

高速列車走行による沿線地盤振動性状 と振動対策工法—X-WIB

竹宮 宏和¹・塩津 吉彦²・湯浅聡文³

¹正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部 環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山県岡山市津島中3)

²松尾橋梁設計部第一課 (元岡山大学工学研究科修士課程学生)

³元岡山大学環境理工学部学生

本研究は、前半では、平坦軌道を走行する新幹線列車から発生する地盤振動について、振動計測とコンピュータ・シミュレーションから考察したものである。定式化において、列車荷重には軌道特性からの分布荷重を仮定し、枕木間隔による擬似周期性を調和周期関数で与え、車軸間隔、車両の編成を考慮している。解析ツールとして、2.5次元 FEM モデルを使用している。後半では、振動対策として、著者らの提案するX-WIBをサイトに導入したときの振動低減効果を調べている。本研究は高速列車走行時の沿線の振動評価・予測および対策工法の開発に寄与する。

Key Words : train induced vibration, field measurement, flat track, 2.5-dimensional FEM, vibration transmission/attenuation, vibration reduction, X-WIB measure

1. まえがき

都市間を結ぶ鉄道に一層の高速化の期待がもたれ、我が国の新幹線列車も、最近では 300km/h を実現しており、さらに将来の高速化への開発が進められている。列車の高速走行は軌道への衝撃的な载荷となって周辺環境へ振動を伝えることになる¹⁾。このことは、半無限弾性体への移動载荷問題から逸早く指摘されてきた²⁾。この振動源は沿線の住民の快適生活や精密機械の稼働などにマイナスの影響を与える可能性があり、環境振動として重要な課題を我々に与えている³⁾。現に新幹線の高速化に伴って、沿線振動が予想以上に現れる箇所と、意外にも振動を感じられない箇所があることが計測から明らかになった。また距離減衰においても軌道からの距離に比例して単調に減少するのではなく、特定の距離で大きくなることも報告されている⁴⁾。この高速列車による振動影響を的確に評価・予測することは社会的に重要である。当該問題には地盤内の弾性波動伝播が大きく関わっており、これを抜きにしては、現象の本質を解明することはできない。

新幹線の走行時の時系列応答(時刻歴)は、計測データからは前論文⁵⁾に示したように、軌道部近傍において数10Hz までの振動成分を幅広く有する。しかし軌道から離れるに従ってサイトの地盤条件によって振動数成分に変化を示す。著者らはこの波動場をコンピュータ・シミュレーションで再現する方向の研究を進めて来ている^{6,7)}。

列車の走行は、車両が軌道上を移動することにより、輪重の軌道への順次载荷となる。そして枕木を介して路

盤への応力の伝達となる。従って振動源の载荷は擬似周期的となって、その結果、波動が原地盤中を伝播する^{8,9)}。このような輪重载荷による発生波は、輪重の移動速度により観測点においてドップラー効果を受ける。それが輪重数だけ繰り返されることから、伝播波の干渉が生じる。この波動場はサイトの条件によって大きく変化する。地盤物性に従って伝播し易い波長の波と、そうでない波がある。沿線振動を評価・予測するにはこれらの現象を解明することから始まる。

鉄道沿線の振動対策工法として、従来、連続地中壁工法その他が検討されてきた¹⁰⁾。著者らは、層状地盤内の波動の伝播、非伝播現象を分ける遮断振動数¹¹⁾を利用した新しい工法である WIB 工法を開発している^{12,13)}。最近では、深い軟弱地盤に関して、波動の伝播阻止を狙った X-WIB を提案している^{13,14)}。これらの WIB 工法の効果の検証のため、これまでは加振源を固定させた状況下で、衝撃载荷による遷移あるいは定常応答解析からその制振効果を評価してきた。ここでは列車の走行を考慮しての X-WIB の制振メカニズムと効果を文献¹⁵⁾に引き続き調べている。

なお、本研究のシミュレーションでは、対象波動場のフーリエ変換領域の有限要素解を離散逆変換して求めている。

2. フィールド計測からの振動性状

新幹線走行時の沿線振動計測のうち、ここで対象とし

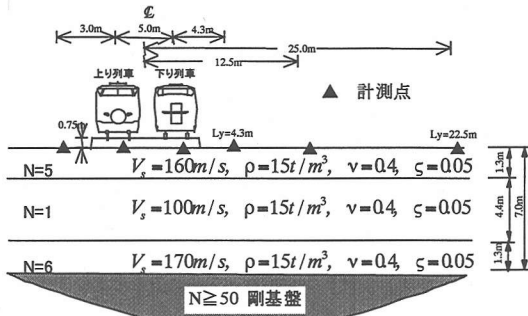


図-1 平坦軌道上り列車走行

た軌道は平坦軌道（図-1）で、新幹線列車は0,100系および300系である。当該地区は、ほぼ水平な成層地盤上の直接軌道であり、近傍箇所でのボーリング調査によると、N値が50以上の基盤上にN値=1~6程度の軟弱層が数mの深さに堆積している。これを参考に決定した地盤状況を図-1にモデル化して描いた。同図中にせん断波速度 V_s 、密度 ρ 、ポアソン比 ν 、内部減衰率 ζ について記述してある。振動計測点は▲印で示した。

