

講演概要 軌間拡大リスクに対するレール横圧 載荷治具を用いた評価法

緒方 正剛¹・佐藤 安弘²

¹正会員 交通安全環境研究所 交通システム研究部 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)

E-mail:ogata@ntsel.go.jp

²正会員 交通安全環境研究所 交通システム研究部 (〒182-0012 東京都調布市深大寺東町7-42-27)

E-mail:ya-sato@ntsel.go.jp

急曲線部などでは列車の走行に伴う横圧がレールに作用する一方で、木まくらぎの劣化などにより犬くぎによるレール締結力が低下すると、軌間拡大が発生し、脱線事故につながるリスクが高まる。まくらぎの劣化等については目視による異常の判別を要し、熟練した技能を要することから、異常の判断基準を数値で示せることが望ましい。

そこで、横圧方向の荷重をレールに載荷でき、かつ、載荷荷重に対する軌間の変化を測定できる治具を製作し、この治具を用いることによって、締結状態の良否を評価する方法を検討した。実験用軌道における実験及び現地実験によって、横圧載荷治具による荷重と軌間拡大の関係に基づき、締結状態を含むまくらぎの不良を判断できる可能性を示した。

Key Words : gauge widening, wide gauge derailment, lateral force, track maintenance, railway

1. はじめに

鉄道の軌道構造として古くから用いられてきた木まくらぎ軌道は、地方鉄道等において現在も広く用いられている。急曲線部などでは列車の走行に伴い比較的大きな横圧がレールに作用する一方で、木まくらぎの劣化などにより犬くぎによるレール締結力が低下すると、軌間拡大が発生し、脱線事故につながるリスクが高まる。近年、地方鉄道において軌間拡大による脱線事故が目立っており、まくらぎや締結装置の維持管理が十分行われていない状況が指摘されている¹⁾。

軌道の維持管理において、まくらぎの劣化等については目視による異常の判別を要し、熟練した技能を要することから、異常の判断基準を数値で示せることが望ましい。従来から、軌道検測車を用いた動的な軌道変位の測定によって、輪重や横圧が作用する条件での軌間変位を管理することができるものの、コスト等の面から軌道検測車を導入することが困難な地方鉄道事業者もある。

そこで、横圧方向の荷重をレールに載荷でき、かつ、載荷荷重に対する軌間の変化を測定できる治具を製作し、締結の不良状態を模擬した実験を行った。さらに、実際の木まくらぎ、犬くぎ締結における軌道条件でこの治具

を用いた実験を実施し、締結状態の良否を数値で評価できるかを検討したので報告する。

2. 横圧載荷治具の検討と製作

軌間拡大によるリスクを線路全線に渡って把握するためには、走行中に動的な軌間変位が測定可能であることが望ましい²⁾が、軌道検測車以外の方法で正確に把握することは、現状では困難となっている。そこで、目視等でまくらぎの劣化等について疑われる箇所において、レールに左右方向の荷重をかけ、軌間の変化を簡易に評価する方法を検討した³⁾。このために製作した治具の仕様を表-1及び図-1に示す。

表-1 横圧載荷治具の仕様

構成	油圧ジャッキ, 手動ポンプ等
最大荷重	15kN(ロードセルによる測定)
軌間	1435mm, 1067mm(部材組替により対応)
軌間拡大量の最大値	100mm(デジタル式リニアスケールによる測定)
載荷部位	レール頭部(併用軌道対応)
電源	乾電池等(商用電源不要)

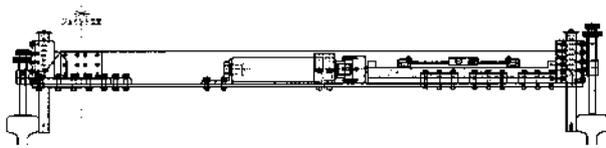


図-1 横圧载荷治具

3. 実験用軌道における実験

(1) 実験用軌道の概要

実験室内の実験用軌道において、製作した横圧载荷治具を用いた実験を行い、レール締結状態と軌間変化の関係を把握した。横圧载荷治具の設置状況を図-2に示す。

実験用軌道の諸元は表-2に示すとおりである。



図-2 実験用軌道への横圧载荷治具の設置状況

表-2 実験用軌道の諸元

軌道全長	5m(直線)
軌間	1435mm
レール種別	50N
まくらぎ種別	PCまくらぎ
まくらぎ配置本数	6本/5m
締結装置	二重弾性締結装置(締結トルク100Nm)
道床	なし(実験室のコンクリート床上に設置)

