

間隙圧の発達特性への砂層と水の境界付近のエネルギー損失の影響

舞鶴工業高等専門学校 土木工学科 正会員 前野 賀彦
京都大学 農学部 農業工学科 正会員 長谷川高士

I. まえがき

波浪により引き起こされる砂層内の間隙水圧の発達特性への、砂層と水の境界付近のエネルギー損失の影響の検討を行うために、造波水槽を用いた室内実験を行った。それは、波圧の砂層中への伝播時における圧力変動の振幅変化および位相特性に注目したものである。この様な問題は、最近、Okusa¹⁾により指摘されているが、著者らの海底地盤の安定性の検討を目的とした、波浪により引き起こされる砂層内の間隙水圧の発達特性に関する一連の研究においても見出され、著者らも²⁾、その検討の必要性を指摘している。それらの一連の研究について簡略に述べると、まず、造波水槽を用いた室内実験を行うことにより、波浪により引き起こされる砂層内の間隙水圧を、波形勾配を用いて整理した³⁾。それは、波形勾配が一定と考えられる沖波が浅水域に侵入する時、波形勾配が増加するという経験的事実に基づいたものである。その結果、提案した実験式は、near shore問題に適用可能なものである。さらに、この波形勾配で整理した実験式を、従来提案されている各種理論式と比較し、それが地盤の異方透水係数比を仮定したSleathの理論式と同様の減衰特性を示すことを明らかにした⁴⁾。さらに、以上得られた波浪により砂層内に引き起こされる間隙圧の発達特性に関する知識について詳細な検討を加えると共に、著者らが、以前提案した実験式をより一般的な砂層内の間隙圧の評価が可能となるように発展させた⁵⁾。他方、低拘束圧下にある海底地盤表面付近の土質特性に関する知識を得るために、波浪により引き起こされる地盤内の間隙圧発達特性に着目して原位置において海底地盤表面の波圧変動と地盤内の間隙圧変動を測定し、それらの周波数分析を行った⁶⁾。その分析結果の中で、特に波圧変動と間隙圧変動とのスペクトル比に着目して、海底地盤の土質特性を推定する試みを示した⁷⁾。さらに、周波数分析によれば、砂層表面の波圧が砂層中へ伝播する際に位相が生ずる事実も指摘された。

以上の砂層中の圧力伝播特性に関する室内実験および現場試験において認められた位相は、その解釈において、多くの困難を伴っている。実際に室内実験において、実験波浪の条件により砂層表面の砂粒子は前後進運動を開始し、砂れんを形成すると共に、水中に遊離し浮遊することが観察される。ところが、これらの現象と砂層中の間隙圧の発達特性との関連を検討するには、個々の要因を分離し単純化する必要がある。この位相を含む圧力の伝播特性は、砂層と水の境界面付近における複雑なエネルギー損失の影響をうけているものと思われる。例えば、影響因子として、1) 砂層表面の砂れん、2) 浮遊砂の濃度、3) 砂層中の境界層の厚さ、4) 砂層の変形等が考えられる。今回、このような砂層中の圧力の伝播特性に影響を及ぼすと考えられる因子について、ジオメンブレンを実験砂層表面に覆った造波水槽による実験を行うことにより検討を試みた。

II. 実験概要

実験は、著者らが以前行った³⁾ものと同様に、図-1に示す造波水槽を用いて行った。なお、砂層の厚さ D_s は36cmとしたので砂層上の水深は $D-D_s$ となる。この場合、砂層の長さの影響を排除するために、砂層長 L_s は9.0mとした。また、ジオメンブレンとして、厚さ0.5mmと1.0mmのラバーを用いた。表-1に示したとおり、密度の異なる三種の砂層について、それぞれ次の三つの条件で行った。(1) 砂層表面にラバーの覆いが無いもの、(2) 砂層表面に厚さ0.5mmのラバーの覆いがあるもの、(3) 砂層表面に厚さ1.0mmのラバーの覆いがあるもの。

ここで、(2)、(3)のラバーで砂層を覆う場合には、砂層とラバーの間への空気および水の侵入を極力防いだ。このことにより、砂層表面の砂れんおよび浮遊砂の波浪による砂層内の間隙圧の伝播特性への影響を取り除くことができるものと考えた。また、実験には福井県大飯郡高浜町難波江浜

