

高速列車下の軌道-地盤系の 2.5D-FEM による振動予測と制振法の検討

竹宮宏和¹・前河隆太²・児嶋基成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 岡山市津島中3-1-1)

E-mail: e_quakes@cc.okayama-u.ac.jp

² 正会員 工修 (株)バシフィックコンサルタント (元岡山大学工学研究科修士課程学生)

³ 学生会員 岡山大学 自然科学研究科 修士課程学生

本研究は、高速列車走行に伴う軌道-地盤系の振動問題を2.5次元FEMモデルからシミュレーションしたものである。解析対象にフィールド計測データとの比較ができるスウェーデン国鉄のX-2000を選び、特定軟弱地盤上を走行するときの振動発生とその沿線への伝播性状を明らかにした。現地を推定レール波速度を越す高速列車走行時は、トランサイスミックな応答状態で非常に大きな振動となるので、それをスペクトル解析し、波動論から考察した。さらに合理的制振対策として、制振工法WIBによる予測効果を視覚的描写によって示した。

Key Words : *high-speed train, 2.5D analysis, track-ground system, FEM, discrete wave number expansion, transeismic range, field measurement, WIB mitigation*

1. まえがき

列車の高速化に伴って、軌道ならび沿線振動問題がクローズ・アップされている。第一著者らは同状況下の地盤内に発生し伝播する振動を理論的に評価・予測する手法および対策法を研究開発して来ている^{1)~8)}。論文^{1)~4)}では、軌道たわみに従う載荷力を直接に地盤へ載荷した解を求めた。論文^{5)~8)}では文献¹⁾⁰⁾に従って、軌道と地盤の動的相互作用系を考慮し、著者らの開発した成層地盤のグリーン関数^{1), 11)}を導入してサブストラクチャ法から対象系の解を求めた。ところで振動対策工法などで不規則な地盤部分が存在した場合の解析として、有限要素法(FEM)の利点を活かして著者らは2.5次元有限要素法の導入を試みた^{1)~3)}。同手法は鉛直断面($y-z$ 平面)内をFEMメッシュ分割するが、軌道に沿った方向(x 軸)には、波動の伝播を離散波数 ξ_x に展開して、つまり $A(\xi_x)\exp(-i\xi_x x)$ の重ね合わせから3次元解析に対応するものである。強制振動数 ω_0 を伴った一定速度 c の移動加振源 $P(t) = P_0 \exp(i\omega_0 t)\delta(x-ct)$ の場合、 x 方向の波数は任意の振動数 ω に対して $\delta(\xi_x - (\omega - \omega_0)/c)$ の形で存在する。したがって、各振動数 ω に対して $y-z$ 平面での解析を遂行すればよい。さらに枕木配置間隔

からの繰り返し衝撃載荷状態は、文献¹⁾²⁾で考慮されているが、上記の移動加振問題の形に置き換えることができることを別論で示した^{2), 8)}。

等速移動する加振源では、加振動数が与えられると、 x 方向への波数が規定されるので、移動方向の波数展開は、振動数に変換されることになる。その意味では、移動載荷/加振問題は停留問題に含まれる。離散波数法解析では、対象とする載荷力の特性に応じて適切な基本長、波数重ね合わせ数を採用することが応答評価の精度に係わってくる。振動数-波数領域変換解からの時間-空間領域解の逆変換は2重逆フーリエ変換に従うが、実際には、振動数と波数の関係が一意的に決定されるので、応答着目点の空間座標を与えて振動数から時間領域への逆フーリエ変換となる。

本研究では、前論文^{5), 6)}と同様にレール、枕木、バラストを含む軌道全体をオイラーはりとして仮定し、2.5次元FEMモデル化による地盤との連成解析へ導入した。軌道部と沿線地盤の応答低減策を著者らが提案しているWIB工法^{3), 4), 7), 9)}で対応していく際、その諸元・物性を検討する上で、本研究のコンピュータ支援による設計が有効である。

最近、スウェーデン国鉄(VANBERKET)では特定の軟弱地盤上を走行する高速列車に対して異常に

大きい軌道振動並びに沿線振動が発生した^{13), 14)}。それは列車走行速度が対象地盤のレーリ波速度（一般的な意味での表面波）を丁度超える状態の応答と別論文⁹⁾で説明したが、本論文では、応答低減のために WIB 工法を採った場合のシミュレーション法を示した。幸い、著者らはフィールド計測データの提供を受けたので、本シミュレーションの精度の検討と WIB による減振効果に関して調べた結果を報告する。

2. フーリエ変換法の適用

対象系の支配方程式をフーリエ変換し、時間・空間領域から振動数・波数領域へ変換して、変換領域での厳密解をまず求める。その逆フーリエ変換を半数値的に求める。いま、関数 $g(x, y, z, t)$ に対して、フーリエ変換対を次式で定義する。

$$\tilde{g}(\xi_x, y, z, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g(x, y, z, t) e^{i\xi_x x} e^{-i\omega t} dx dt \quad (1)$$

$$g(x, y, z, t) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{g}(\xi_x, y, z, \omega) e^{-i\xi_x x} e^{i\omega t} d\xi_x d\omega \quad (2)$$

ここに、 \tilde{g} は振動数領域量、 \tilde{g} は波数領域量であることを表しており、 ω は調和振動に対する角振動数である。 ξ_x は x 方向の波数を表している。

