

3次元地盤環境振動予測システム の開発

田口典生・花里利一・長瀧慶明・池田能夫^{*1}・河原塚透

Keywords: ground vibration, thin layer method, finite element method, 3-dimensional predictive analyses

地盤振動, 薄層要素法, 有限要素法, 3次元解析

1. はじめに

幹線道路や鉄道に隣接して振動を嫌う建物やナノテクノロジー研究所やシステムLSI工場に代表される最先端施設を建設する要求が増加してきている。これらの施設の要求性能を満たすために、建物環境や内部に設置される超精密機器の厳しい振動許容値を満たす必要がある。

交通機関等の加振源から地盤を介して構造物に伝搬する振動をより精度良く予測し、最適な振動低減対策を行なうためには、精度の高い3次元地盤-構造物連成振動解析が必要となる。しかし、地盤と構造物全体をそのまま3次元FEMでモデル化することは計算機の容量や計算速度において問題がある。

そこで、図-1に示すように構造物または近傍地盤については3次元FEMで、遠方の無限地盤については、効率的に地盤のモデル化が可能な3次元薄層要素法¹⁾を用いてモデル化し、それぞれを合体させた振動予測が可能なシステムを完成させた。本報では、システムの概要、実地盤での起振機実験との比較検証、移動加振力評価法について述べる。

