

透過性鋼管防波堤の水理

林 泰 造*・服部 昌 太 郎**・白井 増 次 郎***

1. 緒 言

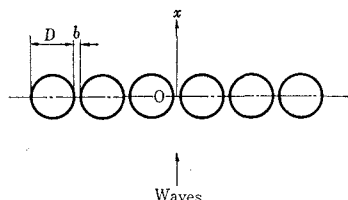
鋼管を相互にいくらかづつ間隔を空けて1列に海中に打ち並べたものが1つの防波堤としての機能を発揮するものであることは前報¹⁾において報告したとおりである。このような構造が防波堤としての機能を十分にもつものであるならば、この構造は施工が比較的簡単であるという点から大変好都合なものとなる。鋼管の間隔を空けて防波堤を透過性とした場合に、間隔を空けたことによって、1) どの程度波が透過するのかということ、および 2) どの程度各鋼管に作用する波力とそれによる曲げモーメントが減少するかということ、が問題となる。これらの問題のうち、2) に対しての理論的考察が前報においては欠けていたので、本報においてはまずこの点につき研究することとした。

つぎに、波が斜めに入射する場合も取り扱った。この場合には、上述の 1), 2) の問題の他にさらに、3) 入射波が防波堤でどのように屈折するかということ、が重要な問題となる。本報においてはその点についても研究を行なった。

2. 前報の理論の概要

図-1 のような透過性鋼管防波堤に波が垂直に入射す

図-1 透過性鋼管防波堤



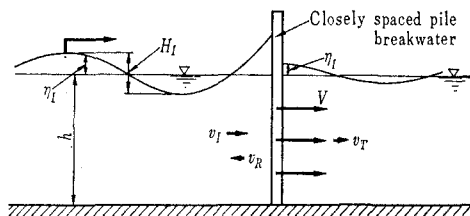
る場合を考える。入射波、反射波および透過波によって起される水粒子の速度は、図-2 の記号を使用するときそれぞれつぎのように表わされる。

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

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

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

図-2 諸 記 号



一方、防波堤 ($x=0$) においては、まず連続方程式として

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

また、各間隔から噴出する噴流の速度は Bernoulli の定理から

$$V = C_v \sqrt{2g(\eta_I + \eta_R - \eta_T)} / \sqrt{1 - \left(\frac{C_v b}{D+b}\right)^2} \quad (5)$$

また、防波堤背面 (港内側) における流量の連続性から

$$V \cdot C_v b h = v_T \cdot (D+b) h \quad (6)$$

他方、 η_I , η_R , η_T としてはつぎのように仮定する。

$$\eta_I = (H_I/2) \sin(kx - \sigma t) \quad (7)$$

$$\eta_R = r_R \cdot (H_I/2) \sin(kx + \sigma t) \quad (8)$$

$$\eta_T = r_T \cdot (H_I/2) \sin(kx - \sigma t) \quad (9)$$

ただし、 r_R および r_T は入射波 (波高 H_I) のそれぞれ反射率および透過率である。

上の (1)~(9) の 9 個の式から、9 個の未知量 v_I , v_R , v_T ; η_I , η_R , η_T ; V ; r_R , r_T をとくことができる。その結果、 r_R および r_T はつぎのように表わされる。

$$r_T = 4(h/H_I) \epsilon [-\epsilon + \sqrt{\epsilon^2 + (H_I/2h)}] \quad (10)$$

$$r_R = 1 - r_T \quad (11)$$

ただし

$$\epsilon = C \frac{b}{D+b} / \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b}\right)^2} \quad (12)$$

で、 C は鋼管間各間隙より流出する噴流 (大部分はもぐり噴流) の流量係数である。

つぎに、この透過性防波堤を通過する際に失う波のエネルギー (単位峯幅、1 波長当りの) E_{Loss} は次式で表わされる。

$$E_{Loss}/E_I = 2r_T(1-r_T) \quad (13)$$

ただし、 E_I は入射波のエネルギー (単位峯幅、1 波長

* 正員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

** 同上 工修 中央大学助教授 同上

*** 同上 大成建設株式会社技術研究所

当りの)である。

3. 鋼管に作用する波力*

入射波(7)と反射波(8)は、それらがともに最大波高をとる瞬間において防波堤直前面の鉛直面内に図-3に示されるような分布形状の圧力を作用する。しかし、この圧力がそのまま各管鋼に作用するわけではない。各鋼管に作用する圧力は図-4の陰影を施した部分についてたてられるつぎの運動量方程式から定められる。

