

距離減衰から推定した交通振動源のスペクトル特性と地盤の減衰定数
 Source Spectral Characteristics and Damping Ratios of Soils
 Estimated from Attenuation of Traffic-induced Vibrations

新井 洋¹⁾、若井 修一²⁾、時松 孝次³⁾
 Hiroshi ARAI¹⁾, Shuichi WAKAI²⁾, and Kohji TOKIMATSU³⁾

1) 東京工業大学工学部建築学科助手 博士(工学)

Research Associate, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2) 東京工業大学大学院

Graduate School, Tokyo Institute of Technology

3) 東京工業大学工学部建築学科教授 工博

Professor, Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

要約

環境振動(地盤振動)予測においては、振動源および伝播経路の適切なモデル化が不可欠であるが、これらについて検討した例は少ない。本研究では、交通振動源のモデル化に関する予備的検討として、振動源が比較的明瞭な地点において振動計測を行い、直線上に等間隔配置されたランダム点加振モデルを仮定して、距離減衰特性に基づいて振動源スペクトルおよび地盤の減衰定数を推定し、以下の知見を得た。(1) 高速道路の交通振動源スペクトルは、2-20Hz の周波数範囲で鉛直・水平成分とも3Hz付近に最大ピークが見られる。また、振動源の水平鉛直加振力比は、この周波数範囲で0.2-2程度の値をとる。(2) 地盤の減衰定数は、ひずみレベル 10^{-9} - 10^{-7} 程度において0.2-3%程度と推定され、速度振幅およびひずみ量と正の相関がある。

SUMMARY

A linear array observation of traffic-induced vibration is conducted at reclaimed land in Tokyo. The spectral analysis of observed data provides the attenuation of traffic vibrations at any given frequency. The source spectra of traffic vibrations and damping ratios of soils are then estimated based on the attenuation, assuming that the ground vibrations consist mainly of surface waves. It has become clear from the estimated results that; 1) Vertical and horizontal source spectra have clear peaks at a frequency of 3 Hz. The values of the horizontal-to-vertical ratios of source spectra are 0.2 - 2; and 2) Estimated damping ratios of soils vary from 0.2 to 3%, depending on the strains induced in the soils.

1.はじめに

近年、環境保全の観点から、交通機関、建設工事、工場機械等に起因する環境振動(地盤振動)に対する事前予測および対策が必要とされる場面が急増している。任意の地点での地盤振動を精度良く予測するためには、従来数多く行われてきた人間感覚に基づく定性的検討に加え、さらに波動論・振動論の観点から定量的検討を行っていく必要がある(例えば¹⁾⁻³⁾。そのためには、振動源および伝播経路の適切なモデル化が不可欠である。伝播経路については、ボーリング調査やP S 検層などの地盤探査結果から、ある程度モデル化が可能と考えられる。一方、振動源のモデル化につ

いては、その種類の多さやプロセスの複雑さから、検討された事例は少ない。そこで本研究では、振動源のモデル化に関する予備的検討として、振動源が比較的明瞭な地点において振動計測を行い、その距離減衰特性に基づいて交通振動源スペクトルの推定を試みる。同時に、微小ひずみレベルにおける地盤の減衰定数について検討する。

2. 計測地点および振動計測の概要

計測は、Fig. 1に示す東京都夢の島を東西に横断する首都高速道路およびJ R 京葉線にほぼ直交する長さ約1.5kmの直線道路(以下、Road A)で昼間に行った。高速

道路およびJR線は高架式構造、それ以外の道路は地表の舗装道路である。この高速道路は昼夜とも交通量が多い。

既往の調査に基づく計測地近傍の地盤構造をFig. 2に示す。表層はS波速度200m/s程度の埋土層または礫層であり、150m/s程度の沖積粘土層が深度約50mまで続き、その下は300m/s以上の洪積層となっている。また、Fig. 2の構造から求めた地盤せん断振動の1次固有周波数は0.74Hzである。

Fig. 3に計測の概要を模式的に示す。Road Aに沿って3成分(鉛直および水平直交2成分)または鉛直成分の速度計(固有周期1秒)を地表面に20台設置した。計測点の高速道路中央からの水平距離は最小28m、最大1200mとした。全計測点の速度計を4台の計測装置にわけて接続し、Z方向(鉛直方向)およびX方向(高速道路に直交する方向)・Y方向(高速道路に平行な方向)成分を1時間程度、同時計測した。各計測点で得られた波形は増幅後、カットオフ周波数50Hzのローパスフィルターを通し、サンプリング周波数200HzでA/D変換してノート型パソコンに記録した。なお、記録の同時性は各計測装置に付加した試作のGPSにより十分な精度で確保されている。

