

表面波を利用した地盤調査法

松岡 達郎

要 旨

ハンマーなどによる打撃や重錘落下などの衝撃振源によって発生する表面波の位相速度を測定し、地盤の速度構造を推定する方法の実用性について検討した。

その結果、高い再現性を得る衝撃振源を採用し、位相差測定時のS/Nの改善や位相曲線の平滑化処理を行うことにより、地下の速度分布（分散曲線）が容易に求められることが判明した。

また、幾つかの測定事例について、分散曲線と地盤構造との対応関係を考察し、振動公害のための地盤調査法として利用できることを示唆した。

1 緒 言

振動公害は常に地盤とのかかわりをもつ。道路交通振動を例にとると、車両や走行条件等の加振力特性が等しくても、地盤が変われば測定される振動のスペクトル分布が様々に異なることは、良く知られている。したがって、地盤振動を測定する場合、同時に地盤の状態をなんらかの方法で調査し、測定値との因果関係を量的に求めることが望ましい。

通常的地盤調査としては、ボーリングや標準貫入試験などにより地質柱状図及びN値などを得る方法が、最も一般的である。しかしながら、このうち前者は地盤の地質構成を正確に把握するものであるが質的であり、後者は量的であるものの、本来は土質静力学的な指標を得るものであるため、地盤振動のような波動現象に直接利用することは適切でない。さらに、これらの調査は装置や経費の面で、地盤振動の測定者が同時に実施することが極めて困難である。

このような問題を解消し得る地盤調査法のひとつに弾性波探査がある。これは、人工地震によって発生するP波やS波などの実体波を用いて、地下の速度構造を推定するものである。筆者は先に、地質構成の異なる地盤で道路交通振動の測定とS波による弾性探査を実施し、道路交通振動の速度振幅とその地盤のS波速度との間に定量関係が得られることを示した¹⁾。しか

しながら、弾性波探査（特に、屈折法）は数10～100 m程の測線長が確保できる調査場所を必要とするため、多くのデータを収集することが困難である。また、探査には専用の計測システムを使用することもあって、振動公害のための地盤調査法としては、現在までに必ずしも一般化されていない。

Stokoe and Nazarian²⁾は最近、ハンマーなどで地表を打撃することによって発生する表面波（レーレー波）の位相速度を、2個の振動ピックアップ間のクロススペクトルから算出し、位相速度の波長に対する速度分布（分散曲線）を求め、液化化地域の地盤調査などに利用することを試みている。この方法はピックアップ間距離が数m以内と短く、計測システムも2ch-FFTアナライザと振動計だけの簡単な構成であるため、振動公害の分野にも利用しうるものと考えられる。しかしながら、これまで報告されている調査事例は極めて少なく、測定方法自体も確立されていないため、現在ではまだ研究段階であると言えよう。

そこで、表面波による探査法（以下、表面波法という）の実用化を図るために、Stokoeらの方法に検討を加え、種々の地盤で多数の実験を行った。その結果、深さ10～40mまでの地下構造に対応する分散曲線が、比較的容易に得られることが判明した。本稿では、はじめに、筆者が用いた探査方法を紹介し、次に、幾つかの地盤で得られた探査結果について、地下構造との

関連性を中心に考察する。

2 探査方法

2・1 振源

表面波法では探査深度が波長に比例する。すなわち、相対的に言って地表付近では短波長（高周波数）の波を、深部では長波長（低周波数）の波を使用する。そのため振源は探査深度によって変える必要があり、浅部にはハンマーなどによる打撃、深部には重錘落下などの方法が用いられる。これらによって発生する表面波の周波数範囲は地盤によって異なるが、普通の沖積地盤ではハンマーの場合およそ20-200Hz、重錘落下の場合およそ3-50Hz程度となる。

ハンマーは頭部重量0.5-1kgのもので良く、地表から20cmほどの高さから自由落下させる程度の弱い力で打撃する。重錘落下の場合、一般には重りの重量が大きいほど長波長の波を発生させやすいが、人力投下では20kgを1m高さから投下するのが限度である。これには砂袋を使用する方法が最も簡便で、条件が良ければ最大30-40m程度の波長（周波数5-6Hz）の波を発生させることができる。

