

外乱振動による建物内振動の予測システムの開発

Development of a System for Predicting Vibration in Building by External Vibration

秦 雅史* 安井健治* 川井伸泰** 靄山長一***

要旨

建設作業や道路交通などの外乱振動源や移動式クレーン・プレス機械など建物内部振動源に起因する環境振動を地盤との相互作用を考慮して、適切に評価できる技術として、三次元 FEM 解析を基本に地盤系の薄層要素法を組み合わせた振動予測システムを開発した。このシステムにより、地盤環境振動の専門家だけでなくも加振源から地盤を伝播して発生する建物内部の振動レベルの評価を一貫して処理できる。本システムの適用性について道路交通振動による建物内部振動の計測結果との比較による検証を行った。その結果、道路交通振動において主要な鉛直振動予測についてシステムの適用性が概ね確認できた。

キーワード：地盤環境振動、道路交通振動、薄層要素法、三次元 FEM

1. まえがき

建設作業や道路交通などの外乱振動源による地盤振動は地中を伝播して近接する建物に振動を発生させる。また、移動式クレーンやプレス機械など建物内部振動源は建物躯体構造を振動させて人体や精密機械に影響を及ぼす。最近では都市部の過密化に伴い、これら複数の振動源について事前の振動評価が望まれている。

外乱振動による地盤環境振動を経験によらずに適切に評価できる技術を確立するため、三次元 FEM 解析を基本に地盤系の薄層要素法を組み合わせた振動予測システムを開発した。このシステムにより、地盤振動の専門家だけでなくも加振源から発生した地盤振動による建造物の応答解析と振動評価を一貫して処理できる。なお、地盤に入力される加振力を適切に設定する必要があるため、本システムでは観測加速度から加振力を逆算することができる。検討対象が人間の場合、振動レベルの予測値と人体の振動感覚曲線¹⁾との比較から許容値を上回っていれば設計変更あるいは振動対策を施す必要がある。振動対策は振動源を直接に抑制する方法、振動伝播過程で行う方法および振動対象点で行う方法から選択し、その効果の評価して選択することとなる。

本システムの適用性について道路交通振動による建物内部振動の計測結果との比較による検証を行った。その結果、道路交通振動において主要な鉛直振動予測についてはシステムの適用性が概ね確認できた。

2. 解析法

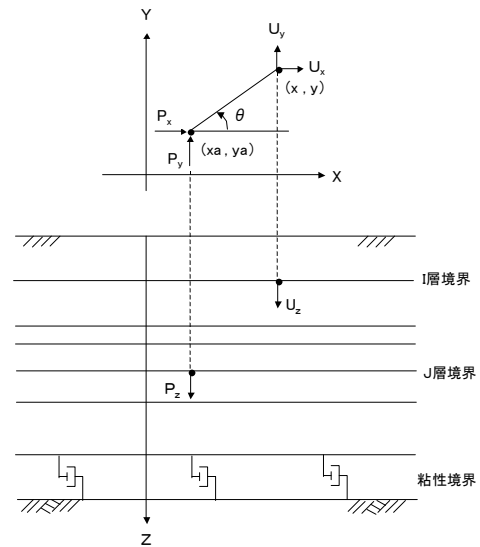


図-1 地盤のモデル化

薄層法は二次元、三次元、軸対称の弾性成層地盤モデルが扱えるため、有限要素法等の汎用プログラムとの結合が容易にできる振動数領域の解法である。振動数に依存しない材料減衰を与えることができ、水平方向は無限に広がる成層地盤であり、底面の境界には深さ方向の反射を無くすための粘性境界により半無限地盤を設定している。基礎と地盤が共有する薄層面上の点加振解から任意の層境界面上の2点間における加振力-応答変位の関係が求められ、この関係を用いて地盤-建造物系の柔性マトリックスを求めて、節点群の拘束条件を与えて、基礎・地盤系の動的相互作用解析を行う。すなわち、図-1に

