

を進行方向（x方向）に弾性支承上の梁の変位分布

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2L_c}} \exp\left(-\left|\frac{x}{L_c}\right|\right) \sin\left(\left|\frac{x}{L_c}\right| + \frac{\pi}{4}\right), \quad L_c = \sqrt{\frac{4EI}{K}}, \quad (2)$$

とする。ただし、EI はレールの曲げ剛性、K は枕木およびバラスト部の弾性反力係数を定義している。特性値 $q = 3\pi L_c / 4 = 1.5$ を採用する。

一方、進行直角方向（y方向）には図-2の二連の三角分布を仮定している。

$$\Psi(y \pm y_0) = \begin{cases} \frac{1}{w} \left(1 - \left|\frac{y \pm y_0}{w}\right|\right) & |y \pm y_0| \leq w \\ 0 & w \leq |y \pm y_0| \end{cases} \quad (3)$$

w は三角形の底面幅、 y_0 は三角形分布の頂点を与える座標値輪重载荷の波数領域表現は

$$\tilde{F}_N(\xi_x, y, z, \omega) = \frac{2\pi}{c} \tilde{\Phi}(\xi_x) \chi(\xi_x) \Psi(y) A_k(\omega_j) \delta(\xi - (\omega - |\omega_j|)/c) \delta(z) T \quad (4)$$

ただし、

$$\chi_N(\xi_x) = \left\{ 1 + e^{ia\xi_x} + e^{i(a+b)\xi_x} + e^{i(2a+b)\xi_x} \right\} \frac{1 - e^{iN_L \xi_x}}{1 - e^{iL \xi_x}} \quad (5)$$

$$\tilde{\Phi}(\xi_x) = 4 / \left\{ 4 + (\xi_x L_c)^4 \right\} \quad (6)$$

式(4)は対象振動数 ω に対して、加振振動数 ω_0 と移動速度の下でx方向波数が固定されることを意味する。

x-方向に波数展開してyz-面内のFEMの定式化をとると、支配方程式

$$(\mathbf{K}^{FEM} - \omega^2 \mathbf{M}^{FEM}) \bar{\mathbf{U}}^{FEM} = \bar{\mathbf{F}}^{FEM} \quad (7)$$

を得る。ここに $\mathbf{M}^{FEM}$ 、 $\mathbf{K}^{FEM}$ 、 $\bar{\mathbf{F}}^{FEM}$ はそれぞれ質量、剛性マトリックス、外力ベクトルで、

$$\mathbf{M}^{FEM} = \sum_{element} \rho^e \iint \mathbf{N}^T \mathbf{N} \det |\mathbf{J}| dy_e dz_e \quad (8)$$

$$\mathbf{K}^{FEM} = \sum_{element} \iint (\mathbf{B}^* \mathbf{N})^T \mathbf{D} (\mathbf{B} \mathbf{N}) \det |\mathbf{J}| dy_e dz_e \quad (9)$$

$$\bar{\mathbf{F}}^{FEM} = \sum_{element} \int \int \mathbf{N}^T \bar{\mathbf{f}} \det |\mathbf{J}| dy_e dz_e \quad (10)$$

ρ^e は密度、 $\mathbf{B}$ はひずみ変位マトリックスを定義しており、

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -i\xi_x & 0 & 0 & \partial/\partial y & 0 & \partial/\partial z \\ 0 & \partial/\partial y & 0 & -i\xi_x & \partial/\partial z & 0 \\ 0 & 0 & \partial/\partial z & 0 & \partial/\partial y & -i\xi_x \end{bmatrix} \quad (11)$$

$\mathbf{D}$ 材料特性はフックの材料特性マトリックスで、 $\det |\mathbf{J}|$ は座標変換に関するヤコビアン、 $\bar{\mathbf{f}}$ は外力ベクトルである。

$$\bar{\mathbf{u}}(x, y, z, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{n=1}^N \tilde{\mathbf{u}}\left(\frac{\omega - |\omega_0|}{c}, y, z, \omega\right) \exp\{-i(\omega - \omega_0)/c\} \quad (12)$$

時間領域解へは高速フーリエ変換アルゴリズムをとる。

3. シミュレーション結果

3.1 解析モデル

軌道部と原地盤を図-3のCASE-1のように2次元有限要素化し、奥行き方向の波動伝播も考慮した3次元波動伝播解析を行った。これは2.5次元解析と呼ばれる。有限要素領域の端部は波動の遠側方への伝播（逸散減衰）を粘性減衰効果で置き換えた。

