

位相折返し法による港内波高計算手法

丸山 康樹*・ 柳山 勉*・ 鹿島 遼一*・ 原 隆幸**

1. はじめに

近年、石炭火力発電所の港湾は大型化し、稼働率の面から港内波高の精度の高い推定方法が必要となってきた。また、港内堆砂問題のように、長期に渡る傾向を把握する場合などでは、港内波高の簡便な推定方法が必要である。

数値計算による港内波高推定方法には Green 関数を用いる方法¹⁾、数値波動解析法²⁾などを挙げることができる。しかし、実際の海の波は不規則波で、これらの方法を適用するには計算時間の面から不利である。

一方、半無限堤回折波解析解を重ね合わせることで開口部からの回折波を近似的に求める方法が提案されており^{3),4)}、任意の形状の開口部で、しかも不規則波に対しても手法の拡張がなされている^{5),6)}。しかし、これらの方法では条件によっては計算過程が煩雑になる傾向が見られる。

他方、比較的簡単な方法として、回折図を用いた折返し図法が提案されている^{7),8)}。そこで、これら2つの方法を基礎とし、それぞれの長所を生かした港内波高計算手法(位相折返し法と呼ぶことにする)を導いた。

本研究は位相折返し法を紹介するとともに、港内波高分布に関する水理模型実験および現地調査結果に本手法を適用した結果について述べるものである。

2. 位相折返し法

2.1 基礎理論

位相折返し法の基本となるのは、Penny and Price (1944) により導かれた半無限堤の回折波解析解である。この解析解を変形し、散乱波成分と入射・反射波成分に分離する。

図-1のように、防波堤と x 軸のなす角を α 、入射角を θ_0 、反射角を θ_r とする。任意点 $P(r, \theta)$ の動径と入射波向線、反射波向線とのなす角をそれぞれ β_1, β_2 とする。ただし、角度は反時計方向を正と定義する。また、

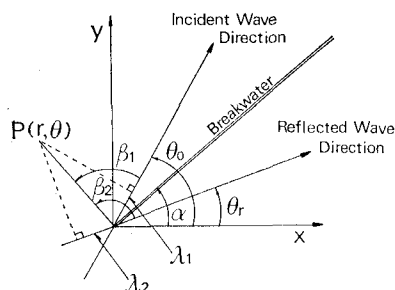


図-1 半無限堤と座標系

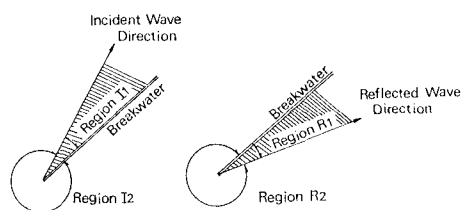


図-2 入射・反射角と領域の関係

点 P から入射波向線、反射波向線上におろした垂線とそれぞれの波向線との交点と原点までの距離を λ_1, λ_2 とする。

図-2のように、領域 I_1, I_2, R_1, R_2 を定義する。各成分波は以下のように表わすことができる。

(1) 入射波成分:

$$\phi_i(r, \theta) = \begin{cases} 0 & (P \in I_1) \\ e^{-ik\lambda_1} & (P \in I_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (1)$$

(2) 反射波成分:

$$\phi_r(r, \theta) = \begin{cases} e^{-ik\lambda_2} & (P \in R_1) \\ 0 & (P \in R_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(3) 入射散乱波成分:

$$\phi_{is}(r, \theta) = \begin{cases} f(u_1)e^{-ik\lambda_1} & (P \in I_1) \\ \text{ただし, } u_1 = -2\sqrt{\frac{kr}{\pi}} \left| \sin \frac{\beta_1}{2} \right| & \\ \{f(u_1)-1\}e^{-ik\lambda_1} & (P \in I_2) \\ \text{ただし, } u_1 = 2\sqrt{\frac{kr}{\pi}} \left| \sin \frac{\beta_1}{2} \right| & \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木技術研究所 環境水理部
海岸水理研究室

