

動的有限要素法による水平成層地盤モデルを用いた 振幅・位相特性

河里康平* 江本浩樹** 山下典彦*** 森源次****

Amplitude and Phase Characteristics of Horizontally Layer by Dynamic Finite Element Method

Kohei KAWASATO* Hiroki EMOTO** Norihiko YAMASHITA*** and Genji MORI****

ABSTRACT

In order to establish a surface wave method to estimate the depth of the soil layer, this paper has examined some of the basic relationships between the depth of the relatively harder soil thin layer and the characteristics of the P-SV wave propagation in layered media and their dynamic response due to the vertical harmonic point load applied on the ground surface. In this examination, the P-SV wave field has been simulated by the finite element method in soil layered media. It has been found from this numerical investigation that the depth of the relatively harder soil thin layer can be estimated from the information of the change of the phase velocity on ground surface at the resonant frequency of the soil layer.

Keywords: harmonic wave, P-SV wave, finite element method

1. はじめに

地盤構造を推定する方法の1つにレイリー波の分散性を利用した表面波探査法がある。この分散性とは、レイリー波の波長が長いほど、より地盤深部のせん断波速度を反映するという性質である。このレイリー波の分散性により得られた波長による伝播速度の違いを逆解析する事により、地盤の工学的性質であるせん断波速度構造を求める事ができる。

表面波探査法は、従来の地盤探査方法であるボーリング孔を用いたPS検層と比較して比較的短時間に低コストで実施が可能であるとともに非破壊で調査が行えるというメリットがある。

しかし、表面波探査法のようなレイリー波の分散性を用いた手法において、起振点の近傍ではP波やS波といった実体波が混在する為、レイリー波が形成されていないのではないかという指摘がある。そこで既存の表面波探査法では、レイリー波が形成されていると考えられる起振点より遠方に受振器を設置する必要がある。

また、表面波探査法の測定方法は、大きく分けて起振機と2~3個の受振器を用いる測定方法と、インパルス振源と多数の受振器を用いる測定方法が提唱されているが、現在のところ表面波探査法に関する研究は、インパルス振源による方法を踏襲した研究に留まっており、起振機といった動的荷重による振幅と位相速度の周波数特性が、地下構造によってどのように変化す

るかという検討がなされていないのが現状である。その為、最近では信頼性の点から多数の受振器を用いて行う測定方法が主流となっている。この多数の受振器を用いて実施する点からも、測線長が長くなる傾向にあり、広い作業スペースを必要とする事が、表面波探査法の問題点となっている。以上の点から、住宅地などといった建物が密集する地域では、十分な作業スペースを確保できない事が多く表面波探査法の実施は難しい。

本研究では、表面波探査法の住宅地などといった省スペースでの実施を可能とする為に、(1)起振機と2個の受振器を用いた測定方法(2)受振器を起振点の近傍に設置する事で起振点近傍での実体波やレイリー波の混在した波の位相速度を用いた測定方法、これら2つの有効性を検証する事を目的としている。具体的には図1のように起振機により発生させた波を、地表面の起振点近傍に設置した2個の受振器によって測定し、測定した波形から位相速度を求める。この位相速度と起振機により発生させた調和振動荷重の周波数の関係から地盤構造を推定する事が可能であるかを有限要素法による解析より検証した。

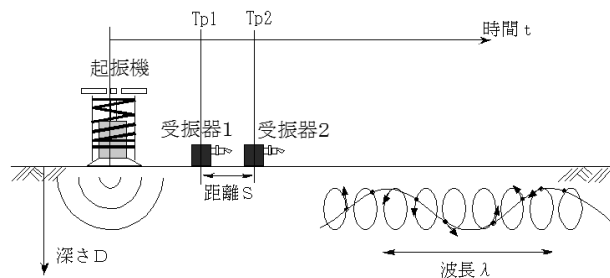


図1 省スペースでの表面波探査法

* 都市工学科

** 神戸大学大学院 工学研究科 市民工学専攻

*** 都市工学科 教授

**** 古野電気株式会社 航空防衛事業部主幹技師

2. 有限要素法に用いた運動方程式

有限要素法の全体系の運動方程式は、式(1)で表される⁽¹⁾。

$$[M]\{\ddot{x}\} + ([G_L] + [G_R] + [G_B]) + \alpha[M] + \beta[K]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

