

波浪による砂層内の間隙水圧の特性

前 野 賀 彦*・長 谷 川 高 士**

1. ま え が き

波浪によるパイプライン、アンカー、プラットフォーム等の沖浜構造物の安定性を検討するためには、構造物への波浪の作用の検討のみならず、波浪による構造物の基礎の安定性の検討もまた、重要な課題の一つである。そのため、従来、波浪作用により基礎の土砂層内に発生する間隙水圧に関して、多くの研究が成されている。

ここで問題となる土砂層内で発生する間隙水圧としては、過渡的間隙水圧と残留間隙水圧とが考えられるが、前者は、波浪による変動圧力と一対一に対応する砂骨格と間隙水の瞬間的応答によるもので、後者は、波浪作用による繰返しせん断応力により引き起こされ、変動圧力の強さと継続時間、および土砂層の排水特性によって、影響を受けると考えられるものである。

そこで、著者らは、土砂層として砂層を考え、砂層内に発生する波浪作用による間隙水圧の特性について、造波水槽を用いて実験を行うことにより検討を行った。

2. 従来の研究

Henkel は、波浪により引き起こされる変動圧力が海底地盤の安定性に影響を及ぼす重要な原因であるとした。従来、変動圧力は、不透水性固定床について、(1)式に示す線型波理論を用いて算定されたが、

$$P_0 = \rho g H / 2 \cosh ND, \quad N = 2\pi/L \quad \dots\dots\dots(1)$$

Mallaid と Dalrymple は、移動床の効果について検討を行い、不透水性移動床の圧力が、固定床の圧力より高いと予測した。さらに、Putnam¹⁾ は、砂骨格と海水とが非圧縮性であり、流体が等方性を持ち、流れが、Darcy 則に従うものとして解を求めたが、間隙水圧の明白な表現を与えていなかった。Liu²⁾ は、Putnam の解に基づいて、砂層深度に従う間隙水圧変動の振幅変化を、(2)式のように求めた。

$$P = P_0 \frac{\cosh N(D_s - z)}{\cosh ND_s} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Sleath³⁾ は、Putnam-Liu の解析法を、水理的異方性

を含むように拡張して、(3)式を得た。

$$P = P_0 \frac{\cosh [N(K_x/K_z)^{1/2}(D_s - z)]}{\cosh N(K_x/K_z)^{1/2}D_s} \quad \dots\dots\dots(3)$$

Moshagen と Tørum は、水を圧縮性、土骨格を固定と仮定したが、この仮定は、非現実的なものであり、層深度による間隙水圧の減衰を過剰に導くものである。

次に、Madsen⁴⁾ と Yamamoto⁵⁾ は、Biot の多孔質弾性体の理論を用いて、波浪作用下の砂中の有効応力と過渡的間隙水圧の解析を行った。さらに、大草⁶⁾ は、弾性透水層理論に基づき、より厳密に理論式を導き、併せて、各種土砂条件における、長周期波から短周期波にわたる実験結果を報告している。また、Tsui⁷⁾ は、実験結果に基づいて、短周期波においては、砂層表面における変動圧力として、(4)式に示す第2次近似の Stokes 波理論が、

$$P_s = \frac{\rho g H}{2 \cosh ND} - \frac{3\rho g N H^2 \tanh(ND)}{16 \sinh^2(ND)} \\ \times \left[\frac{1}{\sinh^2(ND)} - \frac{1}{3} \right] - \frac{\rho g N H^2 \tanh(ND)}{16 \sinh^2(ND)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

測定値と理論値の良い一致をみるとし、モデル波周期が、1.7s よりも大きいときは、測定値は、理論値よりも小さく、砂層中の圧力は、従来の理論予測値よりも、深くなるに従って、急速に減少するとしている。

3. 実験概要

実験は、舞鶴工業高等専門学校土木工学科に設置されている、図-1に示した造波水槽を用いて行った。

図中、 D_s は砂層の厚さで、今回の実験では、36 cm とした。また、 L_s は砂層の長さで、表-1に示した(I)、(II)、(III)の各場合について実験を行った。造波水槽の水深 D は、77 cm で、砂層上では、41 cm とな

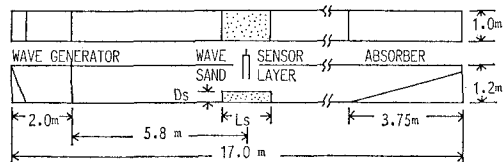


図-1 造波水槽の概要

* 正会員 舞鶴工業高等専門学校助手 土木工学科

** 正会員 農博 京都大学教授 農学部農業工学科

る。また、この造波水槽は、周期が 0.6 s から 2.27 s の範囲の波を起こすことができるものである。

波高計は、砂層中央部に設置し、圧力変換器は、波高計直下の砂層表面および砂層中に、図-2 に示すように設置した。ここで、 P_0 等の P の添字は、砂層表面からの深さ z (cm) を示している。

