

透過性鋼管防波堤と底質の移動について

林 泰 造*・服 部 昌太郎**・白 井 増次郎***

1. 緒 言

透過性鋼管防波堤の水理特性のなかで、鋼管相互の間げきにより

1. 入射波に対してどの程度の波が透過するか。
2. 防波堤の各鋼管に作用する波力とそれによる曲げモーメントは、不透過の場合 ($b=0$) にくらべてどの程度減ずるか。
3. 防波堤へ斜めに波が入射する場合の効果

についてはすでに報告^{1),2)}した。

本報においてはその後に行なった水理実験結果にもとづき、前回報告した透過性鋼管防波堤の理論に若干の修正を行なった点について述べる。つぎに、透過性鋼管防波堤の施工に当たって考慮すべき防波堤基部の洗掘と透過性鋼管防波堤の水理特性に起因する防波堤付近での海底底質の移動に対する基礎実験結果を報告する。

2. 防波堤†に斜めに入射する場合

(1) 理論的考察

図-1に示されるように、入射波が防波堤に角度 θ で入射する場合、防波堤での反射波と透過波の進行角度を θ_R, φ とする。前報と同様にして防波堤付近について長波理論を適用すると、入射波、反射波および透過波によってひき起こされる水粒子の速度の x 方向成分はそれぞれ、つぎのように表わされる。

$x \leq 0$ に対して

$$v_I = \sqrt{\frac{g}{h}} \eta_I \cos \theta \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$v_R = -\sqrt{\frac{g}{h}} \eta_R \cos \theta_R \quad \dots\dots\dots (2)$$

$x \geq 0$ に対して

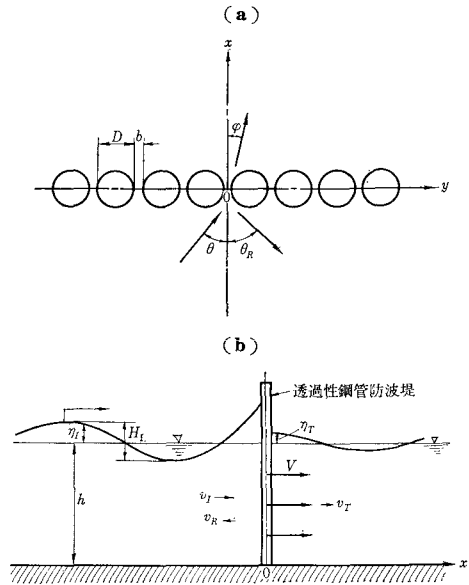
$$v_T = \sqrt{\frac{h}{g}} \eta_T \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (3)$$

また防波堤 ($x=0$) での連続方程式として

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

鋼管間げきからの噴出水流の流速は Bernoulli の定理よ

図-1 記号説明図



り、

$$q = \pm C_v(\theta) \sqrt{2g|\eta_I + \eta_R - \eta_T|_{x=0}} / \sqrt{1 - \left(\frac{C_c(\theta)b}{D+b} \right)^2} \\ \approx \pm C_v(\theta) \sqrt{2g|\eta_I + \eta_R - \eta_T|_{x=0}} / \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

と流量の連続性より

$$q C_c(\theta) b h = v_T (D+b) h \quad \dots\dots\dots (6)$$

をうる。ここで鋼管間げきでの流速係数 C_v と縮脈係数 C_c はともに入射波の入射角 θ の関数である。

他方、 η_I, η_R, η_T をつぎのように仮定する。

$x \leq 0$ に対して

$$\eta_I = \frac{H_I}{2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x \cos \theta + y \sin \theta}{\lambda} \right) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\eta_R = \frac{H_I}{2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{-x \cos \theta_R + y \sin \theta_R}{\lambda_R} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$x \geq 0$ に対して

$$\eta_T = \frac{H_T}{2} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x \cos \varphi + y \sin \varphi}{\lambda_T} \right) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし、 γ_R, γ_T は防波堤での反射率および透過率、 λ ,

