

高架道路からの交通振動の卓越周波数について

五十嵐亨・畠山秀喜

PREDOMINANT FREQUENCIES OF VIBRATIONS PRODUCED BY TRAFFIC ON OVERHEAD ROADS

Toru IGARASHI and Hideki HATAKEYAMA

Abstract

In this paper, the predominant frequencies of vibrations produced by automobiles on elevated highways observed in the ground near the supporting structures are considered. Two types of predominant frequencies are noted. One type is directly associated with the motion of automobiles. The other type is continuously present, not having a direct correlation with the motion of automobiles.

It was found that the first type of predominant vibration could be accounted for as a system of vibrations with the suspension structure regarded as a single mass point.

The second type of predominant frequencies can generally be explained using the multiple reflection theory of S-waves. It was found that they are what are generally referred to as microtremors.

1 まえがき

自動車の走行に伴って道路周辺の地盤や建物に励起される振動は、道路交通振動と呼ばれている。この道路交通振動に関しては、発生、伝播、減衰機構の解明、予測手法の確立、さらには、振動軽減対策の検討といった広汎な調査研究が、関係各機関において現在進められている。

道路交通振動のうち、高速道路など高架構造物上を、自動車が走行する際に発生する振動の卓越周波数に着目して、検討を行なった結果、自動車の走行によって生ずる卓越周波数のほかに、この周波数帯域より低い周波数のところに、自動車の走行に関係のない卓越周波数があることが判明した。

2 周波数分析方法

交通振動は、図-1に示すような振動補正特性を有する振動レベル計を通して得られる振動レベルと呼ばれる振動量を測定する。そして、その大きさの評価は、原則

として、連続する10分間の記録に基づいて、5秒間隔で読み取られた、約100個の測定値から求められる累積曲線の80%レンジの上端値(L₁₀値と呼ばれている)に依

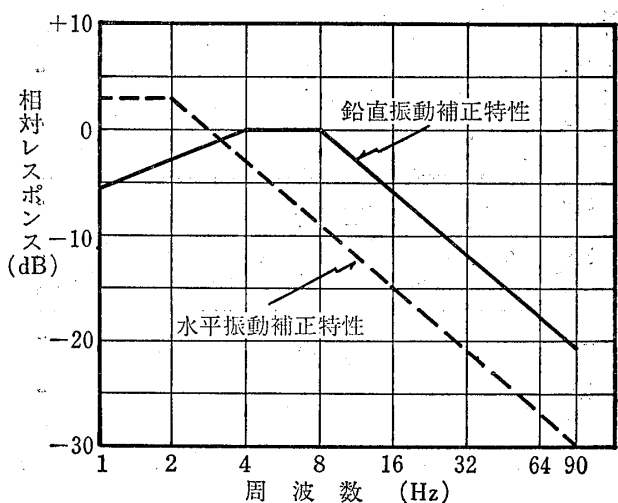


図-1 振動補正特性図
Fig. 1 Frequency response of the vibration level-meter

って行なわれている。なお、人体が鉛直方向の振動に敏感であることから、鉛直振動のみが評価の対象となっている。

測定に当っては、図-2に示すような1~90Hzまでほぼ平坦な特性を有する加速度計を用いた。これは、上記振動レベル計の振動補正特性を除いたときの測定系である。また、交通振動の評価が、現在のところ、鉛直方向の振動でなされていることから、鉛直振動成分を対象とすることとした。

