

空気潜袋堤の波遮断効果の改善に関する実験的研究

井島 武士*・上床 隆彦**・牛房 幸光***・小島 治幸****

1. ま え が き

著者等は先に、Fig. 1 に示すような波の進行方向に間隔 B をもって、2 個の空気袋を、両者の空気が自由に流通するように中空管で連通した空気潜袋堤は、波を遮断すると共に、反射波も少ない消波堤の一つであることを明らかにした^{1),2)}。この消波堤の波遮断効果を改善するためには、次のような問題を解決する必要がある。

(i) 種々の波長の入射波に対して、有効な通過率(通常 0.5 以下)を得るために必要な潜袋数をなるべく少なくすること。(ii) 長波長の波に対しては、多数の潜袋を必要とするが、数を増加しても相対水深が、0.1~0.2 以下の波に対しては有効でない。(iii) 潜袋堤の波の通過率は、波長に拘らず低いことが望ましいが、Fig. 1 の構成においては、波長が短くなるにつれて低下するが、 $L \div 2B$ で極小値があらわれ、次いで極大値があらわれ、以後は波長の縮小と共に減少するという変化を示す。

本論文においては、上記のような問題を解決するため

に、次のような解決方法を実験により見出した。

- (1) 各々の潜袋に上端開口の円筒形パイプを被せる。
- (2) 一对の潜袋による堤を潜袋群による堤に変更する。
- (3) 潜袋を固定するためのフレームを不透水性の水平板に置き換える。
- (4) 水平板を潜袋堤の沖側に没水係留する。

2. 円筒形の鉛直パイプによる波遮断効果の改善

2.1 波遮断の原理

潜袋堤による波遮断の原理は Fig. 2 により次のように説明される。

(i) 入射波が図の左から入射し、波峯は左側の潜袋上にあり、波底が右側潜袋にある時、左右の潜袋のまわりの流体圧力は相対的に静水圧より高く、または低くなる。潜袋の双方が、互に独立していると、潜袋の形状は変るが、体積は変化せず、入射波エネルギーはほとんど潜袋堤を通過し、わずかに反射波が残る。しかし、もし双方の潜袋が中空管で連通されると、左側の潜袋の空気は、両者の圧力差によって右側の潜袋に流れ、左右の潜袋は相対的に体積の増減を生じ、水面は右側潜袋のまわりで上昇し、左側付近で下降する。そのような水面の周期的な上下動の繰返しは Radiation Wave を発生し、潜袋の左右方向に同一振幅の波成分を生ずる。左方に進行する波成分は堤の反射波となり、右方向に進行する成分波は、左右の潜袋が独立しているときの通過波と逆位相になって互に打ち消し合う。したがって潜袋堤の波遮断効果を改善するためには、できるだけ大きな振幅の

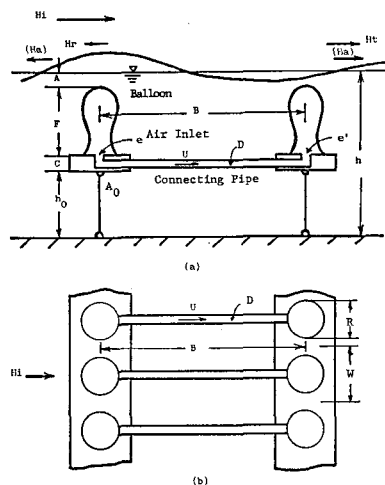


Fig. 1 Construction view of sea-balloon system.

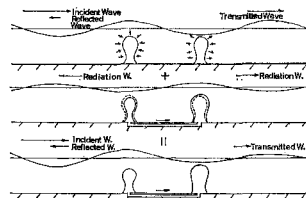


Fig. 2 The mechanism of wave interception by radiation wave.

* 正会員 工博 東和大学教授 工学部 土木工学科
 ** 正会員 工博 大分高専助教授 土木工学科
 *** 九州大学技官 工学部 水工土木学科
 **** 正会員 九州大学助手 工学部 水工土木学科

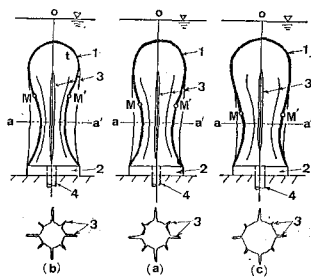


Fig. 3 Equilibrium shape of sea-balloon filled with air less than that of full state and horizontal cross-section through the neck.

