

# 列車の曲線通過時に生じる内外軌の輪重を考慮した静的線形弾性解析

公益財団法人鉄道総合技術研究所 正会員 ○伊藤孝記 桃谷尚嗣 木次谷一平

## 1. はじめに

列車が曲線を通る際、遠心力が外軌側に働くことから、乗り心地や走行安全性等を考慮して軌道に傾斜（以下、カント）が設定されている。カントがあっても、列車が均衡速度と異なる速度で曲線を通ると、内外軌の輪重に差が生じることから、内軌または外軌のどちらかの高低変位進みが早くなる可能性があると考えられている。

そこで、曲線部の軌道沈下特性を検討することを目的として、曲線部における軌道の変形特性を把握することとした。本検討では、在来線の曲線部における軌道の変形について、静的線形弾性解析（以下、弾性解析）により定性的に評価することとし、路盤剛性、カント及び曲線半径の違いが軌道の変形に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

## 2. 解析モデルの条件及び検証

これまでの知見（例えば、1）、2）より、直線部では、適切に物性値を設定した弾性解析から、実物大軌道模型試験での弾性的な応答を概ね適切にシミュレートできることがわかっている。そこで、本検討では、曲線通過時に生じる遠心力を入力し、変形特性を評価することとした。

曲線通過時の列車には、遠心力の軌道面に対して水平方向の成分（ $F\cos\theta$ ）が作用し、同時にカントにより列車重量が内軌側へ傾く力（ $Mg\sin\theta$ ）も作用する（図1）。 $F\cos\theta$ と $Mg\sin\theta$ が等しくなる速度を「均衡速度」といい、このときに内軌と外軌の輪重が等しくなる。一般に、曲線半径 $R$ 、カント $C$ の曲線に対して、静止軸重 $W_0$ の列車が速度 $V$ で通過する際に生じる、外軌輪重 $P_o$ 及び内軌輪重 $P_i$ は式（3.1）、式（3.2）で表される<sup>3)</sup>。なお、ここでは列車の重心高さ $H_G$ は、文献3)を参考に1.7mと設定した。

本検討では、曲線部通過時の軌道の弾性的な変位を評価するため、曲線諸元及び曲線通過速度に応じた遠心力、及び自重を設定した弾性解析を行った（図2、表1）。検討に用いた解析モデルは1軸の列車をモデル化し、静止軸重 $W_0=160\text{kN}$ の場合、曲線半径 $R=300\text{m}$ 、カント $C=100\text{mm}$ の曲線諸元において、式（3.1）及び式（3.2）の計算式で算出した内外軌の輪重と解析結果が概ね一致することを確認した（図3）。

$$P_o = \frac{W_0}{2} \left[ \left( 1 + \frac{V^2}{gR} \times \frac{C}{G} \right) + \frac{H_G}{G/2} \times \frac{C_d}{G} \right] \quad \dots (3.1)$$

$$P_i = \frac{W_0}{2} \left[ \left( 1 + \frac{V^2}{gR} \times \frac{C}{G} \right) - \frac{H_G}{G/2} \times \frac{C_d}{G} \right] \quad \dots (3.2)$$

