

隅角部を有する防波堤前面および沖合の波高分布

角野昇八*・樋田操**・久保直***
小田一紀****・永井荘七郎*****

1. 緒 言

波の入射方向に対して開角度が 180° 以下の隅角部を有する防波堤沖合では、入射波と反射波との干渉により、一般に直線状防波堤に比べて波高が増大し、また隅角部付近の堤体に働く波力も大きくなることが知られている。このような、防波堤による波の散乱あるいは回折の問題を取り扱った研究としては、光の回折に対する Sommerfeld の解を導入した Penny と Price¹⁾の半無限直線防波堤による回折波の研究があり、またその解を重ね合わせることによって得られる開口防波堤や島堤の回折波の近似解²⁾を与えた研究がある。また、これらとは別に合田ら³⁾は島堤の場合の厳密解を、三井ら⁴⁾は隅角部を有する半無限長防波堤の場合の厳密解を求めており、さらに井島ら⁵⁾は、任意平面形状の堤体の場合について解析を行なっている。一方、Barailler と Gaillard⁶⁾は、井島らと同様の手法を用いて港内の回折波の問題を取り扱った。小舟ら⁷⁾は、上記の三井、井島ならびに Barailler らの方法を用いて、凹状の隅角部を有する防波堤前面の波高分布を解析し、それらの結果が実験値とよく一致することを確かめた。しかし小舟らの解析においては、その防波堤の堤長が数波長程度であって短く、また解析は堤沿いの波高分布に限られ、防波堤沖合の波高分布についてはなされていない。

本研究は、凹状の隅角部を有し、法線長が 1450 m の防波堤の前面と沖合の波高分布の特性を、防波堤壁面において波が完全反射（直立壁の場合）する場合および部分反射（スリット型防波堤の場合）する場合について、Barailler と Gaillard の解法による数値解析および 3 次元実験により考察しようとするものである。

2. Barailler と Gaillard による解法⁷⁾

図-1 に示すように、一様水深 h の海域にあって、隅角部を有し、鉛直壁面よりなる防波堤 AOB を考える。

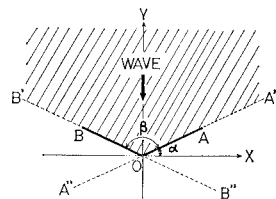


図-1 Barailler と Gaillard による解法

入射波として微小振幅波を考えれば、ラプラスの方程式の解であり、自由表面と水底での境界条件および radiation condition を満足する速度ポテンシャルは次式で表わされる。

$$\phi(x, y, z; t) = \frac{g\zeta_0}{\sigma} \{f_0(x, y) + f_1(x, y)\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} e^{-i\sigma t} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 ζ_0 : 入射波の振幅、 k : 波数 ($2\pi/L$)、 L : 入射波の波長、 σ : 角振動数 ($2\pi/T$)、 T : 入射波の周期、 g : 重力の加速度。

式 (1) において、 $f_0(x, y)$ および $f_1(x, y)$ はそれぞれ入射波および散乱波に相当する x, y の関数である。

式 (1) に表わされる $\phi(x, y, z; t)$ をラプラスの方程式に代入すれば明らかのように、 $f_1(x, y)$ は次のヘルムホルツの方程式を満足しなくてはならない。

$$\frac{\partial^2 f_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f_1}{\partial y^2} + k^2 f_1 = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

いま、図-1 の防波堤 AOB を、O—A 間以外は反射率が 0 の壁面を有する無限長直線防波堤 A'A'' と、O—B 間以外は反射率が 0 の壁面を有する無限長直線防波堤 B'B'' とが O 点で交差しているものとする。このとき、防波堤 AOB の前面の散乱波を表わす $f_1(x, y)$ は、防波堤 A'A'' による散乱波 $f_{1A}(x, y)$ (O—A 間以外は反射率が 0 であるから防波堤 OA による散乱波に等しい) と防波堤 B'B'' による散乱波 $f_{1B}(x, y)$ (同じく防波堤 OB による散乱波に等しい) との和によって

$$f_1(x, y) = f_{1A}(x, y) + f_{1B}(x, y) \quad \dots\dots\dots (3)$$

と表わされるものと考えられる。ただし、この際の隅角部の開角度 β は、 $\pi > \beta > 0$ でなければならない。

* 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部土木工学科
** 学生員 工修 大阪市立大学大学院 工学研究科
*** 正会員 大阪市立大学講師 工学部土木工学科
**** 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科
***** 正会員 工博 大阪市立大学名誉教授

