

I - 574

浮上列車とガイドウェイ構造物との動的相互作用解析法に関する研究

鉄道総合技術研究所 正○曾我部正道 鉄道総合技術研究所 正 松本 信之
 鉄道総合技術研究所 正 涌井 一 神奈川工科大学 田辺 誠

1. はじめに 超高速都市間輸送の実現を目指し、超電導磁気浮上式鉄道の開発が鋭意進められており、現在、山梨リニア実験線の建設が行われている。近い将来、超高速領域での走行実験が開始され、浮上列車の乗心地評価や地震時走行安全性評価等が行われるが、これらに関して走行試験に対応する、あるいは走行試験では再現が困難であるような諸問題に対して定量的な解析評価が必要となる。

本報告ではこのような解析を行うために開発した浮上列車とガイドウェイ構造物との動的相互作用解析法の概要および解析例を紹介する。

2. 解析モデル 山梨リニア実験線では、図1に示すような連接台車形式車両を用いる予定としている。これに対応する車両モデルとして、図2に示すような車体・台車・超電導磁石（以下SCMと略）を質点（剛体）とし、これを3次元的にバネ・ダンパ（非線形バネを含む）で結合したモデルを考えた。編成列車中の各車体・台車はそれぞれ上下、左右、ローリング、ピッチング、ヨーイングの5自由度、SCMは上下、ピッチングの2自由度を持つ。車両モデルの運動方程式は、モデル内の非線形バネ項を右辺に移項し、車両座標系においてマトリックス表示すると次のようになる。

$$\mathbf{M}^V \ddot{\mathbf{X}}^V + \mathbf{C}^V \dot{\mathbf{X}}^V + \mathbf{K}^V \mathbf{X}^V = \mathbf{F}_L^V + \mathbf{F}_N^V(\mathbf{X}^V) + \mathbf{F}_r^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B) \quad \dots (1)$$

ただし、 $\mathbf{F}_L^V$ 車両に作用する外力項（風荷重など）

$\mathbf{F}_N^V(\mathbf{X}^V)$ 車両モデル内の非線形バネ項

$\mathbf{F}_r^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ 誘導面との相互作用力

上添え字V、Bはそれぞれ車両、橋梁を表す。

ガイドウェイ構造物は、はり要素、シェル要素等の有限要素を用いてモデル化するものとした。これを全体座標系においてマトリックス表示すると次のようになる。

$$\mathbf{M}^B \ddot{\mathbf{X}}^B + \mathbf{C}^B \dot{\mathbf{X}}^B + \mathbf{K}^B \mathbf{X}^B = \mathbf{F}_L^B + \mathbf{F}_r^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B) \quad \dots (2)$$

ただし、 $\mathbf{F}_L^B$ 橋梁に作用する外力項（地震力、風荷重など）

$\mathbf{F}_r^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ 車両との相互作用力で $\mathbf{F}_r^V(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)$ の符号を逆にしたものを全体座標系に変換し、これを近傍の接点に分配した接点荷重ベクトル

3. 数値計算法 構造物について $\mathbf{X}^B = \Phi^B \mathbf{Z}^B$ のモーダル変換を考えると式(2)は次のようになる。

$$\ddot{\mathbf{Z}}^B + [2h_i \omega_i^B] \dot{\mathbf{Z}}^B + [(\omega_i^B)^2] \mathbf{Z}^B = (\Phi^B)^T [\mathbf{F}_L^B + \mathbf{F}_r^B(\mathbf{X}^V, \mathbf{X}^B)] \quad \dots (3)$$

ただし、 $[2h_i \omega_i^B]$ 、 $[(\omega_i^B)^2]$ はi次の対角成分が $2h_i \omega_i^B$ 、 $(\omega_i^B)^2$ となる対角マトリックスを表す。

