

舞鶴工業高等専門学校 正会員 前野 賀彦
京都大学 農学部 正会員 長谷川高士

1. まえがき

海底油田を代表とする海洋資源の開発および海洋空間の有効利用と言う観点から、海洋構造物の果たす役割は、重要なものとなっている。そこで、海洋構造物の設計に際しては、波浪や海流などの作用力、海底地盤の物理特性および力学的特性、その他海洋環境の特殊性に起因する多くの問題を解決する必要がある。著者らは、以前よりこのような波浪を受ける構造物の基礎および海底地盤そのものの安定性の検討を行って来た。

その一つの考え方として、有効応力の理論に基づいて海底地盤の安定性を検討しようとする場合には、波浪により引き起こされる海底地盤内の間隙圧の発達特性、並びに海底地盤の土質特性に関する知識を必要としている。

そこで、海底地盤内の間隙圧の発達特性については、まず、従来提案されている理論をまとめるとともに¹⁾、造波水槽を用いた室内実験を行うことにより、波浪による海底地盤内の間隙水圧の発達特性を明らかにする試みを示した^{2), 3)}。それは、浅海域では、沖波が海岸に接近するにしたがって、深海域では一定と考えられる波形勾配が増加すると言う特性に着目し、海底地盤内に発達する間隙水圧を波形勾配を用いて整理した実験式を提案した。さらに、提案した実験式による推定値と従来の各種理論との比較を行い、提案した実験式が実測値と良い一致を示すことを明らかにした⁴⁾。

さらに、実際に福井県大飯郡高浜町難波江浜に観測地点を設け、波浪により引き起こされる海底砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動を測定し、それらの周波数分析により、長周期波の方が砂層内への圧力伝播特性に優れ、位相遅れ時間が大きく、従来言われている長周期波が海底地盤の不安定性に重要な役割を示すと言う経験的事実を裏付ける結果が得られた⁵⁾。

他方、海底地盤の土質特性については、まず、波浪による間隙圧の原位置測定に関する研究と併せて、従来の研究をまとめた⁶⁾。それらの研究によれば、海底地盤表面で、波浪の作用によるものと考えられる底質の移動が認められ、ミシシッピデルタでは、大規模な土塊の移動も観測されていることから、このような比較的浅い海底地盤における土質特性に関する知識を得ることは興味のあるところである。しかし、陸上における高盛土構造物などとは異なり、海底地盤は、海水中にあり、その生成の過程の特殊性から、非常に緩い状態にあり、超低拘束圧下にあると考えられている。そのため、ボーリング等による試料採取法が色々と考え案されてはいるものの、試料採取に際して生ずる練返しと膨潤による影響が大きく、得られた結果に対する信頼性が問題となっている。また、試料が得られたとしても、海底地盤が超低拘束圧下にあることから、要素試験を行うことには多くの困難を伴っており、原位置試験の重要性が認識されている。

そこで、著者らは、難波江浜にて原位置計測した海底砂層表面の波圧変動と、海底砂層中の間隙水圧変動とのスペクトル比が、不規則波浪の各周波数成分についての波圧の砂層中での減衰特性を示すと考えられることから、スペクトル比に注目して、海底地盤中での圧力の減衰特性を検討した。それは、海底地盤を、固相と液相とからなる飽和多孔質体と考え、それが線形弾性固体として挙動し、作用する変動の周波数が、粘性流体の効果が無視できる程度に低いものであるとの仮定が成り立つものとして、海底砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動との関係を理論的に導いた⁵⁾。さらに、今回、この理論式と原位置観測した海底砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動とのスペクトル比とを比較することにより、海底地盤の土質特性の推定を行った。さらに、以上推定された海底地盤の土質特性について、詳細な検討を加えると共に、その有用性を示した。以前行った予備的観測結果について、海底地盤の土質特性の推定を行った結果については、既に一部報告している⁷⁾。その後、著者らは、海底地盤表面付近の波浪による底質の浮遊流出、および洗掘の防止のための Rubber の利用に関する実験的研究を行っている⁸⁾。

2. 実験概要

表-1 難波江砂の特性

Specific gravity	2.70
Uniformity coefficient	1.53
Effective grain size	0.114 mm
Average grain size	0.160 mm
Permeability	0.023 cm/s

