

波動を利用した海底地盤の剪断弾性率計測装置 (BSMP) の開発
Development of Bottom Shear Modulus Profiler

安藤功一*・鈴木英男**

Koichi Ando, Hideo Suzuki

ABSTRACT The seabed shear modulus of several locations in Japan were measured by newly developed bottom shear modulus profiler (BSMP), which actually measures the ratio of the wave-induced particle motion to the wave pressure on the seafloor. Then, a linear inversion scheme is used for calculation of the shear modulus profile. Results are compared to the values obtained at the same sites by the Standard Penetration Test (SPT) using the empirical formula. The agreement between the results with BSMP and SPT is very good except at few locations, where the coherence between the pressure and the acceleration signals is low.

KEYWORDS: seabed, shear modulus, inversion, standard penetration test.

1. はじめに

海洋環境の有効利用は四方を海に囲まれた我が国にとって大きな関心と呼ぶところではあるが、同時に環境破壊をもたらす可能性もあるため開発の対象となる箇所の十分な調査は大変重要である。特に沖合人口島などの建設にあたっては広範囲の海底地盤調査が不可欠である。従来は、ボーリング、標準貫入試験、音波探査、弾性波探査等の海底地質調査法が用いられている。ところがボーリングでは採取段階で物性が変化して海底の自然の状態での測定は不可能で、標準貫入試験とともに足場の建設による時間、費用が無視できないという問題がある。また、音波探査法では硬い層の下で軟弱層の観測は困難であったり、弾性波による探査法では実験および解析が複雑であるなど、大規模の調査には最適であるとはいえない。そこで本研究では最近開発されたこれに代わる簡便かつ経済的な海底地盤の剪断弾性率計測装置の紹介とその測定結果の信頼性について検討する。本研究で取り上げる海底地盤の剪断弾性率計測装置はボトムシェアモジュラスプロファイラ (略称 BSMP) と呼ばれ、山本らによって提唱された。その後 BSMP の原理および理論についてはいくつかの研究がなされているため、本研究ではその詳細には言及せず装置の性能評価および結果の信頼性に焦点を当てる。

2. 調査法の原理

図 1 に重力波伝播のモデルを示す。海底地盤は常に重力波による圧力変動を受けているため、その表面には振幅をもった運動が励起される。ここで海底地盤をいくつかの深さ方向に変化する剪断弾性率をもつ層の集まりと考えると、海水面の運動の変位と海底地盤表面の運動の変位の関係 (アドミタンス) を導くことが可能である¹⁾。またその逆に、海底面の変位と水圧を計測して、その関係から線形逆演算により剪断弾性率を求めることも可能である。逆演算における解の唯一性および収束性は既に検討されている²⁾。

3. 計測装置

新しく開発された海底地盤計測装置は次のような特徴をもつ。

- ◇剪断弾性率とそれより推定した N 値が 2、3 時間で求められるため、従来の標準貫入試験よりはるかに短時間でしかも経済的に地盤の強度を推定できる。
- ◇海底の水深に関係なく測定が可能である。
- ◇得られた剪断弾性率より剪断波速度や間隙率の推定が可能である。
- ◇砂礫層等の下部の状態も探査可能である。

本装置の外観図を図 2 に示す。圧力センサーを除く計測システムは $\phi 434 \times 340$ (突起部を含まず。単位 mm) のステンレススチールの耐圧容器に納められており、外形寸法は $900 \times 900 \times 340$ (W $\times$ L $\times$ H) である。海底とのカップリングを良くするために長さ 400mm の足が 6 本取り付けられている。

* (株)小野測器音響技術研究所 (〒226 横浜市緑区白山 1-16-1)

** (株)小野測器音響技術研究所

測定装置は海底面の垂直方向の加速度と水圧の周期で2～20秒の帯域を10時間にわたって内部メモリに記録することが可能である。計測の手順は簡単で、全ての操作はラップトップコンピューターを使用して行うことができる。まずセンサーからの波形をモニターし動作状態を確認し、計測開始の指示をして切り放し、海底に沈める。2～3時間後に装置を引き上げてコンピューターを接続し、記録されたデータを解析する。解析は記録波形の状態を確認してノイズなどを含んだ悪いデータを取り除き、アドミタンスを計算した後逆演算を行うという手順で行われる。解析の途中では装置の傾斜やセンサーの特性等に対する補正も行われる。解析の過程や結果はリストやグラフとして印刷が可能である。

