

波浪により引き起こされる砂層内間隙水圧の位相特性

前野 賀彦*・徳 富 啓 二**

1. 序 論

波浪により引き起こされる砂層内の間隙水圧については、従来より多くの理論的および実験的研究がなされている（例えば、Yamamoto *et al.*, 1978; Madsen, 1978; Mei & Foda, 1981; 前野・長谷川, 1984; Nago & Maeno, 1984; Sakai *et al.*, 1988）。実験的研究の中では、砂層中における圧力の減衰特性についての報告はあるが、位相特性に関するものは少なく、報告されているものについても慎重な解釈が要求されている（Tsui & Helfrich, 1983）。それは、計測された位相遅れが、実際の現象なのか計測に伴うものなのかの解釈である。特に間隙水圧の測定にはフィルターが用いられるが、フィルター内にもわずかも気体が侵入した場合には位相遅れが生じ、実際の現象とはかけ離れたものを測定することになる。完全に脱気した状態で用いることができる要素試験とは異なり、実海浜や造波水槽内では若干の気体の混入は避けられない。そこで、著者ら(1989)は従来から用いられているフィルター（金属・プラスチック・セラミック）の位相特性を明らかにし、新たに気体が侵入してもそれを排出する機能を有したフィルターを開発した。本研究では、このフィルターを用いて砂層内の間隙水圧の精密な測定を行い砂層表面における圧力伝播の位相特性を各種波浪条件で検討した。

2. 実験の概要

長さ 17 m・幅 1.0 m の 2 次元造波水槽内に、表-1 に示す特性を有する難波江砂により長さ 8.48 m・厚さ 0.4 m の砂層を 図-1 に示すように作成した。波長に対して相当の広がりを持つ実海浜に対して、2 次元造波水槽内の砂層模型は有限の長さに制限される。そこで、この制約を緩和するために砂層の前後端に 図-2 に示す砂層と同じ透水性を有するフィルターを設置して排水を可能にした。造波機は波高 0.2 m 程度で周期 0.63 s から 2.16 s の波を起波できるものである。水深は砂層上で 0.42 m である。

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

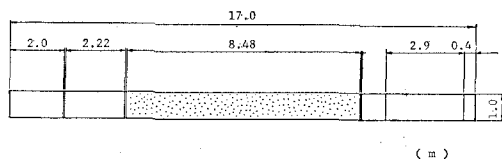


図-1 造波水槽内の実験砂層

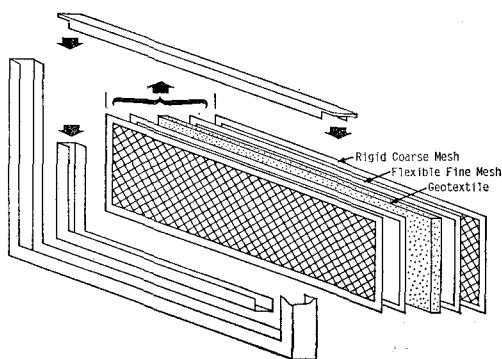


図-2 砂層フィルターの概要

図-3 に示すように砂層内に圧力変換器を設置して、砂層表面で波圧変動を、表面から 2 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm および 40 cm の深さの 5 点で間隙水圧を測定した。併せて、砂層表面から 3 cm のところで、土圧変動と間隙水圧変動を同時に測定した。

これらの間隙水圧計には、前野・徳富(1989)により開発された通常の使用条件で相定される量の気体がチャンパー内に侵入しても圧力の減衰や位相遅れが生じないフレキシブルフィルターを取り付けた。ここで言う圧力の減衰および位相遅れとは間隙水圧計のフィルターおよびチャンパー内の充填液が気体を含むことにより圧縮性と

