

任意反射率に対する湧出し分布法の拡張と 大規模構造物周辺の波浪解析への適用

泉宮 尊司*・加賀 良宏**・竹石 広***

1. 緒 論

近年、広範囲の海域の保全と有効利用という目的より、沖合人工島などの大水深海洋構造物の建設や計画が行われてきている。このような大型構造物建設による周辺海域への影響、特に波浪変形を予測することは、より重要度を増してきている。これまでの波浪解析法の多くは、人工島を完全反射として取扱ひ、それに働く波力や周辺の波高分布を求めている。

最近では、波力や反射率を低減するために、スリット式ケーソンや二重円筒ケーソン等種々の消波型ケーソンが開発されてきている（たとえば、谷本ら，1987，高橋ら，1992）。このような任意反射率の大規模海洋構造物周辺の波浪解析を行った研究は数少なく、Green 関数を用いた方法では殆ど存在しない。

そこで本研究では、任意形状で任意反射率の人工島周辺の波浪解析に適用できるように、従来の湧出し分布法の拡張を行う。この方法を用いて、種々の形状の人工島周辺の波高分布を計算し、形状の変化および反射率の変化による波高分布の変化について、定量的および定性的な比較・検討を行う。

2. 任意反射率に関する湧出し分布法の拡張

任意形状の鉛直柱状構造物周辺の波浪場解析法として、Issacson (1978) による vertical line Green function を用いた湧出し分布法が提案されている。この方法は、回折波のポテンシャルを 2 次元 Helmholtz 方程式の Green 関数と湧出し分布関数を用いて離散表示し、構造物側面における境界条件を用いて、湧出し分布関数を決定するものである。したがって、任意反射率の構造物周辺の波浪場解析を行うためには、構造物側面における境界条件を不透過条件でなく、任意反射率に関する関係式を用いて、湧出し分布関数を決定してやれば、目的が達成されることになる。

いま、構造物周辺の水深 h が一定とし、回折波のポテ

ンシャルを $\phi_s(x, y, z, t)$ とすると、

$$\phi_s(x, y, z, t) = \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \cdot \int_S f(X, Y) G(x, y; X, Y) \cdot e^{-i\sigma t} dS(X, Y) \dots \dots \dots (1)$$

と表される (Issacson, 1978)。ここに、 k は波数、 σ は角周波数、 (x, y, z) は回折波のポテンシャルを求める座標点、 (X, Y) は構造物側面上の座標点、 S は構造物側面の曲線座標、 $f(X, Y)$ は湧出し分布関数である。 $G(x, y; X, Y)$ は、Green 関数で次式で与えられる。

$$G(x, y; X, Y) = iH_0^{(1)}(kr)/4 \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $r = \sqrt{(x-X)^2 + (y-Y)^2}$ で、 $H_0^{(1)}(kr)$ は 0 次の第 1 種 Hankel 関数である。

ここで、図-1 に示すように構造物の側壁面を N 個に分割し、各線素分の中央点 (X, Y) にその線素分の湧出し強さを集中させて考えると、回折波ポテンシャルは、

$$\phi_s(x, y, z) = \frac{gk}{\sigma} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \sum_{n=1}^N f(X_n, Y_n) A_n(x, y) \dots \dots \dots (3)$$

と表される（たとえば、中村ら，1985）。ここに、 $\phi_s(x, y,$

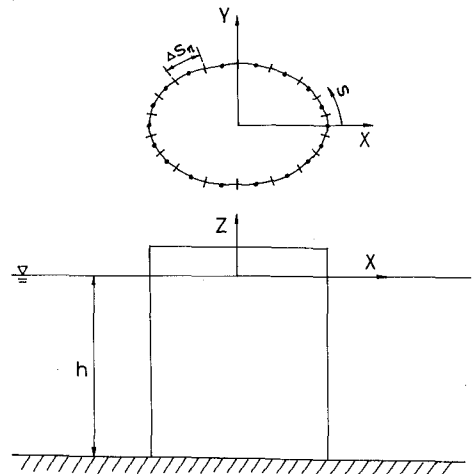


図-1 座標系の定義

* 正会員 工博 新潟大学助教授 工学部建設学科
 ** 秋田県
 *** 学生員 新潟大学大学院 工学研究科

2) は回折波の複素振幅関数であり, $A_n(x, y)$ は次式で与えられる.

