

円形、方形貯油タンク(単体、群体)に作用する波力(実験)

長崎 作治*・小林 浩**

1. 要 旨

大寸法をもつ潜水構造物(一例として原油貯油タンク)に作用する波力を算定する際、杭に作用する波力の理論式をそのまま適用することはできない。

一般に潜水構造物の容積は大きく、寸法は水平・垂直方向を等しく、あるいは水平方向を垂直方向より大きく採っている。

形状としては、円形・方形・球形・半球形などが考えられる。

本論文では、最初に単体としての円形、方形貯油タンクに作用する水平、垂直方向の波浪荷重(波力)を二次元水槽でモデル(容積も変え)実験から測定し、理論(円形には Morison らによる波力の計算式を、方形には Reid らによる波力の計算式を適用した)計算値と比較した。

次に、円形、方形タンクを3列の千鳥状、格子状に配列し、その前・中・後列における単体に作用する水平、垂直方向の波力を測定し、円形と方形について作用波浪と比較した。

その結果、単体としての円形、方形の作用波力、円形、方形の千鳥状、格子状における多列タンクに作用する波力の特性などについて知ることができた。

2. 円形、方形単体タンクに作用する波力(実験測定)

(1) 円形、方形単体タンクに作用する波力

円形(直径 40 cm)、方形(一辺の長さ 40 cm)、縮尺 1 : 100 の円形、No. 1 (高さ 15 cm)、No. 2 (高さ 22 cm)、No. 3 (高さ 29 cm)、方形 No. 1 (高さ 15 cm)、No. 2 (高さ 22 cm)、No. 3 (高さ 29 cm)、各タンクに波浪(波高 5, 10, 15 cm、周期 1.0, 1.3 sec と波高、5, 10 cm、周期 0.8, 2.6 sec)をそれぞれ作用させ、タンクを支持する測定棒からタンクに作用する水平力および垂直力を測定した。

なお使用した二次元造波水槽は長さ 38 m、幅 1 m、深さ 1 m、鋼製両面ガラス張りで、造波装置は変形フラップ型である。表-1 に貯油タンクの寸法と容量を、図-1 に円形、方形貯油タンク No. 1 の形状を示す。

各タンクはそれぞれ単独に二次元水槽の造波機より 15 m 隔たったところにあらかじめモデル固定用の鉄製棒を設け、図-2 に示される要領で上からモデルを吊り、鉄製棒下方のパイプでモデルを固定した。さらにモデルが水平を保つよう自重に相当するカウンターウェイトで調整し、モデルが波浪に対し挙動するよう水槽底面より 3 cm 浮かせた。なお水深は 43 cm とした。

水平方向の作用波力の測定は上から吊り下げた 1 本の固定棒の両側に添付したひずみゲージから、垂直方向の作用波力の測定は 2 本の固定用パイプおのこの両側に添付したひずみゲージからオシログラフで描かれた各ひずみ曲線のうち 10 波の(反射波の入らない)平均振れ幅をまえもって用意したキャリブレーション時の振れ幅(d)とひずみ量(ϵ)、ひずみ量と作用力(P)との関係グラフ(ϵ - P)で換算し、作用波力を読みとった。

波高計はタンク真横とタンク前方 3.4 m の位置にそれぞれセットし、ひずみと同時にオシログラフで記録した。また二次元水槽の側面ガラスに 2.5 cm のマス目を

表-1 貯油タンクの寸法と容量

タンク名	現場寸法		相似率	モデル寸法	
円形タンク No. 1	直径	40 m	1/10 ²	直径	40 cm
	高さ	15 m		高さ	15 cm
	容量	116 000 bbl	1/10 ⁶	容量	18 840 cm ³
円形タンク No. 2	直径	40 m	1/10 ²	直径	40 cm
	高さ	22 m		高さ	22 cm
	容量	171 000 bbl	1/10 ⁶	容量	27 632 cm ³
円形タンク No. 3	直径	40 m	1/10 ²	直径	40 cm
	高さ	29 m		高さ	29 cm
	容量	225 000 bbl	1/10 ⁶	容量	36 424 cm ³
方形タンク No. 1	縦・横	40 m	1/10 ²	縦・横	40 cm
	高さ	15 m		高さ	15 cm
	容量	148 000 bbl	1/10 ⁶	容量	24 000 cm ³
方形タンク No. 2	縦・横	40 m	1/10 ²	縦・横	40 cm
	高さ	22 m		高さ	22 cm
	容量	217 000 bbl	1/10 ⁶	容量	35 200 cm ³
方形タンク No. 3	縦・横	40 m	1/10 ²	縦・横	40 cm
	高さ	29 m		高さ	29 cm
	容量	286 000 bbl	1/10 ⁶	容量	46 400 cm ³