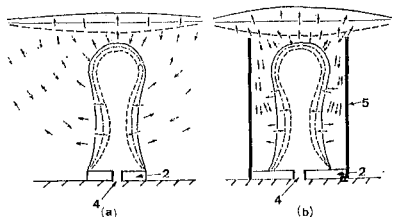


Fig. 4 Imagined fluid flow pattern around a balloon.

Radiation Wave を発生させる必要がある。

(ii) 潜袋の全体積の約 60% の空気を入れた潜袋の平衡形状は Fig. 3 (a) の太実線で示しており、図において、変曲点 M, M' より上部は半球状であり、下部は膜面“3”のように数本の縦じわを伴った「くびれ」のようである。Fig. 3 (b) (c) に示すように、もし空気孔“4”より潜袋内の空気が流出すると、ひだは大きくなり、水平断面 $a-a'$ は小さくなり、また空気が流入すると、ひだは消えて、断面は大きくなる。このようにして、潜袋の体積変化の大部分は「くびれ」の断面積の周期的変化による起こる。

(iii) Fig. 4 (a) は潜袋付近の流体の流れの分布の想像図である。一点鎖線の、静止状態の潜袋形状が空気の流入により実線で示した形状に変化し (Fig. 3 (c) に相当)、また空気の流出により破線で示した形状 (Fig. 3 (b) に相当) に変化する。このような空気の流出入にしたがって、潜袋付近の流体は Fig. 4 (a) の矢印で示した流れの分布を示すと予想される。「くびれ」の膨張収縮は主として流体の水平方向の流れを生じており、水面の上下変動に対する影響は少ないと思われる。一方、もし潜袋を Fig. 4 (b) に示すように円筒形のパイプで囲むと、潜袋の体積変化による水平方向の流れは垂直方向に変わり、Radiation Wave の振幅が大きくなると考えられる。

2.2 波遮断効果改善の実験方法

上記のことを実験で確かめるために、Fig. 5 (a) (b)

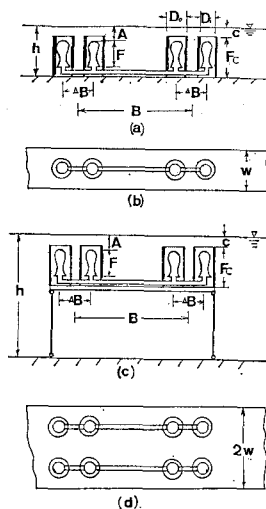


Fig. 5 Sea-balloon breakwater sheltered by vertical pipes.

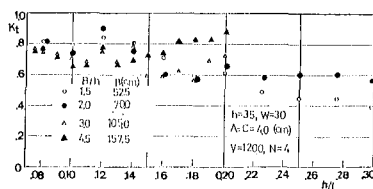


Fig. 6 Transmission coefficient at sea-balloon breakwater without vertical pipe.

に示す潜袋堤を考える。すなわち、 $AB=20$ cm の間隔をもった2個の潜袋が一对となり、内径 $D=25$ mm のパイプで連通した潜袋堤が水深 $h=35$ cm、幅 $W=30$ cm の水路底に固定されているものとする。潜袋は直径 $R=10$ cm、高さ $F=21$ cm、体積 $V=1200$ cc、天端水深 $A=4$ cm である。また潜袋を囲む鉛直のパイプは内径 $D_i=15.0$ cm、外径 $D_o=16.5$ cm、高さ $F_c=31$ cm である。

2.3 実験結果

Fig. 6 は Fig. 5 において鉛直パイプを備えない場合の潜袋堤の相対水深 h/L に対する通過率 K_t の測定値である。 K_t は h/L の増加と共に徐々に低下し、各々の B/h に対して極小値を示す、それから極大値を示し、最後は一様に減少する。 B/h が大きくなる場合、 K_t の極小値は h/L の小さい領域に移り、大きな値を示す傾向がある。

Fig. 6 の潜袋に上記のパイプを取りつけた潜袋堤の通過率 K_t の実測値を Fig. 7 示している。ここに、鉛直パイプの天端水深は潜袋のそれと同じである。Fig. 6 と較べると、鉛直パイプの効果が明らかで、特に h/L の大きい領域で顕著である。

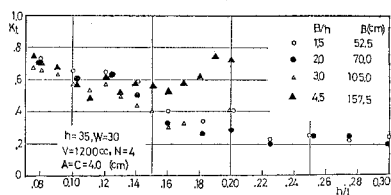


Fig. 7 Transmission coefficient at sea-balloon breakwater provided with vertical cylinder.