(2) 実験方法

実験用軌道の全長が限られていることから、実験可能な条件は限られているものの、軌道の状態について以下の4条件を設定し、実験を行った。

- 締結装置が全て正常(表-2に示す締結トルク)の場合
- まくらぎ6本のうち中央部2本の締結装置が緩んでいた場合(まくらぎ不良2本：締結装置8カ所の締結トルクが0Nmでそのほかは正常)
- 中央部3本の締結装置が緩んでいた場合(まくらぎ不良3本)

- 中央部4本の締結装置が緩んでいた場合(まくらぎ不良4本)

横圧载荷治具を軌道の中央部に設置し、荷重は0.5kNずつ増加させ、それぞれの荷重における変位量(軌間拡大量)を測定する。最大荷重は5kNとする。同条件における荷重载荷を複数回実施する。

(3) 実験結果

荷重-変位曲線(横圧と軌間拡大量の関係)を図-3～図-5に示す。この実験結果より、以下のことがわかった。

荷重1～2kN程度では、軌間が動かないことがあるため、少なくとも3kN以上の荷重を载荷しないと、軌道側の条件による違いが判然としない。一方、5kNまでの载荷におけるいずれの条件においても、荷重と変位の間にはほぼ線形の関係があった。

また、締結状態が不良であるまくらぎの本数が増えるほど、同じ荷重による変位(軌間拡大量)が増加する。例えば、締結装置が全て正常の場合の荷重5kNにおける変位量は1.0mmであった。これに対し、まくらぎ不良本数4本の場合の荷重5kNにおける変位量は2.1mmであった。したがって、レール横圧载荷治具による荷重と軌間拡大量の関係に基づき、締結状態を含むまくらぎの不良を判断できる可能性があると考えられる。

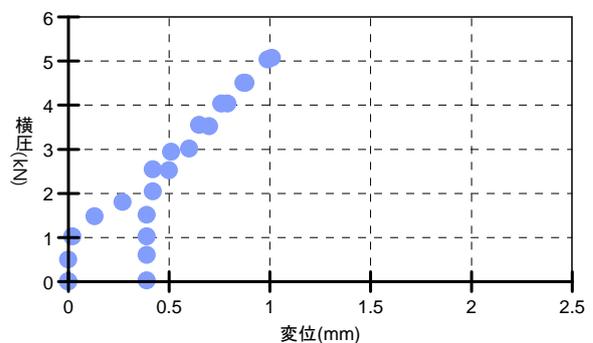


図-3 横圧と軌間拡大量の関係(まくらぎ正常)

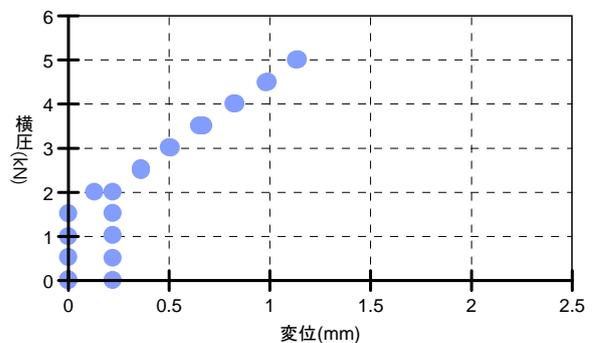


図-4 横圧と軌間拡大量の関係(まくらぎ不良2本)

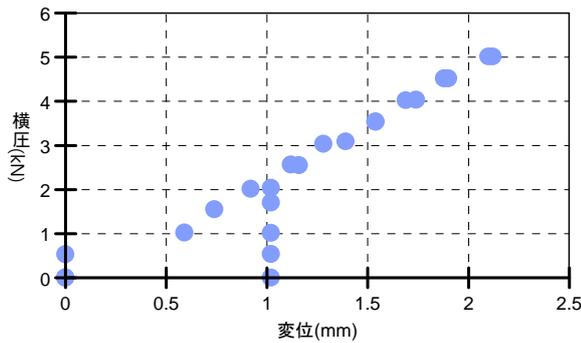


図-5 横圧と軌間拡大量の関係(まくらぎ不良4本)

(4) 計算式との比較

横圧による軌道の変形については、解析モデルが示されており⁶⁾、今回の実験条件に当てはめて以下の式で計算することができる。

$$z = \frac{1}{16EI_y} \cdot \frac{2Q}{\beta^3} \quad (1)$$

ここで、z: レール左右変位,

EI_y : レールの横曲げ剛性,

Q: 横圧,

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_1}{4EI_y}}$$

k_1 : 単位長さ当たりのまくらぎ横ばね係数

ここでは、 k_1 が未知のため、図-3に示すまくらぎ正常時の横圧と変位との関係から k_1 を逆算した。そして、まくらぎ不良の場合について、まくらぎ横ばね係数をまくらぎ不良本数に応じてそれぞれ $k_1/3$, $k_1/2$, $2k_1/3$ と置き、式(1)に基づき、横圧5kN時の変位量を計算した。その結果は図-6のとおりとなり、計算値と測定結果はおおよそ近い値となっている。

