

港湾設計業務シリーズ

波浪変形計算システム(エネルギー-平衡方程式)

Ver 3. X. X

商 品 概 説 書

〈 目 次 〉

1. 概 要	1
1-1. システムの特長	1
1-2. システムの動作条件	2
2. 計算理論説明	3
2-1. 基本方程式	3
2-2. 砕波変形	3
2-3. 回折項の導入.....	5
2-4. 連立方程式の設定	6
2-5. 反射波の計算.....	8
2-6. 透過波の計算.....	11
2-7. 代表波の算定法	11
2-8. 沖波条件	12
2-9. 浅水変形	13
3. 補足資料	15
3-1. 参考文献	15

1. 概要

1-1. システムの特長

本システムは、外郭施設その他の港湾の施設の構造の安定又は水域施設の静穏度等の検討に必要な波浪の推定をエネルギー平衡方程式「砕波および反射を考慮した波浪変形計算高山ら(1991)」に基づいて行います。

地形形状の設定に、DXF・CSV・J-BIRDファイル読み込みを用いることにより、簡単に任意形状を入力できるよう考慮されています。

本システムには、以下のような特徴があります。

- ・ エネルギー平衡方程式を解くことにより、多方向不規則波の屈折・浅水変形・砕波変形が計算できます。
- ・ 砕波変形は、合田による砕波指標(1975)を適用し、砕波減衰項を導入しています。
- ・ 「波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究 間瀬・高山ら(1999)」により、回折の考慮が可能です。
- ・ 「浅海域における波浪変形計算法の拡張 鈴木ら(1994)」により、透過境界の考慮が可能です。
- ・ 計算格子に対して、反射境界が斜めになる場合でも反射境界の角度を設定することで、正常な方向に反射波が計算されるように機能が拡張されています。尚、反射率が設定可能な領域は1つに限定されています。複数領域を配置した場合には、最も岸側の領域が対象となります。
- ・ 砕波変形を考慮しない場合、各地点の波高値を浅水係数で割り戻すことにより、近似的に換算沖波波高の算出が可能です。
- ・ 地形形状の入力には、DXFファイル読み込み、CSVファイル読み込み、J-BIRDファイル読み込みなどを用意しています。
- ・ データの管理はプロジェクト(フォルダ)形式で行っております。1プロジェクトには、1つの地形データと複数の波浪計算データが設定可能です。
- ・ 任意の等深線を入力することにより、自動的にメッシュデータを作成します。
- ・ 陸域境界にも地盤高を設定することが可能となっているため、メッシュの作成が精度よく行えます。
- ・ 地形形状の変更や追加などCAD画面を用いることにより、容易に行うことができます。
- ・ 線境界の設定が可能です。計算領域のメッシュピッチに比べて堤体幅が狭い防波堤などに使用します。
- ・ 地形線に任意の反射率、線境界に任意の反射率・透過率を与えることが可能です。
- ・ 複数計算領域の設定が可能です。メッシュピッチを、沖側は大きく、岸側は小さく設定できますので、1領域の場合に比べて総メッシュ数が少なくなり、計算時間を短縮することができます。エネルギーの伝達は、沖→岸方向であるため、例えば最も岸側の領域の岸→沖方向の反射エネルギーは、1つ沖側の領域には作用しません。したがって、領域の境ではコンターなどが不連続となることに注意が必要です。
- ・ 複数図面枠の設定可能です。対象図面枠を切り替えることによりスケールが異なる図面を印刷できます。
- ・ 作図図面は、コンター図・デジタルマップ図・カラーコンター図・ベクトル図を用意し、それぞれ有義波高・有義波高比・換算沖波波高・換算沖波波高比(屈折係数)が作図可能です。デジタルマップ図に関しては波向きの作図も可能となっています。また、それぞれの図面を重ねて作図することも可能です。

- ・ 碎波位置図が作成可能です。
- ・ 入力された地形形状により内部発生したメッシュデータから、コンター図・デジタルマップ図・カラーコンター図を作成し、水深のチェック図として画面で確認することが可能です。また、それを図化することも可能です。
- ・ 作図の有無の切り替えを等深線に対して行うことが可能です。また、作図する場合、作図間隔の設定も可能です。
- ・ 印刷をカラープリンターで行う場合、地形部分の塗りつぶしの設定が可能です。
- ・ 作図データがDXFファイル形式に出力可能です。ただし、カラーコンター部分に関しては、DXFファイル形式への出力は不可です。
- ・ 作図イメージが画面で確認可能です。

1-2. システムの動作条件

オペレーティングシステム

Microsoft Windows11
Microsoft Windows10 64bit

メモリ

2GB以上（推奨 4GB以上）

ハードディスクの空き容量

アプリケーション用に20MB程度

モニタ

1024×768と同等、またはそれ以上の解像度を推奨

マウス・プリンタ

使用するオペレーティングシステムに対応したもの

その他

Microsoft .NET Framework Version 4.5.X以上
ヘルプ表示用にADOBE READER

※ 使用メモリー量は、水深を計算するメッシュ数により変動します。大領域でかつ、細かいメッシュでの解析を行う場合は、できるだけ多くのメモリーを搭載していただくことを推奨します。ただし、本システムは32bit対応のプログラムとなっており、プログラムが確保可能なメモリー量としては最大2GBまでとなっています。

