

水中表面波探査による 海底地盤情報の可視化手法の開発

柳橋 寛一¹・熊谷 隆宏²・上野 一彦³・小西 千里⁴

¹ 正会員 五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Tomokazu.Yanagibashi@mail.penta-ocean.co.jp

² 正会員 五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Takahiro.Kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

³ 正会員 五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: Kazuhiko.Ueno@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 正会員 応用地質（株）技術本部（〒331-0812 埼玉県さいたま市北区宮原町 1-66-2)
E-mail: konishi-chisato@oyonet.oyo.co.jp

土木構造物の設計や施工において、N値や非排水せん断強さなどの地盤の強度や剛性に係る情報が重要である。これらと相関の高いS波速度を海底地盤から取得する技術として、海域へ適用可能な新しい表面波探査手法を提案した。現地試行により提案手法の有効性について検証した結果、得られたS波速度分布は、ボーリング調査および標準貫入試験によって得られた土質やN値の分布と概ね整合する傾向が確認された。当該手法を用いることにより、海底地盤の強度や剛性に関する情報を空間的に獲得して、可視化することが可能となり、港湾構造物や港湾施設のより合理的な設計や施工に向けての活用が期待される。

Key Words : MASW, Geophysical exploration, Non-destructive, S-wave velocity, Seabed

1. はじめに

地盤探査手法として一般に、ボーリング調査や標準貫入試験、コーン貫入試験に代表される、サウンディングなどの直接的な調査手法が適用されている。これらの手法によれば、高い精度の地盤情報を取得することができるものの、情報が得られる範囲は調査孔（一次元情報）に限られる。広範囲にわたる港湾施設や構造物が計画される海底地盤に対し、これらの技術を用いて、面的に連続な地盤情報を得ようとすれば、調査を稠密に実施しデータを多量に蓄積する必要があり、コストの面で現実的ではない。面的に連続な海底地盤の情報を得る非破壊探査手法には、一般的な既往技術として¹⁾²⁾、資源探査等を目的とする反射法地震探査がある。反射法による探査は基本的にP波を用いる手法であり、得られる地盤内の情報が土質や岩質が変化する境界面の分布であるため、強度パラメータとの関連付けが難しいといった課題がある。

一方、土木構造物の設計や施工においては、強度や剛性に係るN値や非排水せん断強さの情報が非常に重要である。これらのパラメータと相関の高いS波速度³⁾を海底地盤で探査・推定する手法が確立されれば、より良い設計や施工にむけて有意な情報が得られる。

S波速度を取得する方法として、陸域では表面波探査

法が広く適用されている。この探査技術は、沿岸部において、干潟のように潮位変動の中で干出する時間がある地盤に対して適用された研究例や⁴⁾⁵⁾、水深の浅い干潟の潮下帯で適用された事例はあるが⁶⁾、数m以上の水深がある一般海域まで適用可能な方法は確立されていない。

本研究では、海底地盤の情報（S波速度分布）を取得して可視化することを目的とし、一般海域へ適用可能な新しい表面波探査手法を提案する。また現地試行を実施し、当該手法の有効性について検証した結果を報告する。

2. 新しい探査手法の提案（水中表面波探査）

潜水士船からワイヤーで吊り下げた重錘を一定間隔ごとに海底地盤に落下させ、効率良く表面波を起振するとともに、計測ケーブル（ハイドロフォン）で受振し、海底地盤のS波速度を明らかにする探査手法を提案する（以下、水中表面波探査と称す）。水中表面波探査の手順は、以下のとおりである。

- ① ブイ、ロープ状部材とアンカーを連結し、測線の両端部に設置する。
- ② 両端部のアンカーを目標にして、ハイドロフォンを海底面に直線状に張った状態で配置する。

