

現場向きの防波堤付近の波高分布推算法

三井 宏*・筒井 茂明**・亀川 和正***

1. 序 言

半無限防波堤付近の波を示す Sommerfeld の解¹⁾には Fresnel 関数が含まれているので、回折・散乱波の性質を明確には握ることができず、また、関数表なしでは回折係数 K を求めることは困難である。Putnum および Arthur²⁾はこの厳密解の右辺第2項を無視した近似解法を提案しているが、第1項に Fresnel 関数が含まれているので、同様の不便が残ることになる。以下に提案する近似解法は回折・散乱問題の解法によく用いられる発生源からの距離が大きい場合の漸近展開式(鞍点法によることが多い)の第1次項によるもので、含まれる関数としては三角関数と平方根のみである。この近似解に基づいて、数値計算がさらに簡単になり計画・設計に適すると思われる極大波高分布曲線を提案し、両翼が同一直線上にない平行防波堤に具体的に应用する。その結果から見出された開口部形状に起因する2, 3の問題点を指摘する。

2. 近似計算法とその適用範囲

(1) 近 似 式

一様水深の海域に設置された半無限防波堤において、図-1に示す座標を用いると、振幅1, 入射角 α の入射

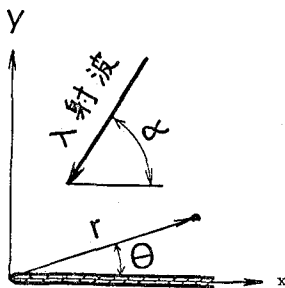


図-1 座 標

波, すなわち $\exp\{ikr \cos(\theta - \alpha)\}$ に対する周辺海域の波の近似定常解 f は, 省略した時間因子を $\exp(i2\pi t/T)$ とすれば, 反射, 入射, 回折の各領域において, それぞれ次のように求まる³⁾。ここに, $i = \sqrt{-1}$, $k = 2\pi/L$,

L はその水深における進行波の波長, T は波の周期, t は時間である。

以下の式において, $\alpha \neq 0$ の場合

$$g_1 \equiv \exp\{ikr \cos(\theta - \alpha)\},$$

$$g_2 \equiv \exp\{ikr \cos(\theta + \alpha)\},$$

$$x_1 \equiv -\exp\left\{-i\left(kr + \frac{\pi}{4}\right)\right\} \left/ \left\{2\sqrt{2\pi kr} \cos \frac{1}{2} \times (\theta - \alpha)\right\}\right.,$$

$$x_2 \equiv -\exp\left\{-i\left(kr + \frac{\pi}{4}\right)\right\} \left/ \left\{2\sqrt{2\pi kr} \cos \frac{1}{2} \times (\theta + \alpha)\right\}\right.$$

であり, $\alpha = 0$ の場合には式(3), (4), (5)において $x_2 = 0$ である。

反射領域 ($0 \leq \theta < \pi - \alpha$):

$$f = g_1 + g_2 + x_1 + x_2 \quad \dots\dots\dots (1)$$

反射・入射領域境界線上 ($\theta = \pi - \alpha$):

$$f = g_1 + 0.5 g_2 + x_1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

入射領域 ($\pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha$):

$$f = g_1 + x_1 + x_2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

入射・回折領域境界線上 ($\theta = \pi + \alpha$):

$$f = 0.5 g_1 + x_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

回折領域 ($\pi + \alpha < \theta \leq 2\pi$):

$$f = x_1 + x_2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

以上の複素表示された式(1)~(5)の絶対値をとれば, 振幅1の入射波に対する振幅 K , 換言すればその地点の波高と入射波高との比 K の近似値が得られ, 偏角をとれば位相(この値が同一の地点を結ぶと等波峰線となる)の近似値が得られる。 $y \leq 0$ ($\pi \leq \theta \leq 2\pi$)の海域における波高 K (回折係数)の数値計算結果を図-2に示す。ここに, 実線は Sommerfeld の解, 破線で示す + 印は式(4)によるものである。

