

## 地盤特性と交通振動について

Relation between Ground property and Vibration caused by Traffic

松岡達郎

## Abstract

交通機関等によって惹起される地盤振動は地盤の特性に強く影響される。定性的には地盤が軟弱なほど発生振動が大きくなることが知られている。今回、道路振動と地盤特性の間の定量関係を明らかにするために、ある幹線道路周辺の振動測定と地盤の弾性波探査を行った。その結果、道路振動の速度振幅 $v$ と地盤の横波伝播速度（S波速度 $V_s$ ）との間に $v \propto V_s^{-k}$ （ $k=0.7\sim 0.9$ ）なる関係を得た。

## 1 はじめに

道路周辺地盤の地質条件の差異によって、測定される地盤振動の振幅は明らかに異なる。このような地盤の特性の違いと振幅変化との間に定量関係が求められれば、道路振動の予測ならびに振動障害の対策に有効な手段を得る。両者の間の定量化を実現させるためには、同一振源とみなせる道路構造・走行条件のもとに振動測定を行うこと、および測定地盤の特性を量的に評価することが必要である。前者については例えば走行速度・交通量等の走行条件、車線数・中央分離帯幅等の道路形態、路面の平坦性・舗装版の剛性等の舗装条件等を可能な限り統一して測定を行えばよい。後者の場合、地盤の静的な評価としては、主にホーリング試験・土質試験から得られる地質断面および土質強度、あるいは標準貫入試験のN値等がある。しかしながら道路振動が地盤を媒質とした弾性波動現象であることを考えれば、地盤が固有に持つ横波伝播速度（S波速度）によって評価する方法が最も望ましいと思われる。すなわち地盤を弾性体とみなした場合、S波速度は密度とともに剛性を決定する量であるため地盤の硬さの評価に適し、道路振動との定量評価が行われ易いものと推定される。本稿は道路振動の測定とその地盤でのS波探査から、発生振動の振幅と地盤の硬さの関係について定量化を試みたものである。

## 2 道路振動の測定

## 2-1 振幅に影響を与える因子

道路振動の広義の振源には種々の因子が含まれている。ここでは、それらが振幅に与える影響について検討し、個々の因子に対して同一の条件設定が可能であるかを調べた。

## 2-1-1 道路の平面形態

車線数・中央分離帯幅等の平面形態の違いによって振幅が異なることは十分考えられるが、影響の度合を単独に定量評価することは困難であろう。しかしこれらの平面形態等が等しい測定場所を選択することは比較的容易である。

## 2-1-2 道路の立体的な構造

高架・盛土・切取等の立体構造の違いによって振幅はかなり異なるようである<sup>1)</sup>。高架道路については、さらにスパンの長さ・フーチング・桁構造の違いによって異なるため<sup>2)</sup>同一振源として選ぶことは難しい。そこで高架以外の平面道路を対象とすべきだが、一般に低地では盛土、台地では切取がなされる場合がある。ふつう盛土が切取より振幅が大きいと認識されているようであるか、それは構造の相違によるものではなく、それらの構造が選ばれる地盤条件によるものであろう。したがって一般に平面道路で見られる低盛土・浅い切取については、振幅への影響を考慮する必要はないと思われる。

## 2-1-3 舗装構造

舗装構造による振幅変化はアスファルト系とコンクリート系の相違、舗装版の厚みの差などによるものであ

う。同一条件を設定する場合、前者については比較的容易に行なえるが、後者については厚みが交通量や路床のCBR値等によって決定されるため、同じ道路でも異なることがある。したがって厳密に舗装構造を等しく選定することは困難であるが、とりあえず設計区分の等しい道路を選ぶことによって同一とみなさざるを得ないであろう。

