

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**

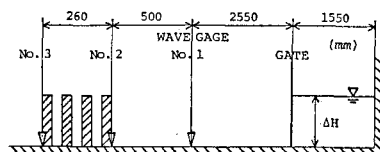
1. まえがき

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、笹川・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¹⁾、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。

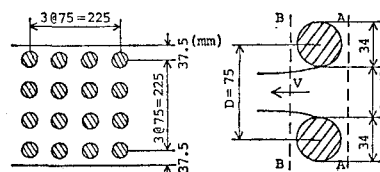
2. 実験方法

(1) 2次元実験の場合

図一に示すように、長さ7.5 m、幅30 cm、高さ40 cmの両側面ガラス張りの2次元水平水路を用い、水路



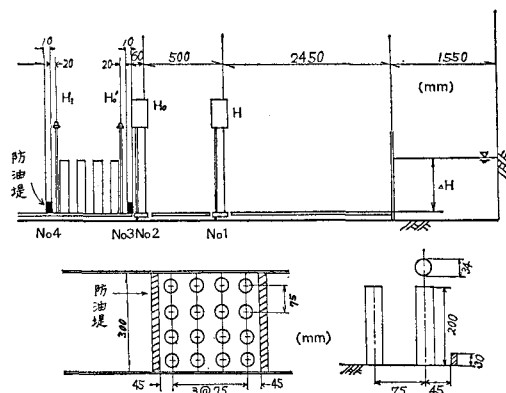
図一 実験装置



図二 パイプの配置 (2次元実験)

の上流側より1.55 mの位置にゲートを設け、ゲートより下流3 m付近にタンク群を模した直径3.4 cmの鋼管パイプを図二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で発生させた。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7.5 cmにとった。波高測定は図一に示す位置に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3 cmおよび4.5 cm、幅1 cm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三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。



図三 防油堤の配置 (2次元実験)

* 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

うで、 α/β 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 $C_0=1.0$, $C_v=1.0$ 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。

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

$$K_1 = -2 - 8R$$

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

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

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

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

$$K_6 = 1$$

$$R = \frac{(1-A) \left(C_0 C_v \frac{b}{D} A \right)^2}{1 - \left(C_0 \frac{b}{D} A \right)^2}$$

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 α 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

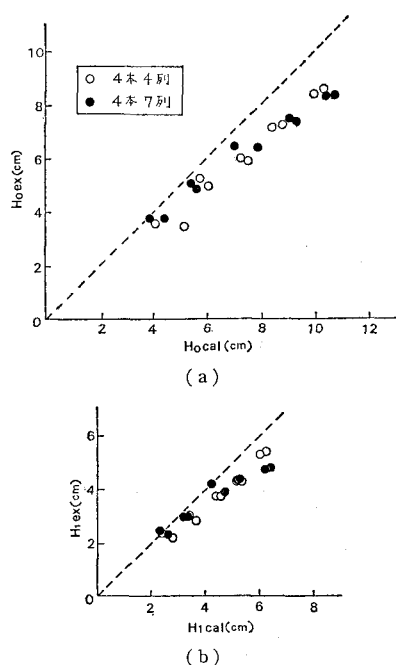


図-7 パイプ群前面の波高の計算値と実験値の比較 (2 次元実験)

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ため、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する。

(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 次元の取扱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動することによって、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認した。ただし、4 本 4 列の場合についてしか実験を行っていない。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は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、

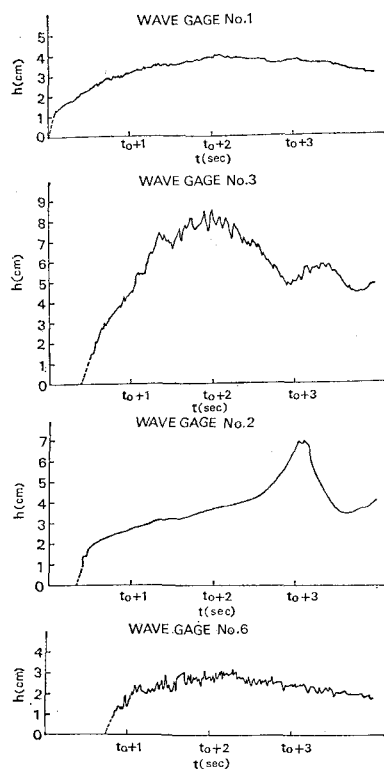


図-8 パイプ群周辺での水面高の変化 (3 次元実験)

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 Fr 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 のようで, β/α は Fr 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 Fr 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

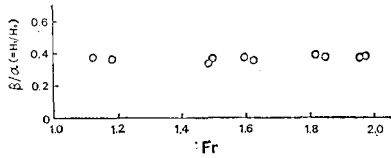


図-9 パイプ群前後面の波高比 (3 次元実験)