3. 列車荷重のモデル化

等速度走行する列車による軌道への輪重荷重を、順次、時間的に载荷する移動集中力として数式表現する。また、枕木配置は等間隔 d であるとする。いま、車両長 L_i の N_i 車両編成を対象に、車輪間隔及び輪重が車両によって異なっていることを考慮して⁸⁾

$$P_{N_i}(x - ct) = \sum_{n=0}^{N_i-1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} P_n \left(x - ct + \sum_{\nu=0}^n L_{\nu} \right) \cdot d\delta(x - md) \quad (3)$$

ここで、 $P_n(x - ct + nL_{\nu})$ は n 番目の車両荷重である。 L_{ν} は観測点と対象輪重の距離、 m は枕木配置のために導入した。 $\delta(\cdot)$ は Dirac デルタ関数を表す。式(3)にフーリエ変換すと、

$$\tilde{P}_{N_i}(\xi_x, \omega) = \frac{2\pi}{c} \chi(\xi_x) \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta\left(\xi_x - \frac{\omega}{c} - m \frac{2\pi}{d}\right) \quad (4)$$

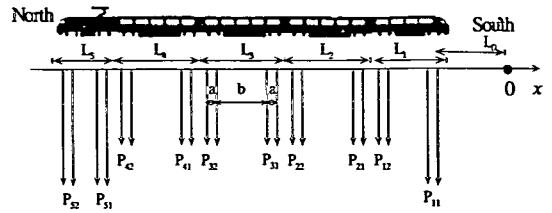


図-1 スウェーデン国鉄 X2000 車両編成と輪重配置

ここに

$$\chi(\xi_x) = \sum_{n=0}^{N_i-1} \left\{ P_{n1} (1 + e^{-ia_n \xi_x}) + P_{n2} (e^{-i(a_n + b_n) \xi_x} + e^{-i(2a_n + b_n) \xi_x}) \right\} \exp\left(-i \sum_{i=0}^n L_i \xi_x\right) \quad (5)$$

ただし、 P_{n1}, P_{n2} は各車両からの輪重であり、距離 a_n, b_n は各車両の車軸間隔である。 L_n は各車両長、 L_0 は最初の車軸が観測点に到達する以前に発生する振動伝播効果を考慮するために導入した距離である。 i は虚数単位を表す。

4. 軌道-地盤系の一体解析の定式化

軌道（レール+枕木）をはり要素で、地盤をソリッド要素で定式化する。まず、軌道をベルヌーイ・オイラー梁で表現すると¹⁰⁾、軌道上の移動加振源によるはりの鉛直方向（ z 方向）変位 w に関する支配方程式は

$$E(1+2i\beta)I \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = P_I(x, t) + P_{N_i}(x - ct) \quad (6)$$

ただし、 EI は曲げ剛性、 M は単位長さ当たりの質量、 β は内部減衰比、 $P_I(x, t)$ は地盤との相互作用力である。式(6)に式(1)の変換を施すと、

$$\left[E(1+2i\beta)I \xi_x^4 - \omega^2 M \right] \tilde{w} = \tilde{P}_I(\xi_x, \omega) + \tilde{P}_{N_i}(\xi_x, \omega) \quad (7)$$

式(7)をはり要素導入節点（ x 方向）についてマトリックス表示すると、

$$\tilde{K}_{ii}^B \tilde{U}_i^B = \tilde{P}_i^B + \tilde{P}_{N_i}^B \quad (8)$$

ただし、変位ベクトル \tilde{U}_i^B は節点当たり直交3成分からなり、 \tilde{w} を含む。上添字 B ははりを意味する。

一方、振動数-波数領域における地盤の支配方程

式は2.5次元有限要素法から

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_{II}^S & \tilde{\mathbf{K}}_{IF}^S \\ \tilde{\mathbf{K}}_{FI}^S & \tilde{\mathbf{K}}_{FF}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{U}}_I^S \\ \tilde{\mathbf{U}}_F^S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{P}}_I^S \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (9)$$

ただし、上添字のSはソリッド要素を意味し、下添字のIは相互作用節点、Fはその他の自由節点を示す。なお、式(9)の右辺は相互作用力を表す。

いま、相互作用節点上での変位の適合条件

$$\tilde{\mathbf{U}}_I^S = \tilde{\mathbf{U}}_I^B \quad (10)$$

および、力のつりあい条件

$$\tilde{\mathbf{P}}_I^S + \tilde{\mathbf{P}}_I^B = \mathbf{0} \quad (11)$$

を適用すると、軌道と地盤の全体系での運動方程式を得て

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_{II}^S + \tilde{\mathbf{K}}_{II}^B & \tilde{\mathbf{K}}_{IF}^S \\ \tilde{\mathbf{K}}_{FI}^S & \tilde{\mathbf{K}}_{FF}^S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{\mathbf{U}}_I^S \\ \tilde{\mathbf{U}}_F^S \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \mathbf{P}_I^S \\ \mathbf{0} \end{Bmatrix} \quad (12)$$

いま、特に、はり要素導入節点におけるマトリックスを取り出して、その成分を表示すると、

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_{xx} & \tilde{\mathbf{K}}_{xy} & \tilde{\mathbf{K}}_{xz} \\ \tilde{\mathbf{K}}_{yx} & \tilde{\mathbf{K}}_{yy} & \tilde{\mathbf{K}}_{yz} \\ \tilde{\mathbf{K}}_{zx} & \tilde{\mathbf{K}}_{zy} & \tilde{\mathbf{K}}_{zz} + (E(1+2i\beta)I\xi_x^4 - \omega^2 M) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \\ \tilde{w} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2\pi}{c} \chi(\xi_x) \sum_{-\infty}^{\infty} \delta\left(\xi_x - \frac{\omega}{c} - M \frac{2\pi}{d}\right) \end{Bmatrix} \quad (13)$$

