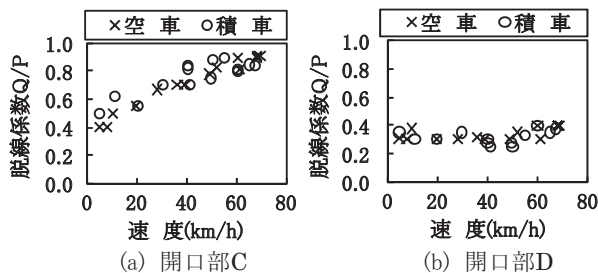


図8 走行速度と脱線係数の関係（外軌側開口部）

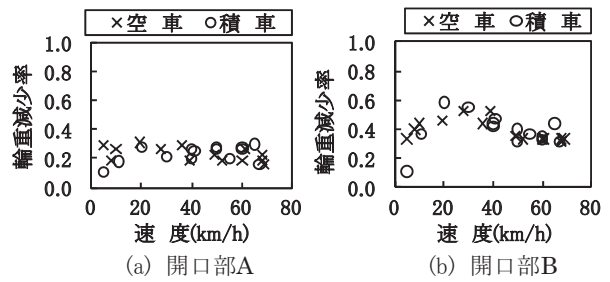


図9 走行速度と輪重減少率の関係（内軌側開口部）

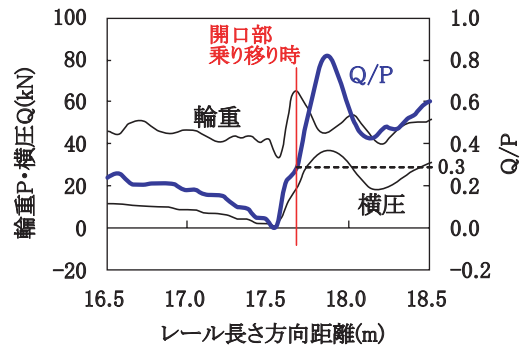


図10 開口部通過時の輪重・横圧の比率の例（開口部C, 空車時, 速度70km/h）

表2 走行試験結果および照査結果

項目		目安値または許容限度値	最大値	
車上側	脱線係数 (Q/P)	0.95	0.91	
	輪重減少率	0.80	0.58	
地上側	レール頭部変位	左右食違い量	4.0mm	
		左右変位	7.0mm <small>文献3)</small>	
	発生応力	応急処置器	耐久限度線図による	10 ⁵ 回時間強度内
		締結ばね	耐久限度線図による	第2破壊限度内
	レール	355 N/mm ²	86 N/mm ²	

2.3 機関車走行時の評価

実軌道では様々な車種が開口部を通過することが想定されるため、103系電車に比べ輪重の重いEF66機関車について、速度70km/hまでの走行安全性および軌道部材の強度評価を行った。EF66機関車が開口部を走行する際に発生する輪重および横圧は、輪重横圧推定式による開口の無い状態の輪重と横圧の推定値に、走行試験結果より推定した割増荷重を加算したものとした。

2.3.1 走行安全性の評価

走行試験結果から、脱線係数の大きい箇所でもその作用時間はごく短かったため、脱線係数の検討は省略し、走行安全性の評価指標は輪重減少率とした。

曲線半径500mの軌道にてEF66機関車が通過した場合

特集：軌道技術

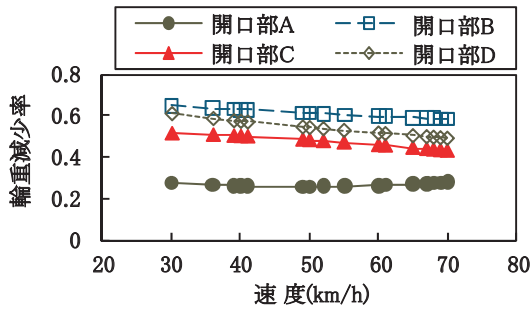


図 11 速度と輪重減少率 (EF66)

について輪重減少率を推定した結果, 図11に示すように最大0.65と推定され目安値0.8を下回り, 走行安全性に問題はないと考えられる。

2.3.2 軌道部材の強度評価

軌道部材の強度評価に際し, EF66機関車の走行時に開口部に発生する輪重および横圧を推定した。

走行試験結果より列車速度, 開口部通過時の車上輪重および横圧の最大値を説明変数として各部材の変動応力の重回帰分析を行い, 推定荷重を代入して変動応力を推定し, 軌道部材の強度評価を行った。推定荷重は, 曲線半径500mの場合より厳しい条件である曲線半径300m, 通り変位30mmの軌道をEF66機関車が速度70km/hで走行した条件で推定した輪重および横圧とした。