著者らが、以前より海岸断面の季節的变化、底質の物理的特性などの検討を行ってきており、予備的観測も、既に行っていることから、原位置における測定は、福井県大飯郡高浜町難波江浜において行った。難波江浜の砂の特性は、表-1 に示した。相当均等な砂であることがわかる。

著者らが、以前行った予備的観測においては、間隙圧測定用の圧力変換器は、直接砂層中に埋設されたが、今回は、図-1 に示すように間隙圧測定プローブを用いた。この間隙圧測定プローブは、先端角30度のコーンを先端に取り付

けた直径26mm、長さ250cm のパイプを用い、先端から15cmのところに圧力変換器を埋め込んだもので、低拘束圧下にある比較的浅い砂層中の間隙圧を測定することにより砂層表面付近の土質特性を得ようと考えていることから、33cm(1985年8月9日)と37cm(1985年8月10日)の砂層深さにおいて間隙圧を測定した。なお、このプローブは、50cmの延長パイプを接続することにより相当深い地盤深度での測定にも対応している。また、それらの圧力変換器は、防水ゴム被覆を施した延長ケーブルによって陸地に設置したブリアンプ、データレコーダに接続した。

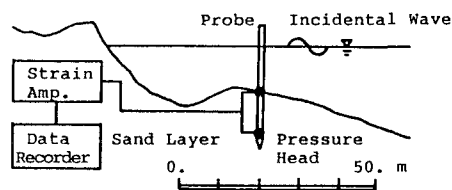


図-1 間隙圧の測定

3. 測定結果の周波数分析結果と考察

著者らが、以前行った予備的観測結果についてと同様に海底砂層中および砂層表面で観測した間隙圧変動および波圧変動について周波数分析を行った。図-2に、1985年 8月9日および10日に測定した砂層表面および砂層中33cm(8.9)および37cm(8.10)の所における圧力変動の振幅変化を、それぞれ示した。

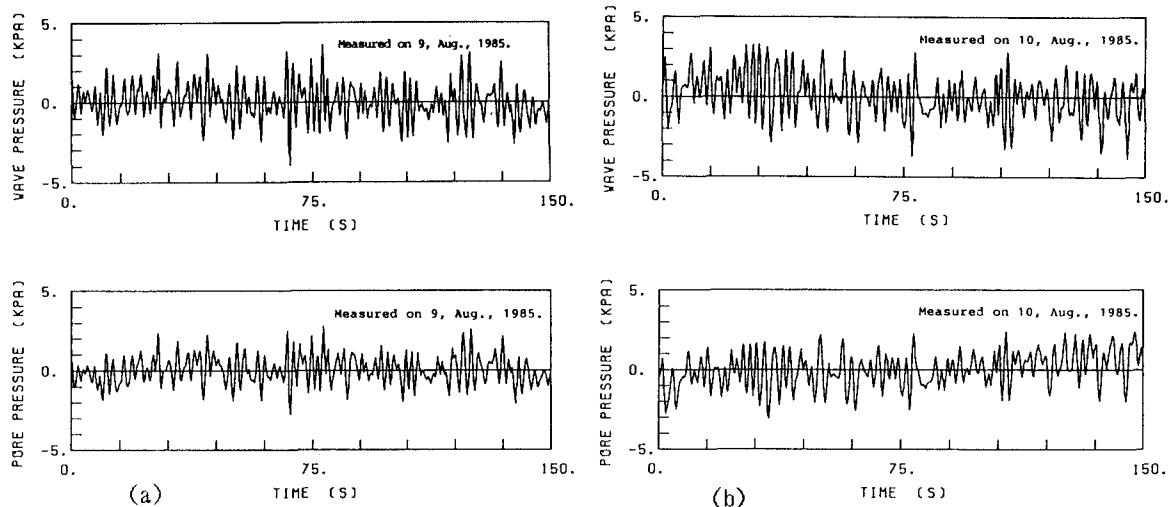


図-2 砂層表面の波圧変動および砂層中の間隙圧変動

図-3に示すFFTの結果によれば、砂層上の波圧変動のパワースペクトルにおける 0.6Hzから1.0Hzの周波数成分は、砂層中の間隙圧変動のパワースペクトルにおいてほとんど認められず、砂層中で減衰してしまったものと思われる。このことは、砂層表面での圧力変動の内、比較的高い周波数成分の減衰が大きいという造波水槽を用いた実験結果と同様の傾向を示している。なお、FFT を行うにあたっては、サンプリング点数を1024点とし、サンプリング間隔を0.15秒としたので、ナイキスト周波数は3.33Hzとなる。海の波は低周波であり、1.0Hz以下の周波数成分について検討を行おうとする場合には、周波数分析結果に問題はないものと考えられる。

