

フローティング・ラダー軌道の波動伝搬速度

(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 奥田広之
(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 曾我部正道
(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 松本信之
(財) 鉄道総合技術研究所 正会員 涌井 一

1. はじめに

フローティング・ラダー軌道は、低支持バネ係数の防振装置でコンクリート路盤より浮かせた構造であるために、高速鉄道に導入するには、軌道の波動伝播速度についての定量的な評価が必要である。ここでは、波動伝播速度の基礎理論の調査、総研のループ線に敷設したフローティング・ラダー軌道に対するハンマー試験および理論解析により、波動伝播速度の基礎的検討を行った。

2. フローティング・ラダー軌道

ラダーマクラギは、コンクリート製縦梁によってレールを支持・拘束する構造であり、さらに左右の縦梁間には鋼管製継材を剛結接合することによって「はしご」状の形態に一体化した構造である。その結果、「鋼製レール＋コンクリート製レール」からなる剛な「複合レール」を構成し、なおかつコンクリート製レールの部分は鋼管製継材との格子構造となっている。フローティング・ラダー軌道（防振装置式）は、「複合レール」を防振装置によりコンクリート路盤から 1.5m 間隔で低支持バネ係数（防振装置の 1 個当たりの鉛直バネ係数 14.7MN/m）で浮かせた構造である。防振装置は、左右・前後方向にも支持機能を有する。このように、フローティング・ラダー軌道は、輪軸の下に設けたサスペンション・システムの一種と考えられる。なお、ここで対象とした防振装置の種類はせん断型防振装置である。

3. 波動伝播速度に関する基礎的検討

非常に柔らかいバネ係数を持った軌道の上を高速で車両が走行するとき、列車速度と軌道の変形の伝播速度との関係が問題となる。しかし、従来は実際の列車速度と波動伝播速度に大きな隔たりがあり、問題にされることは少なかった。ところが、フランスが TGV の開発にあたってこれを問題にし、測定試験を行って解析したところ、実際の波動伝播速度が予想よりかなり低く、軌道の条件によっては考慮する必要があることが報告¹⁾された。

このような背景から、低支持バネ係数で支持されたフローティング・ラダー軌道を高速鉄道に導入するためには、フローティング・ラダー軌道の波動伝搬速度について定量的な評価が必要であると考えられる。

3.1 弾性床上的ベルヌーイ・オイラー梁による理論解

弾性床上的のベルヌーイ・オイラー梁を仮定すると、臨界速度 V_{cr} は、次式で求めることができる。

$$(V_{cr})^2 = (2/m) \cdot (kEI)^{1/2}$$

フローティング・ラダー軌道の各定数は、フローティング・ラダー軌道の曲げ剛性 EI : $1.34 \times 10^7 \text{Nm}^2$, 質量 m : 260kg/m , 1m 当たりの軌道のバネ係数 k : $8.7 \times 10^6 \text{N/m}$ である。これより、フローティング・ラダー軌道の臨界速度 V_{cr} は 1000km/h 程度となる。

3.2 ハンマーによる衝撃加振試験

(1) 試験方法

鉄道総研構内のループ線に敷設したフローティング・ラダー軌道に対して、ハンマーによる衝撃加振を行い、波動伝播速度を求めた。フローティング・ラダー軌道は、ラダーマクラギの長さ 6 m, 梁高さ（レール下）18.5cm, キーワード：ラダーマクラギ, フローティング・ラダー軌道, 波動伝搬速度

連絡先（東京都国分寺光町 2-8-38・TEL(042)573-7279・FAX(042)573-7282

梁幅 45cm であり、レールは 50N、締結装置はタイプレート方式バンドロールである。軌道パッドの厚さは 10mm (バネ係数 58.8MN/m) で、防振装置の 1 個当たりの鉛直バネ係数は 14.7MN/m である。

(2) 位相差法¹⁾による波動伝播速度の算出方法

この方法は、ハンマー加振近傍の加速度波形と各位置の加速度波形の相互スペクトルを求め、その位相差を求めることによって、位相速度 (波動伝播速度) を求めるものである。すなわち、位相速度 (波動伝播速度) C_p は、 $C_p = \omega d / \theta$ で求められる。ここで、 ω : 各周波数、 d : 2 点間距離、 θ : 位相差である。

