

コンクリートスラブ軌道の動的応答解析に関する研究

福山大学 正会員 岡田 清

福山大学 正会員 ○西頭 常彦

①緒言

新幹線に期待されるスピードアップが実現されるためには、軌道が高速に対する性能を有することが必要であり、とくに東北、上越新幹線は全線にわたりスラブ支持弾性を柔らかくしているため、高速化によって、スラブ軌道の安定が懸念される。軌道の安定は現在のところ、つぎの事柄の解析によって把握されと考えられる。すなわち、

- ① 高速走行時においてスラブ軌道に生じる応力および変形の標準値との対比
- ② 高速走行時に生じる振動性状を求め
 - ① 車両とスラブ軌道との共振の有無
 - ② 高周波振動を調べこれが軌道スラブの耐久性に及ぼす影響を考察する

以上の事柄は軌道構造の動的応答特性を求めることによって明らかにされと考えられる。

②スラブ軌道構造の動力学モデル

軌道スラブの支持弾性が柔らかくなると高速走行によってスラブのロッキング振動が顕著になることが考えられるので図-1に示すように1高架橋に敷設するスラブ7枚のうち、スラブ端部が橋脚柱頭部に最も近いNo.2スラブとこれに接するNo.3スラブをとり出して図-2のようなモデルを設定した。なお、橋軸方向の振動を考えているので軌道スラブ、高架橋スラブいずれもはりと仮定してよいと思われる。

③解析手法

解析には2, 3の方法が考えられるが、ここでは空間的変形には有限要素法を時系列的変形には差分法を用いるのがよいと思われたので、図-1に示すようにレール、軌道スラブはそれぞれ7要素、高架橋は9要素に分割した。

④要素の変形を規定する形状関数

はりの場合、要素の変位は線座標 ϕ_1, ϕ_2 を用いて表すことができるのでレール、軌道スラブおよび高架橋の要素内変位は、それぞれ $y_1 = f^T \cdot \alpha, y_2 = f^T \cdot \beta, y_3 = f^T \cdot \gamma, f^T = [\phi_1^3, \phi_2^3, \phi_1^2 \phi_2, \phi_1 \phi_2^2]$ で表される。 α, β, γ の代わりに要素両端のたわみ y_{1i}, y_{1j} とたわみ角 θ_{1i}, θ_{1j} をとり、これを用いてレールの変位 $q_{1e}^T = [y_{1 \cdot i}, y_{1 \cdot j}, \theta_{1 \cdot i}, \theta_{1 \cdot j}]$ のようにすると軌道スラブおよび高架橋スラブの変位がそれぞれ q_{2e}^T, q_{3e}^T のごとく表される。これからレール、軌道スラブおよび高架橋の要素内変位がそれぞれ $y_1 = f^T \cdot A \cdot q_{1e}, y_2 = f^T \cdot A \cdot q_{2e}, y_3 = f^T \cdot A \cdot q_{3e}$ と表される。

⑤スラブ軌道構造の動的つり合い方程式

図-2のレール上の $x = \xi$ の点に作用する車輪荷重を P_0 とし、時刻 t に着目するとき要素の微小長 dx について、つぎのつり合い方程式が成り立つ

$$E_1 I_1 \frac{\partial^4 y_1}{\partial x^4} = -m_1 \frac{\partial^2 y_1}{\partial t^2} - C_1 \left(\frac{\partial y_1}{\partial t} - \frac{\partial y_2}{\partial t} \right) - k_1 (y_1 - y_2) - C_1' \frac{\partial y_1}{\partial t} + P_0 \cdot \delta(x - \xi) \quad (1)$$

$$E_2 I_2 \frac{\partial^4 y_2}{\partial x^4} = -m_2 \frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} + C_1 \left(\frac{\partial y_1}{\partial t} - \frac{\partial y_2}{\partial t} \right) + k_1 (y_1 - y_2) - C_2 \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - \frac{\partial y_3}{\partial t} \right) - k_2 (y_2 - y_3) - C_2' \frac{\partial y_2}{\partial t} \quad (2)$$

$$E_3 I_3 \frac{\partial^4 y_3}{\partial x^4} = -m_3 \frac{\partial^2 y_3}{\partial t^2} + C_2 \left(\frac{\partial y_2}{\partial t} - \frac{\partial y_3}{\partial t} \right) + k_2 (y_2 - y_3) - C_3' \frac{\partial y_3}{\partial t} \quad (3)$$

上式において、添字1, 2, 3はそれぞれレール、軌道スラブおよび高架橋である。

⑥要素の剛性マトリックス K_{1e} 、支承体、質量およびダンピングに共通するマトリックス K_{2e}

式(1), (2)および(3)に仮想仕事の原理を適用し、演算を施すことによって次のように K_{1e}, K_{2e} が求められる。

$$K_{10} = \begin{bmatrix} 12 & -12 & 8\ell & 6\ell \\ 12 & -6\ell & -6\ell & \\ \text{Symmetry} & & 4\ell^2 & 2\ell^2 \\ & & & 4\ell^2 \end{bmatrix}$$

