

筒型透過性防波堤の水理特性について

林 泰 造*・狩野徳太郎**・白井増次郎***・服部昌太郎****

1. 緒 言

従来の防波堤においては、直立防波堤、捨石防波堤、混成防波堤のいずれもその堤体構造は港内に波が透過しないものとなっている。

透過性防波堤としては、消波の目的で潜防波堤、簡易防波堤としての浮防波堤、そして除波堤としてカーテン防波堤などが作られることがあるが、もとよりこれらは防波堤としての機能を十分持っているとはいえない。

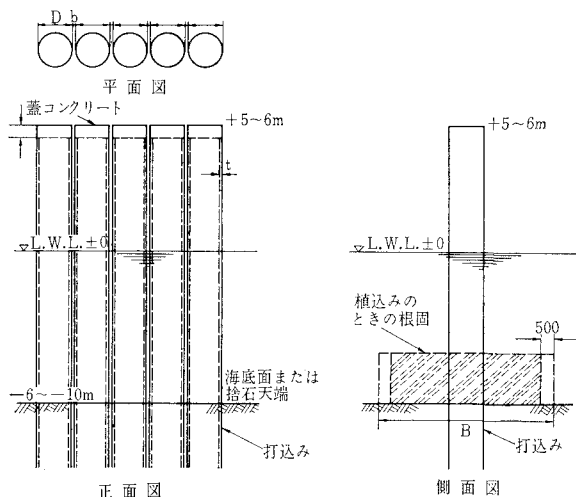
防波堤においても、波を完全に遮ぎるということせず、許容の港内波高の範囲で入射波を透過させることにすれば、それにより防波堤の構造を軽構造化することができ、施工を容易ならしめることができるのではないかとと思われる。

本研究においては、そのような透過性防波堤として筒型構造物を一行に海中に設置した形式のもの（図一）について、その水理特性を種々研究した。

2. 透過性防波堤についての従来の研究

透過性水中構造物による波の減衰については、従来数多くの研究がなされている。これらの構造物の中で潜堤は施工例も、研究も多くその特性について種々の立場か

図一 筒型透過性防波堤図例



ら解明されて来た。浮防波堤の研究はわが国では大阪市立大学¹⁾ および東京大学²⁾ でなされており、広島県音戸港に鉄筋コンクリート製のものがある。カーテン防波堤は清水港折戸湾の貯木場除波堤としてすでに施工され、また名古屋港の稲永埠頭の除波堤もこの形式のもので作られているようである。カーテン防波堤の消波特性については従来より研究³⁾ されて来たが、最近においては運輸省港湾技術研究所⁴⁾ での研究がある。

本研究の筒型透過性防波堤のような構造物による波の減衰効果については Castelletto⁵⁾, Wiegeler⁶⁾ および著者等⁷⁾ の研究がある。これらは主として、くいの配列型式の差異による波の減衰、透過を検討したものであるが、ソ連では消波および海岸侵食防止を目的として、この種の防波堤を使用する研究⁸⁾ が行なわれている。

以上記述した形式以外にも種々の透過性防波堤の研究^{9), 10)}, 施工例¹¹⁾ も報告されている。

防波堤体に鋼管あるいは筒型セルを使用した不透過性の防波堤の波圧に関する研究が大阪市立大学^{12), 13)} で行なわれている。

3. 簡単な理論による問題の予備的考察

(1) 波の透過率

透過性防波堤は堤体に作用する波力の軽減を目的として入射波エネルギーの一部を港内側に透過させるため、防波堤の透過率について検討を行なうことが必要である。

防波堤付近では浅水表面波理論を用うべきであるが、一つには数式の簡単化のため、一つには透過性防波堤の間げきがスクリーンのような働きをし、防波堤付近では水深方向の流速の一樣化に寄与するので、防波堤付近での流速分布は水面より水底まで一樣とする。よって、長波理論を適用することができ、入射波、反射波および透過波によって生ずる流速はそれぞれつぎのように表わされる。

$$v_I = \sqrt{g/h} \cdot \eta_I \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_R = -\sqrt{g/h} \cdot \eta_R \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$v_T = \sqrt{g/h} \cdot \eta_T \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 η : 静水面より水面までの高さ