#### 2-1-4 路面の平坦性

路面の平坦性と振幅の関係を取扱う場合、平坦性の評価方法についていくつか提案されている。定量評価の方法としては、プロフィールメーターを使用した凹凸量の測定からその標準偏差を求める方法<sup>(3)</sup>、定常走行する自動車の上下動速度振幅の統計処理によって得られる平坦指数を用いる方法<sup>(4)</sup>などがある。また定性的には観察によって路面の状態を分類し、発生振動との関係を述べた例もある<sup>(5)</sup>。いずれにせよ路面の平坦性のある程度同一条件として設定することは可能である。

#### 2-1-5 走行速度

自動車の走行速度も振幅に影響を与えている。影響の度合は、舗装の良好な道路で速度が10km/h増加すると概略1～3dB増すようである<sup>(6)(7)(8)</sup>。したがって平均走行速度がなるべく等しい時間帯を選ぶ必要があるが、朝夕のラッシュ時以外ではほぼ定常な走行速度が数時間続くようである<sup>(9)</sup>。すなわち渋滞のない・舗装の良好な道路では、走行速度の影響を十分小さく見積ってよいことになる。

#### 2-1-6 交通量

交通量と振幅の関係を述べる場合の交通量のとり方としては、トータル交通量・大型車交通量・小型車の何台かを大型車1台に換算する等価交通量がある。これらのうち振幅の最大値分布との対応が最も良いのは大型車交通量である。したがって、例えば測定振幅の統計処理として最大値に注目すれば、測定時間内の大型車交通量をチェックすることで条件を等しくとることができる。

#### 2-2 測定地盤の選定

測定目的にかなう地盤を、前項の検討にそって次のとおり選んだ。ある1級国道にそって、地形判断から地質条件が明らかに異なると思われる地盤を数カ所選び測定候補地とした。この中から比較的渋滞の起こらないこと、道路に最も近い測定点を中心にほぼ100mの間の路面が観察によって平坦であると認められることを基準としてTable-Iに示す3ヶ所の測定地盤を選定した。この測定地盤に面する道路は、コンクリート舗装で中央分離帯幅が8～11mの4車線平面道路である。また上記測定地盤の1ヶ所で、レーダーによる走行速度の12時間連続測定

を行った結果、小規模の渋滞が発生しても昼間で平均46～51km/h、夜間で50～55km/h程度であった。以上のことから、走行状態に注意すれば、選定された各地盤に面する道路を安定した同一振源とみなすことが可能であろう。

Table-I

便宜的につけた名称	地形	地表付近の地質	道路の構造
硬い地盤	洪積台地	ローム	浅い切取
軟弱な地盤	沖積地(自然堤防)	粘シルト	高さ約2mの低盛土
極めて軟弱な地盤	沖積地(後背湿地)	腐植土	同上

#### 2-3 測定方法

各地盤について道路端からの距離10m、20m、30m、40m、50m、60mの地点で上下動加速度振幅を測定した。(「軟弱な地盤」では現場条件不良のため30m地点までとしている。)測定時間は1時間とし、途中渋滞が発生した場合は再度やり直した。また同時に1時間大型車通過台数を測定し交通量のチェックを行った。使用した測定システムをFig-1に、ピコアップおよびDCアンプの主な性能をTable-IIに示す。測定時においては、振動の主要動を波形記録するために20Hzまたは40Hzのローパスフィルタを使用し、高周波ノイズを除去した。

Table-II

サーボ加速度ピコアップ	
最大測定加速度	±2G
出力電圧	2V/G
周波数特性	DC～500Hz
分解能	5mgal以下
重量	200g
DCアンプ	
加速度測定範囲	0.1gal～1000gal / フルスケール
測定精度	各レンジ・フルスケールの1%まで
周波数特性	1Hz～250Hz (±5%)
フィルタ	ローパスフィルタ カットオフ5.10, 20, 40, 100Hz (-30dB/oct)
出力電圧	±3V (可変)