*技術研究所 **東京支社建築設計部 ***管理本部情報システム部

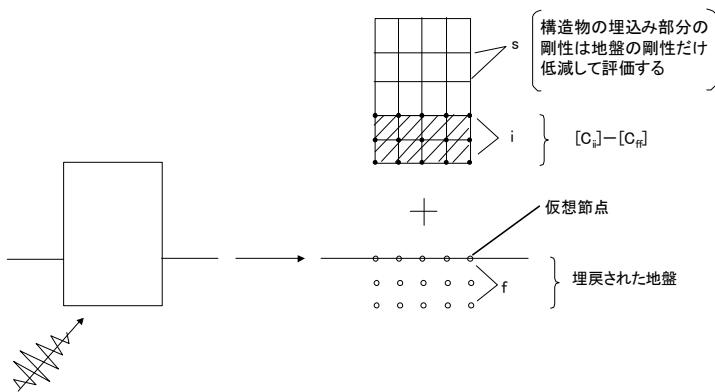


図-2 地盤と構造物の相互作用モデル

示すような成層地盤中の第 J 層境界面内の点 (x_a, y_a) に加振力 (P_x, P_y, P_z) e^{iωt} が作用したときの第 I 層境界面内の点 (x, y) に生ずる変位 (U_x, U_y, U_z) e^{iωt} との関係を求め、図-2 に示すように地盤-構造物系を分離した際に自由地盤中に設けられた仮想境界面上のすべての仮想節点に対してこの関係を適用して得られる応答変位を合成することにより柔軟マトリクスを求める。基本解析コードは(株)構造計画研究所の SuperFLUSH/3DS²⁾ を用いた。

サブストラクチャー法の「Flexible Volume Method」によっており、構造物を分離した際の地盤の切欠き部分を埋め戻すことで地盤を自由地盤として扱い、その代わりに構造物の埋め込み部分から地盤の剛性を差し引いて分離する方法である。

本予測システムは図-3 に示す Windows 画面により、解析タイプの選択を行う。地盤データ、加振力および簡易 FEM モデルの作成、解析結果の図化は作図ソフト Civil3D により行う。また、詳細 FEM モデルは NASTRAN を使用し、そのための結果変換プログラムが用意されている。SuperFLUSH/3DS による予測解析は加振力による応答計算を行う順解析、観測点の加速度記録を用いた逆解析から加振力を求めて応答計算を行う引き戻し解析および異なる振動数について別々に求めた伝達関数の結合ができる。

加振力の算定は図-4 に示すように順解析により算定された実測加速度規定点の伝達関数で実測加速度のフー

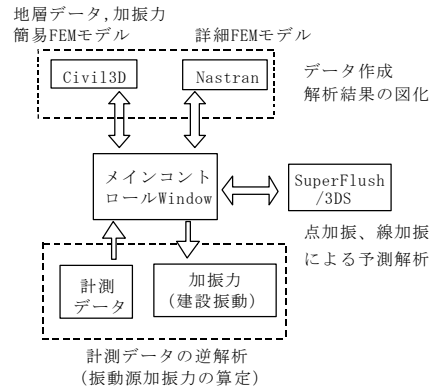


図-3 振動予測システムの処理内容

リエスペクトルを除すことで加振力のフーリエスペクトルを求め、それをフーリエ逆変換することにより求める。また、加速度記録から 1/3 オクターブバンドパスフィルター処理した振動加速度レベルの算定を行う。

3. 振動実験概要

3.1 振動実験

道路交通振動によって免震構造の研究所管理棟の内部に発生する振動を測定した。道路上に足場板で 40mm の段差を設け、重量 2t の軽貨物車両に 1.7t の重りを積