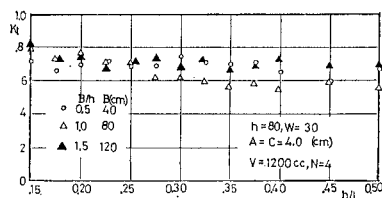


Fig. 8 Transmission coefficient at sea-balloon breakwater (without vertical pipes).

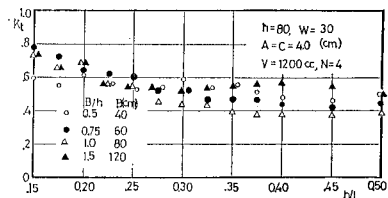


Fig. 9 Transmission coefficient at sea-balloon breakwater (with vertical pipes).

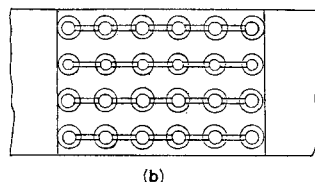
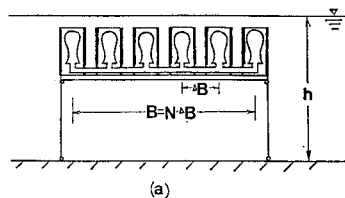


Fig. 10 Breakwater by grouped balloons sheltered with vertical pipes.

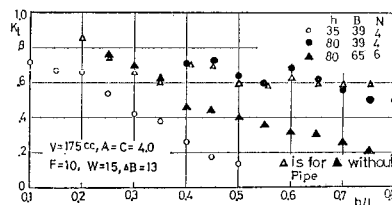


Fig. 11 Transmission coefficient at grouped balloon breakwater sheltered by pipe.

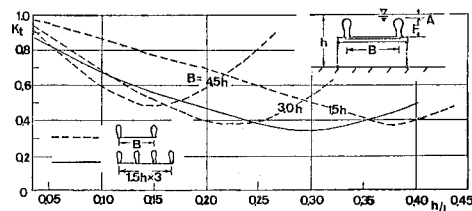


Fig. 12 Calculated transmission coefficient at sea-balloon breakwater with two and four balloons.

Fig. 6 に示したものと同一形状で、水深 $h=80$ cm、幅 $2 \cdot W=60$ cm の水路中に保留した潜袋堤の波の通過率 K_t の測定値は Fig. 8 に示されており、また Fig. 5 (c) (d) で鉛直パイプを被せた潜袋堤の K_t の実測値は Fig. 9 に示されている。両者を比較すると、鉛直パイプの効果が $h/L > 0.2$ で明らかである。

すなわち、上端開口の鉛直パイプを被せた潜袋は波遮断能力を高めるのに効果的であり、またそれは、潜袋を障害物から守る役目もする。

3. 潜袋群堤による波遮断

上述の潜袋堤は2個の潜袋が間隔 B で一対となっている。しかし、実用化の点からは、一対の潜袋堤よりも潜袋群堤とするのが望ましい。そこで、Fig. 10 に示すような4～6個の潜袋を ΔB の等間隔で波の進行方向に連通した潜袋群堤の波遮断効果について調べる。なお、潜袋には鉛直パイプを被せている。実験条件は、直径 $R=6.0$ cm、高さ $F=10$ cm、体積 $V=175$ cc の潜袋4～6個にそれぞれ内径 8.3 cm、外径 8.9 cm、高さ $F_c=14.5$ cm のパイプを被せており、潜袋間隔 $\Delta B=13$ cm である。潜袋堤は潜袋と鉛直パイプの天端水深は同じく

$A=A_c=4$ cm で、水深 $h=35$ cm と 80 cm、幅 60 cm と 30 cm の2本の水路に保留されている。 K_t の測定値は Fig. 11 に示されており、比較のために、 $h=80$ cm、 $N=6$ でパイプなしの潜袋堤の K_t が Δ で示されている。図において Δ に対する K_t は 0.5 より大きく、鉛直パイプなしの潜袋堤は実用的でない。また、Fig. 7 と比較すると、 K_t は h/L と共に単調に低下することが明らかである。

上記の K_t の測定値の傾向は、理論的にも示すことができる。直径 $R=12$ cm、高さ $F=27$ cm、体積 $V=1000$ cc で鉛直パイプなしの潜袋が断面積 3.8 cm² の連通管で、間隔 $B=(1.5, 3.0, 4.5) \cdot h$ をもって連通している場合と4個の潜袋が $\Delta B=1.5h$ で潜袋群堤となっている場合について計算値を Fig. 12 に示す。潜袋堤

は $h=80\text{ cm}$, $W=12\text{ cm}$ の水路に係留されていると仮定し, K_t の計算値は2次元計算法により求めている¹⁾. これらの結果から, 4個の潜袋群堤の K_t 値は他の3つの潜袋堤の K_t 値の包絡線に近似しており, 潜袋堤の K_t は h/L の増加と共に単調に低減して行くことが分る.