$$C_d = \frac{GV^2}{gR} - C \quad \dots (3.3)$$

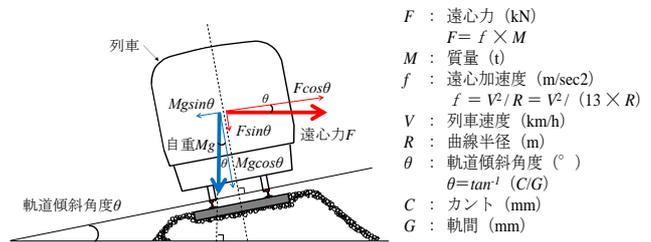


図1 曲線通過時の列車に作用する荷重の概要

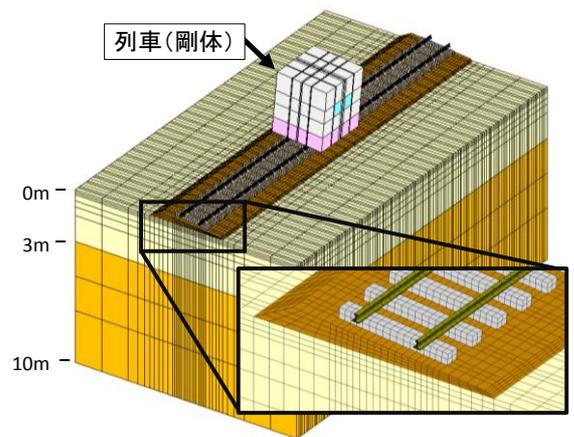


図2 解析モデル例（カント 100mm）

表1 解析に用いた物性値

項目	弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
50kgNレール	210000	0.3
PC6号まくらぎ	35000	0.2
軌道バット(110t/m)	パネ要素	
バラスト道床	100	0.3
路盤	深さ0m-3m: $K_{30}$ 値 × 0.609	0.3
	深さ3m-10m: $K_{30}$ 値 × 1.218	

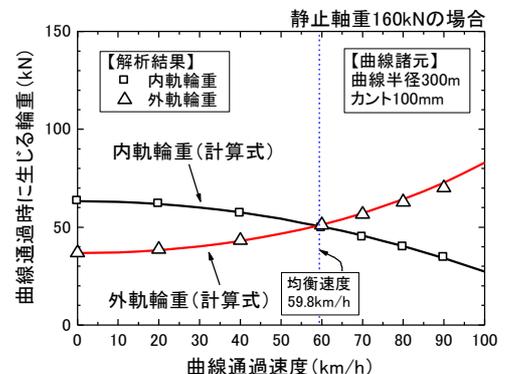


図3 曲線通過速度と内外軌の輪重との関係

キーワード：静的線形弾性解析、曲線部、輪重、軌道の変形

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・路盤 tel 042-573-7276

3. 解析結果

3.1 路盤剛性の影響

上記の解析モデルを用いて、路盤剛性が軌道の弾性的な変位に及ぼす影響を検討した。条件は、曲線半径  $R=300\text{m}$ 、カント  $C=100\text{mm}$  とした。

図4に路盤剛性  $K_{30}$  値が  $50\text{MN/m}^3$  と  $110\text{MN/m}^3$  の路盤条件における、まくらぎ変位と曲線通過速度の関係を示す。また、同じ路盤条件において直線部で生じるまくらぎ変位も併せて記載する。

- ・ 曲線半径とカントが同じ場合のまくらぎ変位は、速度が大きくなるに従って、内軌が小さくなるのに対し、外軌が大きくなった。
- ・ 路盤剛性が高いと、内外軌のまくらぎ変位が小さくなるとともに、内外軌のまくらぎ変位の差もやや小さくなった。
- ・ 内外軌のまくらぎ変位が等しくなる速度は、 $K_{30}$  値が  $50\text{MN/m}^3$  で  $63.4\text{km/h}$ 、 $110\text{MN/m}^3$  で  $60.2\text{km/h}$  であった。
- ・ 内外軌のまくらぎ変位が等しくなる際の変位は、同じ路盤剛性の直線部で生じるまくらぎ変位と概ね同程度となった。

3.2 カントの影響

カントの違いが軌道の弾性的な変位に及ぼす影響を確認した。条件は、曲線半径  $R=300\text{m}$ 、路盤剛性  $K_{30}$  値が  $50\text{MN/m}^3$  とした。

図5にカント  $C=60\text{mm}$  及び  $C=100\text{mm}$  におけるまくらぎ変位と曲線通過速度の関係を示す。また、直線部のまくらぎ変位も併せて記載する。

- ・ 内外軌のまくらぎ変位が等しくなる速度は、カントカント  $C=60\text{mm}$  で  $49.9\text{km/h}$ 、 $C=100\text{mm}$  で  $63.4\text{km/h}$  であった。
- ・ カント量が異なっても、均衡速度付近で内外軌のまくらぎ変位が等しく、直線部で生じるまくらぎ変位と概ね同程度となった。

3.3 曲線半径の影響

曲線半径の違いが軌道の弾性的な変位に及ぼす影響を確認した。条件は、カント  $C=100\text{mm}$ 、路盤剛性  $K_{30}$  値が  $50\text{MN/m}^3$  とした。