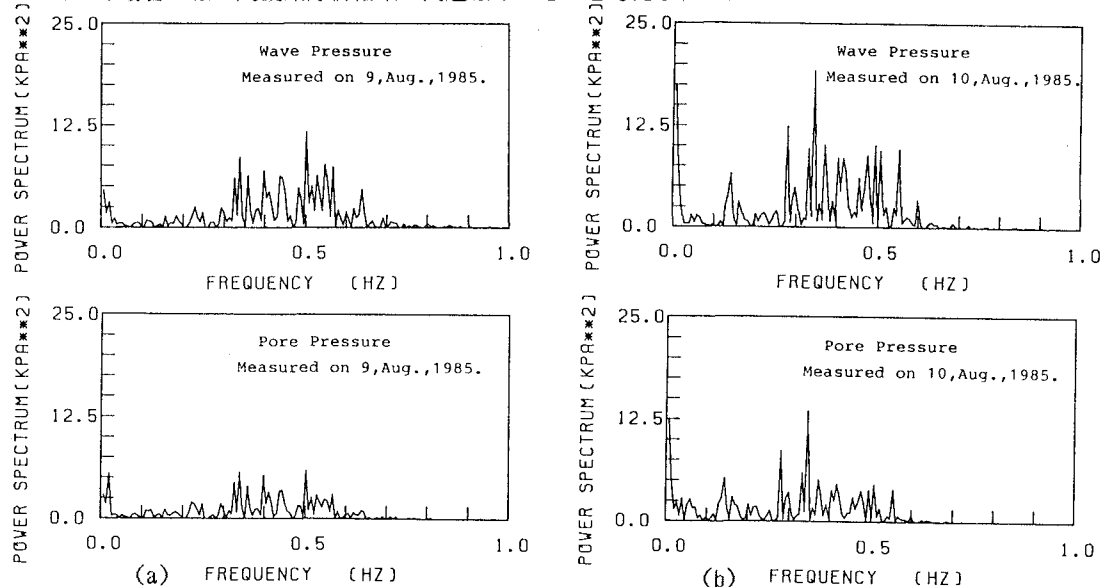


図-3 波圧変動と間隙圧変動のパワースペクトル

砂層中と砂層表面における二つの圧力変動の間のコヒーレンスおよびフェイズを、それぞれ図-4、5に示した。それによると、コヒーレンスは、0.6 Hz付近までは、1.0の値を示しているが、それ以上の周波数域では変動している。このことは、0.6 Hz付近を境にして、圧力の伝播特性が異なることを示唆しているものと思われる。また、フェイズについては、0.6 Hz以上で大きく変動しているのが認められるが、0.6 Hz以下の範囲では、ほぼ一定値($\pi/2$)をとっており、フェイズが二つの圧力変動の間の時間遅れと角振動数とを掛け合わせたものであることから、周波数が小さくなれば二つの変動の間の時間遅れが大きくなる。このことは、従来言われているように、長周期波が、波浪による砂層の安定性に影響を及ぼすとされていることを裏付けるものである。また、周波数応答関数について、図-6に示した。それによると、0.6 Hz以上では変動が大きくなっているが、1.0 Hz以下では全体として直線的な減少傾向にある。このことは、低い周波数成分の砂層中への伝播性が優れていることを示している。