図 1 は以上の関係を利用して、位相速度を求めたものである。なお、図中には 2 層弾性支持梁による理論解により求めた波動伝播速度を合わせてプロットしている。2 層弾支持梁の計算に用いた定数は、50N レールの曲げ剛性 $4.0 \times 10^6 \text{Nm}^2$ 、質量 50kg/m 、1m 当たりの軌道パッドのバネ係数 $7.84 \times 10^7 \text{N/m}$ 、ラダーマクラギの曲げ剛性 $9.4 \times 10^6 \text{Nm}^2$ 、質量 210kg/m 、1m 当たりの防振装置のバネ係数 $9.8 \times 10^6 \text{N/m}$ である。これより、周波数が 50Hz 付近で位相速度 (波動伝播速度) が 1000km/h (280m/s) 程度であることがわかる。

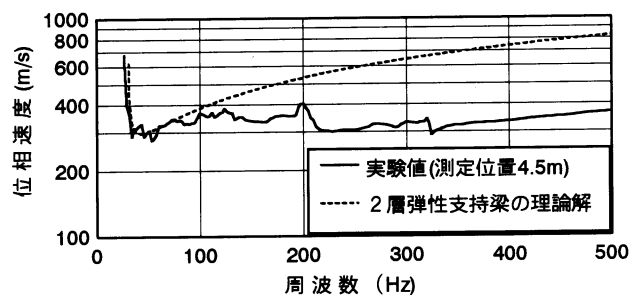


図 1 位相差法による位相速度

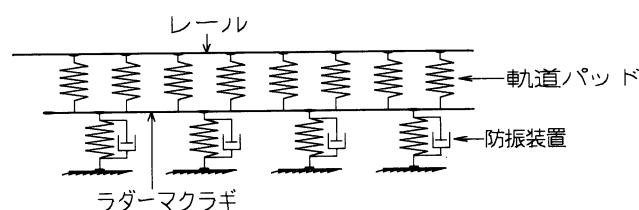


図 2 解析モデル

3.3 1 輪の集中移動荷重による波動伝播速度の検討

フローティング・ラダー軌道をモデル化し、その上を 1 輪の集中移動荷重 (輪重 9.8kN で一定) が走行するときのレール変位の応答値を、走行速度をパラメータとして有限要素解析により求めた。図 2 はその解析モデルを示す。

解析モデルは、全長 30m (ラダーマクラギの長さ 6m × 5 本) とし、ラダーマクラギの縦梁、継材およびレールには梁要素、軌道パッドは線形バネ要素、防振装置は線形バネと線形ダッシュポットの並列結合要素を用いた。なお、防振装置の減衰係数は 2ts/m とした。表 1 に解析に用いた材料定数を示す。図 3 に解析結果を示す。これより、レール変位が最大値を示す走行速度は概ね 900km/h (250m/s) 程度であることがわかった。

以上の「弾性床上的ベルヌーイ・オイラー梁による理論解」、 「ハンマーによる衝撃加振試験および 2 層弾性支持梁の理論解」、 「1 輪の集中移動荷重による波動伝播速度の検討」 から、フローティング・ラダー軌道の波動伝播速度の最小値は、900 ~ 1000km/h (250 ~ 300m/s) 程度と考えられる。

表 1 解析に用いた材料定数

	ヤング 係 数 (Mpa)	断面積 (cm ²)	ポアソン比	断面 2 次 モーメント (cm ⁴)
50N レール	2.1×10^5	64.1	0.3	1.96×10^{-5}
軌道パッド	一個当たり鉛直バネ係数 14.7MN/m			
ラダーマクラギ	4×10^4	751	0.17	1.71×10^{-6}
継 材	4×10^4	127	0.17	6.32×10^{-6}
防振装置	一個当たり鉛直バネ係数 14.7MN/m			

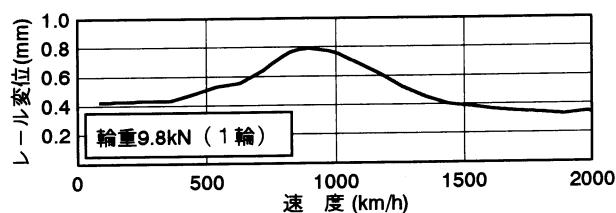


図 3 集中移動荷重によるレール変位

参考文献

- 1) 真鍋克士, 金久保文子: 軌道の上下振動の伝播速度について, 研究業務資料, No. J10018R, p.3