

# 陸岸に遡上した津波の障害物付近の流況

細井正延\*・坪田幸雄\*\*

## 1. まえがき

岸壁などから陸岸に遡上して形成される段波状津波が、付近に設置されている石油等の危険物屋外タンク群や家屋密集地帯を通過するときに、それらの構造物付近でせき上げにより水面が異常に上昇することが考えられる。タンクの屋根部分が水面下に没する状態になると、内部の危険物の流出やタンクの破壊にもつながり、あるいは家屋が大きな被害を受ける危険性が考えられる。本研究は、段波状津波が上記の構造物を通過するときの水面上昇量を算定するもので、解析を容易にするために定常問題として計算を行ない、その結果を2次元および3次元の模型実験の結果と比較した。以上はタンク群の周囲に防油堤がない場合であるが、次にタンク群の前後に防油堤模型を置いて2次元実験を行ない、タンク群の周辺での水面上昇量の増加を防油堤がない場合と比較した。また、地震力によってタンクが破損し内部の危険物が流出して防油堤内に貯留された後に、津波の襲来によって危険物が防油堤外の後方に流出し引火して火災を起こすことが考えられるので、防油堤外への流出率と津波の大きさ、防油堤の高さとの関係について2次元実験を行なって検討した。すでに、笠川・首藤は緩やかに変化する非定常流に対する2次元実験を行って障害物による流水抵抗を調べたが<sup>1)</sup>、本実験のように段波に対する研究はまだ行われていない。

## 2. 実験方法

### (1) 2次元実験の場合

図-1に示すように、長さ7.5m、幅30cm、高さ40cmの両側面ガラス張りの2次元水平水路を用い、水路

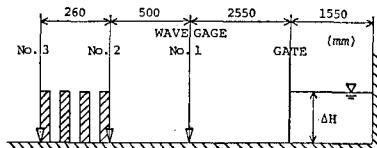


図-1 実験装置

\* 正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部土木工学科  
\*\* 正会員 工修 水産庁漁港部計画課

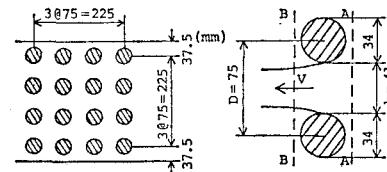


図-2 パイプの配置(2次元実験)

の上流側より1.55mの位置にゲートを設け、ゲートより下流3m付近にタンク群を模した直径3.4cmの鋼管パイプを図-2に示すように配置した。津波は、ゲート上流側だけに貯水し、ゲートを瞬時に引き上げることにより発生させた。ゲート上流側の貯留水深 $\Delta H=7, 9, 11, 13, 15$ cmの各々に対し、パイプの列数を水路方向に4列および7列として実験を行なった。ただし、パイプの水路方向、横断方向の中心間隔は4列でも7列でもすべて7.5cmにとった。波高測定は図-1に示す位置に2極容量式波高計を設置し、電磁オシログラフに接続して記録した。

上記の実験条件は防油堤がない状態であるが、防油堤がある場合の実験では、高さ3cmおよび4.5cm、幅1cmの板を防油堤模型として水路を横断して設けたが、その配置の状況と波高計の位置は図-3に示すとおりである。現在の防油堤の設置基準が“タンクと防油堤の距離はタンクの直径の1/3~1/2以上とする”となっているので、これに合わせたものである。

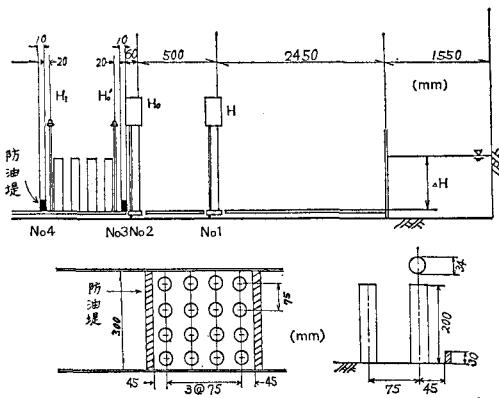


図-3 防油堤の配置(2次元実験)