5. 本解の検証

前述した2.5次元有限要素解析解の精度に関して妥当性を検討するため、まずスウェーデン国鉄より提供を受けた平坦軌道を走行するX-2000の実測データとの比較を行った。また、著者らの前論文の移動グリーン関数法^{11)・11)}による解析解との比較も行った。対象とした高速列車X-2000のモデル化に際して車両諸元及び輪重(5両編成時、図-1)のパラメータを表-1、サイトの地盤データを表-2に示す。そのフィールド計測の概要を図-3に示す。地盤

表-1 各車両の荷重パラメータ(定義は図-1を参照)

車両 n	車軸間隔			車軸荷重	
	a _n (m)	b _n (m)	L _n (m)	P _{n1} (kN)	P _{n2} (kN)
1	2.90	11.76	22.17	160	118
2	2.90	14.80	24.40	123	123
3	2.90	14.80	24.40	123	123
4	2.90	14.80	24.40	123	123
5	2.90	6.60	17.17	182	180

表-2 解析地盤の物性値

物性	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)		Vp (m/s)		ポアソン 比	減衰定数β	
			速度	速度	速度	速度		速度	速度
			Low	High	Low	High		Low	High
1	1.0	1.50	72	65	500	500	0.49	4%	6.3%
2	3.0	1.26	41	33	500	500	0.49	2	5.8
3	4.5	1.48	65	60	1500	1500	0.49	5	9.8
4	6.0	1.48	87	85	1500	1500	0.49	5	6.4
5	36.0	1.48	100	100	1500	1500	0.49	5	6.0

Note: Low: c≦19.4 m/s High: c≦55.6 m/s

表-3 軌道はりの物性値

移動速度 (km/h)	軌道梁の曲げ剛性 (kN・m ²)	質量 (ton/m)
70	2.0E+05	10.8
200	8.0E+04	10.8

データは列車走行時の輪重の繰り返し載荷から発生する地盤ひずみの非線形特性を等価線形化した結果で、文献¹⁵⁾からとった。したがって同表の値を列車速度で使い分けした。軌道部の計測では、変位計(センサーG.L.0とG.L.-12mから評価)を、沿線地盤上では速度計(ジオフォン)を用いている。計測器のフィルター特性を()内に記述した。軌道の枕木間隔は0.5mである。

2.5次元有限要素解析モデルを図-4に、解析に使用したはりモデルによる軌道物性値を表-3に示す。地盤モデルは、横断面において幅160m、深さ50.5mの領域として離散化し、下方境界は剛基盤と仮定したが、そこでの反射波を避けるため十分な深さとした。側方は反射の影響を考慮して解析領域端部において減衰を高めている。列車走行方向は全て南方向として解析した。

まず、軌道直下(中心軸0m地点)における2.5次元有限要素解析解(2.5D-FEM)と実測値との比較を行う。図-2は列車速度70km/hおよび200km/hにおける変位時刻歴応答に関して描いたものである。移動速度が70km/hでは、車両の全通過時間において両者が良好な一致をしていることを確認できるが、200km/hでは最後尾車両の通過時において若干の差が両者間で見られる。

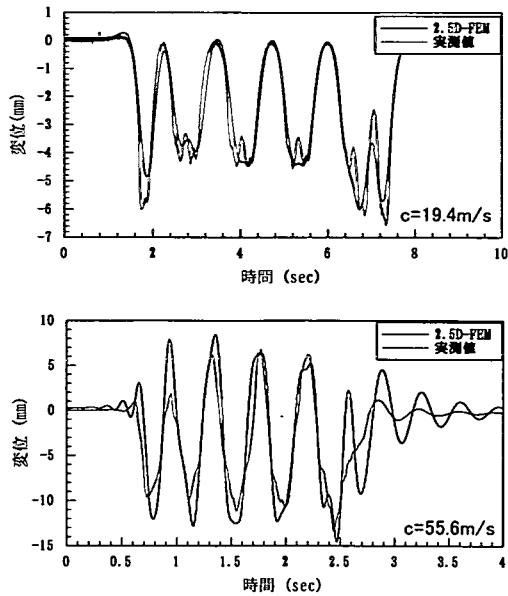


図-2 軌道直下0mの実測値と2.5次元FEM解との比較

X-2000列車は駆動車が先頭と後尾にあるプル・プッシュ方式であるためこれらの位置で大きな輪重が作用する。低速度走行(70km/h)においては、軌道応答は輪重載荷点で鉛直下向きにのみ現れ、それは列車走行と共に移動する。これは擬似静的応答と呼ばれる。一方、高速度走行時(200km/h)においては、軌道応答変位は輪重の載荷時には鉛直下方であるが、通過直後には鉛直上向きにもかなりの程度現れている。このことは、軌道部において慣性力が発生していることに他ならない。