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科

** 正会員 工修 中央大学助教授 同上

*** 正会員 大成建設株式会社技術研究所

† 本報では以後透過性鋼管防波堤を単に防波堤と略記する。

λ_R, λ_T は入射波, 反射波, 透過波の波長である。

$x=0$ (防波堤) では入射波に対して, 反射波および透過波が共に位相のずれなしに, それぞれ反射または透過することから, 式 (7) ~ (9) よりつぎの関係をうる。

$$\sin \theta / \lambda = \sin \theta_R / \lambda_R \dots\dots\dots (10)$$

$$\sin \theta / \lambda = \sin \varphi / \lambda_T \dots\dots\dots (11)$$

ところで, 防波堤設置地点での水深はほぼ一様で, しかも反射波と透過波の周期は入射波のそれと同一であることから, つぎの条件をうる。

$$\lambda = \lambda_R \dots\dots\dots (12)$$

$$\lambda = \lambda_T \dots\dots\dots (13)$$

以上の式 (1) ~ (13) より透過率 r_T を求めると

$$r_T = \frac{4h}{H_I} (\epsilon_\theta \alpha) \left[-\epsilon_\theta \alpha + \sqrt{(\epsilon_\theta \alpha)^2 + \frac{H_I}{2h}} \right] \dots\dots (14)$$

ただし, α は $\pm \sqrt{|\sin 2\pi \zeta|}$ を $0 \leq \zeta \leq 1/2$ で Fourier 級数に展開したものの第一項の係数で

$$\alpha = 4 \int_0^{1/2} \sqrt{\sin 2\pi \zeta} \cdot \sin 2\pi \zeta d\zeta \approx 1.1 \dots\dots (15)$$

また

$$\epsilon_\theta = \frac{C(\theta)}{\cos \theta} \frac{b}{D+b} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2} \dots\dots (16)$$

である。

いま, 入射波が防波堤に直に入射する場合 ($\theta=0$) では,

$$\epsilon_0 = C_0 \frac{b}{D+b} \sqrt{1 - \left(\frac{b}{D+b} \right)^2} \dots\dots\dots (17)$$

となることが必要であり, また入射波が防波堤に平行に入射する場合 ($\theta = \frac{\pi}{2}$) には $r_T=0$ と仮定すれば,

$$\epsilon_{\pi/2} = 0 \dots\dots\dots (18)$$

をうる。このような条件を満足させるために,

$$C = C_0 \cos^2 \theta \dots\dots\dots (19)$$

と仮定すると, 式 (17) と (19) より透過率 r_T はつぎのようになる。

$$r_T = \frac{4H_I}{h} (\epsilon_0 \alpha \cos \theta) \times \left[-(\epsilon_0 \alpha \cos \theta) + \sqrt{(\epsilon_0 \alpha \cos \theta)^2 + \frac{H_I}{2h}} \right] \dots\dots\dots (20)$$

また他の未知量についてはつぎの関係がえられる。

$$\left. \begin{aligned} \lambda &= \lambda_R = \lambda_T \\ \theta &= \theta_R = \varphi \\ r_R &= 1 - r_T \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (21)$$

式 (21) は防波堤を透過する透過波向は入射波の防波堤への入射角と同一で, 防波堤で屈折することはないことを示している。

(2) 実験設備と測定方法

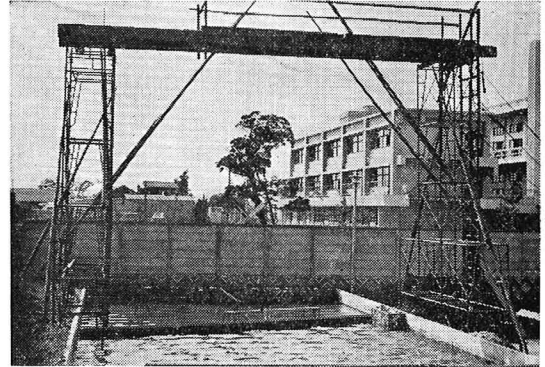
防波堤に斜めに波が入射する場合の防波堤の水利特性を検討するための三次元模型実験は $9\text{ m} \times 24.7\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ のコンクリート製平面波動水槽で行なった。模型防