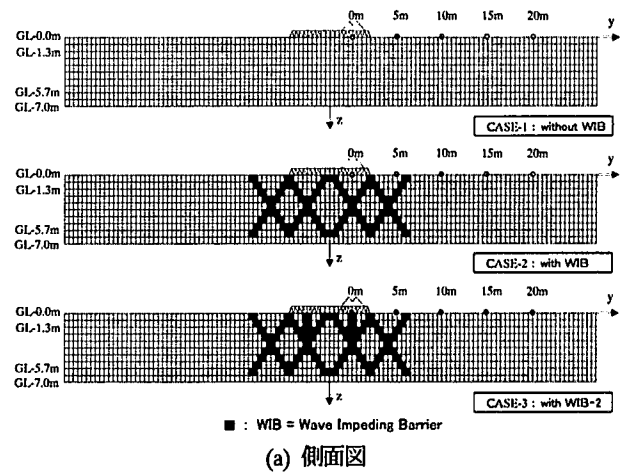


図-3 FEM 解析モデル

3.2 移動加振源による波動の伝播/遮断

一輪重による地表面の鉛直応答の様相を3次元表示で描いたのが図-5である。移動加振源による周辺地盤の応答について波動の伝播が波長によって大きく変化するのをビジュアルに確認できる。振動源からの波動は放射状に広がり伝播していくが、バラスト軌道上を波動がより速く伝わっていく様子も波頭に明瞭に現れている。これよりドップラー効果を受けた水平方向の伝播波の特徴が明瞭である。図-5の加速度分布から最も極だった振動源の前方45°の方向の縞模様様の波紋から算出した分散性を図-4に描くと、丁度レーリー波の特性線に一致しているので、レーリー波が卓越していると云える。この結果は、後述の波動遮断工法のX-WIBの設計基準に

重要な情報となる。

3.3 列車走行による沿線地盤内の波動場

つぎに、新幹線列車を対象にして、16 輛の車輛編成を考える。荷重列としての挙動は、各振動源からの発生波の干渉となって現れ、各波の位相に従って強められる場所と打ち消される場所が存在する。これが縞文様の結果となる。一輪重の場合に比べて（単位の大きさを仮定）列車の場合の複数輪重の応答は増大している。この増大の様相は加振振動数に従って層の遮断振動数より低いか高いかによって変わる。このことは、地表面の応答を移動方向に時間の経過として図-7のように表現するとよく理解できる。計算の都合上、同図では、先頭の4車輛分付近についてのみ描いている。加振振動数が $f = 8.33\text{Hz}$ のときは各車輪から発生する波動はその前方においては遮断振動数以上より伝わり、その後方へは遮断振動数以下なので伝わっていない。しかし、加振振動数が $f = 19.44\text{Hz}$ であると各車輪からの発生波はその前後方向へ伝わり、従って後続車輪からの前者伝播波と波長と相違の関係で重なり、打ち消し合いとなって干渉を起すため応答の増幅、減少となる。これは図-6に見た周期的な距離減衰特性の結果となる。

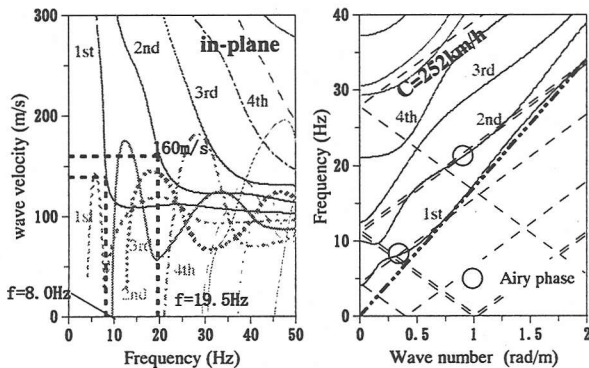
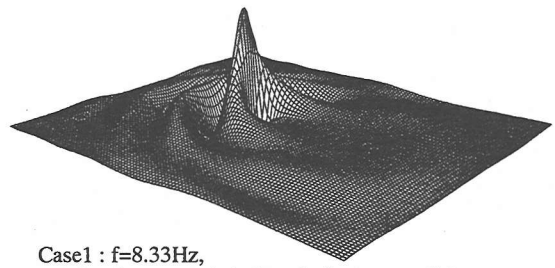


