

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

海洋構造物の安定性の検討に際しては、海洋構造物に作用する波浪の効果についての検討だけでなく、構造物の基礎地盤および、構造物周辺の海底地盤の波浪作用下の安定性もまた検討されるべき重要な課題である。そこで、本研究では、海底地盤の安定性を有効応力理論に基づいて検討する上で重要な海底地盤内の間隙水圧の発達特性に関する知識を整理し著者らの立場を明かにする目的から、まず、波浪により海底地盤内に発達する間隙圧に関する従来の研究をまとめ分類した。更に、それらの海底地盤内の間隙水圧に関する各種予測理論と、造波水槽を用いた室内模型実験を行うことにより、著者ら(1984)が提案したところの波形勾配を用いて整理した実験式との比較検討を行った。

2. 従来の研究

海洋構造物基礎としての海底地盤の圧密特性及び、波浪による海底地盤の液状化等による不安定性の検討には、海底地盤表面及び構造物に作用する変動圧力だけでなく海底地盤内の間隙圧の発達特性もまた明かにされる必要がある。

この点については、Putnam (1949) が、次の条件を仮定して、海底地盤表面に、非減衰、調和変動境界圧を受ける多孔質海底地盤中の Laplace 方程式に従うポテンシャル流れについて検討した。

- 1) 骨格は、非圧縮性である、
- 2) 間隙流体は、粘性非圧縮性である、
- 3) 間隙流体の流れは、層流であり、Darcy 則に従うものである、
- 4) 水理的等方性を有する地盤(一様透水係数を有する地盤)である。

彼は、海底地盤表面の変動圧力は、(2) 式に示した線形波理論によるものとして解を求めたが、それは、瞬間的な流線網を図式的に与えることによってポテンシャル及び流れ関数を求めたもので、地盤内の間隙水圧の明白な表現を与えたものではなかった。

後に、Liu (1973)によって、Putnamの解は、次式として表わされた。

$$P = P_0 \cosh[N(Ds-z)] / \cosh(NDs) \quad (1)$$

$$P_0 = \rho g H / 2 \cosh(ND) \quad (2)$$

ρ : 海水の密度、 g : 重力の加速度、 D : 水深、
 H : 波高、 N : 波数、
 Ds : 砂層厚、 z : 砂層表面から砂層中への深さ

Reid & Kajiura (1957) は、透水性海底地盤上では、地盤中の浸透の影響を受けて地盤表面の変動圧力が減衰することから、Putnam (1949) の理論において、海底地盤表面での変動圧力として不透水性地盤上のものを用いていることには問題があることを指摘した。

Sleath (1970) は、Putnam (1949) のポテンシャル流れの理論を透水異方性を含むように拡張した。それは、水平方向と鉛直方向の異なるふたつの透水係数を有し、一定水深の水平剛性海底地盤についてのもので、過渡的間隙水圧振幅の解を (3) 式のように求めた。なお、(3) 式に於いて、 $k_x = k_z$ の場合には、Putnam-Liu の方程式と一致する。

$$P = P_0 \cosh[N(k_x/k_z)(Ds-z)] / \{ \cosh[N(k_x/k_z) Ds] \} \quad (3)$$

k_x : 水平方向の透水係数、 k_z : 鉛直方向の透水係数

また、彼は、波浪により引き起こされる模型床内の圧力を計測する実験を行い、模型床の飽和に最善の注意を払い、水平及び鉛直方向の透水係数を直接計測した。その結果、床内の流れが、Darcy 則に従うとする仮定の有効性及び水平方向と鉛直方向の透水性が異なることを見出した。しかし、その理論値と実験値との良い一致は、水平方向と鉛直方向の透水係数の比を異方透水係数比として用いることにより得られるものである。

Liu (1973) は、多孔質海底地盤内の間隙水圧分布への地盤の透水性の効果について検討を行った。彼は、海底地盤表面において、垂直及び水平方向の速度と圧力が連続であると仮定した。そこで、無限厚さを有する剛性海底地盤における圧力分布を次式のように得た。

$$P = P_0 \exp(-Nz) \quad (4)$$

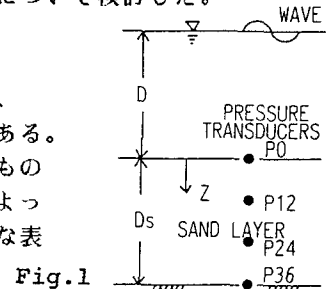


Fig. 1

$$P_0 = (\rho g H / 2) / [\cosh(ND) - (k/T \nu) \sinh(ND)] \quad (5)$$

k : 透水係数、 T : 周期、 ν : 水の動粘性係数

海底地盤が通常見られる砂である時、 $k/\nu \rightarrow 0.0001$ となることから、上式の P_0 は、ストークス波理論の第一項と同じものとなる。したがって、上式は、海底地盤表面及び地盤内の変動圧力への地盤の透水性の効果が認められないことを示している。