Fig-1 測定システム

## 2 - 4 測定結果と考察

振幅の統計処理としてペンオシログラフに再生された記録について、毎1分間に発生した最大主要動の振幅と周波数を読み取り、速度振幅換算をした後1時間平均を行う方法をとった。各地盤について整理された速度振幅を距離減衰の形にしてFig- 2 に示す。図から明らかに地盤が軟かいほど振幅が大きくなる。

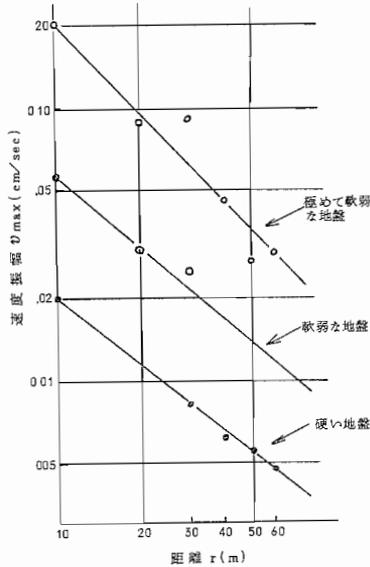


Fig - 2 地盤別の振幅距離減衰

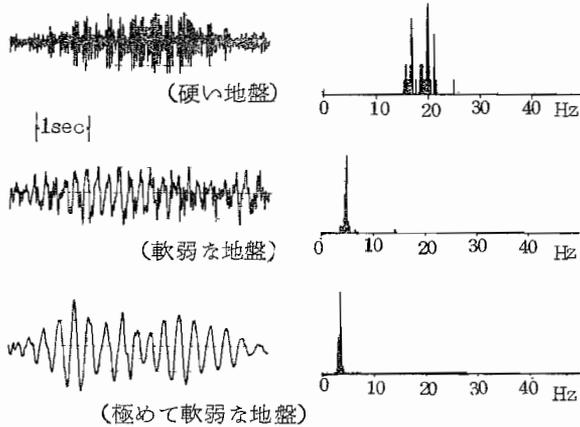


Fig - 3 地盤別の波形記録

Fig - 3 は各地盤に発生した振動波形の一例であるが、地盤の違いによって特徴のある波が発生している。各々の波形記録から読取れる主要動の卓越周波数は、地盤の硬い順に約20Hz、5 Hz、3 Hzである。以上のことから地

盤に発生する振動の振幅と周波数は、その地盤の特性に依存した性質を持つことが推定される。この推定に従うならば、逆に各地盤にはそれらの性質を持った波動を安定して伝え得る媒質が存在しなければならない。

このような推定に基づいて、各地盤で得られた振動のスペクトル分析結果 (Fig- 4、a、b、c) を次のように解釈した。距離ごとに示されたスペクトル分析によれば「硬い地盤」では振源付近の10m 地点において比較的高い周波数 (24~30Hz) が残っているものの、遠方 (30m 地点) まで約20Hzの成分が安定して伝わっていることがわかる。したがってこの地盤ではかなり硬い媒質が水平方向に連続しているものと思われる。また10m 地点ではほとんど目立たない12Hz前後の成分が、20m、30m 地点で明瞭に現れることから、前述した媒質より軟かい別の媒質の存在も予想できるが、この媒質による発生振動の性格づけは極めて弱いものである。「軟弱な地盤」では約5 Hzの波が遠方まで伝わっていることが示されているが、振源付近でそれより高い成分が広い周波数範囲 (10~20Hz) に存在している。20m、30m 地点ではそれら高い成分がかなり減少しているものの、12Hz前後の成分は特に30m 地点でよく目立っている。このことは5 Hzの波を安定して伝える媒質の他に、それより硬い媒質の存在も予想される。また振源付近にほとんど存在しない3 Hz、4 Hzの成分が20m、30m 地点に現れることから、もっと軟かい媒質が存在する可能性もあって、この地盤は非常に複雑な層構造を持つものと思われる。しかしながら5 Hzの波を伝える媒質以外のものは安定した波を伝えるとは言えない。「極めて軟弱な地盤」についても1成分 (約3 Hz) のみが安定して伝わっていることがわかる。前述の各地盤と同様に振源付近では高い周波成分が存在するが、前二者と比較してその割合は非常に小さく20m、30m 地点ではほとんど現れない。すなわちこの地盤の性質は極めて特徴的なひとつの媒質によって支配され、他の媒質の影響がほとんどないことを示している。