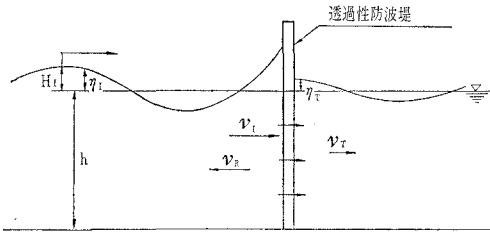
v : 流速

h : 防波堤設置水深

添字 I, R, T : 入射波、反射波および透過波の諸量を

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科
 ** 正会員 工博 大成建設 KK 技術研究所
 *** 正会員 工農博 大成建設 KK 技術研究所
 **** 正会員 工修 中央大学助教授 理工学部土木工学科

図-2 記号説明図



示す添字である(図-2 参照)。

防波堤において波高の影響を無視すると、流量の連続性からつぎの関係がえられる。

$$v_I h + v_R h = v_T h$$

したがって、

$$v_I + v_R = v_T \quad \dots\dots\dots(4)$$

筒型防波堤の円型ぐい間の間げきを通過する流速は、円型ぐい間の水の慣性を無視すれば Bernoulli の定理より式(5)で与えられる。

$$\frac{v_T D}{b} = \sqrt{2g(\eta_I + \eta_R - \eta_T)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

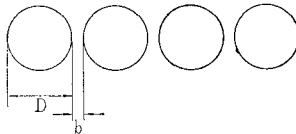
ここに、 D : 円型ぐい外径

b : 円型ぐい間の間隔

である(図-3)。

図-3

上の式(1)~(5)の5個の式での未知量は、



$\eta_R, \eta_T; v_I, v_R, v_T$

の5個であり、したがってそれぞれの解をうる。

波高を H とおくと式(1)~(5)は防波堤においてつぎのようになる。

$$v_I = \sqrt{g/h} \cdot H_I \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$v_R = -\sqrt{g/h} \cdot H_R \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$v_T = \sqrt{g/h} \cdot H_T \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$v_I + v_R = v_T \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\frac{v_T D}{b} = \sqrt{2g(H_I + H_R - H_T)} \quad \dots\dots\dots(10)$$

式(6)~(10)において入射波高 H_I を与えて5個の未知量を求めると、その結果透過波高および反射高はそれぞれつぎのようである。

$$H_T = \frac{1}{2} [-\varepsilon h + \sqrt{(\varepsilon h)^2 + 4(\varepsilon h H_I)}] \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$H_R = H_I - H_T \quad \dots\dots\dots(12)$$

ただし、

$$\varepsilon = (2b/D)^2 \quad \dots\dots\dots(13)$$

である。

いま透過率および反射率を r_T, r_R とすると、

$$r_T = H_T/H_I \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$r_R = H_R/H_I \quad \dots\dots\dots(15)$$

であるから、これらを式(11)および式(12)に代入すると次式をうる。

$$r_T = \frac{1}{2} \left[-\frac{\varepsilon h}{H_I} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon h}{H_I}\right)^2 + 4\left(\frac{\varepsilon h}{H_I}\right)} \right] \quad \dots\dots\dots(16)$$

$$r_R = 1 - r_T \quad \dots\dots\dots(17)$$

式(16)で与えられる透過率と円型ぐいの間げき比 b/D との関係は、後出の図-5に、重複波の碎波限界である $h/H_I = 4$ および実験条件に当る $h/H_I = 5$ の場合について示してある。