※ ハードディスクの空き容量は、アプリケーション用以外にデータ保存用が必要です。必要容量は作成するデータ数により変動します。

2. 計算理論説明

2-1. 基本方程式

エネルギー平衡方程式の基本式は、次のような仮定をすると以下のように表される。

- ・ 波の状態は、時間的に変化しない
- ・ 成分波の周期は変化しない
- ・ 外部エネルギーの授受はない

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} = 0$$

ここに、

$$v_x = C_g \cos \theta$$

$$v_y = C_g \sin \theta$$

$$v_\theta = \frac{C_g}{C} \left(\sin \theta \frac{\partial C}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial C}{\partial y} \right)$$

エネルギーの連続の式からエネルギー平衡方程式を誘導すると、次のように表される。

$$(SC_g \cos \theta)_x + (SC_g \sin \theta)_y + (\partial/\partial \theta) [S(C_g/C) \{ \sin \theta (\partial C/\partial x) - \cos \theta (\partial C/\partial y) \}] = 0$$

2-2. 碎波変形

碎波変形については、合田の碎波指標（1975）を用いて次のように計算する。

碎波による波高減衰項を導入するとエネルギー平衡方程式は、次のように表される。

$$(SC_g \cos \theta)_x + (SC_g \sin \theta)_y + (\partial/\partial \theta) [S(C_g/C) \{ \sin \theta (\partial C/\partial x) - \cos \theta (\partial C/\partial y) \}] = -\varepsilon'_b S$$

ここに、 ε'_b は、単位時間内に碎波によって失われるエネルギーの逸散率を示す。 ε'_b の値としては、計算格子内に進入した波が出るまでに要する平均時間に比例すると仮定して、次式で与える。

$$\varepsilon'_b = \varepsilon_b C / \sqrt{\delta x \delta y}$$

ここに、 δx および δy は x 、 y 方向の計算格子間隔で、本計算では、 $\delta x = \delta y$ を用いる。

尚、碎波位置図においては、このエネルギー逸散率が与えられた閾値よりも大きければ、その格子は「碎波している」とし、図中に丸印を出力する。

碎波限界波高と碎波水深との比は、海底勾配と相対水深（水深と波長の比）によって異なるため、個々の波の周期がある幅に分散している不規則波では、碎波状況がバラバラである。そのため、ここではエネルギー逸散率を閾値として、またその閾値も設定可能とした。

無次元量 ε_b は格子内において碎波する波のエネルギーの割合を示しており、次のようにして求められる。

碎波後であっても波高は、Rayleigh分布に近い分布形を示すと仮定すると、沖波のエネルギーの分布 $P_E(H_s^*)$ は波高の2乗分布で与えられ、次式ようになる。

$$p_E(H_s^*) = \frac{\pi^2}{8} \alpha^4 H_s^{*3} \exp\left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_s^*)^2\right]$$

ここに、 $H_s^* = H/H_{1/3}$, $\alpha = H_{1/3}/\bar{H}$ 、 \bar{H} は平均波高を示す。

計算対象格子に入るときの碎波波高と出る時の碎波波高をそれぞれ H_{bi} と H_{bo} とすると、碎波によってこの格子内で失われるエネルギーは、図-2の斜線部分で示され、その割合は次式ようになる。

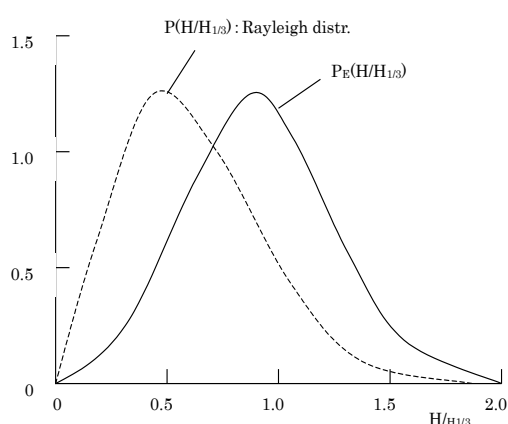


図-1 波高分布と波のエネルギー分布

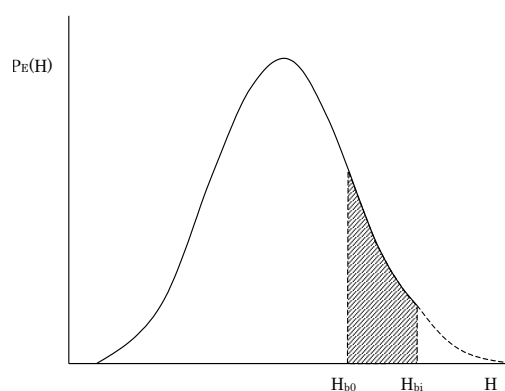


図-2 碎波によって失われるエネルギーの割合

$$\begin{aligned} \varepsilon_b &= \frac{\left[\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^* - \int_0^{H_{bo}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^* \right]}{\int_0^{H_{bi}/H_{1/3}} p_E(H_s^*) dH_s^*} \\ &= 1 - \frac{1 - \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{bo}/H_{1/3})^2 \right\} \exp\left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_{bo}/H_{1/3})^2\right]}{1 - \left\{ 1 + \frac{\pi}{4} (\alpha H_{bi}/H_{1/3})^2 \right\} \exp\left[-\frac{\pi}{4} (\alpha H_{bi}/H_{1/3})^2\right]} \end{aligned}$$

