

II-32 スリット壁形状の波力と消波機能におよぼす効果

苫小牧工業高等専門学校 正会員 浦島 三朗

苫小牧工業高等専門学校 正会員 石塚 耕一

室蘭工業大学 正会員 近藤 一郎

1. まえがき

近年、透水壁を使用した消波構造物についての研究・開発がさかんに行われている。しかし、これらの研究の多くは透水壁を使用したケーソンタイプの物が多く、その基本となる単一の透水壁についての報告は少ない。著者らは、単一のスリット壁について波力実験を行い、波力に孤立構造物に用いられているモリソン式を適用しその特性を調べ、式中のどのような値を使用するかが問題となっている抗力係数および質量係数を実験的に求め、スリット壁のような透水壁にもこれらの係数に適当な値を使用するとモリソン式をある程度適用できることがわかった⁵⁾。また、波動変形理論に使用される損失水頭係数および見かけのオリフィス長さについても抗力係数および質量係数から整理から求め、レイノルズ数やクリーガン・カーペンター数ならびに空隙率、壁厚およびスリット幅で整理することができた⁶⁾。

本研究においては、実験より求めた損失水頭係数⁷⁾および見かけのオリフィス長さを使用して、著者の1人によって提案されている波動変形理論により、単一のスリット壁の反射率および伝達率を計算し、波浪条件による影響やスリット壁の形状効果について調べた。また、波力についても実験より求めた抗力係数や質量係数を使用して、モリソン式により波力を計算し波浪条件による影響や形状効果について検討を加えたものである。なお、水平水粒子速度および水平水粒子加速度にどのような波動理論を用いるかは、重要な検討事項であるが、ここでは部分重複波が対象になるため、波動理論には微小振幅波理論を使用している。

2. 解析方法

反射率および伝達率の計算には、著者の1人によって提案されている波動変形理論⁷⁾を用いて求めた。ここで、波は微小振幅の長波であり、透水壁の厚さは波長に比べて非常に小さく、かつエネルギー損失は透水壁の部分のみで起こると仮定する。

透水壁前後の水深が変化しない、同一水深であれば1枚透水壁の場合の振幅の比は次式のように求まる。

$$\frac{a_r}{a_i} = \frac{A_{0,1}}{2 + A_{0,1}} = \frac{\frac{\sigma}{kh} \left[\frac{C_l}{2g} |u_{1,1}| + i \frac{\sigma L}{g} \right]}{2 + \frac{\sigma}{kh} \left[\frac{C_l}{2g} |u_{1,1}| + i \frac{\sigma L}{g} \right]}$$

$$\frac{a_t}{a_i} = \frac{2}{2 + A_{0,1}} = \frac{2}{2 + \frac{\sigma}{kh} \left[\frac{C_l}{2g} |u_{1,1}| + i \frac{\sigma L}{g} \right]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 a_i は入射波振幅、 a_t は伝達波振幅、 a_r は反射波振幅、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 $k = 2\pi/L$ 、 T は周期、 L は波長、 C_l 損失水頭係数、 L は見かけのオリフィス長さ、 g は重力加速度である。ここにおいて C_l および L にどのような値を使用するかが問題となるが、本研究においては各スリット壁において実験を行い、 C_l はレイノルズ数の関数として、また L/L はクリーガン・カーペンター数の関数として次のような実験式より求めた。

$$C_l = a_1/Re + b_1 \quad , \quad L/L = a_2/KC + b_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Re 数および KC 数に使用する水平水粒子速度は、本研究における損失水頭係数が自乗された水平水粒子速度に関して水深方向の積分によって表わされることを考慮して、水平水粒子速度の自乗平均値を用い、水平水粒子速度、レイノルズ数およびクリーガン・カーペンター数を次式で定義することとした。

$$u_{rms} = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\frac{\int_{-h}^{\eta} u^2 dy}{h+\eta}}, \quad R_e = \frac{u_{rms} \cdot s}{\nu}, \quad K.C = \frac{u_{rms} \cdot T}{dw} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中、 η は表面水位、 s はスリット幅、 ν は動粘性係数、 T は周期である。

また、乱流域において損失水頭係数は一定値に近づくことから、乱流域の損失水頭係数に対し、空隙率 λ 、壁厚 dw およびスリット幅 s の関数として次のような実験式を求めている。

$$C_L = bl = \frac{0.52}{\lambda^{3.0}(dw/s)^{0.46}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

