

列車走行に伴う環境振動解析に関する研究

東京工業大学大学院 学生会員 土戸 研一
東京工業大学大学院 正会員 廣瀬 壮一

1. 研究の背景・目的

近年の鉄道的高速化は目覚しく、新幹線のぞみの運行速度は300km/hを超える。しかし、高速化に伴う振動レベルの増大、沿線の市街地化、微振動が大きな影響を及ぼす施設の増加という社会的背景を鑑みると、振動に対する対策は急務である。しかし、鉄道敷設前の振動測定は不可能であり、施設の性質上現場実験が困難であることから、数値解析による振動予測手法の確立が望まれている。従来の解析手法には、弾性地盤上を定常荷重が一定速度で移動するモデルを解析した、時間域3次元BEM、FEM、BEM-FEMハイブリッド解析などがあるが¹⁾、計算量が膨大で時間がかかる、有限領域しか計算できない、といった欠点がある。そこで本研究では、図-1に示す解析モデルに対して比較的簡単に解析できる手法としてBEMを基礎とする擬似3次元解析を用いて解析を行い、荷重の移動速度と変位の関係の把握と、振動対策の検討を行うことを目的とする。

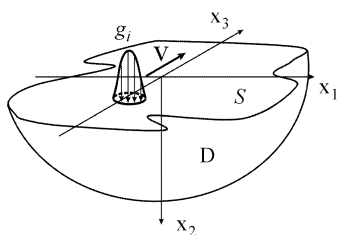


図-1 解析モデル

2. 擬似3次元解析

擬似3次元解析とは、本来3次元空間-時間域で解くべき支配方程式と境界条件を、荷重移動方向 x_3 と時間 t に関して波数 ξ_3 と周波数 ω へFourier変換することで、 $\xi_3, \omega, x_1 - x_2$ 空間での基礎式を導き、その解 $\hat{u}_i(x_1, x_2, \xi_3, \omega)$ を次式のように逆Fourier変換することで、本来の解 $u_i(x_1, x_2, x_3, t)$ を得るものである。

$$u_i(x_1, x_2, x_3, t) = \frac{1}{2\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{u}_i(x_1, x_2, \xi_3, \omega) e^{i(\xi_3 x_3 - \omega t)} d\omega d\xi_3 \quad (1)$$

$\hat{u}_i(x_1, x_2, \xi_3, \omega)$ の計算は、 ξ_3 と ω を固定すると $x_1 - x_2$ 空間における2次元問題となるから、簡単に解析を行うことができる。一般には全ての ξ_3 と ω について計算しなければならないので、全計算量は3次元解析と同じであるが、幾何断面形状が荷重移動方向に一樣で、一定速度 v で一樣な荷重を受ける場合には、 ξ_3 と ω の間には $\xi_3 = \omega/v$ なる

関係が生じ、 $\xi_3 - \omega$ 平面での2次元逆Fourier変換は1次元逆Fourier変換に減じられる。²⁾

3. 解析結果 (荷重移動速度と変位の関係)

図-3は、図-2に示すように、 x_1 方向に幅 $a=1\text{m}$ で x_3 方向に $f \sin^2 x_3/a$ の分布を持って移動している荷重に対し、速度を $v=100\text{km/h}$ から $v=500\text{km/h}$ まで100km/hずつ変化させたときの、荷重中心から4.0m離れた点での応答変位の時間変化を示したものである。縦軸は縦弾性係数 μ と荷重の最大値 f 、 x_1 方向の荷重幅 a によって無次元化した鉛直変位を、横軸はS波速度 c_0 と a によって無次元化した時刻を表している。結果を見ると、 $v=300\text{km/h}$ までは速度が速くなると応答変位も大きくなっている。一方、 $v=400\text{km/h}$ を超えると波形が乱れる。これは表面波の速度(約324km/h)を荷重移動速度が超えるため、荷重に遅れて表面波が到達することによるものである。また、 $v=500\text{km/h}$ に比べ、 $v=400\text{km/h}$ の方が変位が大きい。荷重移動速度が表面波速度に近いほど、荷重と表面波が同時刻に到達して重なり合うことで変位が大きくなるためである。

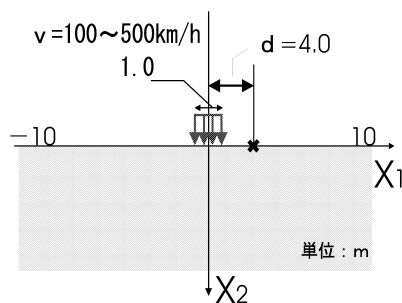


図-2 速度解析モデル

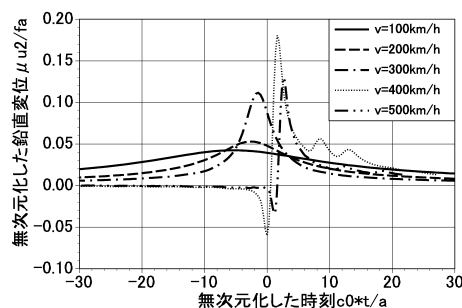


図-3 速度ごとにみた変位の時刻歴

4. 解析結果 (振動対策)