また、Massel (1976) は、以上示したLaplace 方程式によるポテンシャル流れの理論を、剛性多孔質地盤についてのダルシー則に、非線形減衰とモーメント方程式の慣性項を考慮することによって発展させた。しかし、彼の理論による結果は、海と海底の両者に於ける圧力分布への海底地盤の透水性の効果が、無視できる程小さいことから、結局 Laplace方程式による結果と本質的に同じものである。

ここまでは、間隙流体を非圧縮性とする仮定に基づき、Laplace 方程式に導く理論について述べてきたが、一方では、間隙流体が圧縮性であり、多孔質地盤は変形しないものとする仮定に基づいて解かれたものもある。中村ら(1973)は、間隙流体を圧縮性として、多孔質地盤が変形しないものとして、間隙水圧についての熱伝導方程式を導いた。この仮定により求められる結果は、地盤内の間隙水圧応答が、地盤の透水性に大きく依存していることを示している。その解によると、圧力は急激に減衰し、細粒土では位相遅れが生ずるものである。彼らは、同時に細砂と粗砂とについて波浪水槽を用いた実験を行い、理論値と比較している。その実験結果によると、粗砂床の場合には、位相遅れは生じず、Laplace 方程式による解との良い一致を示しているが、粗砂床については、大きい圧力減衰と位相遅れが生じている。彼らは、以上の実験結果と理論値とが良い一致を見ているが、彼らが、理論計算において用いた水の圧縮性は、実際の水の 980倍であったことが、Yamamoto (1978) により指摘されている。それは、実験に用いた砂床中に存在する少量の空気による影響と推定されている。また、Moshagen & Torum(1975)も、中村ら(1973)と同様の仮定に基づいて、二次元異方性流れ問題に関する熱伝導方程式を導いたが、Prevost (1975)により、これらの仮定は、非現実的でできやきわめて粗い砂を除いては、地盤深度の増加に伴う間隙水圧の過剰な減衰を導くことが指摘されている。

しかし、そのPrevost (1975)や Mallard & Dalrymple (1977) の水の波による海底地盤の変形に関する研究における仮定、すなわち地盤を弾性連続体よりなると考え地盤内の流れが存在しないとする仮定は、固体力学の考えに立つものであり、Prevost (1975)は、地盤内の間隙水圧を、弾性連続体中の八面体垂直応力の変化と等しいと仮定することにより、彼の解が、Laplace 方程式により得られる解と同一であるとし、地盤の透水性とは無関係であるとしたが、この仮定は、物理的に不合理なものであることもまた指摘されている。このことは、Doyle (1973)による結果からも示唆される。彼は、弾性理論を波浪によって引き起こされる地盤内のせん断応力の予測に用いようとして、波浪水槽を用いた実験を行っている。しかし、その結果によると、模型地盤表面において計測した変動圧力は、理論予測値よりも、遙かに小さなものであった。更に、海底に於ける原位置観測結果も、理論値と大きく掛け離れたものであった。

また、原位置観測結果によれば、地盤内の間隙水圧応答に位相遅れが生じており、残留間隙水圧の発生の可能性が指摘されているにもかかわらず、従来の理論は、過渡的間隙水圧に注目したものであったが、Seed & Rahman (1978)は、Seed (1976) による地震作用下の液状化ポテンシャルの単純化された算定方法の応用として、波浪作用下の海底地盤の残留間隙水圧と液状化ポテンシャルの算定手順を与えた。しかし、地盤内の間隙水圧を求める手順は、剛性海底地盤について求められたもので、透水性の高い地盤についてのみ適用可能である。

以上述べてきた波浪により引き起こされる海底地盤内の間隙水圧に関する研究には、大きく分けて次の三つのアプローチがあると考えられる。

- 1) 間隙流体を非圧縮性とする仮定から、Laplace 方程式を導くもの、
- 2) 間隙流体を圧縮性とする仮定から間隙水圧に関する熱伝導方程式を導くもの、
- 3) 海底地盤を弾性連続体として地盤内の流れが存在しないものとする固体力学によるもの。