ここで $[M]$, $[K]$ は質量, 剛性マトリクス, 丸括弧内は減衰マトリクスである. $\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$ は解析モデルの節点の加速度, 速度, 変位ベクトル, $\{f\}$ は外力ベクトルである. 減衰はレイリー減衰で評価した. α , β は減衰定数や固有円振動数と式(2)の関係がある.

$$h_i = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} \quad (2)$$

また, 計算量を制限する為, 表層の i 次の固有円振動数を式(3)の金井の式⁽²⁾により計算した.

$$\omega_i = \frac{\pi V_{s1}}{2h}(2i-1) \quad (3)$$

しかし, 今回の解析モデルのような表層が 3 層からなる地盤を, 表層が 1 層からなる表層単層地盤と仮定するには無理がある為, 表層 3 層の各層の S 波速度 V_{sj} から各層厚による重みつき平均をとる事によって求まる S 波速度 V_{av} を式(4)によって求め, これを表層が 1 層からなる地盤に置き換えた際の S 波速度とした⁽³⁾.

$$V_{av} = \sum_{j=1}^N \frac{V_{sj}h_j}{h} \quad (4)$$

また, 地盤の半無限性を考慮するために減衰項に粘性境界を導入した⁽⁴⁾.

3. 解析モデル

解析モデルを図 2 に示す. CASE1, CASE2 は, 埋設物を模擬した硬い層が地盤内に存在する場合, どのような位相速度の周波数特性を示すのかを調べる為, 表層が 1 層からなる 1 層の水平成層地盤と, 表層地盤中に硬い層がある 3 層の水平成層地盤をモデル化した解析モデルである. CASE3 及び CASE4 は, 3 層の水平成層地盤にある硬い層の深さ位置を 4m, 5m と設定した解析モデルである. CASE5 からは, 硬い層の横方向の大きさを徐々に小さくする事により様々な大きさや位置の埋設物をモデル化した解析モデルである.

CASE5~CASE8 は, 硬い層の横方向の大きさを起振点上を軸に左右 1/3 ずつ小さくしたもので, CASE9, CASE10 は CASE8 の埋設物の位置を起振点から右に 9m, 10m としたモデルである.

表 1 に各解析モデルの材料定数を示す. 各種パラメータはそれぞれ時間刻み $\Delta t=0.0005s$, 解析ステップ数 = 4096, 要素サイズは 1 要素あたり横 20cm×縦 20cm の 2 次元ひずみ要素とした. また, レイリー減衰に用いた減衰率は各固有円振動数に対して一様に 5% とした. 解析にはモデル地表面の左端から 9m の位置に最大振