4. 不透過フレームの効果

前に報告した¹⁾ 結果と上述の実験により分るように, 潜袋堤の基本的な問題の一つは長波長の波は潜袋数を増加しても, 鉛直パイプを潜袋に備えても遮断できないことである. これは, 長波長の波による潜袋の体積変化では, 有効な Radiation Wave を発生できないことによると考えられる. この問題を解決する一つの方法は, 水中に固定または係留している水平板を利用することである. 水平板は入射波のある部分を反射して通過波を低下させる. このことを示したのが Fig. 13 で, エネルギー損失を無視した固定水平板の K_t の計算値を示している. 図において, 水平板は水面から qh の天端水深で, 厚さを dh , 長さを nh とする. 例えば, $q=0.225$, $n=1.16$ の水平板の K_t は $h/L=0.23$ で極小値 0.65 を示す. 水深と同程度の長さの水平板は比較的長波長の波に対して有効に波を遮断していることが分る. これは, 水平板と海底によって囲まれた大きな流体域は没水した固体潜堤と類似の働きをして, 入射波エネルギーの大部分を遮断するからである.

$h=80\text{ cm}$ で, Fig. 11 の実験で用いた鉛直パイプを備えた6個の潜袋が, $\Delta B=13\text{ cm}$, 15 cm で水平の不透過フレームと透過性のフレームに固定されている場合の潜袋群堤の K_t の測定値を Fig. 14 に示す. 「不透過」と「透過」の場合を比較すると, 不透過フレームの効果は

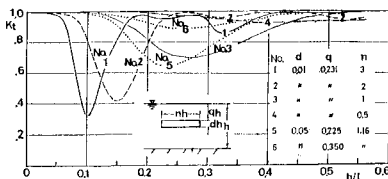


Fig. 13 Calculated transmission coefficient at fixed horizontal plate.

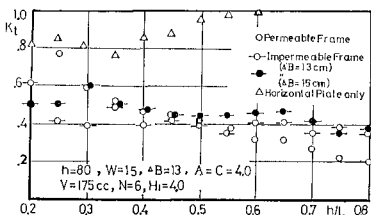


Fig. 14 Effect of horizontal plate on wave interception.

$h/L < 0.3$ であらわれている. このように, $h/L < 0.3$ に対しては, 不透過フレームの存在により K_t が低下するが, $h/L > 0.6$ では, K_t は透過フレームの場合より大きくなっているが, これは, h/L の大きな入射波が水平フレーム板上の流体域を通過する時, 2~3個のソリトン波に分裂し, 透過フレームの場合の分裂しない波より大きな波高になるからである.

以上のことより, 水平板として働いている不透過フレームと鉛直パイプを備えた潜袋を用いた潜袋群堤は, 広範囲の h/L の波を有効に遮断できることが分った.

5. 没水水平板の効果

剛体潜堤および水平板の波遮断効果を調べるために, 没水状態での固定または係留した水平板と潜堤の波の通過率 K_t を水深 $h=35\text{ cm}$, 幅 30 cm の水路で測定する. それぞれの構造は Fig. 15 (a) (b) に示すように, 長さ $l=40.7\text{ cm}$, 潜堤および水平板の上縁天端水深を 4.4 cm , 水平板厚を 2.4 cm , 係留した水平板の密度を $\rho_p=0.38$ とする.

Fig. 16 は Fig. 15 (a) (b) に対する K_t の測定値を示している. これによると, 没水水平板は固定でも係留でも, 固体潜堤と同程度の波遮断効果をもっていることが分る. このことは, 水平板より下の矩形流体域が比較的波長の長い入射波を有効に反射して, 潜堤と同様の働

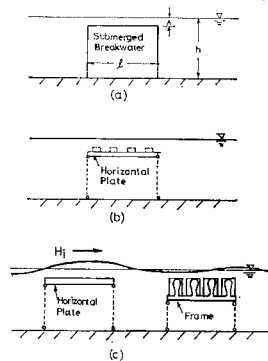


Fig. 15 Submerged breakwater, moored horizontal plate and moored group of sea-balloons.

