

論文 脱線防止ガードの弱点箇所を対象とした 背面横圧強度の評価

西宮 裕騎¹

¹正会員 鉄道総合技術研究所 軌道技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: nishinomiya.yuki.78@rtri.or.jp

急曲線の乗り上がり脱線を防止するための脱線防止ガードは、熱収縮の影響を受けるため、連続する最大長を制限しており、その端部付近や中間部にはレールへの結合装置であるブロックが取り付けられる。しかし、端部から離れた位置にブロックが取り付けられる場合があるが、その余裕長は不明であり、弱点箇所である。

本研究では、脱線防止ガードの弱点箇所を対象とした静的強度評価を目的とし、有限要素法による解析モデルの構築を行い、静的載荷試験との比較検証を行った。その結果、載荷荷重とガード水平変位の関係は再現できていることが確認された。構築した解析モデルを用いて、レールへの取り付けブロックとガード端部までの距離を変数としたケーススタディを実施した結果、設計荷重に耐えうるブロックの取り付け条件が明らかとなった。

Key Words : anti-derailment guard, FEM, flange climb derailment

1. はじめに

脱線を防止する目的で、レールと並行して設置されるL形鋼と支持部材から構成される脱線防止ガードが設けられる区間がある。日本の在来鉄道においては、主に急曲線の乗り上がり脱線を防止する目的で、脱線するリスクが高い区間、および橋りょう区間等の脱線による被害が大きいと推定される区間に設置されている¹⁾。図-1に主に流通している脱線防止ガードを示す。この構造は、1963年の鶴見事故²⁾を契機に開発が行われ、1968年に規格化され³⁾、現在でもJRを中心に在来鉄道で広く用いられており、使用上の顕著な問題は報告されていない。しかし、開発が古いため、設計の前提となる車両や軌道の条件が現在の状況と異なり、安全余裕は不明である。

さらに、規格のガード材は6mを基本長としており、その切れ目では車輪からの背面横圧に耐えられるよう、原則としてレールとの結合部材であるブロックを取り付けることになっている。ガード端からブロック取り付け位置までの距離が長い場合、支持構造が片持ち梁となるため、強度不足が懸念される。しかし、その取り付け位置の限度は明確に定められていない。

脱線防止ガードの理論的な研究開発については、2004年に発生した新潟県中越地震による上越新幹線の脱線事故をきっかけに、地震時の脱線を防ぐ目的で多数の研究

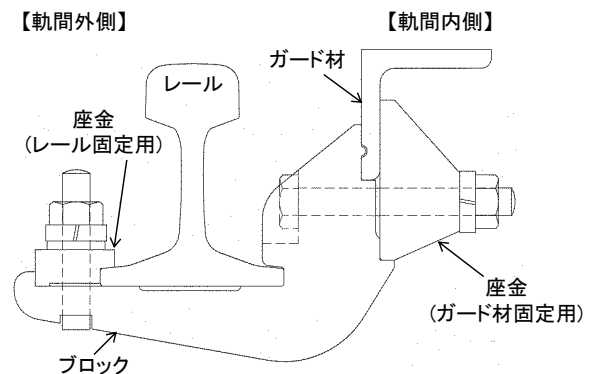


図-1 一般的な脱線防止ガード

開発がなされている⁴⁾が、設計水平荷重は170kN⁵⁾程度で設計され、乗り上がり脱線を防止する脱線防止ガードの設計水平荷重である30kN⁶⁾と比較して大きく異なっている。このため、対象の脱線防止ガードの研究事例は少ないのが現状である。

吉田らは、過去に脱線防止ガードの水平載荷試験⁶⁾により、本脱線防止ガードの背面横圧強度を確認している。しかし、試験により確認できる条件数には限りがあり、限界値は不明であった。さらに、解析による検証を行う目的で、脱線防止ガードの最小構成要素であるブロック単体の水平載荷試験と、その模擬解析モデルとの比較検

証により、載荷荷重とガード変位およびブロックのひずみが良好に一致することを確認している⁷⁾。ただし、前述のガード端からブロックまでの距離が長い場合の強度評価を行う場合、軌きょうを模擬した解析が必要である。

そこで、本研究では、脱線防止ガードの弱点箇所を対象とした静的強度評価を目的とし、有限要素法による軌きょうを構成した解析モデルの構築を行い、静的載荷試験との比較検証を行った。そして構築した解析モデルを用いて、レールへの取り付けブロックとガード端部までの距離を変数としたケーススタディを実施した結果を報告する。

2. 検討方法

本研究では、脱線防止ガードの弱点箇所の静的強度評価を対象とし、有限要素法による数値解析により評価を行う。静的現象を対象とするが、将来的に車両走行を含む動的解析への拡張を視野に入れ、動的陽解法による準静的解析を適用する。

解析の妥当性を確認するため、過去に実施した脱線防止ガードの静的水平載荷試験⁸⁾との比較検証を行う。弱点箇所として脱線防止ガードのガード端部が片持ち梁状態となる軌きょうを想定し、ガード端部からブロック中心までの距離に応じて脱線防止ガードがどの程度の背面横圧まで耐え得るのかをケーススタディにより確認する。