碎波波高 H_{bo} および H_{bi} の算定においては、合田の提唱した碎波指標を用いる。

$$H_b/L_0 = A \left\{ 1 - \exp\left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15\beta^{4/3})\right] \right\}$$

ここで、 $A=0.18$ として求めた碎波波高以上の波は総て碎波し、 $A=0.12$ として求めた碎波波高以下の波は碎波しないと、碎波する波の確率が $A=0.12$ の波から $A=0.18$ の波まで線形的に変化すると仮定した。

上式の海底勾配 β としては、平均波向き $\bar{\theta}$ を用いて次のように与えた。ここでの平均波向きは、計算を行わなければ求まらないことや、1格子ずれても大きく変化することはないと考えて1格子沖側のものを用いた。

$$\beta = \beta_x \cos \bar{\theta} + \beta_y \sin \bar{\theta}$$

ここに、 β_x および β_y はx軸及びy軸方向の海底勾配であり、本システムでは、計算地点から1波長間の平均勾配として与えた。また、水深としては、計算格子内の平均水深 \bar{h} を用いると、碎波波高は、次式のようなになる。

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15 \beta^{4/3}) \right] \right\} \quad (\beta \geq 0)$$

$$H_b = AL_0 \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} \right] \right\} \quad (\beta < 0)$$

尚、上式における係数 A としては、合田が提案している $A=0.17$ を用いた。

波が距離 d/l を進む間における碎波波高の変化率 dH_b/dl は

$$dH_b/dl = -1.5\pi\beta A(1+15\beta^{4/3}) \times \exp \left[-1.5 \frac{\pi \bar{h}}{L_0} (1 + 15 \beta^{4/3}) \right] \quad (\beta \geq 0)$$

$$\text{ただし、} dH_b/dl = 0 \quad (\beta < 0)$$

計算格子内における平均伝播距離 d/l としては $dl = \sqrt{\delta x \delta y} = \delta x$ で与え、

$$H_{b0} = H_b + dH_b/2$$

$$H_{bi} = H_b - dH_b/2$$

として求めた。

2-3. 回折項の導入

「波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究 間瀬・高山ら(1999)」に倣い、次式のように回折項を導入しています。

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} = \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta S_{yy} \right\} - \varepsilon_b S$$

ここに、

κ : 回折項に関する影響係数

間瀬らによれば、この回折項にかかる影響係数は2.5が適切であったとされています。本プログラムでも2.5を使用しています。

エネルギー平衡方程式法では直接的に回折は考慮できませんが、このように回折項の影響係数を導入することにより、近似的に回折波の計算が可能となっています。

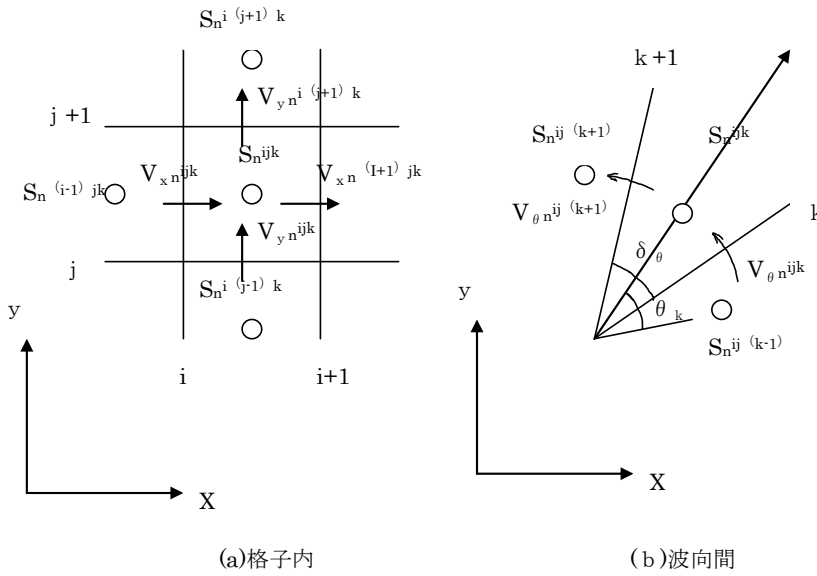
しかし、近似的な取扱いであるため、一般の港内のように複雑な地形を有し、回折波の影響が大きい港内の静穏度の計算などは、別途回折波の計算が精度よく行える計算モデルを採用することを推奨します。

2-4. 連立方程式の設定

砕波による波高減衰項及び回折項を導入した式は次のようになる。

$$\frac{\partial(v_x S)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y S)}{\partial y} + \frac{\partial(v_\theta S)}{\partial \theta} - \frac{\kappa}{2\omega} \left\{ (CC_g \cos^2 \theta S_y)_y - \frac{1}{2} CC_g \cos^2 \theta S_{yy} \right\} = -\varepsilon_b S$$