また、 L/L についてもクリーガン・カーペンター数の大きな範囲において一定となり、空隙率が変化しても L/L の値はそれほど変化しなく、ほぼ壁厚に比例することから、クリーガン・カーペンター数の大きな範囲の L/L に対し、次のような近似式を求めた。

$$L/L = b2 = 0.00567 \cdot dw + 0.0033 \quad \dots\dots\dots (5)$$

スリット壁に作用する全波力 $F_T(t)$ は、揚力が働かないものとするモリソンの提案した構造物背後の渦よって生ずる力の抗力 $F_D(t)$ と、圧力勾配よって生ずる力ならびに構造物の存在による構造物周囲の流体が加速されるためによつて生ずる力の慣性力 $F_I(t)$ の線形和として次式で表わされる。

$$F_T(t) = F_D(t) + F_I(t) = C_D \cdot f_D(t) + C_M \cdot f_I(t)$$

$$F_D(t) = C_D \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u|u|}{2} dA$$

$$F_I(t) = C_M \int_{-h}^{\eta} \rho u \, dV \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 dA 、 dV はスリット壁の微小投影面積と微小体積であり、抗力係数 C_D 、質量係数 C_M は時間および水深方向には変化しないものと仮定している。なお、抗力係数と見かけのオリフィス長さおよび抗力係数と損失水頭係数のかんけいは次式のようになる。

$$C_L = (1-\lambda) C_D, \quad L = [1 + (1-\lambda) C_M / \lambda] dw \quad \dots\dots\dots (7)$$

3. 実験装置および実験方法^{5),8)}

実験は波動実験と定常流実験の2種類を行った。波動実験は長さ19.7m、幅0.8m、高さ0.8mのベンジラム式造波装置が設置されている2次元規則波造波水槽を仕切り板により二分し、その片方を使用した。スリット壁は造波機前方11.3mの位置に設置した波力検出装置に取り付け、アクリル材を用いその外寸は幅40cm、高さ60cmでスリットの数6個で各模型とも一定である。模型の種類は、空隙率 λ とスリット幅 s (実際の幅で、角柱列に換算するとこの値よりも小さくなる。)の組合せで25%-22mm、35%-28mm、50%-40mmの3種類、壁厚 dw が15mm、30mm、45mmの3種類で計9種類である。波力検出装置は片持ち梁構造でアーム部にストレインゲージを貼り、各時刻の波力を測定している。入射波高 H_i ならびに反射波高 H_r の決定はヒーラーの方法を用い、移動台に取り付けられた波高計をスリット壁前面に形成される部分重複波の腹と節の位置、各々 $L/2$ 、 $L/4$ で振幅を測定することにより決定し、伝達波高 H_t は進行波と見なせるのでスリット壁後面 $L/4$ に設置した波高計より測定した。

定常流実験は定常流可変開水路の一部を管路状態にし、その中央にスリット壁を設置し前後の水頭差を測定した。使用したスリット壁は波動実験で使用した模型を高さ20cmした9種類と幅40mmの角柱を空隙率とスリット幅の組み合わせが20%-10mm、30%-17mm、40%-27mm、50%-40mmで配置し、壁厚が15mm、30mm、45mmの12種類について実験を行った。

4. 結果および計算

(1) 波浪条件による反射率および伝達率の変化

図-1は $\lambda=0.50$, $dw/h=0.09$, $s/h=0.0667$ の構造条件のもとで $h/L=0.10\sim0.244$ の3種類の周期について波高を変化させたときの反射率および伝達率を示したものであり、破線は式(4)および式(5)によって近似した近似係数を使って計算したものである。各周期の計算値はそれぞれ極値をもつ変化を示している。これは C_1 や β が Re 数および KC 数の関数であり、波高の小さい範囲ではこれら両係数は層流的抵抗特性を示すためと考えられる。 Re 数や KC 数に直接関与しない近似係数を使った計算値は、波高の小さい範囲では実験係数との計算値のちがいがみられるが、波高の大きい領域ではほとんど一致していることが認められる。また実験値は実験範囲が狭くバラツキも大きい単純に比較はできないが、 $h/L=0.244$ の反射率は計算値よりも大きい、その他の実験値は計算値と比較的よく一致し、計算値と同じような傾向を示す。

図-2は図-1と同じ構造条件のもとで、 $Hi/L=0.02\sim0.06$ の3種類の波高について、周期を変化させたときの反射率および伝達率を示す。破線は図-1と同様に近似係数を用いた計算値であるが、 h/L が小さい波については比較的よく一致するが、 h/L が大きくなるに従い多少差が生ずる。 h/L が小さい範囲においては波高

