

海岸構造物不連続部の波高分布について (第6報)

三井 宏*・川村 勇二**

1. 緒言

第1～5報において、各種の法線形状をもつ構造物周辺の波高分布について報告し、これらを計算するのに便利な近似式を提案したが、この近似式は入射領域と反射領域との境界線など、各境界線にもっとも近い第1次極大波高発生地点または相当地点をつらねた放物線の内部海域では精度が悪い。しかし、主に構造物沿いの波高分布を対象にしていたので、それほど問題にはならなかった。この第6報では、一文字防波堤および埋立地正面護岸沖における十分遠方の海域を対象にする。このような海域では、従来の近似式では計算不可能の領域が相当広い面積を占める。そこで、放物線内部の海域においても適用可能であり、比較的簡単に所要の波高分布を計算できる近似式(修正近似式)をこの第6報で提案し、この修正近似式を用いて埋立地正面護岸に代用できる一文字防波堤沖の反射波高分布を求める。

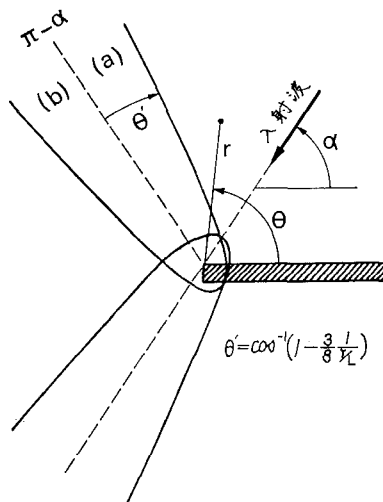


図-1 半無限防波堤の座標

2. 半無限防波堤における散乱波の修正近似解

半無限防波堤における沖側入射・反射領域の散乱波の近似式は次式で与えられる¹⁾。

$$\chi = -\frac{\exp\{-i(kr + \pi/4)\}}{2\sqrt{2\pi kr}} \left\{ \frac{1}{\cos 0.5(\theta - \alpha)} + \frac{1}{\cos 0.5(\theta + \alpha)} \right\} \dots \dots \dots (1)$$

上式は入射・反射領域境界線にもっとも近い第1次極大波高発生地点および相当地点をつらねた放物線²⁾の内部海域では精度が悪い。修正近似解は上式に補正項を設け、放物線内部で厳密解に近似させようとするものである。図-1のように座標をとり、まず、領域(a)について考えてみる。式(1)に補正項Xを入れて波の解を次式のように置く。

$$f(r, \theta) = \exp\{ikr \cos(\theta - \alpha)\} + \exp\{ikr \cos(\theta + \alpha)\} - \frac{\exp\{-i(kr + \pi/4)\}}{2\sqrt{2\pi kr}} \left\{ \frac{1}{\cos 0.5(\theta - \alpha)} \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\cos 0.5(\theta + \alpha)} + X \right\}$$

Xを次の手順で定める。まず、境界線上($\theta = \pi - \alpha$)において、上式は次の境界線上の近似解³⁾

$$f(r, \theta) = \exp(-ikr \cos 2\alpha) + 0.5 \exp(-ikr) - \frac{\exp\{-i(kr + \pi/4)\}}{2\sqrt{2\pi kr}} \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \dots (2)$$

に一致する条件から

$$\theta = \pi - \alpha: X = \exp(-i\pi/4) / (2\sqrt{2\pi kr}) \dots (3)$$

でなければならない。また、放物線上($\theta = \pi - \alpha - \theta'$)においては $X = 0$ でなければならない。次に、放物線と境界線の間領域(a) ($\pi - \alpha - \theta' \leq \theta \leq \pi - \alpha$)では式(3)の振幅を角度 $(\theta - \pi + \alpha)$ により、比例配分しXを求めると

$$X = \left\{ 1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\theta'} \right\} \cdot \frac{\exp(-i\pi/4)}{\sqrt{2\pi kr}}$$

となる。ここに $\theta' = \cos^{-1}\{1 - 3L/(8r)\}$ である。

同様に領域(b)についてXを求めると

$$X = - \left\{ 1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\theta'} \right\} \cdot \frac{\exp(-i\pi/4)}{\sqrt{2\pi kr}}$$

