

スリット壁の損失水頭係数と見掛けの オリフィス長さについて

浦島 三朗*・石塚 耕一**・近藤 俣郎***

On the Head Loss Coefficient and Effective Orifice Length of a Slotted Wall

Saburō URASHIMA, Kōichi ISHIZUKA and Hideo KONDO

要 旨

本論は、単一の縦スリット壁について実験的に波力を求め、実験結果よりスリット壁の損失水頭係数と見掛けのオリフィス長さについてまとめたものである。その結果、損失水頭係数は Reynolds 数によってよく整理することができ、また空隙率および壁厚とスリット幅の比の関数として推定することができる。見掛けのオリフィス長さは、Keulegan-Carpenter 数で整理され、波長に比例していることがわかる。

Synopsis

Wave forces acting on a vertical single slotted wall was investigated experimentally. Inputting the experimental data and results in order, the head loss coefficient was considered to be a function of Reynolds number as well as void ratio and ratio of wall thickness to slit width. The effective orifice length was considered to be a function of Keulegan-Carpenter number and be in proportion to wave length.

1. ま え が き

近年、遊水部を有し前面に多孔壁やスリット壁のような透水性の壁をもつ直立消波構造の防波堤や岸壁が多く建設されるようになってきた。この種の構造物については波力、消波、越波等に関する水理的現象を解明するため、各種の研究が行われその成果が相次いで発表¹⁾²⁾されている。しかし、透水壁を使用したケーソンタイプの研究は盛んに行われているが、その基本となる単一の透水壁についての報告は少なく、わずかに円形多孔壁について近藤・佐藤ら³⁾の基礎的な研究があるのみである。単一の縦スリット壁については、未だ不明確な点が多く今後の実験的研究によって解明

されなければならない点が多々残されている。

透水壁の反射率や伝達率の理論的推定⁴⁾⁵⁾には、透水壁の損失水頭係数や見掛けのオリフィス長さにどのような値を使用するかが大きな問題となる。特に後者については Mei ら⁶⁾による推定方法があるのにすぎない。そこで Morison 式により波力を決定する場合に用いられる抗力係数 C_D 、質量係数 C_M が損失水頭係数 C_L 、見掛けのオリフィス長さ l とそれぞれ比例関係にあることから、スリット壁に作用する波力を直円柱の場合と同様な方法で測定することによって C_L と l を推定した。水平水粒子速度および加速度にどのような波動理論を使用するかは重要な検討事項である。孤立構造物では進行波を用いているが、スリット壁に進行波を用いると定常流実験との連続性がわるく⁷⁾、円柱などの孤立構造物とは異なりスリット壁は反射波の存在を無視できないので、水粒子速度および加速度には微小振幅波動理論により部分重複波を

* 講 師 土木工学科

** 教 授 土木工学科

*** 教 授 室蘭工業大学土木工学科

考えて求めた。また、水粒子速度にはスリット部を流れる実流速 q とスリット壁前方の流量流速 u があり、両者は $u = \lambda q$ の関係が成り立ち、実流速 q で求められた抗力係数 C_D' および質量係数 C_M' と流量流速 u で求めた C_D および C_M とは $C_D' = \lambda^2 C_D$ および $C_M' = \lambda C_M$ の関係がそれぞれ成り立つ。実流速 q で求めた C_D' および C_M' は、角柱などの孤立構造物の値に近づくが、ここでは流量流速で計質を行い、その結果について検討した。

2. 実験装置および実験方法

実験は波動実験および定常流実験の両方について行い、波動実験に用いたスリット壁は幅 40 cm、高さ 60 cm のアクリル材を用いた。

その種類は空隙率 $\lambda = 25, 35, 50\%$ の 3 種類、壁厚 $d_w = 15, 30, 45$ mm の 3 種類を組み合わせた 9 種類であり、スリット壁前面の水深は一定で $h = 50$ cm とした。実験波の種類は周期 $T = 1.1 \sim 2.4$ sec、入射波高 $H_i = 1 \sim 10$ cm 程度で実験を行い、スリット壁に作用する水平全波力、スリット壁前面水位をある継続時間内で連続的に測定した。また入射波高および反射波高は、スリット壁前面水域の最大波高および最小波高を測定し、Healy の方法によって決定した。