3. 交通振動の距離減衰特性

計測を行った時間帯においては、Road A周辺で短周期(主に1秒以下)の振動を発生させるような振動源は、Road A北側に位置する高速道路とJR線の車両および電車の通行以外には特に見あたらなかった。また、車両および電車の通行頻度は、JR線に比べ高速道路の方が多かった。このことから、計測時の、このサイトでの周期1秒程度以下の振動源は、主に高速道路の車両通行であると考えられる。そこで、計測された波形のうち、高速道路側から波群伝播していると考えられる区間を選び、1成分につき4096ポイントを単位とする30個のデータセットを作成した。これらのFFTおよびパワーレベルでの相加平均スタッギング^④により、各地点でのZ、X、Y各成分の速度フーリエスペクトル振幅を求めた。Fig. 4に代表地点でのZ、Y成分の速度フーリエスペクトル振幅を示す。Z、Yいずれの成分も、2Hz以上の周波数帯で、高速道路中央からの水平距離(以下、振源距離r)が大きいほどスペクトル値が小さくなる傾向が認められる。また、Z、Yいずれの成分も、振源距離rによらず3Hz付近に明瞭なスペクトルピークが認められる。高速道路に最も近いr=28m、33m地点では、Z成分の10Hz付近、Y成分の9Hz、15Hz付近にも比較的大きなピークが見られるが、このピークは距離rとともに急激に小さくなり、r=835m地点では見ることができない。X成分についてもY成分と同様の傾向が確認された。

Fig. 5に、幾つかの周波数でのZ、X、Y成分のスペクトル値と振源距離rとの関係を○、□、△印で示す。いずれの周波数でも、鉛直成分のスペクトル値が水平成分のそれよりも大きい傾向が認められる。また、スペクトル値の距離減衰は概ね $r^{-1/2}$ と r^{-2} の間に距離に依存して変化して

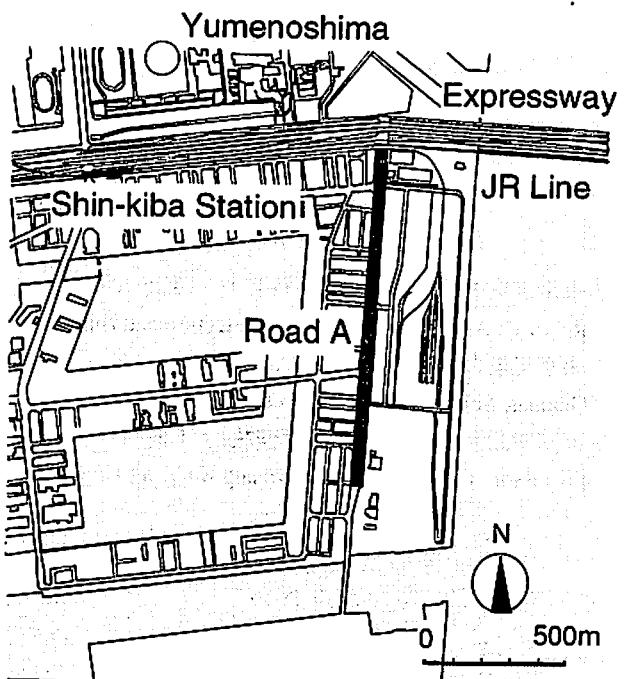


Fig. 1. Map showing observation site.

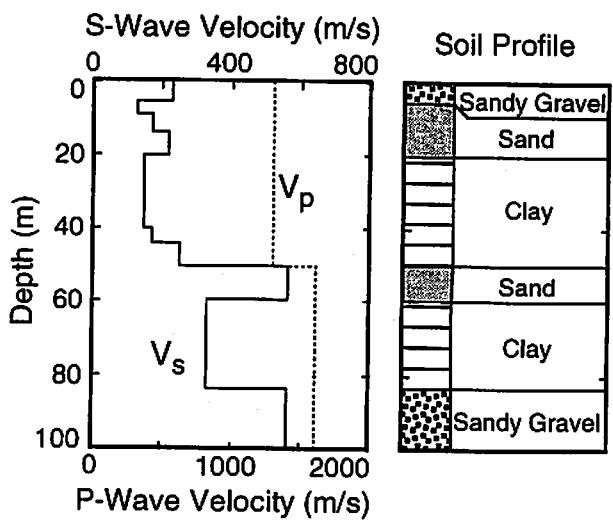


Fig. 2. Soil profile at observation site.