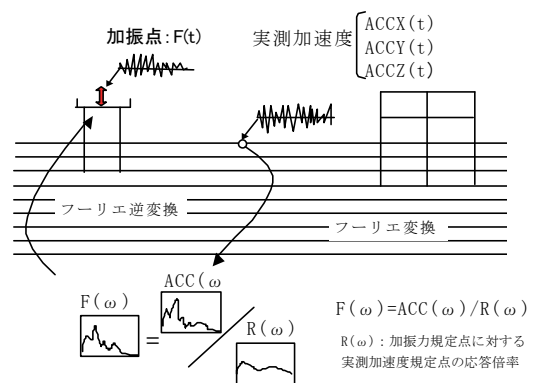


図-4 実測加速度による加振力の逆算

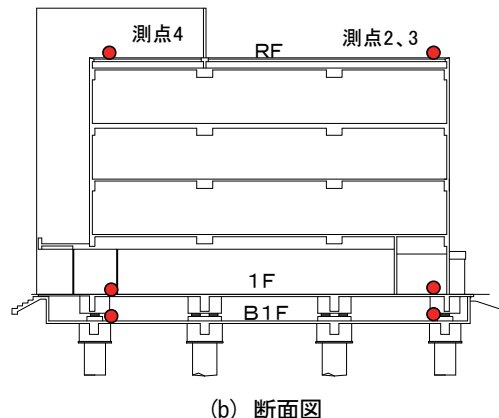
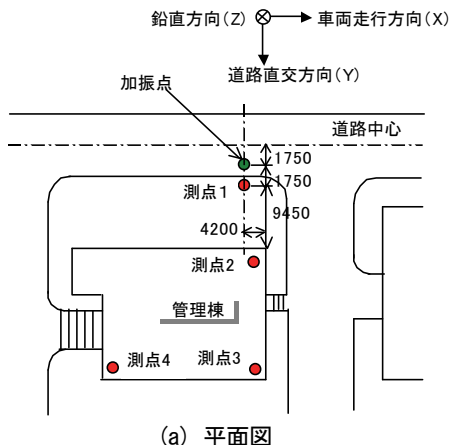


図-5 計測位置

載して走行させて鉛直方向に加振力を加えた。図-5に示す4測点の3方向加速度を振動計 VM53A(リオン株)により測定した。3ケースの加振を実施した。全ケースについて地表面上の測点1は固定し、建物内部の測点2~4をケース1は耐圧盤上、ケース2は1階床、ケース3はR階の同じ位置に設置して振動測定を行った。

3.2 実験結果

測定した加速度波形として図-6に地表面と耐圧盤上の記録の一例を示す。また、図-7に全加振ケースによる地表面での1/3オクターブバンド分析した各中心振動数における振動加速度レベルを示す。3回の加振の差は小さく、ほぼ同じ加振力であったといえる。図-8~10にそれぞれ地表面に対するB1階耐圧盤、1階、R階での振動加速度レベルの差分から求めた伝達特性を示す。

地表面から耐圧盤の伝達特性は水平方向(車両走行方向・車両走行直角方向)については、ほぼ一様に振動し

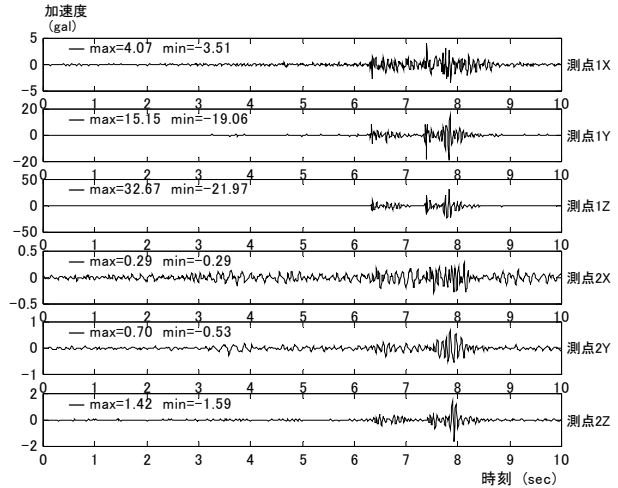


図-6 観測加速度波形の一例(ケース1)