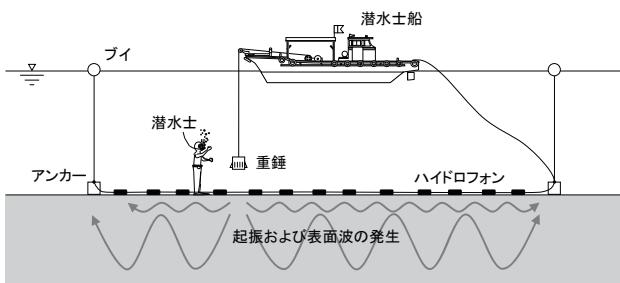


図-1 水中表面波探査の概要図

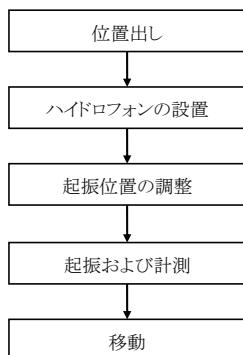


図-2 調査手順

- ③ 一定間隔ごとに重錘を海底面に落下させて表面波を発生させ、受振器で受信する。
- ④ 受振した表面波の時系列データを解析し、海底地盤のS波速度構造を推定する。

重錘を使用したこの手法によれば、海底地盤面に起振装置等を設置する必要はなく、海上で作業を完結できるため、繰り返される起振作業を効率的に進められる。また、海底地盤面を直接起振するため、十分なエネルギーの表面波のデータを取得することができる。

探査手法の概要図を図-1に、調査手順を図-2に示す。

3. 現地試行

(1) 概要

河口域から外海へ向かう中間地点に位置する静穏な港湾内（図-3）において、水中表面波探査の現地試行を行った。護岸部から沖側に10 m程度離れた47 m × 23 mの範囲を対象とした。既往のボーリング調査結果では、表層0.5~1.0 mが薄い粘土層で覆われ、深さ3~4 mまで貝殻片を含む軟弱な砂および礫層、さらにその下層を軟弱な風化凝灰角礫岩で形成された成層地盤であることが示されている。水中表面波探査を実施する測線はA~Eの5測線とし、沿岸方向に延長47 m × 1測線（A測線）、岸沖方向に延長23 m × 4測線（B~E測線）を設定し、受振器間隔は1 m、起振間隔は2 mとした。また、ボーリング調査および標準貫入試験（JIS A 1219）を実施し、N値の測定と地層の確認を行った（図-4）。採取したボ-

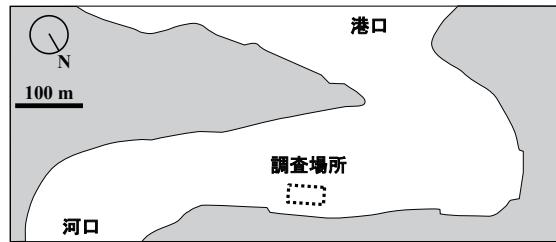


図-3 調査位置図

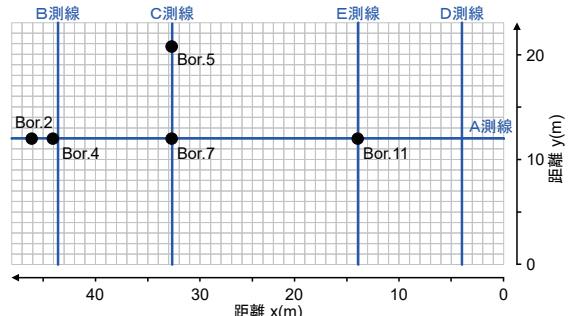


図-4 測線配置図

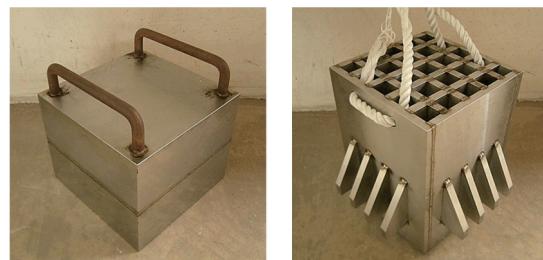


写真-1 左：閉塞型20 kg重錘、右：格子型20 kg重錘

表-1 実験条件一覧表

測線	重錘の種類 (形状・質量)	落下高さ
A (47 m)	格子型：20 kg 閉塞型：20 kg 格子型：50 kg	0.5~3.0 m (5段階)
B, C, D, E (各23 m)	格子型：20 kg	1.5 m