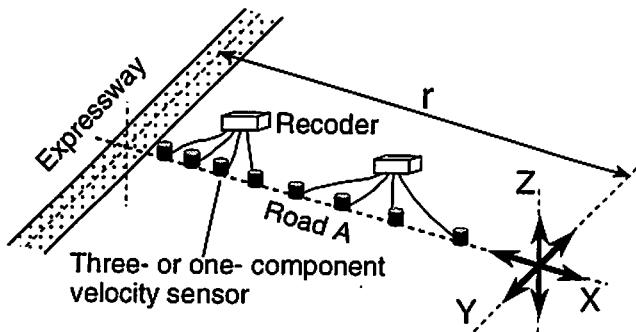


Fig. 3. Schematic diagram of the observation.

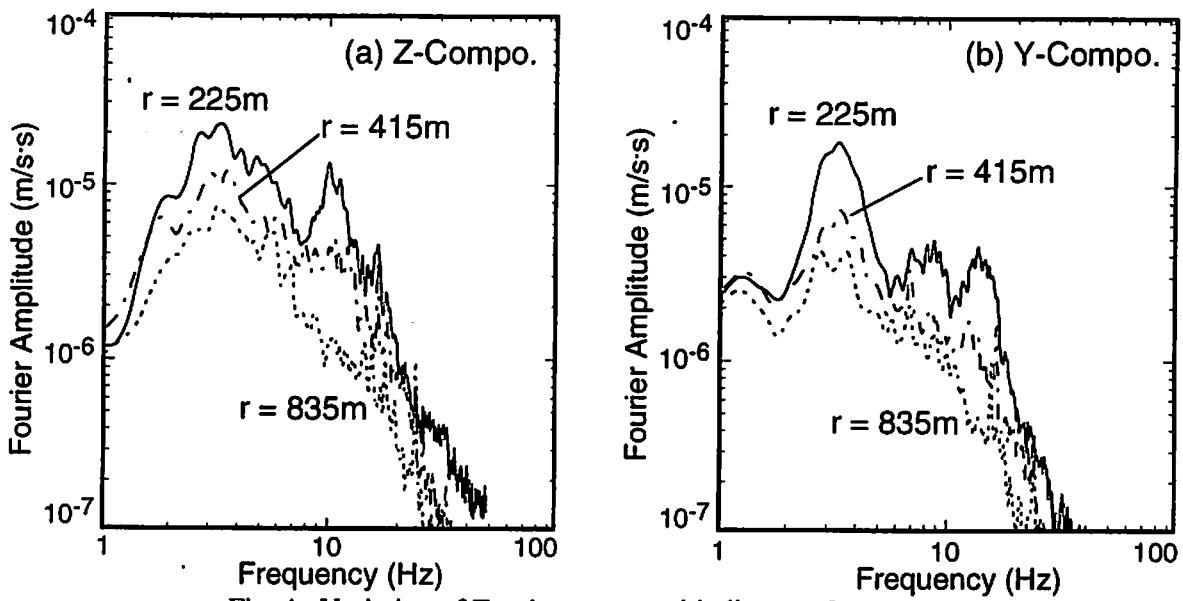


Fig. 4. Variation of Fourier spectra with distance from expressway.