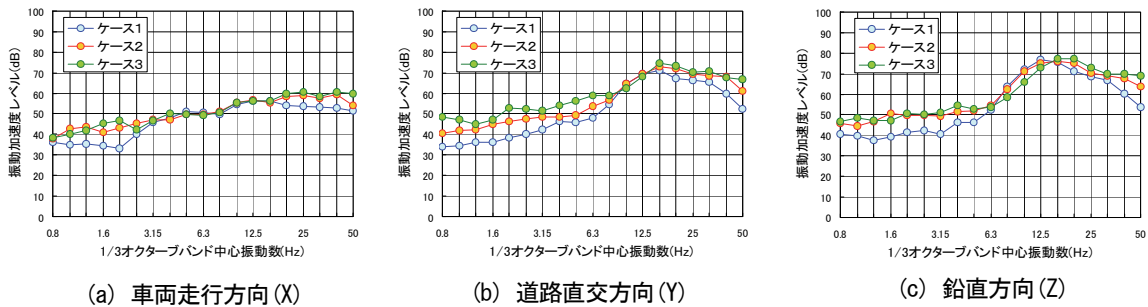


図-7 地表面の振動レベルの比較

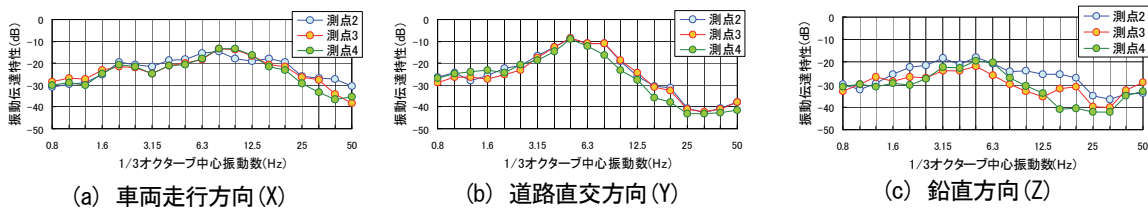


図-8 伝達特性(地表からBF)

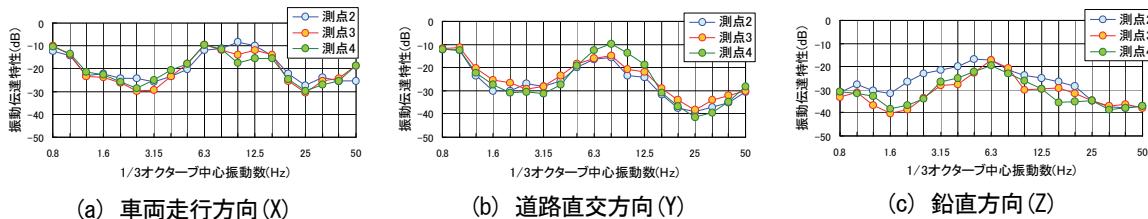


図-9 伝達特性(地表から1F)

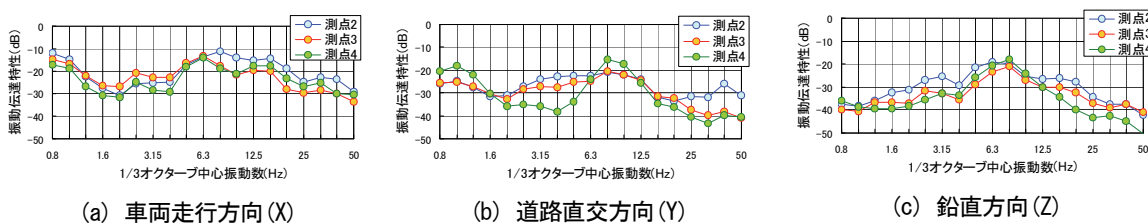


図-10 伝達特性(地表からRF)

ており、鉛直方向については、測定点間に若干の差異があることから、基礎のロッキング振動が発生していると考えられる。

地表面から1階の伝達特性は水平方向（車両走行方向・車両走行直角方向）については1Hz 付近の振動低減量が小さくなっていることから、免震層の周期で振動している。鉛直方向については、測定点で若干の差異があることから、1階床のロッキング振動が発生していると考えられる。しかし、周期帯に大きな差は見られない。