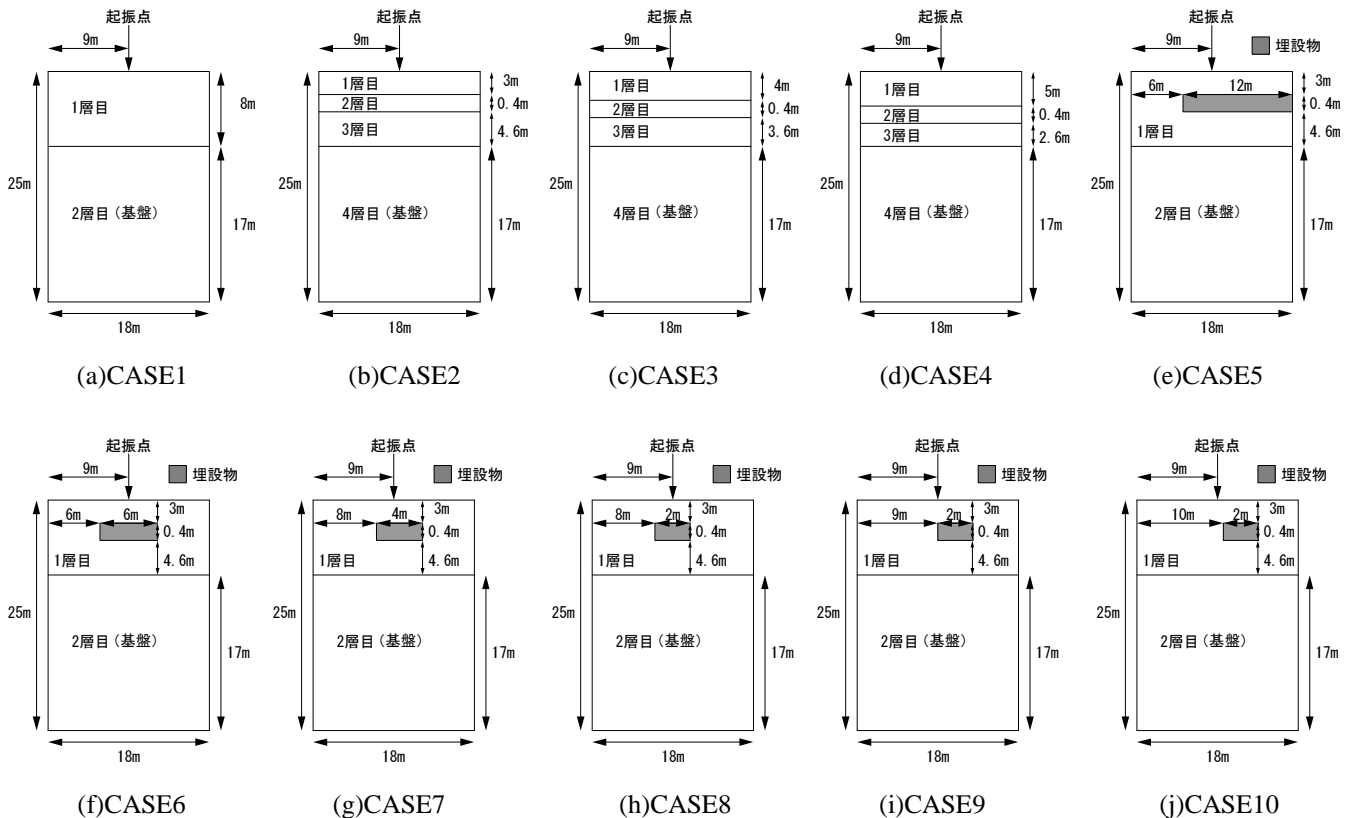


図 2 解析モデル

幅 20kN の 1~99Hz の調和振動荷重を外力として鉛直方向に作用させた。位相速度は、図 3 のような起振点近傍位置で起振点より右に 0.2m と 1.8m の鉛直変位波形の差分を取り、式(5)より求めた。解析にはニューマーク β 法を用い、 $\beta = 0.25$ とした⁽⁵⁾。

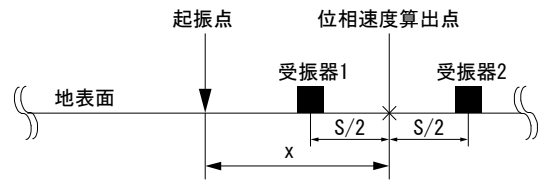


図 3 位相速度算出のイメージ

$$\text{位相速度} = \frac{2\pi S \omega_i}{\text{位相角差}} \quad (5)$$

表 1 材料定数

(a)CASE1

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	$\rho(t/m^3)$	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
2層目	980	400	2	0.4

(b)CASE2,CASE3,CASE4

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	$\rho(t/m^3)$	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
2層目	3674	1500	2.1	0.4
3層目	490	200	1.8	0.4
4層目	980	400	2	0.4

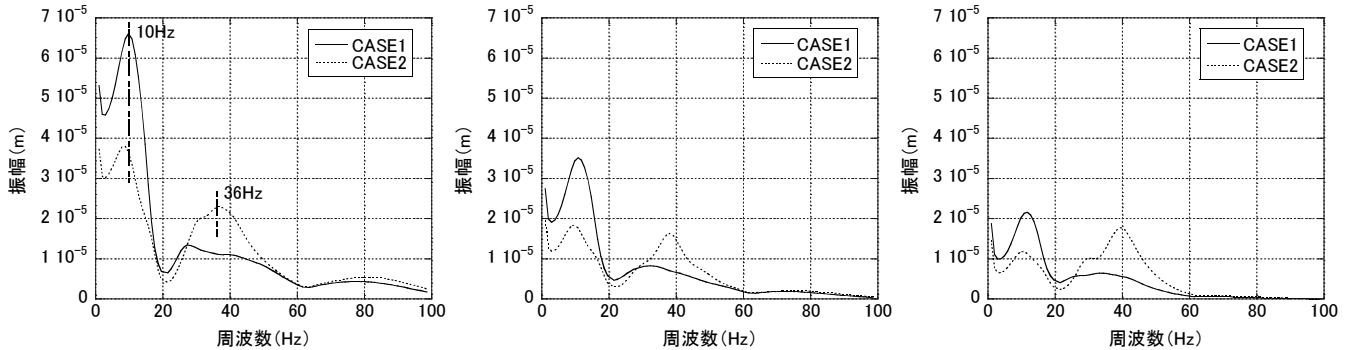
(c)CASE5,CASE6,CASE7,CASE8,CASE9,CASE10

	Vp(m/s)	Vs(m/s)	$\rho(t/m^3)$	ν
1層目	490	200	1.8	0.4
埋設物	3674	1500	2.1	0.4
2層目	980	400	2	0.4