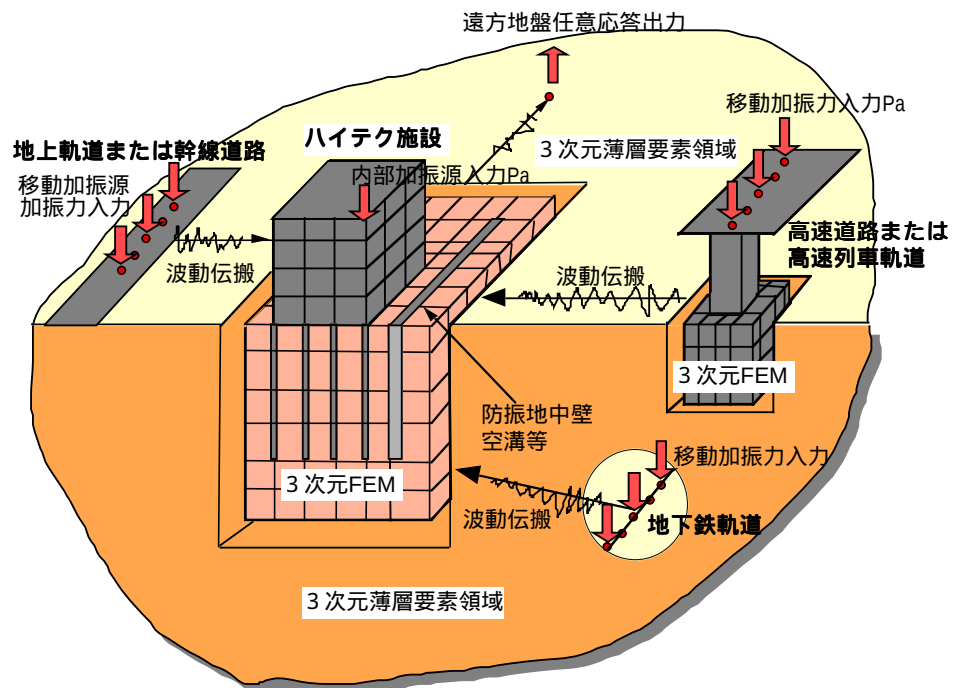


図-1 モデル化概念
Concept of Modeling

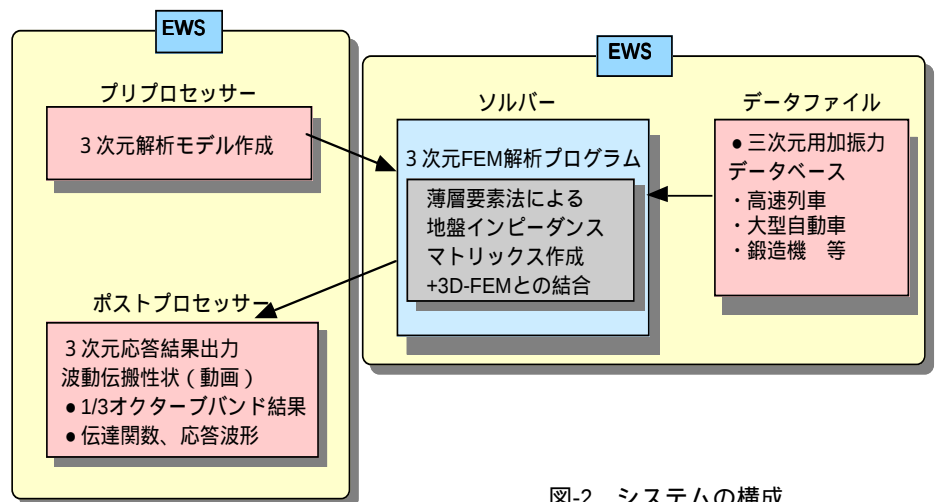


図-2 システムの構成
Outline of System

* 1 エンジニアリング本部原子力部

2. システムの構成と解析手順

本システムは解析モデルを作成するプリプロセッサと解析を実行するソルバー及び解析結果を表示するポストプロセッサにより構成されている。システムの構成を図-2に示す。解析手順を以下に説明する。

STEP1（モデリング）；システム内のプリプロセッサにて薄層要素領域内に複数の構造物基礎や構造物隣接地盤を3次元FEMでモデル化し、構造物の内部や無限地盤における加振力の入力位置や応答の出力位置を指定し解析を開始する。

STEP2（解析実行）；ソルバーにおいて薄層要素法を用いて半無限地盤のインピーダンスマトリックスを計算し、これとFEM部分の剛性マトリックスとを結合させ、予め用意されている加振力データベース内に整備されている高速列車や大型自動車の移動加振力を入力して、小さな容量で短時間に地盤・構造系の応答解析を実施する。

STEP3（結果表示）；最後にポストプロセッサにより、波動の伝搬過程の表示や1/3オクターブバンド解析結果を表示する。

3. 解析手法

3.1 3次元FEMと薄層要素法の結合法

図-3に地盤インピーダンスの計算概念を示す。加振源と受振源構造物の基礎の排土部の土をFEMでモデル化する。排土部分の剛性、慣性項はFEMで計算し、内点消去により基礎と地盤の連成面上に縮約した排土部分のインピーダンス $[X_{bb}^E]$ を作成する。また、フリーフィールドシステムの基礎と地盤の連成面位置のインピーダンス $[X_{bb}^F]$ は、3次元薄層要素法による点加振解を用いて

計算する。これら2つのインピーダンスと基礎や上部構造物の動的剛性マトリックス $[S_{aa} \sim S_{bb}]$ を結合させて釣り合い方程式(1)を作成し、これを複素応答法を用いて解くことにより必要とする各点の応答を求める。

$$\begin{bmatrix} S_{aa} & S_{ab} \\ S_{ba} & S_{bb} - X_{bb}^E + X_{bb}^F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_a \\ X_{bb}^F U_b^F \end{bmatrix} \quad \text{----(1)}$$

ここで

U_a ：構造物部分の変位ベクトル

U_b ：境界部分の変位ベクトル

$S_{aa} \sim S_{bb}$ ：構造物の動的剛性マトリックス

X_{bb}^E ：基礎と地盤の連成面上に縮約した排土部分のインピーダンス

X_{bb}^F ：フリーフィールドシステムの基礎と地盤の連成面位置における地盤インピーダンス

P_a ：任意加振点群加振力ベクトル

3.2 遠方任意点の応答

薄層領域の遠方任意点の応答 $\{U_r\}$ は、埋込基礎の各節点と地盤の任意点間における地盤柔性マトリックス $[A_{bb}^F]$ に基礎が接している地盤面の地盤反力 $\{P_s\}$ を乗じることにより式(2)により求める。

