

講演 6. 地方鉄道における軌間拡大リスクの評価 の効率化に関する検討

交通システム研究部 ※一柳 洋輔 緒方 正剛 佐藤 安弘 篠田 憲幸（客員研究員）

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（左右方向の力）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（左右のレールの間隔が広がる状態）が発生し、脱線事故につながるリスクが高まる。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断を要し、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れる。5項目の軌道変位（高低、通り、水準、軌間、平面性）を測定する軌道検測車を用いれば、輪重や横圧が作用する条件での軌間変位の動的値を管理できるが、軌道検測車を導入せずに静的値で管理している地方鉄道事業者もある。

当研究所はこれまでに、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（横圧載荷治具）を製作した¹⁾。また、同治具で求めた荷重と軌間拡大量の関係に基づき、車両による横圧が作用した際の軌間拡大量を推定することで、締結状態を含むまくらぎの不良を判断できることを示した¹⁾。しかし、全線に渡り全てのまくらぎに対して同治具による評価を行うことは現実的でないため、評価すべき箇所絞り込みが必要と考えられる。そこで、小型情報端末を用いた新たな軌道監視手法²⁾を活用し、列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価すべき箇所を選定する方法について、車両運動シミュレーションや軌道検測車による軌道変位データ等を元に検討したので報告する。

2. 横圧載荷治具による評価法の概要

当研究所がこれまでに提案した、横圧載荷治具を用いてレールに横圧方向の荷重をかけることで軌間の変化を評価する方法の概要を説明する。

横圧と軌間拡大量の間にはほぼ線形の関係がある

ことから、横圧載荷治具により測定した荷重と軌間拡大量（表1の“a”）の関係にもとづき、実際に車両が曲線を通過する際の軌間拡大量（表1の“b”）は、車両通過に伴う発生横圧から推定できる¹⁾。ここで、曲線通過時の発生横圧は、線形や車両諸元等により異なるものの、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）の和として算定でき、表1では40 kNとしている¹⁾。

一方で、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40 mm程度となる³⁾。25 mmのスラック（曲線部における設計上の軌間拡大量）に加え、静的な軌間変位5 mmが発生していると仮定した場合の、動的な軌間拡大の許容値は10 mm（=40-25-5）となる（表1の“c”）。推定した軌間拡大量“b”と許容値“c”の比較から、締結状態を含むまくらぎの不良を判定した結果（表1最下段）は、目視による締結状態の良否と一致し、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ている¹⁾。

表1 横圧載荷治具による締結状態の評価例¹⁾

地点 No.	2	3	4
a: 軌間拡大量 [mm] (3 kN 載荷実験時)	0.7	1.8	0.4
b: 軌間拡大量 [mm] (横圧 40 kN 推定値)	8.8	24.3	5.1
c: 軌間拡大量 [mm] (許容値)	10	10	10
判定 (b < c)	○	×	○

3. 評価箇所の絞り込みに関する検討

前述の通り、当研究所は横圧載荷治具による測定結果にもとづき、車両による横圧が作用した際の軌間拡大量を推定することで、締結状態を含むまくらぎの不良を判断する方法を提案したが、軌間拡大リスクの評価を効率化するためには、横圧載荷治具による評価法を適用すべき箇所の絞り込みが必要と考えられる。一方、当研究所では地方鉄道における軌道管理の省力化を実現するために、小型情報端末を活用した軌道監視手法を検討しており²⁾、今回は小型情報端末で収集される列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価す

べき箇所を選定する方法について検討した。

3. 1. 車両運動シミュレーションによる検討

3. 1. 1. 検討方法

軌間変位を含む軌道変位が車両運動に及ぼす影響について、汎用シミュレーションソフト Simpack を用いて検討した。解析モデルの主要諸元を表 2 に示す。軌間等の軌道変位が存在する軌道モデル上で車両モデルを走行させ、その際の前台車中心直上の車体床面における振動加速度及び角速度を計算する。