つぎに沿線地盤の応答について調べる。低速走行時の擬似静的応答と、高速走行時の動的応答が沿線地盤へどのように伝わるかは、環境振動の観点から重要な検討項目である。現地では軌道直交方向の特定の距離においてフィールド計測がなされているが、使用したジオフォン(速度計)のフィルター特性により収録される波形で低振動数成分がカットされている。そのため本解と実測値を直接に波形で比較することは避けて、波形をフーリエ変換した振動数成分で比較する。ここでは、まず応答に支配的な振動数成分の影響を2.5-D FEM解の地表面変形において見るために、著者らが別論文⁸⁾で示したグリーン関数解(Greenと表示)との比較を示した。後者では、最下層地盤を半無限深さとしている。図-5はその結果である。軌道およびそれからの距離において、低速走行、高速走行時共に両解は良い一致を示している。

高速走行時には、軌道からの距離に従って軌道応

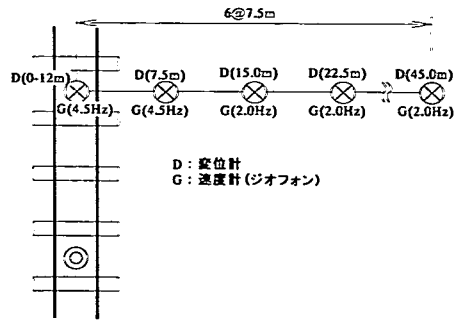


図-3 軌道と沿線の振動計測の概要

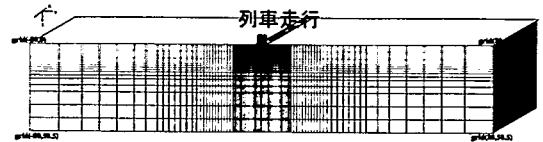
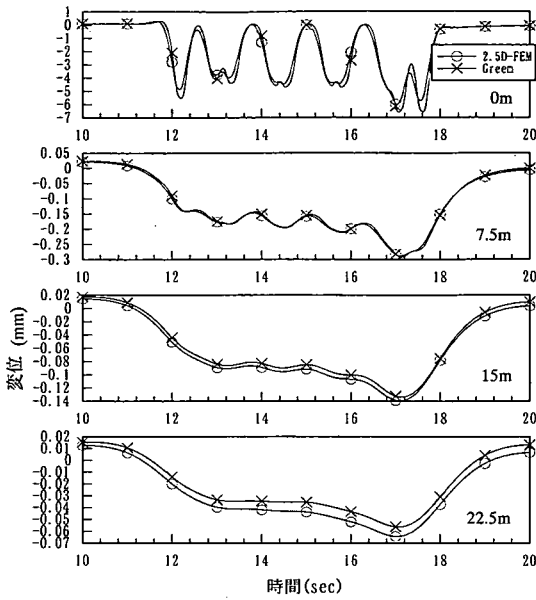


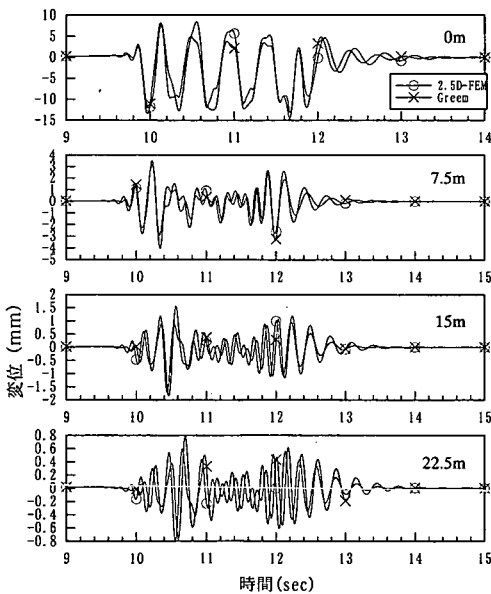
図-4 2.5次元有限要素解析モデル図

答とは異なる振動波形が見られる。軌道の動的挙動は地盤に対して新たに振動源となり、そのため振動源の特性と共に地盤の動特性が顕著に現れている。軌道振動より短い周期の波動の発生・伝播の結果となっている。この波動場の変化の裏付けは付録に説明する地盤内の波動伝播の分散特性から説明される。

図-5の低速走行時の応答からは、軌道の擬似静的応答のため、沿線地盤の応答はそれに従う形で距離と共に同位相で指数的に減少している。従って真の波動伝播は全く生じていないと言える。このことに関しても、付録の分散特性図から裏付けられる。さて、シミュレーションとしての速度成分を計算し、そのフーリエ振幅をジオフォン(速度計)による記録波形のフーリエ振幅と比較する。実測に使用したジオフォンは、距離7.5mの速度計では4.5Hzハイパス・フィルター特性を、15m以遠のジオフォンでは2.0Hzハイパス・フィルター特性を持っているので、それぞれの振動数以上の振動数帯域をカバーできるが、これらの規定値より低い振動数帯域を捉えることには精度が落ちる。計測記録からの振動数成分をフーリエ振幅で図-6に描いた。なお軌道部の応答は、振動数帯域で変位より速度成分に変換したものである。同図より、動的応答が現れる高速走行時において、軌道部は2~3Hzにピークを示すが、軌道より離れるに従って卓越振動数は高い振動数帯域へと移り、30mの距離地点応答では4~7Hzが卓越する。振動数成分のシフトに関しては前論文⁸⁾でも対象地盤の波動特性から説明したが、ここでは、付録において分散特性曲線と列車走行速度との関係を示し、速度