となる。したがって $0 \leq \theta \leq \pi$ 領域の散乱波 χ は次式で示される。

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部土木工学科
 ** 学生会員 徳島大学大学院工学研究科

$$\chi = -\frac{\exp\{-i(kr + \pi/4)\}}{2\sqrt{2\pi kr}} \left[\frac{1}{\cos 0.5(\theta - \alpha)} + \left\{ \cos 0.5(\theta + \alpha) \pm \delta \left(1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} \right) \right\} \times \frac{\exp(-i\pi/4)}{\sqrt{2\pi kr}} \right]^{-1} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $k=2\pi/L$ は波数、 δ は次の定義による。

$$1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} \geq 0 \text{ のとき } \delta = 1 \text{ (放物線内)}$$

$$1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} < 0 \text{ のとき } \delta = 0 \text{ (放物線外)}$$

\pm は $\cos [0.5(\theta + \alpha)]$ の符号と同じである。計算の便宜から式(4)の [] の部分を実数部、虚数部に分けると次のようになる。

実数部:

$$p = \frac{1}{\cos 0.5(\theta - \alpha)} + \frac{\cos 0.5(\theta + \alpha) \pm A}{\{\cos 0.5(\theta + \alpha) \pm A\}^2 + A^2}$$

虚数部

$$q = \frac{\pm A}{\{\cos 0.5(\theta + \alpha) \pm A\}^2 + A^2}$$

ただし、 A は次式で与えられる関数である。

$$A = \frac{\delta}{2\pi \sqrt{2r/L}} \left\{ 1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} \right\}$$

半無限防波堤に波高1の入射波があたった場合に生じる散乱波高 K を修正近似解と Sommerfeld の厳密解⁴⁾ により、それぞれ求めると 図-2 のようになる。図-2 は半無限防波堤先端部を中心とする相対半径 $r/L=1, 4, 16$ の同心円上の点において、入射角 $\alpha=45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の場合のそれぞれの K を示したもので、厳密解は実線、修正近似解は破線で示す。両者はよく一致し、 $r/L=1$

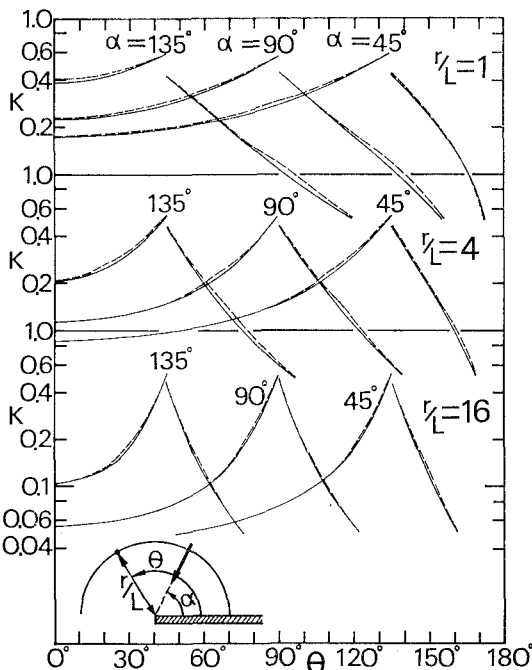


図-2 散乱波高分布

において差が最大となる点(近似範囲を示す放物線位置)でも 0.01 程度であり、 r/L が大きくなるほどこの差はさらに小さくなっている。入射・反射領域境界線上において、反射領域の χ から求めた散乱波高と入射領域の χ から求めた散乱波高は一致せず、すべての場合、反射領域の散乱波高が大となっている。この境界線上での両者の平均値は $K \approx 0.5$ で、 r/L が大きくなるにしたがい、両者とも $K=0.5$ に収束する傾向にある。このことは無限遠方において、式(2)が $0.5 \exp(-ikr)$ になることから容易に推定できる。

次に、修正近似解による散乱波の等位相線が放物線内で、どのような形になるかが問題となる。散乱波の位相は式(4)の偏角を計算することにより求まる。その結果によると、修正近似解による散乱波の等位相線はほぼ同心円であるが、境界線上で式(2)に一致させるために少しのひずみを生じている。

修正近似解を用いて半無限防波堤に 90° の角度で入射してくる波高1の入射波による沖側の波高分布を求めると、ただし、入射波をのぞいた波高 K' で、式で示すと次のようになる。