** 正会員 中部電力総合技術研究所 土木研究室

(4) 反射散乱波成分:

$$\phi_{rs}(r, \theta) = \begin{cases} \{f(u_2)-1\}e^{-ik\lambda_2} & (P \in R_1) \\ \text{ただし, } u_2=2\sqrt{\frac{kr}{\pi}} \left| \sin \frac{\beta_2}{2} \right| \\ f(u_2)e^{-ik\lambda_2} & (P \in R_2) \\ \text{ただし, } u_2=-2\sqrt{\frac{kr}{\pi}} \left| \sin \frac{\beta_2}{2} \right| \end{cases} \quad (4)$$

ここに、関数 $f(u_j)$ ($j=1, 2$) は次式で与えられる。

$$f(u_j) = \frac{e^{i\pi/4}}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^{u_j} e^{-i\pi w^2/2} dw \quad (5)$$

また、 k は入射波の波数、 $P \in I_1$ 等の記号は点 P が領域 I_1 に含まれることを意味する。

Penny and Price の解では防波堤と x 軸が一致しているため、図-1 のような防波堤配置に適用するには座標回転が必要となるが、ここで示した成分波表示は一般的な防波堤角度に対してもそのまま成立する。

図-3 に各成分波の計算例を示した。(a) は入射散乱波成分の回折係数 Kd と同位相線であり、反射散乱波成分も同様な傾向を示す。(b) は入射散乱波と反射散乱波の和 (散乱波と呼ぶ) で、同位相線は同心円状となり、放射状に進行する性質をもつ。散乱波 $\phi_s(r, \theta)$ は (3)、(4) 式の和で次式のように表わすことができる。

$$\phi_s(r, \theta) = \phi_{is}(r, \theta) + \phi_{rs}(r, \theta) \quad (6)$$

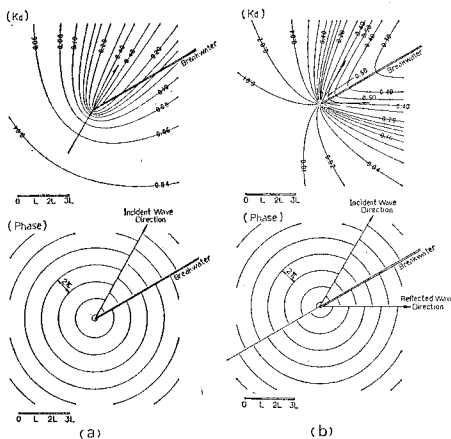


図-3 各成分波の等 Kd 線と同位相線

(a) 入射散乱波

(b) 散乱波 (入射散乱波と反射散乱波の和)

2.2 防波堤開口部への適用

図-4 に防波堤配置と座標系を示した。開口部からの回折計算は、まず任意点 P における防波堤 1 からの散乱波成分を (6) 式から計算する。次に、図-4 に示した距離 ϵ だけ位相差を考慮して、防波堤 2 からの散乱波成分を (6) 式から計算する。それぞれの防波堤先端を通過する 2 本の波向線で囲まれた部分 (図中斜線部)

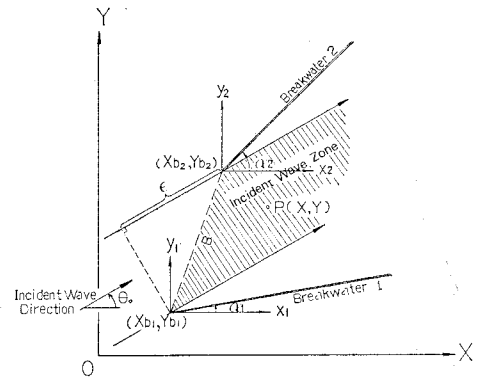


図-4 開口部防波堤配置と座標系

を入射波帯と呼ぶことにする。点 P が入射波帯にある場合には、入射波成分は (1) 式で計算すればよい。この方法では、成分波の重複がないので単純にそれぞれを重ね合わせることで、回折係数を求めることができる。