$$\{U_r\} = [A_{bb}^F] \{P_s\} \text{-----(2)}$$

3.3 薄層領域任意点の加振応答

薄層領域内の部分方程式ならびにFEM領域の部分方程式は式(3)、(4)となる。

$$\{P_b\} = [X_{bb}^G] \{U_b\} \text{-----(3)}$$

$$\{P_f\} = [K_f] \{U_f\} \text{-----(4)}$$

ここで

$\{P_b\}$ ：地盤外力ベクトル

$\{U_b\}$ ：地盤変位ベクトル

$[X_{bb}^G] = [X_{bb}^F] - [X_{bb}^E]$ ：掘り込み部地盤インピーダンス

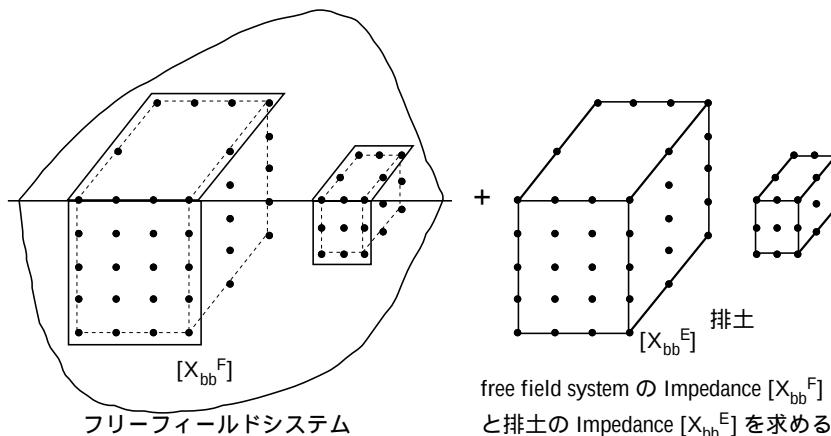


図-3 地盤インピーダンスの計算概念
Concept of Calculating the Impedance

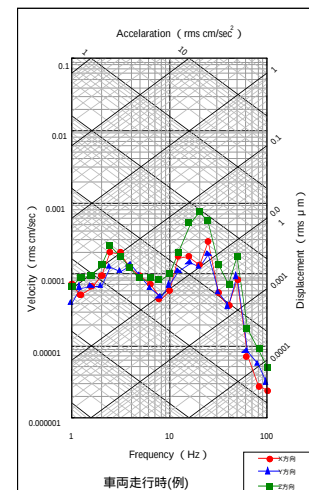


図-4 応答結果出力例
Output Example of Response Results

$\{P_F\}$: FEM部外力ベクトル

$\{U_F\}$: FEM部変位ベクトル

$[K_F]$: FEM部インピーダンス

(3),(4)式より, 全体系の運動方程式(5)が得られる.

$$\{P_T\} = ([K_F] + [X_{bb}^G]) \{U_T\} \text{-----}(5)$$

外力は任意外力点群 $\{P_a\}$ に作用すると仮定すると, (5)式に以下の外力 $\{P_T\}$ を与えて全体系の応答を求める.

$$\{P_T\} = \{\{0\}, \{0\}, \{P_a\}\}$$

$$\{U_T\} = ([K_F] + [X_{bb}^G])^{-1} \{P_T\} \text{-----}(6)$$

(6)式よりFEM領域内, 連成面上および任意加振点群における応答が得られる.

3.4 1/3オクターブバンド分析機能

地盤環境振動の応答解析結果の評価としては, 人体や精密機器の振動許容値が1/3オクターブバンド (以下, 1/3oct) 中心周波数における振幅で与えられることが一般的になりつつある. 従って, 本システムには, 矩形及び山型1/3octフィルターによる1/3oct分析機能を整備した. 図-4に1/3oct出力結果の一例を示す.

4. 起振機実験との比較

4.1 実験概要

次に, 予測システムの適用性を確認することを目的として, 地盤振動の距離減衰特性と基礎への入力損失に着目した加振実験²⁾に対して, シミュレーション解析を実

施した. 実験は起振機により地盤上に構築された基礎を加振することにより行った. 地盤振動の距離減衰特性を求める実験では, 図-5に示すように起振機と各測点を一直線上に配置し, 水平X,Y, 上下Z加振時の変位応答を測定している. また, 基礎への波動の入力損失特性を求める実験では, 基礎スラブの大きさをパラメータとして, 図-6に示すように起振機基礎から10mの位置に4種類の基礎を十字形に配置し, 上下加振時の加速度応答を測定している. 入力損失の評価は, 加振点から測定基礎位置と同距離の反対側に配置した地盤上の測定点における振動加速度レベルから測定基礎の振動加速度レベルを振動数毎に差し引いた相対レベルを入力損失レベルとしている.