成分波は、総て岸側に向けて進行するという条件を設定すると、 $V_x > 0$ となって、上式は1階の微分方程式であるから、沖側境界でのスペクトルを与えると、沖側から逐次解くことができる。次図に示すように、格子 (i, j) において、上式を差分化すると次式のようなになる。



$$A_1 S_n^{ijk} + A_2 S_n^{i(j-1)k} + A_3 S_n^{i(j+1)k} + A_4 S_n^{ij(k-1)} + A_5 S_n^{ij(k+1)} = -B S_n^{(i-1)jk}$$

ここに、

$$A_1 = V_{xn}^{ijk} / \delta x + \varepsilon_{bn}^{ij} + \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ \begin{array}{l} (CC_g)^{i(j+1)k} + (CC_g)^{ijk} \\ -(CC_g)^{i(j+1/2)k} \end{array} \right\} \cos^2 \theta_k$$

$$+ \begin{cases} \left\{ \begin{array}{l} V_{yn}^{i(j+1)k} / \delta y \\ -V_{yn}^{ijk} / \delta y \end{array} \right\} & \begin{array}{l} (V_y > 0) \\ (V_y < 0) \end{array} \\ \left\{ \begin{array}{l} V_{\theta n}^{ij(k+1)} / \delta \theta \\ 0 \\ (V_{\theta n}^{ij(k+1)} - V_{\theta n}^{ijk}) / \delta \theta \\ -V_{\theta n}^{ijk} / \delta \theta \end{array} \right\} & \begin{array}{l} (V_{\theta n}^{ijk} > 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} > 0) \\ (V_{\theta n}^{ijk} > 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \\ (V_{\theta n}^{ijk} < 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} > 0) \\ (V_{\theta n}^{ijk} < 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \end{array} \end{cases}$$

$$A_2 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ - (CC_g)^{ijk} + \frac{1}{2} (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k$$

$$+ \begin{cases} -V_{yn}^{ijk} / \delta y & (V_y > 0) \\ 0 & (V_y < 0) \end{cases}$$

$$A_3 = \frac{\kappa}{2\omega_n \delta y^2} \left\{ - (CC_g)^{i(j+1)k} + \frac{1}{2} (CC_g)^{i(j+1/2)k} \right\} \cos^2 \theta_k$$

$$+ \begin{cases} 0 & (V_y > 0) \\ V_{yn}^{i(j+1)k} / \delta y & (V_y < 0) \end{cases}$$

$$A_4 = \begin{cases} -V_{\theta n}^{ijk} / \delta \theta & (V_{\theta n}^{ijk} > 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} > 0) \\ -V_{\theta n}^{ijk} / \delta \theta & (V_{\theta n}^{ijk} > 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (V_{\theta n}^{ijk} < 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} > 0) \\ 0 & (V_{\theta n}^{ijk} < 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases}$$

$$A_5 = \begin{cases} 0 & (V_{\theta n}^{ijk} > 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} > 0) \\ V_{\theta n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (V_{\theta n}^{ijk} > 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \\ 0 & (V_{\theta n}^{ijk} < 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} > 0) \\ V_{\theta n}^{ij(k+1)} / \delta \theta & (V_{\theta n}^{ijk} < 0, V_{\theta n}^{ij(k+1)} < 0) \end{cases}$$

$$B = -V_{xn}^{ijk} / \delta x$$

2-5. 反射波の計算

反射波の計算法は、「高山知司他：砕波および反射を考慮した波浪変形計算，港湾技術研究所報告，第30巻第1号，pp. 21-67，1991.」に準じて導入しています。

本方程式の計算においては、計算対象領域を正方格子で近似させているため、陸上境界や防波堤のような構造物は格子線与えられることになります。例えば、主波向きに対して45°の角度を持つ防波堤を設置した場合、計算上、図1のような階段状の防波堤における反射波を計算することになります。

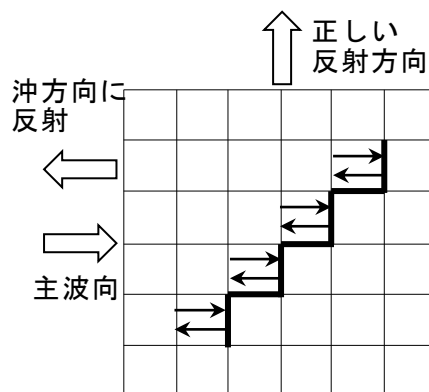


図1 主波向きに対して斜めに設置された防波堤の計算格子

実際の波の反射であれば、斜めに防波堤に入射すれば、防波堤に対してある一定の角度をもって反射するはず（この場合は、90°に近い）ですが、計算上、波のエネルギーのほとんどが沖-岸方向に垂直な壁に反射する形になるため、ほぼ180°の角度で沖側に反射する計算になってしまいます。

本システムでは、この問題点の解決策として、構造物の傾斜角度を考慮して反射の方向を修正する方法「吉田隆千代他：エネルギー平衡方程式法における反射計算の改良，平成27年度第67回土木学会中国支部研究発表会発表概要集，pp. 75-76(Ⅱ-3).」を提案し、選択可能なようにプログラム化しています。

(1) X軸（岸方向）に垂直な壁面での反射

図2、図3に模式図を示します。従来の方法では反射波はすべて沖方向に戻りますが、構造物の傾斜角を考慮すると、反射しない成分や岸方向に反射する成分が現れます。 θ と α の関係で分類するとつぎのようになります。