また、入射角と防波堤角度の条件により、開口部内側に複雑な反射が生ずる場合がある。従来の方法^{5), 6)}では、反射波の発生する領域を幾何光学的に決定し、その領域に含まれる入射波、反射波および散乱波の種類に応じて Penny and Price の解を合成することにより、回折係数を求めることになる。

一方、これらの反射波は位相を考慮した折返し法 (2.3

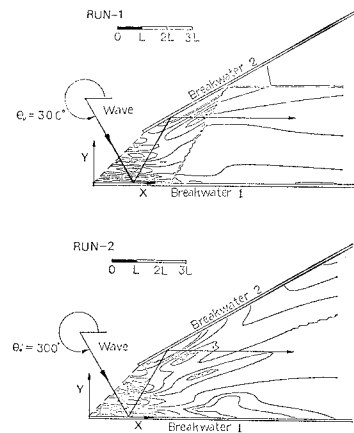


図-5 等 Kd 線分布の比較 (入射波が 2 回反射する例)

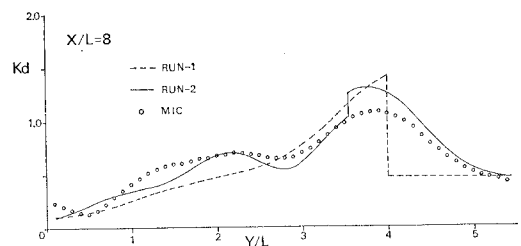


図-6 Kd 値の Y 方向変化の比較

節で詳しく述べる)で計算することができる。

従来の方法^{5),6)}による結果(RUN-1)と本手法による結果(RUN-2)の比較を図-5に示した。また、回折係数 K_d 値の Y 方向変化を図-6に示した。図-6の○印は、Green 関数¹⁾を用いた影響係数法(MIC)⁹⁾による結果で、本手法の結果と良く一致する。従来の方法では、この例のように複雑な反射条件のもとでは領域間に不連続が生ずることがある。また、計算式もかなり煩雑になる傾向がある。

2.3 一般の港湾形状への適用

防波堤の開口部(港口)から進入した回折波は港内の防波堤や護岸により複雑に反射する。折返し回折図法^{7),8)}では回折図を用いるが、本手法では入射波成分と散乱波成分を別々に折返して反射波を求める点に特徴がある(反射波以外の港内の回折係数は2.2節の方法で容易に計算できる)。

図-7は入射波成分の反射波を求める過程を模式的に示したもので、(a)は1次反射、(b)は2次反射の例である。(a)図の3'の記号は節点 $a \sim f$ で形成された港内の防波堤3(cd)を折返し線とした1次鏡像($a_3 \sim f_3$)で、4'も同様な意味の鏡像である。(b)図の43''は防波堤4および3を折返し線とした2次鏡像($a_{43} \sim f_{43}$)である。

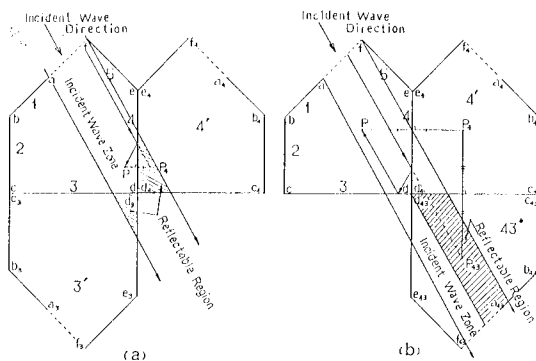


図-7 入射波成分の位相折返し法

(a) 1次反射 (b) 2次反射

1次、2次反射波(一般に n 次反射波)は、港内の任意点 P の鏡像点が反射可能領域(図中斜線部)にある場合に生ずる。この反射可能領域は次の2つの条件を満たす領域として決定される。