* 正会員 農博 舞鶴工業高等専門学校助教授 土木工学科

** 正会員 株式会社共和電業 要素技術研究部

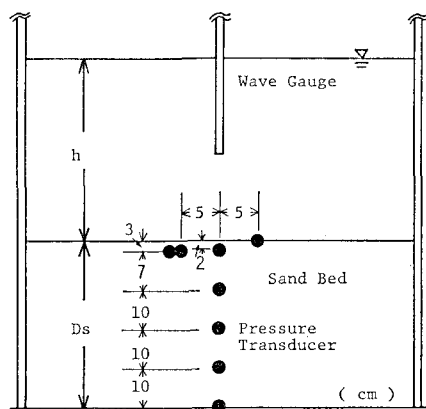


図-3 圧力変換器の配置

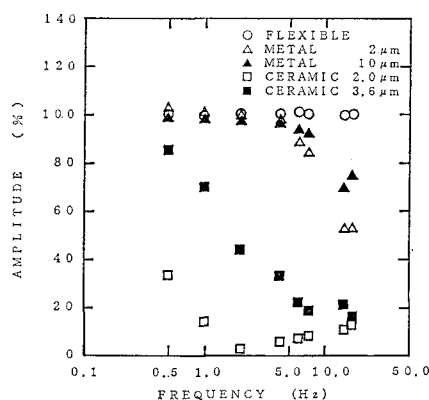


図-4 各種フィルターの減衰特性

なり測定地点の圧力変動をダイアフラムに正確に伝えな
いことに起因するものであり、フィルター前面における
圧力変動振幅とダイアフラム面における圧力変動振幅の
比を圧力の減衰とし、その間の位相のずれを位相遅れと
した。砂層内の間隙水圧の伝播における圧力減衰と位相
遅れについて検討することから、このフィルターの特性
を以下に示す。

図-4にフレキシブルフィルター、 $2.0\mu\text{m}$ 、 $10.0\mu\text{m}$ の
一般的な金属フィルターおよび $2.0\mu\text{m}$ 、 $3.6\mu\text{m}$ のセラ
ミックフィルターの圧力の減衰の割合を通常注意を払っ
て得られる条件下で比較した。それによれば、フレキシ
ブルフィルターは 20Hz 程度の周波数まで圧力減衰を引
き起こしていない。したがって、 2Hz 以下の波で行う
室内実験において圧力減衰の問題はなく、実海浜での観
測に際しても対象とする現象の周波数は 0.5Hz 以下で
あり同様に圧力減衰の問題はない。他方、従来から一般
的に普及している金属フィルターは、周波数の増加に伴
い圧力の減衰の割合が増しており、目の細かいものほど
その傾向が大きい。 5Hz 以下では圧力減衰について数
パーセントの誤差の範囲内に留まるが、精度の要求され

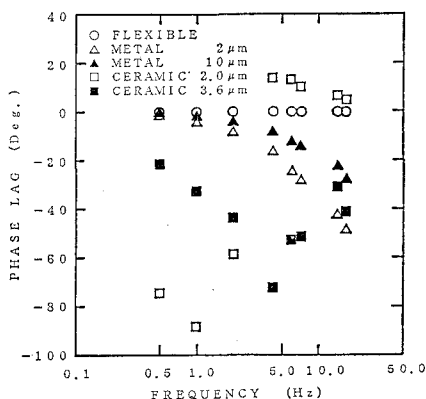


図-5 各種フィルターの位相特性

る測定に用いることには問題がある。さらに、セラミッ
クフィルターは、 0.5Hz で既に減衰が激しく静的な測定
にのみ用いるべきで動的な間隙水圧測定には用いてはな
らない。

さらに、図-5に圧力伝播における位相遅れを各種フ
ィルターについて調べ比較した。それによれば、フレキ
シブルフィルターは 20Hz 程度までの今回の実験範囲内
では位相遅れが生じていない。金属フィルターは、 0.5Hz
で既に数パーセント内の位相遅れを生じている。この位
相遅れは周波数が大きくなるに従って増加している。特
に $2.0\mu\text{m}$ の方はその傾向が激しい。セラミックフィル
ターは今回の実験の全周波数域で激しい位相遅れを生じ
ている。しかも、周波数の増減に対して位相遅れの変化
が一定しておらず解釈も困難である。位相遅れの面から
も動的な間隙水圧の測定に適していないことがわかる。