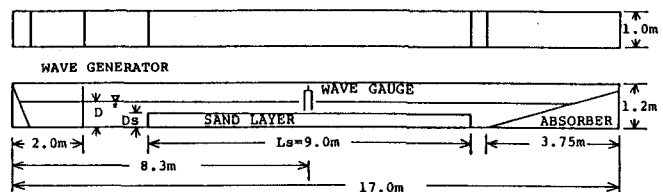


図-1 造波水槽の概要

表-1 実験条件

Case	Dry density (tm^{-3})	Length of bed (cm)	Water depth (cm)	Rubber (mm)
(I)	1.55	900.0	41.0	No
(II)	1.55	900.0	41.0	0.5
(III)	1.55	900.0	41.0	1.0
(IV)	1.55	900.0	46.0	No
(V)	1.55	900.0	46.0	0.5
(VI)	1.55	900.0	34.0	No
(VII)	1.55	900.0	34.0	0.5
(VIII)	1.57	900.0	41.0	No
(IX)	1.57	900.0	41.0	0.5
(X)	1.57	900.0	41.0	1.0
(XI)	1.62	900.0	41.0	No
(XII)	1.62	900.0	41.0	0.5
(XIII)	1.62	900.0	41.0	1.0

の砂を用いた。その物理特性は、表-2に示した。以後難波江砂と呼ぶことにする。

また、砂層中の間隙圧は、ポーラスキャップ付きの圧力変換器を、図-2に示すように砂層中に埋設し測定した。この場合、ポーラスキャップ中の脱気に注意を払った。

図中で、Pz とあるのは、砂層深度 z における間隙圧変動の振幅を表わしている。

表-2 難波江砂の特性

Specific gravity	2.70
Permeability	0.023 cms ⁻¹
Uniformity coefficient	1.53
Effective grain size	0.114 mm
Average grain size	0.160 mm

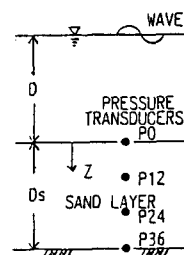


図-2 圧力変換器の配置

III. 実験結果と考察

3.1 波形勾配による砂層中の間隙圧の減衰特性の評価

波浪により引き起こされる砂層中の間隙圧の発達特性を検討するためには、なんらかの定量的な評価法が必要とされる。そこで、本節において、著者らが提案しているところの波形勾配による間隙圧の発達特性の評価法について、砂層長の影響を極力排除した実験結果を用いて述べることにする。

著者らの以前の研究によれば、(1) 式により表わされる第2次近似のストークス波理論により推定される砂層表面の波圧変動の振幅で除した砂層中の間隙圧変動の振幅で定義される圧力比は、同一の砂層条件においては、作用する波の周期と波高に依存している。圧力比は、周期の増加に伴って増加し、波高の増加に伴って減少することから、波形勾配に依存していることが認められた。

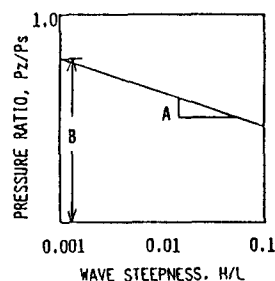
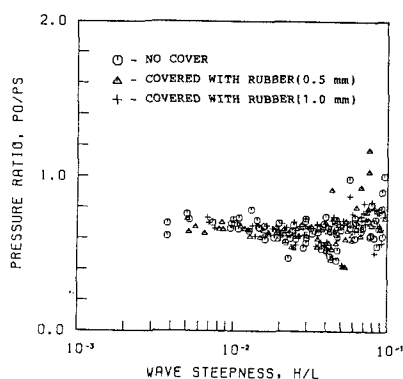


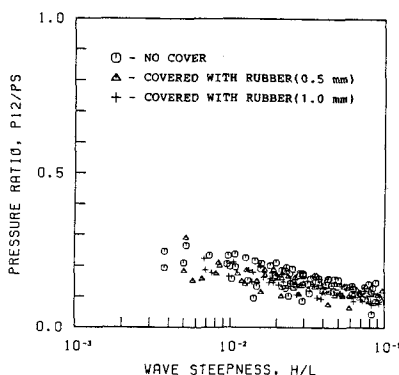
図-4 係数の定義

$$P_s = \rho g H / 2 \cosh(ND) - 3 \rho g H^2 \tanh(ND) / 16 \sinh^2(ND) [1 / \sinh^2(ND) - 1/3] - \rho g H^2 \tanh(ND) / 16 \sinh^2(ND) \quad (1)$$