* 正会員 東海大学教授 海洋学部海洋土木工学科

** 正会員 清水建設(株)海洋開発部

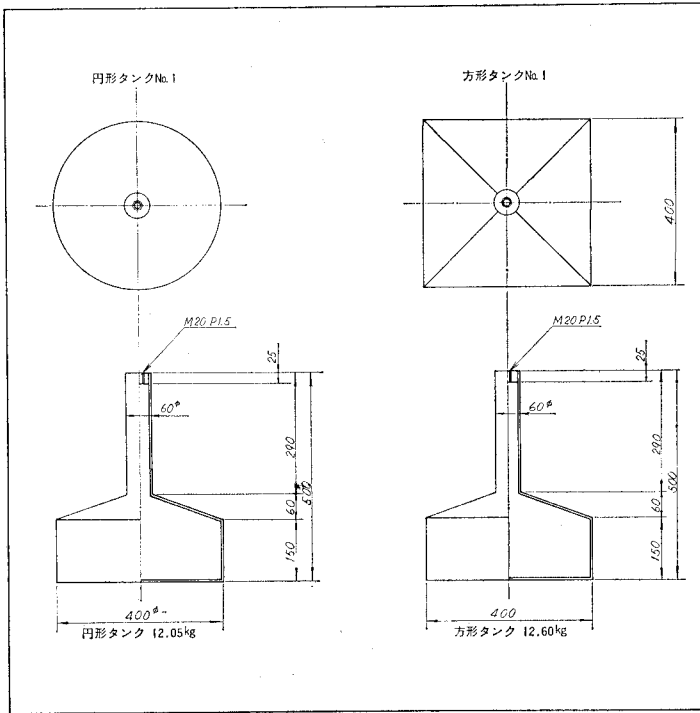


図-1 円形, 方形各タンク No. 1 の形状

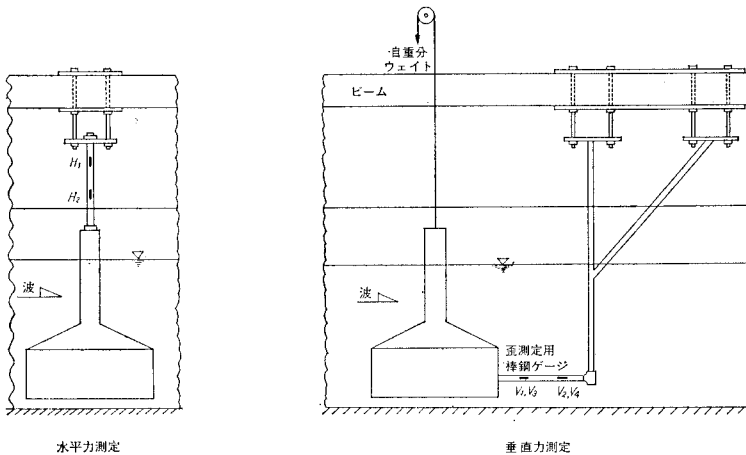


図-2 単体モデルの固定要領

描き, 水槽外側に 8 ミリカメラを固定し, タンク側面につけた×印の挙動を記録した。8 ミリカメラから求めた No. 1 モデル (No. 2, No. 3 略) の最大振幅は円形では波高 15 cm, 周期 1.0, 1.3 sec 時に水平方向 7 mm, 波高 15 cm, 周期 1.3 sec 時に垂直方向 7 mm, 方形では波高 15 cm, 周期 1.0, 1.3 sec 時に水平方向 7.5 mm, 波高 15 cm, 周期 1.0 sec 時に垂直方向 4 mm であった。