- ① 開口部からの入射波帯(2.2節)と鏡像との共通部分。
- ② 点 P の鏡像上の点を通り、入射波向線と平行な直線が鏡像の折返し線と交点をもつこと。

また、図-8は防波堤1からの散乱波の反射波を求める過程の模式図で、(a)は1次反射、(b)は2次反射の例である。散乱波は放射状に進行し、入射帯に相当す

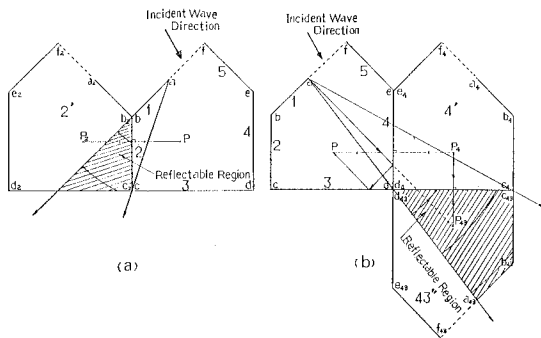


図-8 散乱波成分の位相折返し法

(a) 1次反射 (b) 2次反射

る領域はない。したがって、反射可能領域は鏡像の折返し線となる防波堤の両端と防波堤1の先端を結ぶ直線で囲まれた領域と、鏡像との共通部分(図中斜線部)となる。防波堤5からの散乱波の反射可能領域も同様に求めることができる。

点 P の鏡像点がこれらの反射可能領域に含まれる場合、その鏡像点に対する値を各成分波の式より求め、位相合成することにより、反射波を計算することができる。また、この方法では反射経路が明らかなので、各防波堤の反射率を考慮することが容易である。以上の方法を位相折返し法と呼ぶことにする。

実際の港湾形状に対して本手法の適用性を検討するために、水理模型実験を中部電力総合技術研究所の水槽(23m×30m)を用いて行った。模型縮尺は1/125で、波は周期12sec、沖波波高4m(現地換算値)の規則波である。

海岸線に直角入射の場合の実験値と計算値の比較(K_d 値)を図-9に示した。また、計算に用いた反射率は別途実施した断面実験より推定し、反射回数は3回とした。

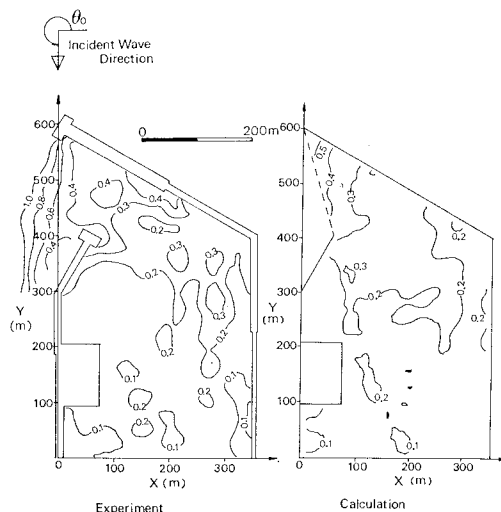


図-9 等 K_d 線の実験値と計算値の比較(規則波)

計算間隔は $\Delta X = \Delta Y = 10 \text{ m}$ (原型値) で、港内の計算点は約 2000 点である。計算値と実験値は比較的良く一致し、位相折返し法がほぼ十分な精度をもつことが確認された¹⁰⁾。

3. 不規則波への応用

実際の海の波は方向スペクトルを有する不規則波である。入射波の方向分散性は港内波高分布に顕著な影響を及ぼす。入射波の方向スペクトルを $S(f, \theta)$ とし、周波数については M 個、角度については N 個に分割し、 $M \times N$ 個の成分波 (f_i, θ_j) を考える。それぞれの成分波を規則波として、入射波高に対する港内波高比を Kd_{ij} とする。不規則波の入射波高を $(H_{1/3})_I$ とすれば、港内波高 $H_{1/3}$ は次式で与えられる。

$$H_{1/3}/(H_{1/3})_I = \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (Kd_{ij})^2 \cdot \Delta E_{ij} \right]^{1/2} \dots\dots (7)$$

ここで、 ΔE_{ij} は成分波のエネルギー密度の全エネルギー密度に対する割合である。以下では、成分波の回折係数 Kd_{ij} の算定に 2 節で述べた位相折返し法を応用し、その精度を検討することにする。