以上のように解釈されたスペクトル分析結果とFig-2 に示された主要動振幅の傾向は、地盤に発生する振動の振幅・周波数がその地盤に存在する特徴的な媒質に依存するという推定に対して、ある程度の根拠を与える。

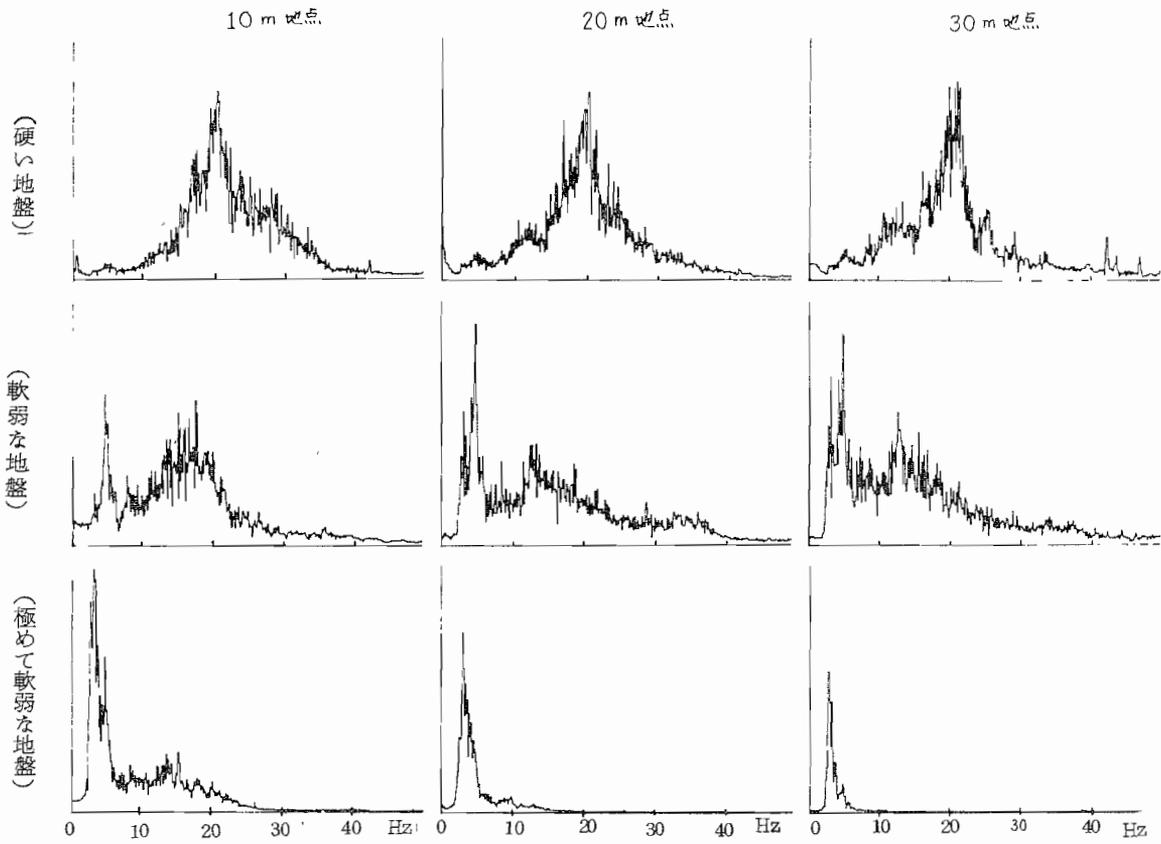


Fig-4 各地盤で距離ごとに得られたスペクトル分析結果

### 3 測定地盤における弾性波探査

#### 3-1 探査方法と解析結果

前項において推定された媒質の存在を確認するために各地盤について弾性波探査を行った。地盤探査にはその目的に応じて種々の方法があるが、ここでは地盤の硬さ(剛性)を示すS波によって地下構造を推定することが最も妥当であろう。測定にはFig-5に示したような、一般の屈折法弾性波探査に用いられるシステムを使用した。振源は板タキ法によるSH振源を用い、ピック間隔 $\Delta = 2\text{m}$ 、1展開(spread)を12成分として、2 spreadの測線長をとった。この測線を振動測定時の測線にほぼ平行してとり、正逆(normal, reverse)両方向の記録を得た。Fig-6に測線配置等を示す。