波堤は外径 34 mm のビニール管を使用し, 直径 2 m の実物鋼管を想定して, 表-1 に示されるような実験条件で行なった。

表-1 実験条件

h (cm)	H (cm)	T (s)	H/L	h/H	b/D
17.0	2.4	0.74	0.0316	7.09	0.075

写真-1 波高撮影用高架と実験水槽

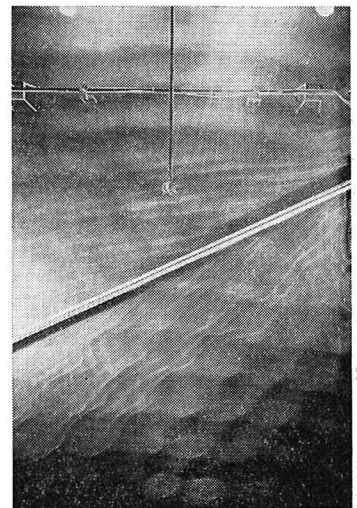


防波堤での入射波の反射および透過の状況は, 写真-1 に示される写真撮影用高架より, 入射波, 反射波および透過波の波峯を 35 mm カメラにより撮影記録するとともに, 抵抗線式波高計で波向・波高計測を行なった。

(3) 実験結果

写真-2 は種々の入射角度に対する実験結果の中の一例で, 入射角度 $\theta=19^\circ 12'$ の場合の防波堤付近の波の反射および透過の状況を示したものである。防波堤沖側での入射波の反射角は網状をなしている重複波の波峯線より, また透過波の進行角度は防波堤岸側での波峯線 (写真上部

写真-2 入射角度 $19^\circ 12'$ の場合の防波堤での反射波および透過波 (下方が沖側)



に黒く写っている波峯線が数本見られる) より判読しうる。

実験結果によると, 写真記録および波高計による波向測定はいずれからも 写真-2 の場合には

$$\theta_R = \varphi \approx 19^\circ 10'$$

$$T = T_R = 0.74 \text{ s}$$

であり, 先の理論的考察における式 (21) に示されるよ

うに入射波は防波堤で屈折することなしに透過している。このことは他の実験ケースにおいても認められた。

写真-2の防波堤近傍に見られる非常に波長の短い波は、防波堤での寄せ波、引き波時に生ずる鋼管間げきよりの落下水による攪乱波で2次的なものであり、波高は非常に小さくその減衰も速やかである。

3. 防波堤と底質の移動

透過性鋼管防波堤は鋼管を一列に海底に打込んだ構造物で、海底下への鋼管根入れが相当深いことから、従来の海中構造物にくらべて構造物基部の洗掘に対して非常に安定性の高い構造である。しかし鋼管間げきよりの噴出流の流速は4~6 m/sに達する場合もあり、施工にあたっては防波堤基部の洗掘の程度とその対策について検討を行なう必要がある。

図-2 鋼管間げきからの噴出流の最大流速の鉛直分布
($h=29.1$ cm, $T=1.7$ s, $H=9.4$ cm)