定常流実験は、定常可変開水路の一部を長さ

表-1 スリット壁の模型の諸元

	$\lambda(\%)$	$b(mm)$	$s(mm)$	$d_w(mm)$	d_w/s
標準型	25	50	17	15	0.90
				30	1.80
				45	2.70
	35	43	23	15	0.64
				30	1.29
				45	1.93
	50	33	33	15	0.45
				30	0.90
				45	1.35
角柱列型	20	40	10	15	1.50
				30	3.00
				45	4.50
	30		17	15	0.88
				30	1.75
				45	2.63
	40		27	15	0.56
				30	1.12
				45	1.69
	50		40	15	0.38
				30	0.75
				45	1.13

100 cm、高さ 20 cm、幅 40 cm の矩形断面の管路を作り、その中央にスリット壁を設置した。スリット壁の模型にはアクリル材を使用し、標準型と角柱列型の 2 種類を用い、その諸元を表-1 に示す。標準型の模型は、波動実験に使用した模型と相似な 9 種類、角柱列型の模型は、幅 $b = 40$ mm の角柱を空隙率および壁厚を変化させて並べた 12 種類の模型である。表-1 に示す標準型のスリット壁の諸元において、スリット幅 s および角柱幅 b の値は、空隙率 λ およびスリットの数を変化させずに同じ幅の角柱が等間隔に並んだ場合の角柱列型に換算した値である。定常流におけるスリット壁の損失水頭は、スリット壁前後の圧力水頭差を測定することにより求めることができる。

3. 実験結果および考察

損失水頭係数 C_L や見掛けのオリフィス長さ z は近藤ら³⁾によってMörison式で使用される抗力係数 C_D および質量係数 C_M と次式に示すような関係が示されており、波動理論等に用いられている。

$$C_L = (1 - \lambda) C_D \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$z = [1 + (1 - \lambda) C_M] d_w \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 λ は空隙率、 d_w は壁厚を表わす。これら両係数の C_L および z は Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数によって整理されることが多く、ここにおいても両無次元数によってまとめている。しかし、Reynolds 数および Keulegan-Carpenter 数の水粒子速度にどのような値を用いるかによって、その意味も異なると思われる。円柱等の孤立構造物⁸⁾や非常に間隔を大きくとって並べた円柱列⁹⁾などにおいては、一般に最大水粒子速度によって定義を行っている。本実験においては、最大水粒子速度を用いるよりも平均的水粒子速度を使用した方が定常流実験と波動実験の連続性がよいこと、また C_D および C_M を水深方向に一周期内の平均的なものとして算出していることを考慮し、Reynolds 数、Keulegan-Carpenter 数および平均水粒子速度 u_m を次式のように定義した。¹⁰⁾

$$\left. \begin{aligned} Re &= \frac{u_m \cdot s}{\nu}, & K. C. &= \frac{u_m \cdot T}{d_w} \\ u_m &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\frac{\int_{-h}^h u^2 dy}{h + \eta}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(3)$$

ここで、 ν は動粘性係数、 s はスリット幅、 T は周期、 d_w は壁厚、 h は水深、 η は表面水位、 u は静水面から y の位置の水粒子速度、 N は一周期内の測定の数を表わす。

定常流における損失水頭係数 C_l は、スリット壁による損失水頭 h_l より、次式で算出することができる。

$$C_l = \frac{h_l}{u^2/2g} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 u は短形管路内の流速を表わし、 g は重力加速度である。

1) 損失水頭係数 C_l

波動実験と定常流実験の抗力係数 C_D はほぼ連続し、Reynolds数によって比較的良好くまとめられ、Reynolds数の小さな範囲では、流速に反比例する層流的抵抗特性を示し、乱流域ではほぼ一定値の値となることが実験より確かめられている。損失水頭係数 C_l についてもReynolds数によってよく整理することができ、乱流域で一定値をとり、抗力係数 C_D と同じ傾向を示す。

定常流実験における標準型のスリット壁の C_l を図-1に示す。図中の直線はMeiらによる推定値を示している。この図より空隙率 λ が小さく、また壁厚 d_w が小さいほど C_l の値は大きいことがわかる。壁厚 d_w の効果は、 λ が小さい時は d_w による C_l の変化は小さいが、 λ が大きくなるに従い d_w の値によって C_l の値が大きく異なる。