(2) 適用範囲

入射領域, すなわち図-2の右側部分では極大・極小波高が認められ, 入射・回折領域の境界線 $2\pi - \theta = 90^\circ$ にもっとも近い第1次極大波高発生地点(斜線入りの線分)から右方ではよい近似を示し, 回折領域においても境界線を対称線とするこの第1次極大波高の相当地点(斜線入り線分)の左方ではよい近似を示している。境

*正 会 員 工 修 徳島大学助教授 工学部土木工学科

**正 会 員 工 修 徳島大学助手 工学部土木工学科

***学生会員 徳島大学大学院 工学研究科

界線付近では近似が悪いのであるが、境界線上においては Sommerfeld の解による計算値と近似値とはほとんど

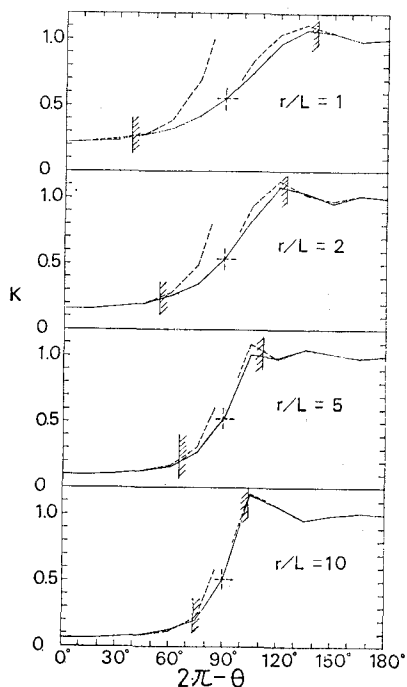


図-2 防波堤背後の波高分布 ($\alpha = \pi/2$)

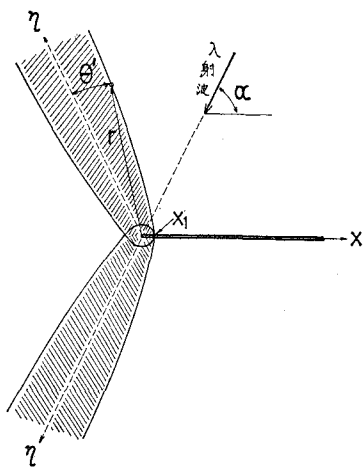


図-3 適用領域

ど一致している。この第1次極大波高発生地点および相当地点は、図-3 に示すように座標原点である防波堤先端を焦点とし、各境界線を挟む放物線となる。したがって、図-3 に斜線で示す範囲、すなわち境界線を除く放物線内の海域ではこの近似式の精度は悪い。それぞれの境界線から測った角度を θ' とし、この放物線を極座標で表示すると

$$r/L = 3/8 \cdot \{1 - \cos(\pm \theta')\}^{-1} \dots \dots \dots (6)$$

となり、それぞれの境界線を η 軸とし、防波堤先端でそれに直交する線を ξ 軸にとって直交座標で表示すると

$$\eta/L = 4/3 \cdot (\xi/L)^2 - 3/16 \dots \dots \dots (6')$$

となる。近似式が成立する範囲を示すこの式、(6)、(6') は、凸型の単純隅角の場合にもそのまま適用できる。ただし、散乱項 x_1, x_2 の値は隅角の交角によって異なる。

近似式の適用限界である前述の放物線から外方へ離れたと、近似式の精度は急速によくなる。放物線のちょうど上では、図-2 の第1次極大波高からも認められるように、原点から離れている地点ほど精度がよい。この場合、精度がもっとも悪いのは図-3 に示す x_1 地点、すなわち防波堤法線と放物線との交点付近である。単純隅角の場合も含め、近似式は厳密解よりもやや大きい波高値を与えるが、もっとも誤差が大きいと思われるこの地点付近において、 K の値にして 0.05 程度過大の値となる。

