

部分重複波の碎波限界に関する実験的研究

岩田 好一朗*・清野 博**

1. 緒 言

海岸工学の諸問題において、最大波高つまり碎波波高を正確に予測することはきわめて重要である。構造物前面水域に形成される完全重複波の碎波限界に関する研究のうち、規則波を取り扱ったものとしては、Penney & Price¹⁾、岸²⁾、Wiegel³⁾、合田ら⁴⁾の研究が代表的である。しかし、部分重複波の碎波については、規則波についても充分検討がなされていないのが現状と言える。

本論では、規則波を取り扱い、構造物前面水域に形成される部分重複波の碎波を水理実験により明らかにするとともに、既存の碎波限界式を利用して、簡易な形の碎波限界式の提案を試みようとするものである。

2. 碎波限界波形勾配に関する予備的な検討

碎波はいうまでもなく、非線型性の強い現象であるが本論では大胆ではあるが、部分重複波の波形 η は入射波 η_I と反射波 η_R の非線型干渉項を無視した式 (1) に示す 2 次の有限振幅波⁵⁾ として近似できるものとして論議をすすめる。

$$\eta = \eta_I + \eta_R = a_1 \cos(kx - \sigma t) + a_2 \cos 2(kx - \sigma t) + b_1 \cos(kx + \sigma t) + b_2 \cos 2(kx + \sigma t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta_I &= a_1 \cos(kx - \sigma t) + a_2 \cos 2(kx - \sigma t) \\ \eta_R &= b_1 \cos(kx + \sigma t) + b_2 \cos 2(kx + \sigma t) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= ka_1^2 \cdot \left(\frac{1}{4}\right) (3 \coth^3 kh - \coth kh) \\ b_1 &= K_R a_1 \\ b_2 &= a_1^2 K_R^2 \cdot k \left(\frac{1}{4}\right) (3 \coth^3 kh - \coth kh) \\ \sigma^2 &= gk \tanh kh \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

上式で、 a_1, a_2, b_1, b_2 : 振幅、 $\sigma (=2\pi/T)$: 角周波数、 T : 周期、 $k (=2\pi/L)$: 波数、 L : 水深 h における波長、 x : 入射波の進行方向を正軸とする水平距離、 t : 時間、 g : 重力加速度、 $K_R (=b_1/a_1)$: 一次の入射波の振幅 a_1

に対する一次の反射波の振幅 b_1 の比である。

2.1 波峰の水平方向の移動速度

いま、 $t=t_0, x=x_0$ で波形が空間的に極値をとったとする。式 (1) より、次式を得る。

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x}\right)_{x=x_0} &= -a_1 k \sin(kx_0 - \sigma t_0) \\ &\quad - 2a_2 k \sin 2(kx_0 - \sigma t_0) \\ &\quad - b_1 k \sin(kx_0 + \sigma t_0) \\ &\quad - 2b_2 k \sin 2(kx_0 + \sigma t_0) = 0 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

この極値が、 $t=t_0+\Delta t$ に $x=x_0+\Delta x$ に移動したとする。式 (4) より、次式が成立することになる。

$$\begin{aligned} &-a_1 k \sin\{k(x_0+\Delta x) - \sigma(t_0+\Delta t)\} \\ &-2a_2 k \sin 2\{k(x_0+\Delta x) - \sigma(t_0+\Delta t)\} \\ &-b_1 k \sin\{k(x_0+\Delta x) + \sigma(t_0+\Delta t)\} \\ &-2b_2 k \sin 2\{k(x_0+\Delta x) + \sigma(t_0+\Delta t)\} = 0 \\ &\dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

式 (5) を (t_0, x_0) のまわりに Taylor 展開し、一次の微係数まで採用し、極大値を与える条件 (式 (6)) と式 (4) を用いると、波峰の水平方向 移動速度 C_0 は式 (7) で与えられる。

$$\begin{aligned} \cos(kx_0 - \sigma t_0) &= \cos 2(kx_0 - \sigma t_0) \\ &= \cos(kx_0 + \sigma t_0) = \cos 2(kx_0 + \sigma t_0) = 1 \dots\dots (6) \end{aligned}$$

$$C_0 = \frac{\Delta x}{\Delta t} = C \left(\frac{a_1 - b_1 + 4a_2 - 4b_2}{a_1 + b_1 + 4a_2 + 4b_2} \right), \quad C = \frac{\sigma}{k} \quad \dots\dots\dots (7)$$