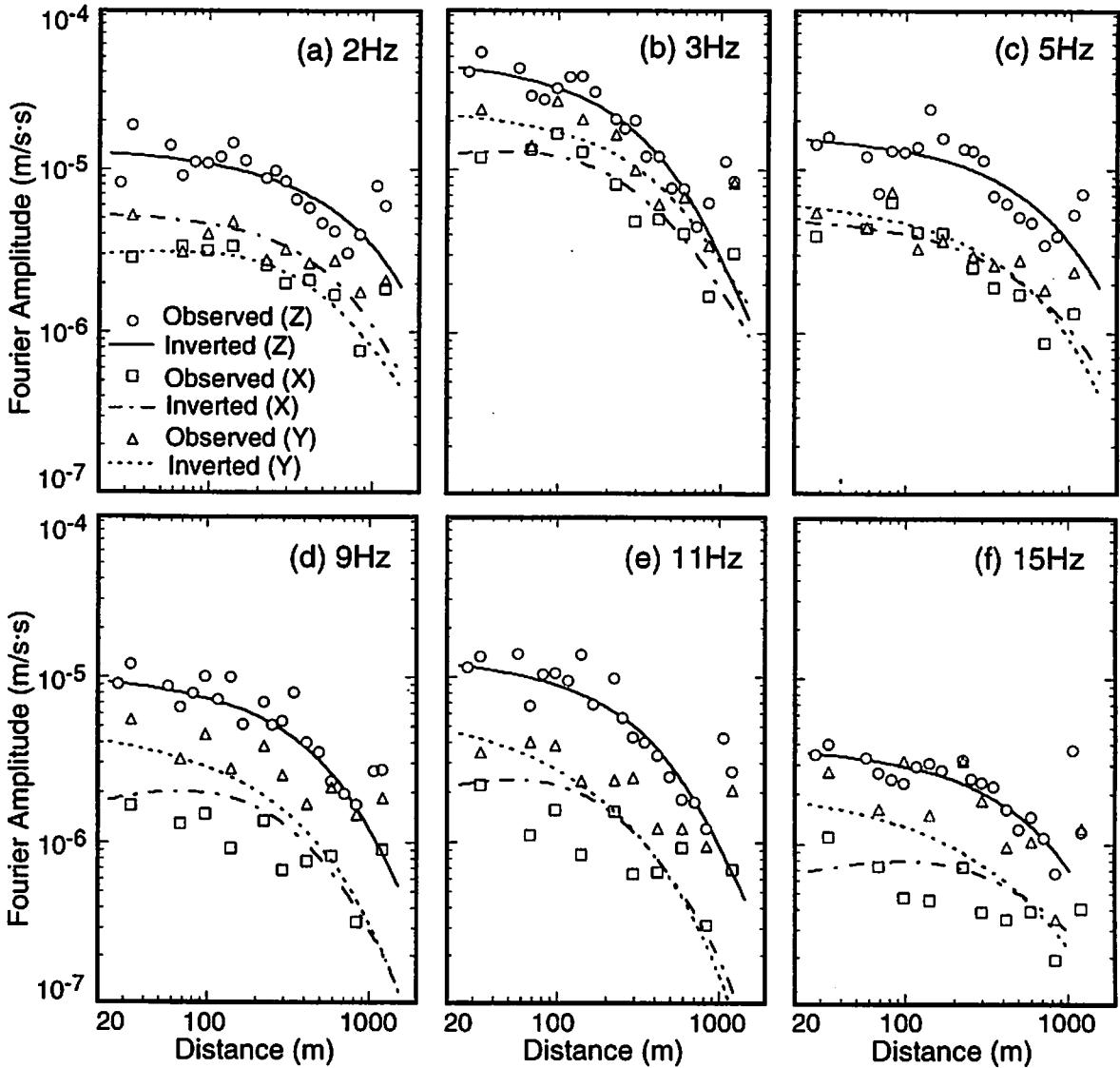


Fig. 5. Attenuation of traffic vibrations compared with those of theoretical surface waves.

いる。多層弾性体上の点加振源から発生する表面波の距離減衰は $r^{-1/2}$ であるが、実体波の距離減衰はこれよりも大きいこと⁵⁾、実地盤では内部減衰が存在することから、計測された距離減衰特性は表面波の距離減衰に地盤の内部減衰が加わったものと考えられる。

4. 距離減衰に基づく加振源スペクトルと減衰定数の推定

4.1 振動源および減衰モデルと表面波の距離減衰式

3章の振動源特定に関する検討から、本研究では、振動源として、主に高速道路を車両が通行する事により高架橋の橋脚を通して地盤上に加えられる力をイメージする。そこで、周波数 f における加振源として、ランダム加振位相を持つ Z、X、Y 方向の地表点加振源(加振力 L_z, L_x, L_y)が高速道路に沿って等間隔 d で並ぶモデルを仮定する(Fig. 6)。地盤は三次元水平成層構造とし、各層の層厚、密度、P 波・S 波速度が既知であるとする。このとき、 i 番目の点加振源(観測点 O との距離 l_i)から伝播する j 次モード表面波の観測点における Z、X、Y 各変位成分のパワーは、Harkrider⁶⁾ および前節の考察を参考に次式で表せる。