図-2は、列車が下り線を走行時の各計測点における加速度の時刻歴を描いたものである。軌道直下の波形は衝撃的であり、軌道から離れた地点になると波形が包絡線において紡錘状に変化しているのが明瞭である。図-3はそれらの波形のフーリエ振幅を示したものである。卓越振動数は、フーリエ振幅図から、軌道近くの下り歩道（ $L_y=4.3\text{m}$ ）で2.5, 4, 8, 19, 28Hz近傍に現れている。列車走行時に軌道部で現れる振動数には、列車速度と車輪間隔あるいは枕木間隔が原因している。3. シミュレーション結果で詳述するが、2.5, 4, 8Hzの卓越振動数には前者が関係し、19, 28Hzには後者が関係している。列車軌道から離れるにつれて、これらの卓越振動数は少しずつ振動数においてシフトしている。そして軌道から10m離れると、8Hzより低い振動数は存在しなくなる。これは水平方向への波動の伝播が生じていないことを意味している。また30Hzより高い振動数成分も消失している。これは距離減衰によるものであろう。波動の伝播と非伝播の様相を明確に把握するために、振動源からの距離 $L_y=10, 22.5\text{m}$ の2地点の加速度のフーリエ振幅 $\bar{A}(f)$ を振動源位置（ $L_y=0$ ）の値 $\bar{A}_0(f)$ で除した伝達関数を図-4に示した。比には対数表示をとっている。図-4において、振動数帯域で0-8Hz, 8-19.5Hz, 19.5Hz以上（これらの数値の選択については後述する）に区分して、各帯域で実測値に対する最小2乗法による回帰直線を求め記入した。その結果、8Hz以下の振動数成分が急激に減衰していることが明瞭で、このことは同振動数以下の範囲では波動が非伝播で、それより高い振動数成分のみが地盤内を伝播していることが読み取れる。この波動遮断の現象には原地盤の厚厚

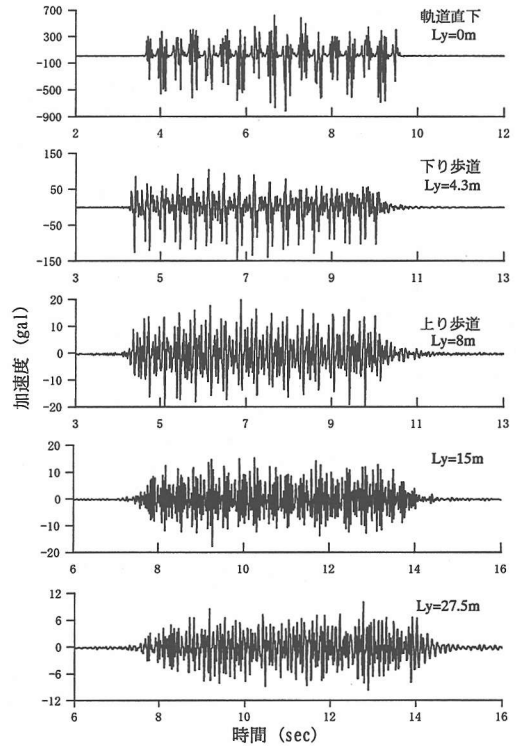


図-2 下り新幹線列車走行時(254Km/h)の地盤の鉛直方向加速度時刻歴,平坦軌道

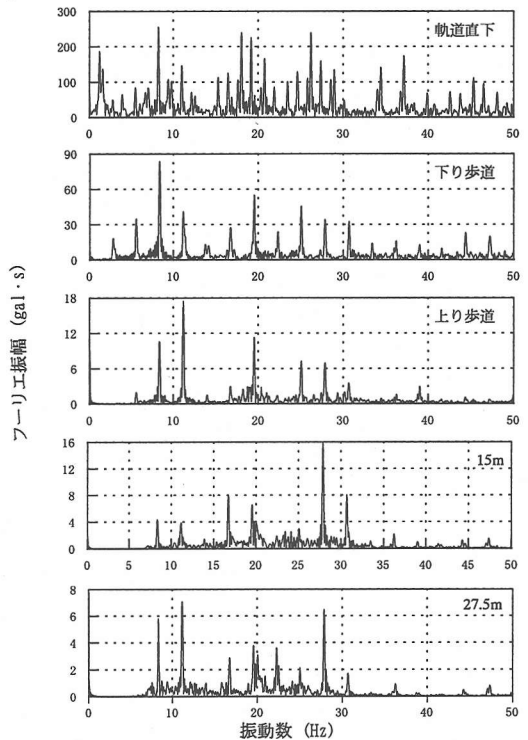


図-3 加速度波形(図-2)のフーリエ振幅

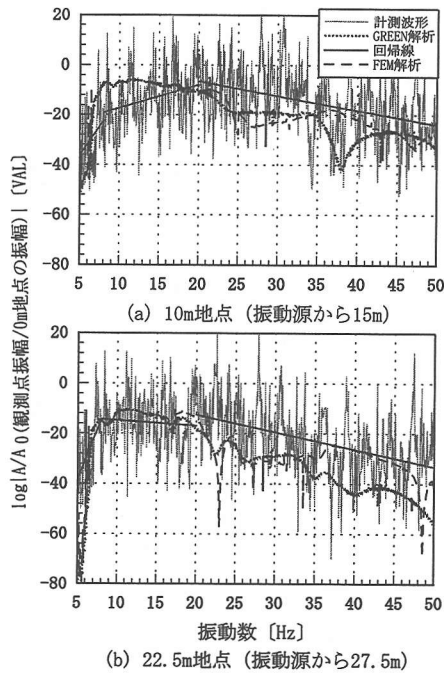


図-4 地盤の振動数伝達関数最大加速度 (gal) z-方向

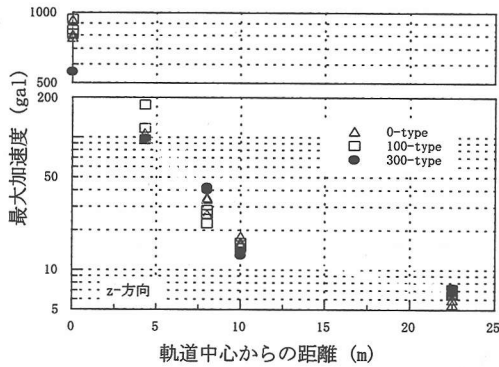


図-5 最大加速度 (z-方向) の距離減衰, 平坦軌道

と伝播波の波長が関係しており、成層地盤の特徴¹⁰として支持層の深さによる自然地盤状況での波動遮断現象の証拠である。

図-5は最大加速度の距離減衰性を示したものである。計測値には、上り線、下り線を新幹線列車が走行したときの結果を併せて示している。沿線振動の距離減衰は、軌道から4.3mと8mの測点で列車速度によって大きく変動する。300系車両は“ひかり”、0,100系は“こだま”である。