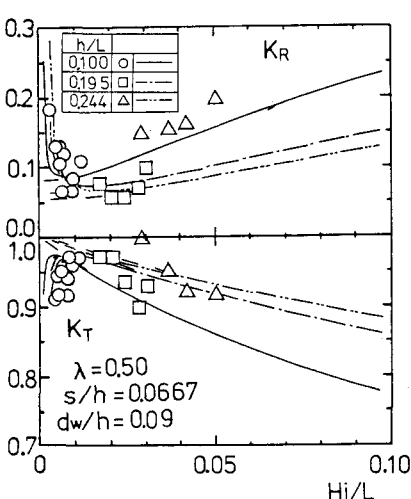


図-1 波高による K_R および K_T の変化

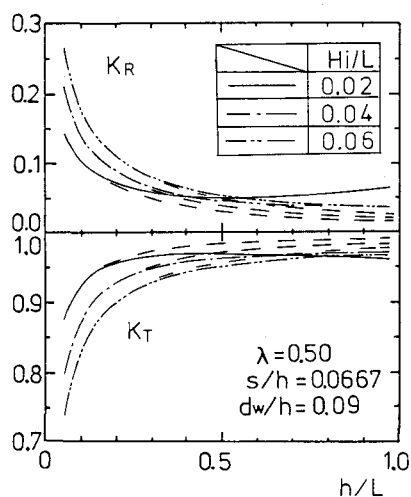


図-2 周期による K_R および K_T の変化

の変化による反射率および伝達率の変化は大きい、 h/L の大きい範囲においては波高による変化の割合は小さくなり、また Hi/L による変化も小さくなる。透水壁を使用したケーソンタイプにおいては遊水室の関係である h/L で極値があらわれるが、単一の透水壁については遊水室の幅が無限大となり $Hi/L=0.02$ において多少その傾向がみられる程度で、 h/L の増大とともに反射率は小さく、伝達

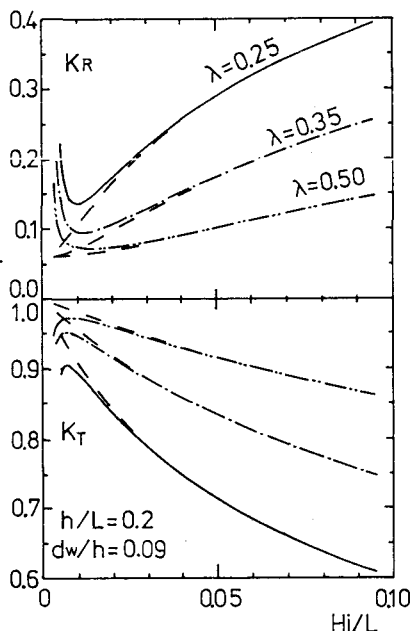


図-3 空隙率の影響

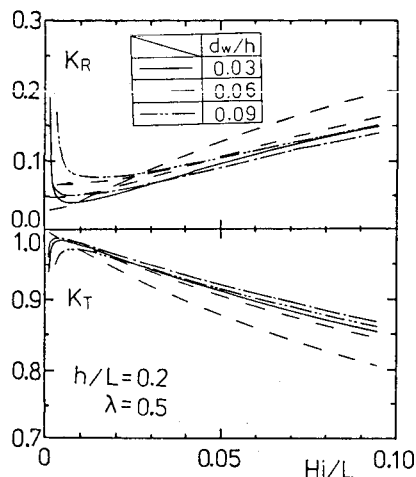


図-4 壁厚の影響

率は大きくなる。

(2) 構造条件による反射率および伝達率の変化

図-3は空隙率 $\lambda=0.25, 0.35, 0.50$, 図-4は $dw/h=0.03, 0.06, 0.09$ の構造条件で横軸に Hi/L をとって表したものである。各空隙率の変化を示す図-3は図-1と同じ傾向を示し、極値を示す Hi/L の値もほぼ $Hi/L=0.01$ 付近で空隙率による変化は認められず、空隙率が小さくなると反射率は大きく伝達率は小さくなる。各壁厚について表している図-4によると、各壁厚において反射率および伝達率はほぼ同じ値を示し、壁厚が薄い構造条件において近似係数による値と実験係数による値は多少異なり、壁厚による変化はあまりみられない。