(2) 入射エネルギー、反射エネルギー、透過エネルギーおよび損失するエネルギー

浅海波理論によると波が1波長、単位峯幅当りにもつエネルギーは式(18)で与えられる。

$$E = \frac{1}{2} \rho g \lambda H^2 \quad \dots\dots\dots(18)$$

ただし、 λ : 波長、 ρ : 密度、 g : 重力の加速度

透過性防波堤でのエネルギーの連続性により、つぎのエネルギーの関係をうる。

$$E_I = E_R + E_T + E_L \quad \dots\dots\dots(19)$$

ここで、 E_L : 単位峯幅当りの波が一波長の間に防波堤で失うエネルギー。

したがって式(18)および式(19)よりつぎの関係が導かれる。

$$H_I^2 = H_R^2 + H_T^2 + H_L^2 \quad \dots\dots\dots(20)$$

ここで、 H_L : “損失波高”(仮称)である。また、

$$\left. \begin{aligned} E_T/E_I &= (H_T/H_I)^2 = r_T^2 \\ E_R/E_I &= (H_R/H_I)^2 = r_R^2 = (1-r_T)^2 \\ E_L/E_I &= (H_L/H_I)^2 = 2r_T(1-r_T) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(21)$$

カーテン防波堤の Wiegel および運輸省港湾技術研究所での研究では、防波堤におけるエネルギー損失を無視して、

$$E_I = E_R + E_T \quad \dots\dots\dots(22)$$

なる関係で計算を行なっているが、防波堤透過部の間げきが小さいときには E_L を無視することはできない。防波堤で失われるエネルギーは透過性防波堤のときには重要な役目を果しているものである。

(3) 波力によるモーメント

重力式防波堤では堤体に作用する波圧を測定する必要があるが、くい構造の防波堤では円型ぐいに働く波力よりもモーメントを設計上必要とし、また実際の測定においてもモーメントの方が波力より正確に測りうる。

筒型透過性防波堤のときの円型ぐいに働くモーメントの理論式は今の段階ではつくり上げることができなかったもので、とりあえず直立壁の場合の重複波の波圧を Sainflou の簡略公式より計算し、この波圧分布により生ずるモーメント分布と実験結果とを比較する。

Sainflou の波圧公式より導びかれる直立壁のモーメントの鉛直分布はつぎのようである。

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{1}{6} \frac{(2H+h_0-z)^3}{2H+h_0} p_1 \quad (0 \leq z \leq 2H+h_0) \\ M &= \frac{1}{6} (2H+h_0)(2H+h_0-3z) p_1 \\ &\quad + \frac{z^2}{6} \left(3p_1 + \frac{p_1-p_2}{h} z \right) \quad (-h \leq z \leq 0) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

ただし、

$$p_1 = (p_2 + wh) \left(\frac{2H+h_0}{h+2H+h_0} \right)$$

$$p_2 = \frac{w2H}{\cosh 2\pi h/L}$$

$$h_0 = \frac{4\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

z : 静水面を原点とする 鉛直座標で上向きを正とする。

また最大モーメントは水底で生じ ($z = -h$)、つぎの式で与えられる。

$$(M)_{\max} = \frac{1}{6} \times [(2H+h_0)(2H+h_0+3h) p_1 + h^2(2p_1+p_2)] \dots\dots\dots (24)$$

実験結果に対するいま一つの比較すべき規準として、ただ一本の円型ぐいに働く最大モーメントを用い、これを合田の計算法¹⁴⁾により計算する。

4. 実験装置および測定方法

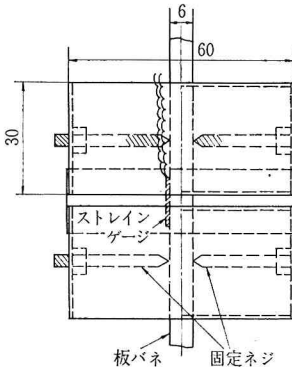
筒型透過性防波堤の水利特性に関する実験は、長さ 30 m、幅 0.80 m、側壁高 0.70 m の片面ガラス張りの鉄製 2 次元波動水槽で行なった。

波動水槽の一端にフラップ式造波機、他端には模型防波堤よりの透過波の反射を防ぐため 1/15 勾配の斜面を設けた。水槽内には造波機の造成波の整正および模型防波堤よりの反射波の影響を防ぐ目的でフィルターを設置する。