また, レール頭部左右変位および食違い量は, 静的載荷試験や走行試験において横圧と比例関係にあることが確認されたことから, 推定横圧より変位を推定した。

その結果を表3に, 耐久限度線図による照査結果を図12に示す。各項目とも許容限度値内であった。また, 応急処置器について推定変動応力に対して図13に示す繰返し

載荷試験を実施した結果, 6万回の繰返し載荷に対し損傷等の異状は確認されず, 耐久性の問題はないと考えられる。

以上より, 1日間程度の列車の通過に対して強度上問題はないと考えられる。

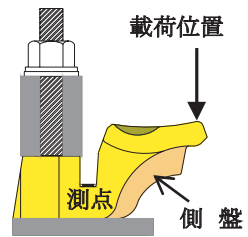


図 13 繰返し載荷試験

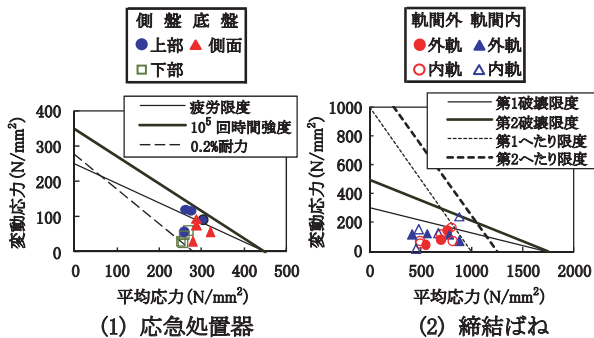


図 12 耐久限度線図による照査結果

表 3 機関車走行時の推定値の照査結果

項目	許容限度値	EF66 機関車走行時の推定結果
レール左右食違い量	4.0mm	2.2mm
レール頭部左右変位	7.0mm <small>文献3)</small>	4.3mm
応急処置器	耐久限度線図による	10 ⁵ 回時間強度内
締結ばね	耐久限度線図による	第2破壊限度内
レール	355 N/mm ²	228 N/mm ²

2.4 応急処置器取り付け時の徐行速度の評価

以上の検討結果から, 表1の前提条件を満たす場合に, 曲線半径500m以上のロングレール区間において, 開口量70mmの折損部に応急処置器を取り付け, 徐行速度70km/hで1日間程度列車が通過する場合, 走行安全性および軌道部材の強度について問題はないと考えられる。

3. 補強継目板を取り付けた場合の検討⁴⁾

3.1 走行安全性および部材強度の検討

補強継目板を取り付けた場合について, 2章の結果を踏まえ, 静的荷重に対する応答を応急処置器取り付け時の結果と相対比較することにより70km/hまでの徐行速度向上に対する評価を行った。

開口部を有する50kgNおよび60kgレールの静的載荷試験を実施した。図14に示す試験軌きょうの開口部のレール端部に載荷し, 補強継目板を締結するボルト本

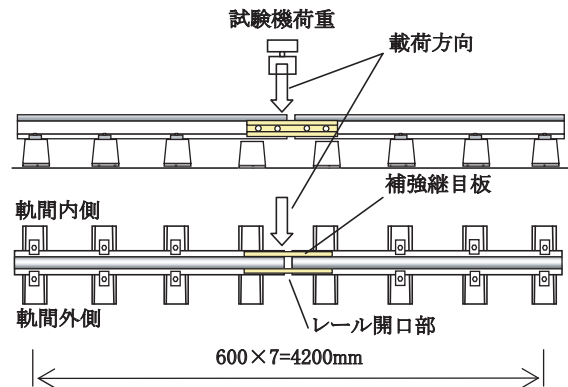


図 14 静的載荷試験の概要

表 4 試験軌きょうの諸元

項目	諸元
レール	50kgN, 60kg
締結装置	9形
まくらぎ	PCまくらぎ6号
軌道パッドばね定数	110MN/m
まくらぎ支持ばね係数	30MN/m
締結間隔	600mm

表5 荷重条件

横圧輪重比 (Q/P)	载荷角度	荷重 (kN)	輪重, 横圧換算 (kN)
0.0	90.0°	75.0	75.0, 0.0
0.5	63.2°	84.0	75.0, 37.5
0.8	51.4°	96.0	75.0, 60.0

注) 载荷角度は水平方向からの角度

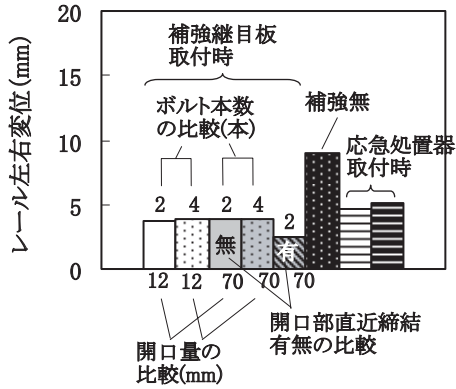


図15 静的载荷試験結果の比較の例 (輪重 75kN, 横圧/輪重=0.5 の場合)