4. 数値解析結果

4.1 硬い層の有無による影響 図 4 に硬い層が振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に与える影響を示す。

まず図 4(a)(1)の、1m 地点の硬い層の有無による振幅の周波数特性について見てみると、CASE1、CASE2 共に約 10Hz で振幅が大きく増幅される地盤の卓越振動数が確認出来る。硬い層を含まない CASE1 では卓越振動数が現れた後、なだらかに減少している。しかし、硬い層を含む CASE2 では約 36Hz で再び大きなピークが現れているのが確認出来る。次に、図 4(b)(1)から 1m 地点の位相速度の周波数特性について見てみると、両

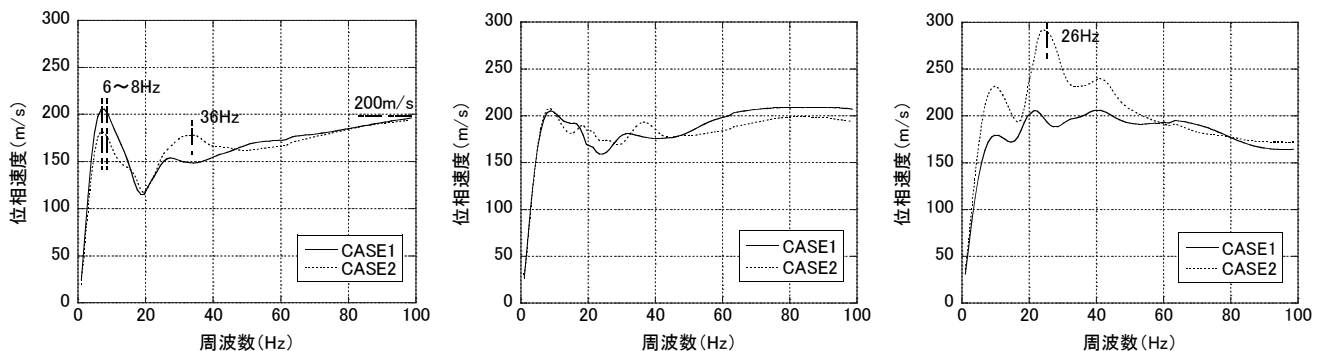


(1)1m 地点

(2)2m 地点

(3)3m 地点

(a)振幅の周波数特性



(1)1m 地点

(2)2m 地点

(3)3m 地点

(b)位相速度の周波数特性

図 4 硬い層の有無による影響

CASEで振幅の周波数特性よりも小さい6~8Hzで位相速度が大きくなっている事が確認出来た。また、硬い層が含まれるCASE2では振幅の周波数特性で現れたピーク周波数と同様の約36Hzで再びピークが現れている。その後は両CASEにおいて1層目のせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ に近づくような傾向を示している。また、地点ごとの振幅の周波数特性を比較してみると、起振点から離れていくほど全体の振幅は小さくなる傾向が見られる。また、すべての地点で同様の周波数の振幅が大きくなる傾向が確認できる。さらに、地点ごとの位相速度の周波数特性を比較してみると、2m地点の位相速度は、1層地盤のCASE1と硬い層があるCASE2であまり違いが見られなかった。しかし3m地点の位相速度の周波数特性と見てみると、CASE2の位相速度がCASE1の位相速度とは大きく異なっており、26Hz付近で非常に大きな2次のピークが現れた。

以上の事から、地盤内に硬い層が存在すると、振幅と位相速度が増加する周波数を確認出来き、起振点近傍では起振点からの距離によって位相速度特性が大きく変わる事が分かった。

4.2 硬い層の深さ方向の位置による影響 図5に硬い層の深さ方向の位置が振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に与える影響を示す。まず、図5(a)(1)

を見ると全てのCASEで約10Hzで振幅が大きく増幅される地盤の卓越振動数が確認出来る。その後CASE2, CASE3, CASE4で約36, 29, 28Hzで再び大きなピークが現れているのが確認出来る。