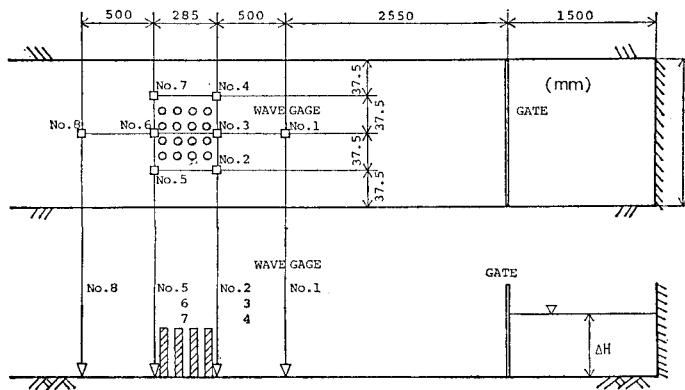


図-4 パイプの配置(3次元実験)

## (2) 3次元実験の場合

幅1.5m、長さ9.5mのコンクリート製の水平水路の中央に、2次元実験の4本4列の場合とまったく同じ状態でパイプを並べて実験を行なった。その配置の状況および波高計の設置位置は図-4のようである。また貯水槽の長さも2次元実験と同じく1.5mとしている。貯留水深 $\Delta H=6, 9, 12, 15, 18\text{ cm}$ である。

著者は先に、貯水槽のゲートを瞬間に引き上げて発生させた段波の性質が、鉛直岸壁から陸上に遡上した津波のそれとよく似ていることを確かめているので<sup>2)</sup>、このような方法で陸上を移動する実験段波を発生させることは妥当であると考える。

## 3. 結果と考察

まず、防油堤がない場合について解析と2次元実験を行ない、つぎに3次元実験を行なって2次元実験の結果と比較した。さらに、防油堤を設けた2次元実験を行なって、パイプ群前後の水面高の変化を先の防油堤がない場合と比較した。最後に、防油堤のある2次元模型で防油堤の内側に着色液を充満し、そこを段波が通過した後の着色液の濃度低下を測定して、着色液の流出率と段波の大きさ、防油堤の高さとの関係を調べた。

### (1) 防油堤のない2次元実験

パイプ群付近の水理諸量の記号を図-5に示す。貯水槽の長さ1.55mの状態で発生させたすべての段波において、入射段波の波高のピーク値 $H$ 、パイプ群前面および後面での波高のピーク値 $H_0, H_1$ がほぼ同時刻に現われることが確かめられたので、ピーク時においては図-5のII断面より下流側では定常状態になっていると

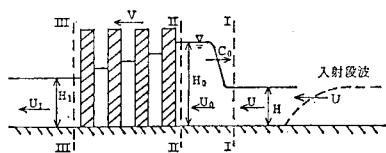


図-5 水理諸量の記号

みなして、定常流解析を行なった。またパイプ群の前面ではせき上げられた水面が段波状になって上流側へ反射、伝ばんする現象が認められた。

図-5のI-II断面間での連続式および底面摩擦を無視した運動量式をつくると、

$$H(U+C_0)=H_0(U_0+C_0)=qr \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho qr((U_0+C_0)-(U+C_0)) = \frac{1}{2}\rho g(H^2-H_0^2) \quad \dots \dots \dots (2)$$

II-III断面間の連続式、ベルヌーイ式

として

$$H_0 U_0 = H_1 U_1 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{U_0^2}{2g} + H_0 = \frac{U_1^2}{2g} + H_1 + C_D \frac{U_0^2}{2g} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、 $C_D$ : パイプ群による抵抗係数、 $U$ : 入射段波先端の移動速度

つぎに、4本4列または7列のパイプ群をまとめて4本1列とみなし、すなわち図-2(b)に示す状態におきかえて、A-B断面間における連続式およびパイプの間から流出する噴流の速度 $V$ を現わす式をつくると、

$$DH_0 U_0 = C_c b H_1 V \quad \dots \dots \dots (5)$$

$$V = C_v \sqrt{\frac{2g(H_0 - H_1)}{1 - \left(\frac{C_c b}{D} \frac{H_1}{H_0}\right)^2}} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 $C_c$ : 噴流の収縮係数、 $C_v$ : 流速係数