定常流における角柱を並べた12種類の角柱列の損失水頭係数 C_l を図-2に示す。図中の直線はMeiらによる推定、開水路のピアの損失水頭に用

いられるd'Aubissonによる方法またスクリーン
の損失水頭に用いられる Kirschmerの方法
によって求めた値を示している。¹¹⁾

Meiらによる推定値は、非常に薄い板のオリ
フィスについての理論であり、透過部では噴流と
なりその後急拡するが水の粘性と周囲の水のため
にもとの流線に復帰するという条件にもとづ
き、次式で表わしている。⁶⁾

$$C_l = \left(\frac{S}{S_c} - 1 \right)^2 = \left(\frac{S}{cS_o} - 1 \right)^2 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、オリフィスの値を準用することとすれば
 C は縮流係数で $C=0.6+0.4(S_o/S)^2$ である。 S
は全断面積、 $S_c=cS_o$ は空隙を通過する噴流の最小
断面積、 S_o はスリット断面積で、スリット壁の場
合は $S_o/S=\lambda$ となる。Meiらの値と実験値とを
比較すると d_w/s が大きく薄い板と仮定できない
場合、また隣接した透過部の噴流が急拡の際に互
いに影響すると思われる λ が小さい場合には
実験値となるが、 d_w/s が1程度のスリット壁につ
いてはMeiらの値と実験値が比較的良好一致し
ている。

定常流実験でほぼ一定値とみられる乱流域の損
失水頭係数 C_l の平均値を λ および d_w/s の関数
で整理するとかなりよくまとめることができ、21
種類の標準型および角柱列型の実験値から、乱流
域ではおよそ次式で近似できる。

$$C_l = \frac{0.52}{\lambda^{3.0} (d_w/s)^{0.46}} \quad \dots\dots\dots(6)$$

これより乱流域では、 C_l の値は同一の λ のスリッ

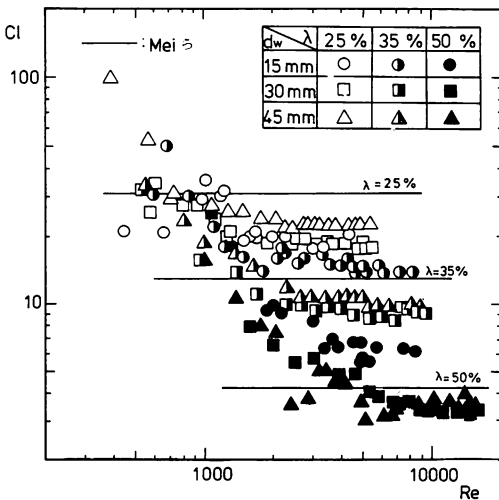


図-1 定常流実験における C_l と Re 数の関係
(標準型)

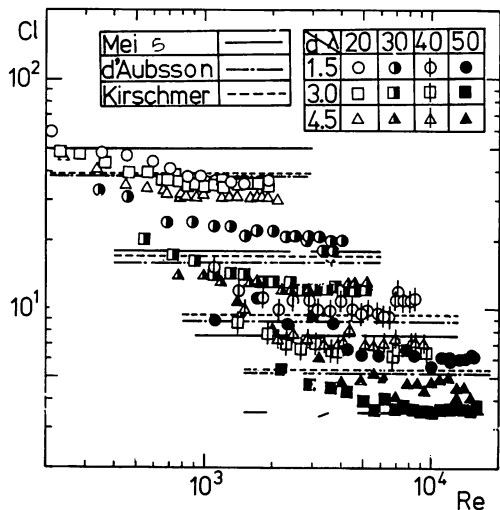


図-2 定常流実験における C_l と Re 数の関係
(角柱列型)

ト壁では d_w/s が小さいほど大きな値をとり、同一の d_w/s においては λ が小さいほど C_l は大きくなり、 λ の影響が d_w/s に比べて非常に大きいことがわかる。これらの傾向は空隙率の小さいスリット壁ほど流れがスリットを通過する際に流速が大きくなり形成される噴流の作用によってエネルギーの損失が大きいことを示している。またスリット幅に対して壁厚が薄いほど透過部を通過し急拡する際に隣接した透過部の急拡と影響をおよぼしあい流れの乱れによってエネルギーの損失を大きくしているのではないと思われる。