つぎに、対象とすべき周波数領域についてであるが、交通振動の大きさの評価が、振動補正特性による振動レベルによることになっていることから、その補正特性を

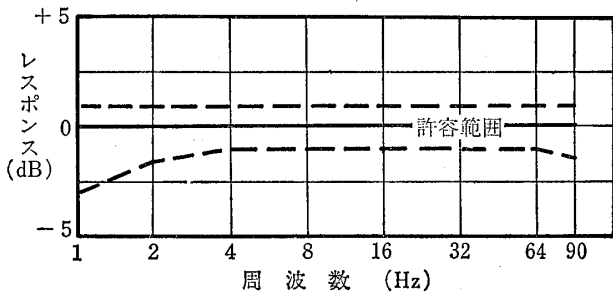


図-2 測定系総合周波数特性図

Fig. 2 Overall frequency characteristics of measurement system

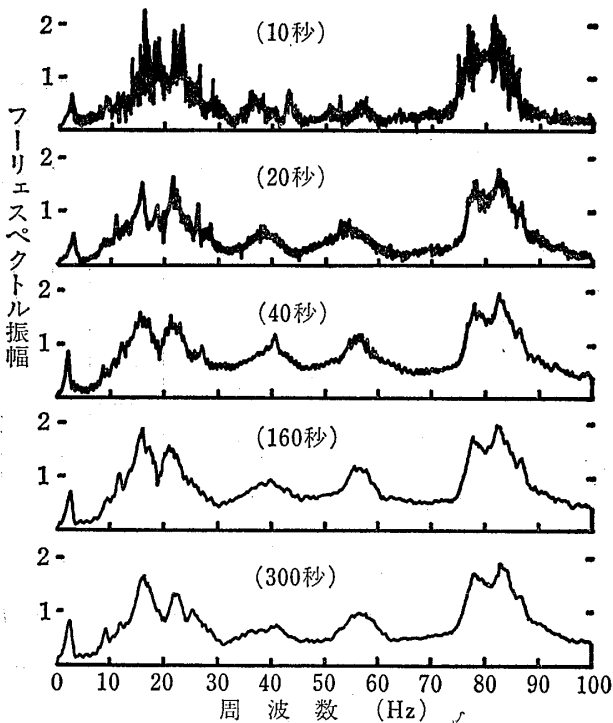


図-3 振動レベルおよび加速度振巾のフーリエスペクトル分析結果

Fig. 3 Fourier spectra of vibration level and acceleration amplitude

通した場合の周波数分析を行なった。その分析結果は図-3に示すとおりであり、加速度の周波数分析結果をも併せて示してある。これによると、図-1の振動補正特性図からも予測できるように、補正特性を通した場合には、高い周波数成分がほとんどみられなくなることがわかった。したがって、周波数分析に当っては、対象とする周波数領域を、図-3下段に示す50Hzまでとした。

また、交通振動の大きさの評価が、約10分間の統計値(L₁₀値)によることになっているので、周波数分析を行なう時間は10分間とした。

分析のための計算は、Y.H.P.社のフーリエアナライザシステム(5451C)を用いた。

無限時間不規則に変動かつ継続する振動波形 $X(t)$ を、有限時間に分割し、これをフーリエ変換して求められる複素フーリエ係数 $(a(\omega) - ib(\omega))$ の $a(\omega)$ および $b(\omega)$ は

$$a(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \cos \omega t dt$$

$$b(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T X(t) \sin \omega t dt$$

であり、フーリエスペクトル $F(\omega)$ は、この複素フーリエ係数とその複素共役値の積の平方根であるので、つぎのように表わされる。

$$F(\omega) = \sqrt{\{a(\omega)\}^2 + \{b(\omega)\}^2}$$

そこで、今回の分析では、まず、記録波形を10秒毎にいくつか分割し、各区分毎にフーリエスペクトル $F_n(\omega)$ を算出し、そのアンサンブル平均

$$\bar{F}(\omega) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N F_n(\omega) \quad N: \text{個数}$$

を求め、これを用いることにした。

3 周波数分析結果

まず、分析時間によって、周波数分析結果に相異が生ずるかどうかを調べるため、記録波形を10秒毎に分割し、1個、2個、4個、16個、30個のアンサンブル平均を求めた。その結果は図-4に示すとおりで、分析時間に関係なく、一定のスペクトルパターンを示していることがわかる。ただし、分析時間が長い程“ゆらぎ”の小さい安定したスペクトルとなっている。したがって、周波数分析の時間を50個、約10分間として、アンサンブル平均を求めることにした。