図-3 防波堤直前面に作用する圧力

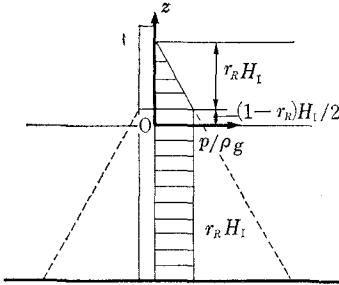
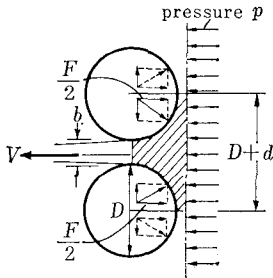


図-4 間隙を囲む部分に作用する諸力



$$\int \rho V C_c b \left[V - \frac{C_c V}{D+b} \right] dz = \int p(D+b) dz - F \quad (14)$$

ここに F は各1本の鋼管に作用する全推力である。上式から

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dz} &= p(D+b) - \rho C_c b \left(1 - \frac{C_c b}{D+b} \right) V^2 \\ &\doteq p(D+b) - \rho C_c b \left(1 - \frac{b}{D+b} \right) V^2 \quad \dots (15) \end{aligned}$$

他方、鋼管間の各間隙から港内側に噴出する噴流の速度 V は Bernoulli の定理により次式で表わされる。

$-h \leq z \leq (1-r_R)H_I/2$ に対して

$$\begin{aligned} V &= C_v \sqrt{2g \left(\frac{H_I}{2} + \frac{H_R}{2} - \frac{H_T}{2} \right)} \sqrt{1 - \left(\frac{C_c b}{D+b} \right)^2} \\ &= C_v \sqrt{2g \cdot r_R H_I} \sqrt{1 - \left(\frac{C_c b}{D+b} \right)^2} \end{aligned}$$

$$\doteq C_v \sqrt{2g \cdot r_R H_I} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2} \quad \dots (16)$$

$(1-r_R)H_I/2 \leq z \leq (1+r_R)H_I/2$ に対して

$$\begin{aligned} V &= C_v \sqrt{2g \left(\frac{H_I}{2} + \frac{H_R}{2} - z \right)} \sqrt{1 - \left(\frac{C_c b}{D+b} \right)^2} \\ &= C_v \sqrt{2g \left[(1-r_R)(H_I/2) + r_R H_I - z \right]} \sqrt{1 - \left(\frac{C_c b}{D+b} \right)^2} \\ &\doteq C_v \sqrt{2g \left[(1-r_R)(H_I/2) + r_R H_I - z \right]} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2} \quad \dots (17) \end{aligned}$$

この結果、防波堤内の各1本の鋼管に作用する全推力は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} F &= \int_{-h}^{(1-r_R)H_I/2} \frac{dF}{dz} dz + \int_{(1-r_R)H_I/2}^{(1+r_R)H_I/2} \frac{dF}{dz} dz \\ &= \frac{1 + (b/D)(3 - 2C_c C_v^2) + 2(b/D)^2(1 - C_c C_v^2)}{1 + (2b/D)} \\ &\quad r_R \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2h}{H_I} \right) \rho g D H_I^2 \\ &\doteq \frac{D + (3 - 2C) b}{D + 2b} r_R \cdot \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2h}{H_I} \right) \rho g D H_I^2 \quad \dots (18) \end{aligned}$$

4. 鋼管に作用する最大曲げモーメント

防波堤内の各1本の鋼管に作用する曲げモーメントは次式で表わされる。

$-h \leq z \leq (1-r_R)H_I/2$ に対して、

$$\begin{aligned} M &= \int_z^{(1-r_R)H_I/2} \frac{dF}{d\xi} \cdot (\xi - z) d\xi \\ &\quad + \int_{(1-r_R)H_I/2}^{(1+r_R)H_I/2} \frac{dF}{d\xi} \cdot (\xi - z) d\xi \\ &= \frac{1}{8} \rho g D H_I^3 \cdot \frac{D + (3 - 2C) b}{D + 2b} r_R \left[\frac{r_R^2}{3} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{2z}{H_I} \right)^2 \right] \quad \dots (19) \end{aligned}$$