ここで、Nは波数であり、 ρ は水の密度、gは重力の加速度、Hは波高である。



(a) $P_0/P_s - H/L$



(b) $P_{12}/P_s - H/L$

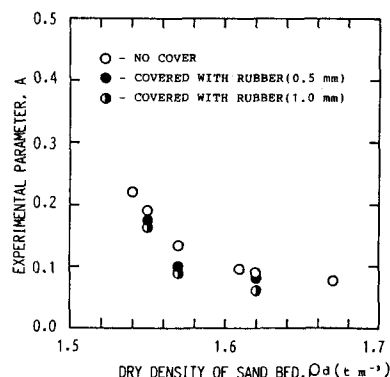
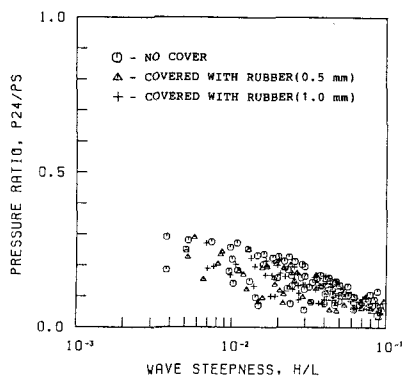
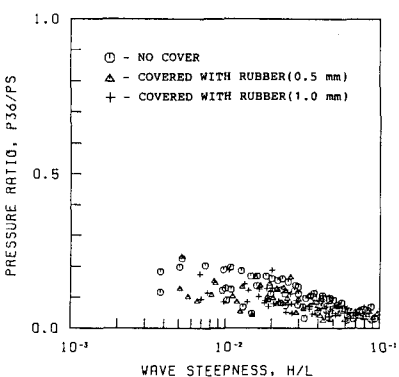


図-5 係数Aと砂層密度の関係



(c) $P_{24}/P_s - H/L$



(d) $P_{36}/P_s - H/L$

図-3 砂層中の間隙圧発達特性への波形勾配の効果

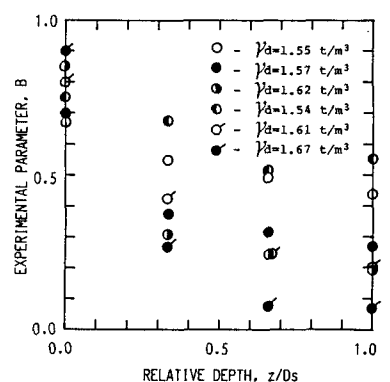


図-6 係数Bと相対深度の関係

砂層深度 z での測定圧 Pz と第2次近似のストークス波理論による砂層表面の推定圧 Ps との圧力比 Pz/Ps と、波形勾配 H/L の間の関係を図-3に示した。図-3に示される圧力比と波形勾配の間の近似的な線形関係に着目して、

著者ら³⁾は次式に示す波形勾配により整理した実験式を提案している。実験式中の係数A、Bは、図-4に示す関係より求められたものである。

$$P_z/P_s = -A \log(H/L+3)+B \quad (2)$$

ここで、係数Aは、ほぼ砂層の排水特性により決められるパラメータであり、波形勾配の増加に伴う圧力比の減衰の割合を示している。図-5によれば係数Aは砂層の密度の増加に伴い減少している。また、係数Bは砂層中への圧力の減衰の割合を示しており、この値も密度の影響を受けている。図-6に以前報告した結果³⁾と併せて、砂層深度 z を砂層厚さ D_s で、除した相対深度 z/D_s との関係を示した。それによれば、以前報告した結果と同様に、相対深度の増加に伴い、係数Bの値は、指数関数的な減少傾向にあり、その傾向は、密な砂層ほど大きい。