$$P_{zzji} = (1/4)L_z^2 E_{R0j}^2 \quad (1)$$

$$P_{zxji} = (1/4)L_z^2(u/w)^2 E_{R1j}^2 \sin^2 \theta_i \quad (2)$$

$$P_{zyji} = (1/4)L_z^2(u/w)^2 E_{R1j}^2 \cos^2 \theta_i \quad (3)$$

$$P_{xzji} = (1/4)L_x^2(u/w)^2 E_{R1j}^2 \sin^2 \theta_i \quad (4)$$

$$P_{xxji} = (1/4)L_x^2[(u/w)^4 E_{R0j}^2 \sin^4 \theta_i + E_{L0j}^2 \cos^4 \theta_i] \quad (5)$$

$$P_{xyji} = (1/4)L_x^2 \cos^2 \theta_i \sin^2 \theta_i [(u/w)^4 E_{R0j}^2 + E_{L0j}^2] \quad (6)$$

$$P_{yzji} = (1/4)L_y^2(u/w)^2 E_{R1j}^2 \cos^2 \theta_i \quad (7)$$

$$P_{yxji} = (1/4)L_y^2 \cos^2 \theta_i \sin^2 \theta_i [(u/w)^4 E_{R0j}^2 + E_{L0j}^2] \quad (8)$$

$$P_{ryji} = (1/4)L_y^2[(u/w)^4 E_{R0j}^2 \cos^4 \theta_i + E_{L0j}^2 \sin^4 \theta_i] \quad (9)$$

ただし、

$$E_{R0j} = A_{Rj}(H_0^{(2)}(k_{Rj}l_i)) \exp(-hk_{Rj}l_i)$$

$$E_{R1j} = A_{Rj}(H_1^{(2)}(k_{Rj}l_i)) \exp(-hk_{Rj}l_i)$$

$$E_{L0j} = A_{Lj}(H_0^{(2)}(k_{Lj}l_i)) \exp(-hk_{Lj}l_i)$$

ここに、 P_{ZX} の添字 ZX は、Z 方向加振源(L_z)から発生・伝播する波の X 方向成分のパワーを意味する。 A はミディアムレスポンス⁶⁾。 (u/w) はレイリー波の地表での粒子軌跡縦横比、 k は波数、添字 R, L はレイリー波、ラブ波を表す。 $H_n^{(2)}$ は n 次第 2 種 Hankel 関数、 h は地盤の減衰定数である。 θ_i は i 番目の加振点から観測点を見上げた角である(Fig. 6)。ここで、各加振源の加振位相のランダム性から、全加振源から到来する波を観測点において重ね合わせた波の Z、X、Y 方向変位のパワー $P_z(f, r), P_x(f, r), P_y(f, r)$ は、Tokimatsu et al.⁷⁾ を参考に次式で表せる。

$$P_z(f, r) = \sum_j \sum_i [P_{zzji} + P_{zxji} + P_{zyji}] \quad (10)$$

$$P_x(f, r) = \sum_j \sum_i [P_{zxji} + P_{xxji} + P_{yxji}] \quad (11)$$

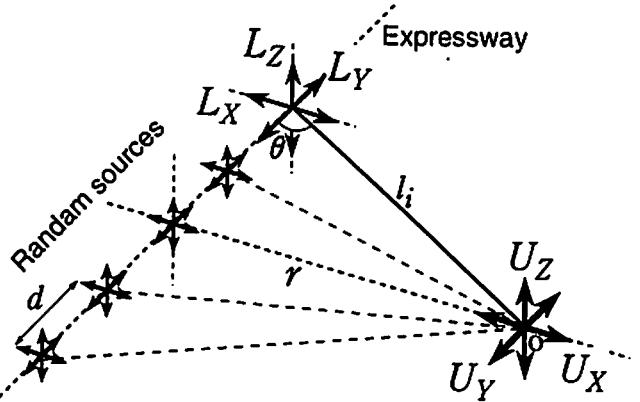


Fig. 6. Inferred source model of traffic-induced vibration.

$$P_r(f, r) = \sum_j \sum_i [P_{zzji} + P_{xyji} + P_{yyji}] \quad (12)$$

速度振幅 $U_z(f, r), U_x(f, r), U_y(f, r)$ に換算すると、

$$U_z(f, r) = 2\pi f [P_z(f, r)]^{1/2} \quad (13)$$

$$U_x(f, r) = 2\pi f [P_x(f, r)]^{1/2} \quad (14)$$

$$U_y(f, r) = 2\pi f [P_y(f, r)]^{1/2} \quad (15)$$

なお、加振源間隔 d は現場の状況から 30 m と仮定する。

4.2 表面波距離減衰の逆解析

各周波数ごとに、(13) - (15) 式で表される理論距離減衰が計測された Z、X、Y 成分の距離減衰と適合するよう最適化を行い、加振力 L_z, L_x, L_y より地盤の減衰定数 h の値を推定する。最適化において最小とすべき評価関数 S は次式とする。

$$S = \sum_i [U_{zc}(r_{zi}) - U_{zm}(r_{zi})]^2 W_{zi} + \sum_j [U_{xc}(r_{xj}) - U_{xm}(r_{xj})]^2 W_{xj} + \sum_j [U_{yc}(r_{yj}) - U_{ym}(r_{yj})]^2 W_{yj} \quad (16)$$