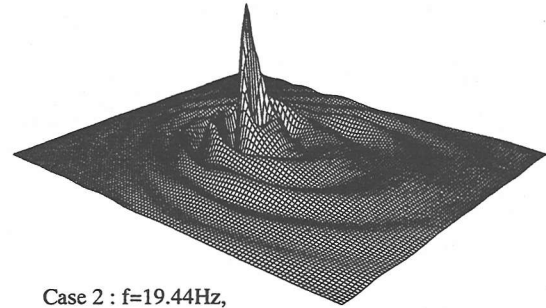
図-4 波動の分散特性

3.4 制振工法 X-WIB の導入

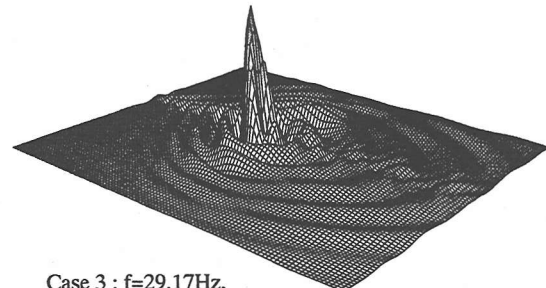
制振工法として、著者らの提案する X-WIB を地中に構築した場合のシミュレーション結果を示す。鉛直加振下における地盤内の波動場は、水平方向にはレーリー波が、深さ方向にはP波が卓越するとして考えると、WIB の設計は内幅 D がレーリー波に対する遮断振動数 $f = V_r/2D$ 未満を、WIB のクロス部の深さ H がP波についての遮断振動数 $f = 1/(\sum 4H_i/V_{p_i})$ 未満を規定すればよい。ソイル杭間幅 4m（内幅 3m よりレーリー波に対する対象振動数が 25.1Hz 未満）を CASE-2、更にこれに縦方向に短ソイル杭を加えたものを CASE-3 として、WIB の物性値には地盤改良による測定値を参考にした。



Case1 : $f=8.33\text{Hz}$,
Driving frequency is below the layer cut-off frequency



Case 2 : $f=19.44\text{Hz}$,
Driving frequency is above the layer cut-off frequency



Case 3 : $f=29.17\text{Hz}$,
Driving frequency is above the layer cut-off frequency