リング試料および柱状サンプルの任意の深度において、土粒子密度（JIS A 1202）や含水比（JIS A 1203）、湿潤密度（JIS A 1225）、粒度（JIS A 1204）を測定した。以上の結果と、前述した水中表面波探査の手順により推定したS波速度構造とを比較し検討した。

(2) 重錘による起振効果の検討

使用する重錘として、鋼製の直方体形状の2つのタイプについて検討した（写真-1）。このうち格子型のタイプは、格子が底面から上面まで貫通する形状になっているとともに、外周部に整流板が取り付けられ、水中落下時の姿勢の安定性を期待した形状となっている。これらの重錘を使用し、表-1のとおり重錘の形状（閉塞型または

格子型), 重錐の重量 (20 kg または 50 kg), 重錐の落下高さ (0.5 m, 1.0 m, 1.5m, 2.0 m, 3.0 m の 5 段階) の条件を変化させ, 海底地盤面で表面波を起振させるための最適な条件を検討した.

(3) 使用機器

測量機器の設置や, 重錐の落下・引き上げのための揚機を備えた潜水土船をプラットホームとして, 全ての作業を行った. 受振器には水中での圧力変化を観測できるハイドロフォン (DHA-7, Geometrics, Inc. 製) を使用した. 2 m 間隔で 24 ch の受振器を持つハイドロフォンケーブルを折り曲げ, 受振器間隔を 1 m にして使用した. A 測線は, 23 m のハイドロフォンケーブルを 11 m ずつ重ねながら 2 回移動させ, 計 47 m とした⁷⁾. 収録器には McSEIS-SW (応用地質株式会社製) を使用した.

4. 探査結果

取得した波形記録から CMPCC (Common-Mid-Point Cross Correlation) 解析⁸⁾ を用いて, 周波数一位相速度領域での振幅スペクトルを求め, 周波数毎に振幅が卓越する位相速度を算出し, 周波数と位相速度の関係 (分散曲線) を得た. 分散曲線から, 表面波の位相速度を波長の 3 分の 1 の深度の S 波速度とする 1/3 波長経験則により初期モデルを作成し, 逆解析により分散曲線を再現する S 波速度構造を推定した. 得られた S 波速度構造の鳥瞰図を図-5 に示す.

地盤の剛性を示すパラメータであるせん断剛性率 G_0 は, 単位体積重量 ρ_t と S 波速度 V_s を用いて, $G_0 = \rho_t V_s^2$ と関係づけられるため, S 波速度構造の分布に基づき, 地盤の剛性や強度の分布を推定できる. 図-5 によれば,

工学的基盤層 ($V_s \geq 300$ m/s) を確認することができる.

図-3 で示したように, 沿岸方向において, $x=47$ m は河口側, $x=0$ m は港口側を示す. $x=15 \sim 47$ m では, 基盤層が海底面下 5~6 m 程度の比較的浅い位置に存在しているが, $x=0 \sim 12$ m では, 基盤層が急激に沈み込む. 同様に, 表層 3 m 程度の軟弱な層 ($V_s=50 \sim 150$ m/s) は, 基盤層の沈み込みと同時に, 深さ 10 m 程度まで厚くなる. また, 岸沖方向においても, $y=10$ m から沖側に向けて, 基盤層が急激に沈み込む.

沿岸・岸沖方向の推定結果の交点において, 速度構造が若干一致していない箇所がある. このような推定結果の不連続性は, 一般的には測線毎にデータを処理する方法に起因すると考えられるが, 当該調査位置のように, 基盤層などの地層の分布が急激に変化する場所では, S 波速度の変化が大きくなるため, 推定結果の不連続性が現れやすいことに注意する必要がある.