しかしながら、人力では投下のタイミングや着地場所を一定に保つことが困難で、波形の再現性が必ずしも良くない。これは後述するアペレーシクにとって不利な条件となる。さらに、より長波長の波が必要な探査には加振力が不足する。Stokoeはそのため、標準貫入試験用の重りなどを利用しているが、動力などの装置が必要となり、簡便性が失われる。

そこで、筆者は図1に示す簡易な投下器を作成した。これは、アルミ製脚立にチェンブロックを取り付け、スプリングで開放されるフックにより重りを切り離すようにしたものである。また、重りもゴムボールに小鉄球（パチンコ玉）を充填したものとした。この重りは落下中ある程度の球形を保ち、地表面に衝突する際に変形しながら力を伝えるため、力の作用時間が若干長くなる。その結果、同じ重量でも他の変形しにくい重りに比べて、低周波数側の加振力が増加した。これらの改善により、20kgの重量でも、地盤によっては80m以上（周波数3Hz以下）の長波長の波が得られるようになった。

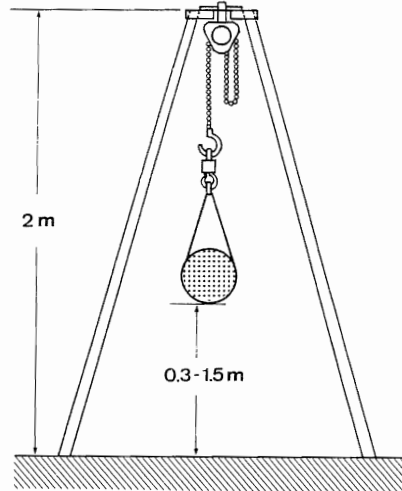


図1 重錘落下振源（投下器）

2・2 フィールドにおけるデータ収集

表面波の位相速度を算出するためには、適当な間隔で設置したピックアップ間を伝わる波の位相差を求める必要がある。そこで、図2に示すようなシステムを用いて、加速度波形をFFTアナライザに取り込む（図3）。これを同一の測定条件で8-16回繰り返してスペクトルアペレーシクを行い、クロススペクトルやコヒーレンス関数の計算などの一次処理を実行する。クロススペクトルは後の位相特性の算出のために、また、コヒーレンス関数はフィールドでの信号評価とともに後の解析周波数範囲の決定のために、各々フロッピーディスクに収納される。

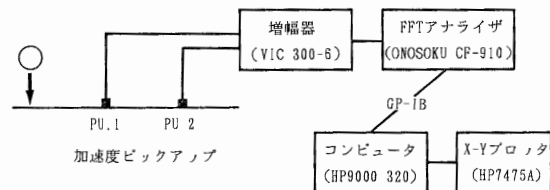


図2 計測システム

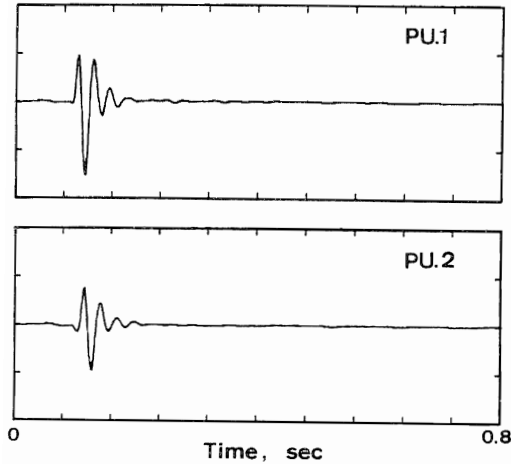


図3 加速度波形

ある条件での測定結果の良否はコヒーレンス関数によって判断する。コヒーレンス関数は周知のとおり信号間の関連度を表すものであり、コヒーレンスが1に近い程高いS/Nで測定されたことを意味する。図4・aは比較的良好な測定結果であると判断されるコヒーレンス関数の一例である。この例では15Hz付近から、周波数が低くなるに従ってコヒーレンスが低下してくるが、工学的にはコヒーレンス0.8-0.9以上を有効であるとみなせるので、5-7Hzから50Hzまでの広い周波数範囲のデータが利用できる。一方、図4・bの場合、一部の周波数ではコヒーレンスが高いものの、測定周波数範囲の全般にわたって不規則に低下しており、不良なデータである。