図-5は波浪条件を一定し、横軸に空隙率をとり近似係数で計算した反射率および伝達率を示したもので、 $\lambda=0.5$ 程度までは空隙率が大きくなるとともに急激な変化を示すが、それ以上空隙率が大きくなっても反射率および伝達率の変化は小さい。図-6は同じように近似係数で計算し、横軸に dw/h をとったものであるが、その

変化の割合は空隙率に比べ非常に小さいが、壁厚が大きくなるに伴って反射率は増加する傾向を示しているが、図-4の実験曲線は壁厚の影響はほとんど見られない。しかし、牛・竹田・尾崎は縦スリットケーソンについて実験を行い、壁厚の増加に伴って反射率が大きくなる結果を得ており、本解析と同じ傾向となる。これは本実験に用いた模型の dw/s が牛らの模型の dw/s と比べて非常に小さいめである。ゆえに、反射率は壁厚のみではなく、それに対するスリット幅にも関係し、スリット幅が小さいほど反射率は大きくなる。

図-7はある波浪条件において空隙率を決定したときの、反射率を最小とする dw/h およびそのときの反射率および伝達率を表し

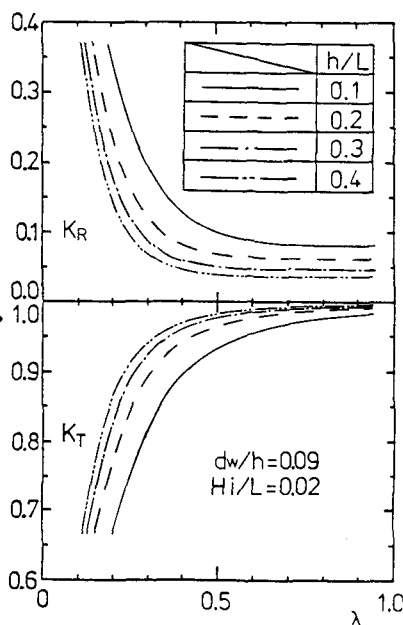


図-5 空隙率による K_R および K_T の変化

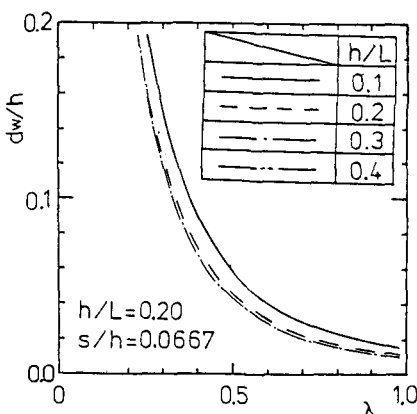


図-7 極小を与える壁厚と空隙率

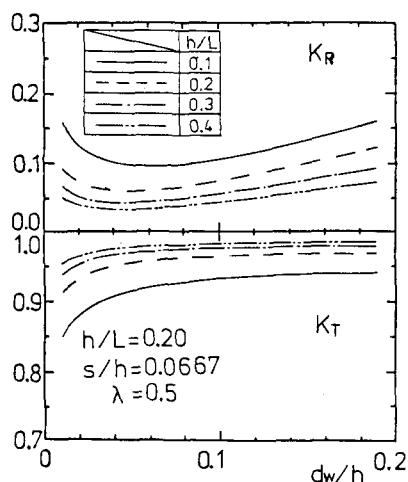
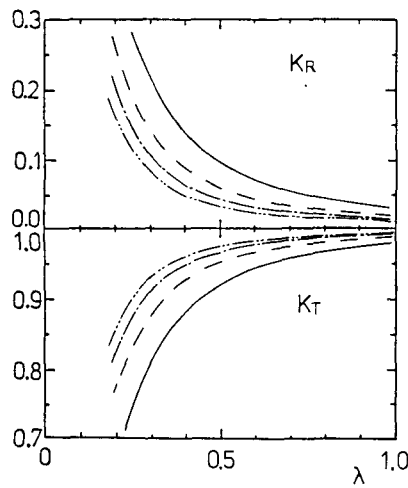


図-6 壁厚による K_R および K_T の変化



たもので、 h/L による変化はほとんどなく空隙率と dw/h はほぼ一対一に対応しているが、反射率および伝達率は h/L によって図-1と同じように変化する。しかし、ある波浪条件に対する実際の構造諸元の決定においては、施工性や経済性が考慮され、特に壁厚については最適な値を自由に選定できないが、1つの目安となるものと思われる。

(3) 波浪条件による波力の変化

実験式(2)を使用し式(6)より波力を求める場合、反射率を事前に知られていなければならない。ここでは式(1)によって反射率を計算して求めた。また波力を実質単位体積当りの波力という考え方から、波力を次式のように無次元化した。