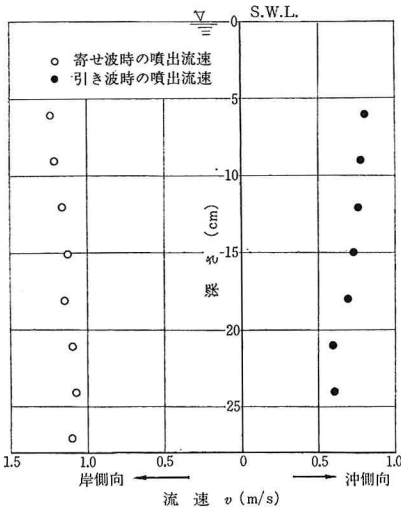


図-2は2次元波動水槽で行なった鋼管間げきからの噴出水流の水深方向の流速分布で、この実験結果にも見られるように、寄せ波時の鋼管間げきからの噴出流速は引き波時にくらべて大きい。したがって長期間にわたって考えると防波堤を透過する流速が卓越し防波堤を通過する底質の移動が生ずるものと考えられる。この防波堤の機能を利用することによって、欠かい海岸での欠かい防止工としての防波堤の利用も期待しうる。

以上の底質の移動に関連する事柄を実験により検討するため、2次元波動水槽を用い防波堤に波が直に入射する場合の実験を基礎実験として行なった。

(1) 実験設備と実験方法

使用する2次元波動水槽は、長さ30 m、幅0.80 m、側壁高0.70 mの片面ガラス張りのもので、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。

模型防波堤は外径60 mmの鋼管を使用し、間げき比は $b/D=0.75$ である。

表-2 模型底質

粒 径 (mm)	比 重	沈降速度 (cm/s)
0.6~1.2	1.9	9.0~9.5

模型用底質は表-2に示される人工軽量砂を、模型防波堤前面2 m、脊面1 mに敷き、底質の移動状況およびその地形を35 mmカメラで記録するとともに、ポイントゲージによりその形状を測定する。

底質の移動は防波堤設置水深によって、その移動形式に差があると考えられる。他方、鋼管防波堤を通常の防波堤としての目的で使用する場合と欠かい防止工として使用する場合は、その設置水深が異なってくる。以上の理由から模型実験は表-3に示される3種類の防波堤設置水深と2種類の入射波について行なった。

表-3 底質移動に対する実験条件

h (cm)	h/L	H (m)	H/L
29.1	0.110	12.2	0.045
		9.2	0.034
18.0	0.083	12.9	0.060
		9.5	0.044
13.0	0.070	9.9	0.053

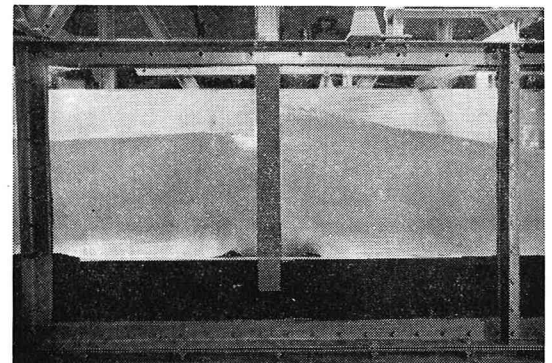
模型実験では防波堤への波の入射により防波堤岸側の水位が徐々に上昇し、引き波時の鋼管間げきよりの噴出流速が過大となる。この防波堤岸側の水位上昇を防ぐため実験波の継続時間を10~15波に区切り、防波堤付近の地形が安定となるまで実験波をくり返し入射させて実験を行なった。

(2) 実験結果

防波堤に波が入射しはじめると海底は入射波の種類、防波堤設置水深に応じた変形を開始する。海底形状の変化はまず防波堤鋼管間げきの噴出水流による防波堤基部

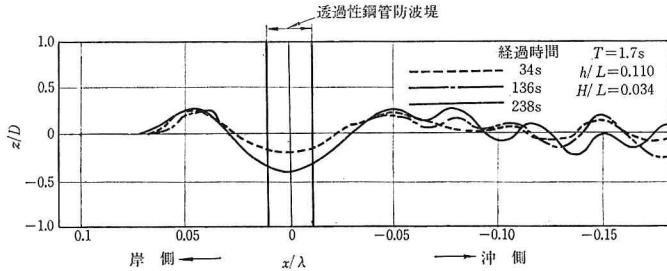
写真-3 鋼管間げきよりの噴出流による防波堤基部の洗掘と底質の巻上げ ($h/L=0.110$, $H/L=0.045$)