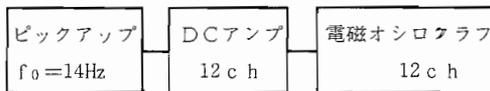


Fig-5 測定システム

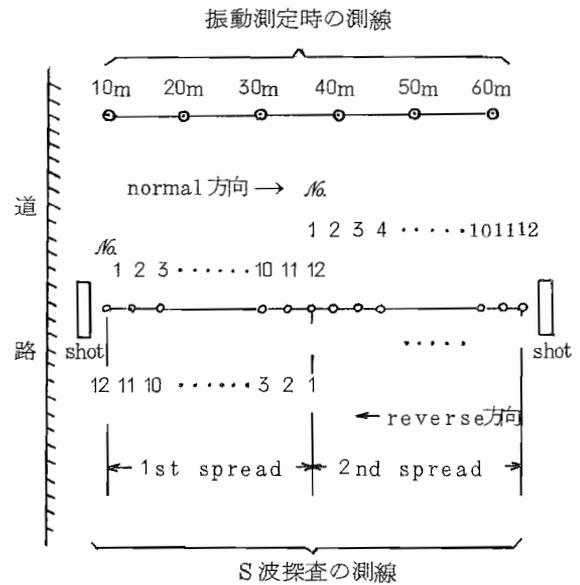


Fig-6 測線配置

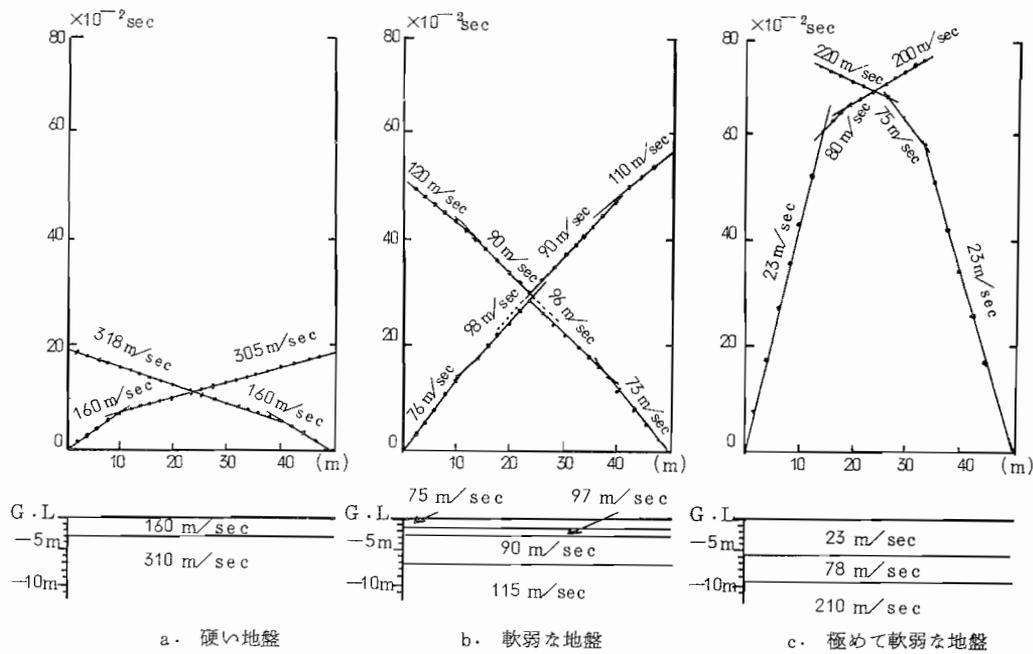


Fig-7 測定地盤における弾性波探査結果

Fig-7、a、b、cは記録から得られたSH波の走時曲線（上段）と解析によって推定されたS波速度断面である。走時曲線から明らかに、正逆両方向のS波速度（ $V^+$ 、 $V^-$ ）は各層とも大きな差がないため、 $V = (V^+ + V^-) / 2$ の平均速度を持つ平行層として計算している。またbの「軟弱な地盤」には低速ハサミ層があって、一般に屈折法では解析不能となるが、記録に3・4層目からの屈折波が現れていたため、層の厚みを仮定したpath計算を用いて解析した。速度断面図によればaは典型的な洪積台地であることを示し、表層にローム、2層目に砂礫層の存在が推定できる。一般にこの地域のローム層は厚さ約5～6mであるが、たまたまこの地盤は広い面積にわたって人為的に2～3m程削られていたため、ここでは厚さ3mという結果が出ている。bは腐植土・粘土、細砂混り粘土などを思わす低速度層の互層である。cは表層の超低速度層が特徴的な地盤で、これは腐植土層の中でも極めて軟弱であることを意味する。現在までに公害センターで行われた探査例のうち腐植土層のS波速度はほぼ30～50%secを示しており、今回は最低速記録を得たことになる。また2層目は粘土、3層目は砂層であろう。