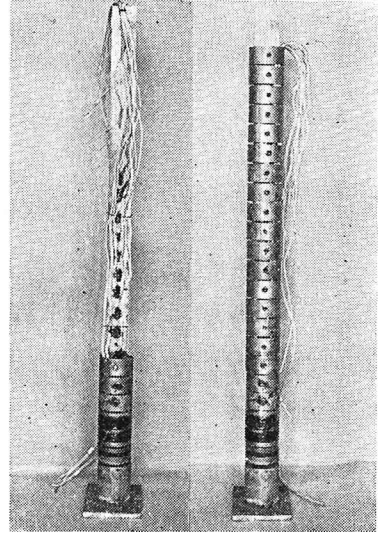
模型筒型防波堤は、波動水槽中心線上に固定されるモーメント測定用の円型ぐいを除いて、外径 60.5 mm (2' GP) の鉄管を使用し、円型ぐい間の間隔は $b/D = 0 \sim 0.5$ までの間を数段階に変化しうるようにした。

モーメント測定用の円型ぐいは、筒構造物の打込みまたは植込み

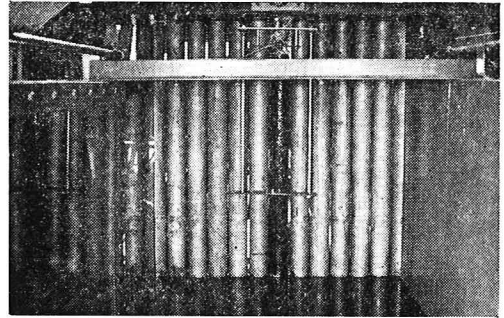
図—4 モーメント測定用円型ぐい組立図 (単位 mm)



写真—1 モーメント測定用円型ぐい



写真—2 模型筒型透過性防波堤



の場合を考え、下端を固定端とする長さ 87 cm、幅 4 cm、厚み 6 mm の板バネに外径 60 mm、高さ 30 mm の真ちゅう製円筒を 図—4 に示されるように固定連結したものをを用いた。写真—1 はモーメント測定用の円型ぐいの組立中および完成したものを示し、また 写真—2 は模型筒型防波堤である。円型ぐいに働くモーメントは円型ぐい内の板バネよりストレインゲージにより検出し、動ひずみ測定器と電磁 オッシロ グラフによって記録する。

波高の測定は電気抵抗式波高計により入射波、防波堤前面の衝突波および透過波の波高をそれぞれ測定記録する。防波堤の反射率は、防波堤よりの反射波により生ずる部分重複波の最大波高と最小波高を測定し計算により求める。

5. 実験結果

筒型透過性防波堤の模型実験は、表—1 に示される実験条件のもとで行なった。防波堤透過部の間げき比は、 $b/D = 0, 0.05, 0.083, 0.2$ および ∞ の 5 つ場合をとり

表—1 実験条件

h (m)	$2H$ (m)	T (s)	$2H/L$	$2H_0'/L_0$	h/H
0.40	0.16	1.7	0.053	0.038	5.0

あげた。ここで $b/D=0$ は筒型防波堤を不透透性とした円型シエル型防波堤の場合に相当し、 $b/D=\infty$ はただ一本のくいのみの場合に当る。

(1) 透過率

筒型防波堤の透過率の実験結果は図-5に示される。同図には式(16)で計算される $h/H_I=4$ 、および5の2つの場合の理論値と Wiegel¹⁵⁾ の行なった計算ならびに実験値が記してある。

図-5 透過率と間げき比の関係

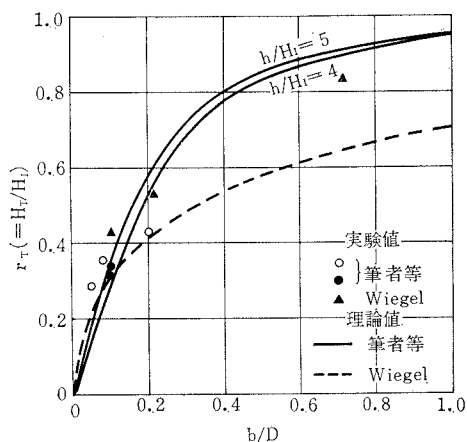


図-5の実験結果に見られるように、透過率の実験値と式(16)の理論値とは比較的良好に一致しており、透過率は式(16)で十分計算しうるものと認められる。

(2) 防波堤で損失するエネルギー

防波堤で損失するエネルギーに関する実験結果は図-6に示される。

図-6 防波堤での損失エネルギー比と間げき比

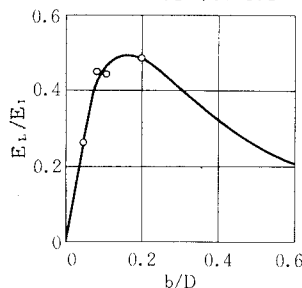


図-6は E_L/E_I と b/D との関係を示した実験結果で、図中の理論値は $h/H_I=5$ (実験条件) に対する式(21)より計算される E_L/E_I の値を記したものである。