(3) 極大波高分布

半無限防波堤周辺の波の状態を示すと図-4 のようになる。すなわち、式 (1)~(5) からわかるように、入射

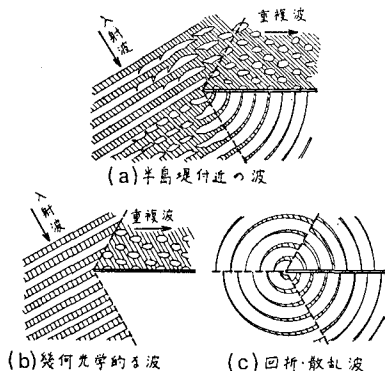


図-4 半無限防波堤周辺の波の状態

波、反射波の幾何光学的項は波峰線が平行直線の平面波であり、回折・散乱項は防波堤先端を点源として外方に進行する円筒状波である。この円筒状波の波高は点源からの距離の平方根に反比例して減少し、その波峰線は同心円弧で、波長は入射波の波長に等しい。

図-4 からわかるように、円筒状波の波峰線は平面波のそれと交わる。この地点では極大波高が発生し、位相差が π の地点では極小波高が発生する。海岸工学上では極大波高が重要であり、したがって、詳細な波高分布よりもむしろ極大波高分布のみを知れば十分であることが多い。式 (1)~(5) の右辺の絶対値を求めれば前述のように詳細な波高分布が得られるのであるが、入射波、反射波、回折・散乱波それぞれの項の絶対値 $|g_1|, |g_2|, |x_1 + x_2|$ を合計すれば、上述の極大波高値が得られる。式

(1)~(5) 右辺の絶対値をとった場合には、波高が入射波長の order で場所的に変動する領域があって計算およびその整理には手数がかかるのであるが、このように各項の絶対値を合計すれば、得られる極大波高値の分布曲

線は単調に変化し、計算・整理は簡単になる。各項の絶対値を合計して得た各領域における極大波高値を求める式を以下に示す。

反射領域 ($0 \leq \theta < \pi - \alpha$) :

$$K = 2 + 1/(4\pi\sqrt{r/L}) \cdot \left| 1/\cos \frac{1}{2}(\theta - \alpha) + 1/\cos \frac{1}{2}(\theta + \alpha) \right| \dots\dots\dots (7)$$

反射・入射境界線上 ($\theta = \pi - \alpha$) :

$$K = 1.5 + 1/(4\pi\sqrt{r/L} \sin \alpha) \dots\dots\dots (8)$$

入射領域 ($\pi - \alpha < \theta < \pi + \alpha$) :

$$K = 1 + 1/(4\pi\sqrt{r/L}) \cdot \left| 1/\cos \frac{1}{2}(\theta - \alpha) + 1/\cos \frac{1}{2}(\theta + \alpha) \right| \dots\dots\dots (9)$$

入射・回折境界線上 ($\theta = \pi + \alpha$) :

$$K = 0.5 + 1/(4\pi\sqrt{r/L} \sin \alpha) \dots\dots\dots (10)$$

回折領域 ($\pi + \alpha < \theta \leq 2\pi$) :

$$K = 1/(4\pi\sqrt{r/L}) \cdot \left| 1/\cos \frac{1}{2}(\theta - \alpha) + 1/\cos \frac{1}{2}(\theta + \alpha) \right| \dots\dots\dots (11)$$

幾何光学的項の波峯線と回折・散乱項のそれとが交わるような海域では、上述のように各項の絶対値を合計することに問題はないのであるが、交わらないような海域では問題を生じる。すなわち、このような海域では幾何光学的波と回折・散乱波とがある位相差を保ちつつ、ほぼ同じ方向に同一の波速で進むのであるから、各波高を単純に加えることはできない。ところが、このような海域は上式が成立しない各境界線付近、すなわち式(6)、(6')で示される放物線内部であるから、近似式の適用範囲を守る限りは、式(7)~(11)の適用に不都合はないものと考えられる。