3. 1. 2. 直線部における検討結果

図 1 の最上段のように直線部において静的に最大 25 mm の軌間変位（右レールに 10 mm、左レールに 15 mm の通り変位）が生じている箇所を車両が通過した際の、車体振動加速度等の計算結果を、図 1 の上から 2 段目以下に示す。軌間変位については、車体の上下と左右の加速度及びロールとヨーの角速度に影響するものの、その影響度は小さい。軌間変位が車体の上

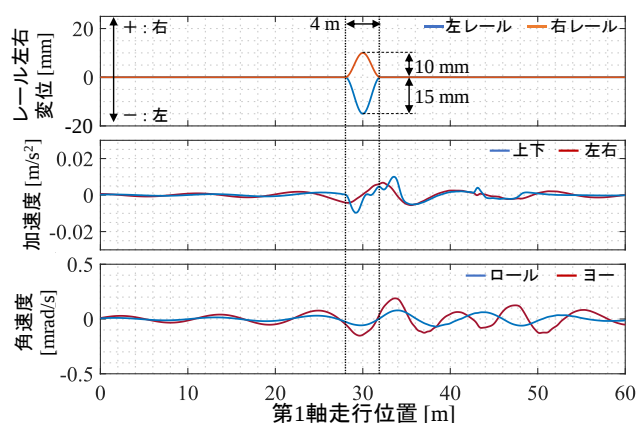


図 1 直線部軌間拡大箇所通過時の運動解析結果

表 2 解析モデルの主要諸元

	単位	数値等
車体質量	kg	26800
車体慣性半径 (ロール,ピッチ,ヨー)	m	1.4, 5.7, 5.7
台車枠質量	kg	1600
台車枠慣性半径 (ロール,ピッチ,ヨー)	m	0.66, 0.66, 1.1
輪軸質量	kg	1300
輪軸慣性半径 (ロール,ピッチ,ヨー)	m	0.62, 0.3, 0.62
二次ばね剛性 (前後,左右,上下)	kN/m	150, 150, 350
二次ばね減衰係数 (前後,左右,上下)	kN/(m/s)	0, 0, 35
左右動ダンパ減衰係数 (前後,左右,上下)	kN/(m/s)	20
一次ばね剛性 (前後,左右,上下)	MN/m	8, 6, 1
一次ばね減衰係数 (前後,左右,上下)	kN/(m/s)	0, 0, 1
車輪半径	m	0.43
軸距, 台車間距離	m	2.1, 13.8
一次・二次ばね左右間隔	m	2
軌間	m	1.067
車輪・レール間摩擦係数	-	0.3
車輪踏面形状	-	修正円弧
レール形状	-	50kgN

下加速度にもわずかに影響するが、これはレールと車輪の接触点が軌間拡大箇所において左右方向に変位すると同時に、車輪踏面勾配の影響によって車輪が上下方向に変位することが理由と考えられる。ただし、軌間変位が車体の上下加速度に及ぼす影響は、軌道の高低変位による影響に比べて一般に小さいことから、列車動揺のデータから軌間変位の影響のみを抽出することは困難と考えられる。

3. 1. 3. 曲線部における検討結果

左レールが外軌の半径 300 m の曲線部において、図 2 最上段に示すようにスラック 10 mm に加え静的に最大 25 mm の軌間変位（外軌側に 15 mm の通り変位、内軌側に 10 mm の通り変位（図 2 “内軌拡大”））を有する箇所を車両が通過した際の、車体振動加速度等の計算結果を図 2 の上から 2 段目以下に示す。曲線部で軌間拡大箇所を通過すると車体の上下加速度のほか、特に左右加速度、ロール角速度及びヨー角速度に影響し、その影響は図 1 の直線部における結果に比べて大きい。これは、曲線部では台車の前軸（第 1 軸）外軌側車輪がレールに追従して変位することから、外軌側の通り変位の影響を主に受けるためと考えられる。