図-6 は, 各測線の S 波速度構造の断面図に対し, 標準貫入試験の結果を重ね合わせたものである. ポーリング調査結果によれば, 当該調査範囲の土質は, 軟弱な砂層に礫や貝殻, 固結土等が含まれるもののが主であり, N 値の分布にはばらつきが見られる. このような地盤条件であ

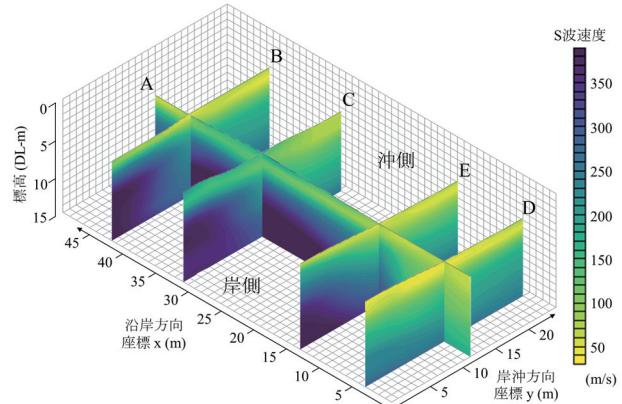


図-5 S波速度構造の鳥瞰図

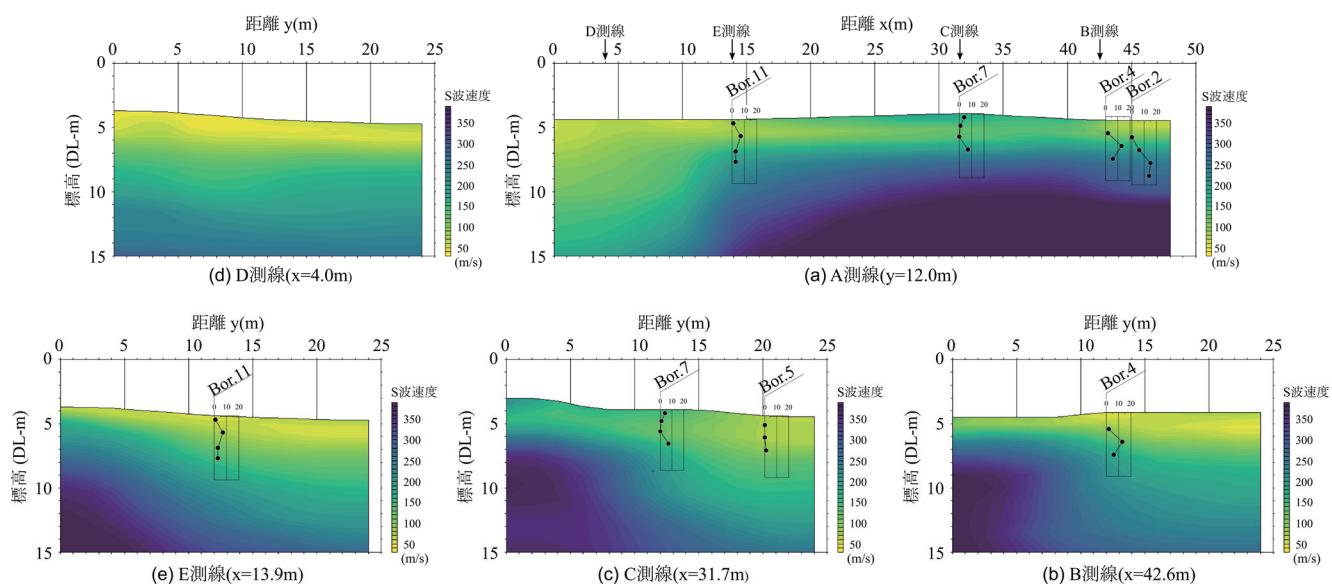


図-6 各測線におけるS波速度構造の推定図およびN値の測定結果

るもの、提案する手法によって得られたS波速度分布は、後述する図-7や図-8でも示されるとおり、調査で得られた土質やN値と概ね整合する傾向にあり、水中表面波探査による海底地盤のS波速度構造の探査手法の有効性が確認されていると考えられる。