$(1-r_R)H_I/2 \leq z \leq (1+r_R)H_I/2$ に対して、

$$\begin{aligned} M &= \int_z^{(1+r_R)H_I/2} \frac{dF}{d\xi} \cdot (\xi - z) d\xi \\ &= \frac{1}{48} \rho g D H_I^3 \cdot \frac{D + (3 - 2C) b}{D + 2b} \left[1 + r_R - \frac{2z}{H_I} \right] \quad \dots (20) \end{aligned}$$

したがって、鋼管に作用する最大曲げモーメント $M_{\max}$ は(19)において $z = -h$ とおくことによりつぎのように与えられる。

$$\begin{aligned} M_{\max} &= \frac{1}{8} \rho g H_I^3 D \cdot \frac{D + (3 - 2C) b}{D + 2b} r_R \left[\frac{r_R^2}{3} \right. \\ &\quad \left. + \left(1 + \frac{2h}{H_I} \right)^2 \right] \quad \dots (21) \end{aligned}$$

特に、鋼管を全く間隔を空けずに打ち並べた防波堤の場合、すなわち $b=0$ の場合、には(12)、(10)および(11)から明らかなように $r_R=1$ となる。この場合の

* 3, 4, 5 は本年9月東京において開催された第10回海岸工学国際会議において発表したものと同一内容のものである。

$M_{\max}$ を $M_{\max 0}$ と記せば、その値は (21) からつぎのように与えられる。

$$M_{\max 0} = \frac{1}{8} \rho g H_I^3 D \cdot \left[\frac{1}{3} + \left(1 + \frac{2h}{H_I} \right)^2 \right] \dots (22)$$

したがって、

$$\frac{M_{\max}}{M_{\max 0}} = \frac{D + (3 - 2C)b}{D + 2b} r_R \left[\frac{r_R^2}{3} + \left(1 + \frac{2h}{H_I} \right)^2 \right] \left[\frac{1}{3} + \left(1 + \frac{2h}{H_I} \right)^2 \right] \dots (23)$$

上式の関係は $C=1$ および $C=0.9$ の場合について図示したものがそれぞれ 図-5 および 図-6 である。

図-5 $M_{\max}/M_{\max 0}$ の値 ($C=1$ の場合)

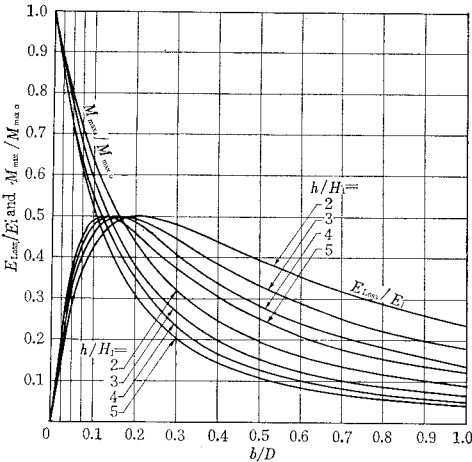
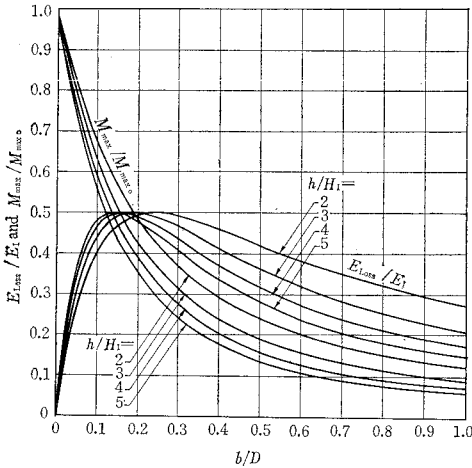


図-6 $M_{\max}/M_{\max 0}$ の値 ($C=0.9$ の場合)