$$A_n(x, y) = \int_{\Delta S_n} (i/4) H_0^{(1)}(kr) dS(X, Y) \dots\dots\dots (4)$$

ここで, 任意反射率に対する境界条件を考える. まず, 構造物の側面が滑らかな曲線でおおわれているとすると, 図-2 に示すように局所的に拡大して考えると, 構造物の壁面はほぼ直線で近似される. この時, 入射波が構造物に対して α なる角度で入射しているとする, 入射波および反射波は

$$\phi_I = (H/2) \exp[ik(s \sin \alpha + n \cos \alpha)] \dots\dots\dots (5)$$

$$\phi_S = (H/2) K_r \exp[ik(s \sin \alpha - n \cos \alpha)] \dots\dots\dots (6)$$

と表される. これらの式において, 鉛直分布関数等共通な項は省略して記述している. これらの n 方向の微分をとり, $n=0, s=0$ とおくことにより, 構造物上では次の関係式が満たされることになる.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{1-K_r}{1+K_r} (ik \cos \alpha) \phi \dots\dots\dots (7)$$

ここに, $\phi = \phi_I + \phi_S$ である. したがって, 上式の関係を満たすように, 湧出し分布関数を決定してやればよいことになる. 式 (3) および入射波のポテンシャルを上式に代入すると,

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N f(X_n, Y_n) \left[B_{mn} - \frac{1-K_r}{1+K_r} (k \cos \alpha_m) A_n(X_m, Y_m) \right] \\ = \frac{iH}{2} \left[\left(\sin \theta X_{sm} - \cos \theta Y_{sm} - \frac{1-K_r}{1+K_r} \cos \alpha_m \right) \right. \\ \left. \cdot e^{ik(X_m \cos \theta + Y_m \sin \theta)} \right] \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

なる関係式が得られる. 上式において, B_{mn} は次式で与えられる.

$$\begin{aligned} B_{mn} = \int_{\Delta S_n} \frac{k}{4r_{mn}} H_1^{(1)}(kr_{mn}) [(X_m - X_n) Y_{sm} \\ - (Y_m - Y_n) X_{sm}] dS(X_m, Y_m) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

ここに, (X_m, Y_m) は線素分 ΔS_m の中央の座標点, X_{sm}, Y_{sm} は, $dx_m/dS_m, dy_m/dS_m$ を示し, r_{mn} は (X_m, Y_m) と (X_n, Y_n) との距離を表す. 上式は, 被積分関数に特異点を含むので 0 近傍の漸化式により積分を評価した. B_{mn} の値が求まれば, 式 (8) より湧出し強度 $f(X_n, Y_n)$ を算

定することができる.

3. 大規模構造物周辺の波浪場解析への適用

任意反射率に対する湧出し分布法の拡張を行った本手法の適用性を調べるために, 種々の形状の大規模構造物周辺の波浪場解析を行った. 表-1 には, 本研究で行った計算の条件を示している. 形状については, 円筒, 長方形, 五角形および三角形の 4 種類とし, 水深は現実的な問題も考慮し, 一律 20 m とした. 波の周期は 8.0 s, 12.8 s および 14.0 s の 3 種類とし, 入射角については 0° および 45° の 2 種類とした.

まず, 計算プログラムの基礎的なチェックを行うために, 反射率を 1 にして円筒による回折計算を行った. その結果, 50 分割程度以上で厳密解 (MacCamy・Fuchs, 1954) と十分な精度で一致することが確かめられた.

