

水平 3 点曲げ試験によるレール継目部の横曲げ剛性の評価

鉄道総合技術研究所 正会員 ○細見 章人

鉄道総合技術研究所 正会員 山岡 大樹

鉄道総合技術研究所 正会員 玉川 新悟

鉄道総合技術研究所 正会員 西宮 裕騎

1. はじめに

近年、軌道の FEM 解析モデルを用いて、様々な条件を想定した座屈解析が行われている¹⁾²⁾。これらの解析は、ロングレール区間を対象としたものであるが、非ロングレール区間においても軌道の座屈に対する安全性の向上は重要な課題となっている³⁾。上記の解析モデルを非ロングレール区間に適用するためには、レール継目部のモデル化が必要となる。レール継目部は、継目板と継目板ボルトにより 2 本のレールを連結した構造であり、一般部と比較して、座屈時の曲げ変形に対する剛性（以下、横曲げ剛性）が異なると考えられる。ただし、これを定量的に示した事例はみられない。本稿では、非ロングレール区間における FEM 解析モデルを構築するための要素試験として、レール継目部の水平 3 点曲げ試験（以下、3 点曲げ試験）を実施し、レール継目部の横曲げ剛性を評価した結果を報告する。

2. 3 点曲げ試験

2.1 試験概要

図 1 に 3 点曲げ試験の状況を示す。本試験では、2m 間隔で配置した支点治具上に、継目部を有する全長 2.4m の試験用レールを横倒し状態で設置し、継目板の中央を鉛直下向きに載荷した。試験用レールは、支点治具と試験用レール頭部および底部の側面との干渉を防ぐため、支点周辺を切削加工している。測定項目は、荷重、レール継目部のたわみ量および継目板ボルトの軸力とした。

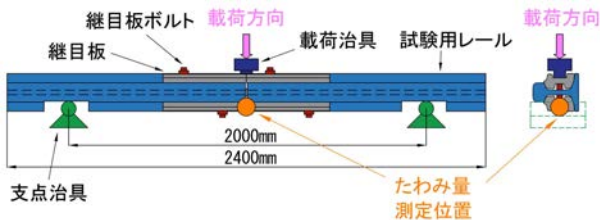


図 1 3 点曲げ試験の状況

2.2 試験条件

表 1 に 3 点曲げ試験の条件を示す。本試験は、50kgN レールと 60kg レールの普通継目部を対象とした。また、継目板ボルトの締結トルクは、緊締度が及ぼすレール継目部の横曲げ剛性への影響を確認するため 500N・m および 250N・m とし、遊間を規定値 6mm と夏季高温時の無遊間状態を想定した 0mm とした。載荷は、0kN→10kN→0kN の載荷サイクルを 3 回行い、その後、0kN→20kN→0kN の載荷サイクルを 3 回行い、合計 6 サイクル行った。なお、本試験では、継目板腹部への塗油は行っていない。

表 1 試験条件

継目種別	継目板ボルトの 締結トルク (N・m)	遊間 (mm)
50kgN 普通継目	500	6
		0
	250	6
		0
60kg 普通継目	500	6
		0
	250	6
		0

2.3 試験結果

図 2 に載荷 3 サイクルの平均たわみ量を示す。レール種別で比較すると、60kg レールの試験体が 50kgN レールの試験体よりもたわみ量が小さくなった。これは 60kg レールの断面 2 次モーメントが 50kgN レールよりも大きいためと考えられる。また、荷重 10kN と 20kN の場合を比較すると、50kgN、60kg レールの試験体ともに、締結トルク 500N・m ではたわみ量が 2.0～2.1 倍になっているのに対して、締結トルク 250N・m では、たわみ量が 2.2～2.4 倍程度となっている。試験後の外観観

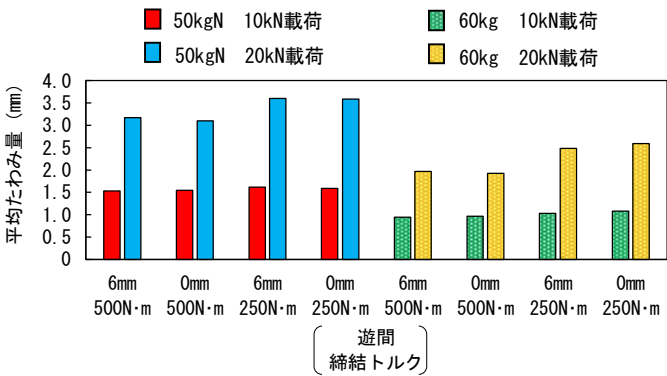


図 2 載荷 3 サイクルの平均たわみ量

キーワード：ロングレール，座屈，レール継目部，曲げ剛性
連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 （公財）鉄道総合技術研究所 軌道構造 TEL042-573-7275

察では、いずれの試験用レールも変形は認めらず、また、緩解後のボルトに軸力は残留していなかった。なお、50kgN、60kg レールの試験体の遊間によるたわみ量の差は最大で 0.11mm であった。図 3 に締結トルク 250N・m、遊間 0mm で載荷した 50kgN レールの試験体の荷重とボルト軸力の関係を示す。なお、図 3 は継目中央側のボルト 1 本分の測定結果である。20kN までの 4 サイクル目の載荷において、荷重が 10kN を超過した付近から軸力の低下がみられたものの、5 サイクル目と 6 サイクル目の載荷では軸力の低下はみられなかった。上記の軸力の低下は、載荷によりレール、継目板および継目板ボルトの姿勢が変化することで生じたと考えられる。以上のことから、荷重が大きくなると、部材の弾性変形だけではなく、レール、継目板および継目板ボルトの姿勢の変化によってもたわみ量が大きくなると考えられる。