反射領域: $f_1(r, \theta) = \exp\{ikr \cos(\theta + \alpha)\} + \chi$

入射領域: $f_1(r, \theta) = \chi$

上式の計算結果を 図-3 に示す。この図に記入した数値に1を加えた値が極大波高であることに注意しなければならない。

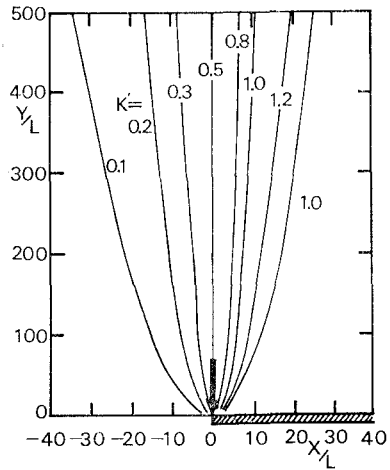


図-3 反射波高分布 ($\alpha=90^\circ$)

3. 一文字防波堤沖の波高分布

隅角からの散乱波の等位相線は半無限防波堤からのそれと同じなので、広幅突堤状埋立地の正面護岸からの反射波は一文字防波堤からの反射波と類似している。したがって、ここで取り上げる一文字防波堤からの反射波は埋立地正面護岸からの反射波とほぼ同じと考えてよい。

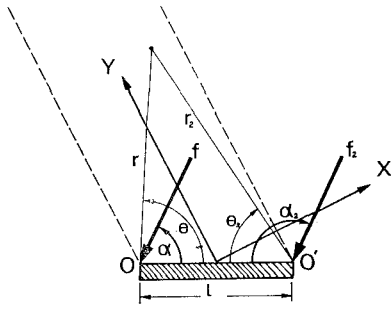


図-4 一字防波堤の座標

一字防波堤に対して、図-4 に示す座標を用い、 O または O' から発生した散乱波が O' または O に到達して生じる再散乱波を無視する。そうすれば法線 $\overline{OO'}$ 沖の波高は、 O から発生する散乱波と O' から発生する散乱波および $\overline{OO'}$ による幾何光学的反射波を重ね合わせるにより次のように求められる⁵⁾。ただし、この場合も入射波の項は除外してある。

$$\left. \begin{aligned} \text{反射領域: } f &= \exp \{ ikr \cos(\theta + \alpha) \} + \chi + \chi' \\ \text{入射領域: } f &= \chi + \chi' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 χ は O からの散乱波で式 (4) で示され、 χ' は O' からの散乱波で、次式で表わされる。

$$\chi' = -\frac{\exp \{ -i(kr_2 + \pi/4) \}}{2\sqrt{2\pi kr_2}} \cdot \left[\frac{1}{\cos 0.5(\theta_2 - \alpha_2)} + \left\{ \cos 0.5(\theta_2 + \alpha_2) \pm \delta_2 \left(1 - \frac{|\theta_2 - \pi + \alpha_2|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r_2)} \right) \right\} \times \frac{\exp \{ -i\pi/4 \}}{\sqrt{2\pi kr_2}} \right]^{-1} \cdot \exp \{ ikl \cos \alpha \}$$

式 (5) を用いて、一字防波堤 ($l/L=3, 5, 10$) に $\alpha=45^\circ, 90^\circ$ の角度で入射してくる波高 1 の入射波による反射波高分布を求めたものが図-5(a)~(f) である。ここでは、防波堤前面の中央から反射波の進行方向に Y 軸、

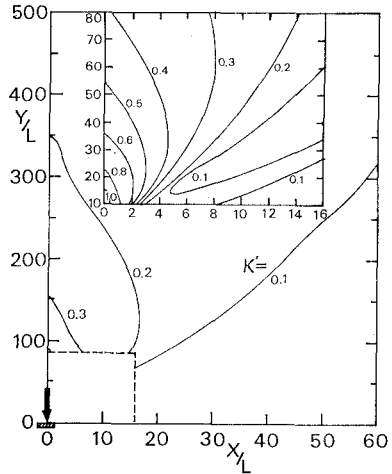


図-5(b) 反射波高分布 ($l/L=3, \alpha=90^\circ$)

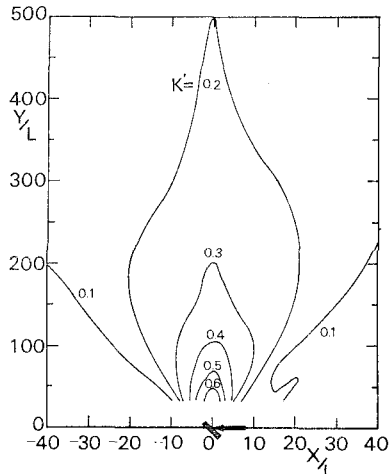


図-5(c) 反射波高分布 ($l/L=5, \alpha=45^\circ$)