図-3 は, 湧出し集中心数 88 とした場合の波高分布を示したものである. 左図が全側面反射率が 1 の場合で, 右図は波が直接作用する左半分のみを反射率 0.8 とした場合である. 完全反射のケースについては, 表-1 に示しているように, 最大波高および最小波高がそれぞれ 1.73 および 0.55 で, 厳密解の値にちょうど一致していた. 左半分の反射率を 0.8 にすると, 前面の最大波高が 1.60 と

表-1 計算条件

Case No.	形状	水深 D (m)	周期 T (s)	入射角 θ (deg)	反射率 K_r	最大波高 $H_{\max}/H_i$	最小波高 $H_{\min}/H_i$
1-1	円筒	20.0	8.0	0.0	1.0	1.73	0.55
1-2	円筒	20.0	8.0	0.0	0.8	1.60	0.53
1-3	円筒	20.0	8.0	0.0	0.5	1.38	0.51
2-1	長方形	20.0	12.7	0.0	1.0	2.03	0.76
2-2	長方形	20.0	12.7	0.0	0.8	1.86	0.74
2-3	長方形	20.0	12.7	0.0	0.5	1.62	0.69
3-1	五角形	20.0	8.0	0.0	1.0	1.83	0.28
3-2	五角形	20.0	8.0	0.0	0.8	1.71	0.28
3-3	五角形	20.0	8.0	0.0	0.5	1.49	0.26
3-4	五角形	20.0	8.0	45.0	1.0	2.26	0.13
3-5	五角形	20.0	8.0	45.0	0.8	2.02	0.30
3-6	五角形	20.0	8.0	45.0	0.5	1.64	0.42
3-7	五角形	20.0	14.0	0.0	1.0	1.45	0.66
3-8	五角形	20.0	14.0	0.0	0.8	1.40	0.64
3-9	五角形	20.0	14.0	0.0	0.5	1.33	0.62
4-1	三角形	20.0	8.0	0.0	1.0	1.93	0.31
4-2	三角形	20.0	8.0	0.0	0.8	1.79	0.33
4-3	三角形	20.0	8.0	0.0	0.5	1.59	0.31
4-4	三角形	20.0	14.0	45.0	1.0	1.94	0.53
4-5	三角形	20.0	14.0	45.0	0.8	1.80	0.60
4-6	三角形	20.0	14.0	45.0	0.5	1.56	0.72

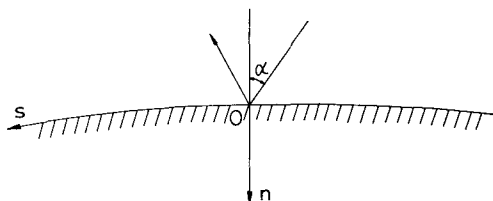
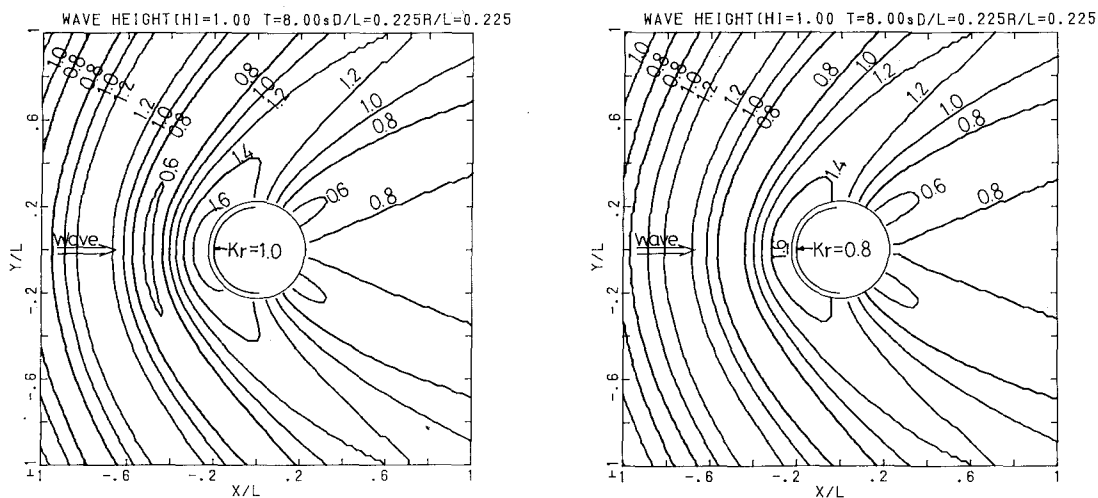
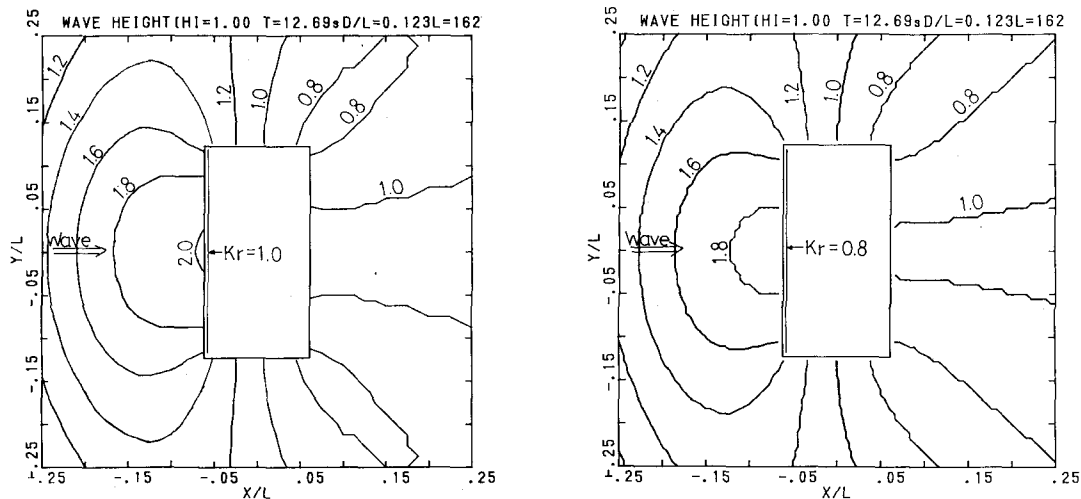