3. レール継目部の横曲げ剛性の評価

試験体であるレール継目部を変断面の梁と仮定し、中央集中荷重が作用した際のたわみ量からレール継目部の横曲げ剛性を算出した。図 4 に示すように、レール継目部の z 軸まわりの断面 2 次モーメントを I_1 、レールの z 軸まわりの断面 2 次モーメントを I_2 とした場合、支点からの距離 x におけるたわみ量 y は、初等梁理論を用いて次式で表される。なお、試験体はすべて鋼材で構成されるため、ヤング率 E は一定とした。表 2 に計算諸元を示す。

$$y = -\frac{P}{EI_1} \left\{ \frac{1}{12} x^3 - \frac{L^2}{16} x + \frac{b^3}{6} \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \right\} \quad (b \leq x \leq L/2)$$

図 2 に示した継目中央位置 ($x = L/2$) でのたわみ量を上式に代入し、レール継目部の断面 2 次モーメント I_1 を推定し、これに E を乗じてレール継目部の横曲げ剛性 EI_1 とした。図 5 にレール継目部の横曲げ剛性の推定結果を示す。ここで、50kgN レールと 60kg レールの横曲げ剛性 EI_2 は、表 2 より $0.66\text{Nmm}^2 \times 10^{12}$ および $1.05\text{Nmm}^2 \times 10^{12}$ であるため、レール継目部の横曲げ剛性はレール単体よりも大きいことを確認した。また、締結トルク 500N・m では、20kN 載荷時の横曲げ剛性が 10kN 載荷時よりも平均 4%程度低下し、締結トルク 250N・m では、平均 20%程度低下しており、締結トルクが小さい方が横曲げ剛性の低下割合は大きかった。以上のことから、レール継目部は、レール単体よりも横曲げ剛性が大きいものの、レール継目部に加わる荷重やボルトの軸力低下により、横曲げ剛性が低下すると考えられる。一方、遊間がさらに大きい場合は明らかではないが、本検討の範囲内では、遊間によるレール継目部の横曲げ剛性の違いはみられなかった。

4. まとめ

本稿では、非ロングレール区間における FEM 解析モデル構築のための要素試験として、レール継目部に対して 3 点曲げ試験を実施し、レール継目部の横曲げ剛性を評価した。今後、得られた知見をもとに、非ロングレール区間における FEM 解析モデルの構築とこれを用いた座屈解析に取り組む予定である。

参考文献

1) 中田健太他：復元通り変位原波形に基づく軌道座屈予測に関する基礎的検討，第 26 回鉄道工学シンポジウム論文集，2022。
2) 玉川新悟他：軌道検測車で測定した通り変位波形に基づくロングレールの実用的な座屈発生温度の推定法，構造工学論文集，Vol.69A，2023。
3) 西川貢：夏に備えて - JR 九州における著大な通り変位対策，新線路，Vol.74，2020。

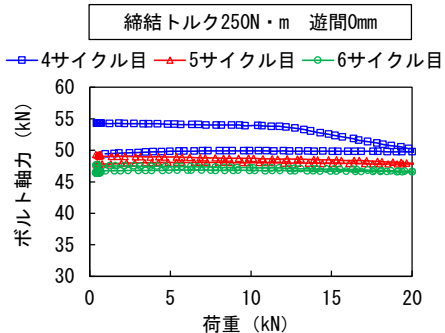


図 3 50kgN 普通継目の載荷荷重と軸力の関係

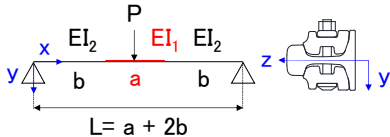
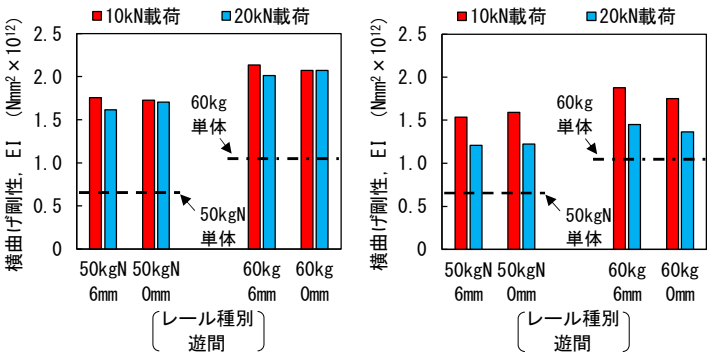


図 4 試験体の単純梁モデル

表 2 計算諸元

項目	50kgN	60kg
継目板長さ (mm)、a	560	820
レール単体長さ (mm)、b	720	590
支点間距離 (mm)、L	2000	
ヤング率 (N/mm ²)、E	2.06 × 10 ⁵	
レール単体断面 2 次モーメント、I ₂ (cm ⁴)	322	512
載荷荷重 (kN)、P	10、20	



(a) 締結トルク 500N・m (b) 締結トルク 250N・m

図 5 レール継目部の横曲げ剛性の推定結果