

講演 1. レール横圧载荷治具を用いた軌間拡大リスクに対する検討

交通システム研究部 ※緒方 正剛 佐藤 安弘

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⁾³⁾。

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。また、路面電車の軌道は舗装に覆われている場合、締結装置の状態を目視確認できない。

そこで、舗装除去がない低コストな検査として、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、実際の軌道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. 横圧载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⁴⁾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⁵⁾。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 横圧载荷治具の仕様

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)
载荷部位	レール頭部(併用軌道対応)
電源	乾電池等(商用電源不要)

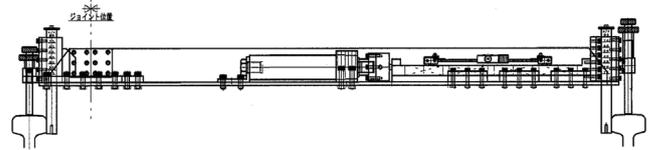


図1 横圧载荷治具

3. 実験用軌道における実験

3. 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)

3. 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不良本数の違いを見るため、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(まくらぎ連続不良2本:締結装置8箇所の締結トルクが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(まくらぎ連続不良3本)
- ・中央部4本の締結装置が緩んでいた場合(まくらぎ連続不良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. 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。

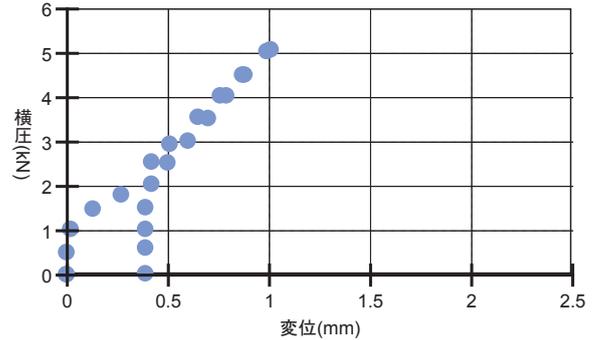


図3 横圧と軌間拡大量の関係(まくらぎ正常)

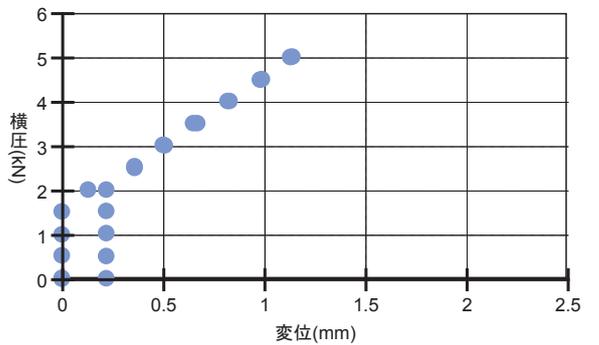


図4 横圧と軌間拡大量の関係(まくらぎ不良2本)

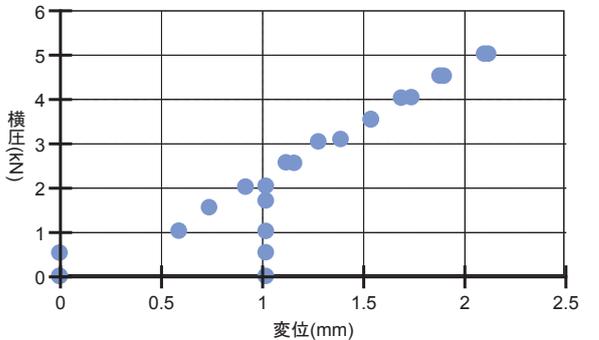


図5 横圧と軌間拡大量の関係(まくらぎ不良4本)

4. 評価法の検討

4. 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⁶⁾。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⁶⁾。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。

4. 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載荷実験時)	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7)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

5. 1. 構内側線における実験

5. 1. 1. 実験状況

地方鉄道の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(軌間拡大量)の関係を複数箇所で開催した。2箇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箇所はまくらぎの劣化により締結状態が比較悪く思

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 構内側線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	碎石			
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)

5. 1. 2. 実験結果

4箇所の地点のうち、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3章での検討に準じて、曲線通過時の発生横圧40kNの場合の軌間拡大量推定値を求めた結果は、表5の通りとなった。

表5 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のほかに、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。

5. 2. 併用軌道における実験

5. 2. 1. 実験状況

路面電車の併用軌道で現地実験を実施した。4箇所を選定し、横圧載荷治具を用いて、荷重と変位(軌間拡大量)の関係を把握した。1箇所は近年スラブ直結

構造に更新された箇所、3箇所は従来の木まくらぎ構造で締結が比較的緩いと思われる箇所で測定した。軌道条件を表6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までを目安とした。

表6 併用軌道における軌道の諸元

軌間	1435mm			
レール種別	50N			
まくらぎ種別	なし	木まくらぎ		
まくらぎ配置本数	スラブ2m	9本/5m		
締結装置	直結	犬くぎ		
道床	コンクリート	砕石		
地点	1	2	3	4
線形	直線	直線	直線	直線
締結状態(目視)	良	やや不良	不良	不良

5. 2. 2. 実験結果

前記3章での検討に準じて、路面電車で曲線通過時の発生横圧 23kN とした場合の軌間拡大推定値を求めた結果は、表7の通りとなった。

表7 実験結果及び締結状態の評価

地点	1	2	3	4
軌間拡大量 (mm) (3kN載荷実験時)	0.9	1.3	1.7	2.0
軌間拡大量 (mm) (横圧23kN推定値)	6.7	9.7	12.7	15.1
軌間拡大量 (mm) (許容値)	10	10	10	10
判定	○	○	×	×

舗装アスファルトのひび割れ状況等から、目視でも不良が疑われた地点3及び地点4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、曲線部では不良と判断される。地点2の締結状態では、判定結果は問題ないものの、曲線部では許容値に近い軌間拡大量となることも想定される。一方、スラブ直結構造に更新された地点1では、最も軌間拡大量が小さいことが確認された。ただし、実際の測定地点はいずれも直線区間であり、車両通過時の作用横圧がかなり小さくなると推定されるので、実際の測定地点では車両通過時の軌間拡大量はかなり小さいものと考えられる。

5. 3. 検証結果

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。現地実験の結果から、目視による劣化状

況と横圧載荷治具による判定結果は一致しており、しかも定量的に評価できることを確認した。

また、今回製作した治具は、狭軌及び標準軌、地方鉄道の軌道のほか、路面電車の併用軌道にも対応可能なことを確認した。

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、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によって、締結状態を含むまくらぎの不良を判断でき、これにより、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、現地の評価実績を積み重ねることとしたい。

最後に、実験に協力いただいた事業者各位に謝意を表します。

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) 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)
- 7) 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)