図6に曲線半径  $R=300\text{m}$  及び  $R=600\text{m}$  におけるまくらぎ変位と曲線半径の関係を示す。また、直線部のまくらぎ変位も併せて記載する。

- ・ 内外軌のまくらぎ変位が等しくなる速度は、曲線半径  $R=300\text{m}$  で  $63.4\text{km/h}$ 、 $R=600\text{m}$  で  $89.9\text{km/h}$  であった。
- ・ 曲線半径が異なっても、均衡速度付近で内外軌のまくらぎ変位が等しくなり、直線部で生じるまくらぎ変位と概ね同程度となった。

4. おわりに

本検討より、列車が曲線部を通過する際に生じる内外軌のまくらぎ変位について、路盤剛性、カント及び曲線半径の違いによる影響を把握した。今後は、本検討から得られた知見を基に、例えば、曲線部における内外軌の変位を考慮した路盤改良工法の開発等を行う予定である。

【参考文献】

- 1) 伊藤孝記、桃谷尚嗣、関根悦夫：荷役機械の荷重を受ける軌道の設計方法に関する研究、土木学会論文集E1、Vol.68、No.1、pp1～13、2012。
- 2) 伊藤孝記、桃谷尚嗣、中村貴久、村本勝己：発生バラストを再利用した鉄道路盤の改良工法に関する研究、土木学会論文集E1（舗装工学）、Vol.68、No.3、2012。
- 3) 長門彰、三浦重 他 編：新しい線路、日本鉄道境界、2000.3

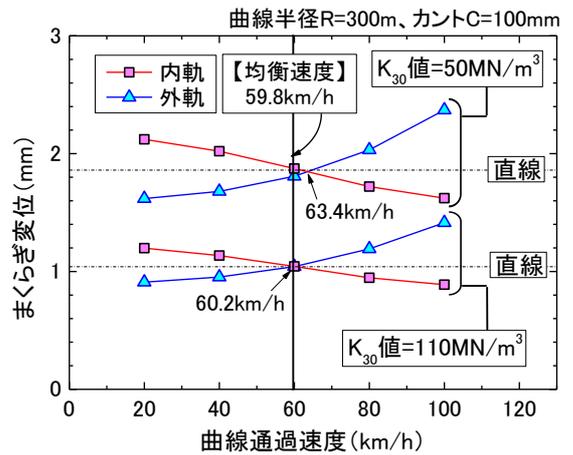


図4 路盤剛性の比較

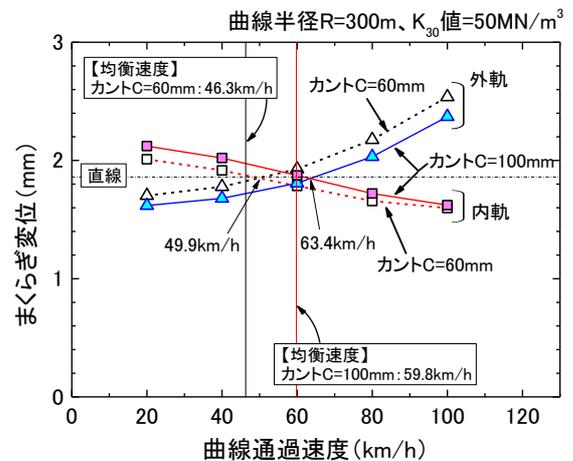


図5 カントの比較

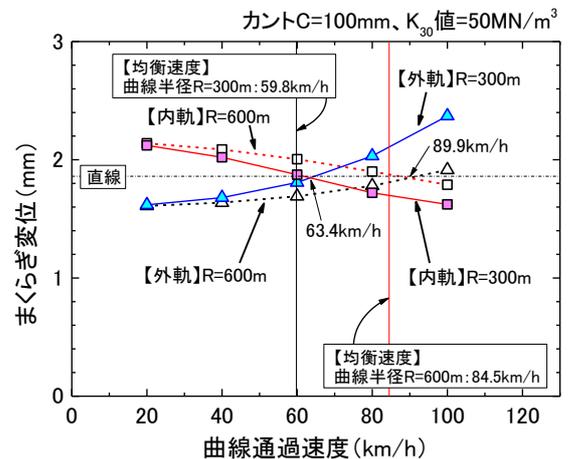


図6 曲線半径の比較