また、実験に用いた砂は、福井県大飯郡高浜町の難波江浜の砂で、その物理特性は、表-1 に示した。

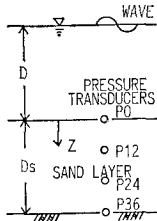


図-2 圧力変換器の設置状況

表-1 実験砂(難波江砂)の特性

	(I)	(II)	(III)
砂層長 L_s	250.0 cm	166.0 cm	99.5 cm
砂層密度 γ_d	1.61 t/m ³	1.54 t/m ³	1.67 t/m ³
比重 G_s	2.70		
透水係数 K	0.023 cm/s		
均等係数 U_e	1.53		
有効径 D_{10}	0.114 mm		
中央粒径 D_{50}	0.160 mm		

4. 実験結果と考察

(1) 波により引き起こされる変動圧力

図-3 に、砂層表面で測定された圧力 P_0 と、同時に測定した波高および周期を用いて、第 2 次近似の Stokes 波理論により算定した圧力 P_s との関係を示した。砂層条件の異なる 3 つの場合共、圧力が、 0.004 kgf/cm^2 ($3.92 \times 10^3 P_a$) 程度までは、理論値と測定値は、良い一致を示

しているが、それ以上の圧力の範囲では、測定値が、(4) 式で推定される理論値よりも低い値となっている。その傾向は、砂層の密度等の排水特性の影響を受けているものと思われる。

(2) 作用する波の周期の変動圧力への効果

砂層表面での測定圧 P_0 と理論圧 P_s との圧力比と、作用する波の周期 T との関係、砂層条件の異なる 3 つの場合について、図-4 (a), (b), (c) に示した。今回行った実験では、各場合共、図上プロットに、ばらつきが認められるが、(I) の場合では、 $T=1.25 \text{ s}$ 付近、(II) の場合には、 $T=1.04 \text{ s}$ 付近、(III) の場合には、 $T=1.80 \text{ s}$ 付近を境に、圧力比が、周期の増加に伴って小さくなっている。Tsui は、周期 1.7 s としているが、この値は、砂層の大きさ、砂層の排水特性等の影響を受けているものと思われる。

また、砂層中での測定圧 P_z と砂層表面での理論圧 P_s との圧力比と、作用する波の周期との関係についても (I), (II), (III) の各場合について図-4 (a), (b), (c) にそれぞれ示した。それによると、周期が大きくなるに従って、圧力比が減少する砂層表面での傾向とは逆に、圧力比は、周期の増加に伴い増加する傾向にある。また、その傾向は、砂層中深くなるに従って顕著となっている。

これらの図において、図上プロットにばらつきが認め

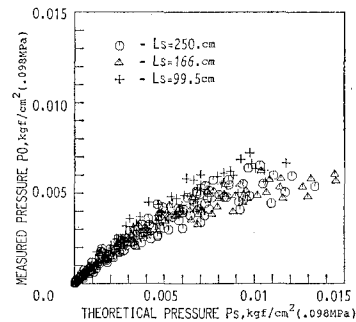


図-3 砂層表面での測定圧と理論圧の比較

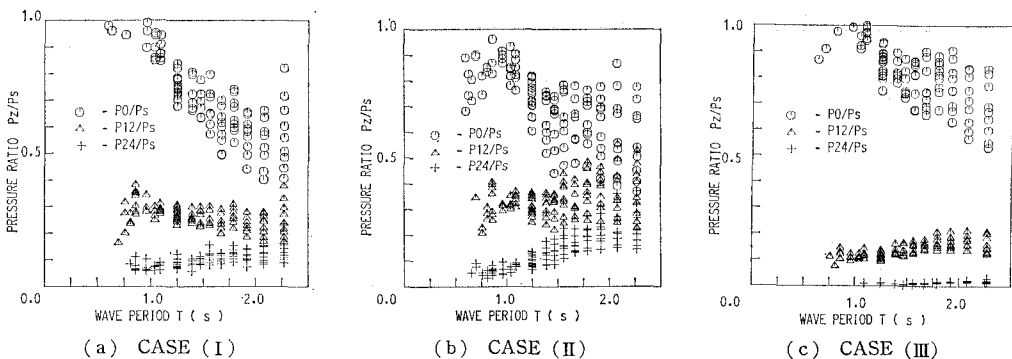


図-4 砂層中の間隙水圧に及ぼす波の周期の効果

られることから、周期による影響のみでなく、他の要因による影響があるものと思われる。先に示した図-3において、圧力が大きくなるに従って、ばらつきが大きくなっていることから、波高 H による影響とも考えられる。