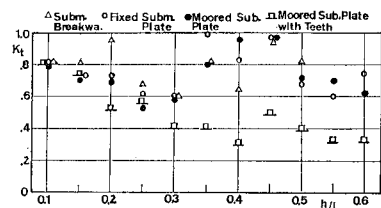


Fig. 16 K_t at submerged breakwater, fixed plate and moored plate.

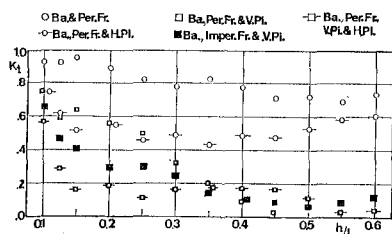


Fig. 17 K_t at balloon, permeable frame, impermeable frame and horizontal plate.

きをしていることを意味している。さらに、密度 $\rho = 0.445$ の水平板に $2.2\text{ cm} \times 2.2\text{ cm}$ の 6 個の正方形断面材を歯型状に取付けると、短形波の波に対して特に波遮断効果が良くなることが分る。

そこで、問題は潜袋堤の波遮断に関して没水水平板の効果をどのように利用するかである。この問題を解決するために、Fig. 15 (c) に示すように、水平板を潜袋堤の 50 cm 沖側の水中に係留し、(i) 潜袋を透過性フレームに取付けた場合 (○)、(ii) 水平板が鉛直パイプなしの潜袋堤の沖側に没水係留されている場合 (—○—)、(iii) 水平板なしで、鉛直パイプ付きの潜袋が透過性フレームに取付けられている場合 (□)、(iv) (iii) の場合で、透過性フレームの代りに不透過性フレームを用いた場合 (■)、(v) フレームに固定された鉛直パイプ付きの潜袋群堤の沖側に水平板が没水係留されている場合 (—□—) の 5 ケースについて、 K_t を測定した結果を Fig. 17 に示している。実験結果より (ii) の場合の —○— は (i) の場合の ○ に比べて比較的波長の長い波に対して水平板の効果があらわれており、(iii) の □ は鉛直パイプが波長の短かい波に対して有効であることを示している。さらにフレームを不透過にした (iv) の場合の ■ により、比較的波長の長い波を遮断し、また (v) の場合の —□— は (ii) の場合にさらにパイプを備えたことにより、相対水深 $h/L > 0.15 \sim 0.20$ の波を有効に遮断していることが分る。

以上のことから、潜袋堤から離れた水平板は h/L の小さい波に対して、潜袋堤のフレームとして用いたときの水平板よりも効果的であることが明らかとなった。こ

れは、入射波高が潜袋堤の沖側に係留した水平板の流体域で大きくなり、波長は縮減して H/L が著しく大きく、 h/L が小さくなるため、ソリトンの発生条件に近づき、水平板を通過した後は、2～3波のソリトンに分裂し、通過後の水深の大きな領域を、分裂した後の波長のまま深海波に近い形で進行して、潜袋堤に入射することにより有効に吸収されるものと考えられる。

6. 結 論

潜袋堤の波遮断効果の改善法を要約すると次の通である。

(1) 上端開口の鉛直パイプを各々の潜袋に備える方法は、短波長の波の通過率の低減に特に効果的である。これはパイプが潜袋付近の流体の流れを変えて有効な Radiation Wave が発生するからであると思われる。

(2) 一对の潜袋堤を潜袋群堤に変えることによって、波長の縮減に対する通過率の低減は単調にあらわれることになる。

(3) 比較的長波長の波に対して、通過率を低下させるためには、潜袋堤のフレームを不透過にすると有効である。これは不透過フレームを水平板と考えたときの効果によるものである。

(4) 水中に没した水平板は、潜袋堤の沖側に係留すると、長波長の波に対して効果的である。これは、没水水平板の反射効果のみならず、長波長の入射波が2～3波の短波長波に分裂した後に潜袋堤によって吸収されることによるものと思われる。

終りに本実験を遂行するに当たり、仁木将之君（現福岡県庁勤務）の協力を得た。ここに深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Ijima, T., T. Uwatoko and Y. Ushifusa: Wave interception by sea-balloon breakwater, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Vol. 45, No. 4, pp. 357~392, 1985.
- 2) 上床隆彦・井島武士・牛房幸光: 空気潜袋群による波の遮断機構 (2次元解析による考察), 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 517~521, 1984.