ω_i^B 橋梁i次の角振動数 h_i 橋梁i次のモーダル減衰定数

いま、時刻tまでがすでに解かれ、時刻t+Δtについて解くものとする。Newmarkの平均加速度法により式(1)(3)を時間方向に離散化し整理すると

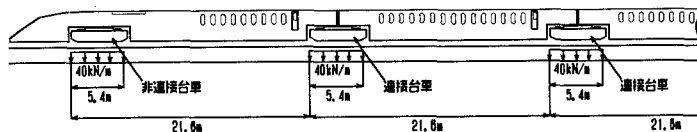


図1 超電導磁気浮上式鉄道に用いる車両諸元

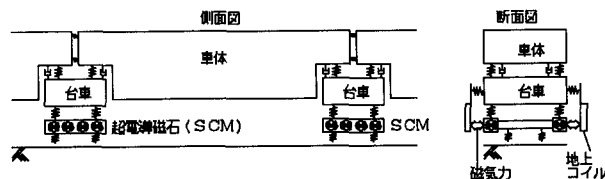


図2 車両解析モデルの概念図（列車編成中の中間車の例）

$$\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,I+1} = \left[\frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{M}^V + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{C}^V + \mathbf{K}^V \right]^{-1} \left[\mathbf{F}_{t+\Delta t}^{V,I} + \mathbf{M}^V \left(\ddot{\mathbf{X}}_t^V + \frac{4}{\Delta t} \dot{\mathbf{X}}_t^V + \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{X}_t^V \right) + \mathbf{C}^V \left(\dot{\mathbf{X}}_t^V + \frac{2}{\Delta t} \mathbf{X}_t^V \right) \right] \cdots (4)$$

$$\mathbf{Z}_{t+\Delta t}^{B,I+1} = \left[\frac{4}{\Delta t^2} + \frac{4}{\Delta t} h_i \omega_i^B + (\omega_i^B)^2 \right]^{-1} \left[\tilde{\mathbf{F}}_{t+\Delta t}^{B,I} + \ddot{\mathbf{Z}}_t^B + \frac{4}{\Delta t} \dot{\mathbf{Z}}_t^B + \frac{4}{\Delta t^2} \mathbf{Z}_t^B \right] \cdots (5)$$

ただし

$$\mathbf{F}_{t+\Delta t}^{V,I} = \mathbf{F}_{L,t+\Delta t}^V + \mathbf{F}_{N,t+\Delta t}^{V,I}(\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,I}) + \mathbf{F}_\Gamma^V(\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,I}, \mathbf{X}_{t+\Delta t}^{B,I})$$

$$\tilde{\mathbf{F}}_{t+\Delta t}^{B,I} = (\Phi^B)^T \left[\mathbf{F}_{L,t+\Delta t}^B + \mathbf{F}_\Gamma^B(\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,I}, \mathbf{X}_{t+\Delta t}^{B,I}) \right]$$

ここで、上添字1は Δt 内の反復を表しており、初期値を以下とする。

$$\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,0} = \mathbf{X}_t^V \cdots (6)$$

$$\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{B,0} = \mathbf{X}_t^B \cdots (7)$$

式(4)(5)の逐次代入を、次の式(8)(9)の残差ベクトルのノルムが与えられた許容誤差 ε 以下になるまで反復する。

$$\text{車両の時刻 } t+\Delta t \text{ での残差ベクトル } \mathbf{R}_{t+\Delta t}^{V,I+1} = \mathbf{F}_{t+\Delta t}^{V,I+1} - \left[\mathbf{M}^V \ddot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t}^{V,I+1} + \mathbf{C}^V \dot{\mathbf{X}}_{t+\Delta t}^{V,I+1} + \mathbf{K}^V \mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,I+1} \right] \cdots (8)$$

$$\text{橋梁の時刻 } t+\Delta t \text{ での残差ベクトル } \mathbf{R}_{t+\Delta t}^{B,I+1} = \tilde{\mathbf{F}}_{t+\Delta t}^{B,I+1} - \left[\ddot{\mathbf{Z}}_{t+\Delta t}^{B,I+1} + [2h_i \omega_i^B] \dot{\mathbf{Z}}_{t+\Delta t}^{B,I+1} + (\omega_i^B)^2 \mathbf{Z}_{t+\Delta t}^{B,I+1} \right] \cdots (9)$$