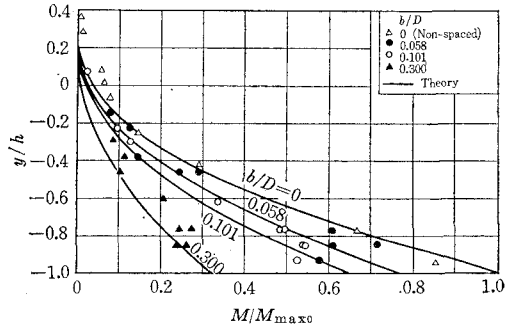
5. 実験

前報におけると同様な実験を行なって、4種類の b/D の場合について鋼管模型に作用する曲げモーメント分布を測定した。この実験においては、すべて水深は 40 cm、波の周期は 1.7 sec、波高は 16 cm とした。

実験結果は 図-7 に示される。同図中の曲線は式 (19), (20), (22), (12), (10) を使い、 $C=0.9$ として

計算された理論値である。この図から、理論と実験の一致度合はかなりよいものであることが認められる。

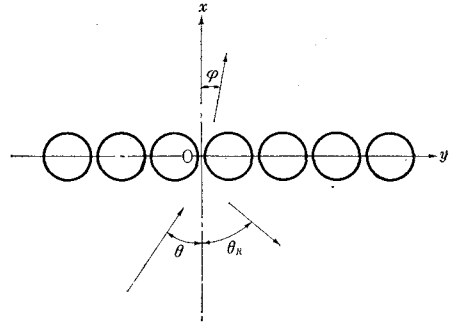
図-7 曲げモーメント分布



6. 防波堤に対して波が斜めに入射する場合

図-8 に示されるように、入射波、反射波および透過波の角度をそれぞれ θ , θ_R および φ で表す。既述の式 (1)~(9) に対応して、本節の場合には次式が与えられる。

図-8 反射角度と屈折角度



$x \leq 0$ に対して、

$$v_I = \sqrt{g/h} \cdot \eta_I \cos \theta \dots (24)$$

$$v_R = -\sqrt{g/h} \cdot \eta_R \cos \theta_R \dots (25)$$

$x \geq 0$ に対して

$$v_T = \sqrt{g/h} \cdot \eta_T \cos \varphi \dots (26)$$

$x=0$ において

$$v_I h + v_R h = v_T h \dots (27)$$

$$q = \pm C_v \sqrt{2g} |\eta_I + \eta_R - \eta_T| \sqrt{1 - \left(\frac{C_v b}{D+b} \right)^2} \dots (28)$$

$$q \cos \varphi \cdot C_v b h = v_T \cdot (D+b) h \dots (29)$$

$x \leq 0$ に対して

$$\eta_I = \frac{H_I}{2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{\lambda} \right) \dots (30)$$

$$\eta_R = r_R \cdot \frac{H_I}{2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{-x \cos \theta_R + y \sin \theta_R}{\lambda_R} \right) \dots (31)$$

$x \geq 0$ に対して

$$\eta_T = r_T \cdot \frac{H_I}{2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x \cos \varphi + y \sin \varphi}{\lambda_T} \right) \quad (32)$$

ただし、 v は x 方向の流速、 q は各間隙より流出する噴流の速度、 λ は波長である。これらの (24)~(32) が (1)~(9) の 9 個の式に対応する 9 個の式であるが、この他にさらに、防波堤前面における y 方向の流速の連続性から、

$x=0$ において

$$\sqrt{g/h} \eta_I \sin \theta = \sqrt{g/h} \eta_R \sin \theta_R \quad (33)$$

また、 $x=0$ では入射波の山は位相的には反射波の山として反射され、また入射波の山は同じく位相的には透過波の山として進行すべきことから、式 (30)、(31) および (32) よりつぎの 2 関係式が成立たねばならないことがわかる。

$$\sin \theta / \lambda = \sin \theta_R / \lambda_R \quad (34)$$

$$\sin \theta / \lambda = \sin \varphi / \lambda_T \quad (35)$$

以上の式 (24)~(35) の 12 個の式に現われている未知量は $v_I, v_R, v_T; \eta_I, \eta_R, \eta_T; V; r_R, r_T; \theta_R, \varphi; \lambda_R, \lambda_T$ の 13 個であって、もう 1 個の物理的考察を式に書き表わしたものが必要である。それは φ についてのものであって、つぎのように考える。