(a) 70km/h



(b) 200km/h

図-5 FEMとGreen関数による変位比較

に従って惹起される地盤固有の振動を指摘している。それが上述の4~7Hzに当る。7.5m距離地点では、計測結果において4.5Hz以下の低振動数が精度よく捉えられていないことから、同領域を除いては実測値と2.5次元シミュレーション値はかなり良好な一致を見せている。以上のことより本解析で使用した2.5次元FEMモデル化手法の妥当性が裏付けられる。

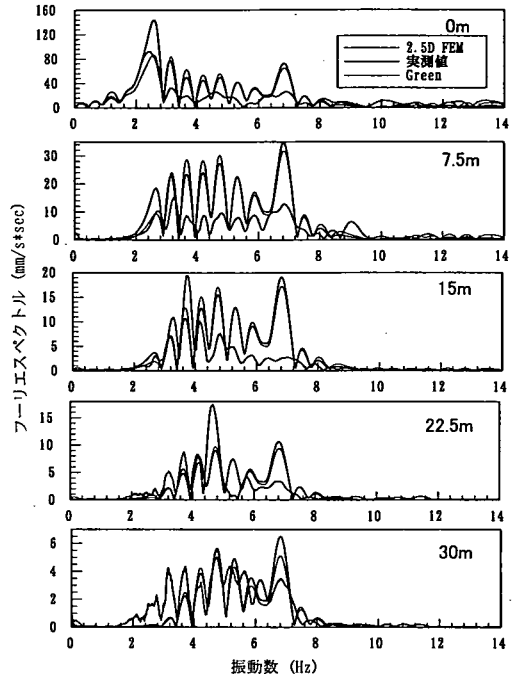


図-6 フーリエスペクトル, 列車速度 $c=200$ km/h

6. 数値解析シミュレーション

2.5次元有限要素解析法を用いて、X-2000の走行を対象とした数値解析シミュレーション結果について示す。

(1) 振動対策前の地盤におけるシミュレーション

地盤振動について、軌道直角方向への伝播性状を地表面・地中断面で捉えた応答から考察する。

図-7は地中横断面(YZ平面)における最大値変位コンター図を示したものである。列車の70km/h走行時には、軌道部から深さ方向に応答が放射状に広がっていることが確認できる。一方、200km/h走行時には、深さ方向だけでなく、軌道直角水平方向への応答の広がりが見られ、遠方の地表面付近にまで応答が顕著に現れている。

図-8は地表面(XY平面)において、特定の時間における(出発地点から10秒走行後から描いた)地表面応答を捉えたものである。70km/h走行時の結果をみると、各車両の輪重位置に応答が集中して現れており、列車荷重による静的な応答が時間と共に進行方向へシフトすることが分かる。応答の影響範囲は軌道付近にのみ集中している。200km/h走行時の結果をみると、応答は動的なものとなっており、各輪重から発生した振動が軌道から遠方地点へブーメラ

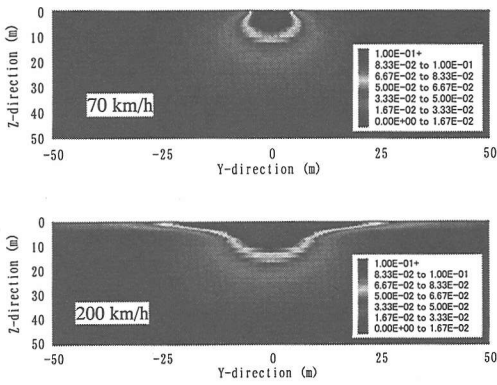


図-7 地中横断面 変位応答カウンター

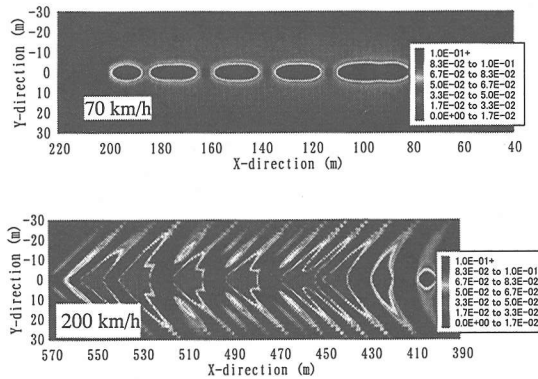


図-8 地表面 変位応答カウンター

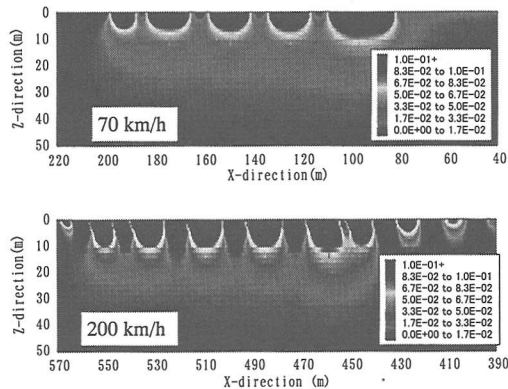


図-9 地中縦断面 変位カウンター

ン状に広がっていることが確認できる。さらに車両の移動速度が高速で表層地盤の表面波（レイリ波）速度を越えているため、軌道直角方向への振動伝播様相において各輪重の位置より斜め後方にずれている。そして遠方の地盤まで応答が及んでいる。

図-9 は Y=0m の地中縦断面 (XZ 平面) において、特定の時間における (出発地点から 10 秒走行後から描いた) 変位カウンター図を示したものである。70 km/h