3. 実験結果と考察

善ら(1987)は、砂層表面の波圧変動が瞬間的に砂層内
に伝播しないことにより砂層表面が液状化するとして
いる。また、前野ら(1989)は、この種の液状化が砂澱形
状、砂層表面付近の流速・圧力および砂移動機構と密接
に関連しており、砂澱の消滅限界およびシートフローの
発生限界を規定する可能性があることを示している。そ
こで、砂層表面において波圧変動を測定し、その直下の
図-3に示す各点で測定した間隙水圧変動との間の位相
差を検討した。

(1) 砂層中における圧力伝播の減衰特性

波浪により引き起こされる砂層内の間隙水圧の発達特
性については、前野・長谷川(1984)により既に波高、周
期、相対水深、波形勾配などの波の特性値との関係が得
られているが、位相特性を検討するに当たって必要と思
われるので以下に示す。

図-6に間隙水圧変動振幅を波圧変動振幅で除した圧
力の減衰比と砂層表面からの深さを砂層厚で除した相対

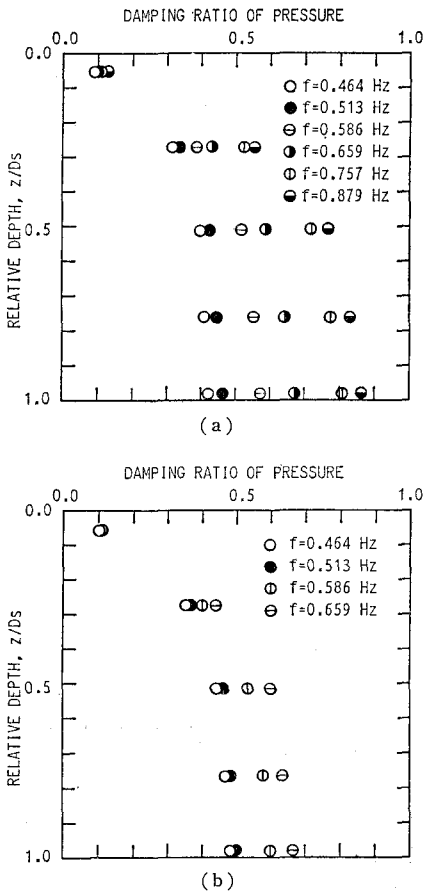


図-6 圧力の減衰比と周波数の関係

砂層深度との関係を示した。圧力の減衰は、周波数だけでなく波高の影響も受けるので、ここでは、造波時のストロークが異なる2ケースについて示した。(a)のケースに比べて(b)のケースはストロークが大きく対応する周波数について波高が大きくなっている。それによれば、減衰比は砂層深度が増すに従って大きくなっており、その増加の割合は砂層表面で大きい。また、砂層内のすべての位置で周波数の大きいものほど減衰比が大きく、高周波成分が減衰し易く低周波成分が伝播し易いという従来の結果を裏付けるものである。

さらに、圧力伝播の減衰比に及ぼす波高の効果を考察するために、図-7に周波数 $f=0.464$ Hz の場合について4種の波高の異なる場合の圧力の減衰比と相対深度との関係を示した。それによれば、周波数が同じ場合には波高が大きいに減衰比が大きくなっている。これらの事実は、従来報告されている波高が大きいものほど砂層中で圧力が減衰するという結果と一致するものである。

(2) 砂層中における圧力伝播の位相特性

次に、砂層中における圧力伝播の位相特性を検討する

ことにする。図-8に砂層内深度の変化に対する水面変動と間隙水圧変動との位相差の変化を2つの波浪条件について示した。以後の考察において、位相角は位相遅れを正にとってある。それによれば、砂層深度が増すに従って位相角が増加している。言い換えれば砂層深度が増すに従って位相遅れが大きくなっている。このことは従