$f = F_{max} / [\rho g (1 - \lambda) B H d w] \dots\dots\dots (8)$
 ここで、 ρ は水の密度、 B はスリット壁の幅、 F_{max} は一周期内における最大の全波力を表わす。

図-8および図-9は前出の図-1および図-2と同様な条件のもとで、縦軸に f をとって表したものである。図-1にみられた H_i/L の小さい領域での反射率および伝達率の極値は波力については特にみられない。また近似係数を用いた値はほと

んど一致している。 h/L の効果は図-9にみられるように、 h/L の小さい領域では h/L が大きくなるにしたがい f は急激な減少を示すが、その後は非常に小さな値となり、長周期の波が f に大きく影響することがわかる。

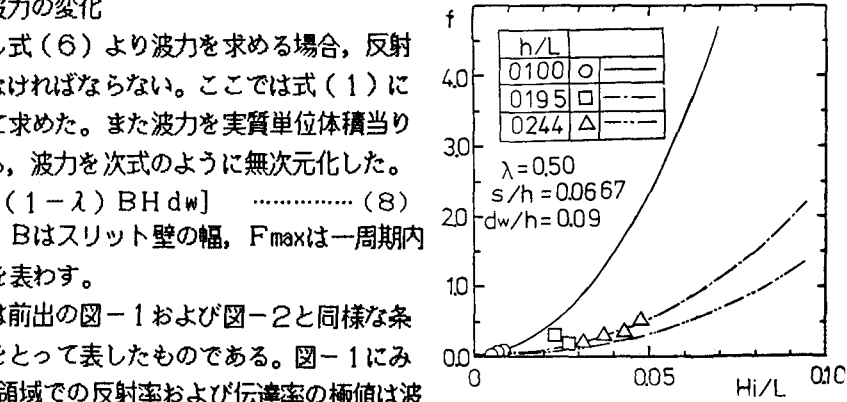


図-8 波高による波力の変化

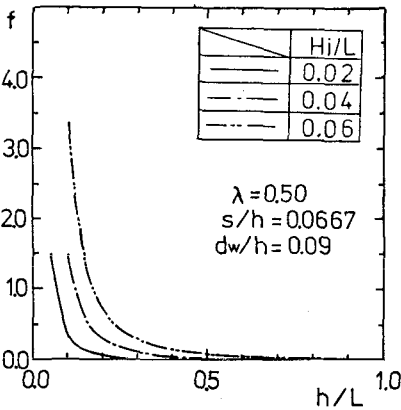


図-9 周期による波力の変化

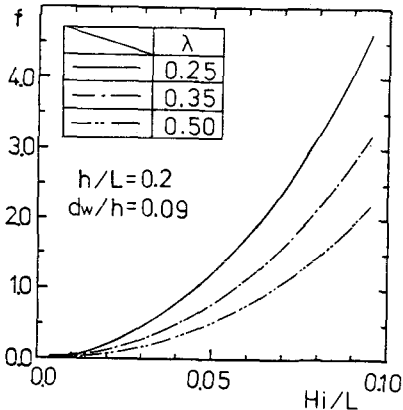


図-10 空隙率の影響

(4) 構造条件による波力の変化

図-10および図-11は前出の図-3および図-4と同様に横軸に H_i/L をとり、各空隙率 λ および dw/h の計算値を示したものであり、図-11に示されるように近似係数を用いると実験係数の値よりも f は大きくなる。図-12および図-13は横軸に空隙率および dw/h をとり、近