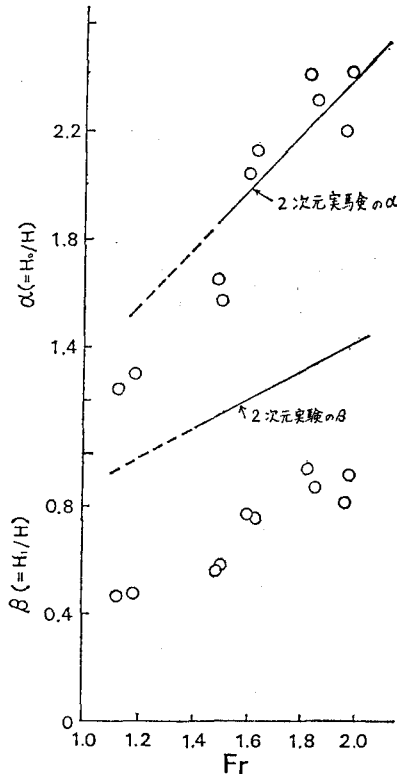


図-10 パイプ群前後面の波高 (3 次元実験)

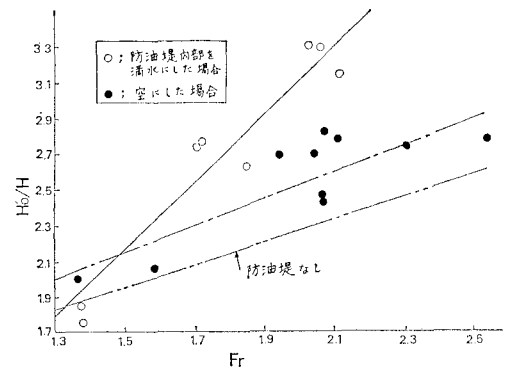
甚だしく広い範囲に存在するであろうから, あらかじめそのような多くの実験を行なって H_1/H_0 の値を定めておくことは不可能に近い. したがって, 2 次元での H_1/H_0 の値を採用すれば, パイプ群後方の波高 H_1 は 3 次元の場合より大きく, 安全側に求められることになる.

(3) 防油堤を設けた 2 次元実験

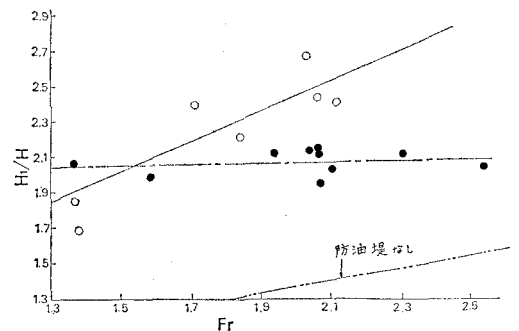
図-3 に示す状態で 2 次元実験を行なって, パイプ群の前後での水面上昇高を防油堤がない場合と比較した. つぎに, 防油堤の内部を着色水で満水にし, そこを段波が通過したときに着色水が防油堤の後方に流出する量を, 内部の薄められた着色水の濃度を比色計を用いて測定することによって求めた.

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 $\Delta H=7, 9, 11, 13, 15, 17$ cm である. 津波の第 1 波が入射するときに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 Fr をとり, 縦軸にパイプ群の第 1 列目と防油堤の間での相対波高 H_0'/H , または第 4 列目と防油堤の間での H_1/H をとって実験値を描くと 図-11 (a), (b) のようになる. パイプ群の

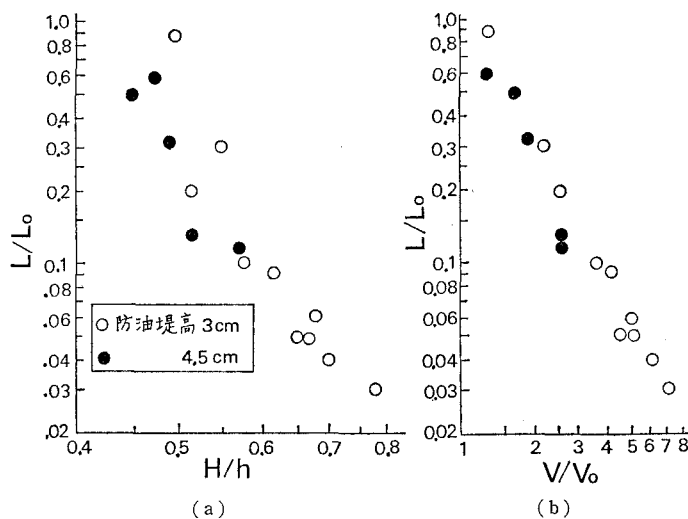


(a)



(b)

図-11 防油堤がある場合のパイプ群前後面の波高



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 の着色水で満ちし、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し引いた量 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 の増大に伴って L/L_0 が急激に減少し、 $H/h \approx 0.6$, $V/V_0 \approx 3$ 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 α 、したがってパイプ群の前面の最大水深 H_0 および後面の最大水深 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、計算に労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。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。

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.