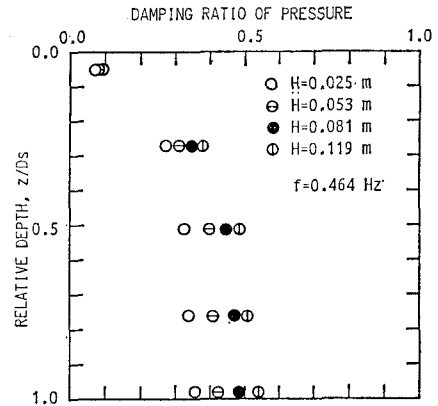
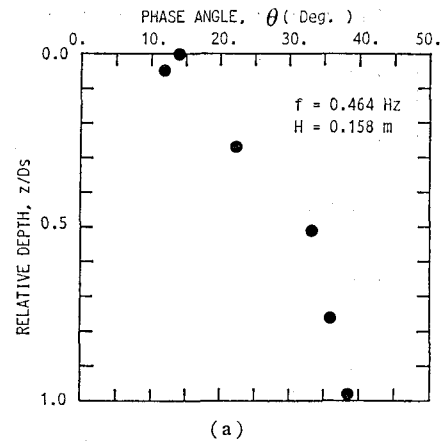
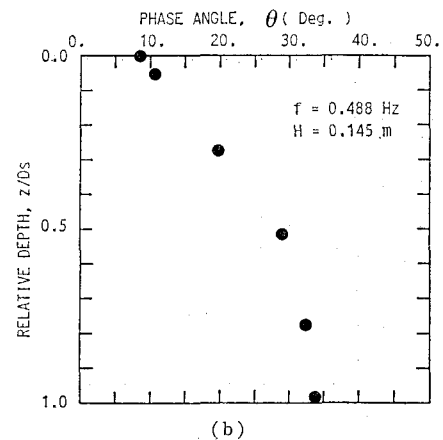


図-7 圧力の減衰比と波高との関係



(a)



(b)

図-8 間隙水圧変動と水面変動との位相角

来言われていることを裏付けるものである。

しかしながら、例えば 図-8(a) に示すように、砂層表面の波圧変動と砂層中 2 cm (相対砂層深度 0.5) における間隙圧変動とを比較すると、砂層表面から砂層深度が増加するに従って単調に位相角が増加する砂層全体の傾向に反して、多くの場合波圧変動と水面変動との位相角よりも砂層中 2 cm における間隙圧変動と水面変動との位相角の方が小さくなっている。この現象についてまず疑われるのは、波圧測定用の圧力変換器と砂層中における間隙圧測定用の圧力変換器が一直線上にない可能性である。この点については、例えば 図-8(b) に示す結果において、砂層表層に位相の乱れは見られず、砂層深度の増加に伴い位相角が単調に増加している。つまり、実験条件により位相差の発生に違いが生じていることになる。今回の実験では周期が短く波高が大きい場合にこの傾向が顕著である。従って、圧力変換器が一直線上に無いとの仮定は成り立たない。この砂層表面における位相遅れの乱れが実際の現象であるとする砂層表層がそれ以下の層と異なった構造を有していることになる。

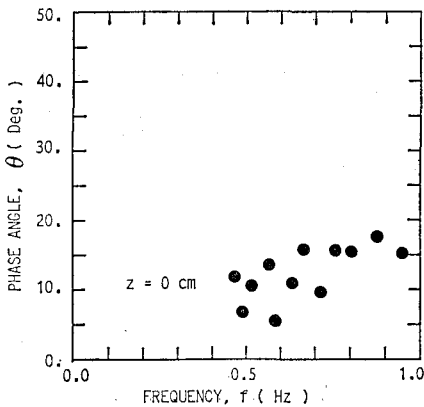


図-9 波圧変動と水面変動との位相角と周波数

(3) 圧力伝播の位相特性と周波数の関係

図-9 に波圧変動と水面変動との間の位相角と周波数の関係を示した。それによれば、位相角は周波数の増加に伴い増加している。さらに、砂層中の間隙圧変動と水面変動との間の位相角と周波数との関係を 図-10 に示した。それによれば、砂層中 2 cm においては、位相角は周波数の増加に対してバラツキはあるものの増加傾向を示している。その傾向は砂層表面の位相角に比べて穏やかなものとなっている。さらに砂層深度が増すに従って位相角は周波数の増加に対して減少傾向に転じ、その傾向は砂層深度が増すに従って大きくなっている。