なお、式 (7) の C は進行波の波速である。後述の碎波限界式に、波峰の無次元水平方向移動速度を使用するので、本論では、式 (8) で波峰の無次元水平方向移動速度 C^* を定義する。

$$C^* = \frac{C_0}{C} = \left(\frac{a_1 - b_1 + 4a_2 - 4b_2}{a_1 + b_1 + 4a_2 + 4b_2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

式 (8) に示すように、 $b_1=b_2=0$ の時は進行波のみ存在する場合で、 $C_0=C$ 、つまり $C^*=1$ となる。また、完全重複波の場合 ($a_1=b_1, a_2=b_2$) は $C^*=0$ となり、波峰は水平方向には移動しないことになる。従って、部分重複波の波峰の無次元水平方向移動速度 C^* は $0 < C^* < 1$ の値をとることになる。このように、 C^* は部分重複波の重複度合を与える重要な一指標であることが理解で

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 日立造船株式会社 土建計画部

きる。式(8)で二次項を省略すると、

$$C^* = \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1} = \frac{1 - K_R}{1 + K_R} \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。なお、 $K_R = b_1/a_1$ であり、微小振幅波に対する反射率である。従って、微小振幅波の取り扱いをする限りは、反射率 K_R と無次元水平方向移動速度 C^* は極めて簡単な関数関係で表示できることが判明する。

2.2 砕波限界波形勾配

本論では、既存の限界波形勾配の理論式と C^* を用いることにより、簡便な限界式の提案を行なう。

上述したように、 $C^*=1$ の時は進行波になるので、進行波の限界波形勾配の式として、式(10)の Miche⁶⁾ の式を採用する。また、 $C^*=0$ の時は完全重複波となるので、砕波限界波形勾配として、式(11)の Wiegel の式を採用する。

$$H_b/L_b = 0.142 \tanh(2\pi h_b/L_b) \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$H_b/L_b = 0.218 \tanh(2\pi h_b/L_b) \quad \dots\dots\dots (11)$$

なお、式(10)と式(11)で、 H : 波高、下付添字 b は砕波を示す。

本論では、部分重複波の砕波限界は式(10)と式(11)の中間的な形になると考える。つまり、式(10)と式(11)では、 $\tanh(2\pi h_b/L_b)$ の係数のみが異なっていることから、ここでは、この係数が波峰の無次元水平方向移動速度 C^* に比例して変化すると仮定する。

つまり、部分重複波の砕波限界波形勾配を次式のように与える。

$$H_b/L_b = (0.218 - 0.076C^*) \tanh(2\pi h_b/L_b) \quad \dots\dots\dots (12)$$

この式(12)の妥当性については、水理実験により検討していく。

3. 水理実験

3.1 実験装置と実験方法

実験は、名古屋大学工学部土木工学科にある片面ガラス張りの二次元鋼製造波水槽(長さ 22m×高さ 0.95m×幅 0.70m)で行なわれた。水槽を木製の隔壁板により長さ方向に2分割し、ガラス面のある水路に反射板を設けて部分重複波の砕波が発生するようにした。もう一方の水路は入射波がそのまま通過するようにしてある。静水深は造波板前面部で 58cm とした。造波板から約 6m 離れた地点から前端部が 1/9 の勾配を持つ高さ 25cm、長さ約 15m の小段を設置し、小段の始端部から約 4m 離れた地点に反射板を設置した。反射板の設置位置での水深は 33cm である。

発生波の周期(T)は6種類($T=0.70$ 秒, 0.85 秒, 1.00 秒, 1.15 秒, 1.30 秒, 1.45 秒)であり、それぞれの周期に対して反射板の空隙率を変えて部分重複波の砕波を生起させた。Case-I の実験シリーズは、反射板のない進行波のみの砕波の実験、Case-II, III, IV の実験シ