4.2 解析概要

表-1に示す地盤モデルの諸元は敷地地盤の地盤柱状図と実験結果から設定したものである²⁾. 地盤モデルは解析有効振動数を考慮して地盤を水平薄層に分割している. 地盤モデルの最下層はその直上層の物性による半無限地盤を模擬するため, ダッシュボットでモデル化する. 起振機基礎, 測定点, 及び基礎スラブは有限要素でモデル化する. 本手法の利点は解析対象となる部位あるいはその近傍部分のみを有限要素でモデル化すればよいところにある. 有限要素間, 遠方および周辺地盤における波動伝播は薄層法で3次元的に考慮されるので, 3次元有限要素法と比較してモデル化が著しく簡略化できる.

図-5に示す地盤振動の距離減衰の検討では, 起振機基礎の地盤インピーダンスを算定するため, 地表面上にインピーダンス算定用節点を配置し, その上に有限要素で基礎版をモデル化する. 測定点では地表面上の測点を含むように地盤内に有限要素を設ける.

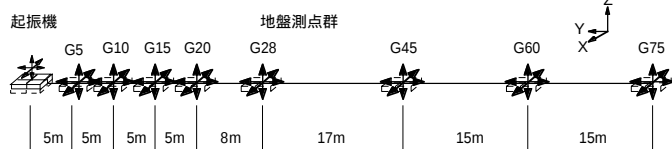


図-5 地盤振動の距離減衰測定位置と解析モデル
Attenuation with Distance Measurement Model of Vibration

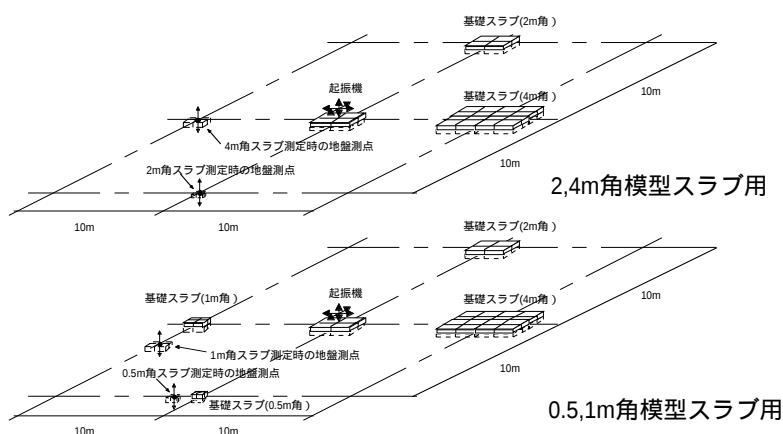


図-6 基礎スラブの入力損失測定位置と解析モデル
Input Loss Measurement Model of Foundation Slab

表-1 地盤概要

Outline of Ground

GL (m)	層厚 (m)	分割 層厚 (m)	単位 体積重量 γ (t/m ³)	S波 速度 V_s (m/s)	ポアソン 比 ν	減衰 h
0.0						
2.5	2.5	0.25				
7.5	5.0	0.5	1.7	70.0	0.4	0.01
17.5	10.0	1.0				
37.5	20.0	2.0				
87.5	50.0	5.0	1.8	486.0	0.35	
187.5	100.0	10.0				
-	-	-	1.8	486.0	0.35	-

基礎への波動の入力損失の検討では実験手順に従い、図-6に示す2種類のモデルを設定する。まず、起振機用基礎と2m, 4m角模型スラブを地盤振動の距離減衰検討モデルと同様にモデル化する。さらに入力損失を評価するための同距離反対側に配置される地盤上の測定点を0.5m, 1m角模型スラブの位置に設定して、2m, 4m角模型スラブの入力損失評価用モデルを作成する。次に、このモデルの地盤上の測定点位置に0.5m, 1m角模型スラブを設置し、地盤上の測定点を移動させ0.5m, 1m角模型スラブに対する加振解析用モデルを構築する。

4.3 解析結果

実験と解析による地盤振動の距離減衰特性の比較を図-7に示す。解析では水平X, Y, 上下Z方向に単位加振力を起振機基礎上にそれぞれ与え、各測点での1/3オクターブ中心振動数における変位応答を求

