

1. まえがき

鉄道において、地震等によって橋台裏の盛土が沈下し、路盤面に大きな段差を生じた場合に、その区間を通過する列車の走行安全性を検討することは、地震対策における基本的事項のひとつである。その第1段階として、走行安全性の解析に対する入力となる軌道変形形状を理論計算により求めたので、その経緯について報告する。

2. 軌道変形のモデル

輪重は台車に相当する箇所では載荷されるものとし、2つの載荷位置に応じて図1に示す5つの変形タイプを考える。ここで、軌道は片側レールを考え、自重（レール+まくらぎ重量）によるつりあい位置を基準とし、下方には自重が、上方には弾性支承による反力が各区間に応じて働くものとする。

3. 軌道変形の計算

図1に示す軌道の変形形状は、各区間に応じて4階の微分方程式を解き、境界条件を満足するように積分定数を決定することにより求めることができる。ただし、境界条件を与える8箇所のうち、左右の無限遠点輪重の載荷位置及び段差の位置を除いた3箇所の座標は、輪重と載荷位置により変化する。これらを $l_1 \sim l_3$ とし、積分定数を $A_1 \sim A_{24}$ とすれば基本方程式は次の形になる。

$$f_i(l_1, l_2, l_3, A_1, A_2, \dots, A_{24}) = 0 \quad i = 1, 2, \dots, 24$$

これは非線形要素 $l_1 \sim l_3$ を含む27元の連立方程式となり、一般には解析的に解くことはできない。そこで次の方法により数値解法を行う。

(1) $l_1 \sim l_3$ を与えて線形連立方程式 $f_i(A_1, A_2, \dots, A_{24}) = 0 \quad i = 4, 5, \dots, 27$ を解く。

(2) $f_i(l_1, l_2, l_3, A_1, A_2, \dots, A_{24}) = 0 \quad i = 1, 2, 3$ を満足させるような $l_1 \sim l_3$ を求める。

このうち(2)は、各式の誤差の2乗和を最小化することと考え、 $l_1 \sim l_3$ の初期値 $l_1^0 \sim l_3^0$ を与え、繰り返し計算により収束させる手法を採った。

4. 数値計算プログラムの概要

数値計算プログラムは、次の3つの主要な部分からなる。

- (1) 計算に必要な諸定数の読み込み
- (2) 非線形連立方程式の求解
- (3) レール変位及び曲げモーメントの計算

このうち、(2)以下は各変形タイプにより異なる構成となる。また実際の計算にあたっては、輪重の載荷位置の移動に伴い、図1に示す5タイプの判別を行わなければならない。このとき、タイプI～IIIは時刻 t を与えれば橋端と載荷位置との相対的位置関係により判別することが可能であるが、タイプIIIとIV、およびタイプIVとVは、一旦非線形連立方程式を解いた結果の解 $l_1 \sim l_3$ と載荷位置との関係により判別しなければならない。

一方、収束計算の初期値は予想される解の近似値を用いることが必要になるが、時刻 t における解を時刻 $t + \Delta t$ における初期値として用い

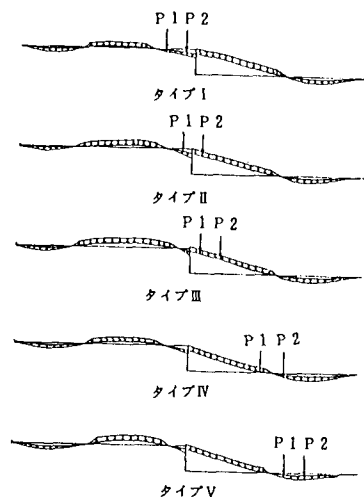


図1. 軌道に対する載荷位置と変形のモデル

るような構成とした。収束基準の打ち切り基準 ε は、変位に関する誤差が 0.1 mm 以下となるように設定したが、この方法により概ね 1～2 回の繰返し計算で収束する。