なお水中に置かれた各タンクと測定装置の水平, 鉛直固有振動周期の計算値は水平 0.081~0.131 sec, 鉛直 0.0576~0.0882 sec で, 波浪との共振はほとんどなくごく一部のケースについてのみ鋸歯状の波形がみられた程

度である。

円形, 方形タンクの作用波浪と水平, 垂直方向の作用力測定値を表-3, 表-4 の左側に示す。これより円形, 方形別の比較が一応できる。

質量力, 抗力を位相から求める作業では実測オシログラムを位相分解することが容易にできるようにパンタグラフで全体を 4 倍に拡大し, これから 45° に分割し, 振幅幅を読んだ。

位相から質量力 (F_M) と 抗力 (F_D) を読みとり, 後述の理論計算値と比較し, C_M , C_D 値を求めた。一例として円形 No. 1 の C_M の計算過程を表-2 に示す。

(2) 円形, 方形貯油タンクに作用する波力(理論計算)

作用波力の理論計算には波浪の回折現象¹⁾等を考慮しないこととし, 円形タンクには, Morison, O'Brien ら²⁾の波力の計算式

$$dF_M = C_M \cdot \frac{w}{g} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} \cdot dz \quad \dots (1)$$

$$dF_D = C_D \cdot \frac{w}{2g} \cdot D \cdot u^2 \cdot dz \quad \dots (2)$$

を, また方形タンクには Reid, Bretschneider³⁾の波力の計算式を用いた。本実験の場合, 質量力が抗力より大きく, 適用理論式にも問題点があるがあえてこれを適用した。

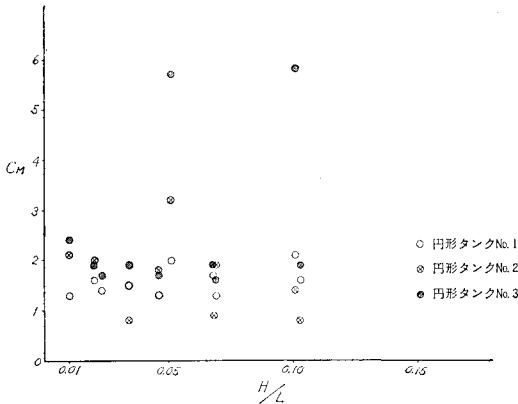
水平方向に長く全部潜水あるい

は一部潜水した殻構造物に作用する波力の算定には波長は重要な要素の一つとなる。波浪の水平方向の作用力は質量力で作用波圧から求める。潜水構造物が長さ L_1 , 幅 L_2 , 高さ L_3 のデメンションで波長 L と対比できるなら水平方向の作用力の算定手順は ① 適当な波理論から波形 (表面位) を描き, ② 波峰が決定したら $L_2 \times L_3$ の表面積に作用する波圧から最大水平力を求めればよい。③ それには構造物の両端における対静水面位置との水平圧比を求め, ④ 同形のモデル実験から質量係数 C_M を波定し, ⑤ 式 (3) に代入すればよい。

$$F = C_M L_2 L_3 (\Delta P_1 - \Delta P_2) \quad \dots (3)$$

表—2 円形タンク No. 1 質量係数

波高 H (cm)	周期 T (sec)	実験値 F_M (g)	理論値 F_M' (g)	質量係数 C_M ($=F_M/F_M'$)
5	0.8	800	749.49	1.07
	1.0	1 850	970.92	1.91
	1.3	1 200	1 012.48	1.19
	2.6	300	669.43	0.45
10	0.8	3 200	1 498.04	2.14
	1.0	3 700	1 941.81	1.91
	1.3	2 700	2 024.85	1.33
	2.6	1 400	1 338.68	1.05
15	1.0	5 000	2 912.91	1.72
	1.3	4 700	3 037.34	1.55

図—3 円形，方形各タンクの C_M 値

ΔP は実測の水圧と静水圧との差で，下添字の 1, 2 は波峰から部材位置 x_1 , x_1+L_1 を示す。Reid と Bretschneider は Airy の微小振幅波理論と孤立波理論を式 (3) に適用し，最大作用力とその生ずる位置を示している。なお円形各タンクの H/L に対する C_M 値を図—3 に示す。