前述の条件から内軌側のレール左右変位を 0 mm へ変更した場合（図 2 “内軌拡大無”）の左右加速度、ロール角速度及びヨー角速度を計算した結果は、前述の 25 mm の軌間変位の場合と差が認められないことから、内軌の変位状態に関わらず外軌側の影響が大きいことが確認できる。したがって、列車動揺のデータか

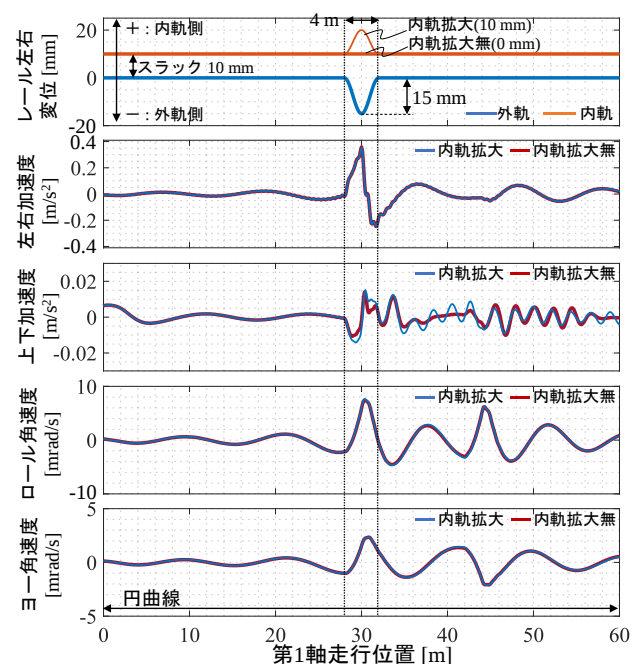


図 2 曲線部軌間拡大箇所通過時の運動解析結果

ら、外軌の通り変位の影響と、内外軌ともに拡大するような軌間変位の影響とを区別するのは難しい。

3. 1. 4. 考察

以上のシミュレーション結果から、軌間変位が車体振動加速度等に及ぼす影響を定量的に明らかにした。しかし、車体振動加速度等は軌間変位のほか高低変位や通り変位の影響を大きく受けるため、列車動揺から軌間変位のみを定量的に推定することは難しい。

もとより軌間拡大は急曲線部等で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レール締結力が低下することで発生しやすくなるため、軌間変位の増加に加えて高低変位も増加している場合があると考えられる。そのような曲線部については、高低変位と相関の高い列車動揺（上下加速度）⁴⁾にもとづいて抽出できる可能性がある。そこで、地方鉄道路線における実際の軌間変位、高低変位及び車体上下振動加速度をもとに以下の検討を進めた。

3. 2. 軌道検測車と列車動揺データに基づく検討

3. 2. 1. 検討方法

定期的に軌道検測車による軌道変位の検査が実施される地方鉄道路線において、小型情報端末を用いて営業列車の動揺の常時測定を行った結果、列車動揺（上下加速度）と高低変位との高い相関が得られている⁴⁾。よって、まず当該路線の中から比較的大きな横圧がレールに作用すると考えられる半径 300 m の曲線部を抽出し、この中から緩和曲線部を除き、軌道構造として木まくらぎ・砕石道床である円曲線 10 区間を対象に軌道検測車による高低変位と軌間変位（スラック含む）の測定データ（最大値）の関係を求めた。

次に、当該曲線区間における小型情報端末による列車動揺データと軌道検測車による軌間変位の関係を求めた。ただし、小型情報端末では GPS（Global Positioning System）による速度から、軌道管理のための列車位置を求めているが、トンネル等 GPS による列車位置同定が困難な箇所や、駅近傍で速度が遅く、列車動揺と高低変位との相関が低くなる曲線区間は対象外とした。

3. 2. 2. 軌間変位と高低変位の関係

前述の半径 300 m の曲線部において、軌道検測車による高低変位と軌間変位の関係を求めた結果を図 3 に示す。概ね高低変位が大きい曲線では、軌間変位も大きくなる傾向を示している。ただし、高低変位が 6.4 mm と小さいにもかかわらず、軌間変位が 27.0 mm と

