

自動車振動の伝搬性状に関する研究

吉原 醇 一 安井 讓
寺村 彰 中村 充

Propagation Properties of Automobile-Induced Vibration

Jun-ichi Yoshihara Yuzuru Yasui
Akira Teramura Mitsuru Nakamura

Abstract

In office buildings or apartment houses close to roadways, occupants often complain about automobile-induced vibration transmitted to rooms. This paper firstly describes the characteristics or features of the vibration, and secondly presents the results of investigations of measurements and analyses related to the items below. Namely, they are the calculation method of time-history dynamic load of axle suspension system, the propagation properties of ground vibration, the method of inversely calculated dynamic loads applied to an elevated expressway pier foundation, a filtering effect on a building foundation, the simulation analysis of a building response, etc. It is concluded that predicting automobile-induced vibration to combine these results of investigations according to the conditions is made possible.

概 要

道路近くに建設されるビルや集合住宅では、建屋に伝搬した自動車振動により苦情が生じる場合がある。本報告では、まず調査から得られた自動車振動の特徴と実態について述べる。次いで、伝搬経路に沿う車両の振動→振動の地盤伝搬→建物基礎の振動→建物本体の振動の順に、以下の項目に関する測定・解析結果について述べる。すなわち、① 動荷重の時刻歴波形の作成方法、② 地盤振動の伝搬性状の特徴とそのシミュレーション解析、③ 高架橋基礎への加振力の逆算法、④ 入力損失効果、および⑤ 建屋応答のシミュレーション解析、等について記す。これらの検討結果を状況に応じて、組合せることにより自動車振動の予測が可能である。

1. はじめに

最近の経済活動の高度化に伴い、物資の輸送手段としての道路の重要性が再認識され、さらなる整備・拡充が進められてきた。こうした傾向は、道路の車線数の増加等による交通の流れの円滑化を促進したが、一方では総交通量が増大し、大型車の総交通量に占める割合の増加にもつながってきた。

この様なトラック等の大型車による交通量の増大に伴い、自動車交通に起因する大気汚染・騒音・振動等の公害が指摘され、これらの中には沿道住民に深刻な影響を及ぼしている例も見受けられる。この中の自動車振動は、その振動振幅が一般的には微小なレベルであり、建物を崩壊させるようなものではないが、建物内での居住環境、作業環境を阻害する要因となり、解決すべき問題として取り上げられることも珍しくない。

建物の設計に際しては、これらの振動の影響を事前に予測し、対策を検討する必要がある。ところで、自動車振動が建物に与える影響を見る際、道路の振動特性については、道路に関連する公共機関あるいは各種の関連研究機関等により、実測および解析に関して研究が行われ、様々な知見が得られている^{1),2)}。しかし、車両が発生する動荷重、振動源と建物間の中媒体である地盤の伝搬性

状および受振側としての建物への入力特性等については未だ不明な点が多く、解明の遅れた部分でもあり、建物の振動予測を困難にしている大きな要因となっている。

本研究では、問題となる事例の多い自動車振動について、先ず調査から得られた実態・特徴について述べ、次いで伝搬経路に沿って、車両の振動→地盤の振動→建物基礎の振動→建物本体の振動、についての実測と解析の比較・検討結果を順次示すこととする。

2. 自動車振動の特徴

道路交通が道路近傍の地盤の振動に影響を与える要因として、以下のものが挙げられる³⁾。① 自動車の諸元、② 走行速度、③ 交通量、④ 路面の平坦性、⑤ 道路構造、⑥ 土質条件、⑦ 地形条件、⑧ 距離。

平坦地の道路に関して言えば、路面の平坦性（凹凸）に起因する影響の程度が最も大きく、車両のばね上質量の振動に関連する2~4 Hz とばね下質量に係る10~15 Hz の振動とが地盤への加振入力となる。また、高架道路から地盤への伝搬振動においては、主桁あるいは橋脚の振動に基づく3 Hz 付近および10数 Hz の振動数が卓越する⁴⁾。図-1~図-4に、平坦地の道路および高架道路に間近の、地盤の加速度の測定波形とそのスペクトル例を示した。これらのスペクトルは、振動の巧オクタ

ープ分析より求めた振動加速度レベル (dB) を加速度値 (gal) に変換し、4 グリッドの図にプロットしたものである。スペクトル図から上記の卓越振動数が現われている様子が読み取れる。この地盤伝搬の振動が、建物に到達してその振動を励起する。特に S 造の中小規模の建物については、その固有振動数が 2~5 Hz にあり地盤の卓越振動数と領域を共有することから、共振を誘発し、居住性を阻害する原因となることがある。