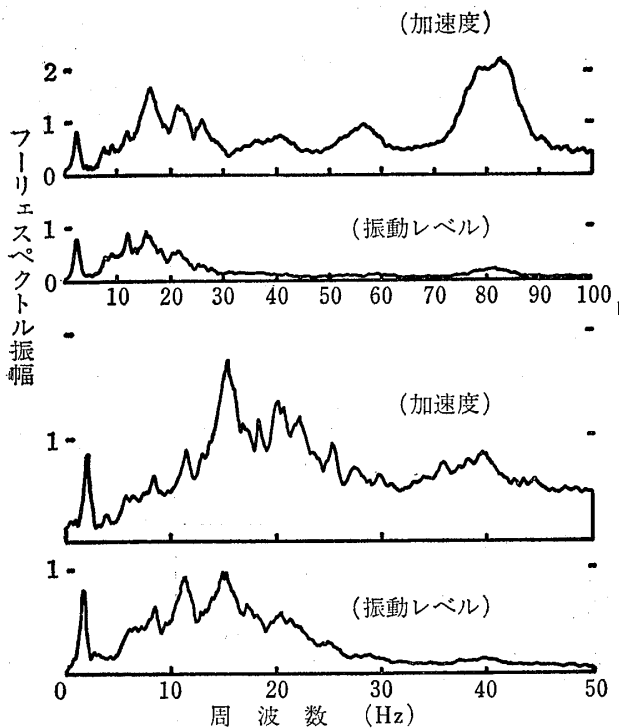


図-4 分析時間によるフーリエスペクトル分析結果
Fig. 4 Fourier spectra according to disparity of analysis times

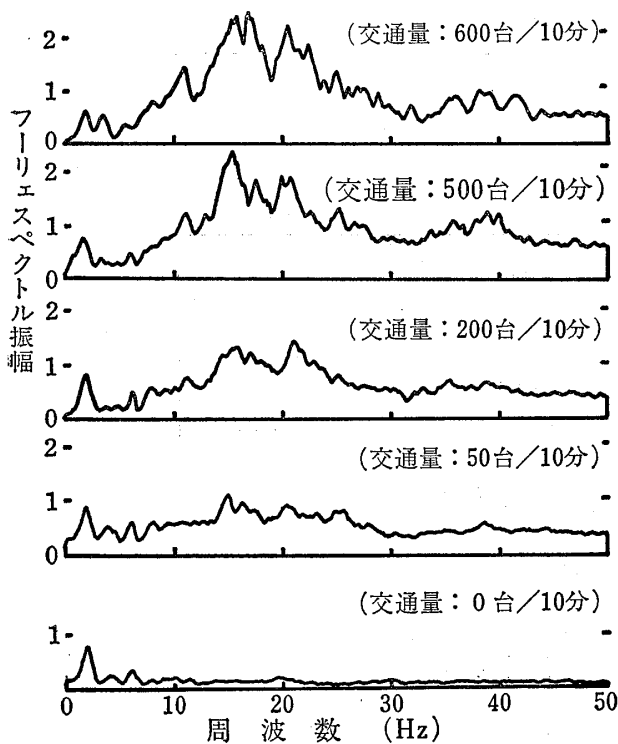


図-5 交通量の違いによるフーリエスペクトル分析結果
Fig. 5 Fourier spectra according to disparity of traffic volumes

上に述べた分析手法は、常時微動の周波数分析と同じ手法であり、上記の結果は常時微動の周波数分析においてみられることであるので、交通振動が、常時微動ならぬ常時振動とでもいべき性質を有していることは興味あることといえる。

交通振動の大きさは、交通量に大きく左右される。そこで、10分間の交通量が、おおよそ600, 500, 200, 50, 0台の場合の周波数分析結果を図-5に示す。この結果によると、交通量が0台のとき（自動車走行の影響のないとき）は別として、いずれの台数の場合においても、2 Hz, 15~20Hz および 40Hz の3個の卓越する周波数が存在することが明らかに認められる。これらの卓越周波数のうち、15~20Hz および 40Hz の周波数のフーリエスペクトル振幅は、交通量が減少するにしたがって、減少してゆく傾向がみられ、交通量が0台/10分のときには、ピークが全くみられなくなる。

これに対して、2 Hzの卓越周波数は、15~20Hz および 40Hzのものにくらべて、フーリエスペクトル振幅はそれほど大きくないけれども、交通量の大小にかかわらず、その振幅の大きさに変化はみられず、交通量が0台の場合にも、同程度の振幅の存在が認められる。