係数Bは、砂層深度 z を砂層厚さ D_s で除した相対深度 z/D_s の増加に伴い指数関数的に減少するものとみなし、図-7に示すBの対数値と z/D_s の関係から、(3)式中の係数 B_0 、 B_1 の値を求め、より一般的な形に発展させた。

$$P_z/P_s = -A \log(H/L+3) + \exp(B_0 + B_1(z/D_s)) \quad (3)$$

なお、係数 B_0 、 B_1 の値と砂層の密度との関係を図-8に示した。それによると、係数 B_0 は、密度の増加に伴い減少傾向にあり、その割合は緩い砂層ほど大きい。また係数 B_1 は、密度の増加に対して線形的な増加傾向にある。

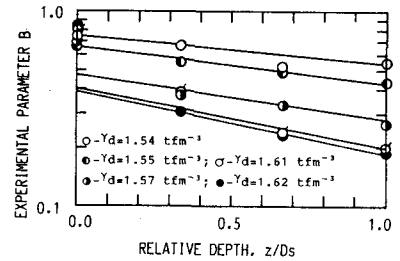


図-7 係数Bと相対深度の関係

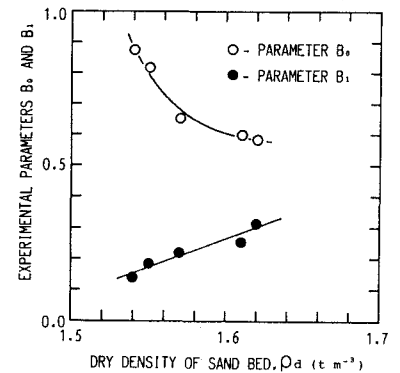


図-8 係数 B_0 、 B_1 と密度の関係

3.2 波圧の砂層中における減衰特性へのラバーの効果

砂層中への水の浸透を抑え、波浪による砂れんの生成を制限するために、砂層の表面にラバーを覆った場合の実験を行った。この様な状況は、実際の海底地盤においても考えられるものである。それは、海底地盤が、砂、シルト及び粘土から成り、しばしば、それらが互層をなし、不透水層により覆われた砂層が存在し得るからである。また、海洋構造物の基礎の洗掘の防止のために、最近、ジオテキスタイルが用いられているが、それが、細かい粒子の土砂により目詰りを起こし、その結果、期待される透水性を保持し得なくなることが考えられる。そこで、ラバーに覆われた砂層中の間隙圧の発達特性について、従来提案している波形勾配により整理された実験式を用いて考察することにする。

まず、図-9に砂層表面の測定波圧変動の振幅と(1)式により推定される第2次近似のストークス波理論による推定圧との関係を示した。それによれば、以前報告した結果³⁾と同様に、密な砂層ほど砂層表面の波圧が大きくなり、砂層表面での測定圧は、第2次近似のストークス波理論による推定圧と同様の値を示しているが、緩い砂層では波圧が大きくなるに従って測定圧が推定圧よりも次第に小さくなっている。また、ラバーの有無の影響については、図-9に示す通り若干ではあるが砂層表面がラバーに覆われている場合には、砂層表面の波圧は、ラバーで覆われていない場合に比べて減衰している。また、その傾向は、密な砂層ほど大きく、緩い砂層では、ほとんど認められない。これは、緩い砂層では、波浪の作用により砂の骨格全体が、ラバーと一緒に運動し変形することによるものと考えられる。他方、密な砂層では砂骨格の変形は生じにくく、そのためにラバーによる減衰が生じるものと思われる。