この 1)、2)の仮定に基づくアプローチは、海底地盤が変形しないものとしている。しかし、例えば、砂地盤のような多孔質地盤に於いては、水の波が伝播するときには、流体の流れが多孔質媒体中に生じ、多孔質媒体自身は、変形するものと考えられることから、れきや相当粗い砂地盤を除いては問題があると思われる。また、1)の間隙流体が非圧縮性とする仮定も、間隙圧応答が地盤の透水性と無関係であるという結論を導くことから問題点が残る。また、2)の間隙流体の圧縮性の仮定は、間隙圧応答が、地盤の透水性に大きく依存していることを示すが、過度に減衰してしまう問題点がある。3)については、地盤内での流れが存在しないというもので、非現実的である。

このように、従来のアプローチが多くの問題点を持っていることから、固相と液相の二相問題としての厳密な取り扱いが必要と思われる。そこで、Yamamoto (1977) は、Biot (1941) の多孔質弾性体の三次元圧密理論に基づいて、水の波による海底地盤の応答について検討を行なった。それは、海底地盤内の間隙圧応答と同時に有効応力の分布を得ようとするものである。彼は、一定水深の水平海底地盤を考え、それ

が一定の厚さの多孔質層とその下に不透水性剛性地盤を有する場合について解いている。更に、Yamamoto (1978) は、無限深さの多孔質海底地盤についての厳密解を示した。それに基づき、彼は、多孔質弾性海底地盤における水の波により引き起こされる間隙圧応答は、地盤の透水性、多孔質媒体の剛性、間隙流体の圧縮性により影響を受けることを示した。また、彼は、先に示した1)、2)の二つのアプローチが、彼の一般解の極端な場合にそれぞれ対応することを示し、室内実験結果との比較検討を行い、理論値と実験値が良い一致を見ることを示した。

$$U = i\{m[i(1-2\nu)\omega'' - 1-2(1-\nu)N'']\exp(-Nz)/[-N''+i(1+m)\omega''] \\ - [1-mN''/[-N''+i(1+m)\omega'']] Nz\exp(-Nz) \\ + m\exp(-N'z)/[-N''+i(1+m)\omega'']\}(P_0/2NG)\exp[i(Nx+\omega t)] \quad (6)$$

$$W = \{[1+m[1+(1-2\nu)(i\omega''-N'')]/[-N''+i(1+m)\omega'']\}\exp(-Nz) \\ - [1-mN''/[-N''+i(1+m)\omega'']] Nz\exp(-Nz) - m(1+N'')\exp(-N'z)/ \\ [-N''+i(1+m)\omega'']\}(P_0/2NG)\exp[i(Nx+\omega t)] \quad (7)$$

$$P = \{[1-im\omega''/[-N''+i(1+m)\omega'']] \exp(-Nz) + im\omega''\exp(-N'z)/ \\ [-N''+i(1+m)\omega'']\}P_0\exp[i(Nx+\omega t)] \quad (8)$$

ここで、 $N' = N + i\omega(\gamma/k)\{n/K' + (1-2\nu)/[2(1-\nu)G]\}$ (9)

$$\beta = (1-\nu)/(1-2\nu) \quad (10)$$

$$\omega' = \omega/c \quad (11)$$

$$\omega'' = \beta(\omega'/N) \quad (12)$$

$$c = (k/\gamma)/\{n/K' + (1-2\nu)/[2G(1-\nu)]\} \quad (13)$$

$$m = nG/[K'(1-2\nu)] \quad (14)$$

$$N'' = (N'-N)/N \quad (15)$$

$$1/K' = 1/K + (1-Sr)/P_0 \quad (16)$$

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 : ボアソン比、 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 および z 方向変位

Madsen (1978) は、Yamamoto (1977, 1978) と同様に、Biot (1941) の多孔質弾性地盤についての三次元圧密理論に基づき、地盤の透水性を非等方と仮定して、間隙圧と有効応力のための一般理論を導いた。しかし、地盤の透水異方性を仮定しながら、地盤の応力-ひずみ関係を等方と仮定したままであったので、Biot (1955) により指摘されているとおり、物理的に不合理であることが、Yamamoto (1981) により指摘されている。また、Yamamoto (1981) は、非均質海底地盤を、均質な土砂よりなる多層地盤と考えることにより、この理論をより現実的な非均質海底地盤に適用した。この理論による結果は、原位置観測結果と良い一致を見ている。