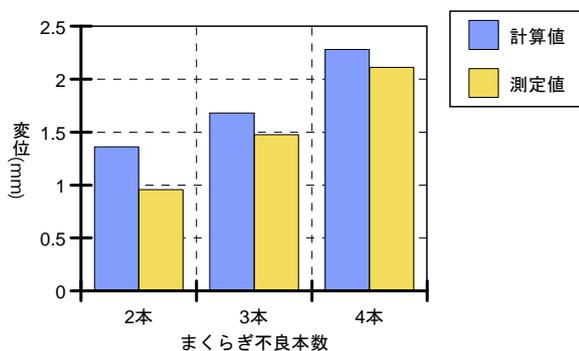


図-6 横圧5kN载荷時の軌間拡大量とまくらぎ不良本数の関係

このように、計算式によっても軌道の変形をある程度の精度で推定できるものの、劣化を含む現実の軌道状態

における k_1 のような諸元値を、試験や実測によらず正確に知ることは困難であるため、横圧载荷治具による定量的な把握を提案するものである。

4. 評価法の検討

(1) 軌間拡大量の推定と許容値の設定

上記の実験結果により、横圧と軌間拡大量の間にはほぼ線形の関係があることを前提に、車両の当該箇所通過時の発生横圧がわかれば、レール横圧载荷治具による荷重と軌間拡大量に基づき、車両による横圧発生時の軌間拡大量を推定することができる。軌間拡大による脱線事故は急曲線部で主に発生しており、曲線通過時の発生横圧は線形や車両諸元等によって異なるものの、定常横圧(転向横圧及び超過遠心力)と横圧変動分(車両の左右動の影響等)の和として算定することができる⁷⁾。ここでは一例として、曲線通過時の車両による発生横圧を40kNとする。

一方、軌間変位の限度値は、レールと輪軸の寸法関係から、一般に40mm程度となっている⁷⁾。当該箇所のスラックや静的な軌間変位によって、動的な軌間拡大量の許容値は異なる。一例として、昭和62年以前の旧国鉄におけるスラックの最大値25mmを適用した場合の保守余裕は、40mm-25mm=15mmとなる。なおかつ、当該箇所には軌間変位が生じている可能性がある。軌間変位の静的値は整備基準値を下回っているものとし、仮に+5mm(静的値)発生しているものとする、動的な軌間拡大量の許容値は15mm-5mm=10mmとなる。

(2) 実験結果を用いた評価例

以上の例について、実験用軌道の実験結果を当てはめて検討した結果を表-3に示す。

表-3 実験用軌道の実験結果に基づく評価例

まくらぎ連続不良本数(本)	2	3	4
軌間拡大量 (mm) (5kN载荷実験時)	1.1	1.5	2.1
軌間拡大量 (mm) (横圧40kN推定値)	8.8	12	16.8
軌間拡大量 (mm) (許容値)	10	10	10
判定	○	×	×

表-3では、まくらぎ連続不良本数2本までは、横圧40kN発生時の軌間拡大量は許容値を下回る一方、まくらぎ連続不良本数3本以上では許容値を上回ることを示している。文献6)によれば、「まくらぎの危険限界については、曲線部において連続2本以上、直線部においては3本以上、不良まくらぎが連続配列になると列車通過時の動的軌間拡大量が大きくなって7mmを超えることがあり、犬くぎの押し出しに対する残留変位も発生しやすく

なる」とされており、表-3の結果はこのことと整合性があるものと考えられる。

5. 現地実験による評価法の検証

(1) 実験状況

木まくらぎ、犬くぎ締結の軌道構造となっている構内の側線で現地実験を実施した。実験では、横圧載荷治具を用いて、荷重と変位（軌間拡大）の関係を複数箇所にて把握した。2カ所はまくらぎ及び締結の状態が比較的良好と思われる箇所、2カ所はまくらぎの劣化により締結状態が比較悪くと思われる箇所を選定した。軌道条件を表-4に示す。実験による軌道の破損を避けるため、載荷荷重は3kNまでを目安とし、載荷中に軌間拡大量が3mmに達した場合は、荷重はそれ以上かけないこととした。

表-4 現地実験における軌道の諸元

軌間	1067mm			
レール種別	30kg			
まくらぎ種別	木まくらぎ			
まくらぎ配置本数	6本/5m			
締結装置	犬くぎ(1まくらぎ当たり4本)			
道床	砕石			
地点	1	2	3	4
線形	直線	曲線	直線	曲線
締結状態(目視)	不良	良	不良	良(最近打直し)