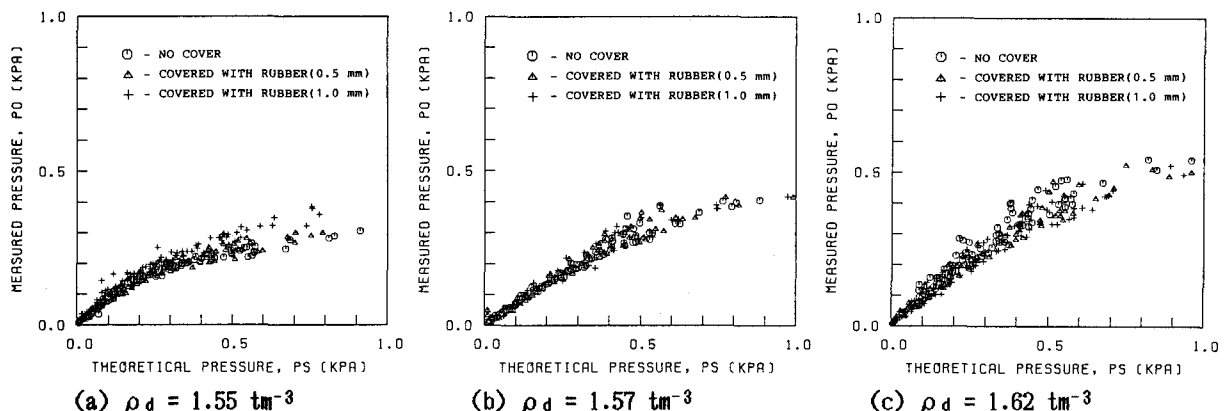


図-9 ラバーで覆われた砂層表面での理論圧と測定圧との比較

図-5によれば係数Aは砂層の密度の増加に伴い減少している。それは、0.5 mmおよび1.0 mmのラバーを砂層表面に覆った場合についても、ラバーで覆われていない場合と同様の傾向を示している。なお、係数Aの値はラバーが厚いほど小さくなっている。したがって、ラバーが厚いほど波形勾配による圧力の砂層中での減衰が小さいことを示している。

さらに、図-10によれば、砂層中への圧力伝播においても砂層表面がラバーに覆われている方が圧力の減衰が大きく、その割合はラバーが厚い程また密な砂層ほど大きい。しかしながら、全体的にラバーの効果がさほど認められないことから、波浪により引き起こされる砂層内の間隙圧の発達、圧力伝播により説明されるものと思われる。

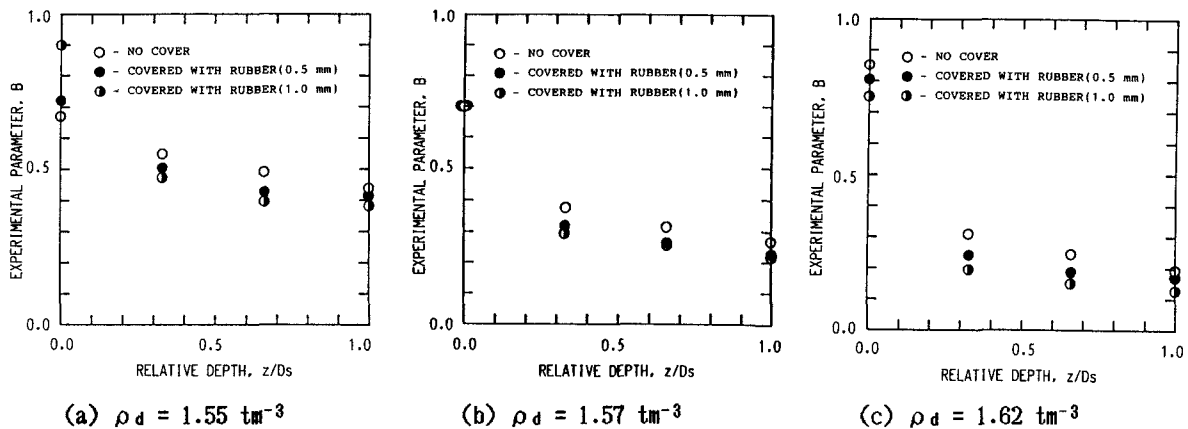


図-10 ラバーで覆われた砂層における係数Bと相対深度 z/Ds の関係

3.3 砂層中の境界層厚

従来から多くの研究者により、移動床の研究が行われているが、著者らの一連の実験においても、波浪の作用を受けた砂床の表面の砂は、前後進運動を開始し、その作用に伴い砂れんを形成し、さらに砂れんの形状に沿った複雑な流況を形作り、ある波浪条件に至ると、砂粒子は砂床から遊離し浮遊砂となる。このような観察に基づけば、波浪により引き起こされる砂層表面の波圧変動並びに砂層中の間隙圧変動は、ここで指摘した複雑な水と砂層の境界付近のエネルギー伝播の影響を受けているものと思われる。本来、このような観察が著者らの提案している砂層中の間隙圧発達特性を示す実験式に反映されるべきであるが、移動床の研究自体が多くの検討されるべき問題点を含み大きな研究課題であることを考えると、簡単に解決できるものではない。しかしながら、砂層中の間隙圧の発達特性問題において、このような観察との関連を無視し続けることは困難である。