3. 車両振動により生じる加振力

予測計算を行う場合、地盤あるいは建物モデルに作用させる動荷重の入力波が必要になる。この章では、走行時の車の加速度波形から入力波を作成する方法について述べる。

動荷重算定のための自動車の振動モデルを図-5 に示す。ただし、ここでは簡単のために車体を剛体として上下方向の平均応答のみを考慮するものとする。このモデルを基に導いた運動方程式を以下に示す。

$$(m_{2F} + m_{2B}) \left(\frac{\ddot{x}_{2F} + \ddot{x}_{2B}}{2} \right) + k_{2F}(x_{2F} - x_{1F}) + k_{2B}(x_{2B} - x_{1B}) + C_{2F}(\dot{x}_{2F} - \dot{x}_{1F}) + C_{2B}(\dot{x}_{2B} - \dot{x}_{1B}) = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m_{1F}\ddot{x}_{1F} + k_{1F}(x_{1F} - x_0) - k_{2F}(x_{2F} - x_{1F}) + C_{1F}(\dot{x}_{1F} - \dot{x}_0) - C_{2F}(\dot{x}_{2F} - \dot{x}_{1F}) = 0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$m_{1B}\ddot{x}_{1B} + k_{1B}(x_{1B} - x_0) - k_{2B}(x_{2B} - x_{1B}) + C_{1B}(\dot{x}_{1B} - \dot{x}_0) - C_{2B}(\dot{x}_{2B} - \dot{x}_{1B}) = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに

- m_{1F}, m_{1B} : それぞれ前後輪のばね下質量
- m_{2F}, m_{2B} : ばね上全重量を前輪部と後輪部に分け、それぞれが分担支持する質量
- x_{1F}, x_{1B} : m_{1F}, m_{1B} それぞれの質点の上下変位
- x_{2F}, x_{2B} : m_{2F}, m_{2B} それぞれの質点の上下変位
- x_0 : 路面 (床面) の凹凸変位

ただし、 $\left(\frac{\ddot{x}_{2F} + \ddot{x}_{2B}}{2} \right)$ は、ばね上全重量の重心位置の上下加速度を表す。式(1), (2), (3)を整理すると、式(4)を得る。

$$F(t) \equiv -k_{1F}(x_{1F} - x_0) - k_{1B}(x_{1B} - x_0) - C_{1F}(\dot{x}_{1F} - \dot{x}_0) - C_{1B}(\dot{x}_{1B} - \dot{x}_0) = (m_{2F} + m_{2B}) \left(\frac{\ddot{x}_{2F} + \ddot{x}_{2B}}{2} \right) + m_{1F}\ddot{x}_{1F} + m_{1B}\ddot{x}_{1B} \quad \dots\dots\dots(4)$$

式(4)が、路面の凹凸により自動車が路面に及ぼす動荷重の算定式である。

実際には、前・後輪のシャフト部とばね上の車体にそれぞれ取付けた加速度計の記録を(4)式に適用して車の動荷重を求める。例として、建物内地下駐車場の入車用上りの石畳の斜路をバンを走行させた時の実測の車両加速度と式(4)より求めた動荷重の時刻歴波形をそれぞれ図-6 と図-7 に示す。また、一般道路上をトラックが走行