### 3-2 地盤のS波速度と道路振動との関係

探査によってあきらかにされた地盤の各S波速度層のうち、地盤に発生した振動の振幅・周波数に強い影響を及ぼすと思われる媒質を次のようにあてはめた。その際に、①表層・第2層等比較的地表に近く、②波を伝えるのに十分な厚みを持つことを基準として、主に主要動の

卓越周波数との関係も考慮した。「硬い地盤」は前述したとおり砂礫の上に比較的薄いローム層をかぶった台地である。一般に厚いローム層上で得られる道路振動の卓越周波数は、種々の測定例から10～15Hzが顕著である。したがって、この地盤で得られた20Hzの波は、表層のロームが薄いことも考慮して、310 m/secのS波速度を持つ2層目の砂礫層に支配されたものと考えられる。「軟弱な地盤」では地表に近い75 m/sec、97 m/secの層が極めて薄く、5 Hzの波を安定して伝えるのに十分な媒質とするのは困難である。したがってここでは90 m/secのS波速度を持つ3層目とするか、あるいは2、3層の物性の違いはほとんどないとして（S波速度が極めて接近している）、これを単一層と考えるのも良いかもしれない。「極めて軟弱な地盤」では23 m/secのS波速度を持つ表層が十分な厚みを持ち、測定された振動のスペクトルも3 Hzの単一成分のみであることから、この層が強い影響を与えるものと考えられる。