コヒーレンスの低下の主な原因としては

- ①加振力不足
- ②波の再現性不良
- ③不適切なピックアップ間距離

などが考えられる。①、②は前述したように、人力加振時に起こりやすく、投下器を使用すればかなり改善される。一方、③については、一般に距離が長くなるほど波の空間的な相関性が失われることから、ピックアップ間距離を短くするほうが有利である。しかしながら、逆に距離が短くなるほど位相差の測定精度が低下するため、探査深度(測定波長)に応じてピックアップ間距離を選択する。実際には振源を目安に選択するが、これまでの実験ではハンマーで0.5-1m, 重錘落下で1-4mが適当である。

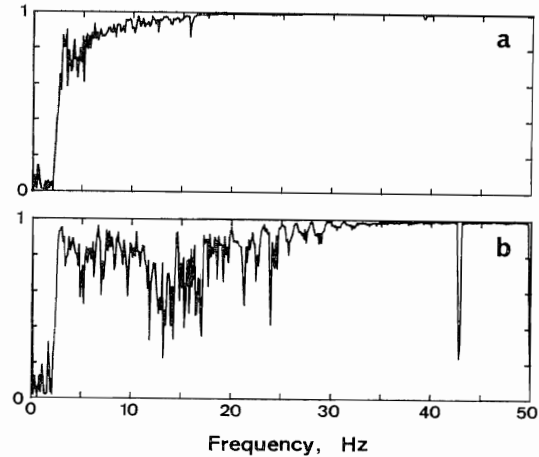


図4 コヒーレンス関数によるデータ評価

a : 良 b : 不良

2・3 解析

フロッピーディスクからクロススペクトルの実部 Re 、虚部 Im を読みだし、ピックアップ間を伝わる波の位相差 θ を

$$\theta = \tan^{-1}(Im/Re) \quad (1)$$

によって求める。この操作は通常のFFTの位相情報が $\pm 180^\circ$ の範囲でしか提供されないために行うもので、クロススペクトルの回転ベクトルの位置を判断しながら、 θ がリーマン面の別葉に移るようにして、 $+90^\circ-1000^\circ$ の任意の範囲で位相差の連続する値を計算する。この結果は、コヒーレンス関数から解析対象として有効であると判断される周波数範囲(図4・aの例ではコヒーレンスが連続して0.8以上となる5-50 Hz)について、位相曲線の形で表示される(図5)。

なお、このように実測される位相曲線には、主にFFTのクロススペクトルの演算精度に起因するとみられる、微少なバラツキが現れる場合がある。このバラツキは場合によって、後述する分散曲線中に不自然な速度変化を引き起こすため、測定値を移動平均して位相曲線を平滑化する(図5)。

位相速度 V_{ph} (m/sec) はピックアップ間距離 x (m)、周波数 f (Hz)、位相差 θ (deg.) を用いて

$$V_{ph} = 360 \times f \times x / \theta \quad (2)$$

によって求められる。一般の分散曲線は周波数に対す

る位相速度表示となるが、表面波法では地下の深さ方向の物性との関連性を求めるために波長 $L_{ph}(m)$ を

$$L_{ph} = V_{ph} / f \quad (3)$$

によって求め、波長-位相速度表示とする。

さらに、現実に測定結果を地盤調査に利用するためには、深度-位相速度の関係が必要になる。しかしながら、分散性レーラー波の位相速度が地下のどの層の物性に支配されるかを理論的に検討することが困難であるため、多くの実験結果から経験的に得られた波長と深度との関係を利用する。すでにHeukelom and Foster³⁾, Fry⁴⁾らは起振器を用いた表面波探査(定常振動法)により、1/2波長深さの深度-位相速度関係が地質断面によく対応するとしている。また、Stokoeらも、おおむねこれに従っている。そこで、筆者も今回の実験においては、1/2波長深度を採用し検討を加える。