3. 解析モデル

図-1に示すように、本研究で対象とした脱線防止ガードは、車輪背面を支持するL形断面形状のガード材、ガード材を保持するブロック、ブロックをレールに固定する座金、ガード材をブロックに固定する座金およびこれらを締結するボルト・ナットから構成されている。ガード材はSS400材が使用されるが、ブロックにはFCMB340(黒心可鍛铸铁)製とFCD450(球状黒鉛铸铁)製の2種類がある。本研究では、現在販売されているFCD450製のものを対象とした。なお、ブロックの材質については、開発当時は黒心可鍛铸铁FCMB340であったが、2006年頃に球状黒鉛铸铁FCD450が追加され、現在の新規購入品についてはFCD製が主流である。

解析モデルを図-2に、解析諸元を表-1に示す。試験条件を模擬するため、ガード、ブロック、座金を弾塑性ソリッド要素でモデル化し、座金固定用のボルトを梁要素でモデル化した。

後述する検証試験では、定盤上に固定されたH鋼に弾性材を介することなくレールを座金で締結しているため、試験時の最大荷重70kNでのレール底部左右変位は最大1.2mmと小さかった。そこで、レールを剛なシェル要素としてブロックとの接触部周辺のみをモデル化し、不動点として拘束した。

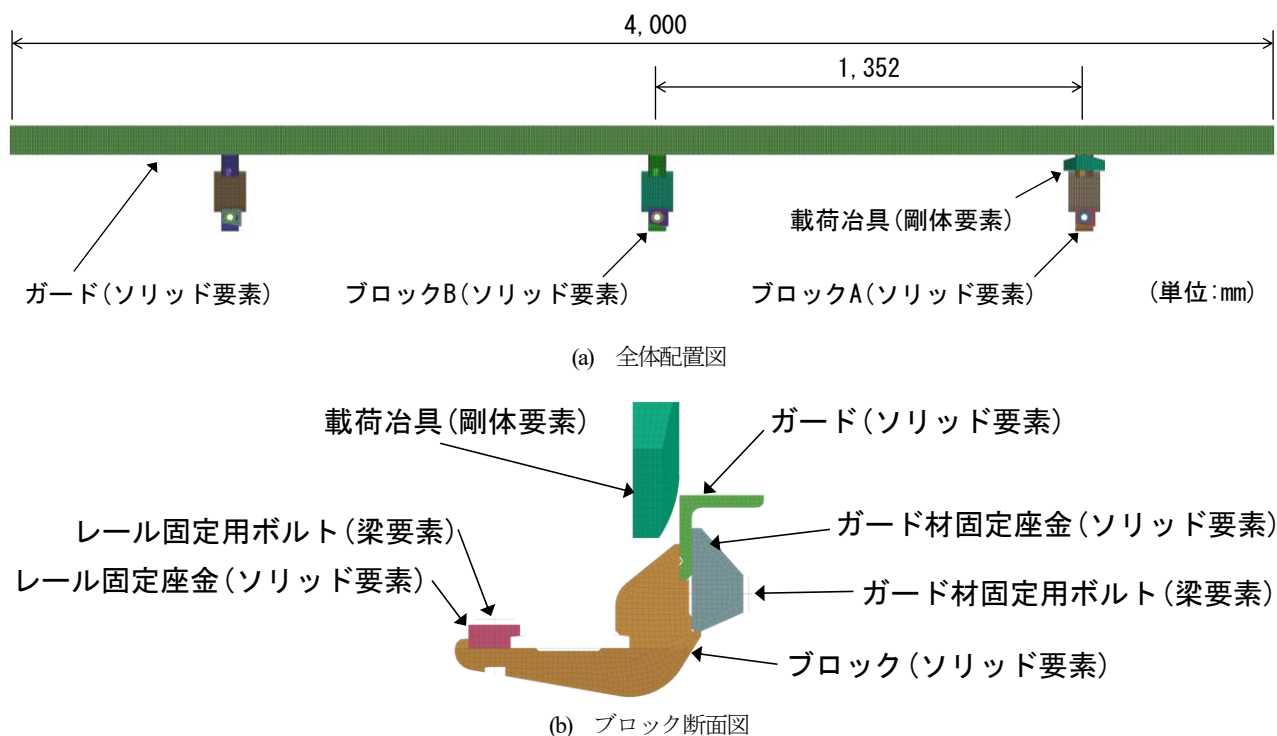
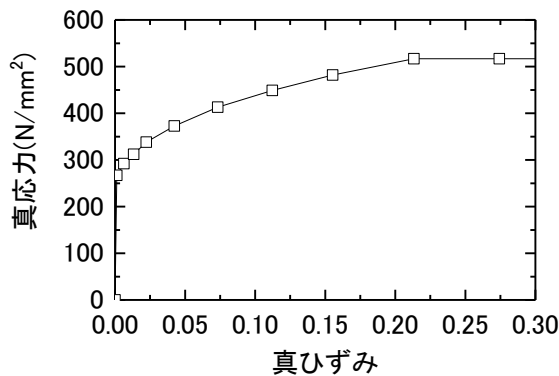