5. 考察

(1) S波速度とN値の関係

道路橋示方書・同解説(耐震設計編)において、N値とS波速度の関係式として、以下が示されている⁹⁾。

$$V_S = 100N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 25) \quad (1)$$

$$V_S = 80N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 50) \quad (2)$$

式(1)は粘性土、式(2)は砂質土に対してそれぞれ適用される。また、今井ら¹⁰⁾は、土質によらず統一的に適用できる関係式として、(3)式を提案している。

$$V_S = 97N^{0.314} \quad (3)$$

図-6に示される、水中表面波探査によって推定されたS波速度と、標準貫入試験によって得られたN値の相関について、式(1)～(3)の関係式を示しながら比較した結果が図-7である。図中の土質の分類は、ボーリング柱状図の観察結果による。先にも述べたとおり、ボーリングの観察結果から貝殻片や固結土などの混入によりN値が突出した地点のデータを除けば、N値が20以下の軟弱な地盤においても、S波速度とN値はべき乗に比例する関係が見られる。ボーリング調査によれば、砂やレキが主要な土質であり、道路橋示方書に示される関係式の式(2)を用いた場合は、N値を3割程度大きく推定する傾向になることがわかる。一方、全ての土質に対する関係式である式(3)を用いると、N値の推定精度が高いことがわかる。

今回ボーリング調査を実施した範囲は、観察上は砂質土主体であるものの、粘土または砂の分類が難しい中間土様の緩い地盤であった。写真-3に示されるとおり、貝

殻片や礫分を多く含む層や、粘性土が互層となった層が含まれ、砂層であっても0.9以上の高い間隙比を示す土も確認された。砂分と粘土分をともに有意に含む中間土(砂分の重量含有率が50～80%程度)は、砂か粘土かに明確に分類できず、中間的な性質を持っていることが知られている¹¹⁾。道路橋示方書に示される砂質土に対する関係式である式(2)を用いると、N値が3割程度高く推定されるのは、当該地点の土質として、砂質土やレキ質土に分類されるものの、粘性土が有意に含まれることに起因するのではないかと考えられる。一方、土質を問わず適用される式(3)は、このような土質に対しても十分な推定精度を有することが分かる。

図-8に、ボーリング調査で得られた粒度組成を示すとともに、標準貫入試験で得られたN値と、式(3)によりVsを換算したN値を比較して示す。標準貫入試験で得られたN値のばらつきは幾分大きいものの、S波速度から換算されたN値は、岸沖方向の測線において、実測値と概ね一致することがわかる。