式(3)の $f_{1A}(x, y)$ は図-1のA'A''を境界とする半無限海域において、式(2)のヘルムホルツの方程式を満足する関数であるから、次式のように表わされる。

$$f_{1A}(x, y) = -\frac{i}{2} \int_{OA} H_0^{(1)}(kr_A) \frac{\partial f_{1A}(\xi_A, \eta_A)}{\partial \nu_A} dS \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、ここに $H_0^{(1)}(kr_A)$: 0次の第1種ハンケル関数、 r_A : (ξ_A, η_A) と (x, y) との間の距離、 (ξ_A, η_A) : OA上の点の座標、 ν_A : OAにおける海域に向かう法線方向。

式(3)の $f_{1B}(x, y)$ も $f_{1A}(x, y)$ と同様な形で表わされる。また防波堤の境界上では、防波堤のOA部分の反射率を K_{RA} とすれば、入射波およびOB部分からの散乱波の ν_A 方向の流速成分の K_{RA} 倍がOA上での散乱波の流速成分に等しいと考えることができ、したがって

$$\frac{\partial f_{1A}(\xi_A, \eta_A)}{\partial \nu_A} = -K_{RA} \left\{ \frac{\partial f_0(\xi_A, \eta_A)}{\partial \nu_A} + \frac{\partial f_{1B}(\xi_A, \eta_A)}{\partial \nu_A} \right\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

防波堤OB部分についても、その反射率を K_{RB} として、式(5)と同様の式が得られ、結局、

式(4)の $f_{1A}(x, y)$ を求めることができる。波高比同様に求められた $f_{1B}(x, y)$ とともに式(3)の $f_i(x, y)$ は定まり、防波堤前面海域の速度ポテンシャルは確定することになる。また防波堤前面の波高分布(波高比)は次式によって算定される。

$$K_D = [f_0(x, y) + f_i(x, y)] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに述べた方法では、防波堤背後へ回折する波の影響を無視しており、防波堤前面のみが計算対象領域となっている。したがって防波堤壁面の全周囲を計算対象領域とする井島らの方法に対して近似的方法といえる。

なお、上記の方法の具体的な計算方法については参考文献7)に詳しい。

3. 数値計算および実験

ここで研究の対象とした防波堤は、図-2に示すようにA法線が760m、B法線が690mと計1450mあり、設置水深は $h=12.0$ mとした。入射波の周期は $T=5.0$ secおよび $T=7.0$ secとし、入射波の方向は図-2において $\alpha=25^\circ$ (防波堤隅角部の開角度を2等分する角度で入射する場合)および $\alpha=50^\circ$ (A法線に斜め入射し、B法線に直角に入射する場合)に変化させた。また、防波堤の壁面は完全反射(実験では直立壁)および部分反射(実験ではスリット型防波堤^{9),10)}の場合について検討した。

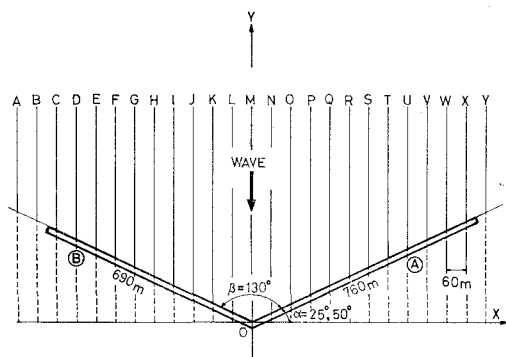


図-2 波高比の計算

り、設置水深は $h=12.0$ mとした。入射波の周期は $T=5.0$ secおよび $T=7.0$ secとし、入射波の方向は図-2において $\alpha=25^\circ$ (防波堤隅角部の開角度を2等分する角度で入射する場合)および $\alpha=50^\circ$ (A法線に斜め入射し、B法線に直角に入射する場合)に変化させた。また、防波堤の壁面は完全反射(実験では直立壁)および部分反射(実験ではスリット型防波堤^{9),10)}の場合について検討した。

数値計算においては、計算の便宜上、法線長をA法線は749m、B法線は686mとした。波高比 K_D の計算は、図-2に示すA~Yの各測線上において3mごとの地点において行うとともに、防波堤壁面周囲上でも計算した。