理論値と実験結果との一致は良く図-6に見られるように防波堤で損失するエネルギーが最大となる b/D の値は理論値および実験値とも 0.16 程度であり、防波堤でのエネルギー損失率は最大 $E_L/E_I=0.5$ 程度である。図-7の反射率と間げき比の実験結果で明ら

かなように、 $b/D=0\sim0.1$ の間で式(17)で与えられる理論値より防波堤の反射率が急激に減少する。

(3) 波力によるモーメント

波力により円型ぐいに生ずるモーメントの実験結果は図-8に示される。実験結果は防波堤の間げき比が $b/D=0, 0.05, 0.083$ および一本の円型ぐいのみの場合のモーメントの鉛直分布を示したものであり、また同図中には、実験結果との比較のため式(23)で与えられる Sainflou の波圧式より計算した直立壁のモーメント分布を記してある。円型シエル型防波堤に相当する防波堤が不透透の場合 ($b/D=0$) では、静水面付近より静水面上のモーメント分布は式(23)で与えられるものとほぼ一致しているが、水底に近づくにしたがってシエルに生ずるモーメントはシエルに対応する直立壁のモーメントより小さくなっている。シエルの最大モーメントは直立型防波堤の Sainflou の波圧式による値の 65% にまで減少している。

防波堤の間げき比が増すにしたがって、円型ぐいに働くモーメントは当然減少するが、最大モーメントと b/D との関係を見ると $b/D=0.1$ 程度までは最大モーメントが減少する割合が非常に大きい。したがって筒型防波堤円型ぐいに働くモーメントを減少させるのに効果がある間げき比は $b/D=0.1$ 程度までの場合と認められる。

6. 結 論

(1) 本研究での理論により、従来算定しえなかった透過性防波堤で損失するエネルギーが防波堤の反射率および透過率とともに計算しうることを示した。すなわち筒型透過性防波堤の透過波高および透過率は式(11)および式(16)、反射率は式(17)で、また防波堤でのエネルギー損失率は式(21)で計算される。

理論値と実験値との一致の程度は、図-5, 6 および 7 に示されるように良好であり、本研究の理論式は筒型透過性防波堤の実用設計に十分使用しうると認められる。

(2) 筒型透過性波堤の各円型ぐい間の間げきを増大させれば、円型ぐいに生ずる最大曲げモーメントは減少してゆくが、このため透過率が増大し港内側の静穏度が乱される。

筒型透過性防波堤の間げき比 b/D (b : 各円型ぐい間の間隔, D : 円型ぐい外径) が $0.1\sim0.2$ の場合に、防波堤でのエネルギー損失率は比較的大きく、透過率は港内の静穏度を満足する程度となる。筒型透過性防波堤の円型ぐいに生ずる曲げモーメントと円型ぐいの間げき比 b/D の関係は図-8に示され、円型ぐいに働く曲げモーメントの減少率が大であるのは b/D が $0.05\sim0.1$ の範囲である。