検証データを得るために 図-10 に示した福島第一原子力発電所港湾で、1981 年 6 月 20 日から 6 月 27 日まで実測を行った。計算結果には入射波のスペクトル特性、即ち、主方向および方向集中度が影響する¹¹⁾。そこで、港内波高測定 (X-3, X-5, E-6, E-7 の 4 点) と同時に、入射波方向スペクトル (P 点) も測定した。港内波高は水圧式波高計、入射波方向スペクトルは電磁流速計と水圧式波高計の組合せにより測定した。

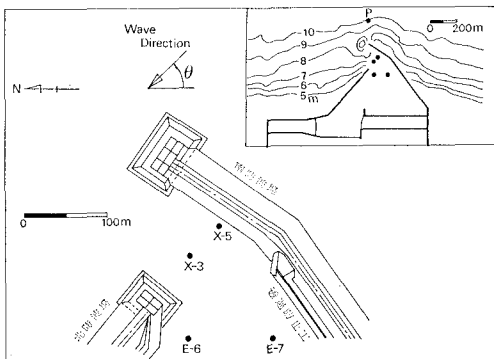


図-10 方向スペクトルおよび港内波高測定点

実測期間中の入射波の周波数スペクトル $S(f)$ の測定結果は、浅海 (水深 10 m) であるにもかかわらず Bretschneider・光易型スペクトルとよく一致した。

図-11 は Nagata (1964)¹²⁾ の方法により解析した方向関数 $G(f, \theta)$ の測定結果の 1 例で、 θ は南を 0 として反時計方向に定義した角度である。周波数 $f_1 \sim f_5$ は周波数スペクトルを等エネルギー分割したときの代表周波

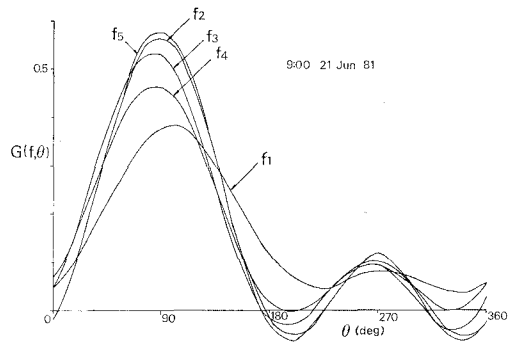


図-11 方向関数 $G(f, \theta)$ 測定例 (1981 年 6 月 21 日 9 時)

数で、 f_2 がほぼピーク周波数 f_p に相当する。周波数ごとに方向関数のピーク位置が若干ずれるが、 $\theta = 90^\circ$ (波向 E) がほぼ主方向となり、他の例でもほぼ同様な傾向であった。

波の集中度に関しては、解析方法の分解能の問題もあるので、光易型方向関数を仮定した場合の沖波波形勾配と $(S_{\max})_0$ の対応図表¹³⁾ から推定することにした。調査期間中の入射波条件では、 $(S_{\max})_0$ はいずれも高い集中度 (65~95) であると推定され、深海から浅海への波の屈折を考慮すればさらに集中度が増加すると考えられ

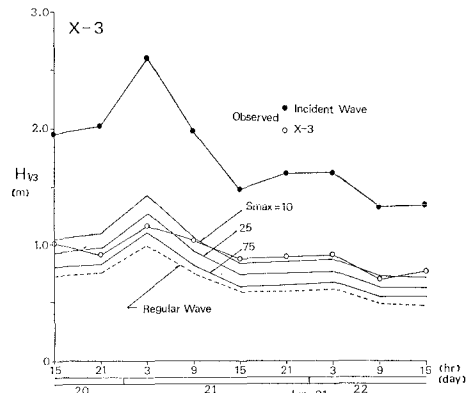


図-12 港口部波高の実測値と計算値の比較 (不規則波)