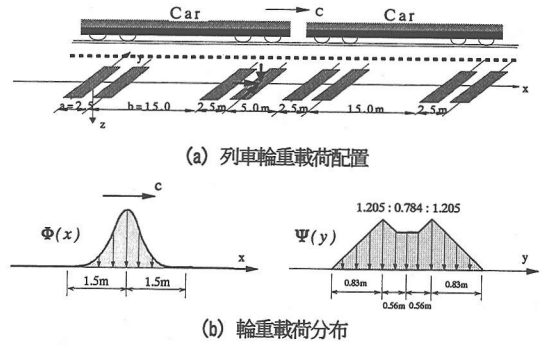


図-6 列車荷重のモデル化

3. シミュレーション法

(1) 列車走行荷重

列車の走行によって軌道へ荷重される荷重特性について述べる。列車振動源はレールと枕木あるいは路盤と列車との動的相互作用、軌道狂いなどの要因が合わさって形成され複雑になるが、基本的には、図-6(a)に示すように、一車両(車両長 L_i [m])が速度 c [m/s]で通過することによって、4個の車輪荷重が順次レールへ荷重され、さらに N 車両の編成によって車両数だけ移動速度に従った時間遅れの荷重状態となる。この荷重状態に対して前論文⁹では、次式を与えた。

$$F(x-ct, y, z, t) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \begin{array}{l} \Phi(x-ct-nL_i) \\ + \Phi(x-ct-a-nL_i) \\ + \Phi(x-ct-a-b-nL_i) \\ + \Phi(x-ct-2a-b-nL_i) \end{array} \right\} \Psi(y) \delta(z) \sum_j A(\omega_j) \exp(i\omega_j t) \quad (1)$$

ここで、 a, b は車軸間隔から2.5, 15mで、 $L_i=25$ mである。

いま、1つの輪荷重による路盤への荷重を進行方向(x 方向)に弾性支承上の梁の変位分布 $\Phi(x)$ に従って次式の数式表現をとる。

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

$$L_c = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K}}, \quad q = \frac{3\pi L_c}{4}$$

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 は軌道剛性 EI と地盤剛性 K によって決まるもので、通常の列車走行速度(軌道の曲げ波の伝播速度、地盤のせん断波速度よりずっと低い範囲)では、 $q=1.5$ mが適切な値としてとれる。この妥当性については、著者らの最近の研究がある^{16, 17}。一方、進行直角方向(y 方向)には、分布 $\Psi(y)$ として図-6(b)の二連の三角分布を仮定している。

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

ここに B 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で、係数 $A(\omega_j)$ は枕木間隔 d と列車速度 c により与えられる擬似周期性を $\exp(i\omega_j t)$ と表現したときの振幅⁹⁾である。ただし、

$$\omega_j = \pi d / jc \quad (j = 1, 2, 3, \dots) \quad (4)$$

(2) 軌道-地盤系の解析モデル化と応答解析手法

地盤内の振動伝播の解析に関して、著者らは既に 2.5 次元解析手法を示した⁹⁾。そこでは断面内 ($y-z$ 面) で有限要素の離散化、奥行き方向に応答を波数展開した。したがって空間-時間に関するフーリエ変換によって波数-振動数領域の有限要素領域の定式化がなされる。外力項は式(1)により与えられるので、 x 方向にはその振動数 (\sim を付す) - 波数 (\sim を付す) 領域において、

$$\tilde{F}_N(\xi_x, y, z, \omega) = \frac{2\pi}{c} \chi(\xi_x) \delta\left(\xi_x - \frac{\omega - |\omega_j|}{c}\right) \delta(z) \quad (5)$$

$$\chi_N(\xi_x) = \tilde{\Phi}(\xi_x) \left\{ 1 + e^{i\omega \xi_x} + e^{i(a+b)\xi_x} + e^{i(2a+b)\xi_x} \right\} \cdot \frac{1 - e^{iN L_c \xi_x}}{1 - e^{i L_c \xi_x}} \quad (6)$$

$$\text{ただし} \quad \tilde{\Phi}(\xi_x) = \frac{4}{4 + (\xi_x L_c)^4} \quad (7)$$

ξ_x は x 方向の波数を、 i は虚数単位を表す。 y 方向の分布 $\Psi(y)$ には式(3)を直接に有限要素の内挿関数で離散化する。したがって有限要素領域の支配方程式は

$$\left[\mathbf{K}^{BEM}(\xi_x, y, z, \omega) - \omega^2 \mathbf{M} \right] \left\{ \tilde{\mathbf{U}}^{BEM}(\xi_x, y, z, \omega) \right\} = \tilde{\mathbf{F}}^{BEM}(\xi_x, y, z, \omega) \quad (8)$$

ここで、地盤物性値には $\lambda^c = \lambda(1 + 2\zeta_j)$ 、 $\mu^c = \mu(1 + 2i)$ と内部減衰率を導入した複素ラメー定数を使用している。定式化では歪-変位関係が波数を含むが、それ以外は通常の平面歪の 2 次元有限要素法と変りはない。

支配方程式(8)の波数振動数領域解は、逆フーリエ変換して空間・時間領域解に求められるが、式(5)より、各加振振動数の下で、移動載荷方向の波数が固定されるので

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{\mathbf{u}}\left(\frac{\omega - \omega_0}{c}, y, z, \omega\right) \exp\left(i \frac{\omega_0 x}{c}\right) \exp\left(i\left(\omega t - \frac{x}{c}\right)\right) d\omega \quad (9)$$