(右側が沖側)

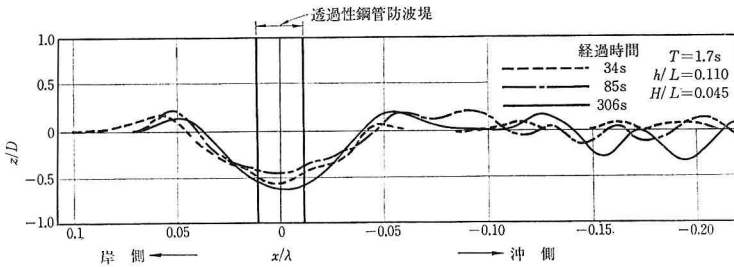


の洗掘にはじまる。この状況は写真—3に見られるように鋼管間げきからの噴出水流により防波堤基部の底質が巻き上げられながら移動し、防波堤に対してほぼ対称な洗掘形状を示すが、防波堤岸側への移動底質量が多く、防波堤岸側には浮遊砂が一様に沈降することが認められる。

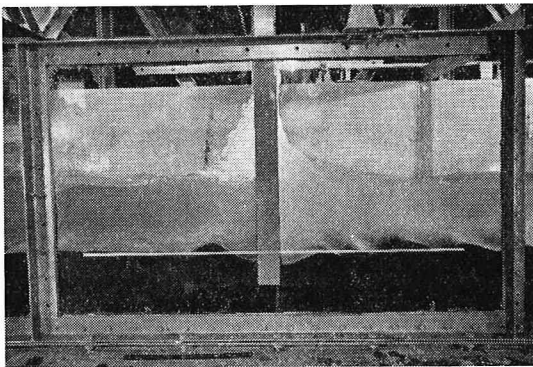
図—3 防波堤沖側で碎波しない場合の海底地形の時間的变化



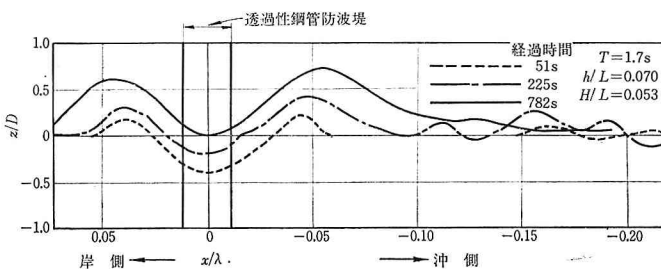
図—4 防波堤沖側で碎波しない場合の海底地形の時間的変形



写真—4 防波堤基部洗掘と砂れん上の底質移動
($h/L=0.083$, $H/L=0.060$)
(右側が沖側)



図—5 防波堤沖側で碎波しない場合の海底地形変形



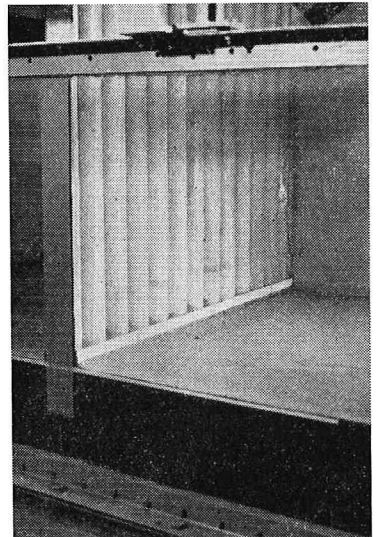
図—3および4は、防波堤設置比水深 $h/L=0.110$ の場合の2種類の入射波に対する防波堤付近の地形の時間的变化を示したもので、横軸は防波堤中心からの距離と入射波長との比 x/λ 、縦軸は地形変動量と鋼管直径との比 z/D である。この実験条件では防波堤沖側に発生する重複波は碎波せず、防波堤基部の洗掘形状は比較的短