今回は一般的な関係式を用いてVsからN値を推定し

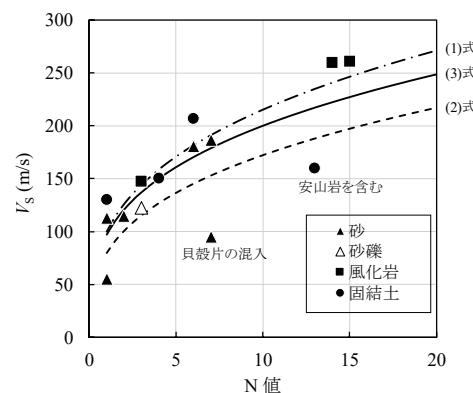


図-7 N値とVsの関係



写真-3 Bor.11地点の表層部のコア採取写真

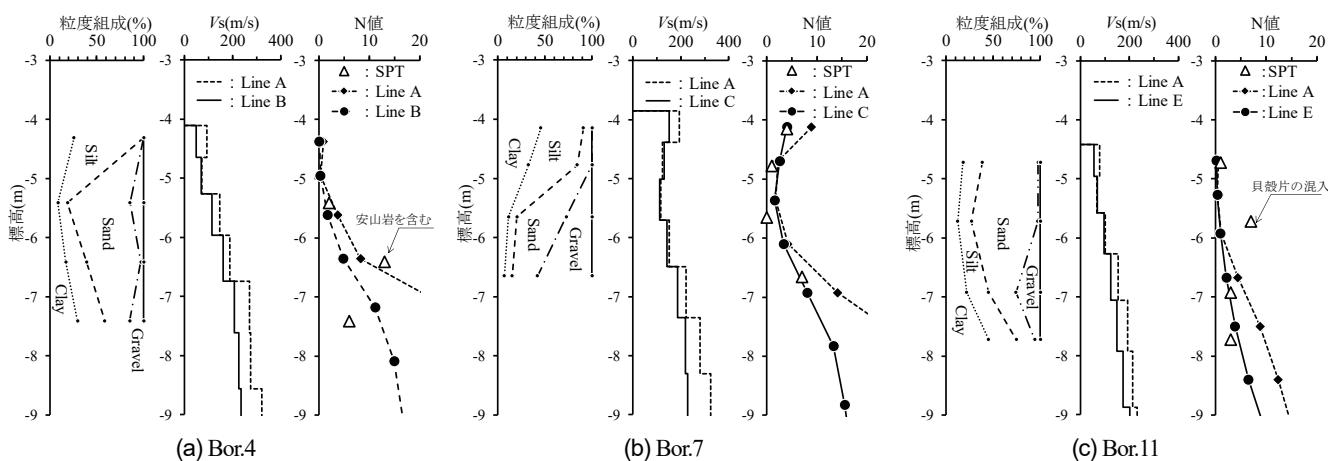


図-8 N値から推定したVsと水中表面波探査で得られたVsとの比較

ているが、地点毎に土質特性を考慮した関係式を構築すれば、より精度の高いN値分布が得られると考えられる。

(2) 重錐の形状の違いと起振効果

A測線の $x=0\sim23\text{ m}$ の区間において、受振した表面波の計測結果を図-9に示す。図において、閉塞型20 kgと格子型20 kgの重錐のケースに着目する。起振位置が $x=23.5\text{ m}$ の波形記録(図-9(a)の上段と中段)によると、表面波の伝播距離に関しては両者に大きな違いは見られない。いずれも起振位置から10 m以上離れた場所では振動が計測されておらず、表面波が伝播していないことがわかる。この現象は土質の変化に起因するものと考えられる。起振位置 $x=23.5\text{ m}$ から $x=12\text{ m}$ までの表面波の到達時間は、0.15~0.2秒程度であり、軟らかく砂相当の土質と考えられる。 $x=0\sim10\text{ m}$ の区間ではさらに軟弱な土質に急激に変化するために、表面波のエネルギーが吸収され、減衰したと考えられる。

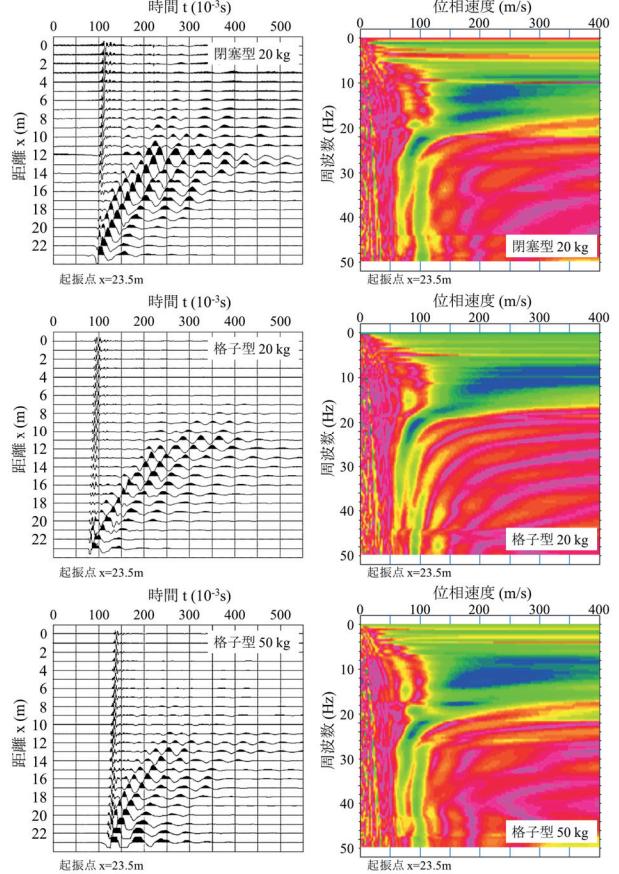
図-9(b)(上段と中段)は、図-9(a)における全波形記録を用いて、周波数一位相速度領域での振幅スペクトルを求めたものである。図中の色は振幅スペクトルの大きさを表しており、桃色が最小、青色が最大の大きさを示す。青系の色で示される振幅スペクトルの大きい箇所の連続性や一意性、基本モードから分裂して現れる高次モードの発生特性から判断すると、格子型20 kgの方が分散曲線を定めやすく、位相速度を精度よく決定できると考えられる。すなわち、整流板が取り付けられ、水中落下時の姿勢の安定性を保ちやすい重錐形状の方が、安定した表面波を発生させるためには効果的であると言える。