図-5 単一輪重による振動の発生と伝播

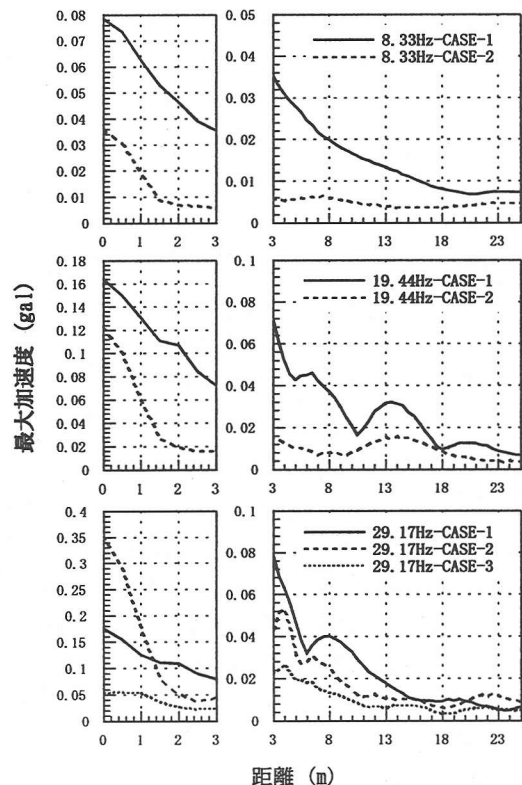


図-6 X-WIB に対する最大応答値の距離減衰特性

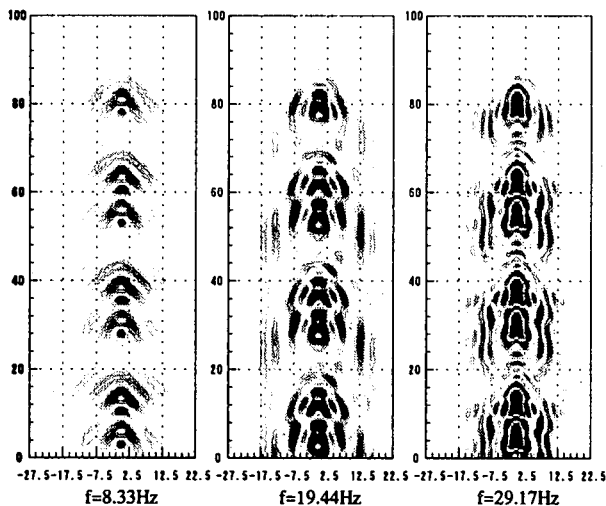


図-7 列車走行による地盤（地表面）の最大値応答の分布，
走行速度 252 km/h, Case1

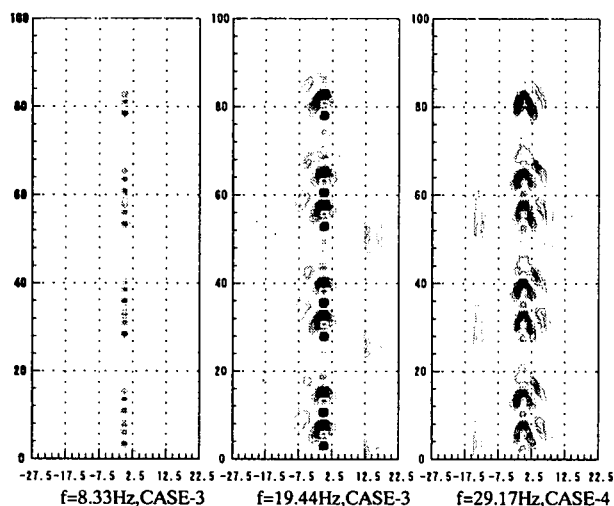


図-8 列車走行による地盤（地表面）の最大値応答の分布，
走行速度 254 km/h, 加振振動数 19.44 Hz

図-10 に WIB による応答の低減効果を調べた。CASE-2では、加振振動数が8.33HzのときはWIBを埋設することにより約70%～80%の制振効果を得ることができる。加振振動数が19.44Hz以下のときは第1層地盤より求められたレーリー波の波長 λ_r の半分、 $\lambda_r/2=3.873\text{m}$ よりWIBの内幅の方が狭くなりWIBを埋設することにより制振効果を得ることができる。しかし、加振振動数29.17Hzに対して、荷重直下においては $\lambda_r/2=3.873\text{m}$ より狭い間隔の施工は難しい。CASE-4（CASE-3に加振源直下に縦のWIBの追加）では加振源直下にWIBを入れたことにより、WIBが加振源直下の振動をWIBを介して下方へ逃がす効果も伴い、本来の直達波を低減させ周辺地盤の振動を低減するというWIBの効果も十分引き出し低減効果が現れている。

4. むすび

本研究での高速列車走行に伴う沿線の地盤振動の評価と、その振動対策に関して得られた結果をまとめれば、

- (1) 単一の移動振動源（一輪重）に対する解析から地盤内の発生波において、移動速度による加振振動数のドップラー効果を確認し、それより決まる波長と地盤層厚の関係で波動の伝播/非伝播現象を振動源の進行方向の前方、後方において説明できた。これは対象地盤層の波動遮断振動数によって決定される。
- (2) 新幹線列車の走行を模擬するものとして複数車両の編成を対象とした場合、前後輪重による発生波の干渉を確認した。これによって沿線地盤応答には、軌道直交方向に起伏のある距離減衰性が現れる。
- (3) 層状地盤内の波動伝播の様相を分散曲線を用いて、伝播波の特定をすることができ、合理的な制振工法への基礎データが得られた。
- (4) 地中部に波動バリアーの構築を目指した X-WIB は、広い振動数帯域において非常に振動低減効果がある。

参考文献

- 1) 竹宮宏和, 合田和哉: 移動加振源による成層地盤の3次元遷移応答特性, 土木学会論文集 No.563/I-39, 137-148, 1997.4.
- 2) 竹宮宏和, 合田和哉, 小森大資: 高速列車走行による沿線地盤振動のコンピュータ・シミュレーション予測, 土木学会論文集 No.619/I-47, 193-201, 1999.4.
- 3) 竹宮宏和, 合田和哉: 移動加振源による多成層地盤上の盛土構造の振動評価への FEM-BEM の適用, 土木学会論文集 No.605/I-45, 199-152, 1998.10.
- 4) 竹宮宏和, 合田和哉: 衝撃/移動荷重による剛基盤上の成層地盤の波動伝播/非伝播現象, 土木学会論文集 No.605/I-45, 161-169, 1998.10.
- 5) 竹宮宏和, 合田和哉, 佐藤直毅: 波動遮断ブロック (WIB) の受動制振効果, 土木学会論文集 No.549/I-37, 221-230, 1996.10.
- 6) Takemiya, H. and Kellezi, L.: Paraseismic behavior of wave Impeding Barrier(WIB) measured for ground vibration reduction, 10th Japan Earthquake Engineering Symp.1879-1884, 1998.