(3) 作用する波の波高の変動圧力への効果

砂層表面と砂層中での測定圧と砂層表面における理論圧との圧力比と、波高 H との関係を、(I)~(III)の各場合について、図-5 (a), (b), (c) それぞれに示した。それによると、砂層表面および砂層中共に、波高の増加に伴って、圧力比が減少しているが、周期との関係と同様に、図上プロットにばらつきが認められる。このばらつきの傾向は、砂層表面で最も大きく、砂層中深くなるに従って小さくなっている。(I)と(III)の場合の結果は、(II)の場合の結果と比べて、ばらつきが相当小さい。これは、(II)の場合、砂層の密度がゆるい状態にあることから、密な砂層では、ばらつきが小さくなるものと思われる。

(4) 砂層中の間隙水圧の減衰効果

(2)では、測定圧と理論圧との圧力比を用いて検討を行ったが、ここでは、砂層中の測定圧と砂層表面での測定圧との圧力比を減衰比として、砂層条件の異なる3つの場合について、それぞれ図-6 (a), (b), (c) に示し

た。それによると、減衰比 P_z/P_0 は、周期の増加に伴って増加しており、(III)の場合を除いて、増加の傾向は、砂層内深さ z に関係なくほぼ一定である。また、(II)の場合に、減衰比の増加の割合が、他の二つの場合と比べて大きいのは、砂層の密度が小さく、比較的ゆるい状態にあることによるものと思われる。全体的に、減衰比は、砂層中深くなるに従って小さくなっており、その傾向は砂層の密度が大きいものほど顕著である。

(5) 砂層中の間隙水圧に及ぼす波形勾配の効果

(2), (3) で指摘したとおり、測定値と砂層表面での理論値との圧力比は、実験砂層が同一条件の場合には、作用する波の周期による影響だけでなく、他に波の波高の影響を受けていると思われる。また、それらの影響は、周期の増加に伴って、砂層中の圧力比が増加傾向にあるのに対して、波高の増加に伴って、砂層中の圧力比が減少傾向にあることから、従来、波の特性を検討するために用いられている波形勾配 H/L を用いて検討を行うことにした。(2)で述べたように、砂層表面と砂層中の圧力とでは、その特性に差異があることから、ここでは、測定圧と砂層表面での理論圧との比をとることで無次元化することにした。