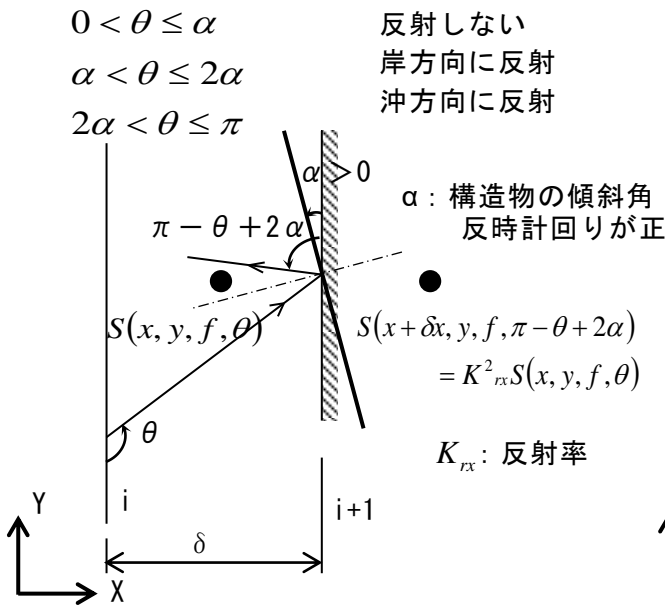


図2 X軸に垂直な壁面での反射 ($\alpha > 0$)

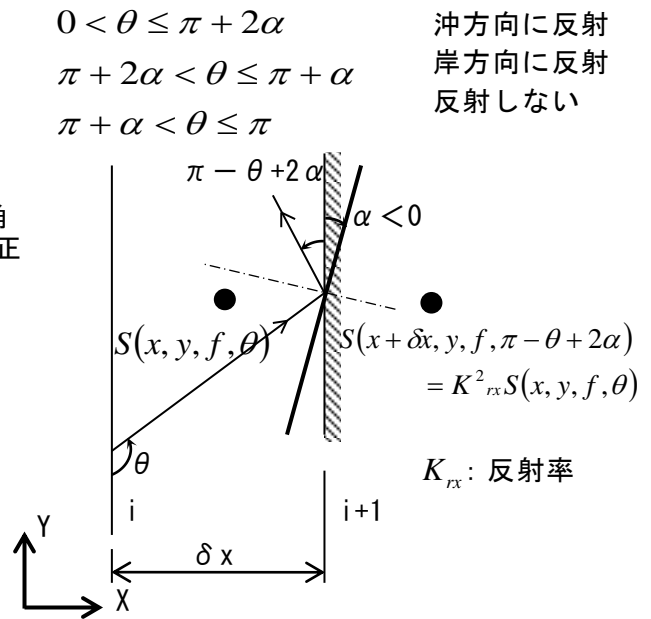


図3 X軸に垂直な壁面での反射 ($\alpha < 0$)

(2) X軸に平行な壁面での反射 (j側)

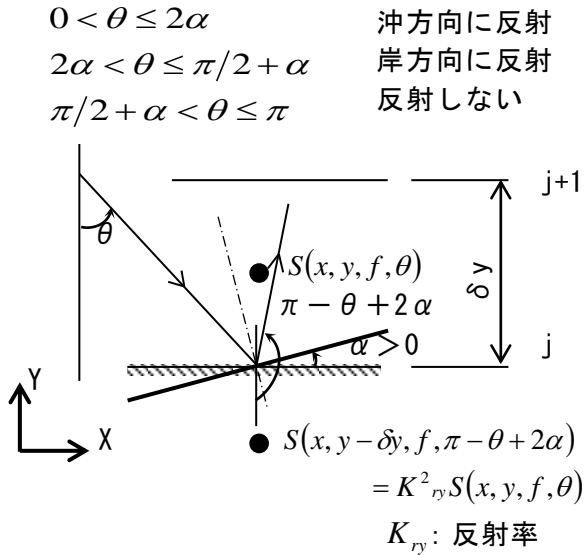


図4 X軸に平行な壁面での反射 (j側, $\alpha > 0$)

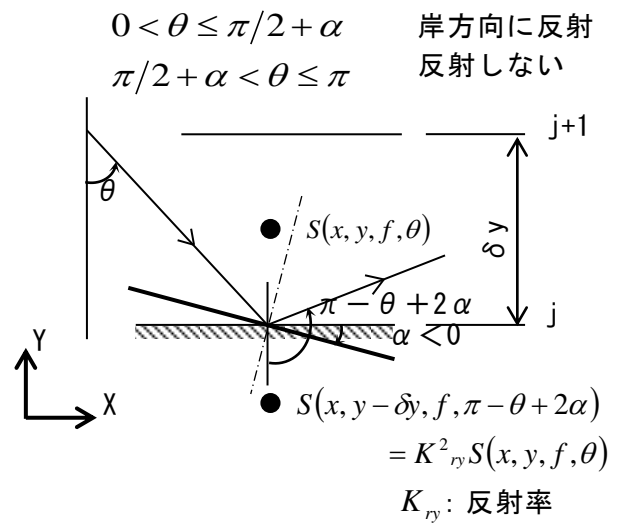


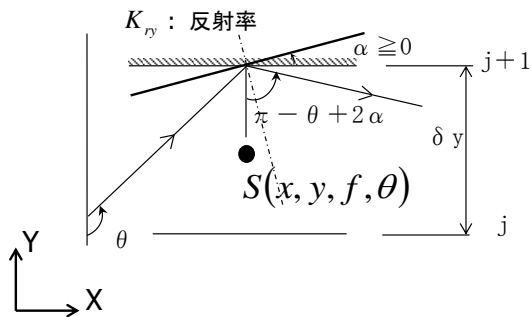
図5 X軸に平行な壁面での反射 (j側, $\alpha < 0$)