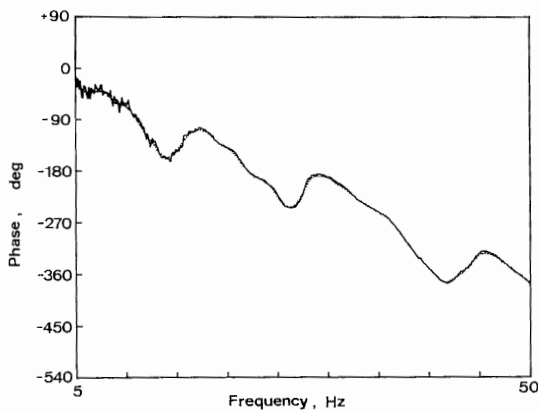


図5 位相曲線とその平滑化処理

3 探査例

3・1 洪積台地の場合

比較的単純な2層構造で各層の物性が明瞭に異なると推定される地盤を選び、実測される分散曲線と地質断面との対応について検討した。

図6・bに、測定場所のボーリング調査による地質断面とN値を示したが、良く締まった洪積砂レキの上にロームが堆積する単純な2層構造とみなすことができる。

振源にはハンマーと20kgの砂袋を使用した。ピックアップ間距離はハンマーの場合0.5m,砂袋の場合1m

とした。各振源とも8回のアベレージを行い、有効周波数範囲30.125-175Hz(ハンマー)及び13.625-50Hz(砂袋)のデータが得られた。これによる測定波長は、約0.5-3m(ハンマー)及び2-20m(砂袋)であった。

図6・aは、このようにして各振源ごとに得られた分散曲線を合成したものである。図の縦軸には波長とともに、Heukelomらにしたがって深度を1/2波長で表している。図から、この分散曲線は波長7m(1/2波長深さ,3.5m)付近の不連続な部分を境に、速度分布の傾向が明らかに異なることがわかる。すなわち、全体としては波長が長くなるに従って位相速度が増加するが、上部では増加率が一定していない反面、下部は波長に対して単調に増加する。これは、比較的軟らかで不均質に堆積するロームと、均質に締まった砂レキの特徴に対応するものと考えられる。また、分散曲線の不連続部分は、これらの境界面に一致している。

さらに詳細にみると、図の分散曲線は波長1m付近と16m付近にも不連続部分があって、これらは各々盛土境界及び砂レキ層下部のN値の低下部分(風化レキが主体になっている)に対応している。したがって、この探査例では1/2波長を深度に仮定した分散曲線が、地質断面を良く表しているものといえよう。

3・2 沖積低地の場合

地盤の各層の物性の差が必ずしも明瞭でない場合の分散曲線の挙動を知るために、後背湿地性の沖積地盤で探査を実施した。図7・bはボーリング調査結果であるが、粘土や細砂からなる軟弱地盤で、全体として探査目的に適う条件であることがわかる。

振源には20kgの砂袋を使用し、ピックアップ間距離を2mとした。これによって、有効周波数5.125-50Hzのデータが得られ、波長3-40mにわたる分散曲線が算出された(図7・a)。

この分散曲線は大別して波長3-11m間,11-20m間及び20-40m間の3つの部分に分けることができる。すなわち、位相速度のパラツキがあるが全体として速度増加が認められない部分、一定の高い増加率を示す部分及びほぼ一定の増加率を示す部分である。これらは各々上部粘土層、上部砂層及び下部粘土層の物性を反映したものと考えられる。したがって、この分散曲線が大局的には地質断面に対応すると考えられるが、一方では洪積台地の探査例のような層境界の明瞭な識別性はない。