(3) 考 察

実験結果を形状，容量， C_M 値について考察すると，

(i) 形状に関し，水平方向の測定波力を比較すると，No. 1 の場合，方形の方が円形より水平方向の波力は大きい。しかし，No. 2 では波高 5 cm，周期 0.8 sec の場合 1 kg，No. 3 では波高 5 cm，周期 0.8 sec で 4.7 kg 円形タンクの方が方形タンクより作用波力が大きかった。

タンクの容量が小さい場合，一般的に方形の方が円形より大きな波力を示した。しかし容量が大きい場合，波浪周期が小さいと逆となった例もある。周期 0.8 sec，波高 5 cm，10 cm また周期 1.3 sec，波高 15 cm の場合は，円形の方が方形よりも大きかった。

形状別の垂直方向の測定波力を比較すると，

No. 2 では波高 10 cm，周期 0.8 sec で 2.9 kg 円形の方が方形よりも大きかった。またタンク No. 3 では波高 10 cm，周期 0.8 sec で 8.1 kg 円形の方が方形より大きい。しかし，2, 3 の例を除いて方形の方が円形より垂直波力は大きかった。容量が小さい場合，方形の方が円形よりも垂直波力は小さく示された。

また，周期が長くなると円形，方形の形状による垂直波力の差はあまりなかった。

(ii) 容量に関してはタンク No. 3 は実験におけるすべての周期，波高に対し水平波力は最大となった。No. 2 の方が No. 1 より当然水平力は大きい。方形タンクでは容量が大きくなるほど水平波力も大きくなる。しかし波高 10 cm，周期 0.8 sec の場合は No. 2 が最大となった。

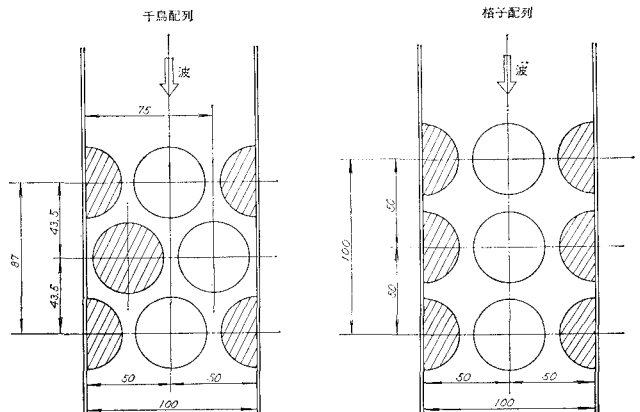
垂直波力は円形タンクでは容量に比例する傾向を一般的に示しているが，No. 1 の方が No. 2 よりも大きかった例もある。また波高 5 cm，周期 2.6 sec の場合も No. 2 の方が No. 3 より垂直波力は大きかった。方形の場合は No. 2 の方が No. 1 より垂直波力は大きい。しかし波高 15 cm，周期 1.0 sec の場合だけ No. 2 の方が No. 3 より垂直波力は大きかった。

形状および容量と波力との関係を比較し，結論づけることはできないが，6 個のタンクのうち円形タンク No. 1 が最適ではないと思われる。

(iii) C_M については，円形タンク No. 1 の平均質量係数は 1.43，No. 2 では 0.63，No. 3 では 2.01，方形タンク No. 1 の平均質量係数は 1.62，No. 2 では 0.63，No. 3 では 2.59 であった。