地表面からR階の伝達特性は水平方向（車両走行方向・車両走行直角方向）については、1階床に比較して各測点間で若干のバラツキがみられており、スウェイ振動が考えられる。鉛直方向については、測定点で若干の差異があることから、ロッキング振動が発生していると考えられる。

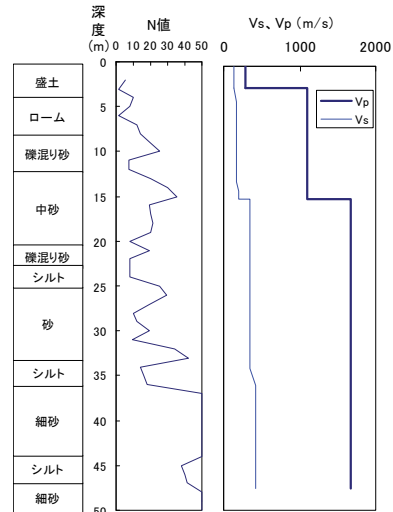


図-11 地盤構成

4. シミュレーション解析

振動測定記録から三次元予測システムを用いたシミュレーション解析を実施した。振動測定記録と解析結果を比較して、本システムの適用性の検討と解析モデル化の妥当性の検証を行った。本検討では0~35Hzの振動数領域について周波数応答解析を行い、計算振動数は0~15Hzは0.25Hzピッチ、15~30Hzは0.125Hzピッチ、30~35Hzは0.5Hzピッチとした。その他のフーリエ振動数についての補間手法は2自由度系の増幅関数を用いた。加振力は地表面上の測点1から逆算した。

表-1 地盤モデル

深度 (m)	層厚 (m)	ポアソン比 ν	単位体積重量 (KN/m ³)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	h (%)
0 ~ -2.5	2.5	0.343	12.7	280	137	2
-2.5 ~ -4	1.5	0.492	12.7	1100	137	2
-4 ~ -11	7	0.488	16.7	1100	168	2
-11 ~ -13	2	0.488	13.2	1100	168	2
-13 ~ -14	1	0.488	16.7	1100	168	2
-14 ~ -15	1	0.485	16.7	1100	189	2
-15 ~ -20	5	0.494	16.7	1670	189	2
-20 ~ -22	1.5	0.479	14.7	1670	339	2
-22 ~ -31	9	0.479	16.7	1670	339	2
-31 ~ -33	2	0.479	14.7	1670	339	2
-33 ~ -34	1.5	0.479	16.7	1670	339	2
-34 ~ -36	2	0.479	13.7	1670	339	2
-36 ~ -38	2	0.465	16.7	1670	427	2
-38 ~ -40	2	0.465	17.6	1670	427	2
-40 ~ -45	5	0.465	17.2	1670	427	2
-45 ~ -48	2.5	0.465	16.2	1670	427	2
-48 ~		0.465	17.2	1670	427	2

4.1 解析モデル

a. 地盤モデル

図-11 に示す地盤調査結果を基に、地盤モデルの作成を行った。地盤モデルは水平成層と仮定して薄層要素を用いてモデル化した。薄層要素の層分割は、最大解析振動数 40Hz まで考慮し、波長の 1/6 以下となるように設定した³⁾。モデルは深度 350m まで層分割し、それ以下は半無限地盤とした。表-1 に地盤モデルを示す。図-12 にレーリー波の分散特性を算定した結果を示し、図-13、14 に平常時の測定結果（暗振動）の車両走行方向、鉛直方向スペクトルを示す。群速度の分散曲線に