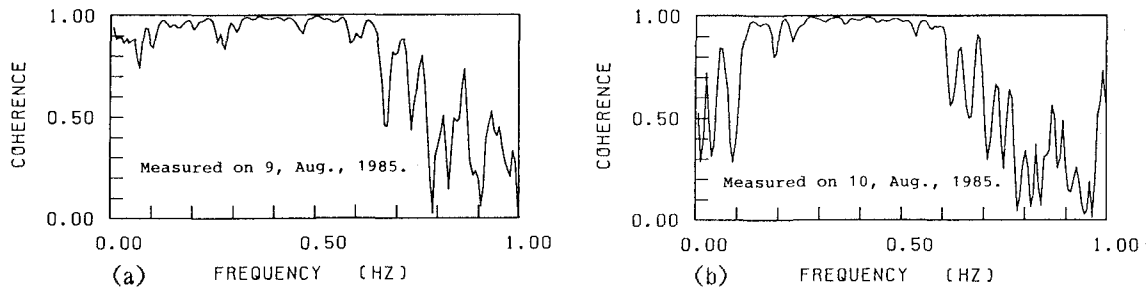


図-4 波圧変動と間隙圧変動との間のコヒーレンス

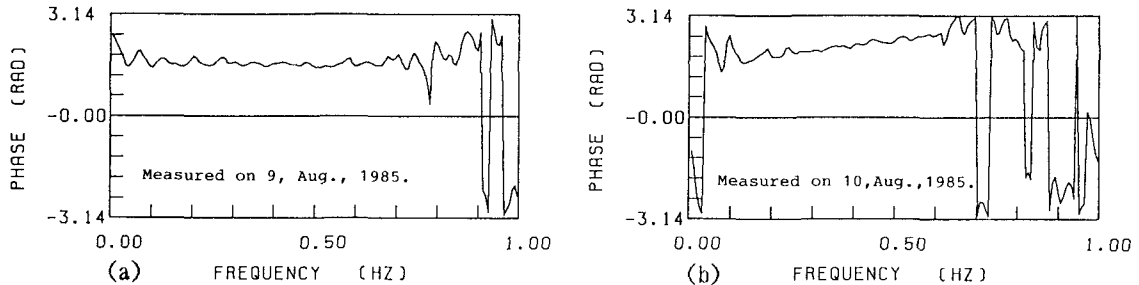


図-5 波圧変動と間隙圧変動との間のフェイズ

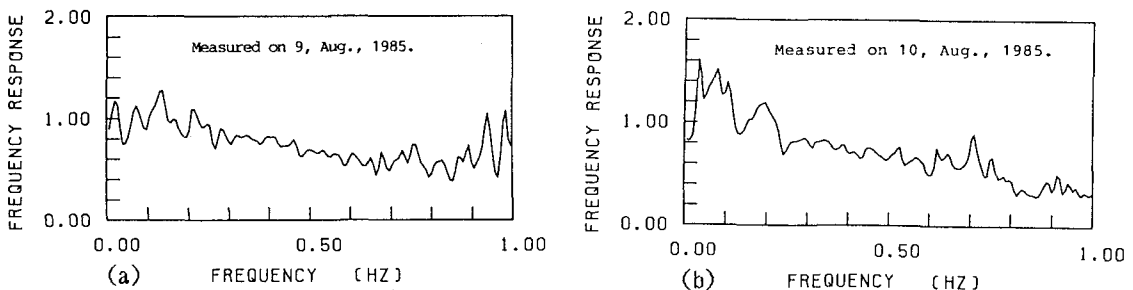


図-6 波圧変動と間隙圧変動との間の周波数応答関数

4. 間隙圧変動と波圧変動との間の理論的相関の誘導

地盤内の間隙圧と地盤運動との関係における一次特性の多くは、弾性波の伝播理論を用いて理解される。すなわち、固相と液相からなる飽和多孔質媒体において、それが、1) 線形弾性固体として挙動し、2) 作用する変動の周波数が、粘性流体の効果が無視出来る程度に低いものであることなどの条件を満たすものとするれば、弾性波により引き起こされる間隙圧は、Jeagar & Cook⁹⁾によれば、飽和多孔質媒体に関する相反作用理論により、次式のように固体の体積ひずみに比例することが推論される。

$$P = \{ K_f(K_s - K_c) / [n(K_s - K_f)] \} \epsilon \quad (1)$$

Kf: 流体の体積弾性係数、Ks: 固体の体積弾性係数、Kc: 飽和混合体の体積弾性係数、n: 間隙率

Mavko and Harp¹⁰⁾は、地盤表面の水平加速度と鉛直加速度をそれぞれS波、P波についての体積ひずみと関連付けることにより、間隙水圧と加速度を直接結び付けて理論的考察を行っている。彼らは、1980年に起きたカリフォルニアのマノモース湖での地震時に計測された飽和砂中の弾性波により引き起こされる間隙圧の記録を解析している。その中で、彼らは、P波とS波について、それぞれ間隙圧と表面の鉛直および水平加速度とのスペクトル比を示している。