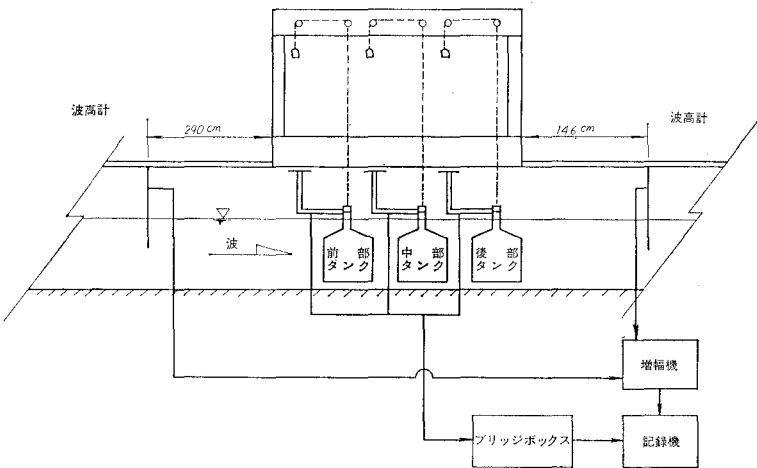
3. 円形，方形群体タンクに作用する波力（実験測定）

二次元水槽に No. 1 型の円形および方形タンクを 3 列の千鳥状と格子状に配列し，群における前，中，後列



但し，斜線を施した部分は波力測定をしないダミータンクの配置を示す。

図—4 円形・群体タンクの配列



図—5 実験装置の概略 (群体)

各単体に作用する波力を測定し、同時に各タンクの挙動を観察した。なお波浪は周期 0.8, 1.0, 1.3, 2.6 sec に対し波高 5 cm と 10 cm をまた周期 1.0, 1.3 sec に対し波高 15 cm をも作用させた。

実験要領は千鳥と格子の2配列について、前、中、後列の3個のタンクについて水平、垂直方向のひずみ量と

作用波高を同時にオシログラフに記録させた。

なお今回はタンク内に水を入れ、タンク底面は水底面より 3 cm あがった位置となるよう装置した。円形タンクの配列を 図—4 に、実験装置の概略を 図—5 に示す。

単体タンクの実験と同様にキャリブレーション時の振れ幅 (d) とひずみ量 (ϵ) の関係グラフ ($d-\epsilon$)、ひずみ量と波力 (P) との関係グラフ ($\epsilon-P$) からオシログラフに記録された 10 波の平均振れ幅 (d) を読み、 $d-\epsilon$ グラフを利用してひずみ量 (ϵ) を読み、ひずみ

量 (ϵ) から $\epsilon-P$ グラフで作用波力 P を読みとった。測定した水平、鉛直方向の作用波浪と波力を 表—3、表—4 に示す。

多列タンクに作用する波高別波力、配列形状別波力を比較し、配列、形状、周期、波高について次のように考察した。

表—3 単体と群体の水平方向作用波力

	波高 H (cm)	周期 T (sec)	単体 波力 P (kg)	群体の波力 P (kg)					
				千鳥配列			格子配列		
				前部 タンク	中部 タンク	後部 タンク	前部 タンク	中部 タンク	後部 タンク
円形	5	0.8	1.3	1.4	1.5	1.4	1.7	2.1	2.4
		1.0	1.5	1.5	1.6	1.3	1.7	2.0	2.1
		1.3	1.4	1.3	1.9	1.6	1.6	1.7	2.0
		2.6	0.9	1.3	1.4	0.9	1.1	1.5	1.2
	10	0.8	3.1	2.9	2.8	2.9	3.6	4.7	5.7
		1.0	3.3	3.0	3.1	2.7	3.9	4.4	4.6
		1.3	2.7	3.5	3.9	3.5	3.2	3.7	3.3
		2.6	2.1	2.9	3.0	2.8	2.6	3.0	2.7
	15	1.0	4.8	4.1	4.4	3.8	5.5	7.3	4.1
		1.3	3.8	5.6	6.2	5.7	5.1	5.3	5.3
方形	5	0.8	1.7	2.3	2.5	2.8	2.6	3.1	3.3
		1.0	1.9	3.1	2.4	2.4	3.4	2.7	2.4
		1.3	1.6	3.2	3.3	3.0	3.3	3.1	3.3
		2.6	1.2	1.8	1.8	2.0	1.9	1.8	2.0
	10	0.8	3.5	5.0	4.9	5.4	5.3	6.1	6.2
		1.0	4.1	5.7	4.4	4.2	5.3	4.7	4.8
		1.3	3.5	6.1	5.8	5.6	6.1	6.3	7.3
		2.6	2.5	4.6	4.3	4.3	4.5	4.6	4.9
	15	1.0	6.4	9.2	6.4	9.6	9.4	6.2	5.8
		1.3	4.5	8.9	11.0	11.0	9.7	10.7	11.9