次に、図5(b)(1)を見てみると、全てのCASEで振幅の周波数特性よりも小さい6~8Hzで位相速度が大きくなっている事が確認出来た。またCASE2, CASE3, CASE4で振幅の周波数特性で現れたピーク周波数と同様の約36, 29, 28Hzで再びピークが現れている。この周波数は、硬い層が深いほど小さくなる傾向が見られた。その後は全てのCASEにおいて1層目のせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ に近づくような傾向を示している。また地点ごとに各結果を見てみると、硬い層の有無による結果の時と同様の傾向となった。

4.3 埋設物の大きさによる影響 図6に、埋設物の大きさが振幅の周波数特性と位相速度の周波数特性に与える影響を示す。まず、図6(a)(1)の1m地点の振幅の周波数特性を見てみると、約10Hzで1つ目のピークが見られ、CASE5~CASE8についてはその後38~40Hz付近で2つ目のピークが見られる。その後、周波数が高くなるにつれ次第に減少していく結果となった。これは、硬い層がある場合で見られた傾向と同様である。また、埋設物の大きさが小さくなるにつれて2次のピ

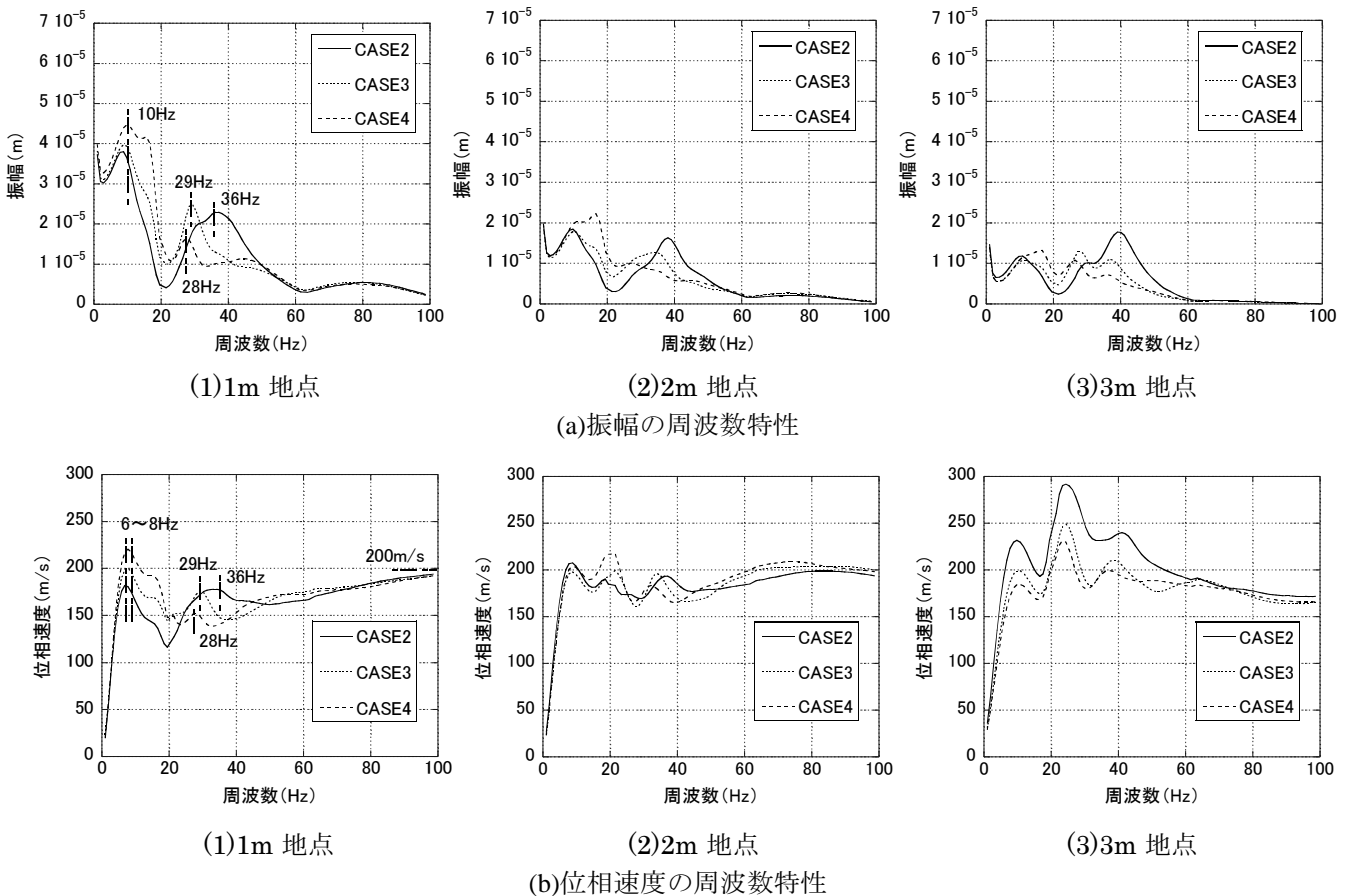


図5 硬い層の深さ方向の位置による影響

ークが小さくなる傾向が見られた。これは、埋設物の大きさが制限される事によって埋設物の境界面で反射が生じ、埋設物を通過した波が地表面に現れにくくなった為であると考えられる。また、地点ごとの振幅の周波数特性を比較してみると、起振点から離れていくほど全体の振幅は小さくなる傾向が見られる。

次に、図 6(b)(1)の 1m 地点の位相速度の周波数特性を見てみると、8Hz 付近で 1 つ目のピークが現れた後、CASE5~CASE7 では 33Hz 付近で 2 次のピークが見られた。これらの 2 次のピークは埋設物の影響と考えられる。しかし、CASE8 については、1 層地盤の CASE1 と比較してあまり違いがなかった。