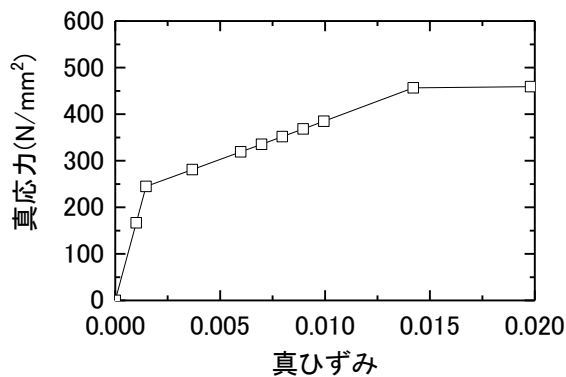
図-2 解析モデル

表-1 解析諸元

部 品	項 目	値
レール	モデル	剛体
ガード材	モデル	弾塑性ソリッド要素
	ヤング率	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
	質量密度	$7.8 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
ブロック	モデル	弾塑性ソリッド要素
	ヤング率	$1.72 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
	質量密度	$7.4 \times 10^{-9} \text{ ton/mm}^3$
ボルト (ガード固定用)	モデル	梁要素
	初期軸力	28.5kN
	ヤング率	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
ボルト (レール固定用)	モデル	梁要素
	初期軸力	22kN
	ヤング率	$2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$
	ポアソン比	0.3
スプリング ワッシャ	モデル	ばね要素
	ばね定数	4900N/mm
部材間	摩擦係数	0.3
—	水平荷重	70kN



(a)SS400材



(b)FCD450材

図-3 構成部材の応力・ひずみ曲線

弾塑性材料の降伏条件はVon Mises によるものとし、SS400 のガードの応力-ひずみ特性を図-3(a) に、FCD450 のブロック、座金の応力-ひずみ特性を図-3(b) に示す。

FCD450 については、文献⁸⁾に示すFCD500 とFCD350 の応力-ひずみ特性から補間して設定した。座金固定用の梁要素には、試験で測定した組立時のボルト軸力の平均値を初期軸力として与えた。レール、ガード、ブロック、座金の各部材間で接触している箇所については、ペナルティ法により、節点・要素表面間に接触を定義した。

解析種別は将来的に動的な列車荷重を考慮する目的で、動的陽解法による非線形動解析とした。時間増分は最小サイズのソリッド要素から決定され、 $6.0 \times 10^{-7} \text{ sec}$ とした。解析の初期段階でボルト軸力を100msec かけて載荷し、減衰のため50msec の時間をおいた後、水平荷重を700msec で所定荷重となるよう載荷した。

4. 検証実験および解析モデル検証

解析の妥当性を確認するため、過去に実施した脱線防止ガードの静的水平載荷試験⁹⁾との比較検証を行う。

(1) 検証実験

脱線防止ガードの端部が片持ち梁状態となる軌きょうを想定して載荷試験を行った。試験軌きょうとして、定盤上に固定されたH鋼に50kgN レール5.5m を固定し、脱線防止ガード4.0m を設置した。レール締結間隔は25m あたりまくらぎ37 本配置相当とし676mm とした。軌きょう載荷試験の概要図を図-4、載荷位置を表-2に示す。以降、載荷位置はブロックA 中央位置からの距離を表すものとする。軌きょう載荷試験は油圧ジャッキで載荷し、荷重を0kN → 10kN → 0kN → 20kN → 0kN → 70kN としてブロックが破壊するまで、または脱線防止ガードが変形し荷重が上昇しなくなった時点まで載荷した。試番ごとに脱線防止ガードおよび載荷位置直近のブロックを交換した。

表-2 軌きょう載荷試験の載荷位置

試番	載荷位置
1	ブロック A 直上（ガード端部側）
2	ブロック A からガード端部方に 275mm
3	ブロック A からガード端部方に 550mm
4	ブロック B 直上（ガード中間部）

(単位：mm)