(3) 重錐の質量の違いと起振効果

図-9において、格子型重錐のケースに着目し、20 kgと50 kgの結果を比較する。振源位置が23.5 mにおける波形記録(図-9(a)の中段と下段)によると、伝播距離に関し両者に大きな違いは見られない。起振位置近くの波形を観察すると、格子型50 kg重錐の波形は、計測能力の上限に達している状況が見られ、やや過剰なエネルギーで起振させていると考えられる。図-9(b)の中段と下段は、上記の波形記録から求めた周波数一位相速度領域での振幅スペクトルを示す。前項と同様に、振幅スペクトルの大きい箇所の連続性や一意性、基本モードから分裂して現れる高次モードの発生特性から判断すると、格子型20 kgの方が分散曲線を定めやすく、位相速度を精度良く決定できると考えられる。

(4) 重錐の落下高さの違いと起振効果

A測線の受振器位置 $x=24\sim44\text{ m}$ の区間において、格子型20 kgの重錐の落下高さを0.5~3.0 mの間で5段階に変化させたケースの起振効果について検討した。振源位置



(a) 波形記録 (b) 周波数一位相速度スペクトル
図-9 異なる重錐の波形記録とスペクトル

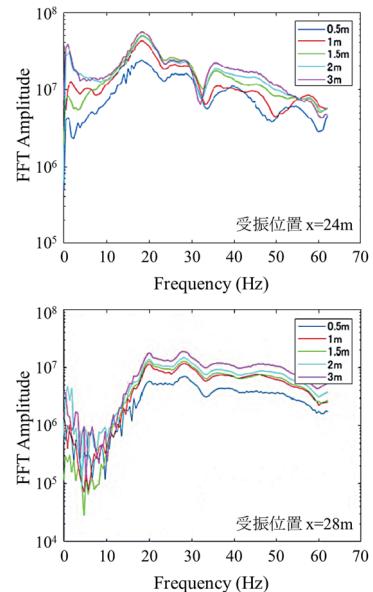


図-10 落下高さによる振幅スペクトルの違いの例

は、前項と同様に $x=23.5\text{ m}$ である。落下高さの違いにより、受振した表面波の振幅に差異が見られたため、各波形に対する振幅スペクトルを求めた。代表的な振幅スペクトルの例を図-10に示す。

周波数が15 Hz未満の低周波領域では、落下高さに対する振幅スペクトルの大きさが一部逆転しているが、15 Hz以上の領域では、落下高さとともに振幅スペクトルが増大する傾向にある。落下高さが1 m以下では、発生する

表面波が小さく解析が困難であるが、1.5 m以上の落下高さがあれば、十分なエネルギーを持った表面波が起振されることがわかる。提案する水中表面波探査において、繰り返し起振することの作業性や、適切な表面波を発生させるための起振効果を考慮すれば、落下高さ1.5 mが最も適切であると判断される。今後は、低周波数領域の表面波(5~20 Hz)をさらに精度良く取得するために、重錘の質量や形状について改良を加えていくことが望まれる。

6. まとめ

海域へ適用可能な新しい表面波探査手法として、水中表面波探査の現地試行を実施し、調査手法の有効性、ならびに最適な重錘の形状や重量について最適な条件を検討した結果、以下の結果が得られた。