この原因として考えられる事は、(i)埋設物の境界面での反射の影響(ii)位相速度を求める際の差分間隔の影響がある。(i)の理由についてはさきほどの振幅の周波数特性と同様である。(ii)については、CASE8 の埋設物の大きさが小さい為、1m 地点の差分間隔 (0.2m 地点と 1.8m 地点) では、分間隔 1.8m に対して横方向の大きさ 2m の埋設物の 0.8m 分しか影響を受けない為である。よって、横方向の大きさ 2m の埋設物の影響が現状の差分間隔に対して大きくなるように、図 7 のようにこの埋設物の位置を 1m ずつ右に移動させ解析を行った。

次に、2m 地点と 3m 地点の位相速度の周波数特性を見てみると、2m 地点の位相速度は、CASE5 で小さな 2

次のピークが確認できるものの、その他の CASE については 1 層地盤の CASE1 と比較してあまり違いが見られなかった。

しかし、3m 地点の位相速度の周波数特性と見てみると、1 層地盤の CASE1 の位相速度とは大きく異なっており、埋設物の横方向の大きさが大きい程、位相速度結果に大きく違いが現れた。よって、起振点近傍での位相速度は、地点によって傾向が大きく変わるという結果が得られた。また、CASE8, CASE9 については 3m 地点の差分間隔の地下には埋設物は埋まっていないが、1 層地盤の CASE1 と比較して全体的に位相速度が大きくなっている事から、埋設物が地下にない差分地点においても、埋設物の影響が現れる事が分かった。

4.4 埋設物の横方向位置による影響 図 7 に、埋設物 (0.4m×2m) の横方向の位置が振幅の周波数特性と位相速度の周波数特性に与える影響を示す。全ての結果において、1 層地盤の CASE1 と違いがあまり見られなかった。よって、埋設物の横方向の大きさが振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に影響を与える要因である事が分かった。