ここに、添字 c は理論値、 m は観測値を表す。また、 W は各成分に対する重みである。本研究では、(16) 式の最適化手法として非線形最小二乗法を用い、試行錯誤により適当な初期値を与える、反復改良を繰り返し、補正量が十分小さくなった時点での解を最終的な推定値とする。

4.3 推定加振源スペクトルおよび減衰定数

Fig. 7 に周波数 2-20 Hz で推定された加振力 L_{ZE}, L_{XE}, L_{YE} を、Fig. 8 に減衰定数 h_E の周波数特性を示す。また、Fig. 5 には、得られた解 $L_{ZE}, L_{XE}, L_{YE}, h_E$ に対応する Z、X、Y 各成分の理論減衰曲線を実線、鎖線、破線で示している。Fig. 5 から、いずれの周波数においても理論減衰曲線は観測減衰曲線の傾向を概ねとらえており、逆解析はある程度適切に行われたと考えられる。ただし、10 Hz 以上の高周波領域や X 成分においては理論と観測の適合度合いが悪い部分も見受けられる。このことは、振源のモデル化および逆解析による推定結果には不確定な部分が含まれていることを示唆している。

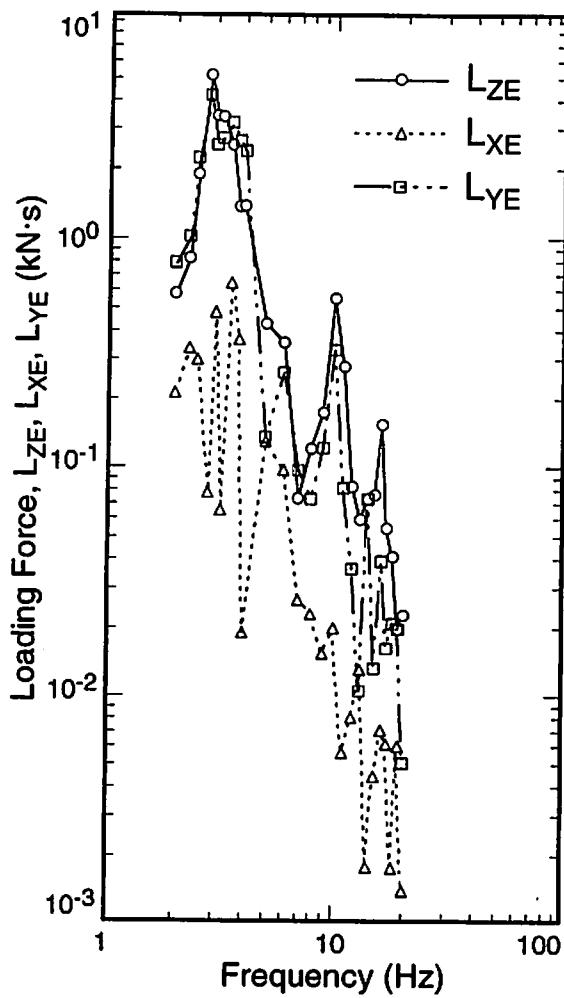


Fig. 7. Estimated loading forces of source.

Fig. 7より、推定加振力スペクトルは、Z、X、Y各成分とも3Hz付近に最大ピークが見られる。また、Z、Y成分には10Hz付近にも比較的明瞭なピークが見られる。ここで、Fig. 4との比較から、Z、Y成分の推定加振力スペクトルの極大または極小となる周波数は、最小振源距離での観測フーリエスペクトルのそれらと概ね対応していることが分かる。また、推定加振力スペクトルのピーク周波数(3Hz, 10Hz)は、既往の研究¹⁰で報告されている各種車両の動的付加荷重および路肩応答のスペクトルのピーク周波数と概ね対応している。ただし、推定加振力スペクトルの10Hzのピーク値は3Hzのそれより1オーダー程度小さな値となっている。