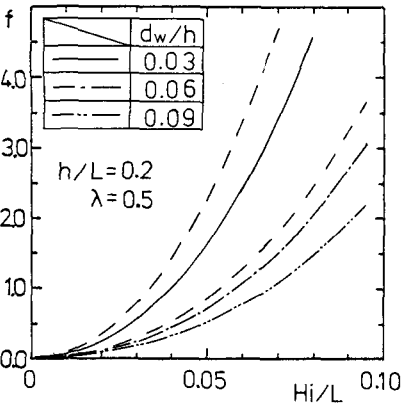


図-11 壁厚の影響

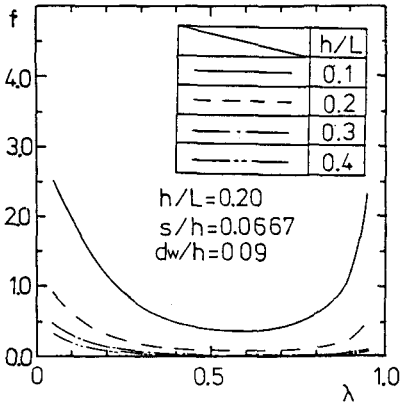


図-12 空隙率による波力の変化化

似係数により計算したものである。図-12に示されるように、ある空隙率において f は極小値をとることがわかる。また dw/h は、図-13にみられるように dw/h の小さい領域では f は大きく、 dw/h が大きくなるにしたがい減少する。図-14は波浪条件および dw/h を決定したときに f を最小とする空隙率、またそのときの f の大きさを示したものである。これより、最も波力が小さくなる空隙率はほぼ $\lambda=0.4\sim0.7$ 程度である。

5. まとめ

波力および消波機能におよぼす影響は、波浪条件においては H/L の影響が大、 H/L が大きくなるとともに波力は大きくなり、 H/L の小さな領域で反射率および伝達率は極値をもつ。 h/L においても h/L が小さい範囲では波力反射率および伝達率とも急激な変化をするが、本計算範囲ではおよそ $h/L=0.2$ 以上においては大きな変化は示さない。

構造条件においては、反射率および伝達率は空隙率の効果が非常に大きい、 $\lambda=0.5$ 付近以上ではほとんど変化はない。 dw/h については、壁厚の効果はそれほど大きくはない。波力についても同じことがいえるが、壁厚については dw/h が大きくなるにしたがい f は小さくなるが、 f は dw の関数となっていることに注意する必要がある。

単一のスリット壁として使用する場合の最適な形状についての明確な値はでないが、波力は $\lambda=0.4\sim0.7$ 程度で極小をとるが、その極小点前後の変化が小さいことを考えると、空隙率 $\lambda=0.2\sim0.5$ 付近において無次元波力 f 、反射率および伝達率の変化点が存在することから、この付近が適当な空隙率と考えることができる。

参考文献

- 1) 近藤俊郎・竹田英章: 消波構造物, 森北出版, 279 p., 1983.
- 2) 近藤俊郎・佐藤隆一: 多孔壁の損失係数と見か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.
- 3) 谷本勝利・吉本靖俊: 直立消波ケーソンの反射率に関する理論及び実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第21巻 第3号, pp. 43~77, 1982.
- 4) 牛 恩宗・竹田英章・尾崎 晃: 透過波の位相, 反射率, 波圧力に及ぼすスリット部材の厚さの影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第39号, pp. 95~100, 1983.
- 5) 浦島三朗・石塚耕一・近藤俊郎: スリット壁の波力に関する抗力係数と質量係数, 第36回土木学会年次学術講演会講演概要集, pp. 793~794, 1981.
- 6) 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.
- 7) 近藤俊郎: 二重透水壁式防波堤の消波理論, 第14回自然災害シンポジウム講演回論文集, pp. 39~42, 1977.
- 8) 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, 第38号, pp. 245~248, 1982.

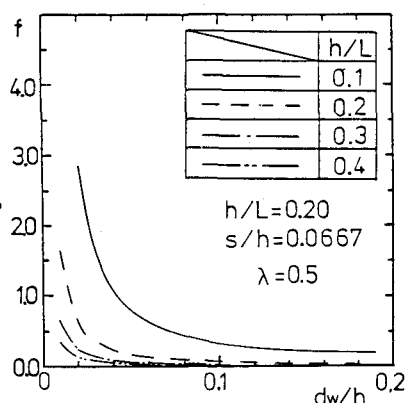


図-13 壁厚による波力の変化

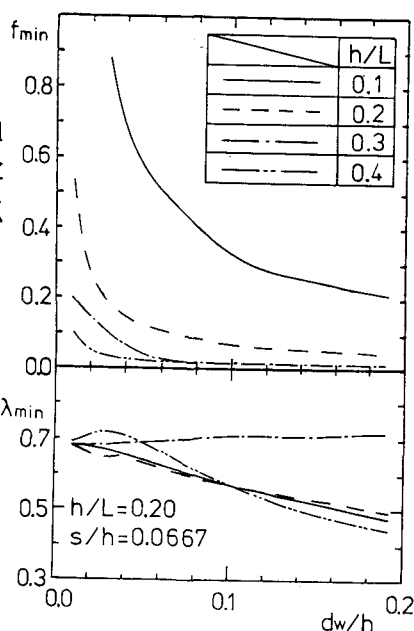


図-14 極小を与える壁厚と空隙率