一方、著者らは、砂層表面の変動圧力と海底砂層地盤の体積ひずみとを結び付けて検討を試みた。そこで、平面ひずみ状態における地盤表面の圧力変動と地盤の体積ひずみとの関係を以下に求めた。まず、波浪作用下の海底地盤の変位は、本来、Biot¹¹⁾の弾性波の伝播理論に基づくYamamoto¹²⁾の理論により求めるものであるが、今回砂層海底地盤を対象としており、海洋波浪の周期は、1Hz以下であることなどから、Zienkiewicz¹³⁾によるところのBiot¹⁴⁾の圧密理論に基づくYamamoto¹⁵⁾の理論による結果と同じ解を与えることになる。

そこで、海底地盤の変位は、 $T = P_0 \exp[i(\lambda x + \omega t)]$ の調和載荷を地盤表面に受ける時、(2)、(3)式で表わされる。

$$U = i \{ m [i(1-2\nu)\omega'' - 1-2(1-\nu)N''] \exp(-Nz) / [-N'' + i(1+m)\omega''] - [1-mN'' / [-N'' + i(1+m)\omega'']] N z \exp(-Nz) + m \exp(-N'z) / [-N'' + i(1+m)\omega''] \} (P_0 / 2NG) \exp[i(Nx + \omega t)] \quad (2)$$

$$W = \{ [1+m\{1+(1-2\nu)(i\omega'' - N'')\} / [-N'' + i(1+m)\omega'']] \exp(-Nz) - [1-mN'' / [-N'' + i(1+m)\omega'']] N z \exp(-Nz) - m(1+N'') \exp(-N'z) / [-N'' + i(1+m)\omega''] \} (P_0 / 2NG) \exp[i(Nx + \omega t)] \quad (3)$$

$$\text{ここで、} \quad N'^2 = N^2 + i\omega(\gamma/k) \{ n/K' + (1-2\nu)/[2(1-\nu)G] \} \quad (4)$$

$$\beta = (1-\nu)/(1-2\nu) \quad (5)$$

$$\omega' = \omega/c \quad (6)$$

$$\omega'' = \beta(\omega' / N^2) \quad (7)$$

$$c = (k/\gamma) \{ n/K' + (1-2\nu)/[2G(1-\nu)] \} \quad (8)$$

$$m = nG/[K'(1-2\nu)] \quad (9)$$

$$N'' = (N' - N) / N \quad (10)$$

$$1/K' = 1/K + (1-Sr)/Pa \quad (11)$$

K' : 間隙流体の見掛けの体積弾性係数、 K : 間隙流体の真の体積弾性係数、 ν : ポアソン比、 n : 間隙率、 G : 砂のせん断弾性係数、 ω : 角振動数、 Sr : 飽和度、 U, W : x 方向および z 方向変位、 Pa : 絶対間隙圧したがって、体積ひずみは、次式のように表わされる。

$$\varepsilon = \partial U / \partial x + \partial W / \partial z = \{ -[(1-Nz)(1+m) + m(1-2\nu)](-N'' + i\omega) \exp(-Nz) + mN'' \exp(-N'z) \} P_0 \exp[i(Nx + \omega t)] / \{ G[-N'' + i(1+m)\omega''] \} \quad (12)$$

上式において、 $P_0 \exp[i(\lambda x + \omega t)]$ は、地盤表面での調和変動圧力であることから、上式は、体積ひずみと地盤表面の調和変動圧力との関係を求めたことになる。したがって、(1)式と(12)式から、間隙水圧と地盤表面の調和変動との関係を(13)式のように求めることが出来る。

$$P = Kf(Ks - Kc) \{ -[(1-Nz)(1+m) + m(1-2\nu)](-N'' + i\omega) \exp(-Nz) + mN'' \exp(-N'z) \} T / \{ nG(Ks - Kf)[-N'' + i(1+m)\omega''] \} \quad (13)$$

5. 海底砂層地盤の土質特性の推定

著者らは、(13)式に示すとおり、海底砂層中の間隙圧変動と砂層表面の波圧変動との間の理論モデルを誘導した。この理論式は、波浪の各周波数成分ごとの任意の砂層内地盤深度での波圧変動の振幅の減衰の割合を表わすと考えられる。また、一方では、実際に原位置観測した間隙圧変動と波圧変動とのスペクトル比が、砂層表面での波圧変動の砂層中での減衰比を表わすと考えられる。以上のことから、提案した間隙圧変動と波圧変動との間の理論式と実際に観測した間隙圧変動と波圧変動とのスペクトル比とが一致するように、理論式中の各土質定数の値を求めることにより、海底地盤の土質特性を推定しようと考えた。