大きな曲線が一部認められるが、当該曲線は図 4 に示すとおり、円曲線長が 25 m と短く、緩和曲線部において高低変位 19.3 mm が検出されており、曲線部全体に着目すれば、高低変位と軌間変位ともに大きい箇所といえる。以上の結果から、高低変位の大きな曲線部では、軌間変位も大きい可能性があることから、横圧载荷治具により評価すべき箇所として注目すべき対象になると考えられる。

3. 2. 3. 軌間変位と車体上下加速度の関係

次に、軌道検測車による軌間変位の検出波形と、それと同時期に測定した小型情報端末による列車動揺（上下加速度）のデータの例を図 5 に示す。列車動揺については、再現性を確認するため、営業列車による 3 回の測定データを重ね書きしている。また図 5 には、円曲線内における両者の最大値を示している。同様にして、図 3 と同じ曲線区間（列車位置同定が困難

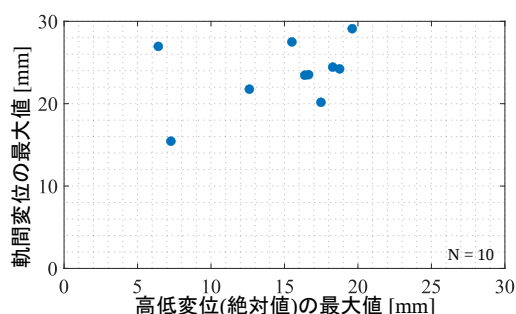


図 3 曲線部における高低変位と軌間変位の関係

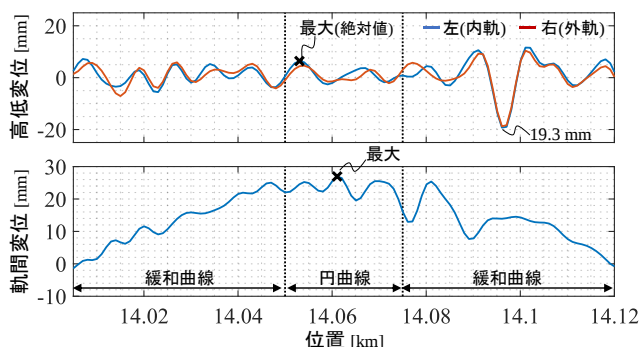


図 4 高低変位と軌間変位の検出データ例

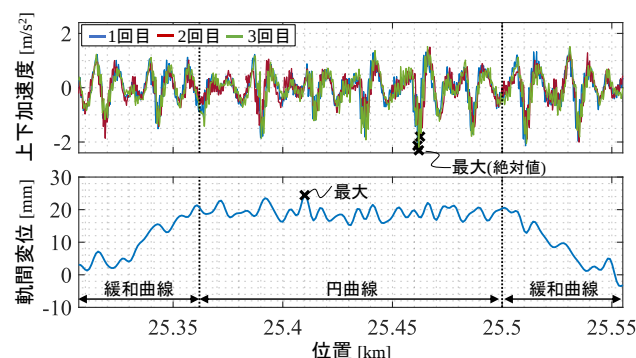


図 5 軌間変位の検出データと列車動揺データの例

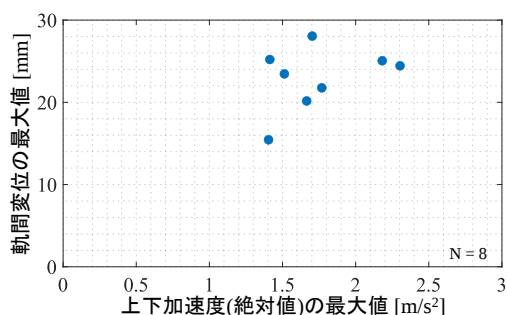


図6 曲線部における列車動揺と軌間変位の関係

な箇所や速度が遅い区間は対象外とした) において軌間変位と上下加速度の最大値を求め、図6にまとめて示す。図5に示したように、必ずしも同一曲線中での軌間変位の最大を観測した地点と、列車動揺の最大を観測した位置は一致しないものの、図6からは列車動揺の最大値が大きい曲線部で軌間変位の検測結果の最大値も大きい傾向が認められる。