(3) X軸に平行な壁面での反射 (j+1側)

$$0 < \theta \leq \frac{\pi}{2} + \alpha \quad \text{反射しない}$$

$$\frac{\pi}{2} + \alpha < \theta \leq \pi \quad \text{岸方向に反射}$$

$$S(x, y + \delta y, f, \pi - \theta + 2\alpha) = K_{ry}^2 S(x, y, f, \theta)$$



$$0 < \theta \leq \frac{\pi}{2} + \alpha \quad \text{反射しない}$$

$$\frac{\pi}{2} + \alpha < \theta \leq \pi + 2\alpha \quad \text{岸方向に反射}$$

$$\pi + 2\alpha < \theta \leq \pi \quad \text{沖方向に反射}$$

$$S(x, y + \delta y, f, \pi - \theta + 2\alpha) = K_{ry}^2 S(x, y, f, \theta)$$

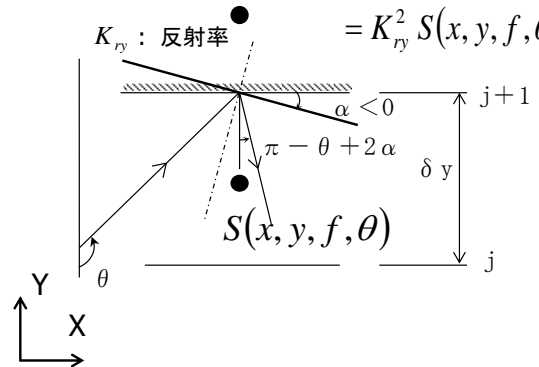


図6 X軸に平行な壁面での反射 (j+1側, $\alpha > 0$) 図7 X軸に平行な壁面での反射 (j+1側, $\alpha < 0$)

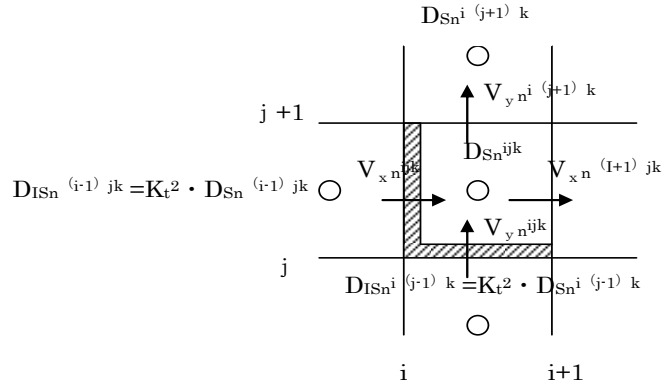
ただし、本方程式での反射の計算方法では、緩勾配方程式法のように波形の位相変化は考慮されていません。そのため、防波堤前面で入射波と反射波が重なり合って波高が高くなる現象は十分に再現されないことに注意が必要です。1波長程度離れた場所での値については、位相変化の影響が小さくなるため、ほぼ同じ結果となります。

以上のことから、反射波の計算が可能とはなりましたが、それらの問題のため反射波の影響が大きい港内の静穏度の計算などは、反射の計算が精度よく行える別の計算モデルを採用することを推奨します。

2-6. 透過波の計算

本システムでは、線境界に対して透過率を与えることにより、透過型の防波堤を考慮することが可能です。波が堤体を通過して港内に進入する際、各成分波のエネルギーを透過率に応じて減少させることで導入します。

次図のような透過堤配置をした計算格子を考えると、透過堤を通過する直前の格子 $(i-1, j)$ および $(i, j-1)$ から、次の格子 (i, j) に流入する波エネルギーを透過率 K_t に応じて減少させます。



$$DI_{Sn}^{i-1,j,k} = K_t^2 D_{Sn}^{i-1,j,k}$$

$$DI_{Sn}^{i,j-1,k} = K_t^2 D_{Sn}^{i,j-1,k}$$

2-7. 代表波の算定法

連立方程式を解いて求めた D_{sn}^{ijk} を用いて、有義波高 $H_{1/3}$ および最高波高 H_{max} 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、平均波向き $\bar{\theta}$ は次式のように求めることができる。

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0}$$

$$H_{max} = \min \{ H_b, 1.8 H_{1/3} \}$$

$$T_{1/3} = T_0 \sqrt{m_0 / m_2} / \sqrt{T_0}$$

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{K=1}^K \theta_k D_{sn}^{ijk}}{m_0}$$

ここに、

$$m_p = \sum_{n=1}^N \sum_{K=1}^K f_{pn} D_{sn}^{ijk}$$

$\min \{ a, b \}$ は、 a, b のうち小さい方の値を示す。また、 H_b は砕波波高、 T_0 は、沖波の有義周期、 \bar{T}_0 は沖波の平均周期である。沖波の平均周期は、入力した沖波のスペクトル $S_0(f, \theta)$ を用いて、次式で計算する。

$$\bar{T}_0 = \left[\frac{\int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_0(f, \theta) df d\theta}{\int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} f^2 S_0(f, \theta) df d\theta} \right]^{1/2}$$