- 1) 水中表面波探査により得られた S 波速度分布は、ボーリング調査や標準貫入試験によって得られた土質や N 値と概ね整合することが確認された。
- 2) 閉塞型重錘(20 kg)と格子型重錘(20 kg)による起振効果を比較した結果、周波数一位相速度領域における振幅スペクトルの連続性や一意性から、整流板が取り付けられ、水中落下時の姿勢の安定性を保つことができる格子型重錘の方が S 波速度構造を推定する上で優れていることがわかった。
- 3) 格子型重錘の質量の違い(20 kg, 50 kg)に対する起振効果を検討した結果、周波数一位相速度領域での振幅スペクトルの連続性や一意性から、20 kg の重錘の方が S 波速度構造を推定する上で優れていることがわかった。
- 4) 重錘の落下高さに対する起振効果を検討した結果、落下高さとして 1.5 m 以上必要であることが分かった。また、施工性を考慮すると、落下高さは 1.5 m 程度が最適であると判断される。

提案する探査手法が様々な沿岸部で適用され、広い

範囲で地盤情報を可視化していくことができれば、港湾構造物の設計や施工の合理化の実現に資することができると思われる。そのためにも、海象条件、地盤・土質条件の異なるさまざまな海域の地盤に適用し、多くの知見を集め、さらなる施工手順の効率化や測定精度の向上を図っていくことが今後の課題である。

謝辞：本研究の実施にあたり、洋伸建設株式会社 谷山齊氏に多大なご助力を頂きました。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 物理探査学会：物理探査ハンドブック増補改訂版、平成 28 年 6 月, pp.46-52.
- 2) 地盤工学会：地盤工学への物理探査技術の適用と事例、平成 13 年 10 月, pp.365-370.
- 3) 今井常雄、麓秀夫、横田耕一郎：日本の地盤における弾性波速度と力学的性質、第 4 回日本地震工学シンポジウム公演集、1975, pp.89-95.
- 4) 渡部要一、佐々真志、金子崇、上野一彦、山田耕一、橋本裕司：人工干潟に埋め立てられた浚渫土砂構造の時間変化：MASW による継続調査とその検証、土木学会論文集 B2, vol71, No.2, I_826-I_831, 2015.
- 5) 渡部要一、佐々真志、林宏一、山田耕一：人工干潟の安全性評価における MSAW の適用性の検討、土木学会論文集 B2, vol.66, No.1, pp.1406-1410, 2010.
- 6) 渡部要一、金子崇、佐々真志、橋本裕司、中條壮大：MASW を活用した潮上帶・潮間帶から潮下帶に至る干潟堆積土砂構造評価、土木学会論文集 B2 (海岸工学), vol.72, No.2, I_1699-I_1704, 2016.
- 7) 柳橋寛一、熊谷隆宏、上野一彦、小西千里：海底地盤に適用可能な水中表面波探査技術の開発、第 73 回年次学術講演会（平成 30 年度）、投稿中。
- 8) Hayashi, K. and Suzuki, H. : CMP cross-correlation analysis of multi-channel surface-wave data, 物理探査, 57, pp.7-13, 2004.
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、平成 24 年 3 月, pp32-33.
- 10) 今井常雄、殿内啓司：N 値と S 波速度の関係およびその利用例、基礎工, vol.10, No.6, pp.70~76, 1982.
- 11) 地盤工学会編：中間土—砂か粘土か—、丸善、平成 4 年 4 月, p.85.

(2018.2.8 受付)

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF NEW SURFACE WAVE METHOD APPLICABLE TO THE UNDERWATER GROUND

Tomokazu YANAGIBASHI, Takahiro KUMAGAI, Kazuhiko UENO
and Chisato KONISHI

The geotechnical properties related to strength or rigidity of ground is very important in the design and construction of civil engineering structures. As a method to acquire the velocity of shear wave correlated with N-value and undrained shear strength, a new surface wave method which is applicable to the underwater ground was proposed. The results of on-site trials at seafloor indicated that the estimated S-wave velocity distribution tends to agree with the profiles of soil type and N-values obtained by drilling surveys and the standard penetration test. The proposed method is expected to be an effective tool for the geotechnical investigation of seabed, and to be an applicable for better design and construction.