式(4)により $\mathbf{X}_{t+\Delta t}^{V,I+1}$ が求まると、これに対応した速度、加速度を求めることができる。構造物についても同様に、式(5)で $\mathbf{Z}_{t+\Delta t}^{B,I+1}$ が求まると、それに対応する速度、加速度が求まる。

4. 解析例 図3に1mmの正弦波(10波)の上下方向軌道狂い上を5両編成の列車モデルが550km/hで走行した場合の3号車の車体加速度最大値を示す。車体客室内の加速度は重心点における各ベクトル情報をもとに任意の指定位置で各時刻毎に計算される。解析では客室最前部、最後部、重心位置に着目した。図中の線Aは車体剛性も考慮した場合の周波数応答解析の結果^[1]の包絡線であり、実験線ガイドウェイ構造物の設計に用いられているものである。両者を比較することにより解析法の妥当性が確認できる。同様に左右方向、ローリングについても確認を行った。

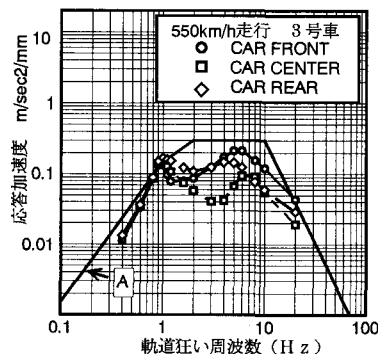


図3 上下方向周波数応答

図4は橋梁のたわみ制限について示している。橋梁のモデルは振動しない半正弦波モデルとし1連および5連について考えた。図中の直線(L/6000等)は現在設計に用いられている左右・鉛直系独立モデルによる1連橋梁に対するたわみ制限^[2]である。両者を比較するとたわみ制限は、若干緩和される結果となっているが整合性がとれている。また、折れ角、目違いについても解析を行ったが同様の結果であった。

上述の解析例では構造物は非振動系と仮定したが、これを振動系とした解析も行っており、地震時の振動影響等も含め、今後評価していく予定である。試験ケースとして約2000のはり要素を用いてモデル化した詳細な振動系ガイドウェイ構造物を解析した実績があり、橋梁の大きな不同変位についても問題なく解析できている。

5. まとめ 詳細な車両モデルを用いた動的相互作用プログラムを構築し、既往の解析結果をもとに解析法の妥当性を確認した。今後はこれらの結果を踏まえ高速領域での浮上列車と構造物の振動問題について検討を行っていく予定である。

参考文献 [1] 吉岡博：磁気浮上車両の運動モデル、鉄道総研報告、第2巻、第6号、pp.43~50、1988.6 [2] 富田健司、松浦章夫：浮上式鉄道構造物の許容変位、鉄道総研報告、第6巻、第1号、pp.43~50、1992.1 [3] 涌井一、松本信之、田辺誠：鉄道車両と構造物の動的相互作用解析法に関する研究—力学モデルと実用解析法—、鉄道総研報告、第7巻、第4号、pp.11~20、1993.4.

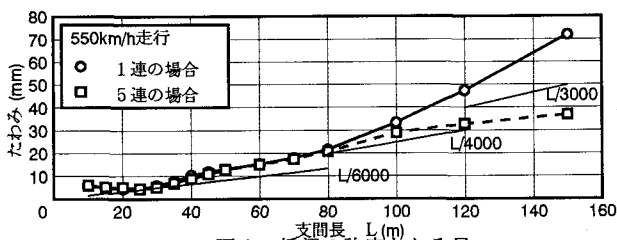


図4 橋梁の許容たわみ量