数, 開口量, レール開口部直近の板ばねの有無を変えて軌道部材に発生する応力および変位を測定した。表4に試験軌きょうの諸元を, 表5に荷重条件を示す。

試験結果の例として, レール頭部左右変位についてみると, 図15に示すように締結ボルト本数, 開口量による違いはみられず, 直近の締結の有無により差が生じている。

前章の応急処置器取り付け時の静的载荷試験結果と比較して, 70km/hまでの徐行速度向上に対する評価を行った結果を表6に示す。継目板の応力については, 過去に実施した普通継目部の静的载荷試験結果を参考にした⁵⁾。

走行安定性については, レール頭部左右変位の試験結果から補強継目板取り付け時の軌道の剛性が応急処置器と同等以上であることから, 2章の検討結果を下回ることとはなく, 問題はないと考えられる。また, 部材強度については締結装置の位置でレールの左右変位を拘束すれ

表6 静的载荷試験結果の評価

評価項目	評価	備考	
レール頭部変位	左右食違い量	○	—
	左右変位	○	—
応力	レール	△	直近の締結がない場合, 横圧作用時に応急処置器の試験結果を超過
	締結ばね	○	—
	継目板	△	直近の締結がある場合に, 普通継目部の試験結果と同程度

○: 本試験結果が応急処置器の試験結果と同程度もしくは下回る
△: 条件付きで問題なし

ば問題はないと考えられる。

なお, 開口量, ボルト本数が普通継目と同じであれば, 営業速度で問題ない。ただし, 損傷が連続している場合には最徐行が望ましい。

3.2 補強継目板を事前に取り付けた場合のレール軸力に関する検討

シェリングが発見された場合に, レール交換までの安全性を確保することを目的として補強継目板を取り付ける場合がある。ロングレール区間の補強継目板を取り付けた箇所でレールが折損した場合には, 開口部にレール軸力が作用する。

そこで, 補強継目板の取り付け後に温度低下によりレール折損に至った状況下の継目板拘束力と継目板ボルトの発生応力を推定することを目的として, 静的有限要素解析を行った。解析モデルは, 図16に示すようにレール継目を含むPCまくらぎ14本分の半軌きょうを模擬したソリッドモデルと, ロングレールを模擬する梁モデル(全長 250m × 2) から構成される。

