

透過潜堤上における波の碎波変形計算法

Somchai Rojanakamthorn*. 磯部 雅彦**. 渡辺 晃***

1. 序 論

海岸侵食制御と景観保全を主な目的として、最近再び潜堤が建設されるようになった。著者ら (Somchai ら, 1989) は透過潜堤による波浪制御効果を予測するための数値モデルとして、透水層上の緩勾配方程式を導き、その適用性を室内実験によって確認した。しかし、そこでは非碎波の場合のみが取り扱われており、潜堤の重要な機能の1つである碎波による波エネルギー減衰を除外していた。

本研究においては、透水層上の緩勾配方程式にエネルギー減衰項を含め、碎波減衰のモデル化を行うことによって、潜堤上での碎波を含む波浪変形にともなう生じる平面的波浪場の数値予測手法を開発した。また、岸沖1次元問題および平面2次元問題における計算結果を実験結果と比較し、モデルの適用性を検討した。

2. 碎波変形モデル

(1) 碎波減衰項を含む透水層上の緩勾配方程式

透過潜堤が設置されている場合のように、透水層が存在し、しかも透水層の上下の境界が緩勾配で傾いている場合の波浪変形の支配方程式、すなわち透水層上の緩勾配方程式は次のように表される (Somchai ら, 1989)。

$$\nabla_h(\alpha \nabla_h \hat{\eta}) + k^2 \alpha \hat{\eta} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\hat{\eta}$ は水面変動の複素振幅、 $\nabla_h = (\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は水平方向の微分演算子、また、

$$\alpha = \alpha_1 + \varepsilon (C_r - i f_p) \alpha_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\alpha_1 = \beta_1^2 h_1 [(\beta_1^2/2kh_1)\{1 - \exp(-2kh_1)\} - (\beta_1^2/2kh_1)\{1 - \exp(2kh_1)\} - 2\beta_2\beta_3] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\alpha_2 = (\beta_1^2 h_p/2)[1 + \sinh(2kh_p)/2kh_p] \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\beta_1 = [\varepsilon \exp(kh_1) \sinh(kh_p) - \delta \cosh(kh_1)]^{-1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\beta_2 = \varepsilon \exp(kh_1) \sinh(kh_p) - (1/2)\delta \exp(kh_1) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\beta_3 = (1/2)\delta \exp(-kh_1) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\delta = \varepsilon \sinh(kh_p) - (C_r - i f_p) \cosh(kh_p) \quad \dots\dots\dots (8)$$

である。ここに、 ε は空隙率、 C_r は質量係数、 f_p は線形抵抗係数、 h_0 および h_1 は透水層の上下面から測った水深であり、 $h_p = h_0 - h_1$ は透水層の厚さを表す。また、複素波数 $k = k_r - i k_i$ は次式によって決定される。

$$\sigma^2 = gk \frac{\varepsilon \exp(kh_1) \sinh(kh_p) - \delta \sinh(kh_1)}{\varepsilon \exp(kh_1) \sinh(kh_p) - \delta \cosh(kh_1)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 σ は角周波数、 g は重力加速度である。なお、線形抵抗係数 f_p は線形透水係数 K_p と乱流抵抗係数 C_f から等価仕事の原理によって、次のように計算される。

$$f_p = \frac{\left\{ \int_V \int_0^T \left(\frac{\varepsilon^2 \nu}{K_p} |u_s|^2 + \frac{\varepsilon^3 C_f}{\sqrt{K_p}} |u_s|^3 \right) dt dV \right\}}{\left\{ \sigma \int_V \int_0^T \varepsilon |u_s|^2 dt dV \right\}} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 ν は動粘性係数、 u_s は透水層内の実流速ベクトル、 V は透水層領域の体積、 T は波の周期である。

透水層上の緩勾配方程式 (1) に碎波などによるエネルギー減衰の影響を含めるために、次式のように修正する。

$$\nabla_h(\alpha \nabla_h \hat{\eta}) + (k^2 \alpha - i \sigma f_D) \hat{\eta} = 0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 f_D はエネルギー減衰係数である。後に明らかになるように、 f_D に α が乗じてあることにより、 f_D は実数値であって、エネルギー減衰の強さを表すことになる。

(2) 碎波減衰項の評価式

碎波によるエネルギー減衰係数の値を評価するため、まず、透水層が水平な場合について考察し、従来の不透過緩勾配上でのエネルギー減衰係数との関係を求める。

水平透水層に対しては α が一定であるため、式 (11) から除くことができる。すなわち、

$$\nabla_h \hat{\eta} + (k^2 - i \sigma f_D) \hat{\eta} = 0 \quad \dots\dots\dots (12)$$