波の入射角度 θ が図-9 (a) に示した角度 θ_{cr} より大きい場合と小さい場合とで屈折の現象はかなり異なると思われる。まず角度 θ_{cr} は簡単な幾何学から

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \frac{1}{1 + (b/D)} \quad (36)$$

で表わされる。波の入射角度が図-9 (c) に示されるように θ_{cr} より大きいときには、波の進行方向に対する開口部の正射影面積は 0 であるから、同図に示されるように、水脈は防波堤に垂直の方向 ($\varphi=0$ の方向) にのみ絞り出されるものとする。つぎに、図-6 (b) のように波の入射角度が θ_{cr} より小さくなると、水脈の左縁 A および右縁 B の平均的方向 ($\varphi=\theta/2$ の方向) に水脈中心線が向うようになり、さらに入射角度 θ が小さくなって 0 に近くなると、水脈の左縁 A のみならず右縁 B も θ に平行になるから、中心線の方 φ は θ に近づくものと思われる。このような考えから、屈折角 φ としてはつぎのような式をあてることとする。

$$\left. \begin{aligned} \theta < \theta_{cr} \text{ に対して } \varphi &= \theta - \frac{\theta_{cr}}{2} \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^2 \\ \theta \geq \theta_{cr} \text{ に対して } \varphi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

このようにしてたてられた式 (24)~(37) の 14 個の式をとくことにより 14 個の量 (θ_{cr} が加わったので 14 個となった) を定めることができる。 ϵ は一般には小さい値であるから

$$(2h/H_I) \epsilon^2 \alpha^2 \ll 1 \quad (38)$$

と考えて $(2h/H_I) \epsilon^2 \alpha^2$ を 1 にくらべて無視すると、上の 14 個の式からつぎの諸式がえられる。

$$\theta_{cr} = \cos^{-1} \frac{1}{1 + (b/D)} \quad (39)$$

$$\varphi = \begin{cases} \theta - \frac{\theta_{cr}}{2} \left(\frac{\theta}{\theta_{cr}} \right)^2 \\ 0 \end{cases} \quad (40)$$

$$r_T = \frac{4h}{H_I} \epsilon \alpha \left[-\epsilon \alpha + \sqrt{\epsilon^2 \alpha^2 + \frac{2H_I}{h}} \right] \quad (41)$$

$$r_R = \begin{cases} \sqrt{1 - 2r_T \cos \varphi \cdot \cos \theta + r_T^2 \cos^2 \varphi} & (\theta < \theta_{cr}) \\ \sqrt{1 - 2r_T \cos \theta + r_T^2} & (\theta \geq \theta_{cr}) \end{cases} \quad (42)$$

$$\sin \theta_R = \sin \theta / r_R \quad (43)$$

$$\lambda_R = \lambda \sin \theta_R / \sin \theta \quad (44)$$

$$\lambda_T = \lambda \sin \varphi / \sin \theta \quad (45)$$

ただし、 α は $\pm \sqrt{|\sin 2\pi \zeta|}$ を $0 \leq \zeta \leq 1/2$ の間で Fourier 級数に展開したものの第 1 項の係数で、

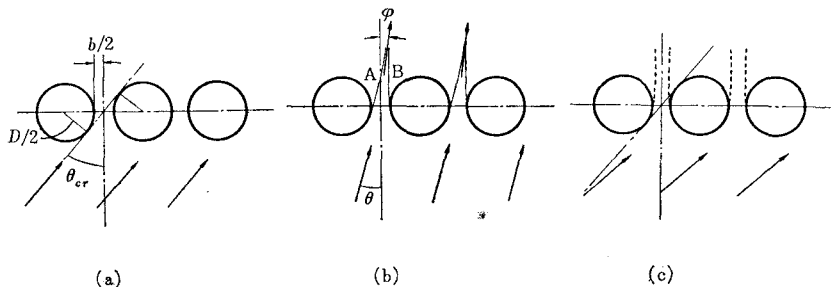
$$\begin{aligned} \alpha &= 4 \int_0^{1/2} \sqrt{\sin 2\pi \zeta} \cdot \sin 2\pi \zeta d\zeta \\ &= 1.113856 \approx 1.1 \end{aligned} \quad (46)$$