以上のように推定された各地盤の媒質のS波速度 $V_s$ （硬い順に310 m/sec、90 m/sec、23 m/sec）とその地盤で測定された道路振動の主要動速度振幅 $v_{max}$ との関係をFig-8に示す。振幅はFig-2の距離減衰であてはめた直線上の値を用いている。振幅とS波速度の組合せが少ないが、両者の間には、

$$v_{max} \propto V_s^{-k} \quad (K > 0)$$

なる関係が認められた。kは道路端からの距離によって異なり、今回の例では $k \approx 0.7 \sim 0.9$ であった。

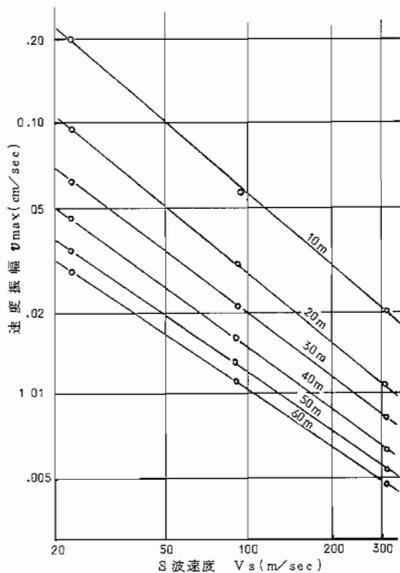


Fig-8 振幅とS波速度の関係

#### 4 結語

地盤に発生する振動の性質が地盤の特性に依存するという観点から、特性の異なる地盤において発生する振動の振幅を、その地盤の代表的なS波速度によって定量化することを試みた結果、

- (1) 振源の条件を可能な限り等しくして測定された道路振動の速度振幅は、洪積台地、沖積低地（自然堤防・後背湿地）で明瞭に異なり、地盤の硬さとの対応が認められた。
- (2) 各地盤で発生する主要動の卓越周波数も同様な対応が認められ、地盤の硬さの順に約20Hz、5 Hz、3 Hzの波が振源付近から遠方まで安定して卓越した。
- (3) S波による弾性波探査によって、各地盤には前述の特徴的な波を安定して伝え得る媒質の存在が確認された。
- (4) 媒質の剛性を決定するS波速度Vsと道路振動の速度振幅vmaxとの間に、 $v_{max} \propto V_s^{-0.7 \sim -0.9}$ なる関係が求められた。すなわち、地盤に発生する振幅は地盤が軟弱なほど大きく、定量的には媒質のS波速度の逆数にほぼ比例して増大することが示された。

本研究は極めて少ない測定例であるが、地盤特性に対する振幅の定量評価にひとつの方法を提出した。しかしながら特に地盤振動の性質を形成するメカニズムについては、まだ多くの疑問がある。例えば今回測定された振動のスペクトル分析には、外力として一般に説明される

自動車の車体共振の性質（例えば大型トラックのバネ下共振が10Hz前後）は認められないが、また一方、主要動の卓越周波数も重複反射理論から求められる表層の固有周波数（例えば「極めて軟弱な地盤」で1.25Hz）と一致してはいない。このことは地盤振動の性質を決定する上で、振源付近の伝達系（舗装版—路床系）の影響が無視できないことを意味している。今後は測定例を増すとともに、舗装版—路床系の特性についても十分検討する必要がある。

なお、本研究遂行にあたって、特にS波探査の測定・解析に御指導いただいた埼玉大学工学部毎能輝記助手に対して厚く御礼申し上げます。

#### 引用文献

- 1) 建設における地盤振動の影響と防止、小林芳正、鹿島出版会
- 2) 高架構造物および地表面の振動測定、梶垣心一、土木技術Vol. 26, No 4
- 3) 環状7号線の周辺地域に対する交通振動防止、東京都建設局、道路 S 49
- 4) 交通車両による振動防止対策、施工技術、6—6 S 48
- 5) 走行車輛による神戸市南沿道の振動（第1報）、畑中元弘、建設工学研究所報告、No10、S 42
- 6) コンクリート舗装版の振動ならびに応力測定、同第2報、畑中元弘他、建設工学研究所報告、No 1 S 35、No 5 S 39
- 7) 自動車走行時における地面振動の測定、五反田哲郎、藤本茂夫、日本音響学会講演論文集、S 48
- 8) 中央公害対策審議会専門委員会資料、警察庁交通局、振動規制技術マニュアルに引用
- 9) 前掲3)