以上述べてきた、Biot (1941) の多孔質弾性体の圧密理論に基づいた波浪による海底地盤の応答に関する Yamamoto (1977, 1978)、Madsen (1978) の理論は、多孔質弾性地盤内の固相(土骨格)と液相(間隙流体)の慣性力を、浸透力や弾性力に比べて無視できるものとして取り扱ってきたが、これは、砂地盤のような比較的剛性と考えられる場合については、十分適用可能なものである。しかし、彼らの理論は、波浪の性状、周期、波長、波高、水深、土層厚に加えて、地盤土のせん断弾性係数、ボアソン比、間隙率、透水係数、土の圧密係数などの多くのパラメータを必要とするものである。

しかし、いくつかの実験において示されるとおり、粘土地盤などについては、十分説明し得るとは言い難いものである。これらの粘土地盤については、地盤土砂の内部摩擦効果を考慮する必要があると思われる。この内部摩擦効果に関する研究としては、Gade (1957) と Dalrymple & Liu (1978) による海底地盤を非圧縮性粘性流体として取り扱ったものと、Hsiao & Shemdin (1980) による海底地盤を非圧縮性粘弾性連続体からなる半無限領域として取り扱ったものがある。しかし、それらは、地盤内の浸透流れと有効応力の発達を考慮していないので、地盤内の有効応力に関する情報が得られていない。また、これらの理論においては、土の内部摩擦力は、ひずみ比に比例すると仮定されているが、Stokoe (1980) によると、海成土についての応力-ひずみ関係の実験結果は、土の内部摩擦力がひずみ比とは無関係であることを示している。更に、彼の結果は、海成土の内部摩擦力が粘性型ではなく、Coulomb 型であることを示唆している。以上の点から、Yamamoto (1981) は、Biot (1962) の多孔質粘弾性媒体中の音響波の伝播理論に基づき、Coulomb 摩擦減衰を考慮した波浪による海底地盤の応答に関する理論を導いた。更に、Yamamoto (1982) は、海底地盤の土砂の特性が地盤深度により変化する場合及び海底地盤の土砂が非線形応力-ひずみ関係を有する場合について解いている。また、Yamamoto (1983) は、これらの理論と、波浪水槽を用いた砂床と粘土床についての水の波による応答の実験結果との比較を行った。

3. 波形勾配を用いた実験結果の整理法

Maeno & Hasegawa (1985) によれば、図-1 に示した条件下で測定された砂層中の間隙圧 P_z (z は砂層

深さ)と第二次近似のストークス波理論による砂層表面の理論圧 P_s との圧力比 P_z/P_s は、図-2 に示す
とおり、波形勾配の常用対数値と直線的関係が認められ、次式に示す実験式を得た。

$$P_z/P_s = -A \log(H/L) + B \tag{17}$$

H/L : 波形勾配、 A 、 B : 実験パラメータ

上式中の係数 A 、 B は、各種実験条件に於いて、図-3、図-4 に示す値をとる。係数 B と砂層厚 D_s で除して無次元化した相対砂層深度 z/D_s との関係を図-4に示した。それによると、表-1 に示す(Ⅰ)～(Ⅲ)の各場合共に、 z/D_s の増加に伴って係数 B が小さくなっているが、(Ⅱ)、(Ⅲ)の各場合には、砂層底で僅かに大きくなっている。また、これらの減衰の割合は、砂層の密度が大きい場合に大きくなっている。係数 A と砂層の密度との関係を図-3 に示した。それによると、砂層の密度が大きいほど、係数 A の値は小さくなっており、一定値に収束しているようである。これらの実験結果から、係数 A は、砂層の密度による影響が大きく、実験上の制約である砂層長による影響は、比較的小さいように思われる。このように実験式中の係数 A 、 B は、砂層の密度等の排水特性により求めることが可能である。

Table 1. Properties of Nabae sand.

	(Ⅰ)	(Ⅱ)	(Ⅲ)
Length of sand bed	250.0 cm	166.0 cm	99.5 cm
Dry bulk density	1.61 t/m ³	1.54 t/m ³	1.67 t/m ³
Specific gravity		2.70	
Permeability		0.023 cm/s	
Coefficient of uniformity		1.53	
Effective grain size		0.114 mm	
Average grain size		0.160 mm	