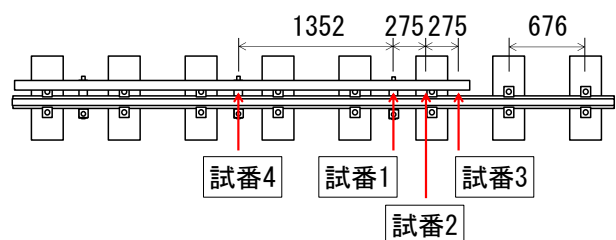


図-4 軌きょう載荷試験の載荷位置

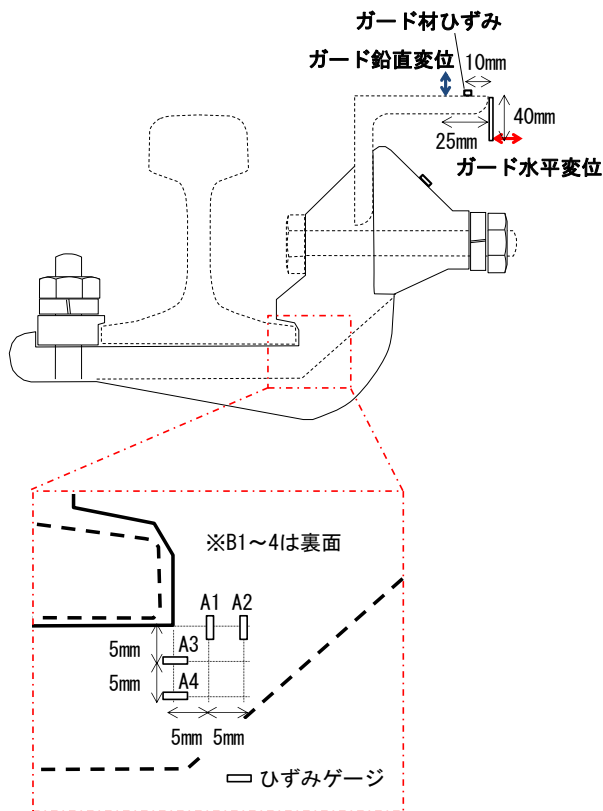


図-5 変位およびひずみ測定位置

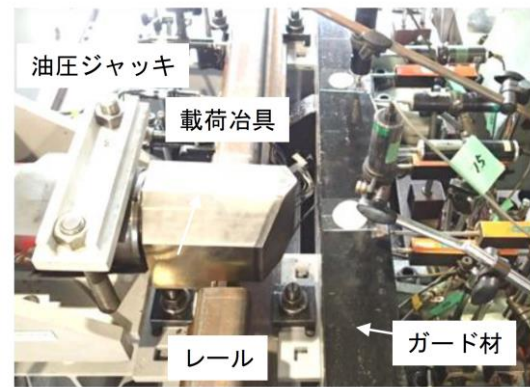
ブロックボルトおよびガードボルトの締付トルクは $150\text{N} \cdot \text{m}$ とした。部材の変位およびひずみ測定位置の概要図を図-5に、載荷状況の例として試番2を図-6に示す。

(2) 解析モデル検証

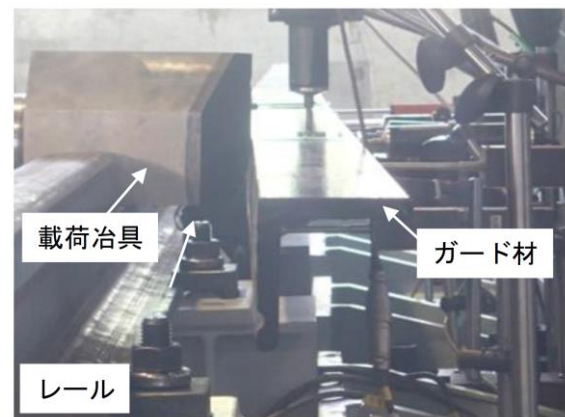
図-7, 図-8に載荷中の解析結果を示す。載荷荷重は実験結果の最大荷重を参考に設定し、図の変形倍率は1.0として表示した。実験結果と同様に、ガード材が片持ち梁状態となっている試番2および試番3では、ガード材が塑性変形して曲がりが生じた。なお、実験ではガードに極端な曲がりが生じた時点で載荷を中断している。図-9～図-12に、実験結果と解析結果の比較検証結果を示し、表-3に破壊直前の載荷荷重におけるガード変位の比較結果を示す。

図-9(a), (b), 図-12(a), (b)より、ブロック直上で載荷を行った試番1, 4については、載荷荷重50kN以上の範囲においてガード鉛直変位が25～40%程度異なる傾向を示している。実験の載荷治具は初期に水平に固定されているものの、ガードの変形に追従していた。このため、載荷荷重50kN以上の範囲においては、解析と実験で載荷位置がずれていることが想定され、ガード鉛直変位の誤差要因となったと考えられる。

図-10(a), (b)より、試番2については、実験で載荷を打ち切った50kNまでの範囲では概ね荷重・変位関係が一致していることが確認された。解析では、載荷荷重



(a)載荷前



(b)載荷中

図-6 検証試験の載荷状況

40kNの時点で載荷点のガード水平変位が約8mm程度急進しており、ガード材の塑性変形が進行したためと考えられる。しかし、実験では急進は確認されず滑らかな荷重・変位関係となっている。原因として、材料の応力・ひずみ特性の差異や、載荷治具の接触位置のずれによるガード姿勢の差異等が考えられる。載荷荷重50kN時のガード変位の差異は、水平方向で12%、鉛直方向で8%であり、設計への適用に問題ない範囲に収まることが確認された。

図-11(a), (b)より、試番3については、載荷荷重20kNを超える領域で載荷点のガード水平変位が他試番より進行する傾向がみられ、解析は載荷終了までの荷重・変位関係を再現していることが確認された。なお、他試番より荷重・変位曲線の傾きが小さいため、表-3の載荷荷重に対する変位の差は比較的大きい傾向がみられた。

図-9(c)および図-12(c)より、試番1, 4については、ガードひずみと載荷荷重の関係に2倍以上の差異が生じている。ブロック直上で載荷する条件では、ガードひずみの評価点が応力分布が急変する箇所となっているため、載荷位置のガード長手方向の差異や、部材間の隙間により生ずる接触状況差異により、得られるひずみ値が大きく変化する可能性があり、値に差を生じたものと考えられる。