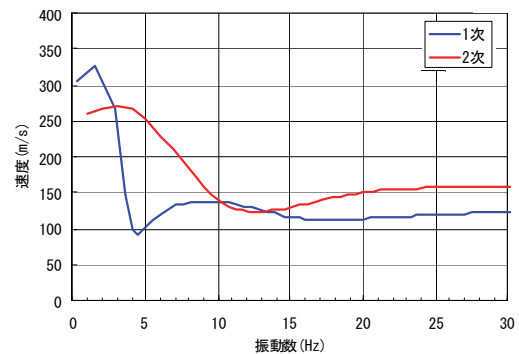


図-12 分散特性

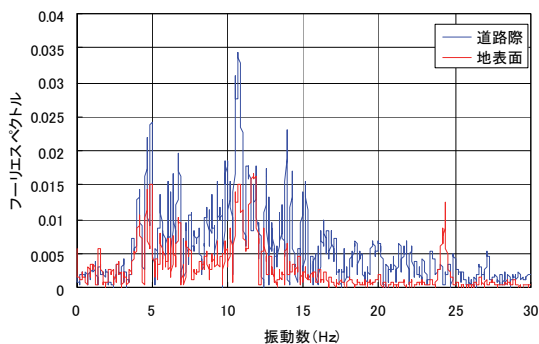


図-13 フーリエスペクトル（車両走行方向）

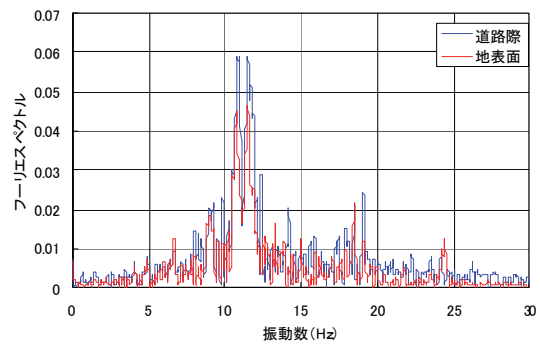


図-14 フーリエスペクトル（鉛直方向）

において、群速度が振動数に対して極小になるとき、波の振幅は励起されて大きくなり、波動の継続時間も長くなる。1次モードで4.5Hz付近、2次モードで12Hz付近に極小値が見られ、設定した地盤モデルはこの付近の振動数帯で振動が伝播しやすいことがわかる。一方、図に示す暗振動のフーリエスペクトルより、5Hz付近と12Hz付近に振幅の卓越が見られる。このことから、本検討で設定した地盤モデルについては概ね現地地盤を模擬できているといえる。

b. 三次元FEMモデル

全体解析モデルを図-15に、免震ピット部分を図-16に示す、杭・免震ピット・1F床板・上部構造物を三次元FEMでモデル化した。管理棟の上部構造は、質点とせん断ばねで構成する4質点モデルとした。上部構造のばね物性値を表-2に、免震層の積層ゴム、鋼棒ダンパーのばね定数を表-3に示す。積層ゴムのばね定数は長期地震観測における微小地震時の卓越振動数と建物重量から免震層の剛性を求め、ダンパーのばね定数が設計値であると仮定して求めた。

なお、上部構造物が質点モデルであることから、1F床板は剛体としてモデル化を行った。1F床板と免震ピットとを免震装置（積層ゴム25箇所、ダンパー12箇所）を模擬したばねで結合し解析を行った。質点モデル（上部構造物）の配置は、各階床重心の平均位置とした。薄層要素とFEMの境界部に設置される動的インピーダンスを算定する際の加振半径は、各々の節点の支配面積より等価な面積を有する円の半径とした。（ただし、杭に取り付け節点については、杭の半径とした。）解析モデルの固有値を表-4に示し、図-17には1階床での応答変位の時刻歴を示す。