めている。実験時の加振力は加振振動数によって変動しているため、実験と解析との比較は起振機基礎から5m位置の測点における振動レベルから各測点の振動レベルを振動数毎に差し引いた相対レベルで行っている。解析では水平方向の相対レベルの増減が実験よりも大きい。Z方向では良い対応を示している。Y方向の減衰傾向は、解析が実験よりもやや大きめとなっているが、X, Z方向では両者の傾向は概ね同様である。実験のY方向で見られる10Hzの15m～40m間での相対レベルの増減は、解析では6.3, 10Hzの20m～65m間で現れている。

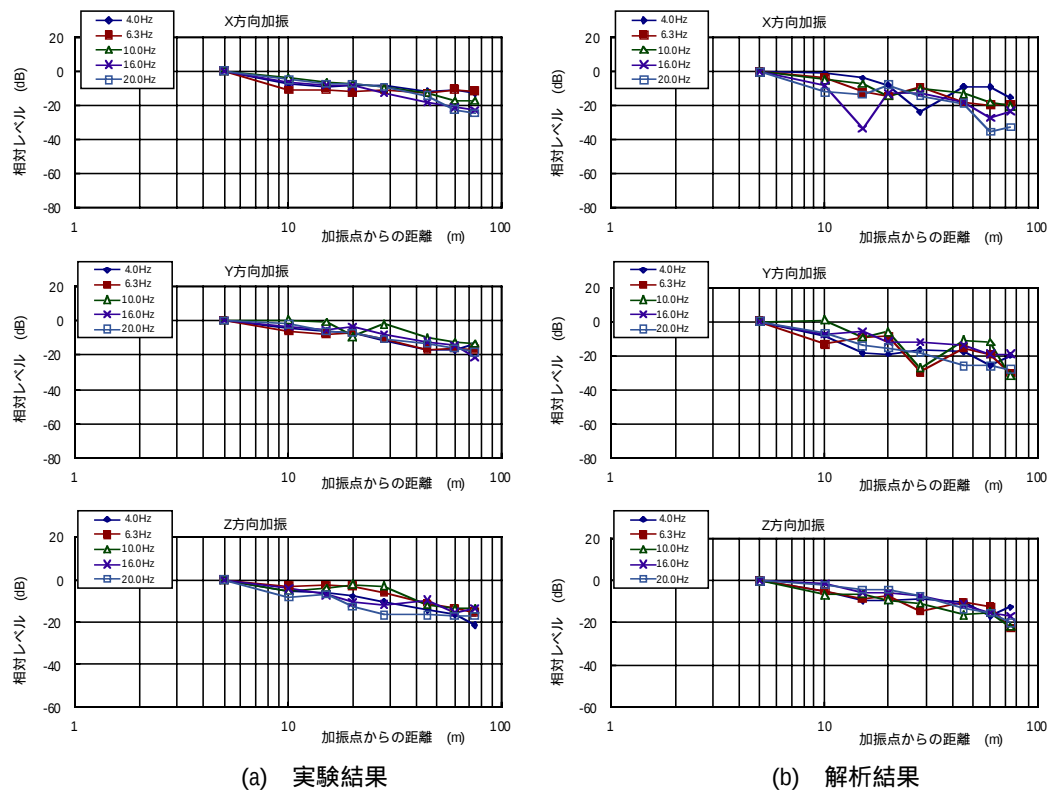


図-7 地盤振動の距離減衰特性の比較

Comparison of Attenuation with Distance (Left : Experiment, Right : Analysis)