そこで、敢てこのような観察に対して、著者らがどの様に考え、取り組もうとしているかを示すことは、有意義であると考えられる。以下にその一端を述べることにする。

波浪の作用を受ける砂層は、表面付近と砂層中とは、排水特性が異なっているものと考えられる。表面付近では、砂層表面からの排水が容易であり、砂粒子は波浪の作用を直接的に受けて、その運動量も大きく、密度も緩い状態にあると考えられる。逆に、砂層中の深度が増すに従って排水は困難となり比較的締め固まった状態にあると考えられる。この様に考えると、砂層を何等かの合理的な条件により、表面付近とその下層に分類できれば都合が良いと考えられる。著者らは、このような状況を間隙圧の伝播特性を通じて理解しようと考えた。実際に造波水槽を用いた室内実験において測定された波圧変動の砂層中での減衰特性は、従来の多孔質弾性地盤の仮定に基づく各種理論式により推定される波圧変動の減衰特性と比べて、砂層表面付近で、間隙圧は急激に減衰し、その後、その減衰の割合は減少し、ほぼ一定のようにみなされるものである。このことから、表面付近の砂層とその下層とは、圧力の減衰のメカニズムが異なるのではないかと推論がなされる。

Mei & Foda⁸⁾は、海底地盤表面に境界層を仮定して海底地盤内の応力及び間隙圧を求めている。その結果予測される間隙圧の値が、Yamamoto⁹⁾の観測値と一致するものとしている。彼らの境界層厚の定義式を以下に示す。

$$\delta = (kG/\omega)^{0.5} [nG/K_f' + (1-2\nu)/2(1-\nu)]^{-0.5} \quad (4)$$

ここで、 δ は境界層厚であり、 G はせん断剛性率、 k は透水係数、 ν はポアソン比、 n は初期間隙率、 K_f' は見かけの体積弾性係数、 ω は角振動数である。上式において、 ω は観測波浪の有義波周期より、次式に従い求めることができる。

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T_{1/3} \quad (5)$$

さらに、上式における各土質特性値は、それぞれ実験及び理論的考察により得られるものである。例えば、透水係数は砂については定水位透水試験により得られ、粘土やシルトについては変水位透水試験により得られる。以下の考察においては、定水位透水試験により求めた透水係数を用いた。しかしながら、Okusa等¹⁰⁾によれば、振動流の作用する砂層の透水係数は、振動流の周波数に依存していることを、実験結果に基づいて指摘している。それによれば、この透水係数の周波数依存特性は、周波数 0.2Hz 以上において認められるとしている。砂層表面に作用する波圧変動により、砂層表面付近において振動流が発生しているものと考えられることから、著者らが、従来行っている造波水槽による実験において起波される波の周波数が、0.44Hz～1.67Hz の範囲であるので、実際には砂層の透水係数は、周波数に依存しているものと考えられる。この点に関しては、今後の課題と言える。

また、間隙率 n は、比較的容易に実験的に求めることができる平均粒径から、Hamilton¹¹⁾ の平均粒径と間隙率の関係に基づいて求めることができる。この間隙率の予測については、著者らも砂層中の間隙圧の減衰特性に基づいて求める方法を提案している。その結果、両者は良く一致することが確認された。

また、ポアソン比は、Hamilton¹²⁾ の弾性波伝播速度の実際の海底地盤における測定の結果に基づいて、次式により予測される。

$$\nu = \{ (V_p/V_s)^2 - 2 \} / \{ (V_p/V_s)^2 - 1 \} \quad (6)$$

ここで、 V_p は圧縮波の伝播速度で、 V_s はせん断波の伝播速度である。それによると、ポアソン比は、砂層表面付近で、0.495 程度の値を予測している。

さらに、混合体の体積弾性係数 K は、著者らが提案している予測法により求められる。それは、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を不規則波の減衰比と定義して、それと理論的に導かれた地盤表面の調和圧力変動と地盤中の間隙圧変動との関係式とが一致するように関係式中の飽和度と混合体の体積弾性係数を求める方法である。したがって、せん断剛性率は次式により求められる。