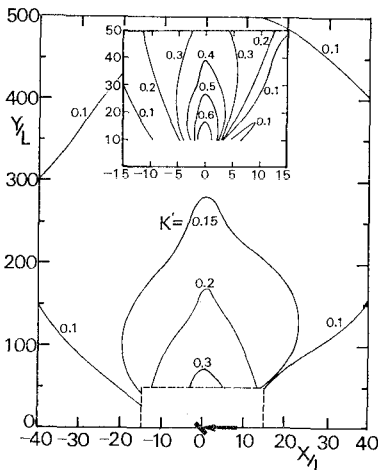


図-5(a) 反射波高分布 ($l/L=3, \alpha=45^\circ$)

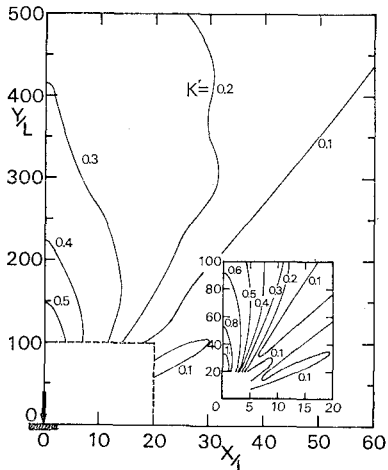


図-5(d) 反射波高分布 ($l/L=5, \alpha=90^\circ$)

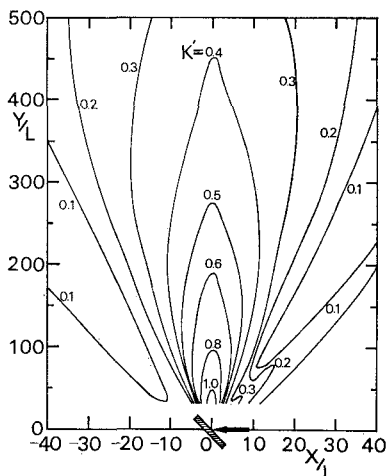


図-5(e) 反射波高分布 ($l/L=10, \alpha=45^\circ$)

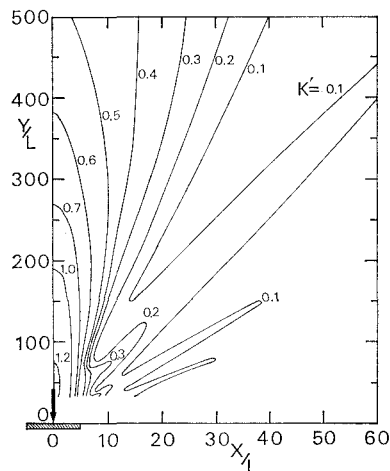


図-5(f) 反射波高分布 ($l/L=10, \alpha=90^\circ$)

それに直角方向に X 軸をとってある。これらの図より次のことがわかる。

(1) 反射波は、防波堤長 l/L が大きくなるほどこの存在範囲は広がって、遠くまで影響する。

(2) 防波堤長 l/L を一定にした場合、入射角 $\alpha=45^\circ$ と 90° を比較してみると、明らかに 90° の場合が影響範囲は広い。

(3) 防波堤長 l/L によらず、 Y/L が大きくなるにしたがい、波高は減衰し、無限遠方で反射波高は 0 になる。この原因は、無限遠方では波高 0.5 の両散乱波と、波高 1 の幾何光学的反射波が、 π だけずれた位相の状態で行進するため、それぞれの波が打ち消されたものだと考えられる。

これらのことは、理論計算により求めた結果であるが、実際の海面での反射波は逆風になることが多く、本計算波高よりも反射波は早く減衰するものと思われるが、斜め入射の場合には順風となり、その反射波が遠方の海岸