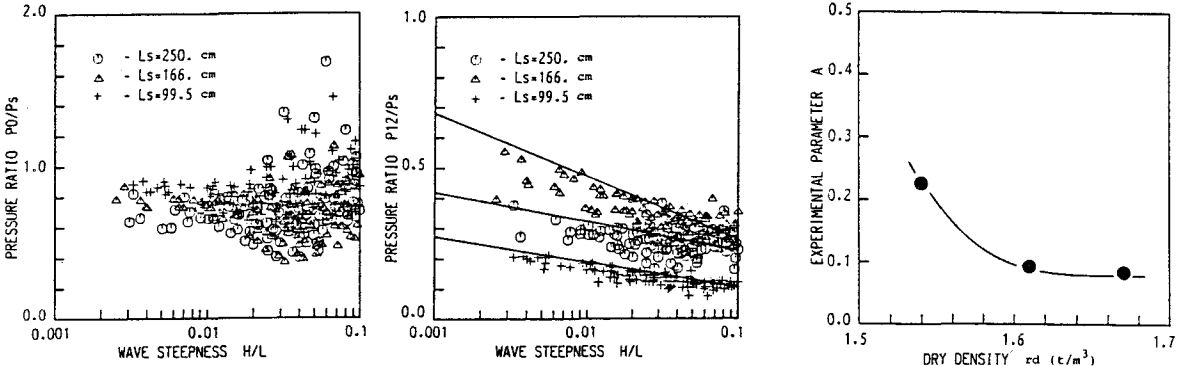


Fig.2 Effect of the wave steepness on the pore water pressure inside sand beds.

Fig.3 Relation of constant A to the density of the sand bed.

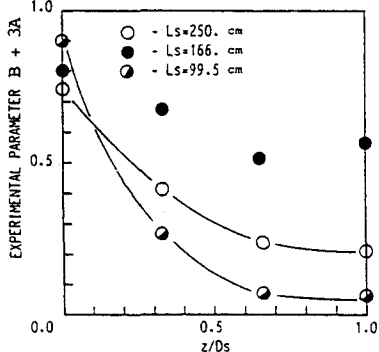


Fig.4 Relation of constant B to the relative depth, z/D_s .

4. 各種理論と実験結果との比較
図-5 に、著者ら(1984)の行った造波水槽を用いた実験結果に基づいて提案した実験式と、Liu (1973)の無限地盤に於ける理論式、Putnam - Liuの理論式、透水異方性を考慮するために異方透水係数比を用いた Sleath の理論式、および測定結果との比較なった。なお、ここでは、Yamamoto (1977)の理論式は、Putnam-Liuの式と同じものとして取り扱った。それは、今回行った実験において、実験砂層が、完全に飽和しているものとみなせば、間隙水の見掛けの体積弾性係数と砂のせん断弾性係数との剛性比を零とみなすことができ、(14)式の m が零となり、(8)式中に $m=0$ を代入することによりPutnam-Liuの式が導かれることによる。それによると、実測値と提案した実験式は、良い一致をみているが、他の理論式により推定された値は、実測値と比べて、減衰の割合が小さいものとなっている。その中で、例えば、図-5aにおいて、異方透水係数比 $k_x/k_z = 5.0$ の場合の Sleath の理論曲線は、測定値および実験式とほぼ一致したも

のとなっている。このことは、実験条件が、見掛け上鉛直方向の透水性よりも、水平方向の透水性の方が、5 倍大きいことを示しているものと思われる。他の図-5bから図-5gの各場合においても、適当な異方透水係数比を与えたSleathの理論曲線と、測定値および実験式による推定値は、ほぼ一致している。このことから、波浪作用下の砂層中では、波浪による排水拘束条件により鉛直方向と水平方向の透水性が異なるものと考えられる。また、この間隙水圧の減衰特性から逆に地盤の異方透水係数比を推定することも考えられる。

そこで、図-5 において測定値および実験式と比較的良好一致をみるSleathの理論式の異方透水係数比の値と砂層の密度との関係を図-6 に示した。それによると、密度が大きくなるに従って、異方透水係数比が増加しており、その割合は波長が大きなものほど顕著である。