式(1)～(6)だけでは、入射段波の波高 $H$ と移動速度 $U$ を与えることでも、パイプ群前面での $H_0$ を求めるすることはできない。

いま、 $H_0/H=\alpha$ 、 $H_1/H=\beta$ とおくと、式(3)～(6)より次式が得られる。

$$\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)^2 = \left(\frac{H_0}{H_1}\right)^2 = \frac{\left(C_c \frac{b}{D}\right)^2 + \left(C_c C_v \frac{b}{D}\right)^2 (C_D - 1)}{1 - \left(C_c C_v \frac{b}{D}\right)^2} \quad \dots \dots \dots (7)$$

上式から、 $H_1/H_0=\beta/\alpha$ の値は入射段波のフルード数 $F_r=U/\sqrt{gH}$ には無関係であることがわかる。4列および7列のすべての種類の実験から、縦軸に $\beta/\alpha (=H_1/H_0)$ をとり横軸に入射段波の $F_r$ をとって描くと図-6のよ

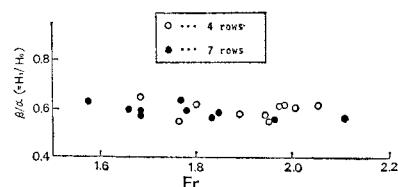


図-6 パイプ群前後の波高比(2次元実験)

うで、 $\alpha/\beta$  の大きさは  $F_r$  値とは無関係で一定であって、4 列で 0.606, 7 列で 0.598 である。したがって、式(7)で  $C_c=1.0$ ,  $C_v=1.0$  とすると  $C_D$  の値も一定となり、4 列で  $C_D=6.385$ , 7 列で  $C_D=6.554$  を得る。すなわち、パイプ群の列数や間隔等を変えた種々の配列状態に対する  $C_D$  の値が求められることになる。

つぎに、 $\beta/\alpha=H_1/H_0=A$  とおくと、式(1)～(6)より次式が得られる。

$$\alpha^6 + K_1\alpha^5 + K_2\alpha^4 + K_3\alpha^3 + K_4\alpha^2 + K_5\alpha + K_6 = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$K_1 = -2 - 8R$$

$$K_2 = 16R^2 + 8R - 4F_r^2 - 1$$

$$K_3 = 4 - 16R \cdot F_r^2 + 4F_r^2 + 8R$$

$$K_4 = 4F_r^4 - 1 + 4F_r^2 - 8R$$

$$K_5 = -2 - 4F_r^2$$

$$K_6 = 1$$

$$R = \frac{(1-A)\left(C_c C_v \frac{b}{D} A\right)^2}{1 - \left(C_v \frac{b}{D} A\right)^2}$$

あらかじめ、種々のパイプ群の配列状態に対し段波状津波の実験によって  $C_D$  の値が求められていれば、式(7)から  $H_1/H_0=A$  が算定できるから、任意の入射段波のフルード数  $F_r$  の値を与えれば式(8)から  $\alpha$  が求まり、パイプ群前面での波高  $H_0$  およびパイプ群通過直後の波高  $H_1$  も求まる。図-7(a), (b) には 4 列および 7 列の場合の  $H_0$ ,  $H_1$  の計算値  $H_{cal}$  と実験値  $H_{ex}$  の比較

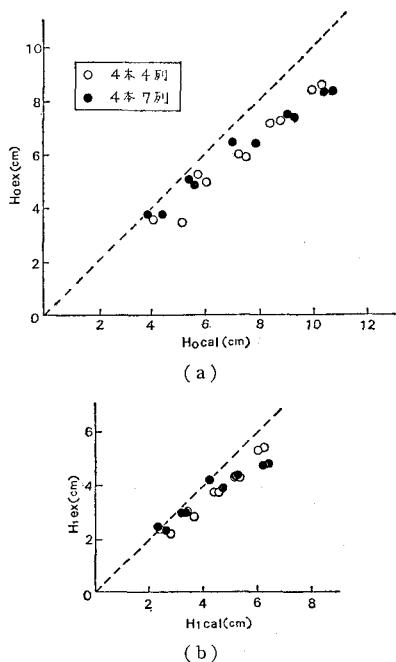


図-7 パイプ群前後面の波高の計算値と実験値の比較（2 次元実験）

が示されている。いずれも計算値が実験値よりもやや大きくなっているが、これは非定常流を定常流として扱ったためであると思われる。しかし、計算値は安全側へ偏っているので、上述の計算方法はタンク群や家屋群の近傍の水面上昇量を算出するために妥当なものと考える。