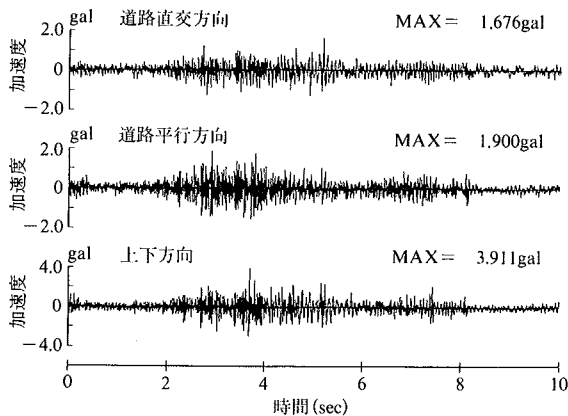


図-1 平坦地道路に近傍の地盤における振動の波形

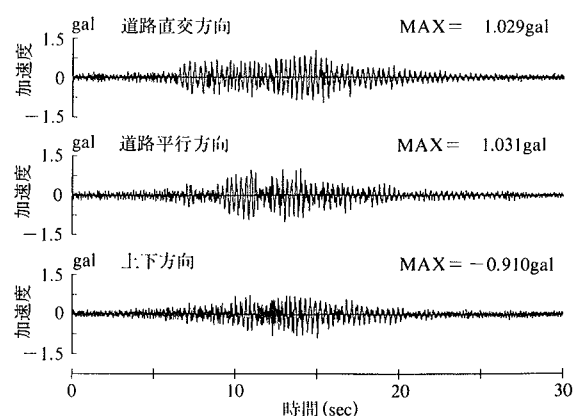


図-3 B 高架橋に近傍の地盤における振動の波形

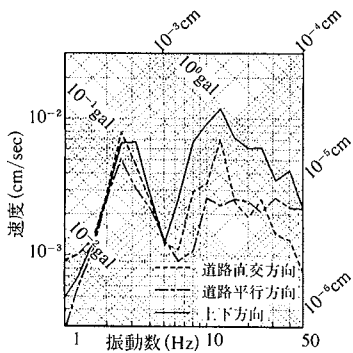


図-2 平坦地道路に近傍の地盤における振動のスペクトル

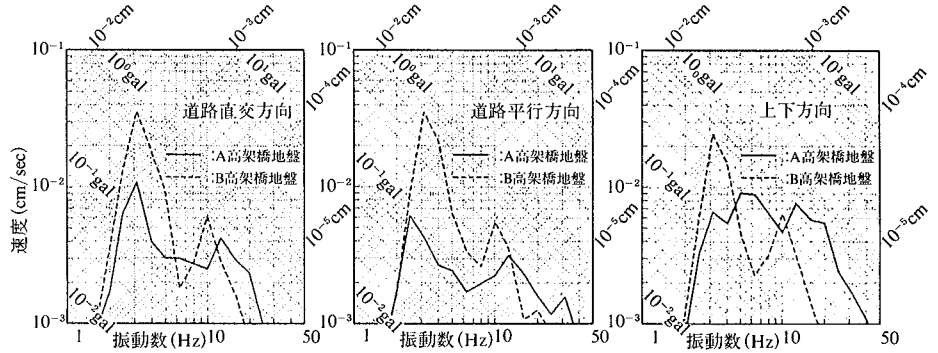


図-4 高架道路に近傍の地盤における振動のスペクトル

した場合については、動荷重の時刻歴波形のみを図-8に示す。

さらに、図-9に、バンとトラックについて、前・後輪のシャフト部とばね上車体の各測点の加速度の応答スペクトルを示す。図-9(a)から2~3 Hzに最初のピークがあり、図-9(b)(c)から10~20 Hzにもう1つのピークがあることがわかる。2~3 Hzは車体で卓越しているので全体系の1次固有振動数であると考えられ、また、10~20 Hzは前・後輪で卓越していることから、タイヤの空気ばねによる卓越振動数であると考えられる。

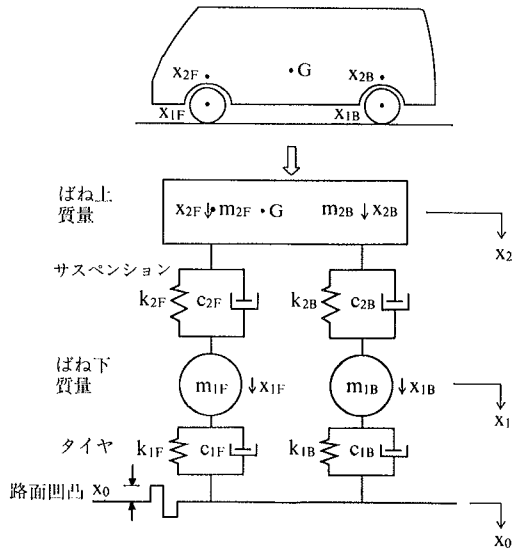


図-5 車両の振動モデルと測点位置

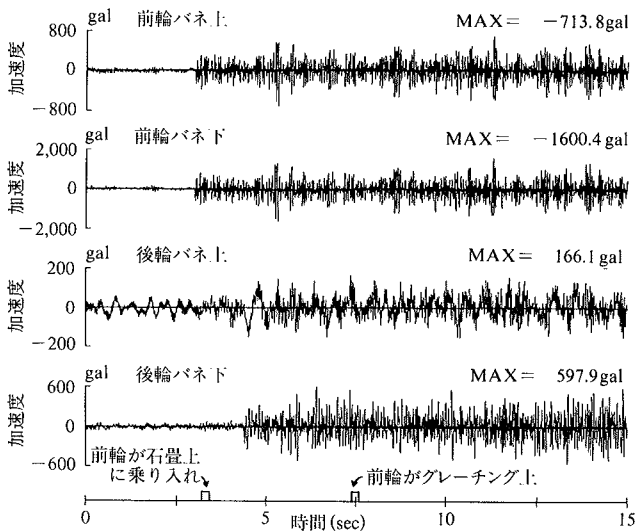


図-6 車両の測定波形 (バン)