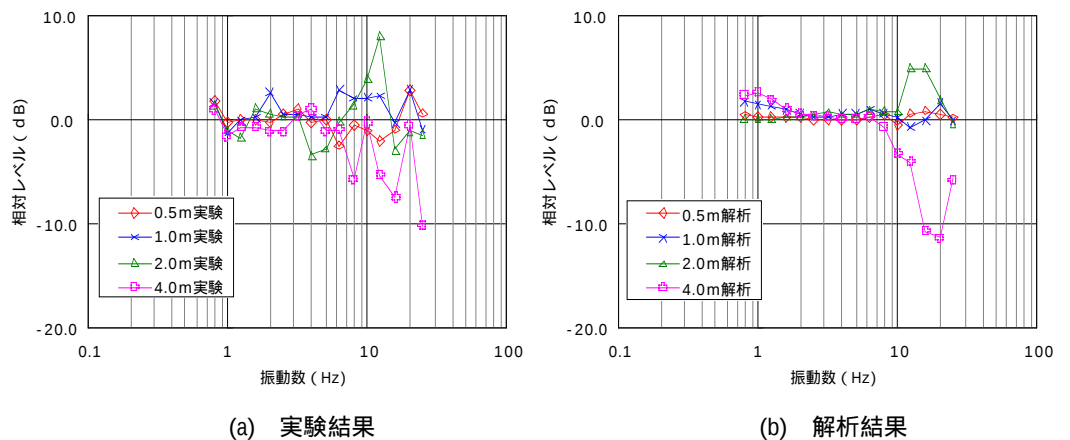


図-8 スラブへの入力損失特性の比較

Comparison of Input Loss of Footing Slab (Left : Experiment, Right : Analysis)

図-8は基礎への波動の入力損失特性を実験と解析について比較したものである。この解析では上下Z方向の単位力で起振機基礎を加振し、基礎および地盤測点での加速度応答を1/3オクターブの中心振動数で求めている。0.5m, 1m角模型スラブでの入力損失があまり大きくない傾向は解析結果でも現れている。また実験結果の2m, 4m角模型スラブで基礎スラブの固有振動数域に見られる相対レベルの増減を解析でもほぼ表現しており、予測システムの適用性が概ね確認されたと言える。

5. 高速列車走行による地盤振動の実測と解析

次に、列車や自動車の走行による移動振源について、これまでの幾つかの提案³⁾⁴⁾をもとに、新たな解析手法の提案を行い、高速列車走行による地盤振動解析を実施し、実測結果と比較を行った。

5.1 移動加振源を考慮した解析方法

以下の2種類の解析法を適用する。両手法ともに薄層要素を用いている。

[解析手法A] 移動振源による地盤振動解析法として研究開発した方法³⁾であり、走行方向直交成分・上下動成分のほか、走行方向成分が得られる。振源を含む不規則領域を有限要素で離散化、その側方領域を薄層要素で表し、波動の側方遠方への逸散を評価している。振源は無限に続く等間隔の集中荷重が等速度で移動すると仮定している。列車の車両数が多く、全長が長い場合に本解析

法は適した手法である。集中荷重は、自重に相当する静荷重と車両の振動を表す動荷重の和で表わす。この方法により、静荷重の走行速度が軟弱層の弾性波速度を超えるような問題、いわゆるスーパー・ソニック現象についてでも解析できる⁵⁾。

[解析手法B] 3次元元加振薄層法(田治見1980⁶⁾)を移動振源問題に適用した手法である。いま、薄層地盤モデル上に受振点*i*と有限個の加振点*j*(静止している)を仮定する。点加振解を用いて、*j*点の単位加振による*i*点の変位解を求める。加振点は点列であり、時間差を考慮して各加振点に入力することにより、移動振源とみなす。加振点*j*において、時間差 τ_j をもつ正弦波入力は、

$P_j \sin(\omega_0(t - \tau_j))$ で表せる。半周期の正弦波加振力を用いれば、衝撃型に相当する加振力となる。ここで、*j*点加振の時間関数 $P(t, j)$ のフーリエ変換により、

$$F_p(\omega, j) = \mathcal{F}[P(t, j)]$$

*j*点加振による*i*点変位の周波数応答関数は薄層モデルの点加振解で与えられ、 $U_i(\omega, j)$ と表す。

受信点*i*における変位応答の時間関数は、フーリエ逆変換により求まる

$$u_i(t) = \mathcal{F}^{-1}[F_p(\omega, j) \cdot U_i(\omega, j)]$$

解析手法Bも水平方向への波動逸散が自動的に評価でき、地盤振動の3成分が得られる。特徴としては、振源の移動距離が有限長さで表せ、静荷重は振動数を十分に低く与えることで近似的な評価が可能なことである。

5.2 地盤振動の実測

高速列車として、路盤上を推定速度 秒速50m/sで走行

する場合の地盤振動を測定した。車両の重量と長さは1両あたり約196kN、25.0mである。図-9に示すように、測定点は線路中心から4m、24m地点であり、サーボ型加速度計STP-300を用いて、走行方向成分、走行方向直交成分、上下動成分を測定した。地盤条件は、図-9に示すように、砂礫層上にローム層が堆積している。常時微動のH/Vスペクトルの卓越周期は約0.32秒であり、同定解析により、層厚及びせん断波速度を求めた。