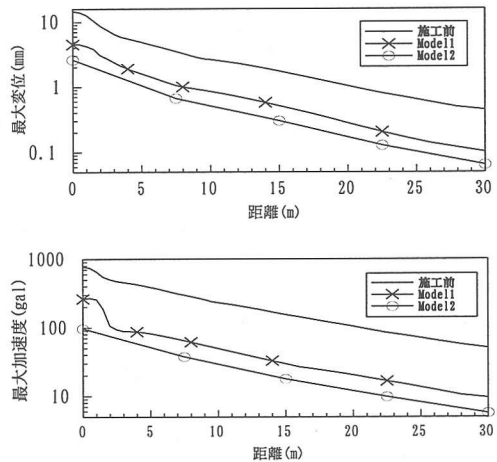


図-10 応答の距離減衰, 200km/h

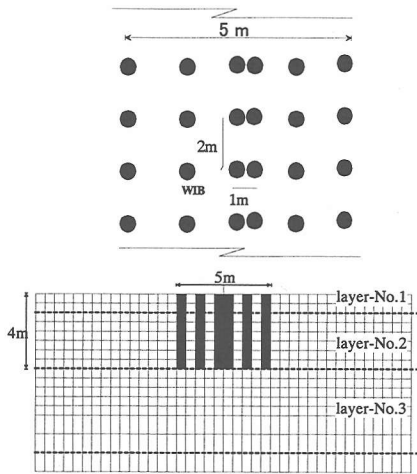
の走行時では、地中においても輪重位置付近に応答が広がっていることが確認できる。200 km/h の走行時になると、輪重位置の応答が鉛直下向きに対して僅かに斜めになってやや細く伸びている。

軌道直角方向の最大値の距離減衰特性について述べる。70km/h の走行時の応答は、擬似的な応答であるため変位と、特に加速度が軌道から離れると急激に落ちる。一方、200km/h の走行時の応答は、図-10 に見るように変位・加速度応答共に大きく、それらの影響が遠方にまで及んでいること、それも加速度の方が変位よりも同傾向が強いことが分かる。これは図-6 で説明したが、地盤内に発生し伝播する波が 3～数 Hz であることによる。

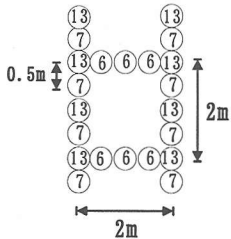
(2) 振動対策工 (WIB) 導入後のシミュレーション

つぎに振動対策工法として WIB 工法を施工した場合の応答低減効果を検討するため数値解析シミュレーションを行った。WIB の導入に当たり、WIB 剛性および形状をパラメータとし、列車走行速度に応じて応答を比較し、より効果的な振動対策を目指した。ここでは、図-11 の WIB 設計と実際にスウェーデン国鉄により原地盤で施工された状況をモデル化して、時速 200 km 走行時の数値シミュレーションした結果について示す。

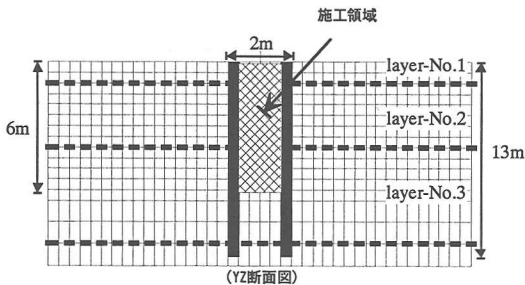
WIB の施工には、主に地盤内にセメントミルクを攪拌注入してソイル杭を作る。そのため地盤改良率 (改良面積率) を 25% 程度に仮定した。一方、スウェーデン国鉄のソイル杭施工には石灰とセメント混合材が使用された。従って表-4 の物性としたときの検討を行った。それぞれの解析モデルを図-11 に Model 1, Model 2 として示す。



(a) 解析モデル1 (Model 1)



ソイル杭平面図 (○内は杭長)



(b) 解析モデル2 (Model 2)

図-11 振動対策工 (WIB) 導入モデル (周辺のみ表示)

表-4 地盤改良杭 (WIB) の物性値

解析ケース	密度 ρ (t/m ³)	せん断波速度 V_s (m/s)	ポアソン比 ν	減衰定数 β	ヤング率 E (kN/m ²)
WIB 1	1.5	250	0.35	0.05	2.53E+05
WIB 2	1.7	215	0.35	0.05	2.13E+05

WIB の設計においては、WIB の導入幅 B と対象地盤内の波長 λ の比が $B = \lambda/2$ 程度と著者らの研究から提案できる。⁹⁾ さて、対象地盤内の波動伝播に関する分散特性図 (付録) を参照して、図-6 の結果より振動数が 7 Hz 以下の範囲をターゲットにする。いま、列車速度 200 km/h を対応した波長は約

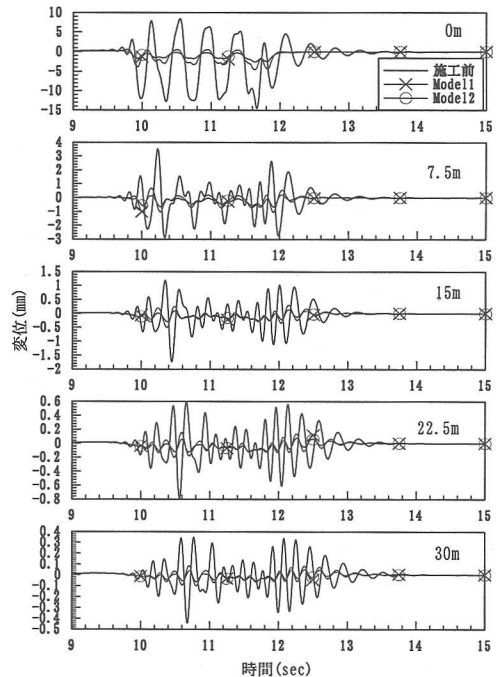


図-12 WIB 剛性による応答時刻歴の低減比較、列車走行速度 200km/h

$\lambda = 8$ m であるから $B = 5$ m でよいことになる。スウェーデン国鉄の地盤改良は軌道直下の軟弱表層を安定化するために深い地盤改良杭も併用している。図-11(a) の平面図に杭長を記入した。