4. 実地試験

BSMP が考案されてから国内外で多くの実験が行われ、BSMP の有用性が報告されている。Trevorrow らは堆積砂や有機沈積物の海底での実験で BSMP の有用性を確認している。また Badiey らの実験で軟かい粘土や砂における有用性を確認している。³⁾

鈴木らが行った実験の結果を図3に示す。⁴⁾ 実験の結果は標準貫入試験によるN値と比べてもBSMPにより海底地盤の剪断弾性率を精度よく測定できることを示している。

Badiey らの実験は複雑に入り組んだ防波堤に囲まれた地点で行われ、高いコヒーレンスのデータが取れたにもかかわらず深い層の剪断弾性率は他の方法と一致していない場合もあった。これは反射波の影響等によって理論で用いた重力波伝播モデルの仮定が満たされなくなることによると思われる。よって非常に狭い湾内など特殊な地点ではN値やボーリングなどの方法との併用で有効性を確認することが望ましい。

5. BSMP の信頼性

前章で述べたようにBSMPによる海底地盤の剪断弾性率の測定値は殆どの状況で標準貫入試験による値と良く一致しているが、BSMP法の精度については余り良く議論されていない。Trevorrow らはBSMPに用いられる逆演算の精度について理論的な考察を加えているが、精度の実用的な解析法については触れていない。また実際に記録されたアドミタンスデータはノイズを含んでいるため逆演算の過程での誤差を生む可能性がある。そこで実用上の見地からBSMPの結果を検討した。

逆演算で求められた浦安沖の剪断弾性率プロファイルの一部を変更し、その海底地盤に対するアドミタンスを計算した。その結果、異なる層ごとに同じ割合で剪断弾性率を変えた場合、深い層を変えた時程アドミタンスの変化が少なくなりついにはその変化がなくなる。これより変化がなくなる層より深い層の結果の信頼性は低いといえよう。例えば浦安沖のデータでは、深さ18mにある厚さ4mの層の剪断弾性率を50%増加させたときアドミタンスは約10%減少したが、40メートル以深にある厚さ5mの層を変化させたときは

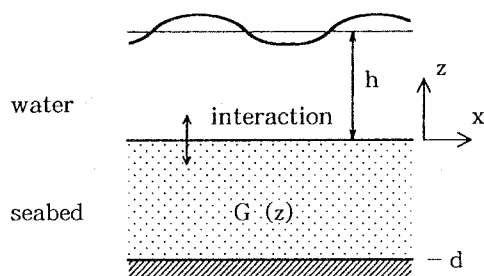


図1 重力波伝播モデル

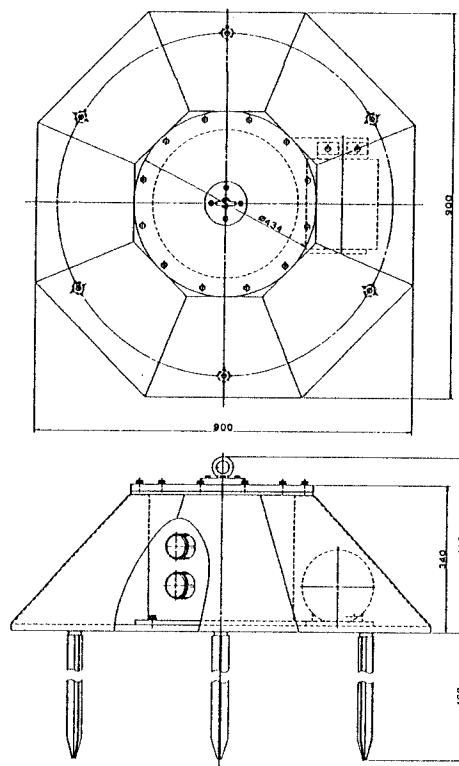


図2 海底地盤計測装置外観図

多くとも数%以下の変化であった。Trevorrow らによれば得られた剪断弾性率が信頼できる深さの限界はアドミタンスデータに含まれる波の最長の波長の $1/2$ 程度とされている。浦安沖のデータ解析に使用した波の波長の最大値は126mであったが、前述の計算結果より40m以深の剪断弾性率は多くの誤差を含んでいる可能性があるといえる。実際のデータの質等の条件の違いにより実用上測定できる最大の深さは変わってくるが、その定量的な研究は今後の論文で紹介したい。