ーズは、おのおの不透過板、縦横 2cm 間隔で d (直径) $=0.6$ cm の穴を持つ空隙率 7.1% の木製多孔板、縦横 2.5cm 間隔で $d=1.8$ cm の穴を持つ空隙率 40.7% の木製多孔板による部分重複波の実験である。砕波状況は 16mm 高速シネカメラ(50 コマ/秒)で撮影した。

また、発生波(造波板前面部)、入射波と部分重複波(小段上)は6台の電気容量式水位計で計測し、すべて磁気テープに記録した。

実験は、まず反射板を取り除いた状態で波を発生させ波形が整った時点で反射板を設置した。そして、砕波がほぼ定常になってから計測を開始し、計測第1波が造波板で反射し再入射する前に計測を終了した。

3.2 解析方法

砕波地点、砕波波高 H_b 、砕波波長 L_b 、波峰の水平方向の移動速度 C_0 などの砕波点での波の特性諸量は 16mm フィルムをフィルム・モーションアナライザーで解析して求めた。なお、 H_b と L_b は原則として zero-upcross 法で定義したが、撮影の都合で zero-upcross 法で定義できない場合は zero-downcross 法で定義した。(図-1 参照)。

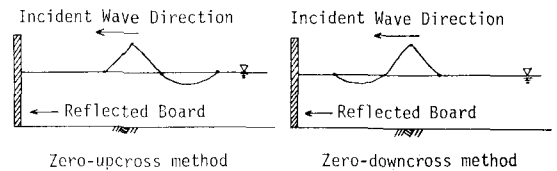


図-1 波の定義法

実験は砕波現象を対象としているので、規則波を造波させたにもかかわらず、波形は必ずしも同一でなく波形の再現性が乏しい場合が多く認められた。このため、Case-I の実験を除き、他の Case-II~IV の実験シリーズでは、連続3波を取り出し解析した。

式(8)と式(9)の a_1 , b_1 , a_2 , b_2 の推算を下記の方法で行なった。 a_1 と b_1 は以下に述べる実測空間波形より算定し、 a_2 と b_2 は実測値 a_1 と b_1 と式(3)を用いて決定した。 a_1 と b_1 の算定法を述べる。実験波形につ

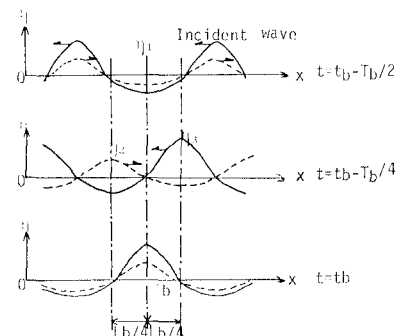


図-2 重複波形の説明図

き合わせるため、 x の正軸を便宜上反射波の進行方向とする。いま、 $x=x_b, t=t_b$ で砕波が生じたとする。[$x=x_b+L_b/4, t=t_b-T_b/4$], [$x=x_b-L_b/4, t=t_b-T_b/4$] と [$x=x_b, t=t_b-T_b/2$] における水位変動をそれぞれ η_3 , η_2 と η_1 とする (図-2 参照)。 $x=x_b, t=t_b$ で入射波と反射波の峰の位相が重なって砕波したと仮定すると、式 (1) と式 (7) より次式を得る。

$$a_1 = \frac{1}{2}(\eta_3 - \eta_1), \quad b_1 = \frac{1}{2}(\eta_2 - \eta_1) \dots\dots\dots (13)$$

$$K_R = b_1/a_1 = (\eta_2 - \eta_1)/(\eta_3 - \eta_1) \dots\dots\dots (14)$$

なお、式 (14) の K_R は Healy⁷⁾ の方法で求めた値と必ずしも一致しない。

4. 実験結果とその考察

4.1 波峰の無次元水平方向移動速度 C^*

波峰の無次元移動速度 C^* の計算値と実測値の比較を

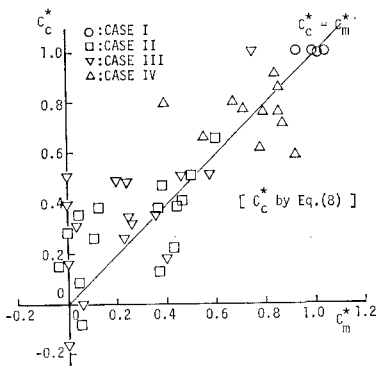


図-3 計算値 (C_c^*) と実測値 (C_m^*) の比較 (式 (8) を使用)