となる。ここで、複素振幅を振幅 a と位相角 χ に分離し、

$$\hat{\eta} = a \cdot \exp(-i\chi) \quad \dots\dots\dots (13)$$

とおいて式 (12) に代入すれば、実数部および虚数部よりそれぞれ

$$\nabla_h \chi \cdot \nabla_h \chi = k^2 \{1 - (k_i/k_r)^2\} + (1/a) \nabla_h^2 a \quad \dots\dots\dots (14)$$

* 工修 東京大学大学院 土木工学専攻
 ** 正会員 工博 東京大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

$$\nabla_h(a^2 \nabla_h \chi) = -(2k_r k_i + \sigma f_D) a^2 \quad \dots\dots\dots (15)$$

を得る。式(14)で、振幅の2階微分を無視し、実波数 k_r に比べれば振幅減衰率 k_i が小さいとすれば、

$$\nabla_h \chi = (k_r \cos \varphi, k_r \sin \varphi) \quad \dots\dots\dots (16)$$

のように χ の勾配が波数ベクトルとなることがわかる。ここに、 φ は波向である。したがって、式(15)は、 $\mathbf{n}$ を波向方向への単位ベクトルとして、

$$\nabla_h(a^2 \mathbf{n}) = -(2k_i + \sigma f_D / k_r) a^2 \quad \dots\dots\dots (17)$$

となり、右辺の括弧内第2項が碎波減衰項を表す。碎波減衰項を含む従来の緩勾配方程式についても同様な表示を行えば、 f'_D をエネルギー減衰係数、 c_g を群速度として、

$$\nabla_h(a^2 \mathbf{n}) = -(f'_D / c_g) a^2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる。ここで、式(17)と式(18)を比較すれば、

$$f_D = (k_r / \sigma c_g) f'_D \quad \dots\dots\dots (19)$$

なる関係にあることがわかる。

ここで、 f'_D は従来 (Dibajnia ら, 1987) と同様に、

$$f'_D = \alpha_D \tan \beta \sqrt{\frac{g}{h'_1}} \sqrt{\frac{\gamma - \gamma_r}{\gamma_s - \gamma_r}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$\gamma = (|\hat{\eta}|/|h'_1|) \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\gamma_s = 0.4(0.57 + 5.3 \tan \beta) \quad \dots\dots\dots (22)$$

$$\gamma_r = 0.4(|\hat{\eta}|/|h'_1|)_b \quad \dots\dots\dots (23)$$

と評価する。ここに、 γ は振幅水深比である。なお、式(19)~(23)を用いて f_D を評価する際、 $\tan \beta$ 、 c_g のように水深を必要とする量が含まれる。ここでは、空隙部分の水を加えた実質水深を次式で定義して用いることにした。

$$h'_1 = h_1 + \varepsilon h_p \quad \dots\dots\dots (24)$$

(3) 碎波指標

現在までに種々の碎波指標が提案されているが、透水層上でしかも反射波が存在する場合に適したものは無い。そこで、実験結果から改めて求めることにした。実験においては、図-1 に示すように法面勾配 1/3 の潜堤を設置した。用いた砂利の寸法は 2.5 cm と 0.6 cm の2種類であり、それぞれ空隙率は 0.39 および 0.44 である。また、設置場所は 1/20 勾配斜面上および水平床上とした。