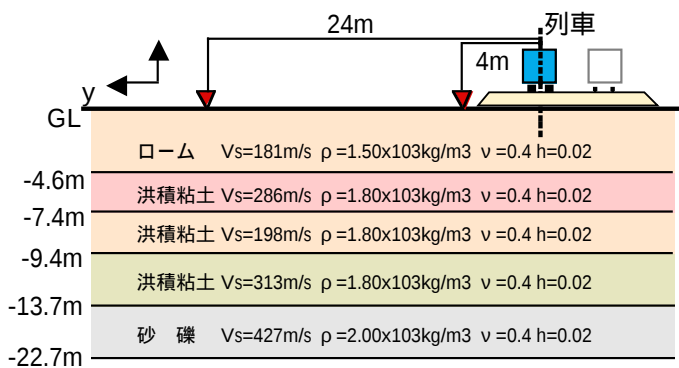


図-9 測定点と地盤条件
Measurement Point and Outline of Ground

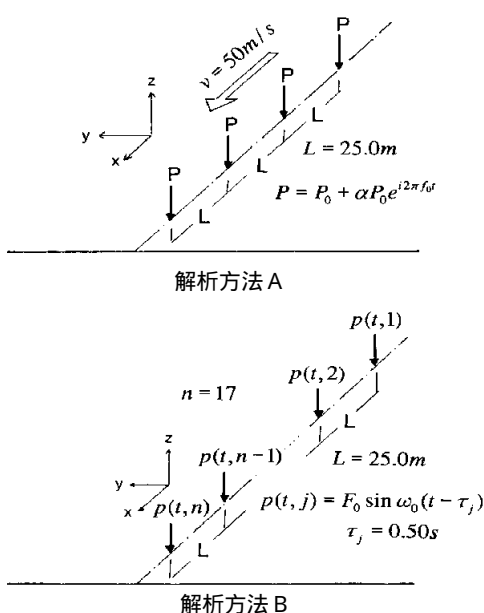


図-10 移動振源のモデル
Model of Moving Vibration Source

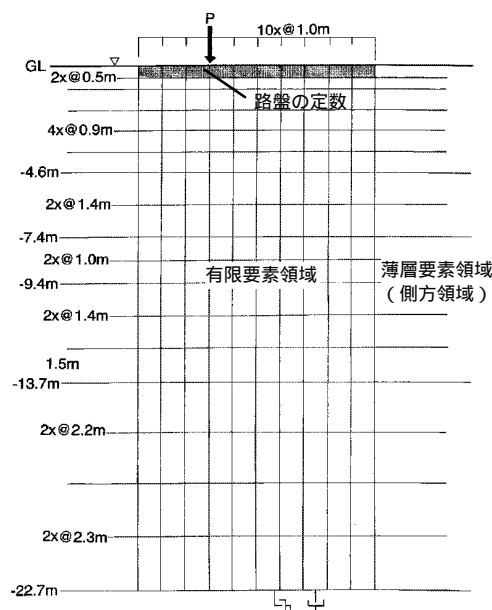


図-11 3次元有限要素モデル (解析手法A)
(断面図)
Model of Finite Element Method

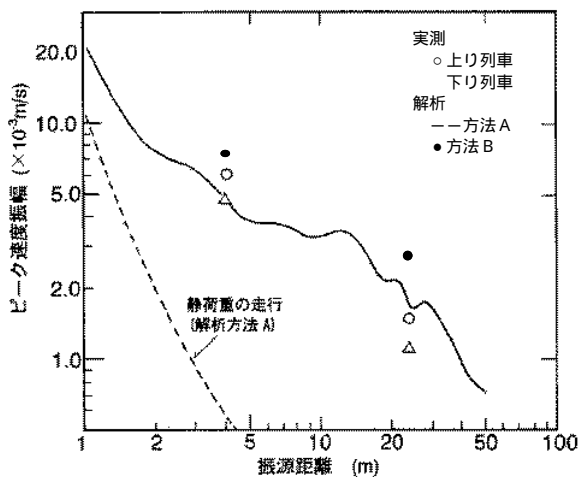


図-12 上下動ピーク速度振幅の解析値と実測値
Analytic Value and Actual Measurement Value
of peak vertical velocity amplitude