5. まとめ

表面波探査法を省スペースで実施する為に(1)起振

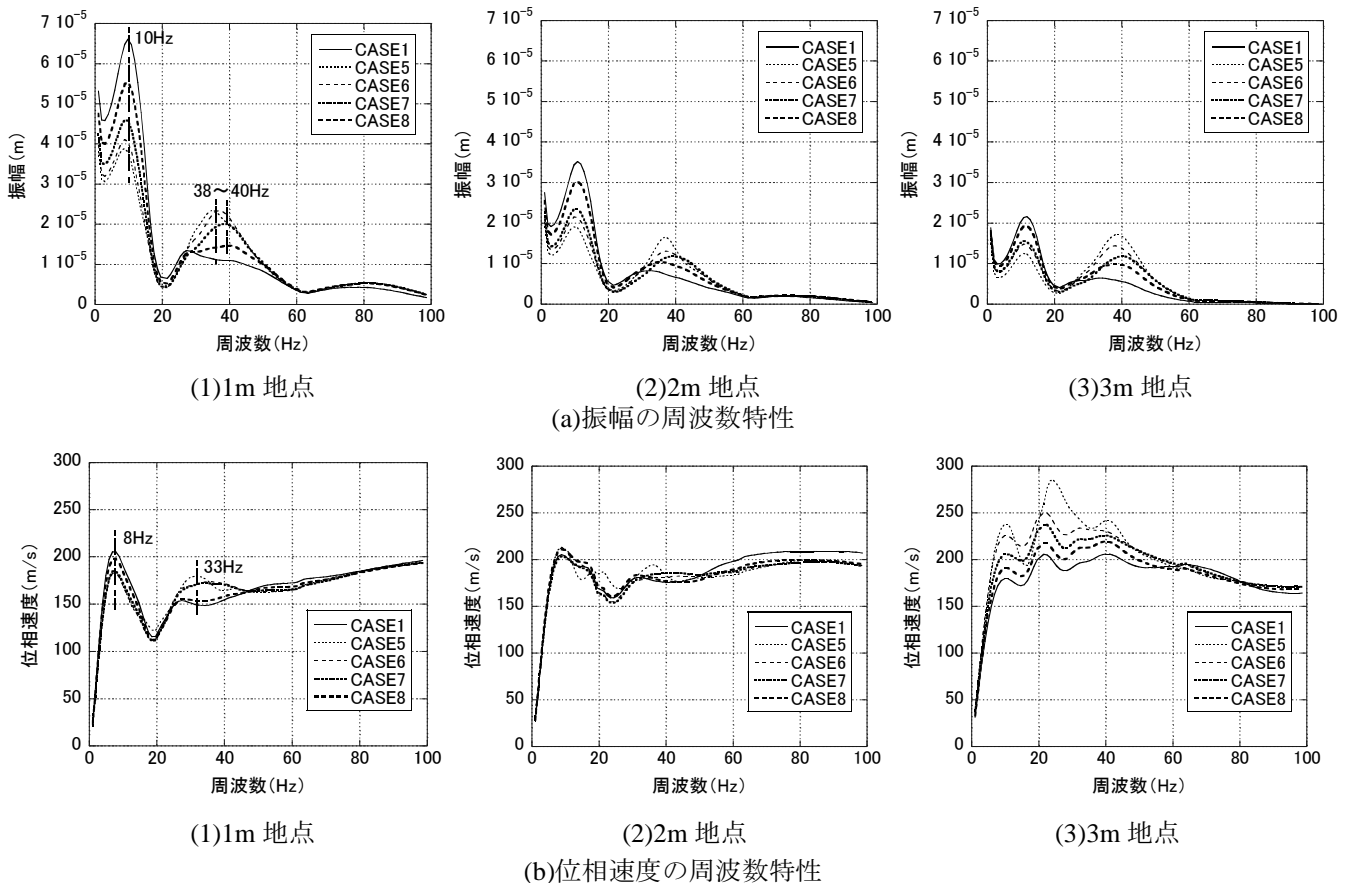


図 6 埋設物の大きさによる影響

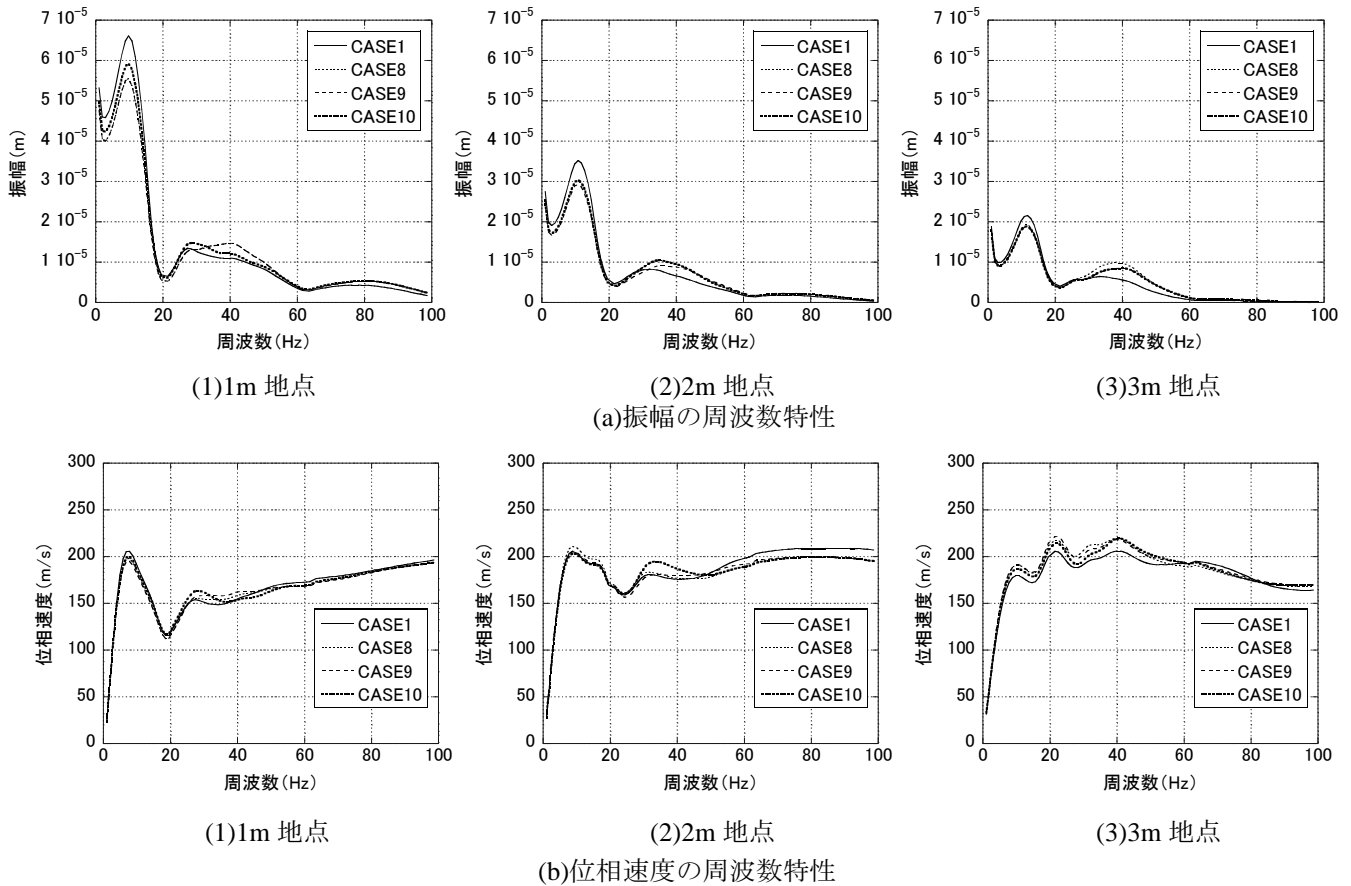


図7 埋設物の横方向位置による影響

機と2個の受振器を用いた測定方法(2)起振点近傍での実体波とレイリー波が混在した波の位相速度を用いた測定方法, これら2つの有効性を検証した. 以下にその結果を示す.

- (1)地盤内に硬い層(埋設物を模擬したもの)がある場合, 硬い層がない場合に比べて位相速度が大きくなる周波数が表れた. また, この位相速度の増加は全ての解析結果で3m地点が最も大きく, 起振点からの距離が位相速度特性に大きな影響を与えている事が分かった.
- (2)3層の水平成層地盤モデルの硬い層の深さ位置を変えた場合, 位相速度の特異なピーク点は, 硬い層の位置が深いほど, 低い周波数で表れる傾向を示した.
- (3)全てのCASEにおいて, 高周波数に近づくほど, 位相速度は地表面のS波速度に近づいていく傾向が見られた.