三次元模型実験は当研究室の河海工学実験場において、縮尺1/60の模型を製作して行なった。実験におけるスリット型防波堤の消波対象周期は $T=5.0$ sec(消波室幅 $l=5.5$ m)である。水深および入射波の周期の条件は計算における条件と同様であり、入射波高は $T=5.0$ secの場合、 $H=1.1$ m~ 2.2 mに、また $T=7.0$ secの場合には、 $H=2.0$ m~ 4.2 mに変化させた。

堤体による波の散乱問題の理論解析においては、 K_D の値は入射波の波高には無関係であり、また実験においても K_D の値と入射波高との間には、ほとんどの場合、特定の相関関係はみられないため、実験値はその入射波高によるバラツキの範囲を単に(工)記号で示した。また、一般に K_D の計算結果は、各測線上において空間的に極大および極小の増減を繰り返すが、極大値のみを測定した実験値との比較を容易にするためと、複雑さを避けるため、計算による K_D の極大となる地点の値のみを(ロ)記号で示した。

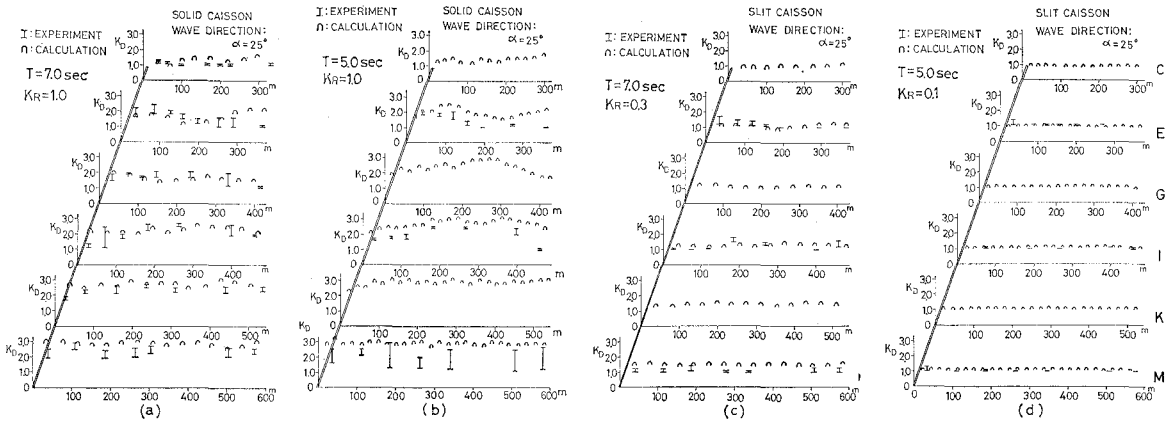
4. 実験値と計算値との比較

(1) $\alpha=25^\circ$ の場合

a) 完全反射(直立壁)の場合

図-3(a)は、防波堤断面を直立壁とし、すなわち、計算における壁面の反射率を $K_R=1.0$ とし、 $T=7.0$ secの周期の波が、防波堤隅角部の開角度を2等分する角度で入射する場合の波高比 K_D の極大値(K_{DP})の計算値を実験値とともに示したものである。また、図-3(b)は同様に $T=5.0$ secの周期の波の場合の結果を示す。 $\alpha=25^\circ$ の場合の実験および計算の結果は測線Mに関してほぼ対称であるため、図-3(a)および(b)においては、B法線の沖合の結果のみについて示した。なお、測線名は、図中の右端に示した。

図-3(a)および(b)より、 $T=7.0$ secおよび 5.0 secの双方の周期の場合に、 K_{DP} の計算値およびその現われる地点は全体的にほぼ実験値と合致している。また、 K_{DP} の計算値は実験値と同様に測線M上におい

図-3 波高比の極大値 K_{DP} ($\alpha=25^\circ$)

で最大となり、 $K_{DP} \div 3.0$ となる。ただし、実験値においてはこの測線上における K_{DP} の値の変動幅が大きくなっており（特に $T=5.0$ sec の場合に著しい）、その下限値は計算値と一致していない。これは、実験値の下限の値をとる場合は、一般に波形勾配が大きい場合 ($H/L \div 0.05 \sim 0.07$) に出現することから、実験において波形勾配が大きい場合には、防波堤の両側部分からの波が側線 M 上において強く干渉しあって、合成波高が極大となる位置が測定中に変化したり、あるいは一部が砕け波となるためと考えられる。なお、測線 M 上の K_{DP} の計算については、図-3 (a) および (b) に示した計算範囲（沖合 600 m）よりもさらに沖合まで計算を行なった結果、測線 M 上の $K_{DP} \div 3.0$ の値は $T=7.0$ sec および 5.0 sec の双方の場合に沖合約 700 m まで現われた。さらに沖合に向って K_{DP} の値は、徐々に減少し、 $T=7.0$ sec の場合には沖合約 1200 m 付近で、 $T=5.0$ sec の場合には沖合約 1000 m 付近で $K_{DP} \div 1.3$ になった。