ここで、(13)式中に含まれるいくつかの土質定数は、海底地盤中の弾性波の伝播速度を測定することにより、次式で与えられる。式中、 V_p, V_s は、それぞれ圧縮波とせん断波の伝播速度である。また ρ は、地盤の密度である。

$$\nu = \{ (V_p/V_s)^2 - 2 \} / 2 \{ (V_p/V_s)^2 - 1 \} \quad (14)$$

$$G = \rho V_s^2 \quad (15)$$

$$K = \rho V_p^2 - 4/3 \rho V_s^2 \quad (16)$$

しかしながら、海底地盤中の弾性波の伝播速度が、いつも得られるとは限らない。今回の原位置観測においても測定は行っていない。そこで、従来の知識に基づいてポアソン比などの土質定数の幾つかを推定することにし、その値に基づいて他の土質定数を求めることにした。それらの土質定数の内、流体や固体骨格を構成する鉱物の体積弾性係数は典型的な値を与えることができ、表-2に示した。

まず、未知の土質定数の内、ポアソン比についてであるが、石原¹⁶⁾によれば、飽和土のポアソン比は、せん断定数 μ が1000kgf/cm²以下ではほとんど変化はなく、0.49から0.50の範囲にあるとしている。また、Hamilton¹⁷⁾によるところの海底地盤で実測された速い圧縮波とせん断波の速度を用いて、(14)式により推定されたポアソン比は、海底地盤表面付近では、0.49から0.50の範囲にあり、石原の結果と同様の結果を導いている。そこで、本研究では、こ

これらの考察に基づいて、ポアソン比の値を、0.495とした。したがって、せん断弾性係数は、(17)式により体積弾性係数と対応付けられる。

$$G = 3(1-2\nu)Kc/[2(1+\nu)] \quad (17)$$

また、海底地盤の間隙率は、Yamamoto¹²⁾によれば、0.35から0.45の範囲にあるものとされており、河村¹⁸⁾による海洋底質の粒径と間隙率の関係においても、表-1に示す平均粒径に対応する間隙率は0.35から0.45の範囲に分布している。この間隙率の値について、著者らは、室内実験の結果に基づいて検証した。それは、著者らの行った文献5に示した造波水槽を用いた波浪による砂層内の間隙圧の発達特性に関する研究において、砂層中の間隙圧変動の振幅と砂層表面での波圧変動の振幅との比を減衰比と定義し、1.0 Hz以下の周波数域については、図-7に示すように、減衰値と波の周波数との間に負の線形関係が近似されるものとして、その傾きと砂層の密度との関係を、図-8に示した。それによると、砂層の密度が増加するにしたがって、傾きは減少しており、その割合は、密度が大きくなるにしたがって小さくなっている。

また、原位置において観測した間隙圧変動と波圧変動とのスペクトル比についても、それが周波数の増加に伴い直線的に減少しているものと仮定するとき、その傾きをスペクトル比と周波数の関係から読み取り、その傾きに対応する砂層の密度を、外挿ではあるが、図-8より推定することにした。今回の観測の結果については、傾きを1.0とすると、砂層密度は、1.51 t/m³となり、間隙率は、0.44と推定された。この値は、先に示したYamamotoや河村の結果と矛盾するものではなく、一つの密度の推定方法となるのではないだろうか。

以上の考察の結果、ポアソン比、せん断弾性係数、間隙率および流体と固体骨格を構成する鉱物の体積弾性係数を、表-2のように与えることができる。したがって、(13)式中の混合体の体積弾性係数と砂層の飽和度を理論式とスペクトル比が一致するように与えることにより推定できる。

本研究の例においては、砂層の飽和度として、97%~99%の範囲の値が推定された。この値は、Esrig & Kirby¹⁹⁾の結果とも矛盾するものではない。また、体積弾性係数は、4.9~5.0 10⁹ Paの範囲の値が推定された。この値も、緩い砂層の体積弾性係数の値としては、妥当なものである。今後、観測地点を変えて原位置観測を行い、広範囲な地盤にも、これらの考え方が適用可能であるか検討を行いたい。