したがって、交通振動によって励起された卓越周波数は、15~20Hz および 40Hzの2種類であって、交通量に関係のない2 Hzの卓越する周波数は、一般に地盤の振動特性を表わす常時微動に相当するものと考えられる。

4 考察

4-1 交通振動と常時微動について

3章に述べたように、交通振動の測定結果の周波数分析によって、自動車の走行によって励起される15~20Hzあるいは40Hzの振動のほかに、2 Hz程度の低い卓越周波数の常時微動が含まれていることが判明した。

図-6~図-10は、地盤条件の異なる高架道路5地点（A地点、B地点、C地点、D地点、E地点）において測定した交通振動について、周波数分析を行なったものである。なお、これらの図の右側には、それらの地点において実施されたボーリングの柱状図を示してある。これによると、沖積層の厚さは、A地点で約2 m, B地点で約6 m, C地点およびD地点で約20mであり、E地点では27m以上である。また、地質柱状図およびN値に基づいて、地盤の各層のS波速度を推定し記入してある。

図-6~図-10において、左側の上段には、高架道路上の交通量が多い場合、中段には、高架道路上の交通量

が零か、あるいは少ない場合の周波数分析結果が示されている。

いずれの地点においても、交通量が多い場合には、10~20Hz 前後に卓越した周波数が認められ、地点によっては、40Hz 付近にも卓越した周波数が存在している。しかしながら、交通量が零かあるいは少ない場合には、上記の卓越周波数に対応するフーリエスペクトル振幅のピークは、消滅するかあるいはきわめて小さくなっている。一方、10Hz 以下の低い周波数部分にみられるピークは、交通量に関係なく存在し、フーリエスペクトル振

幅の大きさは、ほとんど変化しないか、中には交通量が少ない場合の方が大きくなっているものもある。これらの現象は図-5に示したものと同一傾向を示している。

そこで、図-6~図-10の右端に示してある推定S波速度を用いて、S波の重複反射理論によって、それぞれの地盤の理論応答曲線を求めると、それぞれの図の左側下段に示すようになる。

これらの理論応答曲線において、10Hz 以下の帯域にみられる卓越周波数のフーリエスペクトル振幅は最大値を示している。この10Hz 以下の卓越周波数を、実測か

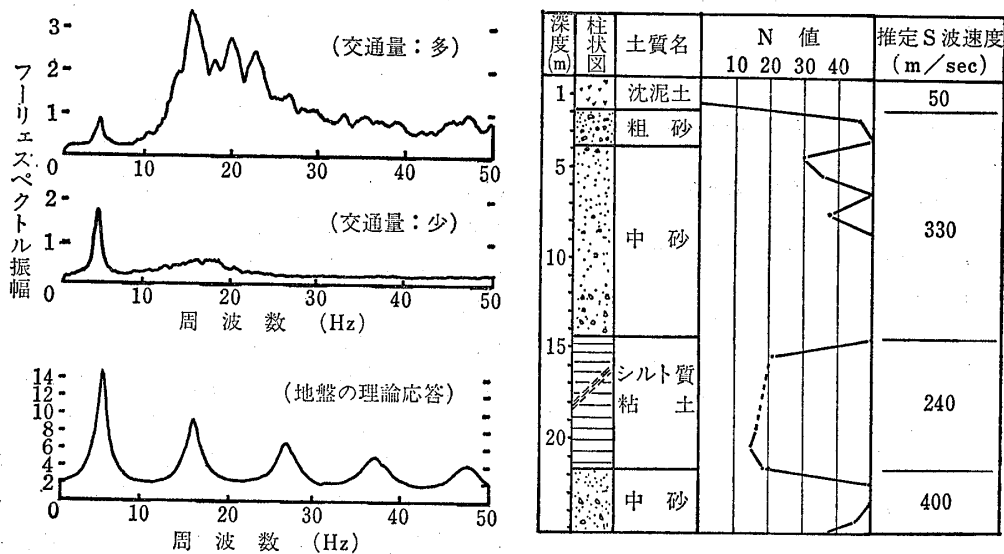


図-6 A地点におけるフーリエスペクトル分析結果と地盤条件
Fig. 6 Fourier spectra at site A and ground conditions