(4) 屈折との組合わせ

一様水深の海域では防波堤先端を点源とする回折・散乱項の直交(波向)線は、先端を中心とする放射状の直線で示される。この直交線間隔 b' は先端からの距離 r に比例するので、間隔が b' の地点における回折・散乱項の絶対値 K' は次式で与えられる。

$$K' = K_0' \sqrt{b_0'/b'} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、添字0は基準地点(たとえば防波堤先端を中心とする半径1波長の円周上地点)における値である。したがって、一様水深でない場合には放射線の屈折図を作って式(12)の根号内の値を求めて K' を決定し、幾何光学的波の屈折係数と合計すれば、その地点の極大波高値が求まる。ただし、適用範囲を示す前述の放物線の形も屈折により変わること、および浅水度係数 K_s も関係することに注意を必要とする。

3. 防波堤開口部への適用

両翼が同一線上にあって幅の広い開口部をもつ防波堤に対しては、半無限防波堤の解を重ね合わせることににより近似解が求められている。開口部の幅が狭くなると、この重ね合わせの方法が適用できなくなるのであるが、Blue および Johnson⁵⁾ はこの限界を1波長までとしている。すなわち、開口幅が1波長の場合、半無限防波堤の重ね合わせによる数値計算結果と実験結果と比較して、付近海面の波紋状態は若干異なるけれども、波高値については数値計算結果の方がやや大きいがほとんど実験値と一致することを報告し、半無限防波堤の重ね合わせにより、1波長より広い開口幅をもつ防波堤に対する回折係数を計算し、数多くの回折図を提案している。

ここでは田中および室田⁶⁾と同じ考え方により、両翼が同一直線上にない平行防波堤開口部に対して近似計算法を適用し、実験結果と比較したのち問題点を指摘する。図-5に示すように、防波堤OA、BCの開口幅を

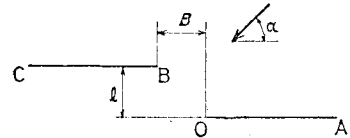


図-5 防波堤開口部の形状

B、間隔を l 、入射角を α とする。徳島大学工学部にある幅15m、長さ30m、深さ0.5mの平面水槽内に、厚さ15cmの建築用空洞コンクリートブロックを並べて模型防波堤とし、表-1に示すように B, l, α の5種

表-1 実験に用いた値

Type	入射角 α	水深 h (cm)	周期 T (sec)	波長 L (cm)	開口幅 B (cm)	奥行 l (cm)	kl	入射波高 H (cm)
A	$\pi/2$	20	0.8	88.7	0	363.6	25.7	3.67
	"	"	1.0	121.2	"	"	18.8	3.42
	"	"	1.2	152.0	"	"	15.0	3.60
B	$\pi/2$	20	0.8	88.7	363.6	363.6	25.7	4.30
	"	"	1.0	121.2	"	"	18.8	4.22
	"	"	1.2	152.0	"	"	15.0	3.56
C	$\pi/2$	20	0.8	88.7	-363.6	363.6	25.7	4.23
	"	"	1.0	121.2	"	"	18.8	4.38
	"	"	1.2	152.0	"	"	15.0	3.50
D	$\pi/4$	20	0.8	88.7	0	363.6	25.7	5.10
	"	"	1.0	121.2	"	"	18.8	4.59
	"	"	1.2	152.0	"	"	15.0	3.60
E	$\pi/4$	20	0.8	88.7	363.6	363.6	25.7	4.93
	"	"	1.0	121.2	"	"	18.8	4.27
	"	"	1.2	152.0	"	"	15.0	3.65

類の組合わせについて実験を行ない、各防波堤の前面および背面に沿う波高、開口部付近の波高分布、港内の波高分布を測定した。その実験結果の一部を図-6および7に示す。図中に記入してある実線は、前述の近似解を以下の仮定に基づき重ね合わせて得た極大波高分布曲線