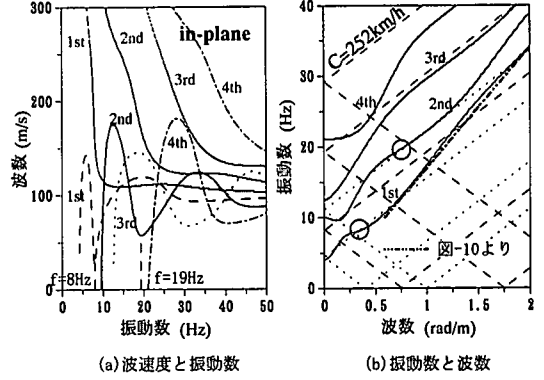


図-7 対象地盤の波動分散特性

この離散化による評価は

$$\mathbf{u}_s(x, y, z, t_m) = \frac{1}{2\pi T} \sum_{n=1}^N \tilde{\mathbf{u}}\left(\frac{\omega_n - \omega_0}{c}, y, z\right) \exp\left(i \frac{\omega_0 x}{c}\right) \exp\left(i \omega_n \left(t_m - \frac{x}{c}\right)\right) \quad (10)$$

ただし $\omega_n = n\Delta\omega$ は離散振動数、その刻みは $\Delta\omega = 2\pi/T$ 、 $T = N\Delta t$ は周期で $t_m = m\Delta t$ は離散時間、 Δt は刻み時間である。

4. シミュレーション結果

(1) 原地盤の波動特性

本研究で対象とした図-1の地盤は非常に堅い支持層を有しているため、この上面を剛基盤面として解析する。層状地盤は分散性の波動場を呈する。このことは分散曲線を描くとよく分かる。分散曲線の計算には、支配方程式のフーリエ積分変換を適用しての薄層要素法に基づく全体層剛性マトリックスの固有値解析に拠った¹⁸⁾。図-7は表層地盤に対する分散特性で、波速度と振動数、振動数と波数の関係を示している。図-7(a)で実線は位相速度、破線は群速度を描いている。図-7(b)で実線は固有モード振動数を描いている。分散曲線において、群速度の最小となる振動数はアアリー相と呼ばれ、波動エネルギーを最もよく伝える振動数である。この振動数は図-7(a)より約 8Hz と 19Hz と読み取れる。これらを○印で図-7(b)に書き入れた。

ところで移動する周期荷重においては、移動速度 c と加振振動数 f_0 から特性曲線が $f = c\xi / 2\pi \pm |f_0|$ で与えられる¹⁾。加振振動数 f_0 は一般に非負で与えられる。しかし、解析では全領域で定義されるため、ここでは $|f_0|$ の表現とした。 f_0 の選定において、理論的に与えることができる重要な値として、対象とする列車走行速度と車軸間

隔に起因する値に観測波形からの考慮を入れた $f_0=8.33\text{Hz}$ がある。列車編成による荷重列の式(6)を適用するときは、車軸間隔からの f_0 を加振振動数として与えなくても、つまり $f_0=0\text{Hz}$ として、車軸配置から発生する振動数は自動的に考慮される。そして列車速度と枕木間隔(0.6m)に起因する値、つまり新幹線軌道を対象として、式(4)の $j=2, 3$ の場合が理論的に卓越してくること、それに観測波形からの考慮をして $f_0=19.44, 29.17\text{Hz}$ を主に対象とする。

以上の加振振動数 $f_0=8.33, 19.44, 29.17\text{Hz}$ の走行特性線を破線で図-7(b)に、さらに同移動速度の下で上記のエアリー相を通るものを点線で描き入れた。そのときの加振振動数は約4Hz, 12Hz, である。図-7を参照すると、4Hz加振では1次固有モード、12Hzでは2次固有モードの波動伝播が惹起され易いと予測できる。

移動加振状態の場合、観測点の波形にはドップラー効果によって、加振振動数を中心にある範囲の振動数帯域内の振動数 f の応答が現れる。軌道から離れた観測地点での加振振動数 f_0 に対するドップラー効果は、対象波動の伝播速度を V として

$$f_0 \frac{V}{V+c \cdot \cos\theta} \leq f \leq f_0 \frac{V}{V-c \cdot \cos\theta} \quad (11)$$

の範囲で生じる。ただし θ は注目点と振動源位置を結ぶ線が振動源移動線となす角度である。波動の伝播速度は、図-7から明らかなように固有モード波ごとに変化する。以上のことを利用して、限られた選定加振振動数(ここでは $f_0=8.33, 19.44, 29.17, 40\text{Hz}$)の下で伝達関数をそれぞれにたいするものの包絡線として描くことができる。いま、グリーン関数計算⁹⁾の結果と次節のFEM解を図-4において計測値結果と比較した。移動加振源には、新幹線の16両編成の加振源状態をとった。式(2)から明らかなように、列車の構造諸元に従った繰り返し載荷の擬似周期性が与えられた加振振動数の上に加わる。計測値との対応はよい。特に注目すべきは、遮断振動数が8Hzを近傍に現れて波動の非伝播を捉えていることで、これは図-7から第1次エアリー相を与える振動数と一致する。

(2) FEMによる地盤解析結果

軌道部と原地盤を図-8のCASE-1のように2次元有限要素化し、2.5次元波動伝播解析を行った。対象領域内に側方境界からの反射波が入らないように図-8のFEMにさらに45mの側方要素を追加し、最側方の幅10mの範囲には逸散減衰を置き換える内部粘性減衰率 $\zeta=0.3$ を仮定した。応答計算には、時間刻み0.005s、フーリエ変換回数2048に対応した振動数刻み0.0976Hzとした。