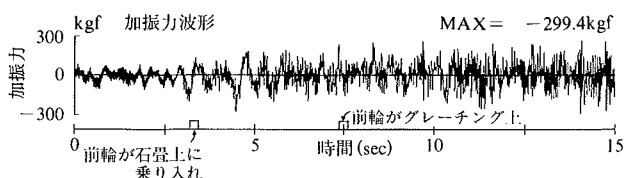


図-7 動荷重の時刻歴波形 (バン)

4. 振動の地盤伝搬

自動車による地盤の振動の伝搬性状に関しては、実測・実験的手法により検討したものがほとんどであり、解析的手法により直接的に応答を予測しようと試みた例はかなり少ないのが現状である^{5),6)}。

そこで、この度、高架道路に接するある現場で振動の測定を行う機会があったので、振動の地盤伝搬の予測について検討する目的で、二次元FEMによるシミュレーション解析を試み、測定結果との比較を行うこととする。

なお、ここで対象とする建物については、その振動測定を、更地、根伐時、耐圧版施工時および建物竣工際の各施工段階で実施した。図-10に、その建物と高架橋との位置関係を示す。

4.1 解析モデル

図-10に示す高架橋と根伐時の地盤を対象として、底面に粘性境界、側面に波動伝達境界を有する二次元FEMによりモデル化する。このモデルの高架橋基礎を定常加振し、地盤の応答を求める。図-11に、根伐時地盤をモデル化したものを示す。メッシュのピッチは0.5 mとする。加振は図中の矢印の位置とし、その位置で上下と水平の各方向に正弦波加振力を作用させる。図中にはモデル諸元を同時に示すが、各層のS波速度 (V_s)・P波速度 (V_p)・密度 (ρ) は、更地の状態で行われたボーリング孔でのPS検層の結果を用い、減衰定数 (h) は土質をもとに推定した値とする。

4.2 逆算加振力

測定結果は1/3オクターブ分析による振動加速度レベルであるため、解析も1/3オクターブ分析によることとする。即ち、1/3オクターブバンド幅中の複数の振動数について、高架橋基礎に単位の正弦波加振力を水平・上下に個別に作用させる。こうして得られる地表測点 (レファランス