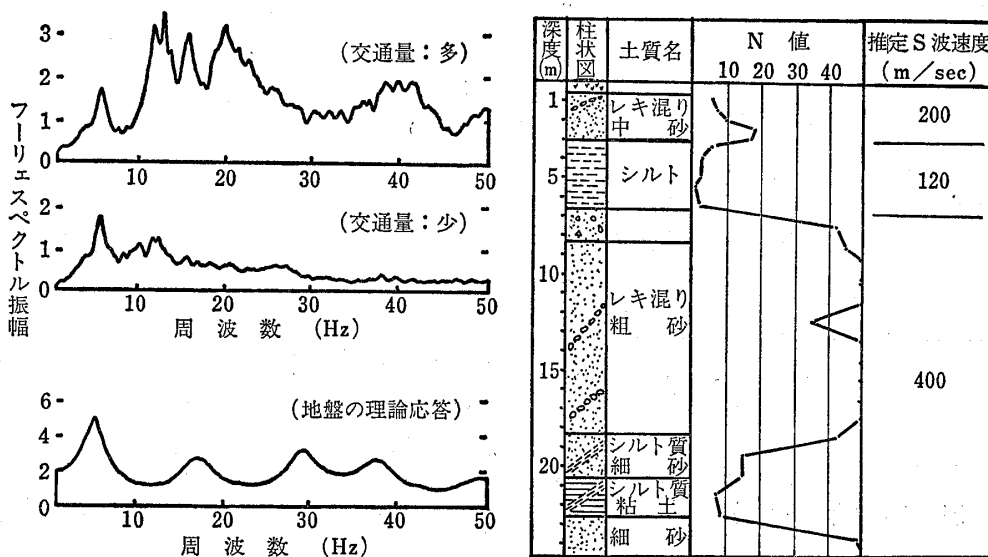


図-7 B地点におけるフーリエスペクトル分析結果と地盤条件
Fig. 7 Fourier spectra at site B and ground conditions

ら求められた結果と比較すると、A地点(図一6)、B地点(図一7)およびC地点(図一8)においては、よく一致する結果となっている。D地点(図一9)においては、一致する周波数が実測されているが、交通量が少ない場合でも、フーリエスペクトル振幅が全体的に大きく、D地点における対象以外の振動源の影響によって、一致する周波数よりも大きい振幅が実測されているものと思われる。E地点(図一10)においては、理論応答曲線の最大値は2 Hz付近にあるが、実測の方には全く現われていない。しかし、前者における第2のピーク

を示す5 Hzのものは、後者の方に明瞭に現われている。

以上述べたように、D地点とE地点の結果は、他の3地点にくらべると、細部においては若干異なる様相を示しているけれども、大局的にみると、交通振動の周波数分析において、5 Hz以下の卓越周波数は、交通振動によって発生したものではなく、地盤固有の振動特性を表わす常時微動に相当するものと考えることができ、高架道路から発生する振動対策を検討する場合には、自動車の走行による影響とは区別して取り扱うことが必要であろう。