(4) 圧力伝播の位相特性と波高との関係

図-11 に波圧変動と水面変動の間の位相角と波高との関係を、周波数 $f = 0.464 \text{ Hz}$ の場合について示した。それによれば、位相角は若干の乱れはあるものの波高の増加に伴い増加している。さらに、間隙水圧変動と水面変動との間の位相角と波高との関係を 図-12 に示した。それによれば、砂層中の位相角は砂層表面と同様に波高の増加に伴い増加している。またその傾向はすべての砂

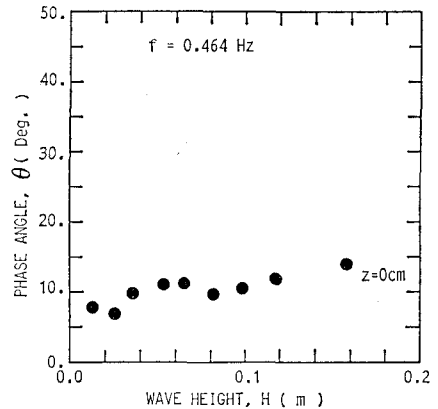


図-11 波圧変動と水面変動との位相角と波高

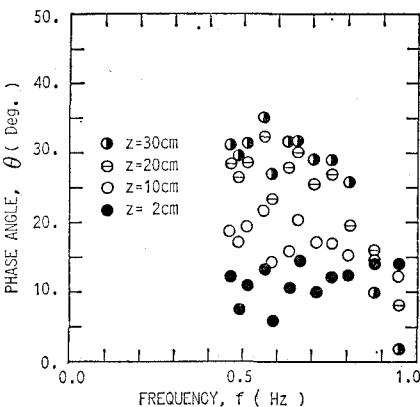


図-10 間隙水圧変動と水面変動との位相角と周波数

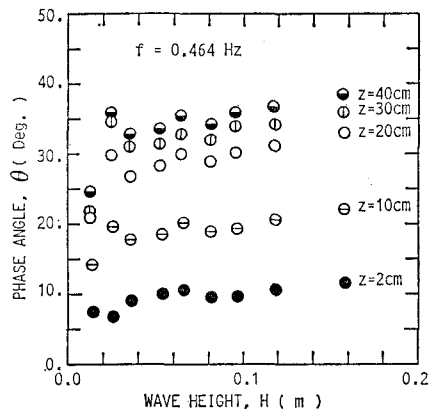


図-12 間隙水圧変動と水面変動との位相角と波高

層深度でほぼ一定で、砂層深度の増加に伴い位相角の変化の傾向が変わる周波数との関係とは異なっている。

(5) 有効応力変動の位相特性

そこで、善ら(1987)の波圧が砂層内に瞬間的に伝播しないことにより引き起こされる砂層の表層の液状化を考察するため、図-3 に示したように砂層表面から 3 cm の位置で土圧変動と間隙水圧変動を同時に測定し、その差から有効応力変動を求め、それと水面変動との間の位相特性を検討した。

図-13 に有効応力変動と水面変動との間の位相角と周波数の関係を示した。それによれば、周波数の増加に伴って位相角は増加している。さらに、図-14 に有効応力変動と水面変動との位相角と波高との関係を示した。それによると、位相角は波高の増加に伴い増加している。以上のことから、砂層表層の有効応力変動は、波高が大きく周期が短い波ほど位相遅れが生じ易く、従って、波圧が瞬間的に伝播しないことによる液状化が発生し易くなることを示している。