## (2) 防油堤のない 3 次元実験

タンク群は岸壁法線に平行に長い距離にわたって設置されている例が多いが、その場合には上記の 2 次元的取扱いの結果は両側を除く中央部付近で成立するはずである。しかし、両側面近くでは水が側方に流动することによって、水面高が中央部よりも低くなることが推測されるので、3 次元実験を行なってこの点を確かめた。ただし、4 本 4 列の場合についてしか実験を行なっていない。3 次元実験の場合にも 2 次元実験と同様に、入射段波の水深のピーク、パイプ群の前面およびパイプ群通過直後の水深のピークがほぼ同時刻に現われること、パイプ群前面でせき上げられた水面が段波状になって上流側に伝ばんすることが認められた。3 次元実験の場合には、とくにパイプ群の側方水面上に衝撃波が現われ、またパイプ群の中に一時貯留された水が下流側後方だけでなく側方へも流出するなど複雑な現象を呈するので、適切な解析方法を見いだすことが難しい。したがって、一応 2 次元の場合と同様の方法を用いて整理することにする。まず、波高計 No. 1, 3, 2, 6 で測定した時間波形を 図-8 に示す、

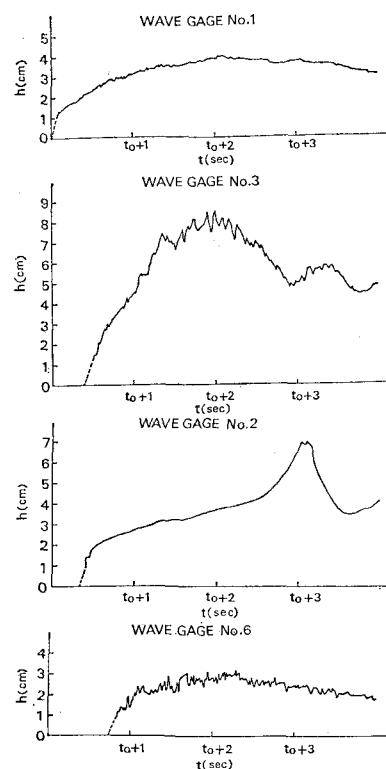


図-8 パイプ群周辺での水面高の変化（3 次元実験）

No. 3 および 6 では短周期の水面変動が著しく、No. 3 では第二、第三の反射段波がみられ、また No. 2 では  $(t_0+3)$  の所に第一のピークが現われている。横軸に入射段波の No. 1 でのフルード数  $F_r$  をとり、縦軸に  $\beta/\alpha = H_1/H_0$  ( $H_0$  は No. 3 での波高、 $H_1$  は No. 6 での波高) をとって描くと図-9 のようだ;  $\beta/\alpha$  は  $F_r$  に無関係に一定値をとることは 2 次元実験の場合と同じである。しかし、2 次元の場合の  $\beta/\alpha=0.606$  に対して、3 次元の場合には 0.370 でかなり小さいが、その原因は上に述べたように、側方流出によるためと思われる。つぎに、横軸に入射段波の  $F_r$  を、縦軸に  $\alpha=H_0/H$ ,  $\beta=H_1/H$  をとって示すと 図-10 のようである。図には 2 次元実験の結果も記載されており、パイプ群の前面では 3 次元も 2 次元もほぼ同程度の波高  $H_0$  を与えるが、後方での  $H_1$  は 3 次元実験の値は 2 次元の場合よりもかなり小さくなっていることがわかる。3 次元の場合の  $\beta/\alpha=H_1/H_0$  の値は、パイプの配置状態によって 2 次元の場合よりも

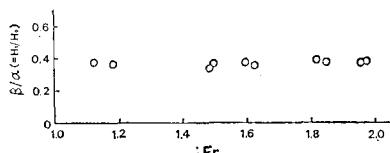


図-9 パイプ群前面の波高比(3次元実験)