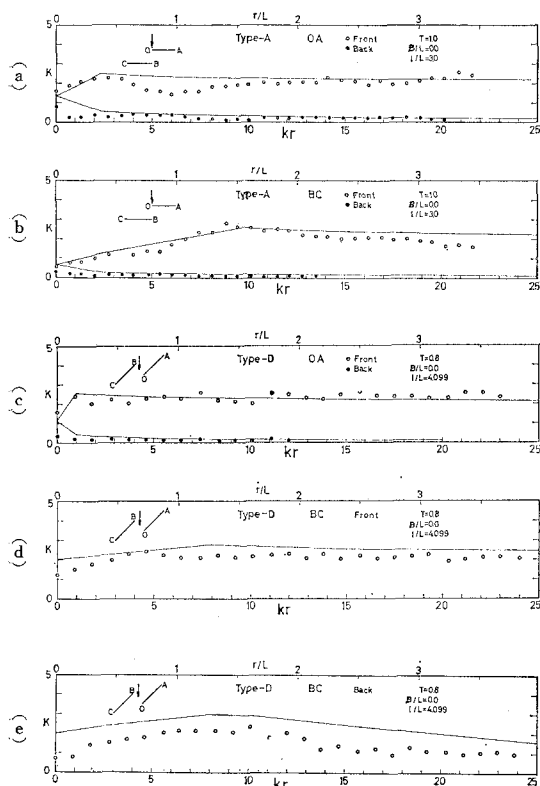


図-6 防波堤に沿う波高分布

である。

(a) 防波堤の天端幅は無視する。この模型においては、天端幅と波長との比は $1:6 \sim 10$ である。

(b) 次の (c) の場合を除外して、2次までの回折・散乱を考慮する。すなわち、入射波、反射波により生じた第1次の回折・散乱波が他の防波堤に入射し、そこで生じる回折・散乱波までを計算に入れる。ただし、円筒状波である回折・散乱波を入射波とするときの回折・散乱波を理論的に求めるのは複雑であるので、2次回折・散乱波を求める場合には、この点源において1次回折波に等しい波高と波向をもつ平面波を入射波と考える。

(c) $\alpha = \pi/2$, $B \leq 0$ の場合、防波堤先端は鏡像または他の防波堤の境界線上に位置することになるので、この境界線である OB 線上およびその延長線上においては、幾何光学的波 $0.5 \exp(-ikr)$ による影響を無限回考慮する。一例を示すと、 $\alpha = \pi/2$, $B = 0$ の場合に、B 点から O 点への入射波高は $(0.5)^2 + (0.5)^4 + (0.5)^6 + \dots = 1/3$ とし、O 点から B 点への入射波高は $(0.5) + (0.5)^3 + (0.5)^5 + \dots = 2/3$ とする。ただし、O, B 点は図-6, 7 に併記した座標によるものとする。

これらの極大波高分布曲線は、図-6 (c) を除いて、実験結果の極大波高値を包絡するか、またはそれより大きい値となる。極大波高は防波堤の相対間隔 l/L の変化に応じて敏感に変動するものであり、極大波高分布曲線