6. まとめ

実地試験および理論計算の結果より BSMP の信頼性について以下の結論に達した。

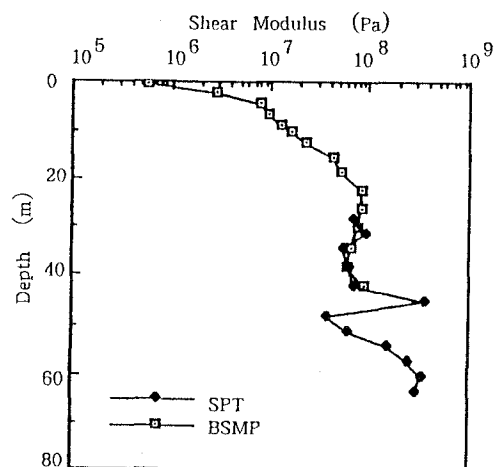
- 1) BSMPにより、海底地盤の剪断弾性率の計測が短時間に行うことができる。
- 2) 入り組んだ入江の内部などの特殊な地形を除き、得られた海底地盤の剪断弾性率の信頼性は高い。
- 3) 特殊な地点での利用の可否は1~2点のN値、ボーリング等の方法との比較により確認できる。

7. 謝辞

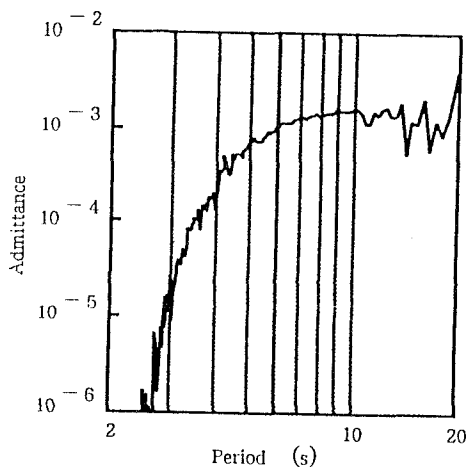
最後に本研究に多大な協力を賜りました、マイアミ大学山本教授、東海大学海洋学部土木工学科浜田教授、北原助教授に感謝致します。

参考文献

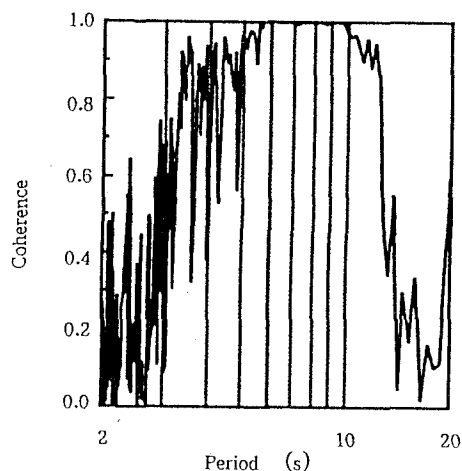
- 1) Yamamoto, T., (1983). Numerical integration method for seabed response to water waves, Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (2), 2, 92 - 100.
- 2) Yamamoto, T. and Torii, T., (1986). Seabed shear modulus profile inversion using surface gravity (water) wave - induced bottom motion, Geophys. J. R. astr. Soc., 85, 413 - 431.
- 3) Trevorrow, M. V. and Yamamoto, T., (1990). Summary of marine sedimentary shear modulus and acoustic speed profile results using a gravity wave inversion technique. Submitted to J. of the Acoustical society of America.
- 4) 鈴木英男、山本督夫、モーセン バディーイ「波動を利用した海底地盤の剪断弾性率の計測」日本音響学会誌 46 巻 1 号 (1990), 68 - 73



(a) 剪断弾性率プロファイル



(b) アドミタンス



(c) コヒーレンス

図3 浦安沖実験結果