4. 評価手順

以上の検討を踏まえ、列車動揺データから軌間拡大リスクを評価すべき曲線部を選定する手順を図7にまとめた。図7左側の小型情報端末による列車動揺データの測定、データ処理、及びヨー角速度による曲線部の抽出までは、小型情報端末を活用した新たな軌道監視手法²⁾に相当する。また、図7右下部の「目視等でまくらぎの劣化等について疑われる箇所」に対し、横圧载荷治具による荷重と軌間拡大量の関係を求め、そ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し、動的な軌間拡大量の許容値と比較して締結状態を含むまくらぎの不良を判断することは、これまでに提案した評価方法³⁾にかかるものである。

今回、軌間拡大リスクの評価の効率化を図る方法の一つとして、曲線部における上下加速度の最大値を抽出することで軌間拡大リスクを優先的に評価すべき箇所を選定する手順を示した(図7右上部に相当)。具体的には、上下加速度の最大値が比較的大きな曲線部において、優先的に横圧载荷治具による軌間拡大リスクの評価を行うこととする。ただし、車体上下振動はシミュレーションで検討した軌間変位の他に、高低変位の影響や列車速度の影響を受けることから、上下加速度の大きな曲線で必ずしも軌間拡大リスクの大きな箇所を網羅できるとは限らない。そのため、上下加速度の最大値が大きい曲線部以外にも、目視等でまくらぎの劣化等が疑われる箇所については、併せて軌

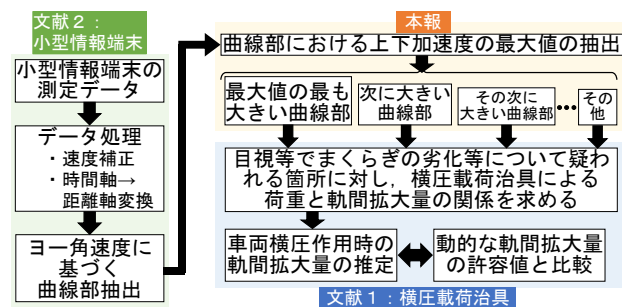


図7 軌間拡大リスクの評価手順

間拡大リスクを評価すべき箇所であると考えられる。

5. 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の予防のため、当研究所ではこれまでに横圧方向の荷重をレールに载荷でき、かつ载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用いて、締結状態を含むまくらぎの不良を評価する手法を提案した。今回、軌間拡大リスクの評価の効率化を検討するため、列車動揺のデータから軌間拡大リスクを評価すべき箇所を選定する方法について、車両運動シミュレーションや軌道検測車による軌道変位データを元に検討した。その結果、曲線部における上下加速度データの最大値を抽出することによって、軌間拡大リスクを優先的に評価すべき箇所を選定する手順を示した。

今後の課題としては、優先的に評価すべき曲線の選定手順にかかるデータ処理の自動化と実路線への適用、さらなる効率化の検討などが挙げられる。

本研究においてデータを提供していただいた会津鉄道株式会社に感謝の意を表します。本研究の一部はJSPS 科研費 JP 21K14113 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 緒方 正剛, 佐藤 安弘, “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”, 交通安全環境研究所フォーラム 2019, pp.3-6 (2019)
- 2) 緒方 正剛, “地方鉄道を対象とした軌道状態の省力化監視手法に関する取組”, 交通安全環境研究所講演会, 講演 1, pp.45-54 (2021)
- 3) 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)
- 4) 篠田 憲幸ほか, “携帯情報端末を用いた営業列車振動データにもとづく軌道管理手法”, 日本機械学会論文集, Vol. 88, No. 911 (2022)