時間内に安定となる。防波堤沖側では砂れんが発生し、写真—4に見られるように底質は砂れん上を前後に移動し、その前進速度は非常に小さい。一方防波堤岸側では防波堤基部の洗掘以外には目立った変化は認められない。

図—5は防波堤前面で重複波が碎波する防波堤設置水深が比較的浅い $h/L=0.070$ の場合の海底形状の時間的变化である。防波堤沖側での碎波により、岸向きの底質移動が卓越し、実験初期に生ずる防波堤基部洗掘は時間の経過とともに埋めもどされ、防波堤沖側の砂堆の移動につれて防波堤岸側に底質の堆積が進行する。

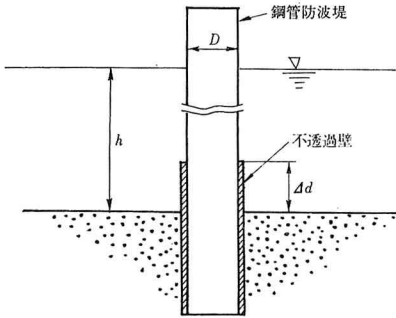
防波堤基部での洗掘を防止するため、洗掘防止工として写真—5および図—6に示される不透隔壁*を設置した実験を行なっ

写真—5 模型透水性防波堤と洗掘防止工



* 防波堤基部洗掘防止工としては、鋼管間げきを塞ぐために、防波堤鋼管よりも外径の小さい鋼管やH型パイルを打ち込むか、またはプレキャストコンクリートによる根固めなどが考えられる。模型実験では便宜上、防波堤基部に図—6に示される不透隔壁により上記の洗掘防止工に代えて実験を行なった。

図—6 洗掘防止工説明図



た。実験に使用する不透過壁は、その頂部が初期海底面上 2.5 cm のものと海底面に一致するものの 2 種類である。

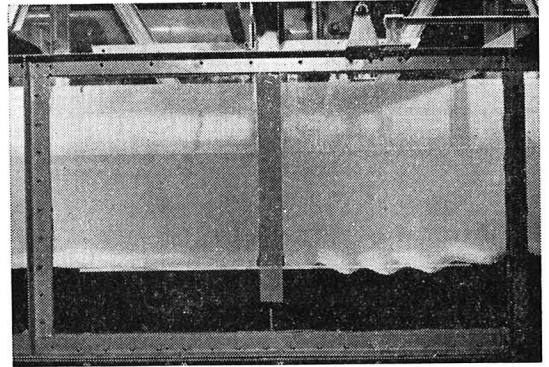
実験結果は図—7~10 に示され、ほぼ安定状態に達した海底形状を 2 種類の不透過壁について示したものである。また図中には不透過壁の効果を検討するために洗掘防止工を施さない場合の安定地形もあわせて示してある。

実験結果によると防波堤沖側で重複波が碎波しない、 $h/L=0.110$ (図—7, 8) および 0.083 (図—9) の場合には防波堤沖側基部でわずかに洗掘が生ずるのみとなり、洗掘防止のための不透過壁の効果は非常に大きい。不透過壁頂部が海底面と一致する $\Delta d/h=0$ の場合には、防波堤岸側への底質の移動による堆積が認められる。

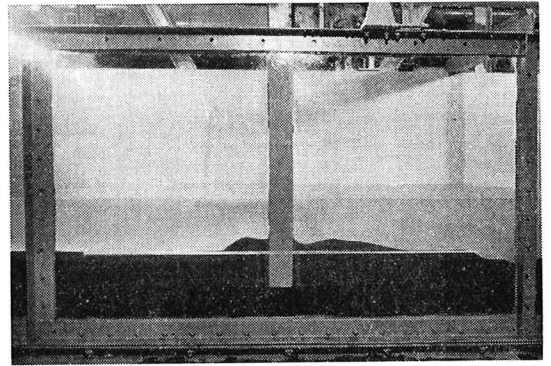
図—10 の防波堤沖側で重複波が碎波する場合には、防波堤基部の不透過壁を越えて底質は防波堤岸側に移動し堆積する。そしてこの砂堆は徐々に前進する。写真—6