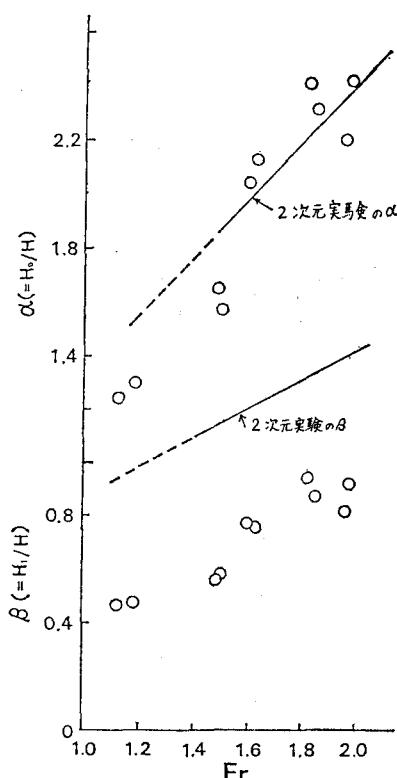


図-10 パイプ群前後の波高(3次元実験)

甚だしく広い範囲に存在するであろうから、あらかじめそのような多くの実験を行なって  $H_1/H_0$  の値を定めておくことは不可能に近い。したがって、2 次元での  $H_1/H_0$  の値を採用すれば、パイプ群後方の波高  $H_1$  は 3 次元の場合より大きく、安全側に求められることになる。

### (3) 防油堤を設けた 2 次元実験

図-3 に示す状態で 2 次元実験を行なって、パイプ群の前後での水面上昇高を防油堤がない場合と比較した。つぎに、防油堤の内部を着色水で満水にし、そこを段波が通過したときに着色水が防油堤の後方に流出する量を、内部の薄められた着色水の濃度を比色計を用いて測定することによって求めた。

#### a) 防油堤による水面上昇について

パイプ群の配置は 4 本 4 列で、防油堤の高さは 3 cm と 4.5 cm の 2 種類とした。貯留水深は  $ΔH=7, 9, 11, 13, 15, 17$  cm である。津波の第 1 波が入射するときは防油堤の内部は空であるので、まずこの状態で実験を行なった。しかし、第 2 波以降が入射するときには内部は海水で満たされているので、この状態に対しても実験を行なって内部が空の場合と比較した。防油堤高が 3 cm の場合について、横軸に入射段波の  $F_r$  をとり、縦軸にパイプ群の第 1 列目と防油堤の中間での相対波高  $H_0'/H$ 、または第 4 列目と防油堤の中間での  $H_1/H$  をとて実験値を描くと 図-11 (a), (b) のようになる。パイプ群の