図-4 (a) は、周期が $T=7.0$ sec および 5.0 sec の場合の防波堤の壁面に沿った K_{DP} の計算値の分布を示したものである。同図の右側は図-2における A 法線上の、また左側は B 法線上の結果を示す。この図より明らかなように、 $T=7.0$ sec および 5.0 sec の場合、ともに防波堤の全延長にわたってほぼ $K_{DP} \div 2.4 \sim 2.5$ であり、測線上 M における $K_{DP} \div 3.0$ より小さい。

b) 部分反射（スリット型防波堤）の場合

スリット型防波堤に波がその法線方向に直角に入射する場合の反射率の特性については既に明らかにした^{8),9)}。しかしながら、波が壁面に対して斜めに入射する場合のスリット型防波堤の反射率特性はまだ明らかにされていない。それゆえ、本研究においては防波堤壁面の反射率を $K_R=0.1 \sim 0.8$ に変化させて波高比 K_D の計算を行い、その計算の結果が実験結果と最もよく合致する場合をスリット型防波堤の場合の計算結果として採用した。

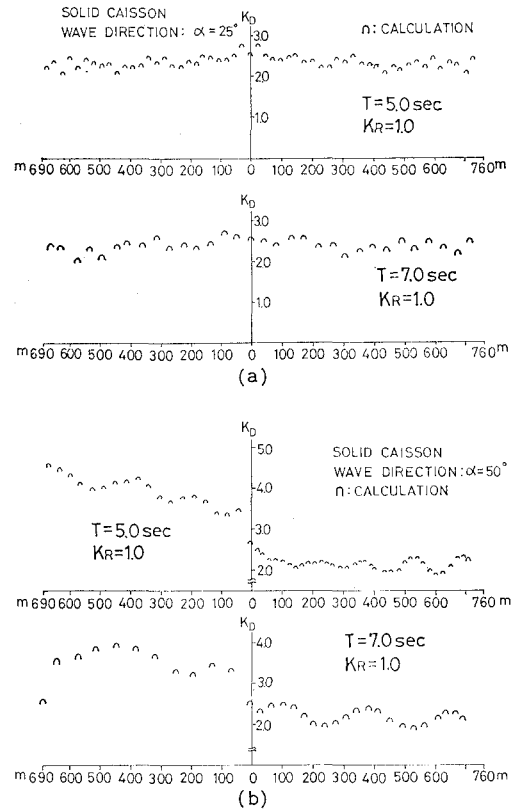


図-4 壁面における波高比の極大値（直立壁）

図-3 (c) は、 $T=7.0$ sec の周期の場合に、壁面の反射率を $K_R=0.3$ とした場合の K_{DP} の計算および実験の結果を示す。また、図-3 (d) は $T=5.0$ sec の周期の場合に、 $K_R=0.1$ とした場合の K_{DP} の計算および実験の結果を示す。図-3 (c) および (d) より明らかなように、スリット型防波堤の斜め入射の場合の反射率を $T=7.0$ sec の場合には、直角入射の場合の $K_R=0.4$ に対して $K_R=0.3$ に、また $T=5.0$ sec の場合には、直

角入射の場合の $K_R=0.25$ に対して $K_R=0.1$ とすれば, K_{DP} の計算値およびその現われる地点は実験値とほぼ合致することがわかる. このことから, 結果的に斜め入射の場合のスリット型防波堤の反射率は, 直角に入射する場合の反射率よりも小さいと考えられる. また図—3 (c) および (d) より明らかなように, スリット型防波堤の場合には, 全測線上にわたって $T=7.0$ sec の場合に $K_{DP}=1.0\sim 1.7$ に, また, $T=5.0$ sec の場合に $K_{DP}=1.1\sim 1.2$ になり, 直立壁の場合に比べて波高比の極大値は $1/2$ 以下に減少する.

スリット型防波堤の場合の防波堤の壁面に沿った K_{DP} の計算値は全壁面に沿って $T=7.0$ sec の場合には $K_{DP}\div 1.4$ に, また, $T=5.0$ sec の場合には $K_{DP}\div 1.2$ になり, この場合にも直立壁の断面の場合に比べて $1/2$ 程度の値となる.