写真—6 防波堤基部洗掘防止工を施した場合の安定海底形状 (右側が沖側)

(a) $h/L=0.110$, $H/L=0.045$, $\Delta d/h=0.086$



(b) $h/L=0.070$, $H/L=0.053$, $\Delta d/h=0.192$



は不透過壁高さ $\Delta d/h=0.086$ と 0.192 の場合のほぼ安定した防波堤付近の地形を示したものである。

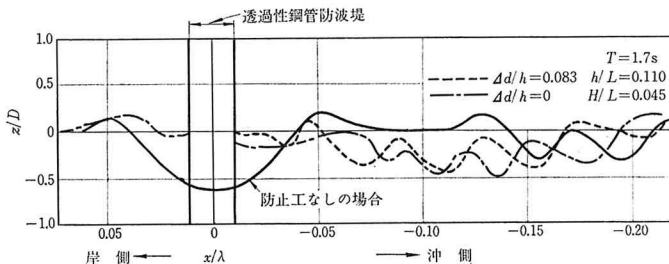
(4) 実験に対する考察

底質の移動に関する実験から、防波堤基部での洗掘は本実験の範囲内では進行性のものではなく、防波堤の設置水深と入射波の種類に応じたある安定形状を呈し、また基部洗掘の影響は防波堤近傍のみにしか存在しないことが認めらる。

防波を主目的にした透過性鋼管防波堤は通常、防波堤前面での重複波が碎波しない比較的防波堤設置水深い位置に設置される。この場合には、防波堤基部に洗掘防止用の不透過壁を付加することによって、防波堤の基部洗掘に対する一層の安定性をうることができる。

海岸侵食防止工として透過性鋼管防波堤を使用する場合には、底質移動の活潑な碎波帯外縁付近の比較的水深の浅い所に防波堤を設置する。したがって防波堤の前面で碎波が生じる場合が多くなり、実験結果 (図—10) にみられるような防波堤の捕砂機能と波力減殺効果とにより海岸侵食防止工として十分なる

図—7 洗掘防止工を施した場合の安定海底形状



図—8 洗掘防止工を施した場合の安定形状

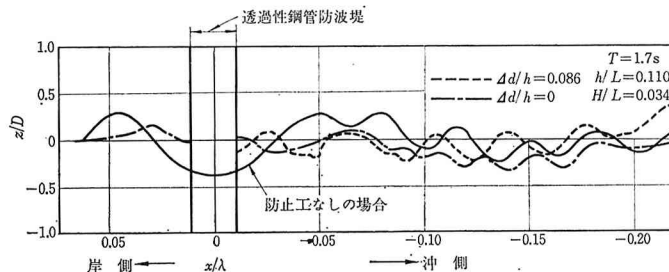


図-9 洗掘防止工を施した場合の安定海底形状

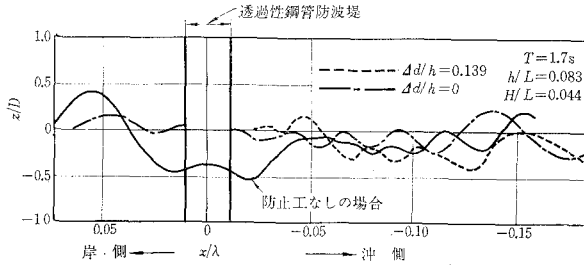
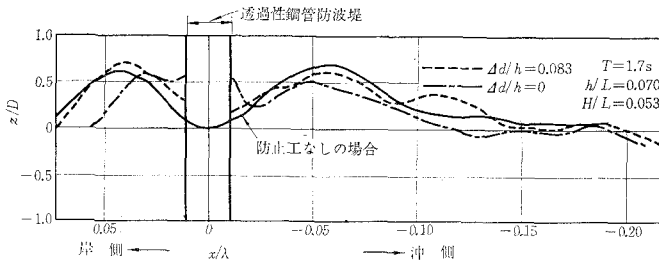