ここでは、実測波力より損失水頭係数 C_l を求めたが、谷本²⁾らは縦スリットケーソンにおいて実験を行い反射率の実験値から損失係数 f を求めており、 f の関数形を次式のように表わし、反射率に合うように慣性項の係数と抗力項の未定係数 A を決定している。

$$f = \epsilon^2 (1 - \epsilon) \{ D_{00} + A(1 - \epsilon)^2 \} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 C_{00} は単一角柱の抗力係数 (=2.0)、 ϵ は中心間隔に対するクリアランスの比、 A は未定係数であり実験より $A=39.0$ の値を使用している。また、抗力係数 C_0 を次のようにおいている。

$$C_0 = C_{00} + A(1 - \epsilon)^2 \quad \dots\dots(8)$$

本実験の定常流実験の C_l を C_0 に換算し式(7)、(8)より f を求めると図-3 のようになり、推定式との適合があまりよくないことがわかる。これは、谷本らの実験が遊水室を有するケーソンタイプであり、スリット壁前面水深と遊水室水深が異なるなどの本実験との構造的な相違とともに、損失係数の決定方法の違いなどが考えられ、本実験はさらに反射率および伝達率の面からの検討が必要と

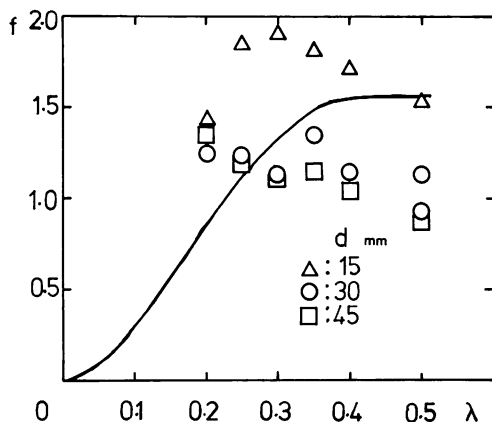


図-3 損失係数 f と λ の関係

考えられる。

2) 見掛けのオリフィス長さ $\mathcal{Z}$

一種の慣性係数である見掛けのオリフィス長さ $\mathcal{Z}$ について Mei ら⁹⁾が薄い透水壁について音響学の理論から紹介している。見掛けのオリフィス長さ $\mathcal{Z}$ と質量係数 C_M の関係は式(2)のようになり、波力から求められた C_M を式(2)より $\mathcal{Z}$ に換算し、Keulegan-Carpenter 数によってまとめたものを図-4 に示す。図に示されるように Keulegan-Carpenter 数が大きくなると $\mathcal{Z}$ は波長 L に比例し、次式のように表わすことができる。

$$\frac{\mathcal{Z}}{L} = \frac{a}{K.C.} + b \quad \dots\dots(9)$$

各スリット壁における a , b の値は図中に示す。同一の壁厚 d_w のスリット壁では、Keulegan-Carpenter 数の大きな範囲で空隙率 λ による変化はなく、ほぼ同じ値をとる。同一の λ においては、 d_w が大きくなるに従い $\mathcal{Z}/L$ は大きな値となる。損失水頭係数 C_l が d_w に対し λ の影響が大きかったのに対し、見掛けのオリフィス長さ $\mathcal{Z}$ は λ の影響はほとんどなく d_w によって変化することがわかる。

見掛けのオリフィス長さ $\mathcal{Z}$ に含まれる質量係数 C_M について波長 L と壁厚 d_w でまとめ、Keulegan-Carpenter 数によって整理すると図-5 のようになる。図は λ の影響を表わしており、同一 d_w において λ が大きくなる C_M の値も大きくなる傾向を示しているが、その影響は非常に小