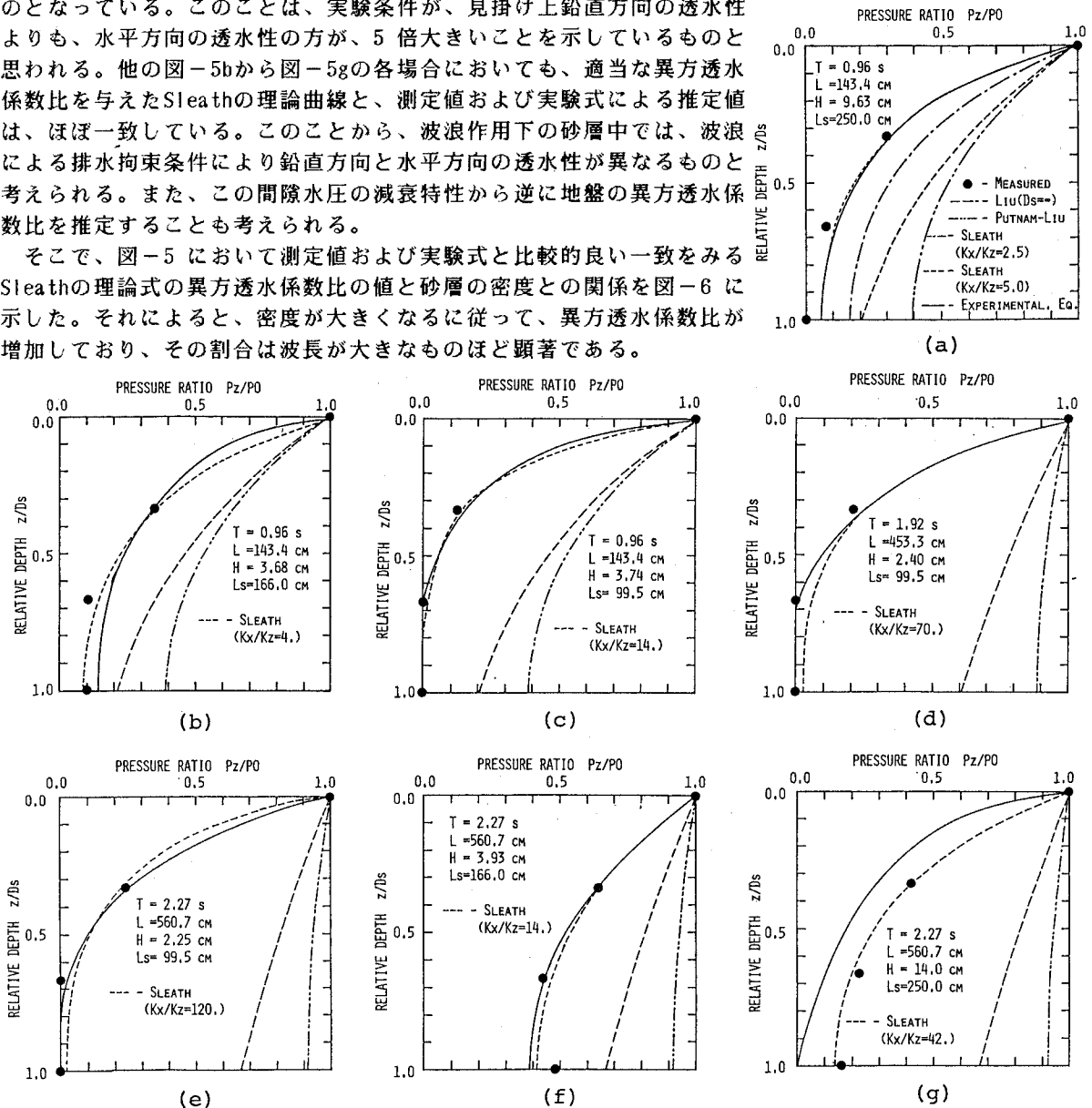


Fig.5 Comparison with Various Theories

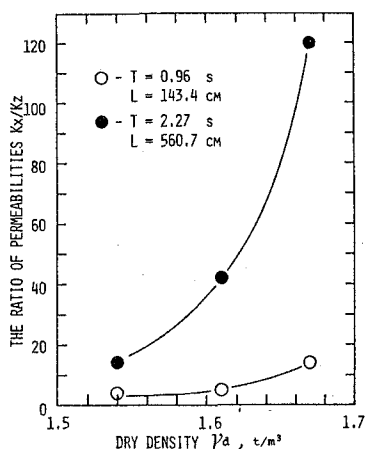


Fig.6

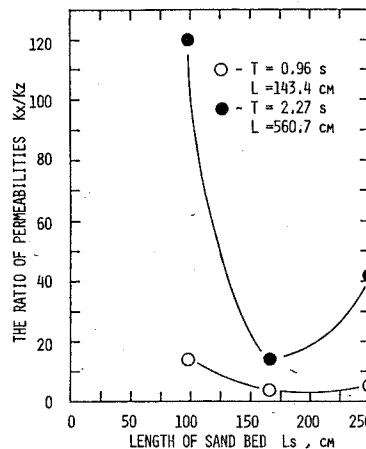


Fig.7

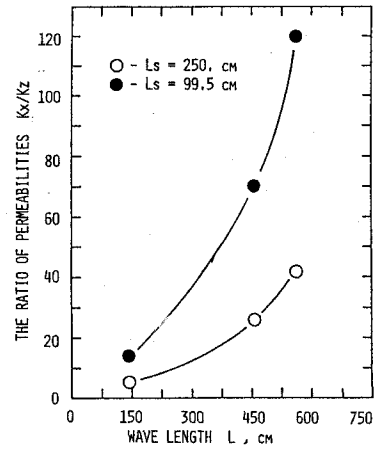


Fig.8

この点については、砂層長の影響も考えられることから、図-7 に砂層長と異方透水係数比との関係を示した。それによると、一意的な傾向は認められず、密度の効果が卓越しているように見受けられる。更に、図-8 に波長と異方透水係数比の関係を砂層長 L_s が99.5cmの場合と250.cmの場合について示した。それによると、波長の増加に伴い、異方透水係数比が急激に増加している。その割合は、 $L_s=99.5\text{cm}$ の方が大きく、 $L_s=250.\text{cm}$ の方が小さくなっている。これは、砂層長との関連も考えられるが、図-7 に示したとおり、砂層の密度による効果と考えられる。

このように、各種理論により推定される間隙水圧の値は、必ずしも、測定値と一致するものではなく、また、Sleathの理論において、適当な異方透水係数比を与えることにより、測定値と良い一致をみる理論式を与えることができるにしても、その異方透水係数比と砂層状態および波浪による排水条件との関係をSleathの理論が与えているわけではないことから、砂層中の過渡的間隙水圧の推定を行おうとする場合には、予め、このような模型実験を行い砂層の特性を考慮した実験式を導き、異方透水係数比を、波形勾配と結び付けて考察することにより、異方透水係数比と砂層状態および波浪による排水条件との対応を求めることが出来るのではないだろうか。