

木まくらぎ区間における軌間変位進みの分析と予測モデルの構築

05000761 (公財) 鉄道総合技術研究所 *昆野 修平 KONNO Shuhei
02602780 (公財) 鉄道総合技術研究所 三和 雅史 MIWA Masashi

1. はじめに

鉄道線路(軌道)では、車両通過時に車輪からレールに作用する力により軌間(2本のレールの間隔)が拡大し、車輪が軌間内に落下して脱線(軌間内脱線)に至ることがある。主な原因はレール締結状態の不良に伴って軌間変位(軌間の設計値に対するズレ)が大きいことなどであり、鉄道事業者は脱線を防ぐために軌間変位の測定値と管理値を照合して保守を行っている。しかし、実際には時間経過に伴う軌間変位の増加(軌間変位進み)は線区や箇所によって様々であるため、このような各箇所での進みの違いを考慮して予防的に保守することが重要である。

そこで、軌間変位の推移の実態を実測データに基づいて調査し、軌間変位進みの統計的な特性やこれに影響する要因を分析する。また、分析結果に基づいて、軌間変位の管理値超過確率の算定モデルを示す。

2. 分析に用いるデータの概要

本検討では、4つの中下級線区の木まくらぎが敷設された曲線における過去10年分の4月期の軌道検測データを分析する。はじめに各年の検測波形の位置を合わせた上で、対象区間を25m区間(ロット)に区切り、各ロットにおける軌間変位最大値の1年間での増加量を軌間変位進みとして算出する。ただし、軌間変位保守や異常値の影響を排除するため、軌間変位のロット平均値の変化が負であるデータについては分析の対象外とする。

3. 軌間変位進みの分析で考慮する要因

軌間変位進みは車両からの左右方向の作用力(横圧)が大きな箇所で増加すると考えられる。この横圧の大きさには曲線半径、車両重量・速度等が関係する。一方、作用する横圧のほか、軌道構造の強さも影響する。例えば、左右方向のレール剛性が低いと、レール締結装置に大きな負荷が掛かるため、軌間変位進みが大きくなりやすいと考えられる。このような要因のうち、軌間変位進みへの影響が大きな要因を分析において考慮することとする。

はじめに、線区別に曲線半径、レール重量で分類した軌間変位進みのデータの分布を確認した結果、線区

間での明確な差異は認められなかった。対象とした4線区の車両・運転条件が比較的近かったためであると考えられる。

曲線半径、レール重量で分類した軌間変位進みの分布を図1,2に示す。図より、曲線半径が小さい方が、またレール重量が軽い方が、軌間変位進みが大きい傾向にあることがわかる。

また、分析において、経年による進み量の増加や、現在の軌間変位と将来の軌間変位進みの影響については、有意な傾向がみられなかったため、これらの要因はモデル化において考慮しないこととする。

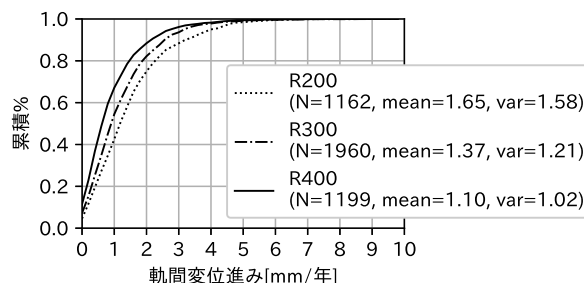


図1. 軌間変位進みの分布(曲線半径別)

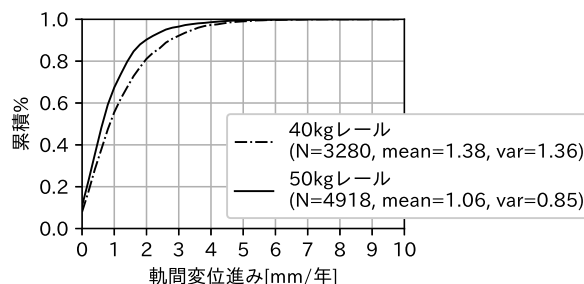


図2. 軌間変位進みの分布(レール重量別)

4. 軌間変位推移の予測モデル構築

4.1. 分布型の推定

軌道構造等の条件が同じであっても、軌間変位進みは箇所によって異なる。このため軌間変位進みについては、これまでに構築した他の種類の軌道変位(高低や通り等)の進みと同様に、確率分布によりモデル化するのが適当であると考えられる[1]。そこで、上述の要因を考慮して、曲線半径・レール重量で区別した各ケースでの進みの実測値の分布について、以下の一般的な確率分布との適合度を χ^2 検定により調べた。

表 1. 軌間変位進み分布における適合度検定結果

R200,40kg レール			R200,50kg レール			R400,40kg レール			R400,50kg レール		
分布名	χ^2 検定値	p 値	分布名	χ^2 検定値	p 値	分布名	χ^2 検定値	p 値	分布名	χ^2 検定値	p 値
Weibull	18.9	.841	Beta	28.4	.076	Weibull	18.8	.406	Gamma	27.5	.094
Beta	22.2	.679	Weibull	28.6	.072	Beta	18.9	.401	Weibull	33.0	.024
Gamma	22.5	.663	Gamma	32.6	.027	Gamma	19.6	.355	Expon	53.7	.000
Gumbel	55.1	.000	Gumbel	37.3	.000	Gumbel	38.4	.003	LogLogi	53.9	.000