図-2 局所座標系

図-3 円筒型人工島周辺の波高分布 ($\theta=0^\circ$, 左図: $K_r=1.0$, 右図: $K_r=0.8$)図-4 長方形人工島周辺の波高分布 ($\theta=0^\circ$, 左図: $K_r=1.0$, 右図: $K_r=0.8$)

やや減少し、左半分の最小波高が0.6以下の所が消失しているのが分かる。これは、当然のことではあるが、反射波の振幅が減少したためである。一方、円筒背後の最小波高は、反射率を0.8にすると0.53となり(表-1参照)、完全反射の場合に比べて極わずかに小さくなっている。これは左前面からの反射・回折波の影響と考えられるが、その影響は極めて小さいといえる。

図-4は、周期12.7s、水深20mの場合の長方形人工島周辺の波高分布を示したものである。左図が完全反射、右図が前面のみ反射率0.8とした時の結果を示しており、分割数は60である。完全反射の場合では、前面の中央部に波高が2.0以上となる所が存在(最大波高2.03)し、沖側へ広がりながら波高が小さくなっている。また、

右側の2つの角点付近で波高が最小となっている。反射率を0.8とした場合では、全体的な波高分布のパターンはそれほど変化していないが、全体的に波高値がやや小さくなっている。前面の最大波高が1.86であり、半無限堤に対する理論値1.8に近くなっている。この微小な差異は、かど点や背後からの回折・反射波の影響であると考えられる。長方形人工島で直角入射の場合には、比較的長い反射面を持つことから、波高が1.5倍以上になる領域が大きく、周辺海域への影響が大きいことが分かる。

図-5に示されるような五角形人工島の場合には、波高分布が大きく変化し、反射率が1のとき、最大波高1.83、最小波高0.28であった。最小波高が現れるのは、背後のかど点近くで、最大波高は沖側前面に現れる。特