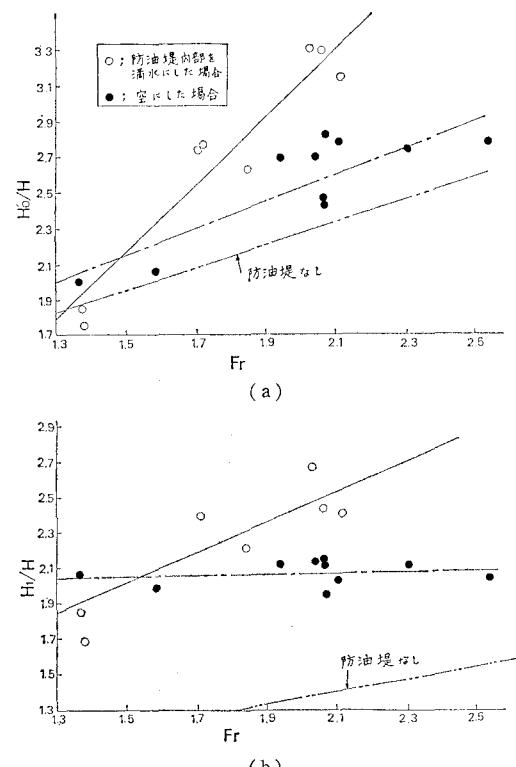


図-11 防油堤がある場合のパイプ群前後の波高

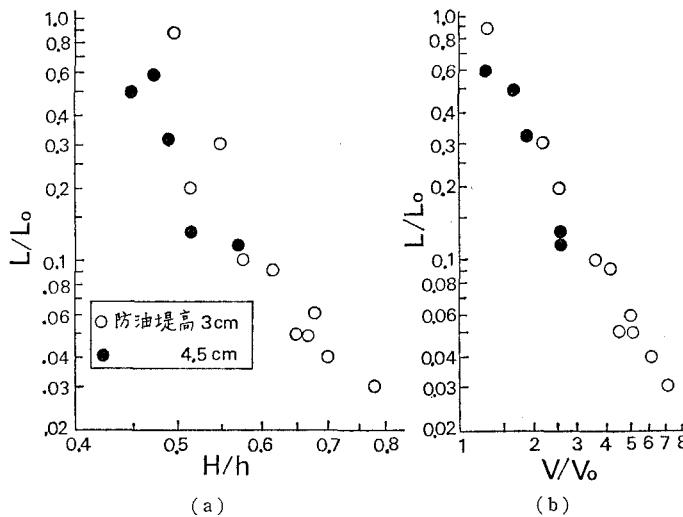


図-12 防油堤内部の着色水の流出

前後部共に、防油堤がない場合よりも水面が上昇しているが、とくに後部の水面上昇が著しい。また、防油堤内にあらかじめ満水した場合は空の場合に比べて上昇量が大きい。防油堤高が4.5 cm の場合も図-11とほぼ同様の傾向が明瞭に現われた。水面上昇に対する防油堤の影響の程度は、入射段波の規模、防油堤高、防油堤内部の容量等に左右されると思われるので、さらに多くの実験を行なって検討する必要がある。

#### b) 防油堤内部の石油等危険物の流出について

防油堤内部を濃度  $L_0$  の着色水で満たし、入射段波を通過させた後にふたたび内部の水の濃度  $L$  を測定した。縦軸に  $L/L_0$  を、横軸に入射段波の波高と防油堤高との比  $H/h$  をとって示すと図-12(a)のようである。また横軸に、入射段波の容積(貯水槽内の貯水量)から上流側防油堤の前方に残った貯水量を差引いた量  $V$  を防油堤内部の容積  $V_0$  で除した値をとって描くと図-12(b)のようである。(a),(b) 図ともに  $H/h$ ,  $V/V_0$  の増大に伴なって  $L/L_0$  が急激に減少し、 $H/h=0.6$ ,  $V/V_0=3$  で90%の着色水が流出する。したがって、第2, 第3の津波が通過すれば着色水の全量が流出するものと

考えられる。

#### 4. 結論

(1) あらかじめ、パイプ(石油等のタンク)の種々の配列状態に対し段波状津波の2次元実験によって抵抗係数  $C_D$  の値が求められていれば、式(7)から  $H_1/H_0=A$  が算定できるから、任意の入射段波のフルード数  $F_r$  の値を与えれば、式(8)から  $\alpha$ 、したがってパイプ群の前面の最大水深  $H_0$  および後面での最大水深  $H_1$  も求めることができる。

(2) 3次元実験の結果から、パイプ群前面での最大水深は2次元実験値とほぼ同じであるが、後面での値は2次元の場合よりかなり小さい。2次元実験では  $H_1/H_0=0.606$  (4本4列), 0.598 (4本7列) であるが、3次元の場合には0.37 (4本4列) である。

(3) パイプ群の前後に防油堤模型を置いて2次元実験を行なったところ、パイプ群前後とくに後面での水位が防油堤がない場合に比べて非常に高くなった。

(4) 防油堤の内部に、あらかじめ石油等の危険物を模して着色水を満水した状態で津波を通過させた場合に、防油堤高に比べてかなり低い高さの津波であっても1波だけで着色水はほとんど全量、パイプ群の後方に流出してしまうことがわかった。

本研究を行なうにあたり、一部の実験の実施、計算に勞を煩わした当時学部学生の杉原誠一郎、宮長勲好の諸君に謝意を表する。また、この研究は文部省科学研究費自然災害特別研究(代表者 岐阜大学 村松郁栄教授)によるものであることを記し、謝意を表する。

#### 参考文献

- 1) 笹川稔郎・首藤伸夫: 大障害物群の流水抵抗、第34回年講概要集, pp. 101~102, 1979.
- 2) 細井正延・小島 学: 段波性津波の防潮堤へのうちあげ高について、第26回海講論文集, pp. 299~303, 1979.