(2) $\alpha=50^\circ$ の場合

a) 完全反射 (直立壁) の場合

図—5 (a) および (b) は, 防波堤の断面が直立壁の場合に, $T=7.0$ sec および 5.0 sec の周期の波が A 法線に対しては斜めに入射し, B 法線に対しては直角に入射する場合の計算結果を実験値とともに示したものである. なお, 図—5 (a) および (b) においては, 紙面の関係で, B 法線の沖合の結果のみについて示した. なお, 測線名は図中の右端に示した.

これらの図より, $T=7.0$ sec の周期の場合には, K_{DP} の計算値およびその現われる地点は全体的にほぼ実験値と合致していることがわかる. また, その最大値は $K_{DP}\div 3.0\sim 3.4$ であり, B 法線の沖合に現われる. これに対して $T=5.0$ sec の場合には, B 法線の沖合の結果は, 計算値の方が実験値よりも大きい (最大値 $K_{DP}\div 3.0\sim 3.7$) 場合が見受けられ, また, その現われる地点も実験における地点と若干ずれている. この理由は, これらの図の K_{DP} の計算値の場所的分布をみれば明かな

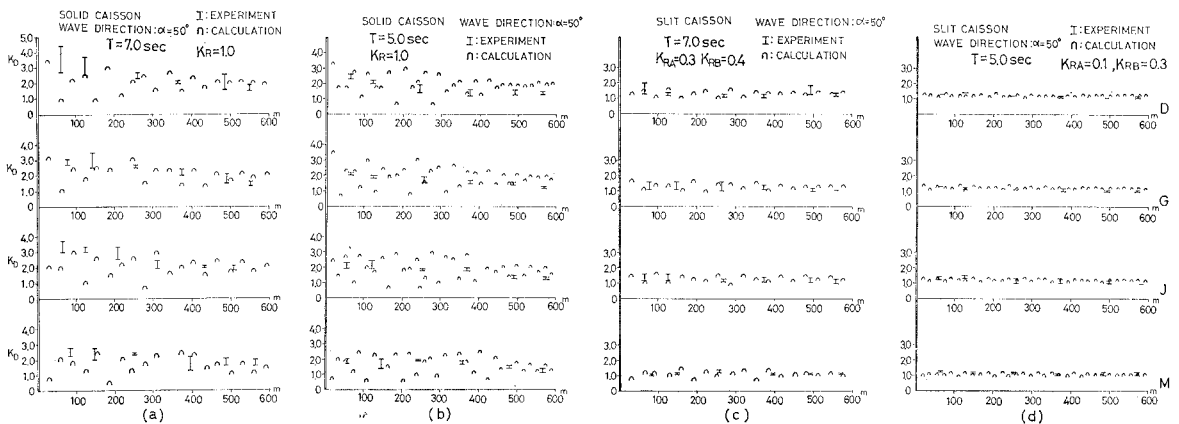
うに, $\alpha=50^\circ$ の場合には防波堤の両側部分からの波が複雑に干渉しあって極大点の場所的分布が不規則となり, かつ隣り合う極大値どうしの値の変化も激しくなる. しかも, $T=5.0$ sec の場合にはこれらの極大点間の間隔が狭いので, 実験においては極大点を十分にとらえきれなかったためと思われる.

図—4 (b) は, 防波堤壁面に沿う K_{DP} の, 直立壁の場合における計算値の分布を示す. この図より, A 法線においては, $K_{DP}\div 2.0\sim 2.5$ の波高比が現われるのに対し, B 法線においては, ほぼ $K_{DP}\div 4.0\sim 4.6$ 程度の大きな波高比が存在することがわかる.

b) 部分反射 (スリット型防波堤) の場合

既述のように, 波が防波堤の法線方向に対して斜めに入射する場合のスリット型防波堤の反射率は, 直角に入射する場合の反射率より小さく, $T=7.0$ sec の場合には $K_R=0.3$ に, また, $T=5.0$ sec の場合には $K_R=0.1$ とすれば K_{DP} の計算結果は実験結果と良く一致する. したがって, 波が防波堤の B 法線に対して直角に, また, A 法線に対して斜めに入射する $\alpha=50^\circ$ の場合には, $T=7.0$ sec の場合における B 法線の反射率を直角入射の場合の $K_{RB}=0.4$ に, また, A 法線に対しては $K_{RA}=0.3$ として計算を行なった. 同様に $T=5.0$ sec の場合には, $K_{RB}=0.3$ (B 法線) および $K_{RA}=0.1$ (A 法線) として計算を行なった.