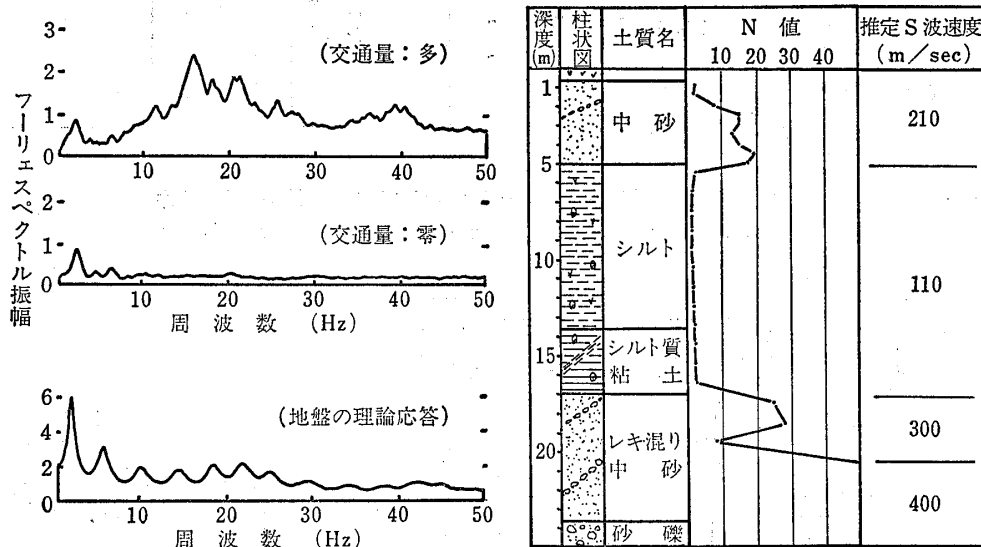


図-8 C地点におけるフーリエスペクトル分析結果と地盤条件
Fig. 8 Fourier spectra at site C and ground conditions

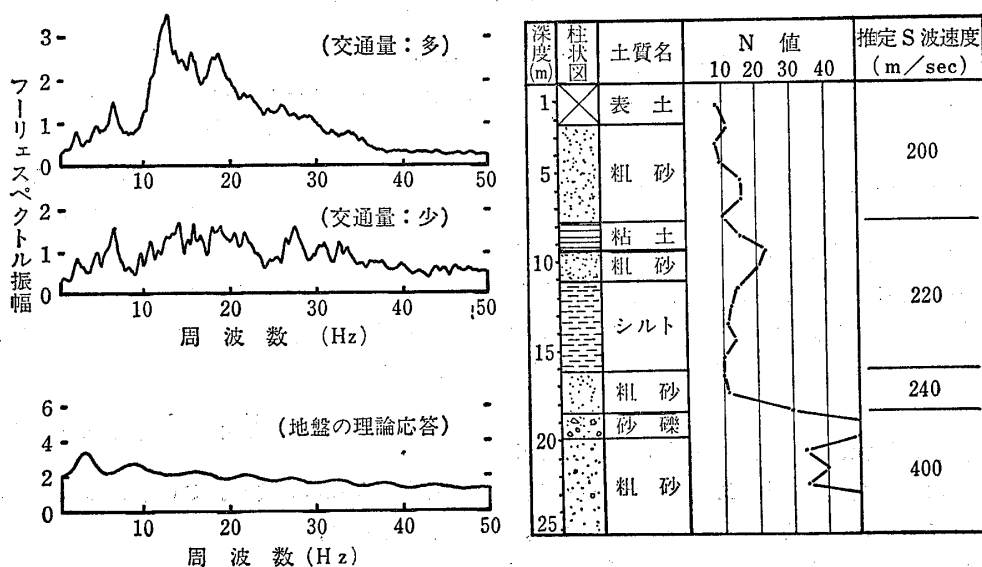


図-9 D地点におけるフーリエスペクトル分析結果と地盤条件
Fig. 9 Fourier spectra at site D and ground conditions

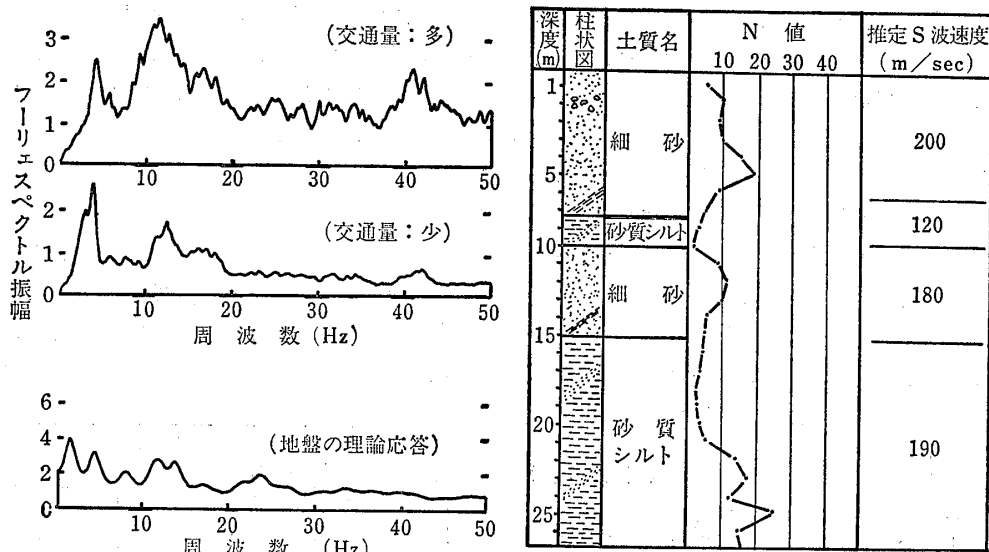


図-10 E地点におけるフーリエスペクトル分析結果と地盤条件
Fig. 10 Fourier spectra at site E and ground conditions