Fig. 9には推定加振力スペクトルの水平鉛直比を示す。ここで、Fig. 7より、いずれの周波数においても L_{XE} は L_{YE} に比べ1オーダー程度小さな値を示していることから、水平加振力として L_{YE} を用いた。Fig. 9から、交通振動源の水平鉛直加振力比は、2-20Hzの周波数帯で0.2-2程度の値をとると推定される。

Fig. 8より、推定された地盤の減衰定数は0.2-3%程度

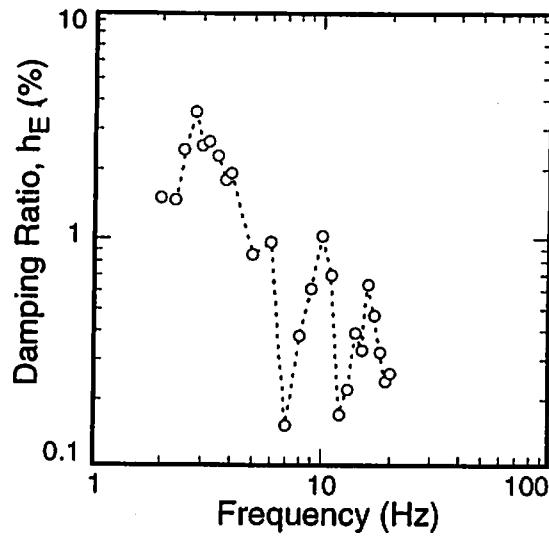


Fig. 8. Estimated damping ratio of soil.

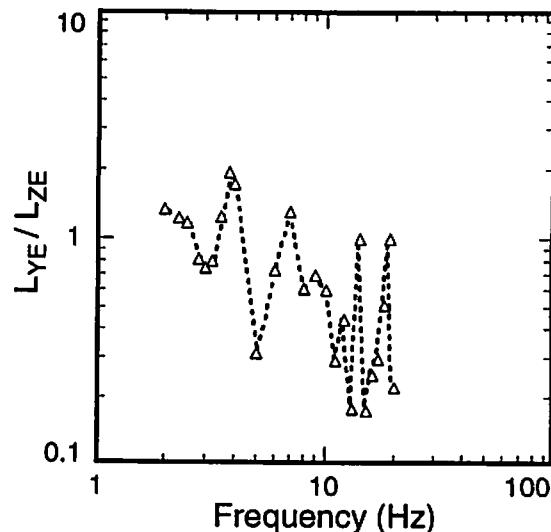


Fig. 9. Horizontal-to-vertical loading force ratio of source.

の値をとり、3Hz付近に最大ピークが認められる。これより、減衰定数と加振力(Fig. 7)および速度振幅(Fig. 4)の間には相関関係がありそうである。そこで、Fig. 10に振源距離 $r = 590\text{m}$ におけるZ、X、Y成分の速度フーリエ振幅値と減衰定数 h_E の関係を示す。図から、各成分ごとに、速度振幅が大きいほど地盤の減衰定数も大きくなる傾向が確認できる。次に、Z、X、Y各方向成分にはそれぞれレイリー波鉛直・水平成分、ラブ波成分が卓越するものと考えて、各成分の速度振幅値から次式によりひずみ量 γ_z 、 γ_x 、 γ_y を推定した。

$$\gamma_z = v_z(f)/V_{RV}(f) \quad (17)$$

$$\gamma_x = v_x(f)/V_{RH}(f) \quad (18)$$

$$\gamma_y = v_y(f)/V_L(f) \quad (19)$$

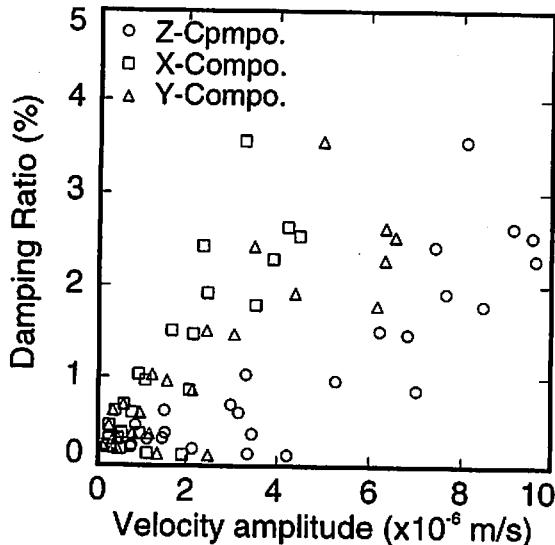


Fig. 10. Correlation between estimated damping ratio and observed velocity amplitude.