$$G = 3K(1 - 2\nu) / [2(1 - \nu)] \quad (7)$$

したがって、任意の波浪作用下における、Mei & Foda⁸⁾ の定義による砂層中の境界層厚を求めることができる。そこで、造波水槽を用いた実験により得られた結果に基づいて、波圧変動の砂層中での減衰特性と境界層厚との関係を調べることにした。ただし、上記の方法は、原位置観測された砂層表面の波圧変動と砂層中の間隙圧変動についての不規則波を対象とした手法である。今回、造波水槽を用いた室内実験結果について考察しようとする場合に、個々の不規則波について求められた砂層表面の圧力変動の振幅と砂層中の間隙圧変動の振幅との比を減衰比として、上記の方法により飽和度と混合体の体積弾性係数を求めた。さらに、原位置観測結果についてのモデルは、無限層厚のものである。造波水槽中に造られた砂床は有限厚であるが、ここでは、砂層表面付近の減衰特性について考察することから、その影響が小さいものとして、無限厚のモデルをそのまま用いた。

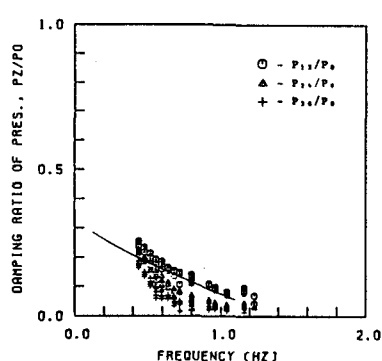


図-11 減衰比と周波数の関係

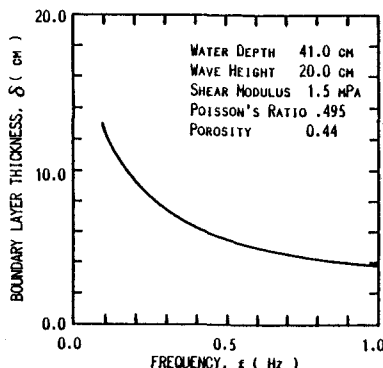


図-12 境界層厚と周波数の関係

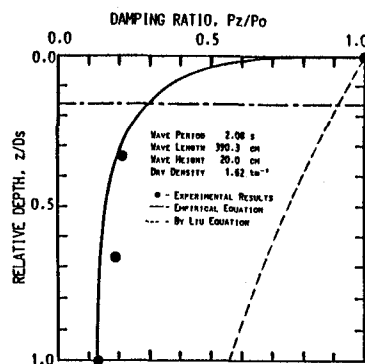


図-13 間隙圧の減衰特性と境界層厚

図-11は、個々の規則波について求められた減衰比と周波数の関係の一例である。砂層表面付近の土質特性を知る目的から、最も上層の砂層中深度12cmのところの減衰比を用いて、図中の曲線により示される理論値から飽和度と体積弾性係数を求めた。図-12は、図-11に示した例における境界層厚と周波数の関係を示している。それによると、境界層厚は、周波数の増加に伴い、二次関数的に減少している。そこで、対応する実験の一例について境界層厚を求めて、それと間隙圧の減衰特性との比較を図-13において行った。この図は、砂層表面における圧力変動振幅で除した砂層中の間隙圧変動振幅で定義される減衰比 Pz/P_0 と砂層深度 z を砂層厚 D_s で除した相対深度との関係を示している。この図において実際に示される減衰曲線は、砂層表面において急激に減衰し、その後、減衰割合が減少し、最

終的に、ほぼ一定とみなされるものとなっている。予測される境界層厚は、一点波線で示したが、それは、急激な減衰曲線部と緩い減衰曲線部の変曲点付近にあることが認められる。以上のことから、境界層を仮定することにより、波浪作用下の砂層表面付近の間隙圧の急激な減衰特性が説明できるものとする。

したがって、この様に求めた境界層厚が、砂層中の間隙圧変動の減衰特性と対応付けられることから、今後、砂層表面付近における間隙圧の伝播メカニズムと砂層中の間隙圧の伝播メカニズムの解明に、この様な考察が役に立つものと考えられる。また、この様な間隙圧の減衰特性の異なる境界層が、波浪作用下の砂層に存在すると考えられることから、この波浪作用により発生すると考えられる境界層が砂層中の間隙圧の伝播特性に重要な役割をもつものと考えられる。