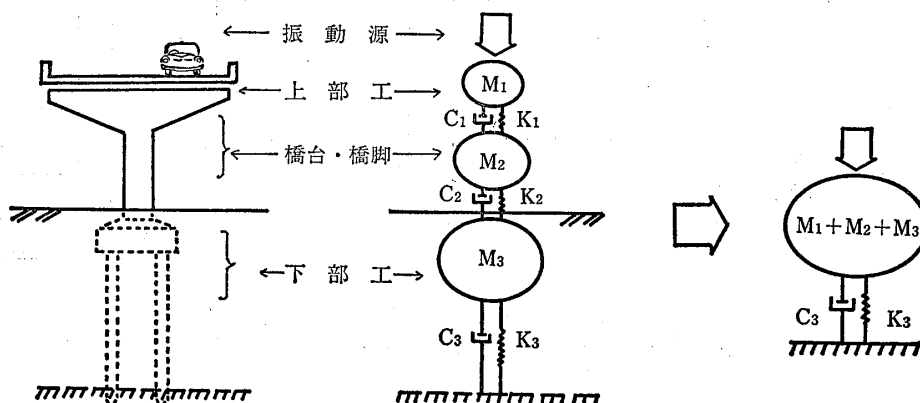


図-11 高架道路の振動系モデル
Fig. 11 Vibration models of the overhead road

4-2 交通振動による卓越周波数の発生機構

高架道路上を自動車が行くときの振動伝播は、自動車が行くことにより振動が発生し、それが路盤などの上部工を揺らし、さらに橋台・橋脚を経てフーチング・杭などの下部工を揺らし、その振動が地盤へと伝播してゆくものとする。

このような振動形態は、図-11の中央部に示すように、質点がバネによって支えられている質点-バネの振動系に置きかえてモデル化することができる。ここに、 M_1, M_2, M_3 は、それぞれ上部工、橋台・橋脚、下部工の重量、 K_1, K_2, K_3 は、それぞれのバネ定数、また、 C_1, C_2, C_3 それぞれの減衰係数を表わす。

ここでは、計算を簡単にするために、上部工、橋台・橋脚、下部工を一体化し、これらを単一の質点にして、図-11の右側部に示すような質点-バネの一質点系のモデルについて考察を行なうこととする。

一質点の振動系における運動方程式は、外力 F_0 が作用する場合、

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_0 \tag{1}$$

で表わされる。また、このときの振動系の固有周波数を f_0 とすれば、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \tag{2}$$

である。すなわち、固有周波数は質量とバネ定数がわかれば求めることができる。

構造物の上下方向の振動特性については、Reissner (1936), 田治見宏 (1968), 山原浩 (1974) などによって、理論的あるいは実験的にその近似解が求められており、最近では、大友ほか (1979) によって、模型地盤および模型構造物を用いた実験が行なわれ、その特性を詳しく調べている。

大友ほか (1979) によれば、バネ定数 K は

$$K = K' \{ 2.2 \times (H/r_0)^{-1.55} + 1 \} \quad (3)$$

$$K' = 7.14 \times r_0 \times G_1$$

で表わされるとしている。

ここに、 r_0 : 円形基礎の半径 (2 B × 2 B の正方形基礎の場合は、 $r_0 = \sqrt{4 B^2 / \pi}$ とする)

H : 表層の厚さ

G_1 : 表層地盤の剛性率

である。さらに、(1) 式あるいは (2) 式の質量 M については、構造物の重量のほか、基礎の半径の長さのフーチング下の地層物質の重量に比例する質量 (付加質量 ma と呼んでいる) を考慮する必要性について述べており、つぎの式を提案している。

$$ma = 1.55 \times \rho \times r_0^3 \quad (4)$$

ρ = 地層物質の密度

また、山原 (1974) によれば、杭基礎の場合には、杭による地盤の補剛効果を 30~50% 見込むことが必要であり、(3) 式中の剛性率は $(1.7 \sim 2.25) \times G_1$ とすることができる。