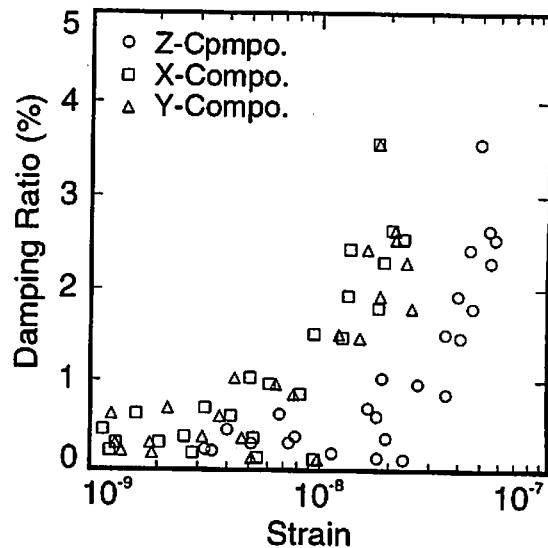


Fig. 11. Correlation between estimated damping ratio and strain.

ここに、 $v_z(f)$, $v_x(f)$, $v_y(f)$ はZ, X, Y成分の速度フーリエ振幅値、 $V_{RV}(f)$, $V_{RH}(f)$, $V_L(f)$ は地盤構造から計算される基本モードから高次モードまでを考慮したレイリー波の鉛直・水平成分およびラブ波の位相速度⁷である。推定されたひずみ量と減衰定数との関係をFig. 11に示す。図より、ひずみレベルは 10^{-9} - 10^{-7} 程度と非常に小さいが、ひずみが大きくなるほど減衰定数も大きくなる傾向すなわち減衰定数のひずみ依存性が認められる。このような微小ひずみレベルにおける土の減衰定数を求めた研究は少ないが、深度5-20m程度で採取した粘土試料の室内ねじり試験から、ひずみレベル 10^{-6} 程度で減衰定数2-3%という値が求められており⁸、推定値はある程度妥当なものと思われる。ただし、以上の結果は、1地点のしかも高速道路の交通振動源のみを対象としたものであること、また加振源モデルおよび逆解析において不確定な部分が含まれることから、今後、更なるデータの蓄積と詳細な検討を行う必要があると思われる。

5. まとめ

振動源が比較的明確な地点において振動計測を行い、直線上に等間隔配置されたランダム点加振モデルを仮定して、距離減衰特性の逆解析から振動源スペクトルおよび地盤の減衰定数を推定し、以下の知見を得た。

(1) 高速道路の交通振動源スペクトルは、2-20Hzの周波数範囲で鉛直・水平成分とも3Hz付近に最大ピークが見

られる。また、振動源の水平鉛直加振力比は、この周波数範囲で0.2-2程度の値をとる。

(2) 地盤の減衰定数は、ひずみレベル 10^{-9} - 10^{-7} 程度において0.2-3%程度と推定され、速度振幅およびひずみ量と正の相関がある。

参考文献

- 1) 西阪理永、福和伸夫: 交通振動問題における車両動荷重特性に関する検討、日本建築学会構造系論文集、491, 65-72, 1997.
- 2) Hanazato, T., Ugai, K., Mori, M., and Sakaguchi, R.: Three-dimensional analysis of traffic-induced ground vibrations, J. Geotech. Engng., ASCE, 117(8), 1133-1151, 1991.
- 3) 福和伸夫、梅村健次、多賀直恒: 等速移動点加振力に対する3次元均質等方弾性体の基本解に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、441, 45-52, 1992.
- 4) 時松孝次、宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文報告集、439, 81-87, 1992.
- 5) 田村修次、時松孝次: 3次元多層地盤上の水平点加振源から発生する実体波の距離減衰、第32回地盤工学研究発表会、I, 859-860, 1997.
- 6) Harkrider, D. G.: Surface waves in multilayered elastic media, Part I, Bull. Seism. Soc. Am., 54(2), 627-679, 1964.
- 7) Tokimatsu, K., Tamura, S., and Kojima, H.: Effects of multiple modes on Rayleigh wave dispersion characteristics, J. Geotech. Engng., ASCE, 118(10), 1529-1543, 1992.
- 8) 沢田健吉、谷口栄一: 地盤を伝播する振動の距離減衰に関する一考察、土木技術資料、19(12), 15-20, 1977.