に到達して思いがけない悪影響を与えることもある。

4. 単純隅角における波の解

第5報⁶⁾に示した各種の交角をもつ単純隅角に対する修正近似解は、正面護岸沖の領域においてそれぞれ以下のようになる。以下に述べる δ および \pm の符号は前に述べた式(4)と同様である。また、 g_1 と g_2 は次式で示される。

$$g_1 = \exp\{ikr \cos(\theta - \alpha)\} \quad g_2 = \exp\{ikr \cos(\theta + \alpha)\}$$

a) 凸 90° 隅角

$$X = \left\{ 1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} \right\} \frac{\exp(-i\pi/4)}{\sqrt{3\pi kr/8}}$$

$$\chi_1 = -\sqrt{2/(3\pi kr)} \exp\{-i(kr + \pi/4)\} / \{2 \cos(2(\theta - \alpha)/3) + 1\}$$

$$\chi_2 = -\sqrt{2/(3\pi kr)} \exp\{-i(kr + \pi/4)\} / \{2 \cos(2(\theta + \alpha)/3) + 1 \pm \delta X\}$$

$0 < \alpha \leq 3\pi/4$ の場合

$$f = g_1 + g_2 + \chi_1 + \chi_2 \quad (0 \leq \theta \leq \pi - \alpha)$$

$$f = g_1 + \chi_1 + \chi_2 \quad (\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi)$$

b) 凸 60° 隅角

$$X = \left\{ 1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} \right\} \frac{6}{5} \frac{\sqrt{(5 + \sqrt{5})/(\pi kr)}}{\exp(-i\pi/4)}$$

$$\chi_1 = -\frac{3}{5} \frac{\sqrt{5 + \sqrt{5}}}{\pi kr} \cdot \exp\{-i(kr + \pi/4)\} / \left\{ 4 \cos \frac{3}{5}(\theta - \alpha) + \sqrt{5} - 1 \right\}$$

$$\chi_2 = -\frac{3}{5} \frac{\sqrt{5 + \sqrt{5}}}{\pi kr} \cdot \exp\{-i(kr + \pi/4)\} / \left\{ 4 \cos \frac{3}{5}(\theta + \alpha) + \sqrt{5} - 1 \pm \delta X \right\}$$

$0 < \alpha \leq 5\pi/6$

$$f = g_1 + g_2 + \chi_1 + \chi_2 \quad (0 \leq \theta \leq \pi - \alpha)$$

$$f = g_1 + \chi_1 + \chi_2 \quad (\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi)$$

c) 凸 120° 隅角

$$X = \left\{ 1 - \frac{|\theta - \pi + \alpha|}{\cos^{-1}(1 - 3L/8r)} \right\} \frac{3}{2} \frac{\exp(-i\pi/4)}{\sqrt{\pi kr}}$$

$$\chi_1 = -\frac{3}{4} \frac{\exp\{-i(kr + \pi/4)\}}{\sqrt{\pi kr}} / \left\{ 2 \cos \frac{3}{4}(\theta - \alpha) + \sqrt{2} \right\}$$

$$\chi_2 = -\frac{3}{4} \frac{\exp\{-i(kr + \pi/4)\}}{\sqrt{\pi kr}} / \left\{ 2 \cos \frac{3}{4}(\theta + \alpha) + \sqrt{2} \pm \delta X \right\}$$

$0 < \alpha \leq 2\pi/3$

$$f = g_1 + g_2 + \chi_1 + \chi_2 \quad (0 \leq \theta \leq \pi - \alpha)$$

$$f = g_1 + \chi_1 + \chi_2 \quad (\pi - \alpha \leq \theta \leq \pi)$$

5. 結 言

埋立地護岸からの反射波の影響範囲を予測するのに、散乱波を示す従来の近似解では放物線内で近似できないし、したがって適用範囲を示す放物線の計算が必要であった。本報で提案した修正近似解はその必要がなく、原点の近傍を除く全海域に適用できることを示した。さらに、この修正近似解を用いて、埋立地正面護岸に代用できる一文字防波堤沖の反射波高分布を求め、非常に遠方まで反射波の影響があることを示した。さらに、基本的な法線形状をもつ凸隅角による波の近似式を求めた。

最後に、本研究は文部省特別研究費(代表者 飯田波事 名古屋大学理学部名誉教授)によるものであること

を付記する。

参 考 文 献

- 1) 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, pp. 85~90, 1970.
- 2) 三井 宏・筒井茂明・亀川和正: 現場向きの防波堤付近の波高分布推算法, 第18回海岸工学講演会論文集, pp. 71~75, 1971.
- 3) 前出 1) に同じ.
- 4) Lamb, H.: Hydrodynamics, 6th edition, pp. 538~541, 1959.
- 5) 三井 宏・川崎俊太: 海岸構造物不連続部の波高分布について(第3報), 第15回海岸工学講演会講演集, pp. 41~49, 1968.
- 6) 前出 1) に同じ.