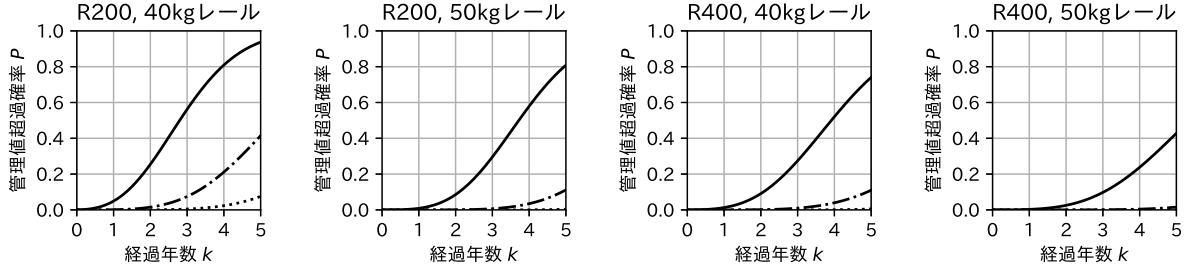


図 3. 管理値超過確率の算出例 (実線：初期変位 $x_0 = 35\text{mm}$, 鎖線： $x_0 = 30\text{mm}$, 破線： $x_0 = 25\text{mm}$)

- ・正規分布 ・ロジスティック分布 ・パレート分布
- ・対数正規分布 ・対数ロジスティック分布
- ・逆ガウス分布 ・ガンマ分布 ・ワイブル分布
- ・ガンベル分布 ・指数分布 ・ベータ分布
- ・一様分布 ・三角分布

検定の結果を表 1 に示す。表より，ガンマ分布とワイブル分布がいずれのケースにおいても高い適合度であることがわかる。よって，軌間変位進みについてはこれらの分布を用いるのが適当であると考えられる。

各ケースでのガンマ分布の形状母数 a と尺度母数 θ の最尤推定量 $\hat{a}, \hat{\theta}$ を表 2 に示す。ガンマ分布の平均が $a\theta$ ，分散が $a\theta^2$ であることから，曲線半径やレール重量が小さいほど，平均や分散が大きくなる傾向を捉えていることがわかる。

表 2. ケース別最尤母数

レール 曲線半径	40kg レール			50kg レール		
	R200	R300	R400	R200	R300	R400
\hat{a}	1.56	1.49	1.42	1.82	1.52	1.26
$\hat{\theta}$	1.24	0.99	0.96	0.78	0.84	0.78

4.2. 管理値超過確率の推定

以上で述べたガンマ分布とワイブル分布を比べると，分布の裾が長いガンマ分布の方が管理値を超過する確率を大きく推定することができる。本予測モデルの用途が脱線事故の防止であることを考慮して，より安全側の評価が可能なガンマ分布により管理値超過確率を推定した。

形状母数 $a > 0$ ，尺度母数 $\theta > 0$ を持つガンマ分布の確率密度関数 $f(x; a, \theta)$ は，ガンマ関数 $\Gamma(\cdot)$ を用いて，

$$f(x; a, \theta) = \frac{x^{a-1} \exp(-x/\theta)}{\Gamma(a) \theta^a}$$

と表すことができる。

曲線半径 R とレール重量 rail のケースにおいて得られた最尤母数を $\hat{a}_{R, \text{rail}}, \hat{\theta}_{R, \text{rail}}$ とすると，1 年の軌間変位進み Δx [mm/年] の確率密度は， $f(\Delta x; \hat{a}_{R, \text{rail}}, \hat{\theta}_{R, \text{rail}})$ と推定できる。そのうえ，各年の進みが独立であると仮定すると，ガンマ分布の形状母数 a の和に関する再生性を利用することにより， k 年の軌間変位進み Δx_k の確率密度は， $f(\Delta x_k; k\hat{a}_{R, \text{rail}}, \hat{\theta}_{R, \text{rail}})$ と表せる。

以上より，曲線半径 R ，レール重量 rail の箇所において，現在の軌間変位 x [mm] に対する管理値 \bar{x} [mm] の k 年後の超過確率 P は，

$$P(x, k; \bar{x}, \hat{a}_{R, \text{rail}}, \hat{\theta}_{R, \text{rail}}) = 1 - F(\bar{x} - x_0; k\hat{a}_{R, \text{rail}}, \hat{\theta}_{R, \text{rail}})$$

と表すことができる。

上述の方法により算出した各ケースでの管理値 $\bar{x} = 40\text{mm}$ の超過確率を図 3 に示す。曲線半径やレール重量の違いが管理値超過確率に大きく反映されており，特に，進みが最も大きくなる要因の組み合わせ (R200, 40kg レール) において，経年に伴う管理値超過確率の増加が顕著であることがわかる。

5. まとめ

木まくらぎ曲線の軌道検測データを対象に，軌間変位進みの分布型を推定し，軌間変位の基準値超過確率を算定するモデルを構築した。

参考文献

- [1] 三和雅史, 石川達也, 大山達雄, “軌道状態推移予測モデルの構築と最適軌道保守計画作成のための全整数型数理計画モデル分析,” 土木学会論文集, No. 681/IV-52 (2001), pp. 51-65.