図-9に以上の考察を踏まえて求められた砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動との間の理論推定曲線と、著者らが、難波江浜で観測を行った砂層中の間隙圧変動と砂層表面の波圧変動とのスペクトル比を示した。それによれば、周波数応答関数が、周波数に対して負の線形関係を示していることから、砂層表面の波圧変動と砂層中での間隙圧変動のスペクトル比は、周波数の増加に伴い二次関数的に減少していることになる。理論推定曲線との関係では、0.6Hz以下の長周期波においては、(13)式による理論予測値と実測値によるスペクトル比は良い一致をみている。したがって、比較的低周波域

表-2 予測計算に用いた諸数値

Bulk modulus of fluid, Kf	2.0 10 ⁹ N/m ²
Bulk modulus of mineral grains, Ks	3.6 10 ¹⁰ N/m ²
Bulk modulus of composite, Kc	4.9-5.4 10 ⁹ N/m ²
Poisson's ratio, ν	0.495
Porosity, n	0.35-0.45

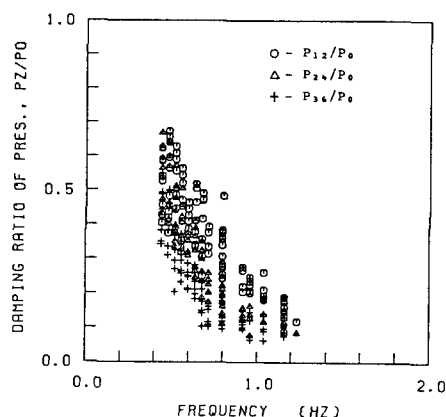


図-7 減衰比と周波数の関係

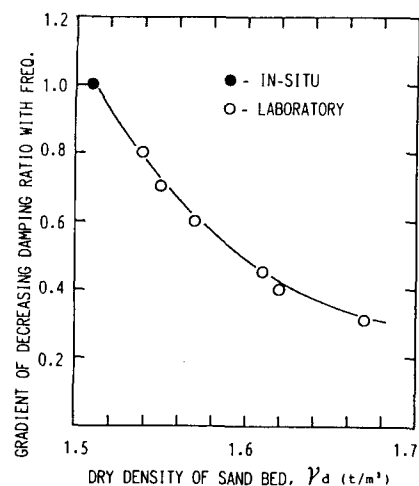


図-8 砂層の密度の減衰比による推定

図-9に以上の考察を踏まえて求められた砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動との間の理論推定曲線と、著者らが、難波江浜で観測を行った砂層中の間隙圧変動と砂層表面の波圧変動とのスペクトル比を示した。それによれば、周波数応答関数が、周波数に対して負の線形関係を示していることから、砂層表面の波圧変動と砂層中での間隙圧変動のスペクトル比は、周波数の増加に伴い二次関数的に減少していることになる。理論推定曲線との関係では、0.6Hz以下の長周期波においては、(13)式による理論予測値と実測値によるスペクトル比は良い一致をみている。したがって、比較的低周波域

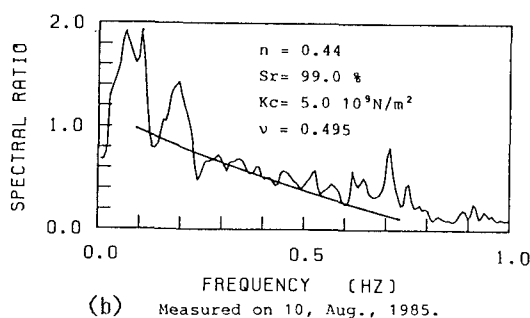
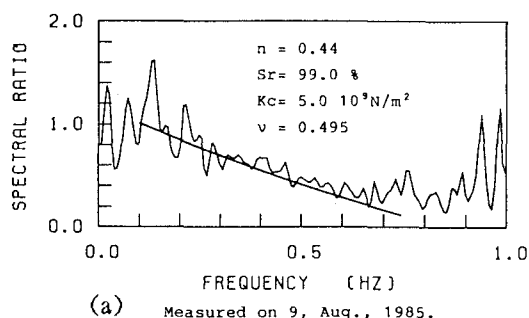