実験結果をとりまとめることにより、

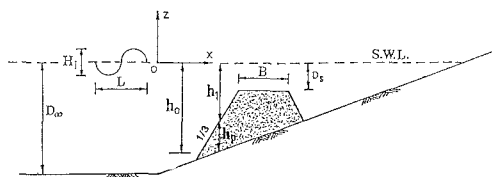


図-1 透過潜堤と記号の定義

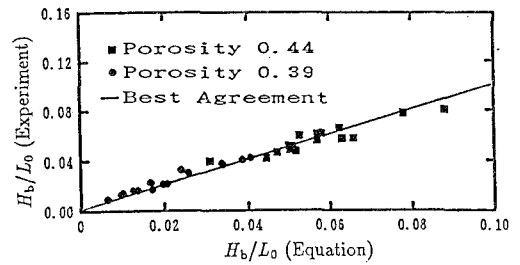


図-2 潜堤上での碎波条件

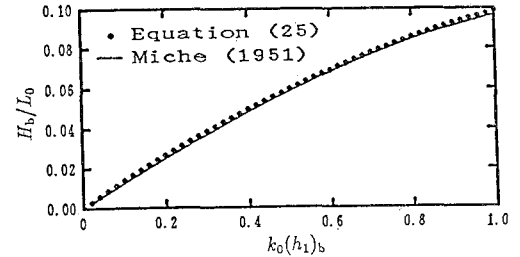


図-3 潜堤上での碎波条件と Miche の碎波条件との比較

$$H_b/L_0 = 0.127 \tanh \{k_0(h_1)_b\} \quad \dots\dots\dots (25)$$

なる碎波条件式を得た。ここに、 H_b は碎波波高、 L_0 は深海波の波長、 k_0 は深海波の波数であり、 $(h_1)_b$ は潜堤表面の碎波水深である。式(25) (横軸) と実験結果 (縦軸) との比較を示すのが図-2 であり、両者の一致度が高いことは、碎波に対しては潜堤上の水深が有効になることを示している。

式(25) と Miche (1951) による碎波点での波長 L_b と波数 k_b を用いた固定床上的碎波条件式

$$H_b/L_b = 0.142 \tanh \{k_b(h_1)_b\} \quad \dots\dots\dots (26)$$

とを比較した結果が図-3 に示されているが、実質的に両者の違いはないことがわかる。ただし、透水層上では k_b の物理的意味が不明であることと数値計算の簡便化のため、数値モデルにおいては式(25)を用いることにした。なお、Miche の碎波限界式は水平床に近い条件で成り立つものである。本研究の範囲でもこれとほぼ同じ碎波条件式が得られたのは、透過潜堤では緩勾配固定床の場合と同様に反射率が小さいことによるものであると考えられる。

3. 実験

(1) 断面2次元実験

図-4 に示す長さ 23 m、幅 0.8 m、深さ 1 m の不規則波造水路を用いて岸沖断面2次元の実験を行った。1/20 の一樣勾配斜面の端から 2 m の所から、粒径 2.5 cm の砂利を用いて法面勾配 1/3 の透過潜堤が設置されている。これに潜堤上で碎波するような規則波および不規則

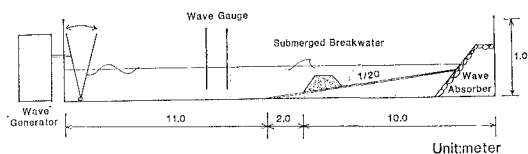


図-4 2次元不規則波造波水路

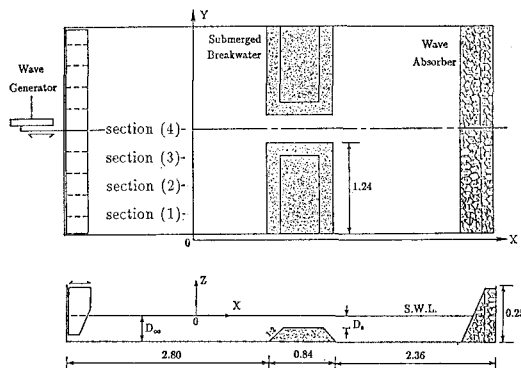


図-5 平面造波水槽

波を作用させ、水路中央に沿った波高分布を容量式波高計によって測定した。潜堤の天端幅 B は 10, 30, 235, および 325 cm であり、碎波が起こるように水深と入射波条件を調整した。実験ケース数は規則波および不規則波に対してそれぞれ 33 および 10 である。

(2) 3次元実験

屈折・回折も透過潜堤による波浪変形の重要な要素である。これは、Costa・Perestrelo (1959) や Mobarek (1962) によって指摘されたように、波浪エネルギーをある領域に集中させ、逆に港口などのエネルギーを減じることに利用可能である。

透過潜堤による屈折・回折・碎波変形を調べるため、平面水槽を用いた実験も実施した。図-5に示すように、水槽は長さ 6 m, 幅 2.9 m, 深さ 25 cm であり、一端にフラップ型の規則波造波装置、多端には消波装置がついている。水槽中に 0.6 cm の砂利によって高さ 8 cm, 幅 52 cm, 法面勾配約 1/2 の透過潜堤を設置し、中心部 50 cm を開口部とした。これに規則波を作用させた場合の 20 cm 間隔の水面変動の分布を、8 本の容量式波高計を移動させて測定した。実験ケースは入射波の波高と周期を変化させた 7 ケースである。