そこで、図-10に示す E 地点について、(2)~(4)式を用いて固有周波数 f_0 を求めると以下のとおりである。

計算に必要な構造物条件としては、

○上部工重量 : $M_1 = 100$ ton

○橋台・橋脚重量 : $M_2 = 200$ ton

○下部工重量 : $M_3 = 250$ ton

○2 B = 8 m : $r_0 = \sqrt{4 \times 4^2 / \pi} = 4.5$ m

である。

一方、地盤条件としては、図-10の地質柱状図および N 値の変化状況を参考にし、また、サンプルの物理試験結果を用いて、つぎのようにした。

○表層の S 波速度 : $V_s = 180$ m/sec

○表層の厚さ : $H = 23$ m

○地層物質の密度 : $\rho = 1.7$ g/cm³

そこで、(4)式によって

$$ma = 1.55 \times 1.7 \times (4.5)^3 = 240 \text{ ton}$$

であるので、

$$M = M_1 + M_2 + M_3 + ma = 790 \text{ ton}$$

また、剛性率は、

$$G_1 = \rho V_s^2 = 1.7 \times (180)^2 = 0.562 \text{ ton/cm}^2$$

したがって、バネ定数は、

$$K' = 7.14 \times 450 \times 0.562 = 1800 \text{ ton/cm}$$

$$K = 1800 \times \{ 2.2 \times (23/4.5)^{-1.55} + 1 \} = 2100 \text{ ton/cm}$$

これに対して、杭による地盤の補剛効果を考慮すると、

$$G_1 = 0.955 \sim 1.265 \text{ ton/cm}^2$$

$$K = 3600 \sim 4800 \text{ ton/cm}$$

したがって、(2)式から固有周波数 f_0 は

$$f_0 = 10.6 \sim 12.3 \text{ Hz}$$

これは E 地点における構造物と地盤を、一質点振動系という単純なモデル化を行なって求めたものである。

一方、図-10に示すように、E 地点での交通振動による卓越周波数は、11~12 Hz 付近に現われており、計算結果と一致した結果となっている。

5 あとがき

高架道路近傍の地盤において観測された振動の卓越周波数には、2種類のもの存在し、その一つは、自動車の走行に伴って卓越してくる周波数であり、もう一つは、自動車の走行に関係なく、常にほぼ一定の振幅を示す振動の卓越周波数である。後者の卓越周波数は、S波の重複反射理論では説明できる卓越周波数であり、一般にいわれている常時微動に相当する振動の卓越周波数であると考えられる。

また、自動車が走行するときに励起される振動の卓越周波数は、構造物の全体を一質点で置換した単純な振動系として、計算によっても求めることができるようである。

しかしながら、この報文において検討した事例は、その数も少なく、今後とも、この種のデータを蓄積して、道路交通振動の解明に努めていきたいと考えている。

参考文献

- Akamatu, K. (1962) : On Microseisms in Frequency Range from 1 c/s to 200 c/s, Bull. Earthq. Res. Inst. 39 p.23-75
- Aki, K. (1957) : Space and Time Spectra of Stationary Stochastic Wave with Special Reference, Bull. Earthq. Res. Inst. 35 p.456-515

- Allam, A. and E. Shima (1967): An Investigation into the Nature of Microtremor, Bull. Earthq. Res. Inst. 45 p.43-59
- 早川 清他(1978):自動車荷重による地盤の振動に及ぼす地盤条件について 第33回土木学会講演集
- 大場 優他(1978):外力モデルの相違による道路橋の走行荷重応答 第33回土木学会講演集
- 大友秀夫他(1979):剛体の上下振動に関するモデル実験 第14回土質工学研究講演集
- 岡田勝次他(1978):単体橋脚の水平振動に及ぼす根入効果 第33回土木学会講演集
- Reissner (1936):土と基礎の振動 鹿島出版会p.210-230
- 田治見 宏(1968):地震工学, 彰国社 p.53-100
- 山原 浩(1974):環境保全のための防振設計 彰国社