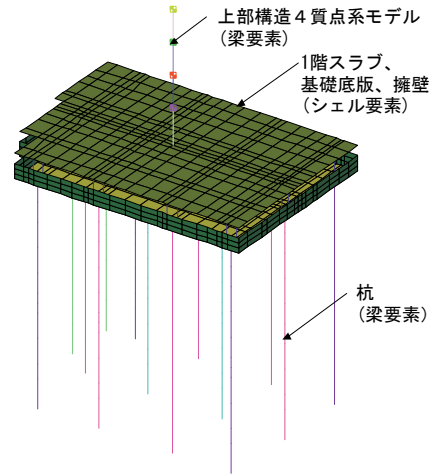


図-15 全体解析モデル

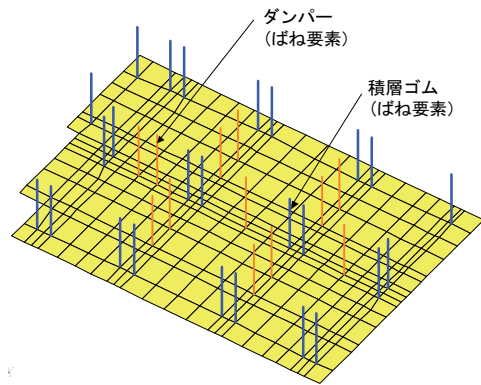


図-16 免震ピット部の解析モデル

表-2 上部構造のばね定数

階	重量 (tf)	Kx (kN/m)		
		水平長辺方向	水平短辺方向	鉛直方向
2F	431.3	1.05×10^7	4.43×10^6	4.14×10^7
3F	424.0	1.80×10^7	3.47×10^6	4.55×10^7
4F	479.2	1.43×10^7	2.67×10^6	4.55×10^7
5F	408.9	8.69×10^6	1.69×10^6	4.55×10^7

表-3 免震部のばね定数

	個数	Kx (kN/m/個)		
		道路走行方向	道路直交方向	鉛直方向
積層ゴム	25	2880	2880	1275300
ダンパー	12	1962	1962	0