2-8. 沖波条件

計算領域内の沖波境界で与える沖波は、一様なスペクトルになっていると仮定し、沖波のスペクトル $S_0(f, \theta - \theta_p)$ は、次式のように表す。

$$S_0(f, \theta - \theta_p) = S_0(f)G_0(\theta - \theta_p; f)$$

ここに、 $S_0(f)$ は、周波数スペクトル、 $G_0(\theta - \theta_p; f)$ は方向関数、 θ_p は主波向きである。

沖波の周波数スペクトルとしては次式で表される形のものを用いた。

$$S_0(f) = af^{-5} \exp(-bf^{-4})$$

成分波の周波数 f_n は、合田 (1977) の提案した次式を用いる。

$$f_n = [b/\ln\{2N/(2n-1)\}]^{1/4} \quad (n=1,2,\dots,N)$$

ここに、Bretschneider・光易型スペクトルの場合、

$$a = 0.257H_0^2/T_0^4$$

$$b = 1.03/T_0^4$$

方向関数 $G_0(\theta - \theta_p; f)$ は、両端を $\delta\theta/2$ だけ取り除いた区間 $(-\pi/2 + \delta\theta/2) \sim (\pi/2 - \delta\theta/2)$ 内を積分することにより求めたが、全領域 $(-\pi/2 \sim \pi/2)$ 内で方向関数の積分値が 1 になるように補正を行っている。補正は、次式のように行った。

$$G_0(\theta_k - \theta_p; f) = \bar{G} \int_{\theta_k - \delta\theta/2}^{\theta_k + \delta\theta/2} G_0(\theta - \theta_p; f) d\theta$$

ここに、 \bar{G} は次式の補正係数である。

$$\bar{G} = 1 / \int_{-\pi/2}^{\pi/2} G_0(\theta - \theta_p; f) d\theta$$

方向関数としては、次式の光易型方向関数 (合田・鈴木、1975) を標準形として用いた。

$$G_0(\theta_k - \theta_p; f) = \bar{G} \cos^{2S} \{(\theta - \theta_p)/2\}$$

ここに、

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f/f_p)^{-2.5} & (f > f_p) \\ S_{\max} (f/f_p)^5 & (f < f_p) \end{cases}$$

S_{\max} は方向集中度を示すパラメータで、 f_p は周波数スペクトルのピーク周波数であって次式で推定している。

$$f_p = 1/(1.05T_{1/3})$$

以上の結果、計算領域沖側における入射波の条件は次式のようになる。

$$D_{sn}^{0ik} = S_0(f_n)G_0(\theta_k - \theta_p; f_n)\delta\theta\delta f_n$$

2-9. 浅水変形

微小振幅波理論による規則波の浅水変形は次式で表される。

$$K_s \equiv \frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{(C_G)_0}{C_G}} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)}\right] \tanh \frac{2\pi h}{L}}}$$

ここに、

K_s : 浅水係数

C_G : 群速度

$$C_G = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right] C$$

$$C = \frac{L}{T} = \frac{g}{2\pi} T \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

$(C_G)_0$: 深海波の群速度 (m/sec)

$$= \frac{1}{2} C_0 = 0.78T$$

L : 波長

h : 水深

線形スペクトル理論による不規則波の浅水変形は次式で表される。

■ 沖波の周波数スペクトル (ブレッドシュナイダー・光易型スペクトル)

$$S_0(f) = af^{-5} \exp[-bf^{-4}]$$

この沖波スペクトルを図に示すように等エネルギー分割して、N個の周波数成分波に分けるとする。上式の a と b が周波数に依存しない定数である場合は次のようになる。

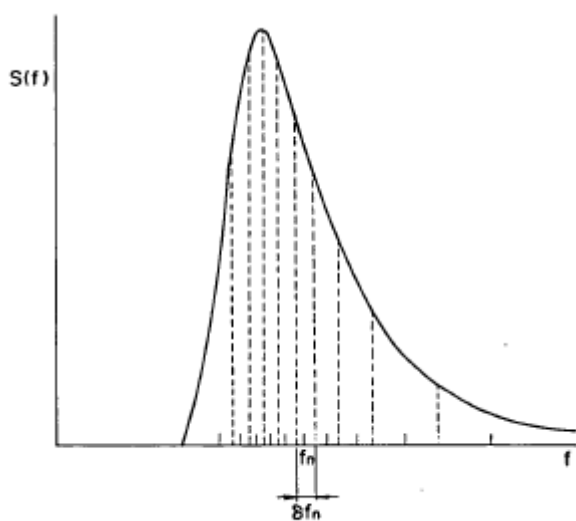


図-19 周波数スペクトルの分割

$$S_0(f_n)\delta f_n = a/4Nb \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

$$a = 0.257 H_0^2 / T_0^4$$

$$b = 1.03 / T_0^4$$

■ 成分波の代表周波数 f_n

$$f_n = \frac{1.007}{T_0} \{\ln[2N/2n - 1]\}^{-1/4} \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