図-10(c)より、試験2については、載荷荷重50kN程度まで荷重・ガードひずみ関係が良好に一致していることが確認された。図-11(c)より、試験3については載荷荷重25kNを超える範囲でガードひずみ値に差が見られ、試験の方が小さい載荷荷重でガードの塑性変形が進行したものと考えられる。しかし、載荷荷重25kNまでの荷重・ガードひずみ関係は良好に一致している。試験2および3については、ブロックと載荷点が水平方向に離れているため、ガードひずみ評価点近傍の応力が単純な圧縮および引張の滑らかな分布となり、誤差が少なくなったものと考えられる。

図-9(d)より、試験1のブロックのひずみについては、初期の荷重・ひずみ関係を含め、実験と解析結果が大きく乖離する結果となった。原因として、当該試験はブロックの直上を載荷しており、載荷位置のガード長手方向および鉛直方向のずれが、ひずみ値に現れやすいことが考えられる。同様にブロック直上を載荷している試験4についても、図-12(d)に示すように、初期の荷重・ひずみ関係や載荷終了時のひずみ値が異なる結果となった。

レールとの組み合わせ部であるひずみ評価点付近は、応力集中する箇所である。ブロックは要素長約5mmの有限要素で離散化しているものの、この応力集中を精度よく評価するには、より細かい離散化が必要となる。しかし、本手法は動的陽解法を採用しており、最小要素サイズによって時間増分が決定され、本章の例では $6.0 \times 10^{-7} \text{sec}$ の時間増分となっている。この時間増分で準静的な条件や走行シミュレーションへの適用を行うには、1～8秒間程度の現象時間を時間積分する必要がある、多大な時間を要する。また、動的陽解法は並列処理による速度向上が期待できる手法であり、要素数の増加による計算時間の増加を軽減することは可能であるが、時間方向には並列処理ができないため、現象時間が長い当該問題の場合は並列処理による計算負荷軽減効果は限定される。現時点での計算アルゴリズムと計算機環境では、実用的な走行シミュレーションへの適用を前提とすれば、要素長約5mmの有限要素での離散化が現実的であると考ええる。

図-10(d)より、試験2については、ガード変位と同様に解析結果では載荷荷重40kNの時点でブロックひずみが $2000 \mu \epsilon$ 程度急進している。原因としては、ガード変位の場合と同様に材料の応力・ひずみ特性の差異や、載荷治具のガード長手方向のずれによるガード姿勢の差異等が考えられる。図-11(d)より、試験3については、荷重・ブロックひずみ特性は、実験と解析で概ね一致する結果となった。但し、ひずみ評価点A4については、荷重・ブロックひずみ特性が解析と実験で異なる結果となった。