.....(4)

$$K_{20} = \begin{bmatrix} 13 & 11\ell & 3 & -13\ell \\ 35 & 210 & 35 & 420 \\ \ell^2 & 13\ell & -\ell^2 & \\ 105 & 420 & 140 & \\ \text{Symmetry} & & & 13 & -11\ell \\ & & & 35 & 210 \\ & & & & \ell^2 \\ & & & & 105 \end{bmatrix}$$

.....(5)

⑦ 軌道構造全体の運動方程式

式(4)、(5)を用いて、要素の剛性マトリックス、質量およびダンピングマトリックスを計算し、これを全要素についてまとめると、つぎのように構造全体の運動方程式が求められる。

$$M \frac{d^2 q}{dt^2} + C \frac{dq}{dt} + Kq = p$$

.....(6)

ここに q は構造の全変位である。

⑧ 振動変位の計算

式(6)は任意の時刻において成立するので、ここではNewmarkの β 法を用いて、これを時間軸方向に展開し計算すると振動変位が求められる。

⑨ 数値計算適用例

図-3は東北新幹線の防振A形スラブ軌道の緒元を用いて、160km/hで走行する場合の節点番号4.11および21の振動変位を追跡計算したものであり、軌道スラブがロッキング振動を示している。

⑩ 結言

東北新幹線は現在270km/h運転であるので、まずこの速度での軌道の安定状況を調べ、これらの結果を参考にして、より高速の領域となった場合の動的応答の解析を引きつづいて行う予定である。なお、本研究の実施および遂行にあたり、日本線路技術(元国鉄技術研究所 軌道研究室長) 佐藤 裕氏より懇切なるご指導をいただいております。ここに深く感謝申し上げます。

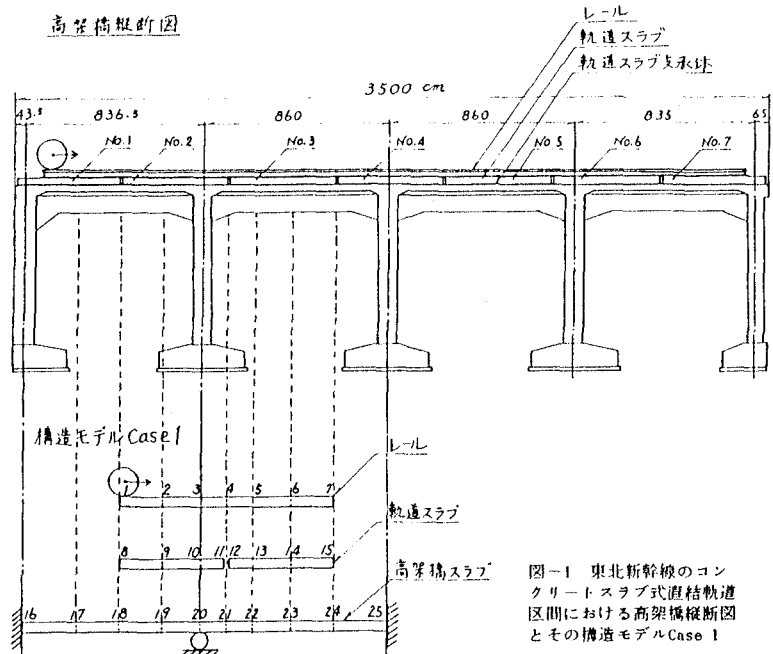


図-1 東北新幹線のコンクリートスラブ式直結軌道区間における高架橋横断面図とその構造モデル Case 1

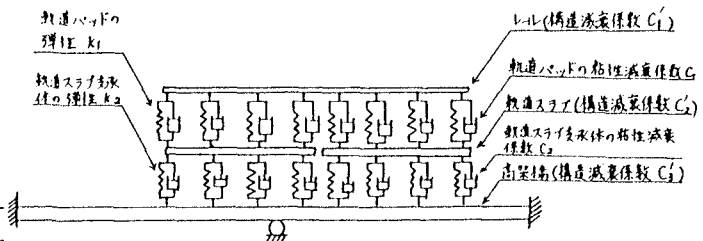


図-2 コンクリートスラブ式直結軌道構造の動力学モデル

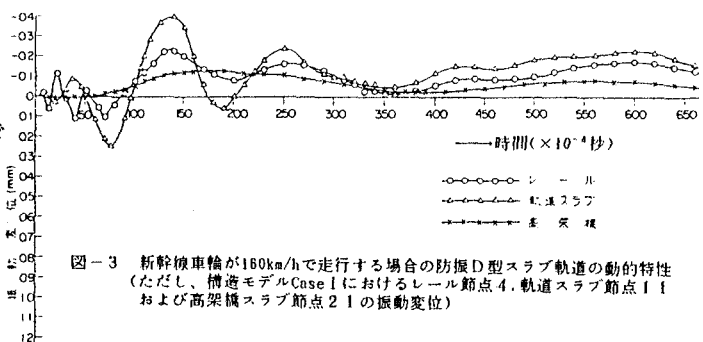


図-3 新幹線車輪が160km/hで走行する場合の防振D型スラブ軌道の動的特性 (ただし、構造モデルCase 1におけるレール節点4、軌道スラブ節点11および高架橋スラブ節点21の振動変位)