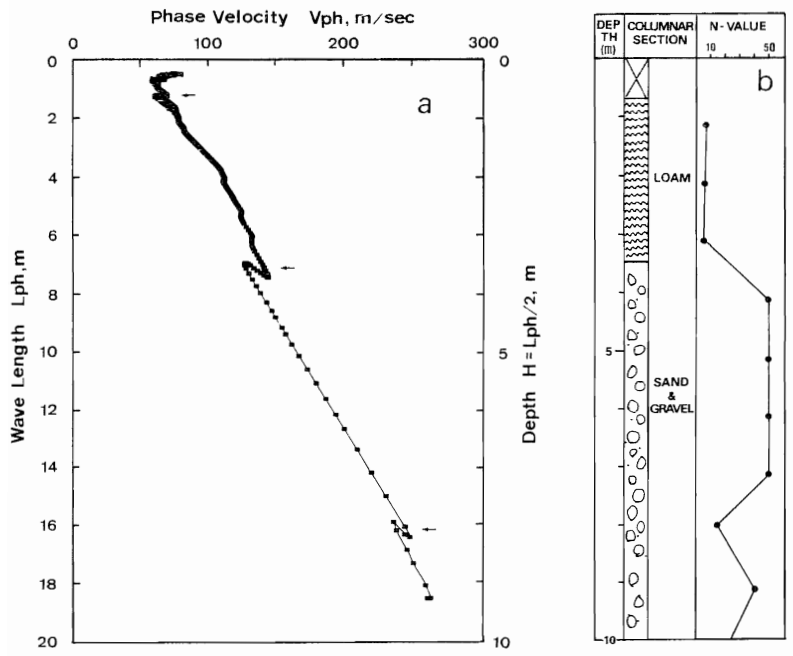


図6 洪積台地の探査例
a : 分散曲線 b : ボーリング調査結果

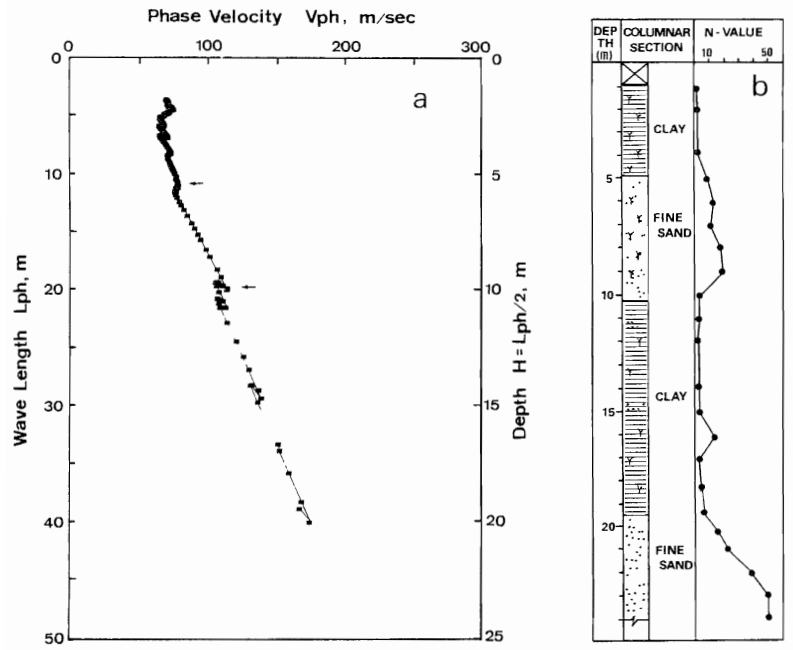


図7 沖積低地の探査例
a : 分散曲線 b : ボーリング調査結果

表面波法は、実体波の境界面での屈折波や反射波を利用する探査法と異なり、境界面の位置を精度よく決定することは困難であるといわれている。したがって、この沖積低地の結果の方が一般的であるといえる。しかしながら、先の洪積台地のように条件によっては境界面が検出される場合もあるため、今後、サンプリング数やクロススペクトルの演算精度等を改善し、境界面の検出をより一般化するための検討も必要であろう。

3・3 深部探査例

図1に示した投下器を使用して、これまでより深い部分の探査を試みた。重りは、小鉄球（パチンコ玉）を充填した重量20kg、直径25cmのゴムボールである。この探査では長波長の分解能を高めるために、FFTの最高分析周波数を20Hzとし、FFTへの入力信号も増幅器に内蔵するローパスフィルタで調整して、特に低域のS/Nを向上させた。これにより、2.5-20Hzの有効周波数のデータを得た。

図8は、実測された分散曲線(a)と測定場所のボー

リング調査結果(b)である。図から探査深度が40m程度まで延びていることがわかる。しかしながら、この場所はボーリング調査結果からわかるように、層構成が複雑なため分散曲線と地質断面の対応は必ずしも良好ではない。したがって、探査結果の当否を他の方法によって検証する必要がある。