振動源として、式(1)で記述される一輪重による移動荷重を考える。x, y方向の断面積が1で荷重総和が1/2の大きさとする。移動速度および枕木間隔は前述の値を用い

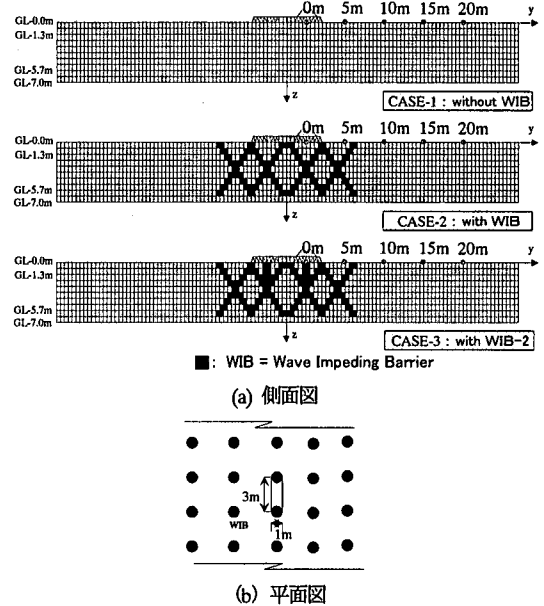


図-8 FEM解析モデル

ているので、付与すべき加振振動数は $f_0=0, 8.33, 19.44, 29.17\text{Hz}$ とした。 $f_0=0\text{Hz}$ は移動載荷、それ以外は移動加振状態となっている。載荷はバラスト部へ直接にとった。CASE-1において図-8(a)の代表的な距離の応答計算結果のうち鉛直方向の加速度成分を図-9に示す。同図においては、荷重の注目点の通過時間を2.0[s]後として描いている。FEM解析におけるメッシュ分割、側方境界の検証のため、成層地盤上のグリーン関数と比較した。なお、FEMモデルにおいて、バラスト部の有無は地盤応答にほとんど影響を与えてないことを確認している。グリーン関数解とFEM解の一致度は良好である。水平応答においては、荷重の移動方向(x方向)にはかなり良好な一致を示していたが、それに直交するy方向の成分(図を省略)では差が見られた。

図-9の応答性状からは、まず輪重の移動線上では、衝撃的な応答となっている。加振源の通過前後においてドップラー効果が波形に現れている。そして加振振動数 f_0 に応じて波動場が大きく変化している。移動線から離れた地盤応答の荷重通過前では、応答振動数は高くなり、通過後では低くなるが、対象地盤のエアリー相の波動も現れてくる。 $f_0=8.33\text{Hz}$ の加振の場合は、第一次のエアリー相の振動となっている。 $f_0=19.44$ の場合はドップラー効果後の振動数が現れている。29.17Hzの加振の場合は、2次のエアリー相とドップラー効果後の振動数が接近しており、それらがうなり現象を形成している。

鉛直応答に対する地表面の様相を3次元表示で描いたのが図-10である。移動加振源による周辺地盤の応答について図-9で考慮した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。時間の経過

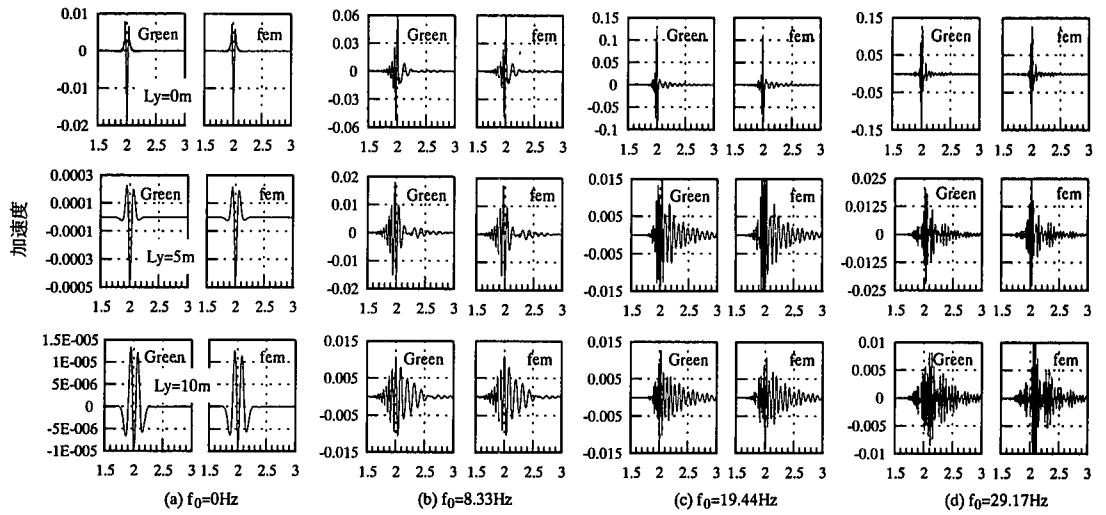
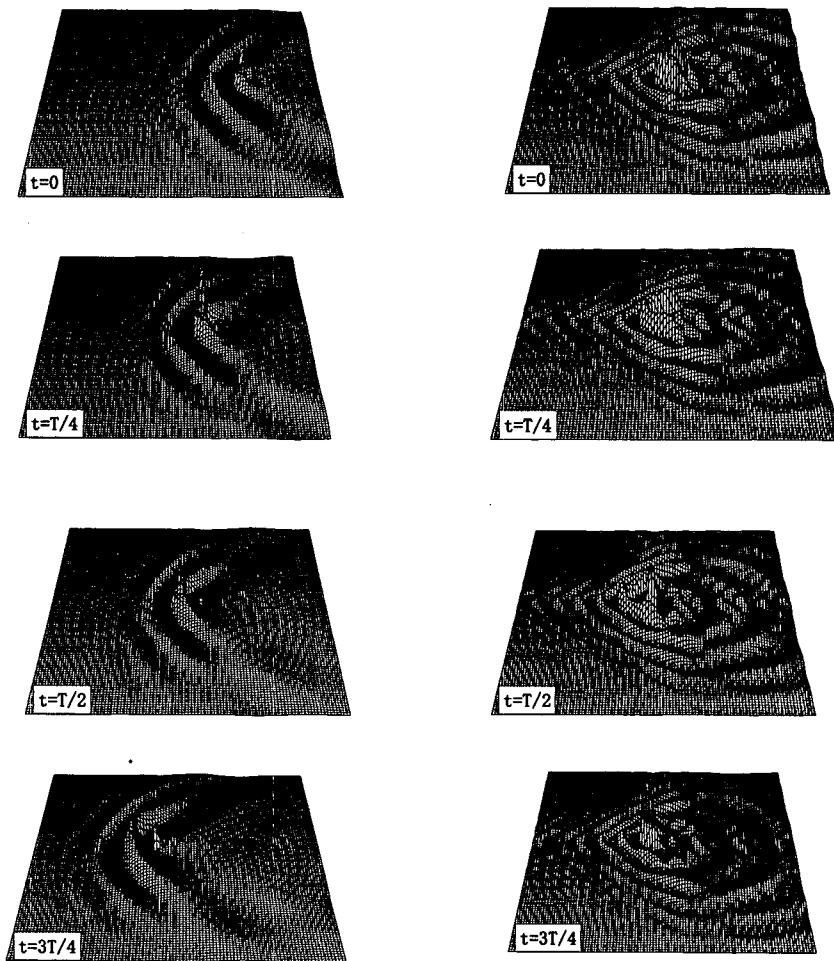