4. 数値計算の方法

(1) 岸沖1次元計算

a) 規則波

式(11)を1次元に単純化したものを用いて、透過潜堤による規則波の浅水・碎波変形を計算した。この計算は前報 (Somchai ら, 1989) に比べて碎波減衰項が加わった

だけであり、境界条件や差分式とその解法は同じである。ただし、 f_D を収束させるための繰返し計算において、碎波位置と碎波減衰係数 f_D も前ステップにおける解を用いて再計算し収束させていく。このとき、 f_D の急激な変化にともなう反射は碎波については現実的でないもので、これを減じるため、 f_D の値は碎波点から碎波水深の2倍の距離の地点に向かって、直線的に増加させるようにした。また、 f_D の値は全領域で一定値として、全領域の平均値を用いた。

なお、ここでの計算は線形理論に基づいたものであるため、碎波直前において波高を過小評価する傾向があり、これと式(25)で表される碎波波高の実験式とを組み合わせると、碎波点を若干岸側に評価することになる。この点で、渡辺ら(1983)による流速波速比を用いた碎波条件の定式化を応用するのがよいが、現在の所、反射波が含まれる場合の適用に問題があるため、暫定的に波高を用いた定式化を用いた。実際には法面勾配が大きいののでこれによる碎波点のずれはわずかである。

b) 不規則波

不規則波の取扱いにはスペクトル解析法と波別解析法がある。このモデルでは碎波という非線形現象が取り入れられているので、線形重ね合わせを基本とするスペクトル解析法は不適当であるため、波別解析法を用いる。

まず、入射波の水面変動から、ゼロダウクロス法によって、個別波の波高および周期を定義した。それぞれの個別波について、規則波としての変形計算を行い、結果を集計して有義波高などを求めた。なお、不規則波の碎波波高は規則波のものに比べて小さいことが実験的に知られているので、ここでの計算では Isobe (1987) に倣い、式(25)の値を 0.8 倍して用いた。

(2) 平面2次元計算

平面的な波浪場の計算には式(11)を2次元のままで解く必要があり、中央差分によりこれを差分化した。境界条件のうち沖側におけるものは岸沖1次元の場合と同じである。岸側の境界については、実験条件に類似させて消波装置に相当するエネルギー減衰帯を設け、その外側で完全反射とすることによって、実験値に近い反射率を実現した。また、側面の境界条件は完全反射の条件である。

数値計算においては1次元の場合と同様に、 f_D と f_p に関する繰返し計算が必要となる。ただし、ここでの f_D の値は各地点ごとの鉛直断面平均値とした。また、碎波条件の判定に関しては、岸沖方向の各測線に沿って、1次元問題と同様に振幅水深比を碎波条件式と比較することによって、

5. 計算結果と実験結果との比較

(1) 岸沖1次元波浪場

潜堤による波高減衰は実用上非常に重要な要素である。実験結果においては潜堤を通過した波には分裂現象がみられ、1周期内に2～3個の波がみられるようになってしまうため、波高が波エネルギーを代表する量とは言えなくなる。そこで、図-6では水面変動の rms_2 値の岸沖分布を表している。図中、 H_t および T は規則波の入射波高と周期を表し、 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は不規則波の有義波高および有義波周期を表す。また、 D_∞ および D_s はそれぞれ沖側一様水深および潜堤上の水深を表し、