振動対策として、防振溝・防振壁について解析を行った。

まず、図－4のようなモデルに対して、溝を埋めない防振溝 (air) の場合、溝をコンクリート (concrete) または発泡ポリエチレン (eps) で埋めた防振壁の場合の3パターンで解析を行い、溝を掘らない半無限体の場合 (HS:half space) と図のA,Bの2箇所で比較した。結果を図－5、図－6に示す。なお、用いた材料定数は表1のとおりで、荷重の移動速度は $v=300\text{km/h}$ である。図を見ると、A点においては、壁と地盤との境界面で反射された波と伝播波の重ね合わせの影響により防振溝は変位が大きくなり、コンクリート防振壁のみ変位が小さくなっている。B点については、どのケースにおいても、変位が小さくなり、防振効果が得られている。次に、コンクリート防振壁とeps防振壁、防振溝に関して、深さを $h=1.0 \sim h=4.0$ まで変化させて解析し、比較した。(図－7、図－8、図－9) これによると、いずれも壁が深くなるほど変位は抑えられているが、その効果はコンクリート壁が顕著に表れている。コンクリート防振壁は弾性係数が高いため、変形に対する抵抗が大きい。そのため、壁が深くなると変形抵抗が増し、変位を抑えることができる。一方、弾性係数が非常に小さいEPS防振壁、中が空洞の防振溝は、変形抵抗が小さいため、壁を深くしても変位を抑える効果が小さい。

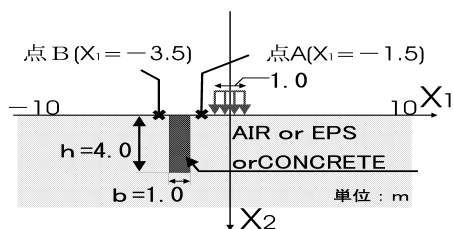


図-4 振動対策モデル

	弾性係数 $E(\text{MPa})$	ポアソン比 ν	質量密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$	P波速度 $c_p(\text{m/s})$	S波速度 $c_s(\text{m/s})$	表面波速度 (m/s) (km/h)
半無限地盤	45	0.33	1700	200	100	90 324
コンクリート	11760	0.25	2400	2424	1400	
発泡ポリエチレン(EPS)	3.89	0.1	112	188	125	

表-1 材料定数

5. 結論

荷重移動速度が表面波速度に近づくほど変位が大きくなり、それを超えると時系列波形が乱れることが分かった。

振動対策効果に関しては、防振溝と防振壁に関して効果があることを確認した。また、壁の弾性係数が大きいほど、壁を深くすることで変位が抑えられることが分かった。

参考文献

- 1) 吉岡修：新幹線鉄道振動の発生・伝播モデルとその防振対策法への応用，鉄道総研報告特別第30号，1999年10月
- 2) 星恵津子：移動荷重を受ける地盤振動解析，東京工業大学大学院総合理工学研究科，修士論文，2000

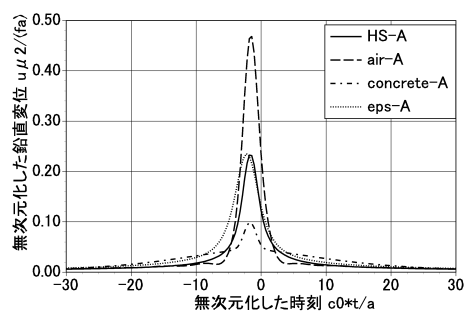


図-5 A点における変位の時刻歴

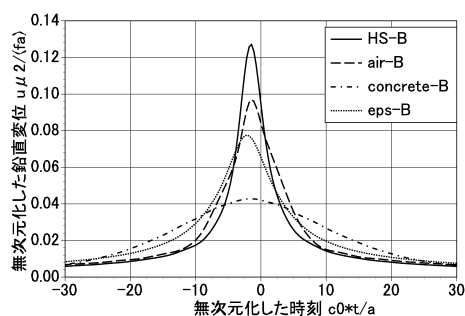


図-6 B点における変位の時刻歴

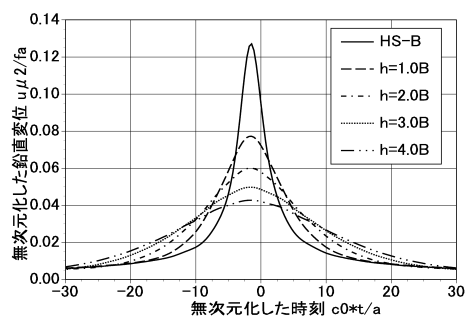


図-7 コンクリート防振壁の深さを変えたときの B 点での変位

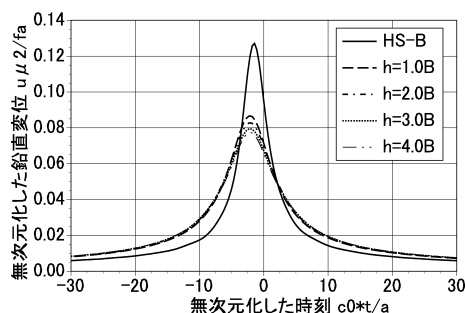


図-8 eps 防振壁の深さを変えたときの B 点での変位

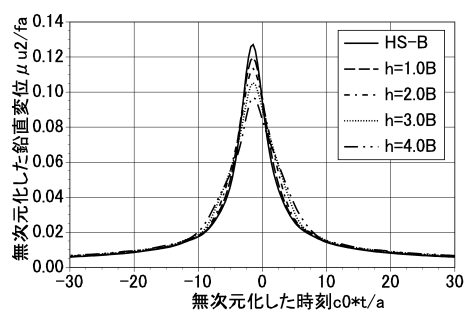


図-9 防振溝の深さを変えたときの B 点での変位