図-12 は軌道と沿線地盤変位に関して時刻歴応答を改良前と比較して描いたものである。WIB 施工後のモデルによる差は殆ど無く、それらのいずれかの導入により軌道上はもちろんのこと、沿線地盤においても応答が低減されているのが明らかである。軌道についてみると、列車の通過に伴い発生していた慣性力による動的な応答が無くなっている。対策前には輪重の載荷方向と逆の方向にも大きく変位していたが、対策後には載荷方向のみのたわみになっていることが分かる。これらの低減にどの振動数成分が原因しているかを究明するために図-12 の変位波形のフーリエ振幅調べると、図-6 を参照して、軌道で発生する 2~3Hz、地盤で発生・伝播する 3~数 Hz が WIB の導入で非常に抑制されているのが分る。

図-13 は鉛直断面内の最大鉛直方向の変位カウンター図を描いたものである。同図からは、対策前には深さ方向のみでなく、軌道直角水平方向の遠方まで応答の広がりが見られたが、対策後においてはその範囲は大幅に縮小されている。そして低速度走行時に見られた変位カウンターに近い形となっている。

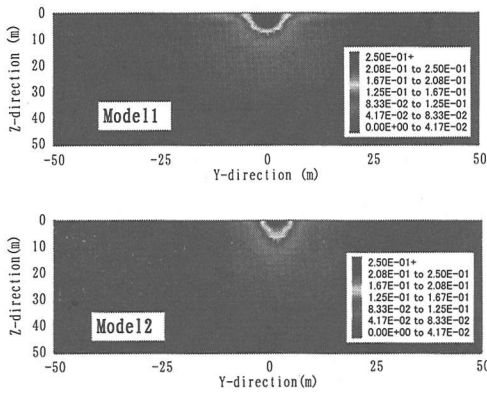


図-13 地盤改良後の横断面内の変位応答コンター
列車走行速 200km/h

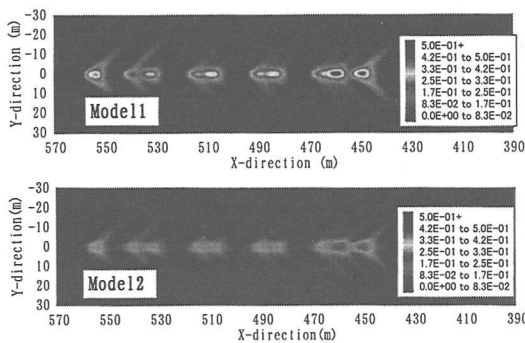


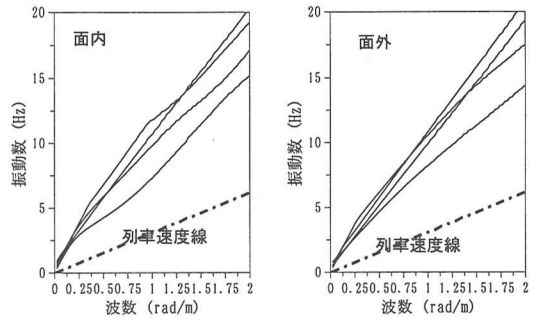
図-14 地盤改良後の地表面の変位応答コンター
列車走行速 200km/h

図-14は、特定の時間における（出発地点から10秒走行後から描いた）地表面応答を示したものである。対策前には地盤応答がブーメラン状に側後方へ大きく応答が出て広がりを持って現れていたが、対策後には同傾向の応答であるが、応答値は非常に小さいものに縮小されている。

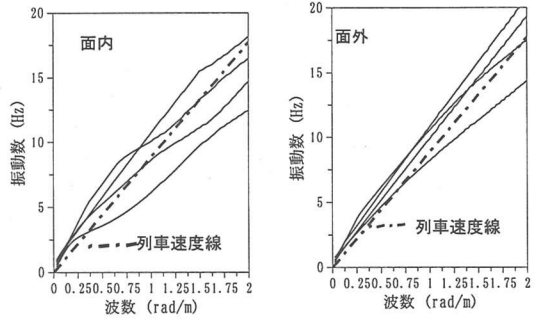
軌道直角方向の各計測点について、図-10にWIB施工後の最大応答値の距離減衰特性を示した。WIBによって距離減衰特性がほぼ平行移動した形の応答に現れ、最大応答が18dB程度低減されているのが認められる。

7. 結論

本研究は、2.5次元FEM手法を開発して列車走行下の軌道と地盤の動的相互作用解析を行ったものである。対象に軟弱地盤上を走行するスウェーデン国鉄のX-2000高速列車を扱った。そして本シミュレーションの精度の検証を同実測値から行った。また、