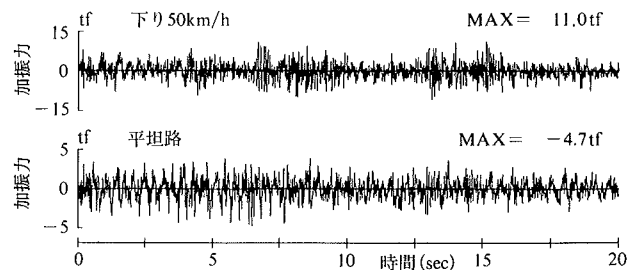
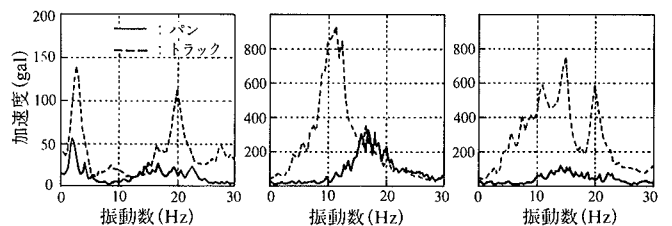
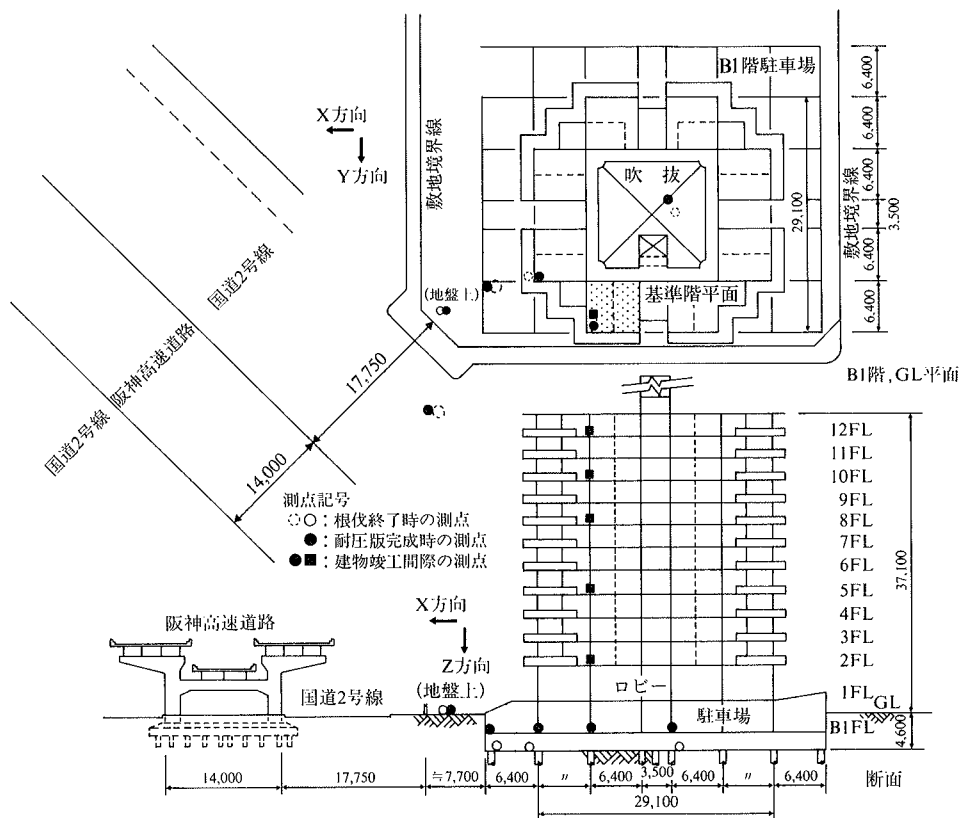


図-8 動荷重の時刻歴波形 (トラック)

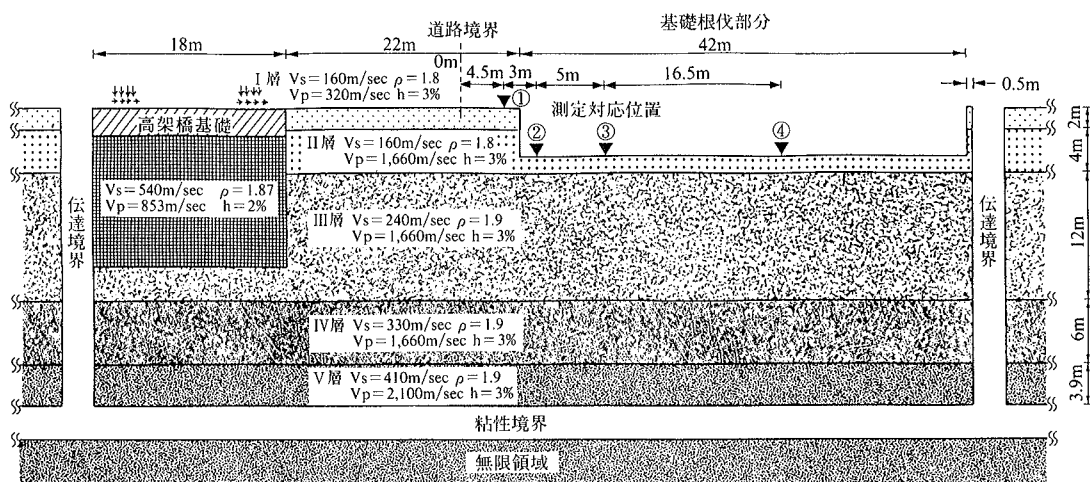


(a) 車体後部バネ上 (b) 前輪バネ下 (c) 後輪バネ下

図-9 車両各測点の加速度の応答スペクトル



図一10 高架橋と根伐底・建物測点との位置関係



図一11 FEM モデル

ポイント) の応答と実測値との関係から、水平・上下の単位加振力を係数倍して得られる複数の力を RMS 平均したものを1/3オクターブバンド中心周波数の逆算加振力とする。なお、レファランスポイントとして測点①のものを用いる。結果を図-12に示す。図中の縦軸(加振力)は、道路に平行方向の基礎長さ(ここでは7m)で割って表してある。同図によれば、逆算加振力は、8 Hz、12.5 Hz、20 Hz で卓越し、20 Hz で最大値を持つ凸凹の形状を示す。また、上下方向だけでなく、水平にもかなりの大きさを有することが分かる。