図-10 洗掘防止工を施した場合の安定海底形状 (沖側で碎波)



機能を有する。

実験結果にも見られるように、防波堤岸側での海底地形の変動は防波堤基部付近を除いては余り活潑ではなく、しかも防波堤沖側より持込まれる浮遊砂のため堆積性の傾向を示している。このことは外海との海水交換とともに透過性鋼管防波堤の特徴ともいえる。

実験は防波堤と底質移動との関係を把握するために行った基礎実験であり、定性的な事柄のみ記述して来た。防波堤基部での洗掘深さなどを定量的に検討するには、模型底質に対する力学的相似律を考慮した模型実験による必要がある。しかし本実験に使用した模型底質は、模型縮尺より換算される実物底質砂と比較すると大粒径の底質に相当するものとなり、この様な模型底質に対してでも防波堤を通過し防波堤岸側に堆積する底質移動が認められたことは、透過性鋼管防波堤の底質移動に対する特性を示したものと認められる。

防波堤に斜めに波が入射する場合の底質移動に対しても上述の事柄が相当程度適用しうると推定されるが、現在実験が進行中であり、講演時に若干の実験結果を報告しようと思う。

4. 結 論

波が防波堤に斜めに入射する場合の透過性鋼管防波堤

の水利特性についての理論的考察と実験とを行ない、防波堤の透過率の計算式(20)をえた。式(20)によると入射角度 θ の増加とともに透過率が減少することの関係式を示したが、鋼管間げきの流量係数と入射角との関係については今後実験による検討が必要である。また防波堤を透過した波は防波堤では屈折せず、入射波と同一の波向で進行することが示された。

透過性鋼管防波堤基部の洗掘は、防波堤設置水深と入射波の種類によって洗掘範囲や洗掘深さは変化するがその形状は進行性でなく、実験開始後比較的短時間で一定となる。鋼管間げきよりの噴出水流で巻き上げられた底質は防波堤前後面に移動するが、寄せ波時の噴出流速が大きいため防波堤岸側に沈降するものが多い。

防波堤を通過する底質の移動は、防波堤設置水深が比較的浅くなり、防波堤前面で重複波が碎波するような場合にけん著になる。この場合には防波堤基部での洗掘は生ぜず、防波堤岸側に生ずる砂堆は徐々に前進する。

実験結果によると防波堤沖側の海底形状の変動は大きい、防波堤の消波効果と鋼管間げきからの噴出水流により防波堤岸側の底質が防波堤沖側に移動することはなく、また海底変動は常に堆積性であることが明らかとなった。

防波堤基部の洗掘防止工として、実験では海底面あるいは海底面上に立ち上がった不透過壁を設けて実験を行った。この洗掘防止工の効果はけん著で、防波堤基部の洗掘は防止される。

以上の底質移動に対する定性的な実験結果より、透過性鋼管防波堤を侵食海岸における侵食防止工として利用することは、防波堤の水利特性、底質の捕砂機能、および外海との海水交換からも十分有望なものであると思われる。

引用文献

- 1) 林 泰造・狩野徳太郎・白井増次郎・服部昌太郎：簡型透過性防波堤の水利特性について，土木学会海岸工学講演会講演集，昭和40年11月，pp. 193-197.
- 2) 林 泰造・服部昌太郎・白井増次郎：透過性鋼管防波堤の水利，土木学会海岸工学講演会講演集，昭和41年12月，pp. 97-101.