そこで、(I)~(III)の各場合について、砂層表面および砂層中での測定圧と(4)式で推定される砂層表面に

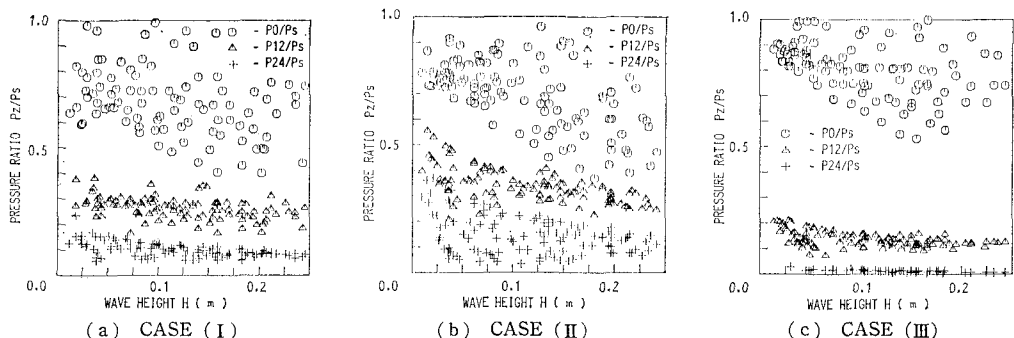


図-5 砂層中の間隙水圧に及ぼす波の波高の効果

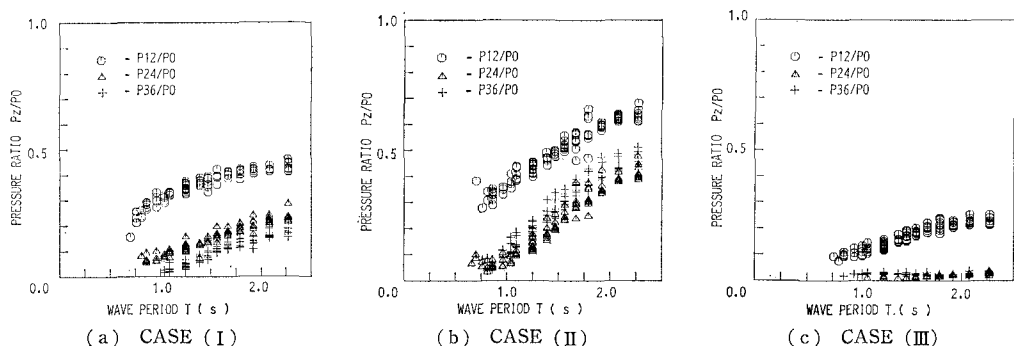


図-6 減衰比に及ぼす作用する波の周期の効果

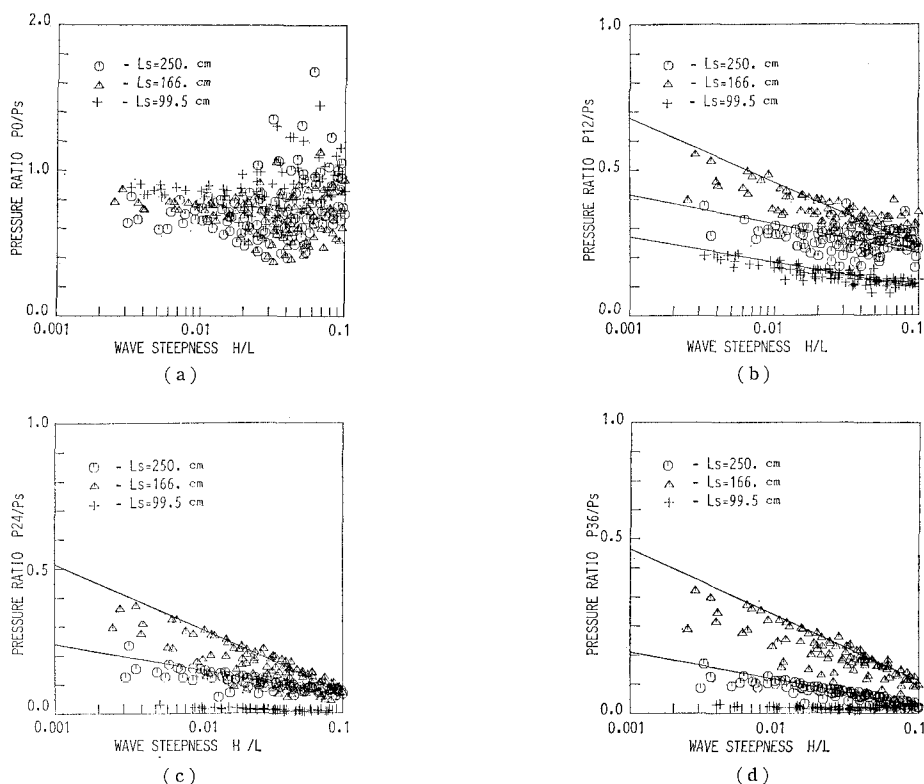


図-7 砂層中の間隙水圧に及ぼす波形勾配の効果

おける理論圧との比 P_z/P_s と波形勾配 H/L の対数値との関係を、図-7 (a)~(d) にそれぞれ示した。それによると、砂層表面での圧力比は、大きな波形勾配においては、ばらつきが大きい、波形勾配の対数値の増減に対してほぼ一定である。また、砂層中での圧力比は、波形勾配の対数値の増加に伴って、直線的に減少しており、その傾きは、同一砂層条件では、ほぼ一定値をとっている。(Ⅲ)の場合については、砂層中深くなるに従っての圧力の減衰が大きい、 $z=24$ cm, 36 cm では、圧力比は小さな値となり、傾きを一定としてしまうのは困難がある。以上のことから、これらの減少傾向の傾きおよび砂層深度による圧力の減衰の割合は、砂層の排水特性、砂層の大きさ等の砂層条件の影響を受けているものと思われる。

(6) 波形勾配を用いた実験結果の整理法

(5) で示したように、圧力比 P_z/P_s は、波形勾配の常用対数値と直線関係が認められることから、(5) 式を実験式として用いることにした。

$$\frac{P_z}{P_s} = -A \left(\log \frac{H}{L} + 3 \right) + B \quad \cdots \cdots (5)$$