4.3 解析結果および実測結果との比較

上記の逆算加振力を高架橋基礎に作用させた時の根伐底の応答結果を振動加速度レベルに換算し、測定結果との比較検討を行う。結果を図-13に示す。比較を行う振動数は、測定結果において特に振幅が卓越していた3.15 Hz、12.5 Hz および 20.0 Hz を対象とする。図中、実線と破線はそれぞれ水平と上下方向の解析結果を、●印と○印はそれぞれ水平と上下方向の測定結果を示す。

測定結果との比較では、解析結果は3.15 Hz を除いて測定値よりやや大きめに得られているが、全般的には両者はほぼ対応していると言える。解析結果が大きめの理由としては、解析が2次元を扱っているのに対して、実

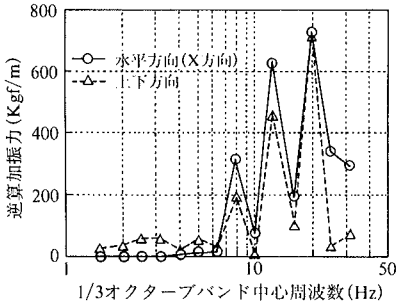


図-12 逆算加振力

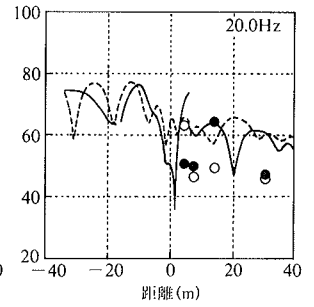
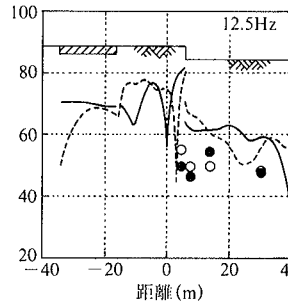
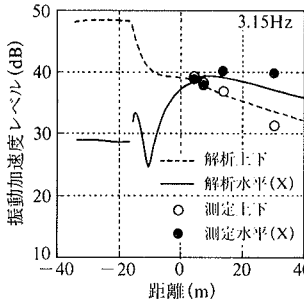


図-13 掘削後の地盤における振動の距離減衰

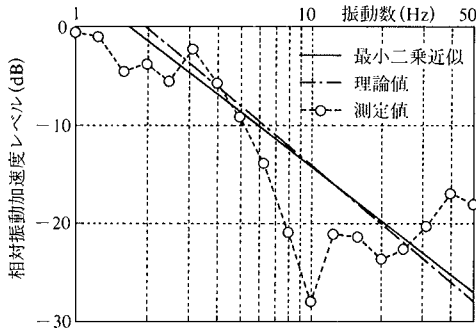


図-14 基礎底盤の入力損失効果 (X 方向)

際の伝搬は3次元的であり、解析は距離減衰を小さめに評価しているためと推定される。

この様に、掘削された地盤のような不整形性のある地盤における高架道路からの自動車振動の伝搬性状のシミュレーションにおいても、二次元FEMは有効な手法であるといえる。また、このシミュレーションから逆算された加振力は、データベースとして、予測に際して有効に活用できるものと考えられる。

5. 建物基礎への振動入力

高架橋からの自動車振動に関して、2つの施工段階での測定、すなわち地下部分掘削終了時の根伐地盤上での測定と地下室完成時の耐圧版上での振動測定の結果から、地盤から基礎底盤への入力損失効果の検討を試みる。

図-10には、地下部分掘削時の根伐地盤上測点と地下部分完成時の基礎底盤上の測点とを重ね書きして示す。入力損失効果の算出方法については、参考文献7)を参照されたい。入力損失効果を上記の建物を対象に求めた例を図-14に示す。図中の点線は実測から求めた入力損失効果を表す曲線であり、実線が測定値の最小二乗近似⁷⁾によるものである。また、同図中の理論値は下式により計算したものである。

$$\eta = \frac{V_s}{\pi B f} \cdot \sin \frac{\pi B f}{V_s} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 η は基礎底盤とその周辺地盤の変位振幅比、 B は基礎底盤の長さ、 V_s は波動の伝搬速度、 f は振動数である。同図から、入力損失効果は振動数の増加とともに大きくなること、また理論値と最小二乗近似値とは良く対応していることがわかる。