IV. まとめ

ジオメンブレンで実験砂層を覆った場合には、砂層表面の砂れんの生成が制限され浮遊砂が存在しないと考えられる。ラバーで覆われた砂層における、波浪により引き起こされる砂層表面での波圧変動の特性、およびその砂層中への伝播特性は、ラバーで表面を覆われていない砂層における場合と同様の傾向を示しており、その伝播特性は若干の乱れはあるものの波形勾配を用いた実験式により整理される。また、その発達割合は、砂層の剛性とジオメンブレンの剛性との剛性比の影響を受けていると考えられる。そこで、砂層中の間隙圧の評価に際し、より一層適用可能な形に実験式を修正した。また、砂層表面の波圧の砂層中でのラバーによる減衰が認められるが、僅かであることから砂層中の間隙圧の発達は、浸透理論によるよりは、圧力伝播理論により説明されるものと思われる。したがって、ジオテキスタイルを海洋構造物の基礎の洗掘防止および底質の侵食の防止等に用いる場合には、それが目詰りを起こして、本来供えるべき透水性の保持ができなくなった場合には、ジオテキスタイルを通じての排水が制限されることから、基礎および海底地盤の安定性の評価に際し、その取り扱いに十分注意を払う必要がある。

また、Mei & Fodaの定義による境界層が、著者らの実験結果に用いて算定され、それが、実際に測定した間隙圧の減衰特性と対応付けられることから、この境界層は、砂層表面付近の急激な間隙圧の減衰を説明するのに有効と考えられる。この様な層が波浪作用により砂層表面付近に存在すると考えられることから、この境界層厚は、砂層中の間隙圧発達特性に重要な影響を及ぼし、また、砂層表面の洗掘、侵食作用に何等かの役割を有すると考えられる。今後、この点について砂層中の間隙圧発達特性の計測と砂層表面の砂れん形状との関連に注目した実験を行うことにより検討したい。

参考文献

- 1) Okusa, S.: Wave-Induced Stress in Unsaturated Submarine Sediments, *Geotechnique*, Vol.35, No.4, 1985, pp.517-532.
- 2) 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、pp.1663-1666.
- 3) Maeno, Y. and Hasegawa, T.: Characteristics of Wave-Induced Pore Water Pressure in Sand Layer, *Proc. of Int. Sympo. on Ocean Space Utilization, Ocean Space'85*, Springer-Verlag, 1985, pp.475-484.
- 4) Maeno, Y. and Hasegawa, T.: Evaluation of Wave-Induced Pore Pressure in Sand Layer by Wave Steepness, *Coastal Engineering in Japan, JSCE*, Vol.28, 1986, pp.123-136.
- 5) Maeno, Y. and Hasegawa, T.: Evaluation of Wave-Induced Pore Pressure in Saturated Sand Bed, *Nearshore Hydrodynamics*, ASCE, 1987, (in press).
- 6) 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、1985、pp.273-277.
- 7) 前野賀彦、長谷川高士：波浪による間隙圧の伝播特性による海底砂層地盤の土質特性の推定、海洋開発論文集、Vol.2、1986、pp.61-66.
- 8) Mei, C.C. and Foda, M.A.: Wave-Induced Stresses around a Pipe Laid on a Poro-Elastic Sea Bed, *Geotechnique*, Vol.31, No.4, 1981, pp.509-517.
- 9) Yamamoto, T.: Wave Induced Instability in Seabeds, *Proceedings of ASCE Specialty Conference, Coastal Sediments '77*, 1977, pp.898-913.
- 10) Okusa, S., Nakamura, T. and Fukue, M.: Measurements of Wave-Induced Pore Pressure and Coefficients of Permeability of Submarine Sediments during Reversing Flow, *Proc. of IUTAM, Seabed Mechanics*, 1984, pp.113-122.
- 11) Hamilton, E.L.: Compressional-Wave Attenuation in Marine Sediments, *Geophysics*, Vol.37, 1972, pp.620-646.
- 12) Hamilton, E.L.: Vp/Vs and Poisson's Ratio in Marine Sediments and Rocks, *Journal of Acoustic Society of America*, Vol.66, 1979, pp.1093-1101.