- (4)埋設物の場合は, 横方向サイズが大きい場合は振幅の周波数特性, 位相速度の周波数特性の両方で特異なピーク点が現れたが, 0.4m×2mの場合はあまり影響が見られなかった. この事から, 埋設物の大きさが振幅の周波数特性や位相速度の周波数特性に影響を与える要因である事が分かった.

以上から, 表面波探査法を省スペースで実施する為に用いた測定方法で, 地下構造によって位相速度の周波数特性が異なる事を確認でき, 有効性を検証する事ができた.

謝辞: 本論文を作成する上で, 山下研究室の専攻科1年生の島袋武氏, 卒研究生の三木拓也氏, 鳥澤拓真氏, 岡那捺希さんには大変お世話になりました. ここに記して謝意を表します.

参考文献

- (1)春海佳三郎, 大槻明: 有限要素法入門, 共立出版 pp34-38, 2006
- (2)地盤工学会: 地盤技術者のためのFEMシリーズ② 弾塑性有限要素法がわかる, 丸善, pp54-57, 2003
- (3)土岐憲三: 土木学会編 新体系土木工学11 構造物の耐震解析, 技報堂出版, p102, 1985
- (4)鈴木晴彦, 林宏一, 信岡大: 表面波を用いた地震探査—人工振源を用いた基礎的研究—, 物理探査学会 第102回学術講演会論文集, pp62-65, 2000
- (5)精木紀男, 正木和明, 荏本孝久, 岩楯敏広, 中島芳久, 高坂隆一: 建築と土木技術者のための地震工学・振動学入門, 吉井書店 pp1-6, 1997