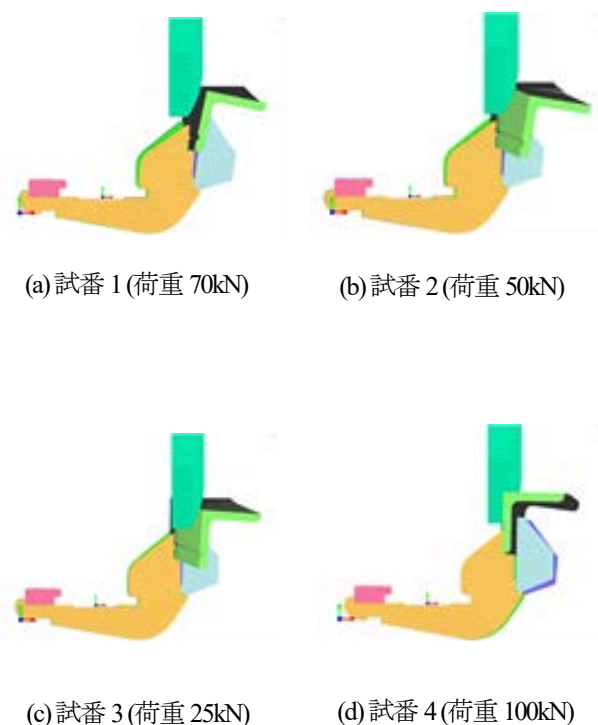


図-7 軌きよう載荷試験の再現解析結果（変形形状）

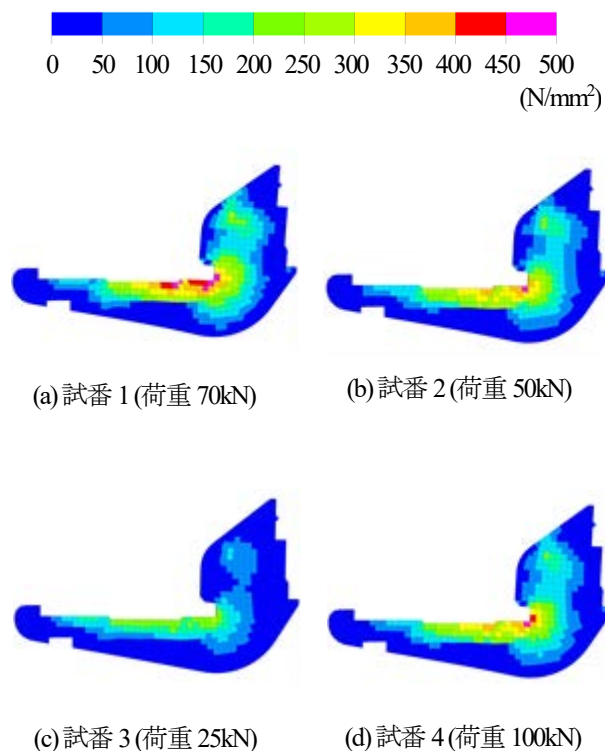


図-8 軌きよう載荷試験の再現解析結果（最大主応力）

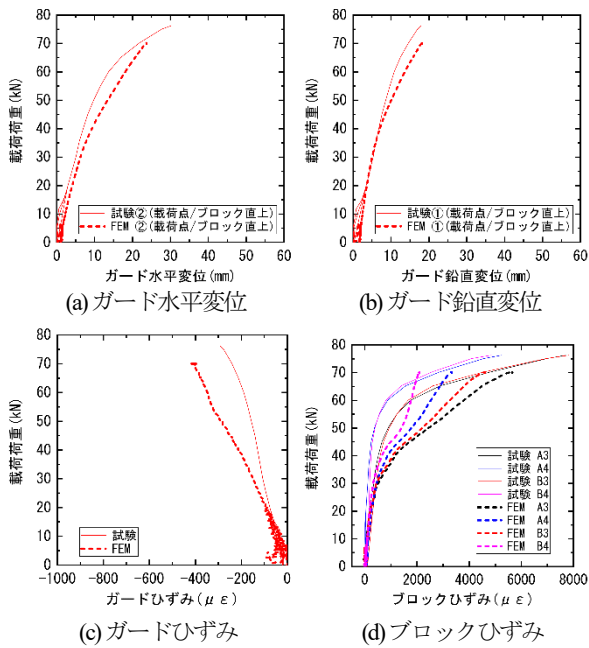


図-9 軌きょう载荷試験と再現解析結果(試番1)

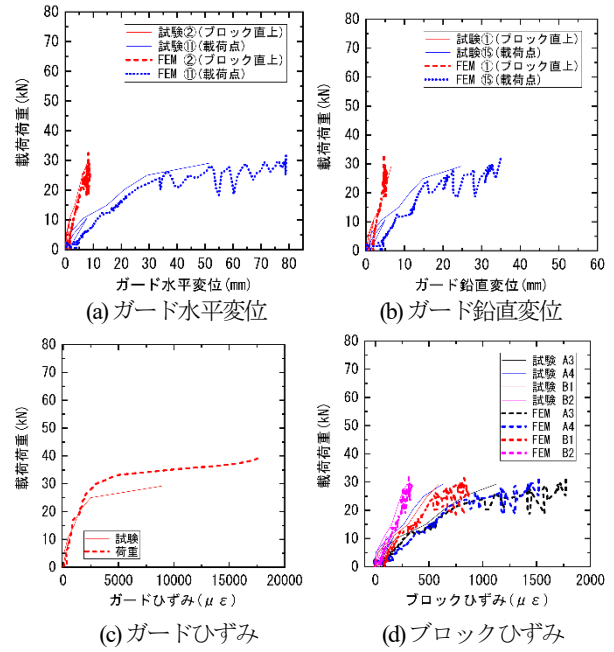


図-11 軌きょう载荷試験と再現解析結果(試番3)

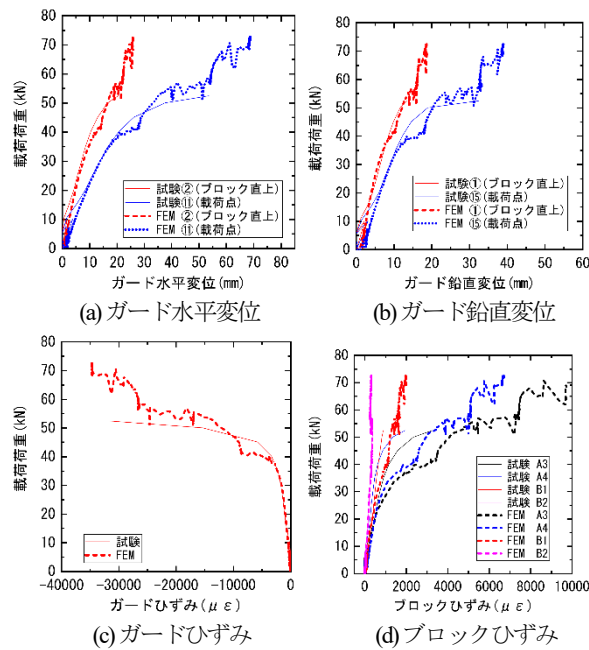


図-10 軌きょう载荷試験と再現解析結果(試番2)

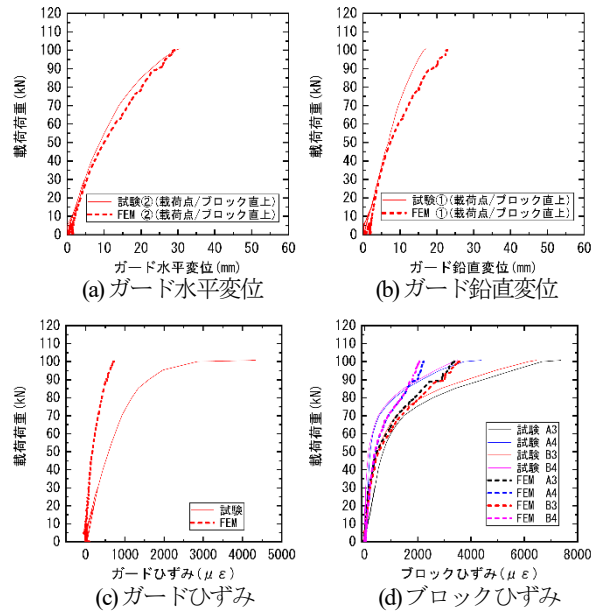


図-12 軌きょう载荷試験と再現解析結果(試番4)