(2) 実験結果

4カ所の地点のうち、地点1については、締結状態不良により横圧を1.5kN載荷した時点で変位が3mmに達する状況であったため、載荷を中止した。それ以外の地点について、前記4.章での検討に準じて、曲線通過時の発生横圧40kNの場合の軌間拡大推定値を求めた結果は、表-5の通りとなった。

表-5 現地実験結果及び締結状態の評価

地点	2	3	4
軌間拡大量 (mm) (3kN載荷実験時)	0.7	1.8	0.4
軌間拡大量 (mm) (横圧40kN推定値)	8.8	24.3	5.1
軌間拡大量 (mm) (許容値)	10	10	10
判定	○	×	○

地点1のほか、目視でも不良が疑われた地点3については、軌間拡大量は許容値を超えて大きくなると推定されるため、不良と判断される。ただし、地点3は直線区間であり、車両通過時の作用横圧が40kNをかなり下回ると思われるので、実際の軌間拡大量はかなり小さくなるものと考えられる。

一方、目視で締結状態が正常であった地点2及び地点4では、軌間拡大量の推定値は許容値を下回るため、実験結果からも正常と判断される。特に、犬くぎ締結直後の地点4は、最も軌間拡大量が小さいことが確認された。

このように、車両通過時の横圧の推定値と、当該箇所での横圧載荷治具による載荷荷重と軌間拡大量の関係がわかれば、締結の劣化状況やまくらぎの連続不良本数が不明な場合であっても、まくらぎの不良等による軌間拡大のリスクが定量的に把握可能になると考えられる。

なお、本評価法では、横圧載荷治具による荷重載荷時に、輪重に相当する上下方向の荷重がレールに作用していないため、レールとまくらぎとの間に横圧と逆方向に作用する摩擦抵抗力が実際よりも小さくなることが想定される。従って、軌間拡大に対しては実際よりも厳しい条件の評価となると考えられる。

6. まとめ

地方鉄道において発生している軌間拡大による脱線事故を予防するため、これまでの熟練した技能を要するまくらぎや締結の目視による異常の判断を支援できるように、横圧方向の荷重をレールに載荷でき、かつ、載荷荷重に対する軌間の変化を定量的に測定できる治具を製作し、締結の不良状態を模擬した実験を行った。

さらに、実際の木まくらぎ、犬くぎ締結における軌道条件でこの治具を用いた実験を行った。

その結果、横圧載荷治具による荷重と軌間拡大量の関係に基づき、車両による横圧発生時の軌間拡大量を推定することができ、締結状態を含むまくらぎの不良を判断できる可能性があると考えられる。これによって、これまでの熟練した技能を要するまくらぎや締結の目視による異常の判断を支援することができるものと考えられる。引き続き、より多くの軌道条件において現地実験を重ね、検証を進めることとしたい。

参考文献

- 1) 運輸安全委員会: 鉄道事故報告書, RA2018-1-2, 2018.
- 2) 運輸安全委員会: 鉄道事故報告書, RA2018-1-6, 2018.
- 3) 運輸安全委員会: 鉄道事故報告書, RA2018-4-1, 2018.
- 4) 石川, 坪川: 動的軌間・平面性測定装置の開発と性能検証試験, 第22回鉄道工学シンポジウム, 2018.
- 5) 緒方, 佐藤: レール横圧載荷治具を用いた軌間拡大のリスク評価の検討, J-Rail, 2018.
- 6) 須田, 長門, 徳岡, 三浦: 新しい線路-軌道の構造と管理, 日本鉄道施設協会, 1997.
- 7) 国土交通省鉄道局監修: 解説「鉄道に関する技術基準(土木編)改訂版(第三版), 2014.

(2019.4.5 受付)

ASSESSMENT METHODS FOR THE RISK OF GAUGE WIDENING BY USING A JIG TO LOAD LATERAL FORCE ONTO THE RAIL

Seigo OGATA, Yasuhiro SATO

At a sharp curve, lateral force, which is generated by the train running, acts on the rail. At that moment, if rail spike's fastening force is weak on account of deteriorated wooden sleepers or others, gauge is widen to increase the risk of derailment. Wooden sleepers or others are visually inspected if they are deteriorated to bear any problems. However, this visual inspection requires the skill and expertise, and, therefore, it is advisable to show the criteria of problems by numerical values.

In order to load the lateral force onto the rail and in order to measure changes in gauge caused by this load, a jig was made to work out methods to determine if the state of fastening is appropriate. As a result of experiments on a test track and on-site experiments by using such a jig, the relationship between the load and the value of gauge widening was obtained. On the basis of such relationship, possibilities were shown to be able to determine problems of sleepers including the state of fastening.