そこで、探査地点から130mほど離れた幹線道路の道路振動をランダム振源とみなして、分散曲線を求めた。周知のとおり、本法のような衝撃性の波と同様にランダム性の波についても、クロススペクトルを利用した位相差の検出が可能である。ただし、道路振動は非定常性が強いので、アベリッジを1024回と多めにとった。図8・aの○で示した分散曲線は、このようにして得られた道路振動由来のものである。投下器を使用した結果と比較すると、振源の種類や位置が全く相違するにもかかわらず、良く近似した分散曲線になっていることがわかる。これにより、投下器を使用して得られた分散曲線の信頼性が、ある程度保証されるものと考えられる。

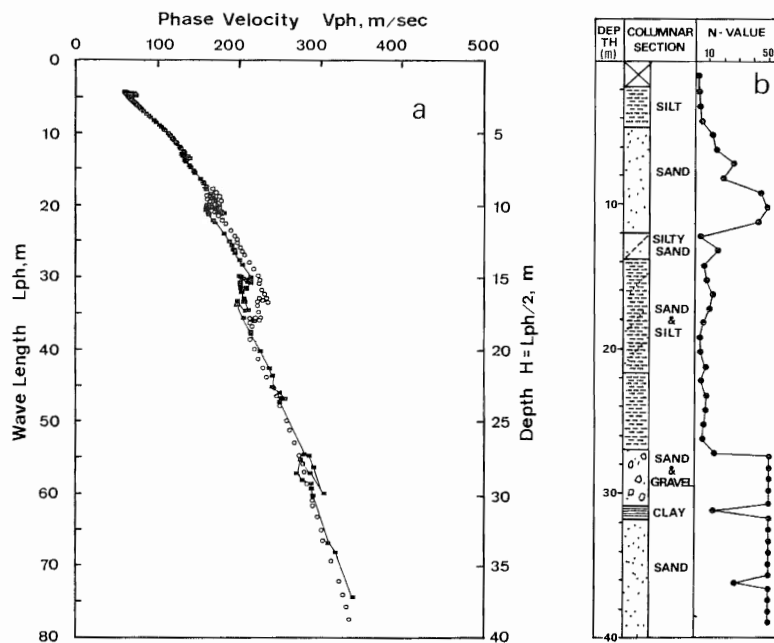


図8 深部探査例

a : 分散曲線 (■…投下器使用、○…道路振動由来)
b : ボーリング調査結果

4 結 言

簡易な衝撃振源から発生する表面波を利用して、地盤の速度構造を推定する地下探査法を紹介した。この方法は計測が簡便であるほか、振動公害の測定に主として使用する計測システム（加速度計, FFTアナライザ）をほぼそのまま利用できることから、今後、利用価値が高まるものと期待される。

例えば、分散曲線から地盤振動の卓越周波数の波が地下のどの層の物性に支配されて伝播しているかを推定したり、分散曲線のパターン（位相速度の代表値や速度増加率など）を用いて地盤種別を判定するなどの利用方法が考えられる。これは、いずれも振動公害の現象と地盤条件の関係を量的に理解するもので、多数のデータが集積されれば、より精密な予測方法などが構築される可能性がある。

筆者は、このうち地盤種別の判定方法について検討するため、ボーリング資料のある地盤で表面波法による分散曲線の収集と常時微動の卓越周波数の測定を実施している。これまでのところ、分散曲線のパターンは地盤の総合的な良否の判定に高い感度を持つことが判明しているが、これについては機会を改めて報告したい。

文 献

- 1) 松岡達郎：地盤の特性と道路交通振動について
騒音制御, 3(2), 20-23, 1979
- 2) K.H.Stokoe, II and S.Nazarian: Use of
Rayleigh Waves in Liquefaction Studies,
Proc., Measurement and Use of Shear Wave
Velocity for Evaluating Dynamic Soil
Properties, Geotechnical Engineering
Division, ASCE, 1-17, 1985.
- 3) W.Heukelom and C.R.Foster: Dynamic
Testing of Pavements. Proc., ASCE, Journal
of Soil Mechanics and Foundations Division,
No. Sml, Part 1, Vol. 86, 1-28, 1960.
- 4) Z.B.Fry: Dynamic Soil Investigations
Project Buggy, Buckboard Mesa Nevada Test
Site, Mercury, Nevada, U.S. Army Engineer
Waterways Experiment Station Miscellaneous
Paper No. 4-666, 1965