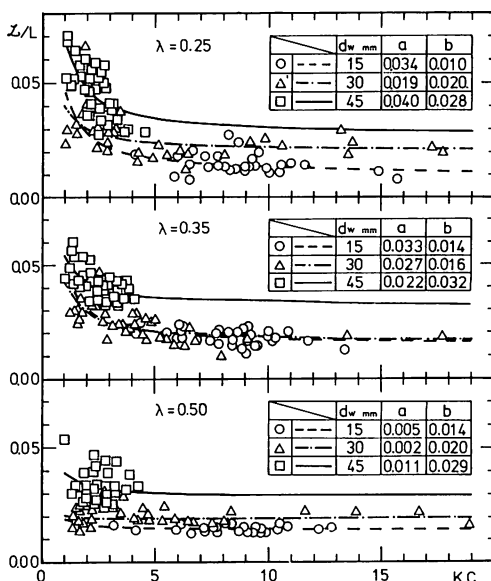
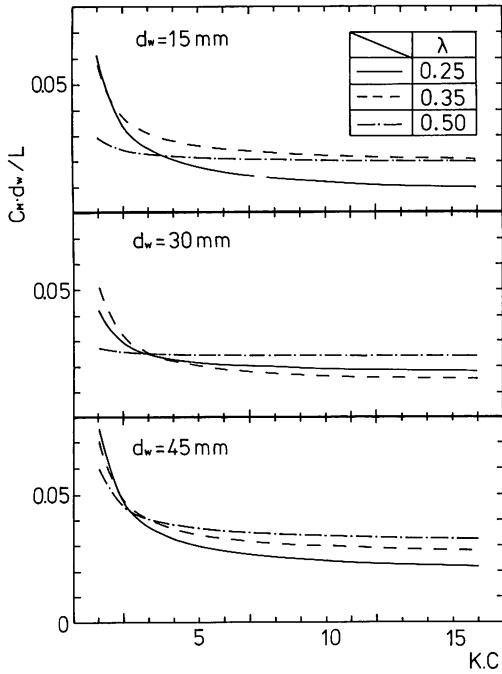
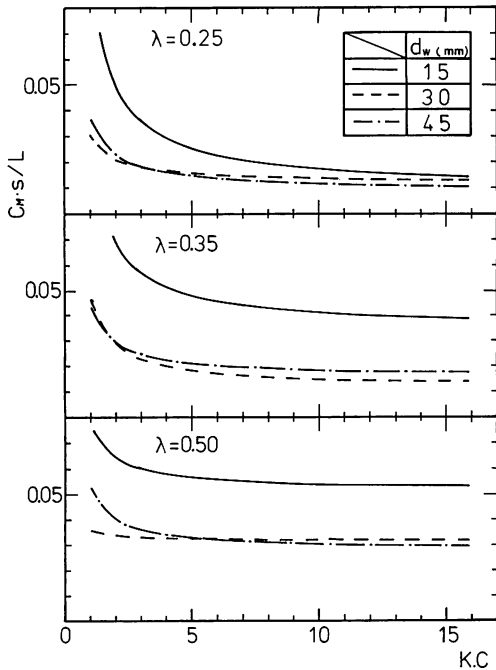


図-4 $\mathcal{Z}/L$ と $K.C.$ 数の関係

図-5 $C_M \cdot d_w/L$ と $K.C$ 数の関係図-6 $C_M \cdot s/L$ と $K.C$ 数の関係

さい。同じように C_M を波長 L とスリット幅 s でまとめると図-6に示すように、 d_w の影響を表わす。図によると同一 λ においては、 d_w が小さくな

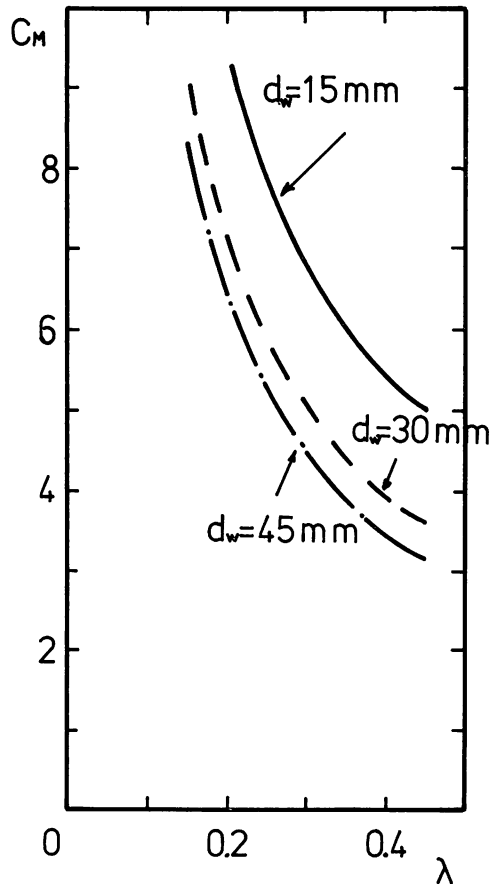
ると C_M は大きくなる。しかし、 C_M は λ が小さい時には d_w による変化はほとんどなく、また d_w が大きくなると各 λ において一定値に近づく傾向を示している。

角野は、¹²⁾ 短形断面無限柱体列の付加質量 λx を Taylor の近似式を応用し次式で求めている。

$$\lambda x = -\rho A + 2\rho D C \quad \dots\dots(10)$$

$$C = \frac{bD}{2(D-d_w)} + \left(\frac{D}{\pi} - \frac{b}{2}\right) - \frac{D}{\pi} \log \frac{4(D-d_w)}{D} + \frac{D(D-d_w)^2}{3\pi D^2} + \frac{281 D(D-d_w)^4}{180 \pi D^4} \quad \dots\dots(11)$$