表-3 軌きょう载荷試験のガード変位の比較結果

試番	荷重 (kN)	箇所	ガード水平変位			ガード鉛直変位		
			実験 (mm)	解析 (mm)	差 (%)	実験 (mm)	解析 (mm)	差 (%)
1	70	载荷点	21.7	23.7	9.0	14.6	18.2	24.8
2	50	载荷点	37.6	33.2	-11.7	18.9	20.4	7.7
		ブロック直上	16.6	16.6	0.1	11.7	12.2	4.6
3	25	载荷点	29.1	35.6	22.3	14.9	20.7	38.5
		ブロック直上	6.1	6.3	3.1	5.7	4.6	-19.5
4	100	载荷点	29.3	29.0	-0.9	16.5	22.8	38.4

(3) 考 察

軌きょうに組み入れた際の静的水平载荷試験との比較検証により、実際の供試条件に近い状態の静的な力学的妥当性を確認した。その結果、荷重・ガード変位の関係は概ね再現できているが、レールとの取り付け部材であるブロックの発生応力は、評価点によっては大きな差を生ずる結果となった。部材応力の評価精度を向上させるためには、より小さい有限要素での分割が必要となるが、動的陽解法では時間増分幅も小さくする必要があり、現時点での計算環境では、より高い精度向上は難しいと考えられる。

5. ケーススタディによる評価

(1) 検討変数

検討変数として、ブロックから载荷点までの距離、水平および鉛直荷重を対象とした。変数の範囲を表-4に示す。水平荷重は設計荷重である30kNとし、鉛直荷重は車輪背面とガード材との摩擦係数を0.3と仮定し、9kNを設定した。

表-4 解析ケース一覧

変数	範囲
ブロックから载荷点までの距離(mm)	0, 100, 200, 300, 400, 500
水平荷重(kN)	30kN,
鉛直荷重(kN)	0kN, 9kN

(2) 評価指標

本評価では評価指標として、ガードの軌間内側への水平変位と鉛直下向き変位を対象とした。水平変位は図-13に示す通り、乗り上がった車輪がレール頭面中央までに達するまでの距離である19mmを目安値とし、レール頭面の半径13mmの曲線にかかるまでの距離である40mmを限度値とした。鉛直変位は車輪背面の垂直部で脱線防止ガードと接触する範囲となる-11mmを目安値とし、車輪フランジ先端面の半径14mmの曲線にかかるまでの範囲で接触する限度である-26mmを限度値とした。これらの条件を表-5に示す。

なお、これら目安値と限度値については、軌間1067mm、スラック10mm、修正円弧頭面、車輪内面間距離990mmの場合を想定している。

表-5 評価指標

評価指標	目安値	限度値
ガード水平変位	19mm	40mm
ガード鉛直変位	-11mm	-26mm

(3) 解析結果

ケーススタディの結果を図-14に示す。ブロックから载荷点までの距離の増加に伴い、ガード変位が増加する傾向が確認された。ブロックから载荷点までの距離が300mmを超えるケースでは、前述の評価指標の目安値を超えることが分かった。鉛直荷重による影響により、ブロックから载荷点までの距離が100mm、200mm、300mmの場合に、水平変位はそれぞれ6%、10%、20%増加することが分かった。