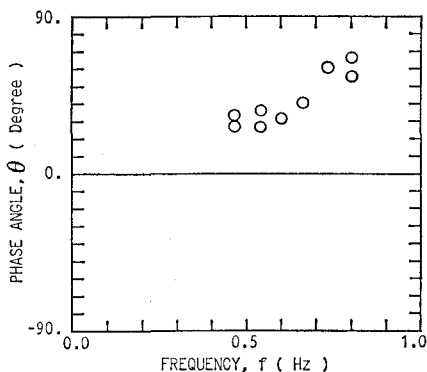


図-13 有効応力変動と水面変動との位相角と周波数

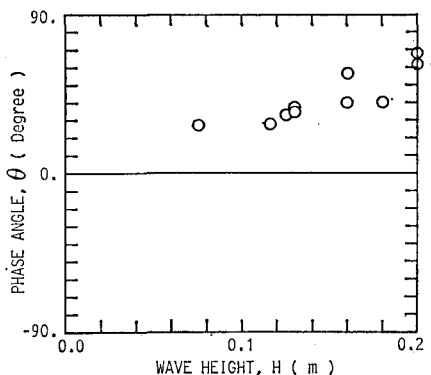


図-14 有効応力変動と水面変動との位相角と波高

4. 結 論

以上の検討の結果、砂層表面付近では圧力の応答に関しては砂層厚に対応した減衰が生じているが、位相特性に関しては波浪条件により大きく変化しており、砂層と水の境界付近の複雑な条件を考察する必要を示している。例えば、砂層表面には波浪条件によっては砂澱が発達しており、また巻き上げられた浮遊砂も認められる。この点については、前野(1988)や前野ら(1989)が間隙圧発達特性と漂砂形態との関連を報告しているが、圧力の伝播における位相特性からも関連が示唆される。今回得られた実験結果によれば、周期が短く波高が大きい波ほど砂層表面における位相遅れが大きく、波圧が瞬間的に砂層中に伝播しないことによる液状化の発生が考えられる。

謝 辞： 本研究は、文部省科学研究費国際学術研究(共同研究) No. 01044137 (代表者：前野賀彦) の一環として行なわれたものであることを付記し深謝の意を表する。

参 考 文 献

- 善 功企・山崎浩之・渡辺 篤 (1987): 海底地盤の波浪による液状化および高密度化, 港研報告, 第 26 卷, 4 号, pp. 125~180.
- 前野賀彦・長谷川高士 (1984): 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.
- 前野賀彦 (1988): 砂層と水の境界付近のエネルギー損失の間隙圧発達特性への効果, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp. 732~736.
- 前野賀彦・松岡裕二・林田洋明・間瀬 肇 (1989): 砂澱形状と間隙圧発達特性との関係, 海岸論文集, 第 36 卷, pp. 789~793.
- Madsen, O. S. (1978): Wave-induced pressures and effective stresses in a porous bed, *Geotechnique*, Vol. 28, pp. 377~393.
- Maeno, Y. and K. Tokutomi (1989): Characteristics of flexible filter for pore pressure transducer, *IAHR Workshop on Instrumentation for Hydraulics Laboratories*, pp. 105~119.
- Mei, C. C. and M. A. Foda (1981): Wave-induced stress around a pipe laid on a poro-elastic sea bed, *Geotechnique*, Vol. 31, No. 4, pp. 509~517.
- Nago, H. and S. Maeno (1984): Pore water pressure in sand bed under oscillating water pressure, *Mem. of Eng., Okayama Univ.*, Vol. 19-1, pp. 13~32.
- Sakai, T., H. Mase and A. Matsumoto (1988): Effects of inertia and gravity on seabed response to ocean waves, *Modelling Soil-Water-Structure Interactions*, A. A. Balkema, pp. 61~66.
- Tsui, Y. and S. C. Helfrich (1983): Wave-induced pore pressures in submerged sand layer, *Journal of GT Div., ASCE*, Vol. 109, No. GT4, pp. 603~618.
- Yamamoto, T., Koning, H. L. and E. Van Hijum (1978): On the response of a poroelastic bed to water waves, *J. Fluid Mech.*, Vol. 87, pp. 193~206.