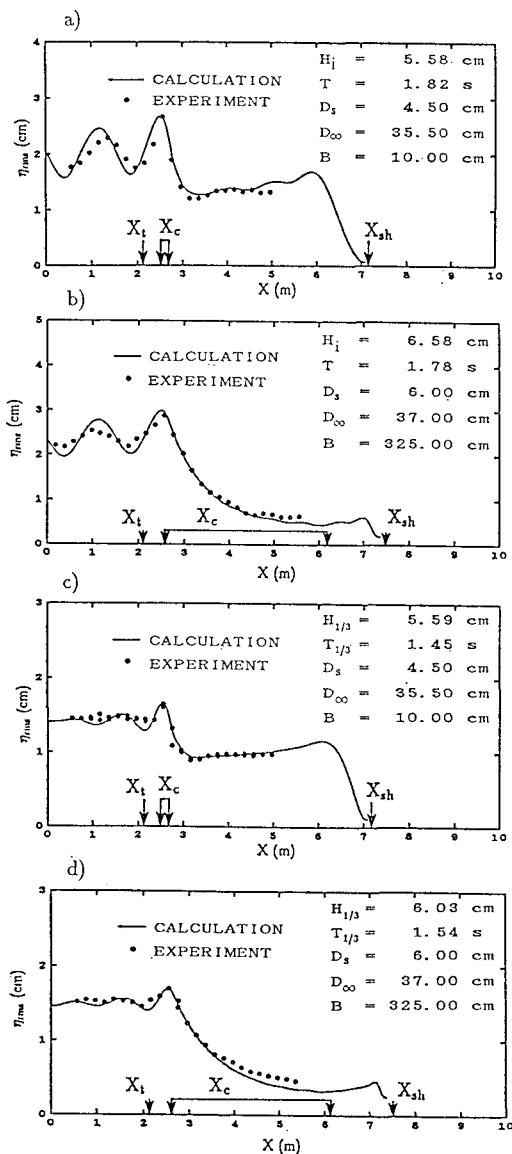


図-6 水面変動の rms 値の岸沖分布の計算値と実験値との比較 (a, b: 規則波, c, d: 不規則波)

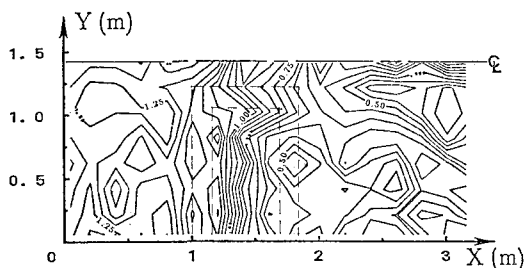


図-7 水面変動の rms 値の平面分布 (測定値)

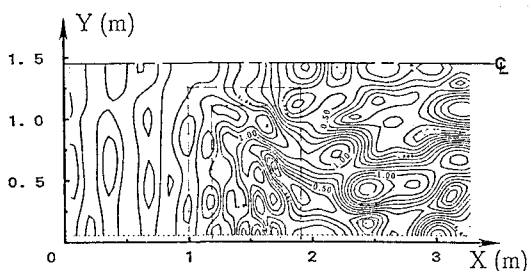


図-8 水面変動の rms 値の平面分布 (計算値)

X_t および X_c は潜堤の法先および法肩の位置、さらに X_{sh} は汀線の位置を示している。

図より、潜堤を通過する間にエネルギーが急激に失われることがわかる。これは、透水層と碎波の両方によって起こるものであり、潜堤上の水深が小さいほどエネルギーの減衰が激しい。

なお、数値計算において K_p および C_f の値については、Sollitt ら(1972)の実験結果より $K_p = 3.77 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$ とし、 $C_f = 0.332$ とした。また、 C_r の値は、Sollitt ら(1972) および Madsen (1974) と同様に 1 とした。

図-6 では水面変動の rms 値(不規則波の計算値では、周期で重みをつけた 100 波分の個別波の値の平均)の分布の計算値と実験値が比較されている。図中の線が数値計算結果を表している。いずれもよい一致を示し、実質水深の定義を含めた碎波モデルが、エネルギー減衰を評価するために妥当なものであることを示している。

(2) 平面2次元波浪場

図-7 は水面変動の rms 値の分布を示す 1 例である。図からわかるように、波エネルギーは屈折・回折の影響により潜堤の後方に集まる傾向がある。これは、浅瀬による集波作用と似た現象であり、潜堤上におけるエネルギー減衰の大きさなどによって、開口部と潜堤背後のどちらが波高が大きくなるかが決まる。

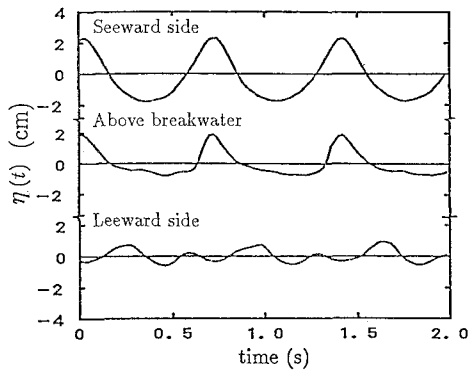
数値計算においては、0.6 cm の砂利に対応して $K_p = 2.06 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2$ および $C_f = 0.428$ とした。また、岸側境界からの反射率は 10% 以下である。