表—4 単体と群体の垂直方向作用波力

	波高 H (cm)	周期 T (sec)	単体 波力 P (kg)	群体の波力 P (kg)					
				千鳥配列			格子配列		
				前部 タンク	中部 タンク	後部 タンク	前部 タンク	中部 タンク	後部 タンク
円形	5	0.8	0.7	4.4	4.3	3.8	5.1	5.5	5.5
		1.0	2.1	4.5	4.6	3.5	5.1	5.5	5.5
		1.3	0.4	6.0	5.9	4.2	5.5	6.3	5.5
		2.6	0.2	3.8	3.2	2.7	2.7	3.7	3.3
	10	0.8	5.0	8.7	8.8	8.2	11.4	12.7	15.0
		1.0	3.9	9.2	9.3	7.7	12.6	12.7	12.7
		1.3	1.1	11.4	8.8	10.7	7.9	9.8	9.8
		2.6	0.4	9.0	8.5	8.6	7.9	9.1	7.5
	15	1.0	5.3	11.9	13.0	10.1	18.9	15.6	11.4
		1.3	1.6	17.1	18.6	16.6	15.0	16.7	16.7
方形	5	0.8	1.9	5.4	6.5	7.0	6.2	8.1	8.1
		1.0	0.8	6.9	6.5	6.3	7.5	7.5	7.4
		1.3	0.5	7.7	10.1	7.8	7.6	7.3	9.4
		2.6	0.2	4.6	5.1	5.1	4.5	4.6	5.4
	10	0.8	3.6	11.0	12.8	14.0	12.4	15.3	14.6
		1.0	2.0	13.2	15.0	11.0	14.2	13.2	12.4
		1.3	1.1	13.8	16.8	15.0	14.0	15.8	20.4
		2.6	0.5	11.0	12.4	11.2	10.6	11.7	13.7
	15	1.0	3.6	19.8	15.8	24.8	24.4	15.6	14.6
		1.3	1.7	21.2	27.2	26.8	21.5	25.4	32.5

(i) 配列：格子と千鳥配列を比較すると、千鳥配列の方が形状、波高、周期とも前、中、後列タンクとも作用波力はほぼ同一であった。格子配列より千鳥配列の方が作用波力は小さく、形状、波高と関係なく作用波力のばらつきがみられなかったことも一つの特性といえる。

(ii) 形状：円形タンク群より方形タンク群の方が作用波力は大きい。このことから円形タンクの方が適切な形状といえる。

(iii) 周期：円形格子状配列を除き、すべての配列、形状波高に対し、周期 1.3 sec の場合、前・中・後列とも最大波力を記録した。また一番長い周期 2.6 sec ではすべての形状、配列において作用波力は最小となった。

(iv) 波高：作用波高が大きくなるほど、波力も増し、前・中・後列の各タンクの作用波力にばらつきがみられた。以上より総合的に判断して、理想的な形状、配列は円形千鳥と思われる。

単体と群体中の単体（円形と方形）に作用する波力を示した表—3、表—4 から円形の場合は単体と群体中の単体のはっきりした水平方向の作用波力の差はないが、

方形の場合はその差がはっきり現われている。

垂直方向の作用力は円形、方形とも単体と群体中の単体の差が大きく現われた。

周期と波高についてみると、周期 1.3 sec で最大となる傾向が示され、波高が大きくなると波力も大きくなり、単体と群体中の単体の差が大きく示された。

参 考 文 献

- 1) MacCamy, R.C. and R.A. Fuchs: Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory, Tech. Memo. No. 69., B.E.B., Corps of Eng., 1954.
- 2) Morison, J.R., J.W. Johnson and M.P. O'Brien: Experimental Studies of Forces on Piles, Proc. 4th Conf. on Coastal Eng., 1953.
- 3) Reid, R.O. and C.L. Bretschneider: The Design Wave in Deep Water or Shallow Water, Storm-Tide, and Forces on Vertical Piling and Large Submerged Objects, Agricultural and Mechanical College of Texas, Dept. of Oceanography, Tech. Rept. on Contract NO_y-27474, DA-49-005-erg 18, and N 7 onr-48704, Feb. 1954 (Unpublished).