これらのことから、本研究の結果認められる筒型透過

図-7 反射率と間げき比

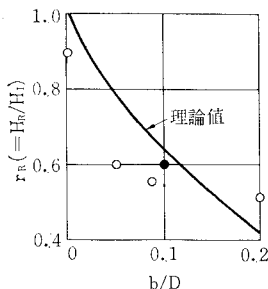
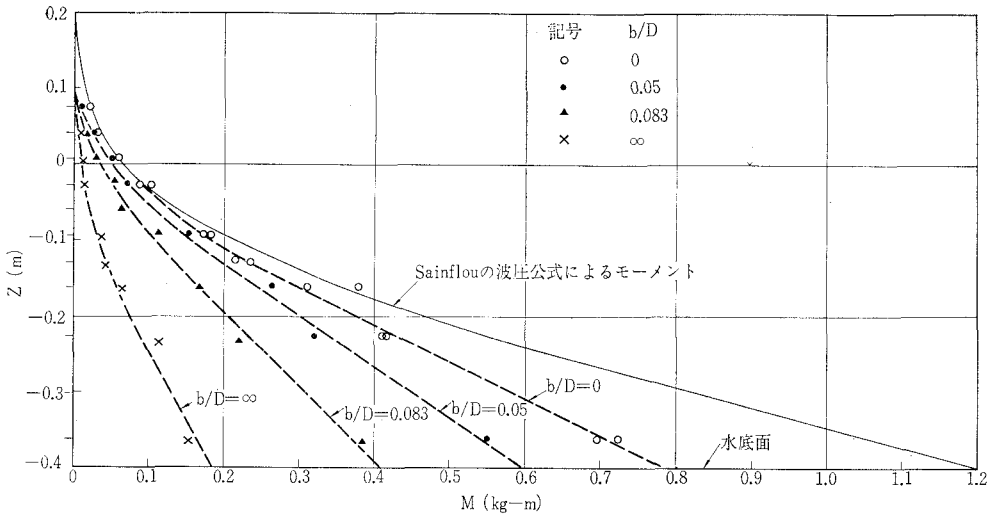


図-8 波力によるモーメントの鉛直分布と b/D の関係

性防波堤としての水利的效果を最も期待しうる円型ぐいの間げき比は $b/D=0.1$ 程度であると考えられる。

(3) 円型シェル型防波堤(本研究の間げき比 $b/D=0$ の場合に当る)のシェルに生ずる曲げモーメントは、円型シェルと同一の投影面積を有する直立平面壁型防波堤に Sainflou の波圧式を適用して計算される曲げモーメントより小さく、最大曲げモーメントはその 65% となる。

参考文献

- 永井莊七郎・久保弘一：浮防波堤に関する研究，第 17 回土木学会年次学術講演会講演概要，1962。
- 本間 仁・堀川清司・望月博正：浮防波堤に関する一研究，第 10 回海岸工学講演集，1963。
- 例えば Wiegel, R.L.: Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier, Proc. of A.S.C.E., Vol. 86, No. WW 1, March, 1960。
- 森平倫生・柿崎秀作・合田良実：カーテン防波堤とその特性について，港湾技術研究所報告，Vol. 3, No. 1, 1964。
- Castello, R.D.: Damping of water waves by vertical circular cylinders, Trans. A.G.U., Vol. 33, Aug., 1952。
- Wiegel, R.L.: Closely spaced piles as a breakwater, Dock and Harbour Authority, September, 1961。
- 林 泰造・狩野徳太郎・白井増次郎・服部昌太郎：透過式防波堤の水利特性について，第 20 回土木学会年次学術講演会講演概要第 II 部，1965。
- Фрейкман, А.И.: Берегоукрепительные волноломы из колонн-оболочек, Транспортное строительство, 1962。
- Ippen, A.T. and Bourodimos, E.L.: Breakwater characteristics of open-tube systems, M.I.T. Hydrodynamics Laboratory Technical Report No. 73, 1964。
- Jarlan, G.E.: A perforated vertical wall breakwater, Dock and Harbour Authority, April, 1961。
- Côté, G.J. and Simard, G.R.: The breakwater quay at the bay of Comeau, Dock and Harbour Authority, April, 1964。
- 永井莊七郎・玉井佐一・西村益夫：円型セル型防波堤に関する研究，第 10 回海岸工学講演会講演集，1963。
- 永井莊七郎・時川和夫・稲垣紘史：鋼管防波堤に関する研究，第 20 回土木学会年次学術講演会講演概要第 II 部，1965。
- Goda, Y.: Wave forces on a vertical circular cylinder: Experiments and a proposed method of wave force computations, Report of Port and Harbour Technical Research Institute, No. 8, August, 1964。
- 前出 6) と同じ。