図-9 一輪重に対する地盤表面の鉛直方向時刻歴応答 (加速度成分)



5Hz 加振振動数のカウンター図
 図-10 一輪重の走行による地表面の波動伝播の様相
 1/4 周期ごとに描写

25Hz 加振振動数のカウンター図
 荷重分布は図-6 (b) に記述, 走行速度 360 km/h

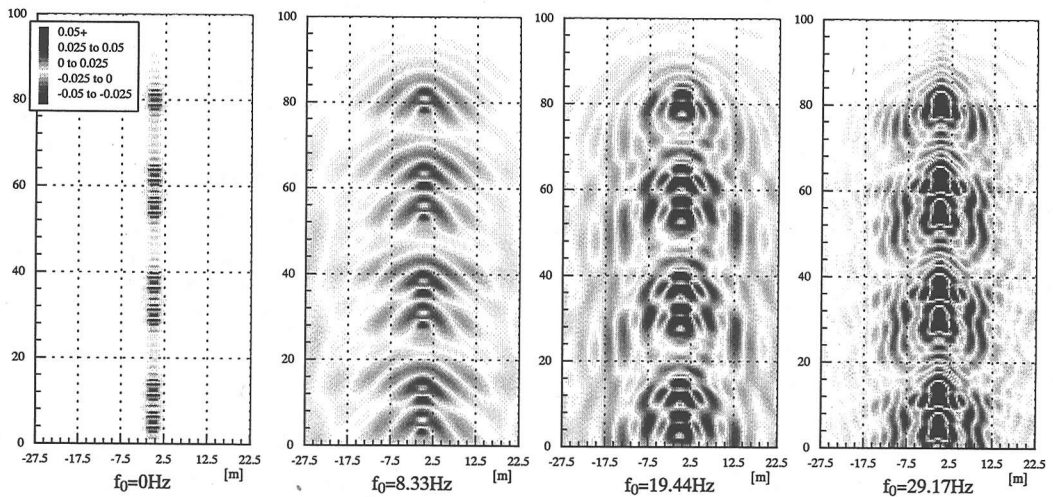


図-1 2 列車走行による地盤（地表面）の最大値応答の分布，走行速度 252 km/h

としてよく理解できる。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-1 0 の瞬間加速度分布から最も際立った振動源の前方 45° 方向の縞模様から算出した波数-振動数の関係を振動数が 10Hz 以上の帯域でプロットしたものを図-7 において直線で表すことができ，その結果は 1 次固有モード線にほぼ一致している。直線で表示できることは非分散性の波動であること，さらにこの部分は前論文¹⁾を参照して表層のレーリ波であることが指摘できる。

つぎに，鉛直応答の軌道からの距離減衰状態を調べた。まず単一輪重の移動（単位の大きさ）を考え，走行を図-1 の下り線とし，移動速度は 70m/s=252km/h としている。このシミュレーション結果の最大加速度値を図-1 1 に描く。加振振動数が $f_0=8.33\text{Hz}$ の場合の応答値は，軌道からの距離と共に単調減少するのみで，水平方向伝播の波長による応答の起伏が見られない。これは図-1 0 において考察したように波長に対して層厚が小さいためである。一方，加振振動数が層の遮断振動数より高い $f_0=19.44, 29.17\text{ Hz}$ では，単調な減衰でなく途中小さな増幅を示しながら減衰している。この起伏の原因には，対象地盤の成層性からくる固有モード波の周期性が挙げられる。

つぎに，新幹線列車を対象にして，16 両の車両編成とする。この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弱められる場所が存在する。図-1 2 は地表面応答を描いたもので，上の結果が縞模様となるのがよく理解できる。ここでは相対的な大きさのみに注目している。

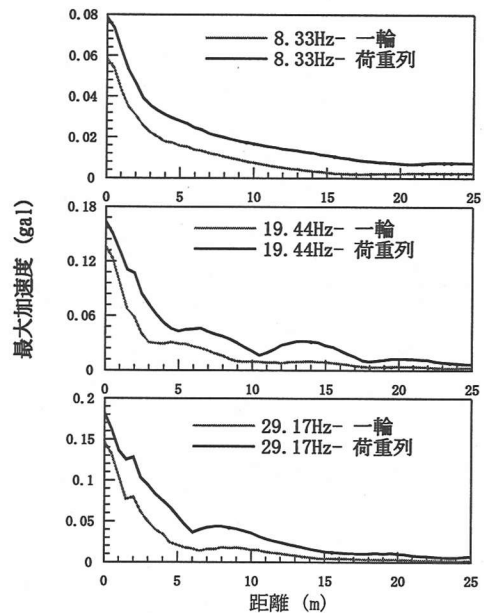


図-1 1 一輪重列車輪重に対する最大応答値の距離減衰特性

一輪重の場合に比べて列車の場合の複数輪重による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。計算の都合上，図-1 2 では，先頭の 4 車両分付近についてのみ描いているが，輪重の移動載荷の状態 ($f_0=0$) では，地盤内の波動は相対的に小さく，輪重によるたわみに相当した加速度が列車の通過に伴って現れるのみである。