図-8 には水面変動の rms 値の計算値の分布を示し、さらに図-9 には代表的な測線について計算値と実験値

との比較例を示す。両者の一致は沖側から潜堤上まで良好であるといえるが、潜堤背後については良くない。図—10に示すように、実験においては潜堤背後での波の分裂現象によって周期が変化してしまう。しかし、計算では同一周期の正弦波であることになるので、屈折・回折現象そのものや透過波と回折波の相互干渉などが正確に評価されない。そのために一致度が悪くなるのである。そこで、一つの試みとして、潜堤背後の1波長分の領域において波数を線形的に3倍に増加させて計算した結果が図—9の点線で示されているが、実験値との一致度は向上する。

6. 結論および今後の課題

透水層上の緩勾配方程式に碎波モデルを組み込むこと



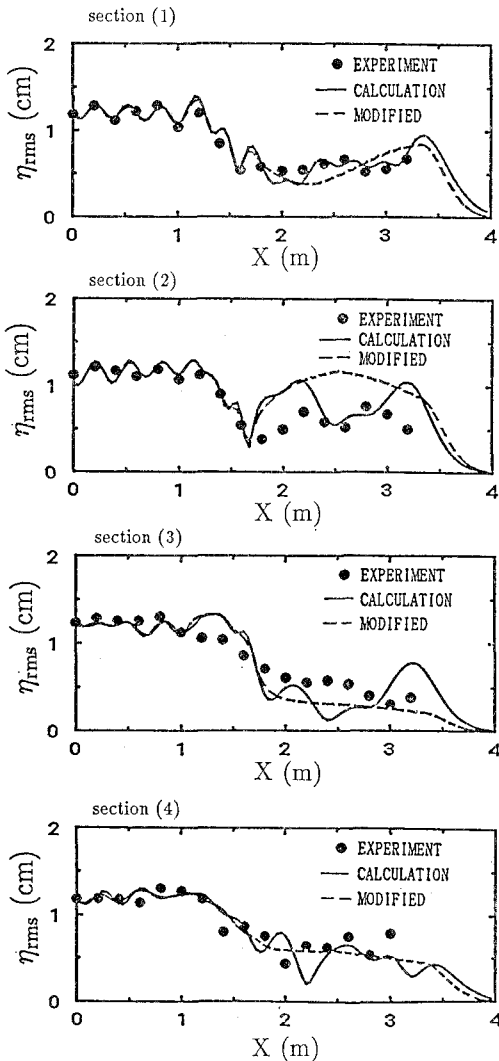
図—10 測定された水面変動波形

により、透過潜堤による波浪の屈折・回折・碎波変形の数値計算ができるようにした。碎波条件については実験結果を整理した実験式を求めたが、これは不透透底面上における Miche (1951) の碎波条件とほぼ一致した。また、エネルギー減衰係数については従来のものを準用した。

岸沖1次元問題について計算結果と実験結果とを比較したところ、規則波・不規則波のどちらに対しても水面変動の rms 値について良い一致が得られた。しかし、平面2次元問題については、潜堤上まではある程度の一致が得られるものの、潜堤背後では一致が悪くなる。これは実現象での波の分裂による周期の変化が数値モデルに取り入れられていないためであり、今後モデルの改良をする必要がある。

参考文献

- 渡辺 晃・原 哲・堀川清司 (1983): 重合した波浪場における碎波について, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 5~9.
- Costa, F. V., and J. F. Perestrelo (1959): Modification of the sea bed with a view to concentration and dispersal of sea water, Dock and Harbour Authority, 39, pp. 305~306.
- Debjania, M.・渡辺 晃 (1987): 波浪場と海浜縦断数値計算モデル, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 291~295.
- Isobe, M. (1987): A parabolic equation model for transformation of irregular waves due to refraction, diffraction and breaking, Coastal Eng. in Japan, Vol. 30, No. 1, pp. 33~48.
- Miche, R. (1951): Le pouvoir réfléchissant des ouvrages maritime exposés à l'action de la houle, Annales Ponts et Chaussées, 121^e Année, pp. 285~319.
- Madsen, O. S. (1974): Wave transmission through porous structure, J. Waterways, Harbors and Coastal Eng. Division, Proc. ASCE, Vol. 100, pp. 169~188.
- Mobarek, I. (1962): Effect of bottom slope on wave diffraction, Univ. Calif., IER, Tech. Report 89-8.
- Sollitt, C. K. and R. H. Cross (1972): Wave transmission through permeable breakwaters, Proc. 13th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1827~1846.
- Somchai Rojanakamthorn・磯部雅彦・渡辺 晃 (1989): 透過潜堤による波浪変形の解析モデル, 海岸工学論文集, 第36巻, pp. 643~647.



図—9 岸沖方向の測線に沿った水面変動の rms 値の分布の比較