各種実験条件において、(5) 式中の係数 A , B がどのような値をとるものかを考察することにより、(5) 式の検討を行うことにした。

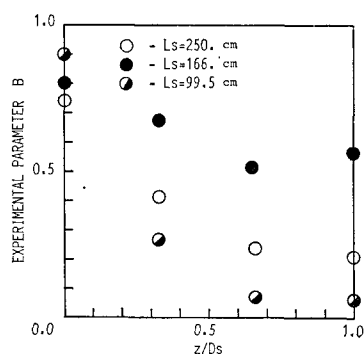


図-8 係数 B と相対砂層深さ z/D_s との関係

係数 B と、砂層厚 D_s で除して無次元化した相対砂層深さ z/D_s との関係を 図-8 に示した。それによると、(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) の場合には、砂層底でわず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-9 に示した。それによると、砂層の密度が密なほど、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は、係数 A は、砂層の密度による

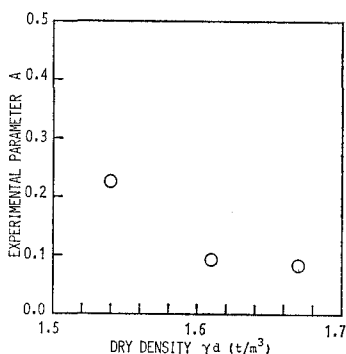
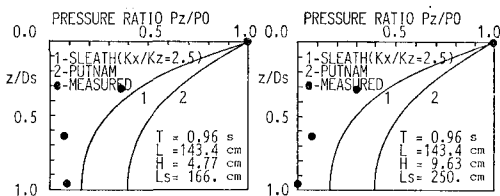
図-9 係数 A と砂層の密度 γ_d との関係

図-10 砂層中における測定圧と理論圧の比較

影響が大きく、砂層の大きさによる影響は、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。

また、図-10 に示すように、測定値は、理論値よりも相当低いものとなっており、(2), (3) 式で推定される理論圧が、実験値と一致するとはかぎらないので、砂層中の過渡的間隙水圧の推定を行おうとする場合、あらかじめ、このような模型実験を行うことにより、砂層の特性を考慮した実験式を用いることができれば都合が良い。しかし、原型への適用にあたっては、模型と原型の相似律についての慎重な検討が必要である。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言えず、模型実験結果を直接、原型事象に適用するには問題がある。

5. ま と め

砂層表面の波圧の理論推定式として、第2次近似の

Stokes 波理論を用いた。測定圧と理論圧との比較において、比較的低い波圧では、両者は良い一致を示しているが、圧力が大きくなるに従って、測定圧は、理論圧よりも低いものになっている。

砂層中の測定圧と砂層表面での理論圧との圧力比は、作用する波の波高と周期の影響を受けていることから、波形勾配を用いて検討した。その結果、圧力比は、波形勾配の対数値の増加に伴って直線的に減少する傾向にあり、簡便な実験式を得た。その実験式中の係数は、砂層の排水特性等の条件により求められるものである。しかしながら、これらの実験式を、直接、原型事象に適用することには、先にも述べたとおり、多くの克服すべき問題点がある。今後、現地観測データとの比較検討を行うことにより、提案した実験式の適用について検討を行うつもりである。

また、本研究の遂行に際し、貴重な御助言をいただいた、京都大学農学部 内田一徳助教授、菊沢正裕助手並びに村上 章助手に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Putnam, J. A.: Loss of wave energy due to percolation in a permeable sea bottom, Trans., A.G.U., Vol. 30, No. 3, pp. 349~356, 1949.
- 2) Liu: Damping of water waves over porous bed, Jour. of Hydraulics Div., ASCE, Vol. 99, No. HY12, pp. 2263~2271, 1973.
- 3) Sleath, J. F. A.: Wave-induced pressures in beds of sand, Jour. of Hydraulic Div., ASCE, Vol. 96, No. HY2, pp. 367~378, 1970.
- 4) Madsen, O. S.: Wave induced pore pressures and effective stresses in porous bed, Geotechnique, Vol. 28, pp. 377~393, 1978.
- 5) Yamamoto, T.: Wave induced instability in seabeds, Proc. of Coastal Sediments Conference 1977, 5th Symposium of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE, pp. 898~913, 1977.
- 6) 大草重康・藤本雅一: 二次元における wave-induced pore water pressure, 第17回土質工学研究発表会, pp. 2377~2380, 1983.
- 7) Tsui, Y. and S. C. Helfrich: Wave-induced pore pressures in submerged sand layer, Jour. of the Geotechnical Engrg. Div., ASCE, Vol. 109, No. 4, April, pp. 603~618, 1983.