示したのが 図-3 と 4 である。同図によると、進行波の砕波 (図中○印) の場合はほぼ $C^*=1$ となっている。そして、実験値に多小のばらつきはあるものの、反射率の小さい Case-IV の砕波 (図中△印)、反射率の大きい Case-III (図中▽印) の砕波、不透過板を使用した Case-II (図中□印) の砕波の順で、ほぼ C^* が減少し、完全重複波に近い状態ほど C^* が小さくなることが認められる。同図に示すように、計算値と実験値の対応性は比較的良好だが、式 (8) を用いても式 (9) を用いても大差はない。このことは、砕波のような非線型性の強い現象において、波形をただかき式 (1) 程度の表示では、微小振幅波表示と差がないことを示している。

4.2 砕波限界波形勾配

図-5 は C^* をパラメーターにして H_b/L_b と h_b/L_b の関係を示し、図-6 は $(H_b/L_b)/\tanh(2\pi h_b/L_b)$ と C^* の関係を示したものである。砕波時の波を扱っているの

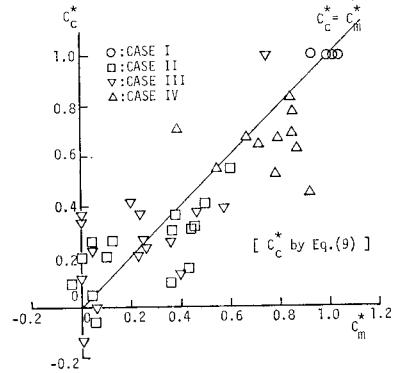


図-4 計算値 (C_c^*) と実測値 (C_m^*) の比較 (式 (9) を使用)

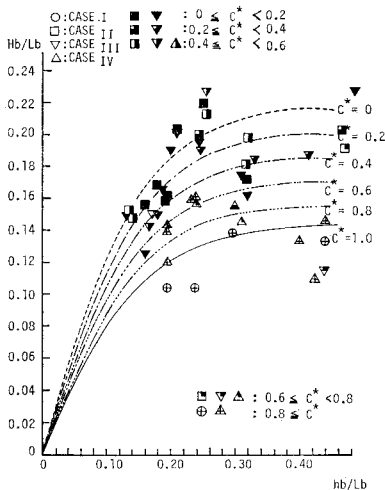


図-5 H_b/L_b と h_b/L_b の関係

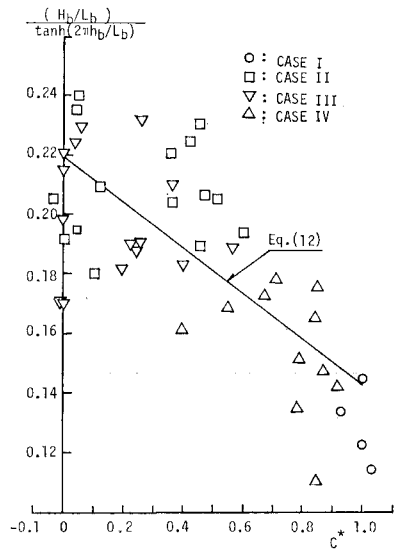
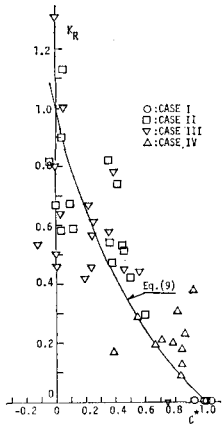
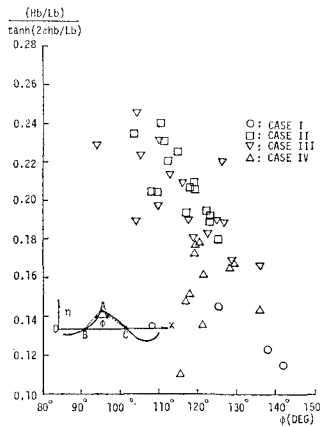