しかし、この実験式の原型への適用に際しては、模型と原型の相似律についての慎重な検討を必要としている。一般に用いられる Froude の相似律は、本来、重力波についてのものであり、土と水の二相問題の相似性を表わすものとはいえず、模型実験結果を直接原型事象に適用するには、まだ、克服すべき多くの問題点がある。この相似律に関して、Yamamoto (1984) は、Froude数に加えて、水の波の位相速度と海底地盤土砂中を伝播する弾性波の速度との比で表わされる Mach 数と呼ばれる三つの無次元数が縮尺模型と原型とで等しくなる必要があるとしている。

5. まとめ

以上、波浪により海底地盤内に引き起こされる間隙圧に関する従来の研究をまとめた。更に、著者らが、造波水槽を用いた実験に基づいて提案した波形勾配により整理した実験式と各種理論との比較を行った。その結果、実験式は測定値と良い一致をみたが、従来提案されている各種理論による推定値は、必ずしも測定値と一致せず、どちらかという掛け離れたものであった。また、Sleathの理論は、異方透水係数比を適当に与えることにより、測定値および実験式による推定値と良い一致をみた。このことは、見掛け上波浪作用下の砂層中の水平方向と鉛直方向の透水性が異なっていることを示しており、砂層が密なほど、また波長が大きいほど大きな異方透水係数比をとることが認められた。更に、波形勾配を用いて整理した実験式とSleathの理論式とを適当な異方透水係数比を用いて結び付けることが出来ることから、異方透水係数比が密度等の砂層状態および波浪作用による排水条件を用いて意味付けられることが示唆された。