■ 浅水係数

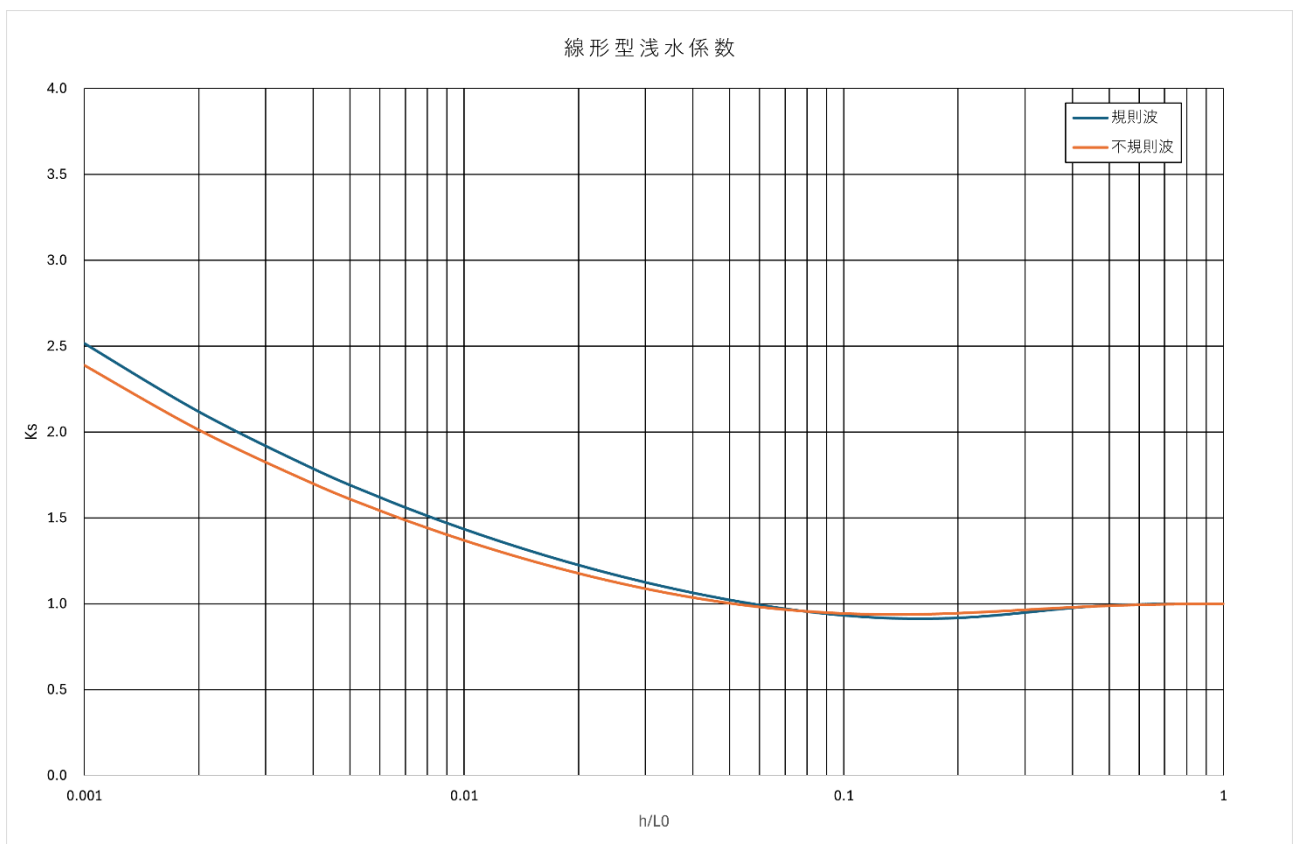
$$K_s = \left[\frac{\int_0^\infty K_s^2 S_0(f_n) \delta f_n}{\int_0^\infty S_0(f_n) \delta f_n} \right]^{1/2}$$

$$K_s = \left[\left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \tanh kh \right]^{-1/2}$$

ここに、 $k = 2\pi/L$: 波数

$$L = \frac{g}{2\pi} T_n^2 \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

参考：港湾技術研究所報告 VOL. 14 NO. 3 浅海域における波浪の碎波変形



3. 補足資料

3-1. 参考文献

本システムを開発するにあたり、参考にした文献は下のとおりです。

- ・ 港湾の施設の技術上の基準・同解説 平成30年 5月 日本港湾協会
- ・ 漁港・漁場の施設の設計参考図書 2023年版 水産庁
- ・ 水理公式集 平成11年版 土木学会
- ・ 海岸波動【波・構造物・地盤の相互作用の解析法】 土木学会/海岸工学委員会/研究現況レビュー小委員会
- ・ 港湾構造物の耐波設計
- ・ 海岸環境工学（海岸過程の理論・観測・予測方法）
- ・ 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第30巻, 第1号
- ・ 光易型方向スペクトルを用いた不規則波の回折・屈折計算, 港湾技研資料, No. 230
- ・ 浅海域における波浪変形計算法の拡張, 港湾技研資料, No. 767
- ・ 波の回折を考慮した多方向不規則波の変形計算モデルに関する研究, 土木学会論文集 No. 628
- ・ エネルギー平衡方程式法における反射計算の改良, 平成27年度第67回土木学会中国支部研究発表会発表概要集 pp. 75-76 (Ⅱ-3).
- ・ 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第3号