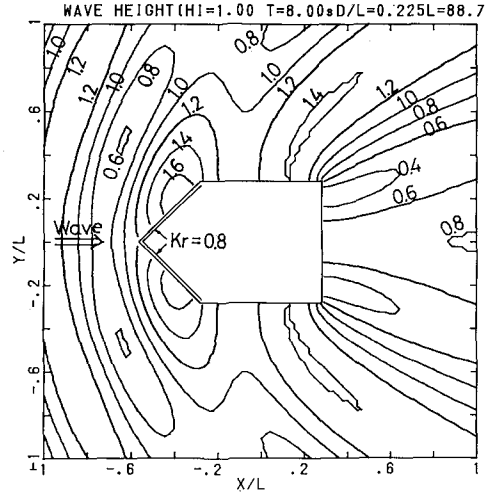
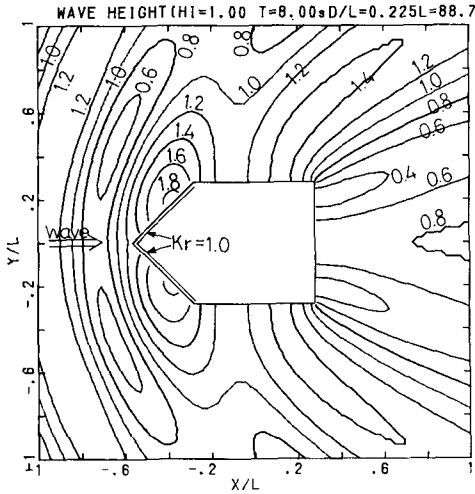


図-5 五角形人工島周辺の波高分布 ($\theta=0^\circ$, 左図: $K_r=1.0$, 右図: $K_r=0.8$)

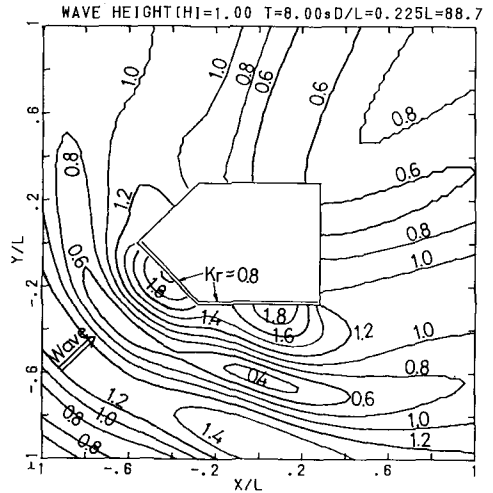
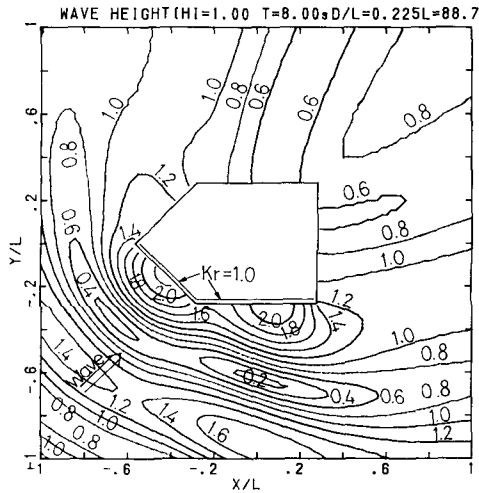


図-6 五角形人工島周辺の波高分布 ($\theta=45^\circ$, 左図: $K_r=1.0$, 右図: $K_r=0.8$)

に興味深いことは、 $X/L=0.2$ 付近の両側に波高が 1.4 以上になる所が出現し、その長さがおよそ人工島のサイズに匹敵することである。このような波高の高い部分がなぜ出現するかについては、右図の反射率を 0.8 とした場合の波高分布を見れば推測することができる。すなわち、右図では波高が 1.4 以上となる面積が著しく小さくなっていることから、沖側の斜めの部分で反射した波が回折して波高の高い部分を形成していたと推測される。

斜め 45° 入射の場合の波高分布は、図-6 に示されている。このケースでは、これまでのケースの中で最も影響の大きい結果となっている。すなわち、波高が 2.0 以上となる所が 2ヶ所あり、その前面では完全反射のときには、0.2 以下の波高を示す所も現れている。反射率を 0.8 と

しても、最大波高 2.02, 最小波高 0.30 と大きな変動を示している。したがって、沖合人工島を建設する際には、このような形状と波向きは避けた方がよいと言えよう。