表-4 固有値

次数	X方向 (Hz)	Y方向 (Hz)	Z方向 (Hz)
1	1.03	1.02	13.37
2	14.54	7.43	—
3	28.72	14.17	—

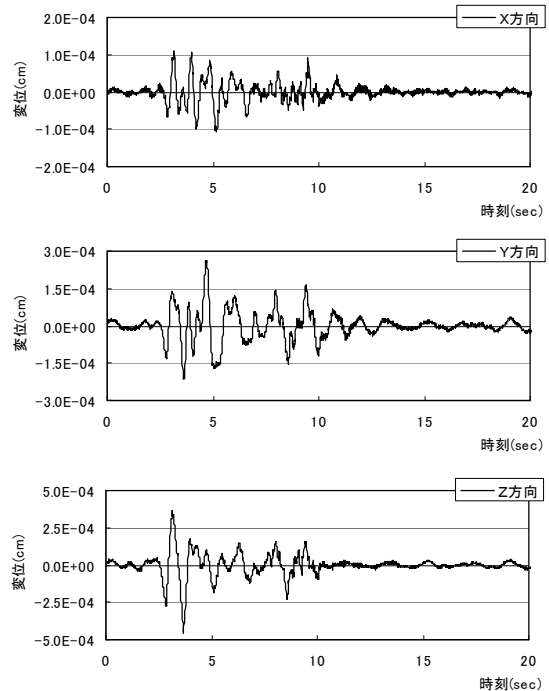


図-17 1階床応答変位

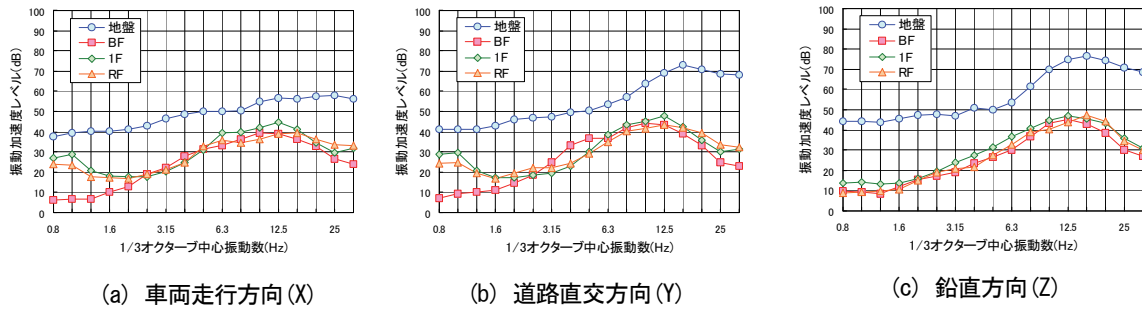


図-18 振動加速度レベル計測値

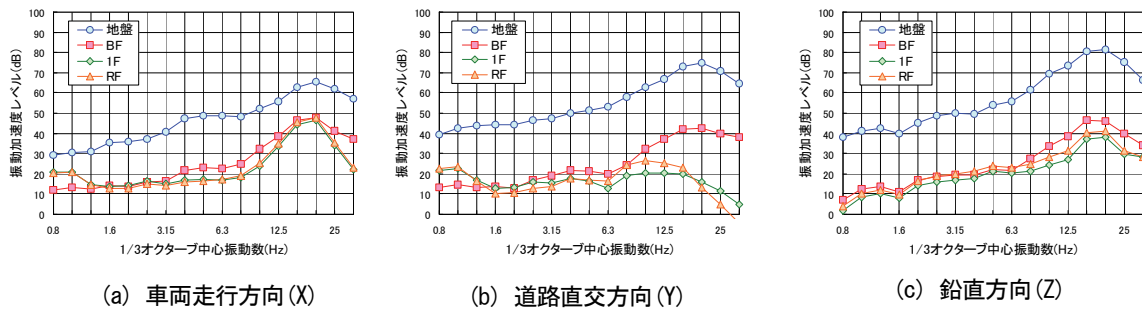


図-19 振動加速度レベル解析値

c. 解析結果

解析プログラム (SuperFLUSH/3DS) の制限上、三方向観測加速度の同時入力による加振力の逆算はできないため、三方向観測値について、それぞれの方向毎の加振力を求めた。三方向加振力による解析を別々に行い、当該方向の 1/3 オクターブバンド中心周波数における加速度振幅の単純和から振動加速度レベル VAL を次式により算出した。

$$VAL = 20 \log_{10} \frac{(a_x + a_y + a_z)}{a_0}$$

図-18 に地表面、B 1 階、1 階、R 階の各測点について 1/3 オクターブバンド分析した VAL 計測値の平均値を、図-19 にシミュレーション解析で求めた測点位置近傍節点の平均値を示す。地表面は加振力の逆算を行う際に規準とした測点であり、本来、解析結果と測定結果は同じとなるが、測定結果が 3 ケースあり平均化していること、三方向同時の結果評価を行っているため少し異なっている。

B 1 階について解析値は水平方向 (車両走行方向・車両走行直角方向) で高振動数が大きくなっているが、鉛直方向では振動レベルの減衰特性をほぼ模擬できている。免震層より上部となる 1 階、R 階について見ると、解析値は水平方向の免震層の卓越振動数 (1 Hz 付近) は一致しているが高振動数ではかなり過小評価となっている。また、鉛直方向では振動レベルのピーク振動数は模擬できているが若干過小評価である。水平方向についての振動レベルの予測精度が低い原因は解析仮定での免震層の

剛性と減衰は振動数によらず一定としているが、小変形時の振動数依存性の影響と考えられる。またシミュレーションの精度向上のためには、上部構造は質点モデルではなく重量の分布や剛性の分布、床剛性を的確に表現できる三次元立体モデルが望ましい。さらに通常の耐震建築構造の水平方向特性の検討が必要である。

5. あとがき

技術研究所管理棟の三次元 FEM モデルを作成し、車両走行試験を対象としたシミュレーション解析を実施した結果、地盤上での振動は良く対応していた。また、建物内の振動に関しては、道路交通振動において主要な鉛直振動の振動レベルの伝達特性を予測値はほぼ表現しており、予測システムの適用性が概ね確認されたとと言える。

今後は振動対策技術の予測と評価に本予測システムを活用し、種々の振動源の加振力データの蓄積と対策工法の評価を行う予定である。

【参考文献】

- 1) (社)日本建築学会、「建築物の振動に関する居住性能評価指針・同解説」、2004. 5
- 2) 榊構造計画研究所、(株)地震工学研究所、「SuperFLUSH/3D 理論説明書 ver3.0」、1995. 11
- 3) 西村忠典、庄司正弘ほか、「地中防振壁による列車振動対策に関するシミュレーション解析」、第 35 回地盤工学研究発表会、2000. 6