図-6 $(H_b/L_b)/\tanh(2\pi h_b/L_b)$ と C^* の関係

図-7 K_R と C^* の関係図-8 砕波波頂角 ϕ と $(H_b/L_b)/\tanh(2\pi h_b/L_b)$ の関係

で、実験値はかなりばらついてはいるが、 C^* が大きくなるにつれて $(H_b/L_b)/\tanh(2\pi h_b/L_b)$ が小さくなり、完全重複波型砕波から進行波型砕波に移行していく事が理解できる。また、提案された式(12)は実験値の平均的な値を与えており、式(12)で部分重複波の限界波形勾配の概略値の推算は可能である。なお、式(12)の C^* の計算に際して、実験値 C_0 を使用した。

また、図-7に示すように、 $C^* = (1 - K_R)/(1 + K_R)$ (式(9))の関係はほぼ成立するので、図-2と図-3の結果とも合わせると、式(12)の代りに、式(15)で限界波形勾配 H_b/L_b の推算は可能であると考えられる。

$$\frac{H_b}{L_b} = \left\{ 0.218 - 0.076 \cdot \left(\frac{1 - K_R}{1 + K_R} \right) \right\} \cdot \tanh(2\pi h_b/L_b) \quad \dots\dots\dots (15)$$

4.3 砕波波頂角

Stokes⁸⁾は進行波の砕波波頂角 ϕ は 120° になること、Penney & Priceは重複波の砕波波頂角 ϕ は 90° になることを明らかにした。部分重複波の砕波波頂角 ϕ に関する理論解析値がないので、本実験で得られた実験結果を記しておく。図-8に示すように、砕波波頂角 ϕ は 90° から 140° の間に存在し、 $(H_b/L_b)/\tanh(2\pi h_b/L_b)$ が大きくなるにつれて砕波波頂角 ϕ は小さくなる。つまり、進行波の砕波に近づくとき ϕ は Stokes の解析値の 120° 近傍の値となり、逆に完全重複波型砕波に近づくにつれて ϕ は Penney & Price の解析値の 90° に近い値となる。なお、砕波瞬時の波頂近傍の局所的な波頂角

ϕ を 16mm フィルムの写真から解析するとかかなり主観が入るので、本論では図-8中に示すように、波頂角 ϕ は波頂(A点)と波面がその前後で静水面と交差する2地点(B, C点)の作る角 $\angle BAC$ として定義した。従って、必ずしも真の砕波波頂角になっていないことに注意して頂きたい。

5. 結 言

本論では、規則波の部分重複波の砕波限界を、主として、水理実験結果に基づいて論議してきた。本論で提案した式(12)で砕波限界波形勾配 H_b/L_b の概略値は充分推算できることを明らかにした。今後、さらに検討を加え、精度高い部分重複波の砕波限界式の提案を行なう所存である。

最後になるが、本研究は、文部省科学研究費・自然災害特別研究(1)「反射波災害の防止工法の研究」(代表者: 名大・岩田好一郎)と「河川河口部における洪水災害の特性に関する研究」(代表者: 大阪大学・室田 明教授)の研究助成金を受けて行なわれた研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Penney, W. G. and A. T. Price: Finite periodic stationary gravity waves in a perfect liquid, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, Vol. 244, 882, pp. 254~284, 1952.
- 2) Kishi, T.: The possible highest gravity waves in shallow water, Coastal Eng. in Japan, Vol. 2, pp. 9~16, 1959.
- 3) Wiegel, R. L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, p. 23, 1964.
- 4) 合田良実・柿崎秀作: 有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 5, No. 10, pp. 1~57, 1965.
- 5) Goda, Y. and Y. Abe: Apparent coefficient of partial reflection of finite amplitude waves, Rept. P.H. R.I., pp. 3~58, 1968.
- 6) Miche, A.: Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. Forme limit de la houle lors de son déferlement: Application aux digues maritimes, Ann. Ponts et Chaussée, Tom 114, 1944.
- 7) Healy, J. J.: Wave damping effect on beaches, Proc. Minnesota Inst. Hydr. Conv., pp. 213~220, 1953.
- 8) Stokes, G. G.: On the change of oscillatory waves, Trans. Cambridge Phil. Soc., Vol. 8, 1847.