6. 建物の振動応答

自動車振動に対する建物の応答に関して、振動の測定結果とそのシミュレーション解析結果を示す。この建物は、図-10に示す地上12階・地下1階のいわゆるマンションであり、構造は、地階および地上階共に柱・梁はSRC造である。一般に、高架道路からの自動車振動に対するS造あるいはRC造の中低層建物では、水平振動が問題になることが多いので、ここでの検討対象は水平動のみとする。

6.1 振動測定結果

竣工間際に測定を行い、高架道路から建物へ及ぼす自動車振動の影響の有無、建物の振動特性等を把握する。

図-10には各階の測点位置(●■印)を示す。測定から得られた加速度が、建物の短辺方向(Y方向)よりも長辺方向(X方向)のほうが大きかったので、以下では長辺方向のみを取り上げ検討対象とする。

図-15は、測定中に建物が励振されている部分を含むある時間帯の、測点の地盤上と柱脚における測定の波形例である。図-16は、上記の測定波形の1/3オクターブ分析による振動加速度レベルを加速度に変換し、4グリッド上にプロットしたものである。同図中にはマイスターの感覚曲線A(振動の知覚限界)も重ね書きして示す。同図から、この建物の振動は全体的に無感領域にあるが、3.15 Hzでは振動知覚限界にかなり近い大きさになっていることが分かる。図-17と図-18に、それぞれ建物の12階のB1階に対する振動伝達比とモードを示す。これらの図から、長辺方向の1次、2次、3次はそれぞれ2.35 Hz、8.98 Hz、13.04 Hzと得られている。

6.2 シミュレーション解析

モデル化にあたっては、建物全体を地下1階を含む13質点系のせん断型モデルに置換する。各階の重量は、構造計算書の柱軸力リストをもとに積載荷重を含んだ値として算出する。剛性は、先ず、柱梁接合部の剛域を考慮し、乾式間仕切り壁も考慮の対象として初期剛性を算出し、次いで、1次固有振動数が長辺方向の測定値2.35 Hzに一致するようにヤング係数(E)を求め、この値を用いて剛性を出し直すという方法で求める。このときEの値は初期剛性算出時の1.65倍と得られる。減衰は一律2.0%とする。

上記のモデルに、図-14の入力損失効果を考慮した入

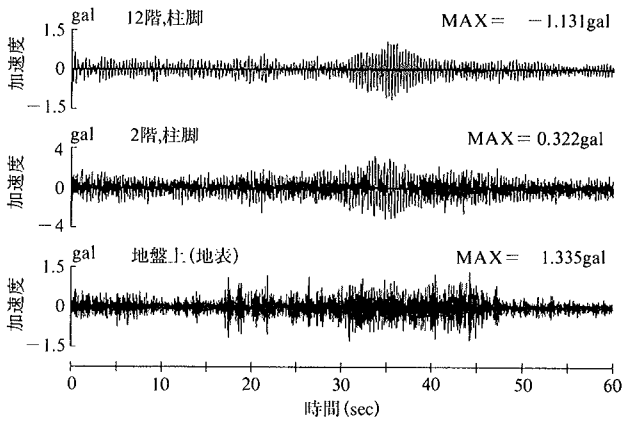


図-15 地盤上と柱脚部の測定波形 (X 方向)

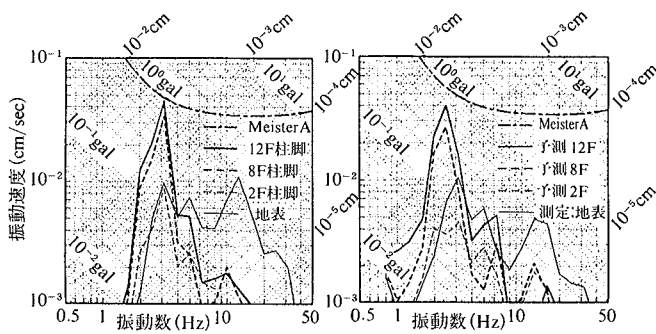


図-16 建物振動の応答 (測定) 図-20 建物振動の応答 (シミュレーション解析)