三角形人工島の場合には、前の五角形人工島の波高分布のパターンと類似しているところが多い。図-7 に示されているように、両斜め前方に波高変化の激しい領域があり、反射率をやや小さくすると、その変化が若干緩和されていることが分かる。しかしながら、反射率を 0.8 程度に下げても、背後の波高が 1 よりも小さくなる領域では、ほとんど変化していないことが分かる。

4. 結 論

任意反射率に対する境界条件式を導き、それを満たす

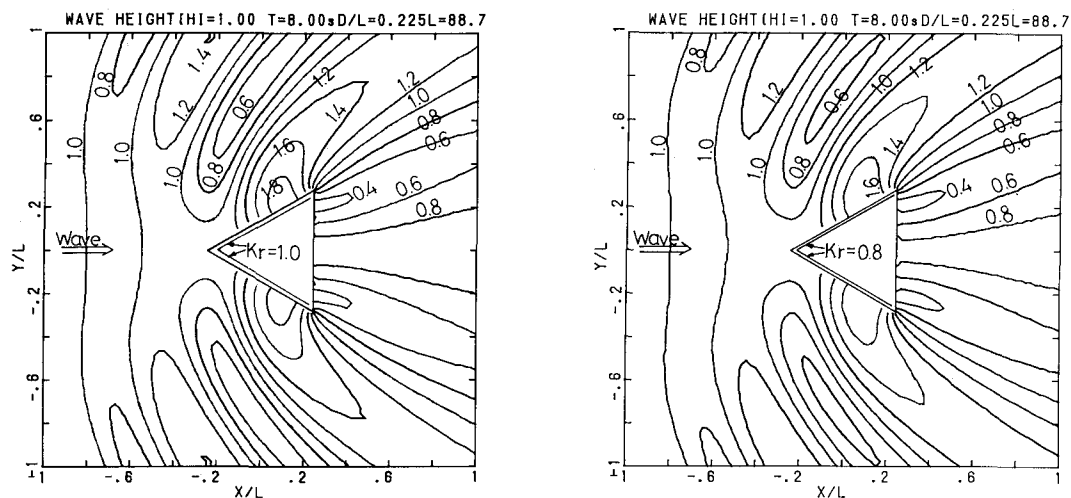


図-7 三角形人工島周辺の波高分布 ($\theta=0^\circ$, 左図: $K_r=1.0$, 右図: $K_r=0.8$)

ように湧出し強度を決定することにより、任意形状で任意反射率を有する大規模構造物周辺の波浪場解析が可能となった。

この計算手法では、構造物の一部の反射率を変化させると、構造物周辺のすべての湧出し強度が変化するが、波高分布は反射率を変化させた前面が有意に変化するだけで、下手側はほとんど変化しないことが分かった。

本手法を代表的な各種形状の人工島に適用し、波高分布の特徴的な変化について議論した。反射率が0.8程度であれば、四角形などの直線部分やかど点があるような形状よりも、円形のような滑らかな曲線があるほうが、波高変化が小さくて周辺に及ぼす影響も小さいことが分かった。

参考文献

- 高橋重雄・下泊建一郎・佐々木均・谷本勝利 (1992): 高波浪海域における直立消波ケーソンの耐波設計法, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 706-710.
- 谷本勝利・下泊建一郎・宮崎啓司 (1987): 二重円筒型波浪制御構造物に働く不規則波力, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 571-575.
- 中村孝幸・奥吉雄 (1985): 任意平面形状を有する堤体構造物まわりの波変形の解析法について, 第32回海岸工学講演会論文集, pp. 594-598.
- Issacson, M. Q. (1978): Vertical cylinders of arbitrary section in wave, J. of Waterway, Coastal and Ocean Eng. Div. ASCE, Vol. 104, No. WW4, pp. 309-322.
- MacCamy, R. C. and R. A. Fuchs (1954): Wave forces on piles; A diffraction theory, U. S. Army Corps of Engineers, Beach Erosion Board, Tech. Memo No. 69, pp. 1-7.