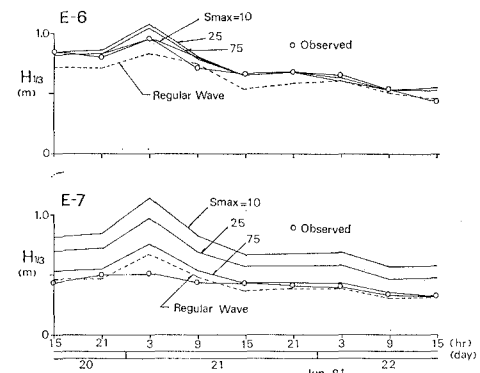


図-13 港内波高の実測値と計算値の比較 (不規則波)

る¹³⁾。しかし、ここでは入射波の集中度 $S_{\max}$ を 10, 25, 75 に仮定して比較を行うことにした。

高山ら(1978)⁵⁾と同様に試算した結果、成分波の個数を 55 ($M=5$, $N=11$) とした。計算結果と実測値の比較を図-12, 図-13 に示した。港口部の X-3 地点の実測値は $S_{\max}=10$ の値に近いが、港口部の南防波堤には図-10 に示したように透過防止工がなく、波高が大きくなる傾向がある¹⁴⁾。一方、港内の実測値 (E-6, E-7) は $S_{\max}=75$ の不規則波と規則波の中間の値に近く、方向集中度に関して予測された波の特性と一致する。

この実測例では、 $S_{\max}$ に関する推定誤差が計算結果に与える影響が少なく、計算手法そのものの精度が検証できたと思われる。

4. 結 論

既往の回折波近似計算手法および鏡像を用いた折返し図法を基本とし、回折波に対する計算手法の改良を行った。規則波を用いた水理模型実験、不規則波に関する現地調査結果に本手法を適用し、妥当な結果が得られた。

なお、本研究を行うに当り、計算プログラムに関しては(株)開発計算センターの定森良夫氏の協力を得た。また、現地調査は港内堆砂に関する研究の一環として行ったもので、調査の計画・実施にあたっては東京電力株式会社・原子力建設部ならびに福島第一原子力改良工事事務局の方々および五洋建設株式会社・土木設計部の方々の協力を得た。関係者の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Barailler, L. and D. Gaillard: Evolution récente

des modèles mathématiques d'agitation due a la houle: Calcul de la diffraction en profondeur non uniforme, La Houille Branche, No. 8, pp. 861~869, 1967.

- 2) 谷本勝利・小舟浩治・小松和彦: 数値波動解析法による港内波高分布の計算, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp. 35~58, 1975.
- 3) 森平倫生・奥山育英: 海の波の回折計算法と回折図, 港湾技術研究所資料, No. 21, 45 p., 1966.
- 4) 高井俊郎: 防波堤開口部に斜めに入射する波の回折図, 港湾技術研究所資料, No. 66, 42 p., 1969.
- 5) 高山知司・横田慎二・河内隆秀: 新しい波の計算手法とスペクトルの最適分割数, 港湾技術研究所資料, No. 303, 42 p., 1978.
- 6) 高山知司: 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 367, 140 p., 1981.
- 7) 佐藤昭二・合田良実: 海岸・港湾, 彰国社, 372 p., 1972.
- 8) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237 p., 1977.
- 9) 鹿島遼一・丸山康樹: 影響係数法による不規則波に対する港内静穏度計算手法, 第 36 回年次学術講演会講演集, pp. 863~864, 1981.
- 10) 丸山康樹・榊山 勉・鹿島遼一・原 隆幸: 港内波高計算手法の提案——各成分波の位相折返しを考慮した多重反射領域の波高分布計算法——, 電力中央研究所報告, No. 381035, 1982.
- 11) 高山知司・西田一彦: 現地港内波浪観測による港内波高算定法の検討, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 113~117, 1981.
- 12) Nagata, Y.: Observation of the directional wave properties, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 7, pp. 11~30, 1964.
- 13) 合田良実・鈴木康正: 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技術研究所資料, No. 230, 45 p., 1975.
- 14) 千秋信一・鹿島遼一・島田貞行・齊藤昭三: 福島原子力発電所海岸構造物の水理設計の検討, 電力中央研究所依頼報告, No. 69551, 1969.