力波を作用させて応答を求める。入力波は、地表測点①における実測波形に関して地下部分掘削終了時のものと竣工時のものとのスペクトルの形状・大きさがほぼ類似のケースの、掘削終了時の根伐底での波形を用いる。入力波と12階の応答波を図-19に示す。また、波形の1/3オクターブ分析による振動加速度レベルを加速度に変換した値を、4グリッドの図上にプロットして図-20に示す。同図には、12階の他に8階および2階の結果も重ね書きして示す。図-16と20の比較から、測定結果とシミュレーション結果とは比較的良く対応しており、上記のような方法でも、自動車振動に対する建物の応答を予測することが可能であることが分かる。

7. おわりに

車両振動では、車両に取り付けた加速度記録から建物モデルへの入力として用いる動荷重の時刻歴波形の作成方法を示した。地盤伝搬では、高架道路を例に自動車振動の地盤伝搬が二次元 FEM で解析可能なことを示した。また、建物基礎振動では、高架道路近傍の新築建物における根伐底地盤と基礎底盤での振動の測定結果に基づき基礎底盤の入力損失効果を把握し、既往の理論で評価できることを示した。さらに、建物本体の振動では、高架道路を振動源とした道路近傍の建物への振動の影響について、実測と解析との比較・検討を行った。高架道路近傍の建物については、質点系せん断型モデルにモデル化し、

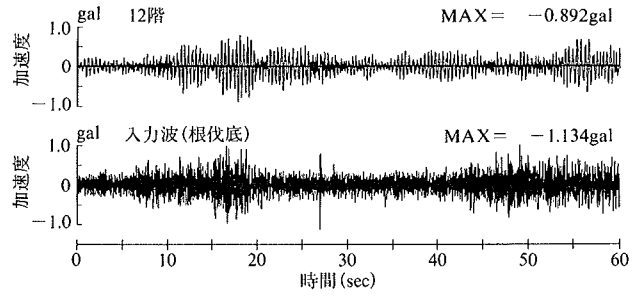


図-19 入力波とシミュレーション解析の応答波形 (X 方向)

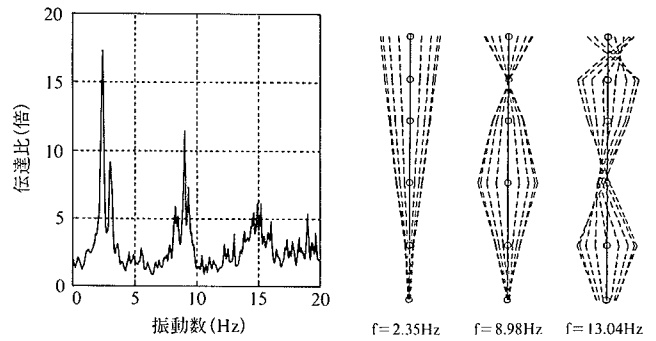


図-17 振動伝達比 (12階/B 1階)

図-18 振動モード (X 方向)

間仕切り壁の剛性の評価や適切なヤング係数の評価等を行うことにより、建物の微小振動レベルの予測が可能であることを示した。これらの検討結果を状況に応じて、組合せることにより自動車振動の予測が可能であることが分かった。今後さらに、より多くの実測データの積み重ねを行い、予測手法の信頼性の向上を図っていきたい。

参考文献

- 1) 北村泰寿, 森誠一郎: 単一走行車両による地盤振動のシミュレーション, 土木学会論文報告集, 第270号, p.31~39, (1978)
- 2) 鈴木清美, 小林一雄: 4. 自動車の車体振動と道路の地盤振動について, 東京都土木技術年報, p.103~111, (1975)
- 3) 横山功一, 成田信之, 桂樹正隆: 道路交通振動に影響を及ぼす諸因子, 第32回土木学会学術講演会梗概集 IV部門, p. 352~353, (1977)
- 4) 吉川 実, 森尾 敏, 寺田道直: 高架橋から地盤へ伝搬する振動について, 第21回土質工学研究発表会, p.817~820, (1986)
- 5) 花里利一: 人工的振源による環境振動に関する研究—走行荷重による地盤振動の3次元解析—, 日本建築学会大会学術講演梗概集, p. 395~396, (1990)
- 6) 松浦康夫, 森尾 敏, 塚本耕治: 高架橋から伝播する交通振動の軽減対策について, 第24回土質工学研究発表会, p. 941~944, (1989)
- 7) 吉原, 中村, 安井, 平野: 地下鉄振動の伝搬性状に関する研究(その2)—建物への入力損失効果—, 大林組技術研究所報, No. 43, p. 21~28, (1991)