図—5 (c) はスリット型防波堤において, $T=7.0$ sec の周期の波の場合の K_{DP} の計算値および実験値の結果を示す. また, 図—5 (d) は $T=5.0$ sec の場合の結果を示す. これらの図より明らかなように, 防波堤の A および B 法線の反射率を上記のようにして計算すれば, 計算値と実験値は全体的にほぼ合致し, K_{DP} の値は直立壁の断面の場合に比べて著しく小さくなる. すなわち, $T=7.0$ sec の場合には全測線上にわたってほぼ $K_{DP}=1.3$ (最大値は $K_{DP}=1.8$) であり, また, $T=$



図—5 波高比の極大値 K_{DP} ($\alpha=50^\circ$)

5.0 sec の場合にはさらに小さく, $K_{DP}=1.2\sim 1.3$ (B 法線の沖合) および $K_{DP}=1.1$ (A 法線の沖合) となる。また, スリット型防波堤の断面の場合には, 各測線上における K_{DP} の値の空間的变化は緩やかで, また, その場所的な現われ方も規則的となることもわかる。

防波堤壁面に沿う K_{DP} の計算値は, スリット型防波堤の場合にも防波堤の B 法線上の K_{DP} の値は大きく, A 法線上では, $K_{DP}=1.3$ ($T=7.0$ sec) あるいは $K_{DP}=1.1$ ($T=5.0$ sec) 程度であるのに対し, B 法線上においては $K_{DP}=1.7$ ($T=7.0$ sec) あるいは $K_{DP}=1.4$ ($T=5.0$ sec) 程度となる。しかしながら, これらの値も直立壁の場合に比べると著しく小さく, また, その値は防波堤の全延長にわたってほぼ一定である。

5. 結 論

隅角部を有する有限長防波堤前面および沖合の波高分布を, 防波堤壁面が直立壁の場合およびスリット壁の場合について, Barailler と Gaillard の解法による数値解析および3次元の模型実験により考察した結果, 以下のことが明らかとなった。

(1) 数値解析の結果は, 直立壁およびスリット壁の双方の場合に対して実験結果と比較的よく一致し, スリット壁の前面および沖合の波高比の極大値は, 直立壁の場合に比べて著しく小さくなる。

(2) 波が防波堤の法線方向に対して斜めに入射 (入射角は 25° および 50°) する場合のスリット型防波堤の反射率は, 直角に入射する場合の反射率よりは小さく, $T=7.0$ sec の場合には $K_R=0.3$ (直角入射の場合 K_R

$\div 0.4$) に, また $T=5.0$ sec の場合には $K_R=0.1$ (同じく $K_R=0.25$) にすれば, 波高比の極大値の計算結果は実験値とよく一致する。

参 考 文 献

- 1) Penny, W. G. and A. T. Price: The diffraction theory of sea waves and the shelter afforded by breakwater, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A, Vol. 244, 1952.
- 2) 例えば, Putnam, R. C. and R. S. Arthur: Diffraction of water waves by breakwaters, Trans. AGU, Vol. 29, No. 4, pp. 481-490, 1948.
- 3) 合田良実・吉村知司・伊藤正彦: 島堤による波の反射および回折に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第10巻第2号, pp. 1-52, 1971.
- 4) 三井 宏・村上仁士: 海岸構造物不連続部の波高分布について (第2報)—隅角部付近の波高分布一, 第14回海講演集, pp. 53-59, 1967.
- 5) 井島武士・周 宗仁・湯村やす・田淵幹彦: 任意形状の透過および不透過防波堤による波の散乱と波力, 第20回海講演集, pp. 79-87, 1973.
- 6) Barailler, L. and P. Gaillard: Evolution récente des modèles mathématiques d'agitation due a la houle: Calcul de la diffraction en profondeur non uniform, La, Hauille Blance, No. 8, pp. 861-869, 1967.
- 7) 小舟浩治・大里睦男: 防波堤隅角部付近の波高分布に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第15巻第2号, pp. 55-88, 1976.
- 8) 永井莊七郎・角野昇八: スリット型防波堤に関する研究, 第23回海講演集, pp. 100-105, 1976.
- 9) Nagai, S. and S. Kakuno: A slit-type breakwater, Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng., Honolulu, 1976.