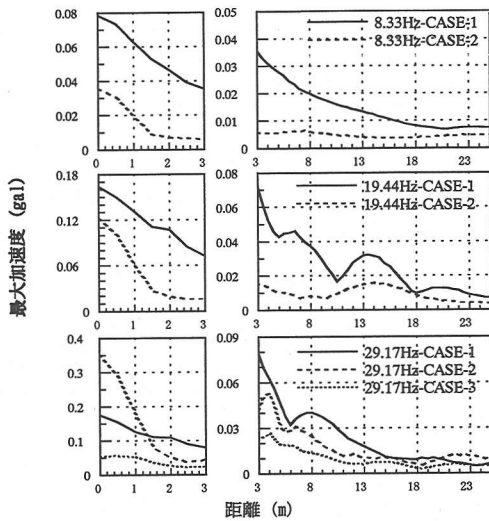


図-1 3 X-WIB に対する最大応答値の距離減衰特性

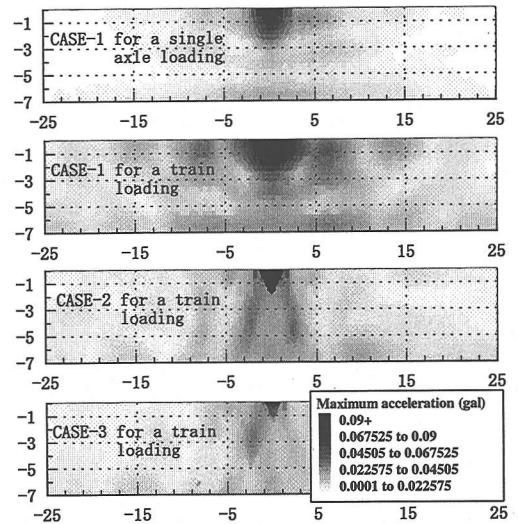


図-1 4 鉛直面内の最大応答値分布, 加振振動数 $f_0=19.44\text{Hz}$

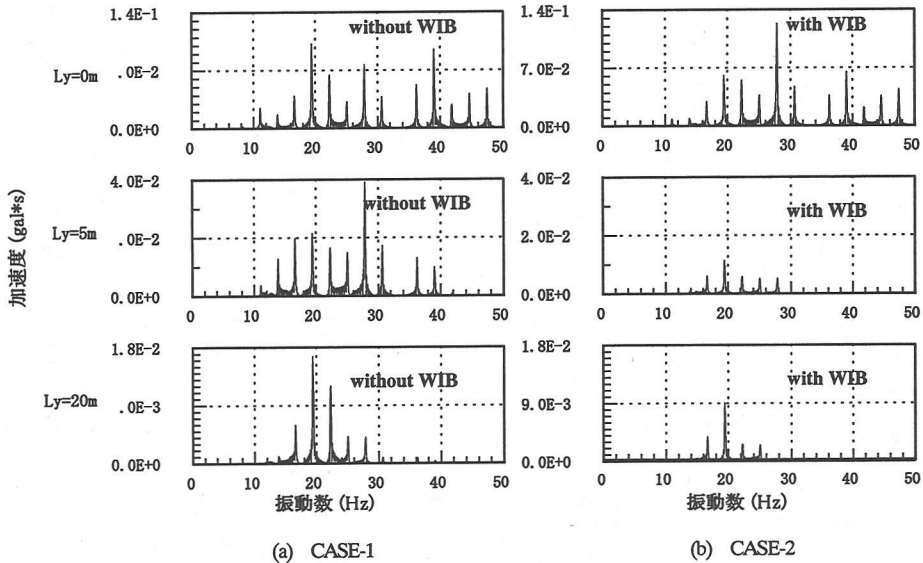


図-1 5 応答のフーリエスペクトル振幅, 加振振動数 $f_0=19.44\text{Hz}$

振動数が $f_0=8.33\text{Hz}$ のときは各車輪から発生する波は、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 $f_0=19.44\text{Hz}$ 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方伝播波と干渉を起すため、波長と位相の関係で重なり、あるいは打ち消し合いとなって応答の増幅、減少となる。これは輪重載荷位置からのオフセットに従い、軌道に沿って平行に現れるようになる。図-1 11に見た周期的な距離減衰特性の結果の一要因でもある。

(3) 工法 X-WIB の導入

X-WIB とは、波動遮断のためバリアーである斜めソイル杭の柱列組を地中に構築することで地盤内の波動伝播特性を変え、ある波長域の波動伝播を阻止する構造である。実際には、施工上、地中攪拌工法によってセメント・ミルクを土中に注入し、ソイル杭を形成する地盤改良工法が挙げられる。ソイル杭中には剛棒を入れて引張抵抗力を期待する。これに対する解析モデルを図-8のCase2, CASE-3に示す。

X-WIB の制振基本原理は、WIB 構造と周辺地盤の動的相互作用により地盤振動を拘束することにある。鉛直加

振下における地盤内の波動場は、水平方向には基本レーリ波が、深さ方向にはP波が卓越するとして、その設計の目安は¹⁴⁾ (1)水平総幅はレーリ波長 λ_R の1/2以上、(2)各WIBの間隔はレーリ波長 λ_R の1/4以下、(3)WIBの深さはレーリ波長 λ_R の(1/2~1/3)、WIBの設計は内幅Dがレーリ波の遮断振動数以下から、その1/4波長程度、(4)WIBのクロス部の深さ H_c がP波についての遮断振動数以下で $f < 1 / \left(\sum_{i=1}^{M/P} 4H_i / V_{pi} \right)$ を規定するとよい。ここに H_i は成層地盤の各層厚、 V_{pi} は各層のP波速度である。本解析例では、径1mのソイル杭間幅4m(内幅3mよりレーリ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。