図-9 間隙圧変動と波圧変動のスペクトル比と理論推定地の関係

の波浪に対して、このような海底地盤の土質特性の推定方法は適用可能と考えられる。

6. まとめ

以上の考察の結果、以下に示す結論が得られた。

1. 波浪により引き起こされる砂層表面の波圧変動は、低い周波数成分の方が、高い周波数成分と比べて、大きな割合で間隙圧変動として、砂層中に伝播する傾向にある。
2. 砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動の間の位相は、周波数の増加に対して一定となっている。したがって、波圧変動中の低周波成分の方が、位相遅れ時間が大きい。
3. 砂層表面の波圧変動の砂層中への減衰の割合を減衰比として、その比と周波数の間の関係から、砂層の密度を推定する試みを示した。
4. 砂層地盤を飽和多孔質体として、それが、線形弾性固体として挙動し、作用する変動の周波数が、粘性流体の効果が無視できるほど低いものであると仮定することにより、波圧変動と間隙圧変動との理論的相関を導いた。
5. 提案した間隙圧変動と波圧変動との間の理論関係式と、原位置観測した間隙圧変動と波圧変動とのスペクトル比を一致させることにより、砂層の体積弾性係数と飽和度を推定した。

参考文献

- 1) 前野賀彦、長谷川高士：波浪作用下の海底地盤内の間隙水圧の特性、第10回海洋開発シンポジウム論文集、pp.151-156、1985。
- 2) 前野賀彦、長谷川高士：波浪による砂層内の間隙水圧の特性、第31回海岸工学講演会論文集、pp.596-600、1984。
- 3) Maeno, Y., and Hasegawa, T.: Characteristics of Wave-Induced Pore Water Pressure in Sand Layer, Proc. of Int. Symposium on OceanSpace Utilization, Ocean Space'85, Tokyo, pp.475-484, Jun.1985, Springer-Verlag.
- 4) Maeno, Y., and Hasegawa, T.: Evaluation of Wave-Induced Pore Pressure in Sand Layer by Wave Steepness, JSCE, Coastal Engineering in Japan, Vol.28, pp.123-136, 1985.
- 5) 前野賀彦、長谷川高士：波浪作用下の海底砂層内に発生する間隙水圧の伝播特性、第32回海岸工学講演会論文集、pp.273-277、1985。
- 6) 前野賀彦、長谷川高士：波浪による砂層内の間隙水圧の伝播特性、第20回土質工学講演会講演集、pp.1493-1496、1985。
- 7) 前野賀彦、長谷川高士：波浪による間隙圧発達特性に基づく海底地盤特性の推定、第35回応用力学連合予稿集、pp.157-160、1985。
- 8) 前野賀彦、長谷川高士：Rubberに覆われた砂層内に発達する間隙水圧の特性について、第21回土質工学講演会講演集、1986。
- 9) Jaeger, J.C., and N.G.W.Cook: Fundamentals of rock mechanics, Methuen, London, England.
- 10) Mavko et al.: Analysis of wave-induced pore pressure change recorded during the 1980 Mammoth Lakes, Calif. earthquake sequence, Bull. of the Seismological Soc. of Am., Vol.74, No.4, pp.1395-1407, 1984.
- 11) Biot, M.A.: Generalized theory of acoustic propagation in porous dissipative media, J. of Acoust. Soc. of Am., Vol.34, pp.1254-1264, 1962.
- 12) Yamamoto, T. et al.: Hydro-geo mechanics of interactions between Water wave and sediment beds, Part 1- Laboratory experiments on wave induced pore pressures and stresses in sand beds and wave damping by soft clay beds, Technical Report prepared for National Science Foundation TR81-2, Univ. of Miami, 1981.
- 13) Zienkiewicz, O.C. et al.: Drained, undrained consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils, Geotechnique, Vol.30, No.4, pp.385-395, 1980.
- 14) Biot, M.A.: General theory of three-dimensional consolidation, J. of Appl. Phys., 12, pp.155-164, 1941.
- 15) Yamamoto, T., et al.: On the response of aporo-elastic bed to water waves, J. of Fluid Mechanics, Vol. 87, Part 1, pp.193-206, 1978.
- 16) Ishihara, K.: Approximate forms of wave equations for water-saturated porous materials and related dynamic modulus, Soils and Foundations, Vol.10, No.4, pp.10-38, 1970.
- 17) Hamilton, E.L.: Vp/Vs and Poisson's ratio in marine sediments and rocks, J. of Acoust. Soc. of Am., Vol. 66, pp.1093-1101, 1979.
- 18) Komura, S.: Bulk properties of river bed sediments and its applications to sediment hydraulics, Proc. of Jap. Nat. Cong. for Appl. Mech. 1961.
- 19) Esrig, M.I., and Kirby, R.C.: Implications of gas content for predicting the stability of submarine slopes, Marine Geotechnology, Vol.2, pp.81-100, 1977.