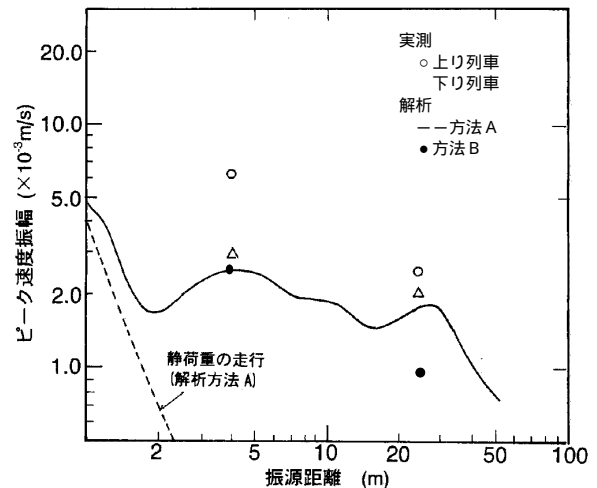


図-13 走行方向水平成分のピーク速度振幅の解析値と実測値
Analytic Value and Actual Measurement Value
of peak Horizontal (Moving direction) velocity amplitude

5.3 解析モデル

図-10に移動振源のモデルを示す。高速列車の加振力は、解析方法Aでは、 $P_0=194\text{kN}$, $\alpha=0.1$, $f_0=30\text{Hz}$ と仮定した。また、解析方法Bでは、半周期の正弦波($\omega_0=62.83\text{rad/s}$)を加振力として、加振各点で移動速度が 50m/s になるように時間差入力を行った。解析方法Aでは、地盤を図-11に示すように有限要素および薄層要素分割した。解析方法Bの薄層モデルは図-11の薄層要素領域と同等の層分割である。

5.4 解析結果

上下動(z)と走行方向水平成分(x)のピーク速度の距離減衰を実測結果と比較して図-12、図-13に示す。解析方法Aでは、車両が振動を伴わない場合(静荷重のみの走行)の解析結果も合わせて示す。解析方法Aによるピーク速度振幅と実測結果はおおむね対応している。図からわかるように、当該地盤条件において、秒速 50m/s の高速列車走行では、車両の自重の移動による振動は小さく、地盤振動は車両の走行による成分が支配的であることがわかる。したがって、地盤振動の予測には、車両の振動による動荷重を評価することが重要であることがわかる。また、解析方法Bも、方法Aと同様にピーク速度振幅と実測結果はおおむね対応している。今回の検討では、ピーク振幅について検討したが、今後は加振力の評価について研究を進める予定である。

6. まとめ

交通機関等の加振源から地盤を介して構造物に伝搬する振動をより精度良く予測し、最適な振動低減対策を行うために、構造物とその近傍地盤を3次元FEMで、遠方地盤を3次元薄層要素法でモデル化し、両者を結合した地盤環境振動予測システムを構築した。本システムを用いて実地盤での起振機実験結果のシミュレーション解析を行い、実験結果をよく再現できることを確認した。

また、3次元解析に用いる移動加振源(列車走行)の加振力評価方法を構築するための第一ステップとして、加振力を2種類の方法で評価した計算結果と新幹線走行時の測定結果とを比較した。その結果、2種類の評価方法による加振力を用いて地盤を伝搬する振動の最大速度を概ねシミュレートできることを確認した。

参考文献

- 1) H.Tajimi: A Contribution to theoretical prediction of dynamic stiffness of surface foundations, 7WCEE, Vol.5, pp105-112, 1980.
- 2) 田口, 長瀧: 地盤の波動伝播と基礎への入力損失に関する実験的検討, 地盤環境振動の評価・予測・対策に関するシンポジウム, pp17-20, 2001年2月
- 3) T.Hanazato, K.Ugai et.al: Three-Dimensional Analysis of Traffic-Induced Ground Vibrations, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.117, No.8, pp1133-1151, 1991.
- 4) 花里利一: 杭基礎工事による地盤振動対策に関する検討, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, 2-2, pp1393-1394, 2001.
- 5) 花里利一, 鶴飼恵三: 車両走行による地盤振動に関する2,3の解析的検討, 土と基礎, Vol.40, No.4, pp29-34, 1992.
- 6) H.Tajimi: A Contribution to Theoretical Prediction of Dynamic Stiffness of Surface Foundations, Proc. of 7th WCEE, Vol5, pp105-112, 1980.