レール種別とボルト本数に対する継目板拘束力を解析した結果を図17に示す。なお, 以下の解析結果は継目板

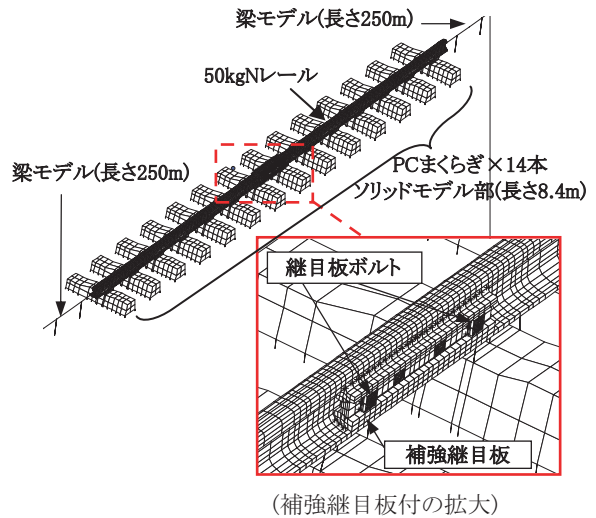


図16 補強継目板取り付け時の解析モデル

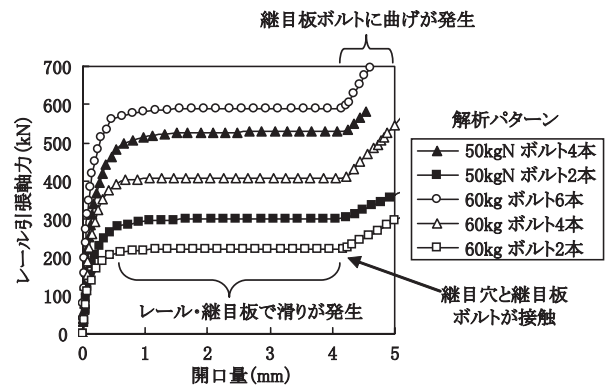


図17 解析によるレール引張軸力と開口量の関係

特集：軌道技術

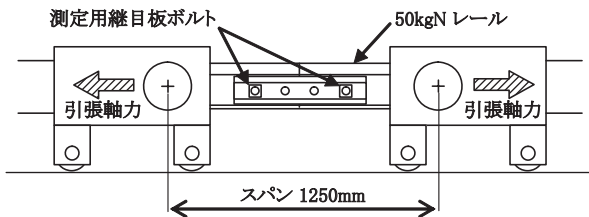


図18 载荷試験の概要

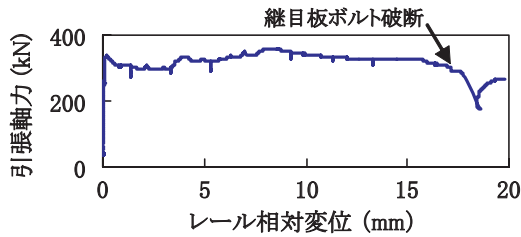


図19 静的载荷試験結果

とレール間にグリースを塗布しない条件であるため、通常のレール継目部の継目板拘束力とは異なっている。

図17から、60kgレールでボルト2本を用いた場合、継目板拘束力は221kNであり、ボルト4本を用いた場合は、408kNであった。なお、ロングレールで想定する最大温度下降量は50℃であり、この温度変化量でのレール引張軸力は50kgNレールで754kN、60kgレールで910kNである。このため、継目板拘束力のみではレール破断時の引張軸力に耐えることはできず、継目板ボルトの曲げ抵抗力に期待することとなる。

実際の継目板ボルトが折損するレール引張軸力を把握するために、静的载荷試験を実施した。試験継目は50kgNレールの補強継目を想定し、図18に示すようにレール中央にレール折損を想定した開口部を設け、普通継目板を2本の継目板ボルトを用いて取り付けた。継目板とレール間にはグリースを塗布しないものとした。

载荷時の水平荷重とレール開口量および継目板ボルトのひずみの関係を図19に示す。最大水平荷重は357kNであり、継目板ボルト破断時のレール開口量は17.8mmであった。開口量が増加し始めた荷重値から、継目板拘束力は320kN程度と推定された。

このように、事前に補強継目板を取り付けた箇所が折損した場合、継目板ボルトが破断する場合があるので注意を要する。継目板拘束力を確保する観点からは、ボルト本数は多い方がよい。

4. 結論

レール折損時の応急処置後の徐行速度向上の可能性を探るため、安田式横裂用応急処置器もしくは補強継目板による応急処置を施した曲線半径500m以上のロングレール区間において、徐行速度70km/hで1日間列車が通過する場合の走行安全性および部材強度を検討した。そ

の結果は以下のとおりである。

- (1) 応急処置器取り付け時の曲線半径500mの区間における103系電車の徐行速度70km/hまでの走行試験を実施し、走行安全性を評価した結果、脱線係数および輪重減少率はいずれも目安値以下であった。また、応急処置器、軌道部材の強度およびレール変位について評価した結果、全て許容限度値以下であり、走行安全上問題がないことを確認した。
- (2) 曲線半径500mにおける103系電車の走行試験結果を用いて推定したEF66機関車走行時の輪重減少率は、目安値0.8を下回った。また、EF66機関車が70km/hで走行した場合に応急処置器および軌道部材に発生する変動応力を推定した結果、各項目について許容限度値以下であった。
- (3) (1)(2)の検討の結果、安田式横裂用応急処置器取り付け時に70km/hまでの徐行速度向上の可能性を得た。
- (4) 補強継目板取り付け時の静的载荷試験の結果を応急処置器の試験結果と比較した結果、(1)の走行試験結果を考慮すると、開口部直近の締結位置でレールの左右変位を拘束すれば補強継目板取り付け時に70km/hまでの徐行速度に関して問題はない。
- (5) 事前に補強継目板を取り付けた後にレールが折損した場合のレール軸力に関する検討を行った結果、引張のレール軸力により継目板ボルトが破断する可能性があるため、注意が必要となる。

5. おわりに

本研究では、走行試験上の制約等もあり、70km/hまで速度向上した場合の安全性について評価した。

曲線半径や軌道の条件によってはさらなる徐行速度の向上もありうるが、そのためには走行試験による検証が必要である。最後に、本研究の走行試験に際し多大なご協力を頂いた西日本旅客鉄道株式会社に厚くお礼申し上げます。

文献

- 1) 溝口敦司他：レール折損時応急処置器取り付け後の徐行速度向上，新線路，Vol.59，No.11，2005.11
- 2) 原田昭治，小林俊郎他：球状黒鉛鑄鉄の強度評価，アグネ技術センター，1999.12
- 3) 長藤敬晴他：防振形レール締結装置の開発，鉄道総研報告，Vol.9，No.12，1995.12
- 4) 西宮裕騎他：レール折損時の補強継目板の使用，新線路，第63巻4号，2009.4
- 5) 片岡宏夫他：レール継目部の動的応力解析と寿命推定，鉄道総研報告，Vol.19，No.2，2005.2