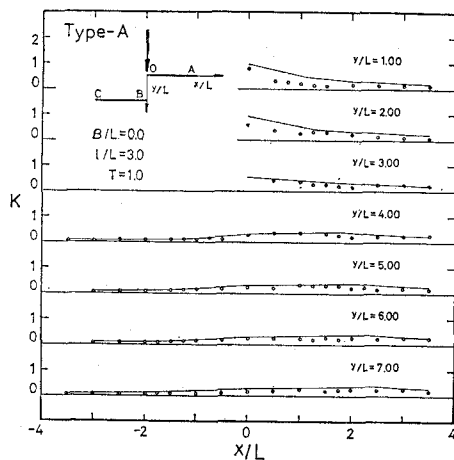


図-7(a) 開口部背後海面における波高分布

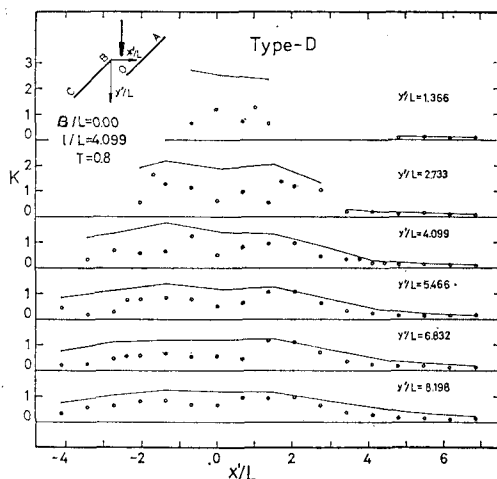


図-7(b) 開口部背後海面における波高分布

はこれらのなかの最大値を示すものである。実際の海面の波は不規則であるし、波長の推算値には誤差が伴うから、計画波高としてはこの極大波高分布曲線が示す値を採用すべきであろう。図-6 (c) の OA 前面に沿う波高実験値の一部分は極大波高分布曲線より大きくなっているが、この原因は OA 側の入射波高が BC 側のそれより大きいことによるものと考えられる。なお、表-1 に示す入射波高 $\bar{H}$ は、OA 側と BC 側の 2 点に設置した波高桿による測定値の平均であり、図-6, 7 に示す実験結果はこの $\bar{H}$ を用いて整理したものである。

近似解を重ね合わせるときに前述の仮定を用いたのであるが、得られた極大波高分布曲線はほぼ妥当な波高値を与えるようである。これらの曲線のなかで、特に注目すべきものは、 $B/L=0$, $\alpha = \pi/4$ に対する以下の 2 点である。

(a) 図-6 (d), (e) に示すように、沖側防波堤 BC の前面および背面に沿い、 $K \approx 3$ の大きい波高が発生するようである。

(b) 図-7 (b) に示すように、開口部海面において上述と同様の大きい波高が発生するようである。

このように大きい波高が発生する主な原因は、防波堤 OA からの反射波、および入射波とこの反射波とにより B 点から発生する回折・散乱波（入射波と反射波との B 点における位相差が π のとき、特に波高が大きい）によるものであるから、防波堤の波浪災害防止のためには、堤体強度を増すことも大切ではあるが、港口の静穏度保持も兼ねる消波工を防波堤に沿って設置することも有効であろう。なお、沖側防波堤においてこのような極大波高分布曲線に近い波高が発生するのは、防波堤前面に波の山がきているとき背面では波の谷がきている場合であり、したがって、その蛇行災害⁷⁾に特に留意する必要があるであろう。

4. 結 言

以上、適用範囲に注意を払わねばならない欠点をもっているが、半無限防波堤の回折係数 K を簡単に計算できる近似解法を提案し、両翼が同一直線上にない平行防波堤に適用してほぼ妥当な結果が得られることを示すと同時に、開口部形状に起因する問題点を指摘した。

この近似解法を離岸堤や島堤などに応用すると、周辺の波の状態を容易に推定でき、高波防止対策や漂砂対策の一助になるものと思われる。

最後に、実験ならびに数値計算に御援助いただいた香川県庁 藤沢哲夫技師、徳島大学 米崎武夫技官に謝意を表するとともに、この研究は文部省特定研究費（代表者北海道大学 尾崎 晃教授）による一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th edition, 1959, pp. 538~541.
- 2) Putnum, J.A. and R.S. Arthur: Diffraction of water waves by breakwater, Trans. AGU., 29(4), 1948, pp. 481~490.
- 3) 三井 宏・筒井茂明: 海岸構造物不連続部の波高分布について(第5報), 第17回海岸工学講演会論文集, 昭.45. pp. 85~90.
- 4) 前出 3) に同じ.
- 5) Blue, F.L. and J.W. Johnson: Diffraction of water waves passing through a breakwater gap, Trans. AGU., 30(5), 1949, pp. 705~718.
- 6) 田中 清・室田 明: 海岸と港湾の問題, 応用水理学中 II, 丸善, 昭.33., pp. 536~538.
- 7) 伊藤喜行・谷本勝利: 混成防波堤の蛇行災害, 港湾技研資料, No. 112, 1971.