5. 計算結果

5.1 計算条件

計算条件は、東海道新幹線の標準的な軌道構造（60 kg レール、3 T a 型 PC まくらぎ 4 3 本/2.5 m）を想定し、輪重は 0 系新幹線電車の標準静止輪重の 735 kN とした。段差量 H は、4 cm、6 cm、8 cm、及び 10 cm の 4 通りとした。

5.2 軌道変形状の例

輪重が加わらない場合の軌道変形状を図 2 に示す。この図にみられるように、段差により盛土側では軌きょうのつり下り区間が、橋梁上では軌きょうの浮き上り区間が生じることになり、輪重が載荷されれば、その大きさと載荷位置に応じてこれらは変化してゆく。

5.3 軌きょうつり下り区間の長さ

輪重の載荷位置に応じた軌きょうのつり下り区間の長さの変化の例を図 3 に示す。このように、載荷位置が橋端から 1.0 m 及び 3.5 m 左側にある時に最大値を生じており、最終的なつり下り区間の長さ（載荷位置が橋端から十分遠方にある時、即ち輪重 = 0 の時）をわずかに越える値となる。

5.4 橋梁上における軌きょう浮き上がり高さ及び軌きょう浮き上がり長さ

輪重の載荷位置に応じた橋梁上の軌きょう浮き上がり高さ及び浮き上がり長さの変化例を図 4 に示す。このように、いずれの最大値も載荷位置が橋梁から約 0.5 m 及び 3.0 m 右側にある時に生じている。

5.5 レール曲げ応力

段差によってレールには橋端付近では負の最大曲げモーメント（レール頭頂面で最大引っ張り曲げ応力）を、車輪直下付近で正の最大モーメント（レール底面で最大引っ張り曲げ応力）を生じる。載荷位置に応じたそれぞれの最大引っ張り曲げ応力の変化の例を図 5 に示す。

6. むすび

以上、橋台裏盛り土の沈下による軌道変形を理論計算により求めるプログラムを構成し、主な計算結果について述べた。今後、これを基にシミュレーションにより走行安全性を検討する方向に進むことが可能になったものと考えられる。

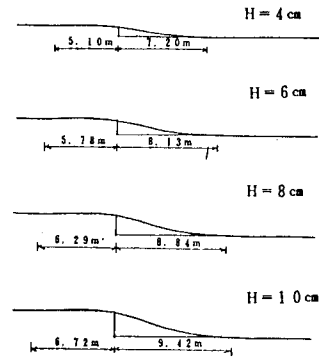


図 2. 軌道変形状 ($P_1 = P_2 = 0$)

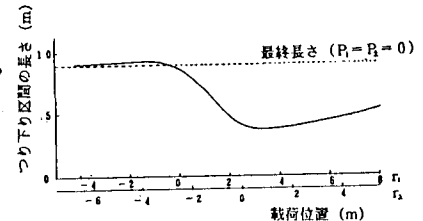


図 3. 軌きょうつり下り区間の長さ $H = 8$ cm

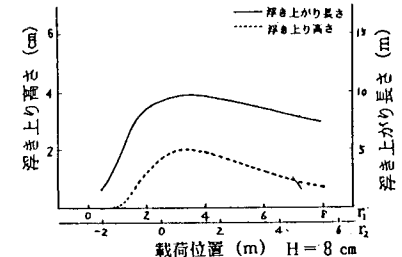


図 4. 載荷位置と橋上における軌きょう浮き上がり高さ及び浮き上がり長さ $H = 8$ cm

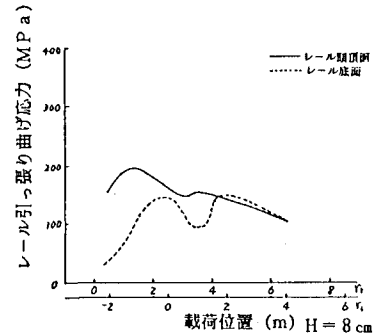


図 5. 載荷位置とレール曲げ応力 $H = 8$ cm