参考文献

- Biot, M.A. (1941), "General Theory of Three-Dimensional Consolidation," J. of Applied Physics, Vol. 12, pp. 155-164.
- Biot, M.A. (1955), "Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Anisotropic Solid," J. of Applied Physics, Vol. 26, pp. 182-185.
- Biot, M.A. (1962), "Generalized Theory of Acoustic Propagation in Porous Dissipative Media," J. of Acoustic Society of America, Vol. 34, pp. 1254-1264.
- Dalrymple, R.R., and Liu, P.L.F. (1978), "Wave over Soft Muds: A Two-Layer Fluid Model," J. of Physical Oceanography, Vol. 8, pp. 1121-1131.
- Doyle, E.H. (1973), "Soil-Wave Tank Studies of Marine Soil Instability," 5th OTC, Vol. 2, pp. 753-766.
- Gade, H.G. (1958), "Effects of a Non-Rigid, Impermeable Bottom on Plane Surface Waves in Shallow Water," J. of Marine Research, Vol. 16, pp. 61-82.
- Hsiao, S.V., and Shemdin, O.H. (1980), "Interaction of Ocean Waves with a Soft Bottom," J. of Physical Oceanography, Vol. 10, pp. 605-610.
- Liu, P.L.F. (1973), "Damping of Water Waves over Porous Bed," J. of Hy Div., ASCE, Vol. 99, No. HY12, pp. 2263-2271.
- Madsen, O.S. (1978), "Wave-Induced Pore Pressures and Effective Stresses in a Porous Bed," Geotechnique, Vol. 28, No. 4, pp. 377-393.
- Maeno, Y., and Hasegawa, T. (1984), "Characteristics of Wave-Induced Pore Water Pressure in Sand Layer," JSSMFE, the 19th Japan National Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., pp. 1329-1332, (in Japanese).
- Maeno, Y., and Hasegawa, T. (1984), "Characteristics of Wave-Induced Pore Water Pressure in Sand Layer," JSCE, Proc. of 31th Japanese Conf. on Coastal Engng., pp. 596-600, (in Japanese).
- Maeno, Y., and Hasegawa, T. (1985), "Characteristics of Wave-Induced Pore Water Pressure in Sand Layer," Proc. of Int. Conf. on Ocean Space Utilization, Ocean Space '85, Springer Verlag.
- Mallard, W.W., and Dalrymple, R.A. (1977), "Water Waves Propagating over a Deformable Bottom," Proc. of 9th OTC, OTC2895, Vol. 3, pp. 141-146.
- Massel, S.R. (1976), "Gravity Waves Propagated over Permeable Bottom," Proc. ASCE, J. of WW, Vol. 102, No. WW2, pp. 111-121.
- Moshagen, H., and Torum, A. (1975), "Wave Induced Pressures in Permeable Seabeds," J. of WW, ASCE, Vol. 101, No. WW1, Feb., pp. 49-57.
- Nakamura, H., et al. (1973), "On the Seepage in the Seabed due to Waves," Proc. 20th JSCE Coastal Engng. Conf. pp. 421-428, (in Japanese).
- Prevost, J.H., et al. (1975), "Wave Induced Pressures in Permeable Seabeds (Disc.)," J. of WW, ASCE, Vol. 101, No. WW4, Nov., pp. 464-465.
- Putnam, J.A., "Loss of Wave Energy due to Percolation in a Permeable Sea Bottom," Transactions, American Geophysical Union, Vol. 30, pp. 349-356, 1949.
- Reid, R.O. (1957), and Kajiura, K., "On the Damping of Gravity Waves over a Permeable Sea Bed," Trans., Am. Geophysical Union, Vol. 38, No. 5, pp. 662-666.
- Seed, H.B., Martin, P.P., and Lysner, J. (1976), "Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction," J. of GT., ASCE, Vol. 102, No. GT4, pp. 323-346.
- Seed, H.B., and Rahman, M.S. (1978), "Wave-Induced Pore Pressure in Relation to Ocean Floor Stability of Cohesionless Soils," Marine Geotechnique, Vol. 3, No. 2, pp. 123-150.
- Sleath, F.A. (1970), "Wave-Induced Pressures in Beds of Sand," J. of Hy., ASCE, Vol. 96, No. HY2, pp. 367-378.
- Stokoe, K.H., et al. (1980), "Dynamic Properties of Offshore Silty Samples," Proc. of OTC, Vol. 2, pp. 289-302.
- Yamamoto, T. (1977), "Wave Induced Instability in Seabeds," Proc. of ASCE Specialty Conf., Coastal Sediments '77, pp. 898-913.
- Yamamoto, T., Koning, H.L., Sellmeijer, H., and Hijum, E.V. (1978), "On the Response of a Porous-Elastic Bed to Water Waves," J. of Fluid Mechanics, Vol. 87, Part 1, pp. 193-206.
- Yamamoto, T. (1981), "Wave-Induced Pore Pressures and Effective Stresses in Inhomogeneous Seabed Foundations," Ocean Eng., Vol. 8, pp. 1-16, Pergamon Press Ltd.
- Yamamoto, T. (1981), "Ocean Wave Spectrum Transformation due to Sea-Seabed Interaction," OTC3977, Offshore Technol. Conf., Houston, pp. 249-258.
- Yamamoto, T. (1982), "Non-Linear Mechanics of Ocean Wave Interactions with Sediment Beds," Applied Ocean Research, Vol. 4, No. 2, pp. 99-106.
- Yamamoto, T., Takahashi, S., and Schuckman, B. (1983), "Physical Modeling of Sea-Seabed Interactions," J. of EM Division, ASCE, Vol. 109, No. EM1, Feb., pp. 54-72.
- Yamamoto, T., and Schuckman, B. (1984), "Experiments and Theory of Wave-Soil Interactions," J. of EM Div., ASCE, Vol. 110, No. GT1, pp. 95-112.