ここに、 ρ は流体密度、 A は断面積、 D は隣り合う柱体の中心間隔であり、また C は blockage coefficient (閉塞係数) と呼ばれ、柱体列による非定常流の阻害の程度を表わす理論係数である。 d_w と b は柱体列の方向およびそれに直角な方向の矩形断面の辺長を表わし、式(11)はスリット幅が十分に狭いという条件、すなわち $(D-d_w)/D$

図-7 角柱列の C_M と λ の関係

《1の条件で有効である。質量係数 C_M と付加質量 λx の関係は次式で表わされる。

$$C_M = 1 + \lambda x / \rho V \quad \cdots \cdots \cdots (12)$$

ここで、 V は柱体の体積を表わす。式(10)、(11)より本実験に使用した付加質量を求め、上式により C_M に換質し、 λ で表わすと各 d_w において図7のような曲線が得られる。 d_w が小さな値ほど C_M は大きくなり、 d_w が大きくなるに従いある値に近づいており、実験値と同じ傾向を示すが、 λ の効果については一致せずこれは波浪条件による影響が大きいと考えることができる。

4. ま と め

以上の単一の縦スリット壁の実験結果から次のことが言える。

- (1) 損失水頭係数 C_l の乱流域での値は、空隙率 λ および壁厚 d_w とスリット幅 s の比でまとめることができる。
- (2) C_l の値は、 λ によって大きく作用し、 λ が小さいスリット壁ほど C_l は大きくなる。また、 d_w の効果は λ に比べて小さいが、 d_w が小さいほど C_l の値は大きくなる。
- (3) 見掛けのオリフィス長さ z は Keulegan-Carpenter 数の大きい範囲では、波長 L に比例する。 d_w が大きいほど z/L の値は大きくなるが、 λ の効果は小さい。
- (4) z に含まれる質量係数 C_M については、 L でまとめると d_w が小さいほど大きくなり、 λ の効果については z と同じように小さい。

以上のように単一の縦スリット壁については、抗力項は空隙率に、慣性力項は壁厚の影響が大きいことが示されたが、反射率から求めた実験値などと傾向が異なることなどから、 C_l 、 z の両係数を用いて波浪変形の推定理論によって反射率および伝達率を推定し実験値と比較することで本法の適用性を確めていきたい。また、スリット壁の周囲の水粒子速度を実測することにより、その流況についても調べていく所存である。

参 考 文 献

- (1) 近藤俊郎・竹田英章：消波構造物，森北，279p., 1983.
- (2) 谷本勝利・吉本靖俊：スリットケーソンの反射率に及ぼす諸要因の影響，第29回海岸工学講演会論文集，pp.389～393, 1982.
- (3) 近藤俊郎・佐藤隆一：多孔壁の損失係数と見掛けのオリフィス長さの推定，第26回海岸工学講演会論文集，pp.333～337, 1979.
- (4) 近藤俊郎：二重透水壁防波堤の消波理論，第14回自然災害シンポジウム講演会論文集，pp.439～442, 1977.
- (5) Kondō, H. : Analysis of breakwaters having two porous walls, Coastal Structures 79, ASCE, Vol. 11, pp.962～977, 1979.
- (6) Mei, C. C., P. L. F. Liu and A. T. Ippen : Quadratic loss and scattering of long waves, Jr. of Waty., Harbors and Coastal Eng. Div., ASCE, Vol. 100. WW3, pp.217～239, 1974.
- (7) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：スリット壁に作用する波力特性，苫小牧工業高等専門学校紀要第17号，pp.91～98, 1982.
- (8) Sarpkaya, T., Isaacson, M. : Mechanics of Wave Forces on Offshore Structures, Van Nostrand Reinhold, 651p., 1981.
- (9) Subrata K. Chakrabarti : Hydrodynamic coefficients for a vertical tube in an array, Applied Ocean Research, Vol. 3, No.1, pp.2～12, 1981.
- (10) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：縦スリット壁に作用する波力に関する基礎的研究，第30回海岸工学講演会論文集，pp.337～341, 1983.
- (11) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎：定常流におけるスリット壁の抵抗係数，土木学会北海道支部論文報告集 38号，pp.245～248, 1982.
- (12) 角野昇八：平板，円形，矩形断面無限柱体列の付加質量，第38回土木学会年次学術講演会講演概要集II部，pp.247～248, 1983.

(昭和58年12月1日受理)