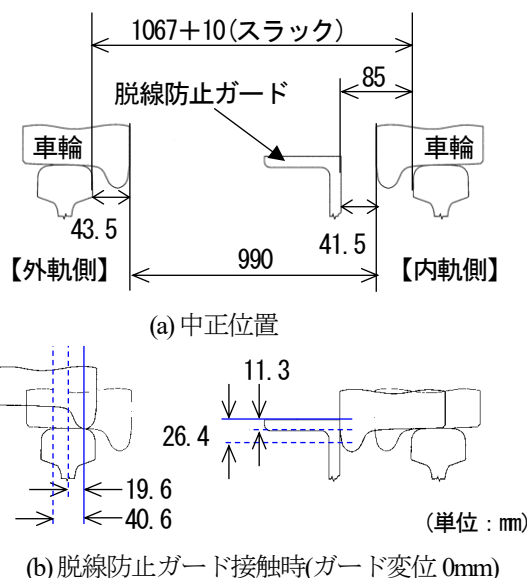


図-13 脱線防止ガードと車輪との位置関係

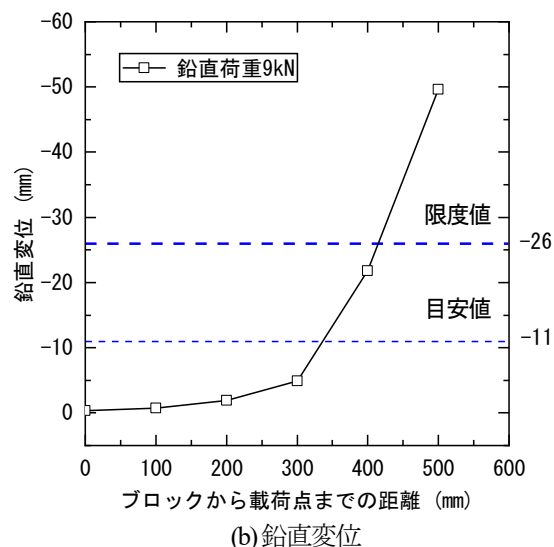
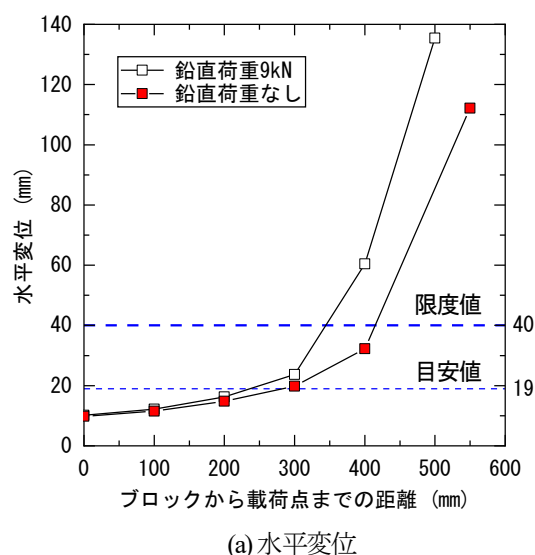


図-14 ケーススタディの結果

(4) 考 察

解析結果から、ブロックからガード材端部までの距離が200mmまでの範囲に収まっていれば、十分な脱線防止効果が得られ、300mmまでの範囲に収まってれば、概ね良好な脱線防止効果が得られると推定される。

なお、予め乗り上がった車輪が弱点箇所を通過する状況下では、ガード端部の水平剛性が小さいことから、ガード端部への作用荷重は軽減されと考えられ、本検討結果で得られたブロックからガード材端部までの距離の制限は、緩和できると考えられる。ただし、脱線防止の観点からは、ガード材端部へブロックを取り付けることが望まれる。

6. まとめ

本研究では、脱線防止ガードの弱点箇所を対象とした静的強度評価を目的とし、有限要素法による解析モデルの構築を行い、静的載荷試験との比較検証を行った。構築した解析モデルを用いて、レールへの取り付けブロックとガード端部までの距離を変数としたケーススタディを実施した。その結果、載荷荷重とガード水平変位の関係は再現できていることが確認された。ケーススタディの結果、設計荷重に耐えうるブロックの取り付け条件が明らかとなった。

今後は、構築した解析モデルを車両走行シミュレーションへ拡張し、車両が脱線防止ガードと接触走行する場合を想定した評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 保線工学編集委員会: 保線工学<下>, 鉄道現業社, 2018.
- 2) 日本国有鉄道: 東海道本線鶴見事故調査委員会報告書, 日本国有鉄道, 1968.
- 3) 平田五十, 茂木重六: 脱線防止ガード, 鉄道線路, Vol. 16, No. 11, pp. 23-29, 1968.
- 4) 新幹線脱線対策協議会: 第14回「新幹線脱線対策協議会」資料4(新幹線の地震対策の進捗状況について), 国土交通省鉄道局技術企画課, 2017.
- 5) 関雅樹, 小長井一男, 村松浩成, 渡邊康人, 可知隆, 古関潤一: 地震時の脱線防止ガードに関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 69, No. 1, pp. 1-18, 2013.
- 6) 吉田敏幸, 片岡宏夫, 平出壮司: 脱線防止ガードに対する水平載荷試験, 新線路, Vol. 69, No. 12, pp. 21-23, 2015.
- 7) 西宮裕騎: 脱線防止ガード端部の強度評価を対象とした弾塑性解析モデルの構築, 第24回鉄道技術・政策連合シンポジウム (J-RAIL2017) 講演論文集, S2-11-4, 2017.
- 8) 原田昭治, 野口徹, 矢野満, 小林俊郎, 鈴木秀人: 球状黒鉛鉄の強度評価, アグネ技術センター, 1999.

(2019.4.5 受付)

EVALUATION OF THE STRENGTH OF THE ANTI-DERAILMENT GUARD AT ITS WEAK POINT WHERE WHEEL LATERAL FORCE IS ACTING

Yuki NISHINOMIYA

The continuous maximum length of a guard angle to prevent flange climb derailment in sharp curves is limited due to thermal expansion. And near the end and in the middle of the guard angle, blocks that are devices for fastening it to the rail are attached. However, the block may be attached at a position away from the end, in which case the safety margin length is unknown and a structurally weak point is given rise to.

In this study, for the purpose of static strength evaluation of the weak point of the anti-derailment guard, a finite element analysis model was constructed and the result obtained from the analysis model were compared with the results obtained from the static verification test.

As a result, it was confirmed that the analysis model well reproduced the relationship between the load and the horizontal displacement of the guard. And as a result of a case study based on the model proposed in which the distance between the fastening block and the end of anti-derailment guard was treated as a variable, the fastening conditions of the block satisfying the design load became clear.