である。

式 (44) から、反射波の波長は入射波の波長より長くなり、また、式 (45) から透過波の波長は入射波の波長より逆に短くなり、特に θ_{cr} より大きな角度で波が入射する場合 (図-9 (c) の場合) には、透過波の波長は 0 になる——すなわち、透過波の相互干渉により、防波堤のすぐ近くの局所的な波を除いては、事実上ほとんど波が消えるものであると理論上からは予想される。この考え方の妥当性にについては、講演時までには実験により検討しておくつもりである。

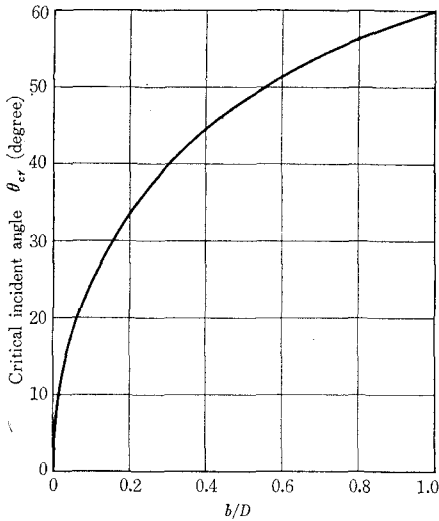
図-10 は限界入射角 θ_{cr} の値を (39) により図示したもので、上記の理論によれば、鋼管間隔が相当空いて

図-9 入射角度と屈折角度



いても、入射波の方向に対して防波堤線を図示の θ_{cr} の値以上に傾ければ、港内側水域を入射波からほとんど十分に遮蔽することができるものと考えられる。すなわち、たとえば $b/D=0.05, 0.1$ および 0.2 に対してはそれぞれ θ を $18^\circ, 24.5^\circ$ および 33.5° より大きくすればよいものと思われる。

図-10 限界入射角 θ_{cr} の値



7. 結 論

波が防波堤に垂直に入射する場合に、各鋼管に作用する曲げモーメントの計算式は (19) および (20) で与えられ、これは工学上の目的に対しては十分な精度をもつ

た式であると考えられる。

鋼管間隔を段々に空けてゆくと、波の透過率は大きくなってゆくが、各鋼管に作用する波力の曲げモーメントはかなり急激に小さくなってゆく。たとえば、 $C=1$, $b/D=0.05$, $h/H_I=2$ に対しては r_T と $M_{\max}/M_{\max 0}$ の値はそれぞれ前報 図-5 および本報 図-5 から読みとられて $r_T=0.174$ および $M_{\max}/M_{\max 0}=0.786$ となり、また C と h/H_I の値は前と同じにして b/D の値のみをかえて $b/D=0.075$ とすると、 r_T および $M_{\max}/M_{\max 0}$ の値はそれぞれ 0.247 および 0.704 となる。このように、間隔をいくらかでも空けることにより、作用曲げモーメントが急激に減少するという点での経済性を考えるとき、この防波堤の構造は場合により大いに適当なものであると思われる。

波が防波堤に斜めに入射する場合についても研究を行ったが、実験が間に合わなかったのでこの場合については本報においてはまだはっきりしたことはいえない。しかし、本報における理論的考察の範囲内では、防波堤線を入射波の方向に対して 図-10 の θ_{cr} の値より以上に傾斜させれば、鋼管間隔がかなり大きな場合でも、港内側水域を入射波からほとんど十分に遮蔽することができるものと思われる。

これらの諸利点を考慮するとき、この構造の防波堤は本格的な防波堤としての他に、海岸浸蝕防止のための離岸堤としても非常に有望なものではないかと思われる。

引 用 文 献

- 1) 林 泰造・狩野徳太郎・白井増次郎・服部昌太郎：筒型透過性防波堤の水理特性について、土木学会海岸工学講演会講演集，昭和40年11月，pp. 193-197.