(a) 走行速度 70km/h



(b) 走行速度 200km/h

図-15 成層地盤の固有モード分散特

軌道および沿線地盤応答の比較を本解とグリーン関数解で行った。それらの結果は非常に良好であった。シミュレーション結果からは、列車の低速走行時には軌道応答は擬似静的応答であり、輪重に対する静的応答が列車走行で軌道に沿って移動することが分かった。一方、高速走行時には、軌道と地盤の動的相互作用で軌道応答が振動源となって沿線地盤へ振動が伝播することが分かった。それは地盤内の波動伝播特性に大きく特性付けられる。

X-2000列車の高速走行時の異常に大きな軌道振動の発生に対して、制振工法WIBを導入した場合の効果に関してソイル杭の埋設幅、長さを変えて調べた。その結果、対象地盤の軟弱層を貫く形で十分な幅にわたって施工されれば、軌道下の波動場は動的応答性状から擬似静的応答性状へ移り、非常に振動低減効果をもたらすことが分かった。さらに現実的にスウェーデン国鉄が施工した減振工法の効果を実シミュレーションから予測できることを示した。

以上より、本シミュレーションは、高速列車走行時の軌道—地盤系の応答をコントロール効果を予測できる有効な手段であることが強調される。

対象地盤の振動数と波数の関係を与える分散曲線各特性線は地盤の固有モードに対応したものである。この計算は薄層要素法を適用して、波動方程式の固有値解析によった。既に図-6に軌道からの振動が原因して地盤内で発生し伝播する卓越波の振動数成分が3~7 Hzですと説明したが、それに対応した波長をここではより厳密に推定する。図-15からは、列車走行速度 200 km/h でサイトにおいて誘発される波数は0.4~1 [rad/m]と読み取れるので、波長は15.7~6.3 [m]である。

参考文献

- 1) 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. 605/1-45, pp.143-152, 1998.10.
- 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. 619/1-47, pp.193-201, 1999. 4.
- 3) 竹宮宏和, 塩津吉彦, 湯浅聡文: 高速列車走行による沿線地盤振動性状と対策工法-X-WIB, 土木学会論文集, No.661/1-53, pp.33-42, 2000.10.
- 4) Takemiya, H. : Simulation of high-speed train induced ground vibration and its mitigation by WIB, *Proc. 7th Int. Cong. on Sound and Vibration*, Garmisch-Partenkirchen, pp.2695-2702, 2000.
- 5) 竹宮宏和, 里中修平, 謝偉平: 高速移動加振源による軌道-地盤系の動的応答と周辺地盤への振動伝播, 土木学会論文集, No. 682/1-56, pp. 299-309, 2001.7
- 6) Takemiya, H. : Simulation of high-speed train induced ground vibration and its mitigation by WIB, *Proc. 7th Int. Cong. on Sound and Vibration*, Hong Kong, pp. 2875-2882, 2001.
- 7) Takemiya, H. : 2.5 D FEM application for

を表-2の層地盤に対して求め、図-15に示した。

predicting ground vibration due to high-speed train and mitigation by WIB, No.1070, *Proc. 8th Asian-Pacific Conf. Structural Eng. & Construction*, Singapore, 2001.

- 8) Takemiya, H. : Simulation of high-speed train induced ground vibration, The case of X-2000 at Ledsgard, *Journal of Sound and vibration*, (to appear).
- 9) 竹宮宏和, 合田和哉, 佐藤直毅: 波動遮断ブロック(WIB)の受動的制振効果, 土木学会論文集, No. 549/1-37, pp.221-230, 1996.10.
- 10) Dieterman H. A. and Metrikine A. V. : Steady-state displacements of a beam on an elastic half-space due to a uniformly moving constant load, *Eur. J. Mech. A/Solids*, 16, 2, pp.295-306, 1997.
- 11) Takemiya, H. : Ground vibration alongside tracks induced by high-speed trains: prediction and mitigation, Ed. V. Krylov: *Noise and Vibration from High-speed Trains*, Thomas Telford, Chap. 12, 2001.
- 12) Krylov, V. : Vibrational impact of high-speed trains, I. Effect of track dynamics, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.100 No.5, pp. 3121-3134, 1996.
- 13) BANVERKET: Evaluation and analyses of measurements from the West Coast line, 1997.
- 14) 竹宮宏和: 「軟弱地盤上の高速列車による振動に関するセミナー」報告, 土と基礎, 第48巻, 第9号, 地盤工学会, pp.39-40, 2001.9.
- 15) Kaynia, A. M. and Madshus, C. , Harvik, L. and Zackrisson, P. : Ground vibration from high-speed trains: Prediction and countermeasure, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, ASCE, pp.531-537, 2000.

(2001. 9. 3 受付)

2.5-D FEM APPLICATION FOR PREDICTING TRACK-GROUND VIBRATION DUE TO HIGH-SPEED TRAIN AND MITIGATION BY WIB PROCEDURE

Hirokazu TAKEMIYA, Ryuta MAEKAWA and Motonari KOJIMA

This paper has dealt with the train-induced vibrations through the track and ground interaction under a moving train. The solution method is to apply the 2.5 dimensional finite element method (2.5-D FEM). The X-2000 of the Swedish National Railway was chosen for the model for analysis; since the measurement data are available for comparison besides a unique response features were observed. At a soft ground, the high-speed operation led the so-called transeismic range that resulted in significantly large vibrations of the track and nearby ground. With the aid of computer simulation, the authors interpret the mechanism for vibration generation and propagation that facilitate the prediction and mitigation when the WIB (Wave Impeding Barrier) measures are taken at the site.