図-13にWIBによる応答の低減効果を調べた。図-7を参照して、加振振動数が8.33Hzのときは基本レーリ波(一次固有モード)の波長が λ_R ≈約20mとなることから、WIBの総幅Bは $\lambda_R/2=10m$ 以上、WIB間隔Dは $\lambda_R/4=5m$ 以下、WIB深さHは(1/2~1/3) $\lambda_R=10\sim7m$ 以上となる。これらに基づいてCASE-2は作成された。図-13からは制振効果が充分に得られているのが分かる。加振振動数が19.44Hzのときは、基本レーリ波の波長 λ_R ≈約6mから $\lambda_R/4=2m$ はWIBの平均間隔と同程度である。したがってCASE-2はWIBの制振効果を得ることが出来る。しかし、加振振動数29.17Hzに対しては基本レーリ波長は $\lambda_R=4m$ となるので、 $\lambda_R/4$ はWIBの平均間隔より小さくなるのでWIBによる制振効果は得られない。そこでCASE-2に加振源直下に縦のWIBの追加したCASE-3では、WIBの平均間隔がWIBが加振源付近で $\lambda_R/4$ より小さくなり、WIBの制振効果を発揮し、応答の低減効果が現れている。

X-WIBの物性値を $V_s=700\text{ m/s}$ 、 $V_p=1000\text{ m/s}$ のとき比較検討を行った。加振振動数8.33Hzのときは共に十分な効果が得られた。しかし、19.44HzとなるとWIB内の波の増幅によりWIBの剛性が低いため、WIB自体が揺れ振動を側方に伝えることとなり遮断効果が薄れる。このためできる限り硬い方が望ましい。本研究からのパラメータ解析からは $V_s=1000\text{ m/s}$ までにする方がよい。

X-WIBによる深さ方向(y-z断面)での最大値分布を示している図-14では、明らかに地表面だけでなく地中においても低減効果が得られている。X-WIBが波を封じ込めて広がるのを押さえているのが顕著に見られる。

図-15に応答フーリエスペクトルにおいてCASE-1(自然地盤)とCASE-2(WIBにより対象振動数が25.1Hz以下で有効)を比較した。これを見るとCASE-2では加振振動数が19.44Hzの場合ドップラー効果による高振動数

がWIB対象振動数を外れ、多少増幅が見られるが、5m地点では低減効果が十分あると言える。

5. むすび

本研究では、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、弾性波動論の手法からの概略解析と、同波動場の2.5次元FEM解析からの詳細なパラメータ解析を行った。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、低振動数帯域において非常に振動低減効果がある。その設計は水平方向の総幅がレーリ波長の1/2以上、各WIB間隔はレーリ波の波長の1/4程度、深さは(1/2~1/3)波長程度とすると効果的である。X-WIBの剛性は、セメント注入による地盤改良杭の程度であればよい。

謝辞：本研究の遂行に際して、新幹線沿線の計測データを(株)JR東海より提供を受けたことにここに謝意を表する。

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) Gakenheimer, D.C. and Miklowitz, J.: Transient excitation of an elastic half space by a point load traveling on the surface, J. Applied Mechanics, 36, 3, ASME, Series E, 505-515, 1969.
- 3) 竹宮宏和：総説 環境における地盤振動、土と基礎、地盤工学会、44-9(464), 1-4, 1996.
- 4) 芦谷公稔、吉岡修：高速走行時の地盤振動評価法、鉄道総研報告、Vol.8, No.6, 37-42, 1994.6.
- 5) 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
- 6) 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.

- 7) 竹宮宏和, 安木清史: 高速列車走行による沿線地盤への振動の伝播性状, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 229-234, 1998.6.
- 8) Krylov, V.: Vibrational impact of high-speed trains, I. Effect of track dynamics, J. Acoust.Soc.Am100(5), 3121-3134, 1996.
- 9) 吉岡修, 芦谷公稔: 新幹線沿線の地盤振動の防止対策, 土と基礎, 地盤工学会, 44-9(464), 13-16, 1996.
- 10) 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, No.605/I-45, 161-169, 1998.10.
- 11) 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.
- 12) 竹宮宏和, 西村昭彦, 成瀬龍一郎, 橋本光則: 埋設波動遮断ブロックによる制振工法(WIB工法)の開発, 基礎工, 23, 2, 111-115, 1995.
- 13) 塩津吉彦, 竹宮宏和: 高速列車走行に伴う沿線地盤振動評価と対策工法(X-WIB), 土木学会第54回年次学術講演会講演概要 I-B117, 1999.9.
- 14) Takemiya, H. and Kellezi, L.: Parascismic behavior of wave Impeding Barrier(WIB) measured for ground vibration reduction, 10th Japan Earthquake Engineering Symp.1879-1884, 1998.
- 15) 竹宮宏和, 塩津吉彦: 高速列車走行による地盤振動の評価と対策, 鉄道技術連合シンポジウム(J-Rail'98), 135-138, 1998.
- 16) 竹宮宏和, 里中修平: 高速移動加振源による起動—地盤系の動的応答性状, 第53回土木学会年次講演会概要集, 2000.9.
- 17) Takemiya, H., Yasuda, N. and Xie, W.P. High-speed train induced vibration of discretely supported track, preparation for publication., 2000.
- 18) 竹宮宏和, 合田和哉: 荷重要素に基づくディスロケーション法による断層近傍地震動のシミュレーション, 土木学会論文集, No.649/I-50, 89-98, 2000.1.

(1999. 2. 25 受付)

FEATURES OF GROUND VIBRATIONS INDUCED BY HIGH-SPEED TRAIN AND THE COUNTER VIBRATION MEASURE X-WIB

Hirokazu TAKEMIYA, Yoshihiko SHIOTSU and Satofumi YUASA

In this paper, alongside ground vibrations induced by high-speed trains and the mitigation measure are discussed from the computer simulation. The track loading is assumed by a set of harmonic moving function of different frequencies in view of a train geometry and in addition sleeper distance. The 2.5 dimensional FEM method developed by the authors is used for the analysis. The simulated ground vibration due to a train system of axle loads is interpreted from the knowledge of wave propagation in layered soil. The vibration reduction rate by the proposed X-WIB based on thus obtained information is demonstrated for the wave field before and after the installation.