

鉛直壁を持つ海域制御構造物の壁面での部分重複波の水面変動と反射率について

Variation of Water Surface Displacement and Reflection Coefficient of Partial Clapotis on a Vertical Wall of Offshore Breakwater

遠藤 茂勝*、落合 実*
Shigekatsu Endo and Minoru Ochiai

The problem of variation of water surface displacement and reflection coefficient of partial standing waves on a vertical wall is basic subject to be solved for the design of offshore breakwater.

The phenomenon of reflection coefficient of partial standing waves is a non-linear boundary problem, it has been examined both theoretically and experimentally using the equation of third order approximation for finite amplitude standing waves, Healy's method and ratio of the water surface displacement in changes of vertical wall height. The reflection coefficient with the increase of vertical wall height was in good agreement with the results of calculation shown in the each diagram.

Keywords : finite amplitude standing wave, water surface displacement, reflection coefficient.

1. はじめに

海域制御構造物は、静穏な広い海域を確保する目的で設置されるが、設置海域の水深が比較的深く、波浪条件が厳しくなる事および鉛直の壁面を持ち波の反射率が大きく、重複波を発生しやすい事などのため、構造物の設置による周辺海域への影響を十分考慮する必要がある。

そこで本研究では、構造物の前面海域に影響を及ぼす重要な要因である構造物からの波の反射波の割合について鉛直壁の天端高が変化する場合の鉛直壁面に沿う重複波の水面変動量の変化から反射率を検討しようとするものである。

不透過の鉛直壁のように波の反射の割合の大きい構造物を設置すると入射波と反射波の非線形干渉により、基本周波数成分以外の波が発生することや、非線形性の効果が水面変動に表われやすいことなどのために、微少振幅波理論に基づく Healy の方法による入射波や反射波の推定には、問題があることがわかっている。そこで、重複波の振幅の計測に当って静水面を基準とした波頂高と波底高のそれぞれの部分にわけて推定し、まずそれらの結果と有限振幅重複波理論の適合性を検討するとともに、重複波の理論の近似式中に含まれる反射係数について検討する。一方、越波を伴う部分重複波の振幅を予め構

造物の設置地点で計測した無堤時の入射波高との関係から反射波高を推定するとともに、さらに無越波時の波頂高及び波底高と越波時の波頂高及び波底高の変動量と天端高の関係から反射波の割合について検討を行った。

2. 反射率について

反射率の測定には、一般に微少振幅波理論にもとづいた Healy の方法がもちいられるが前述したように波の入射面が鉛直でその上、不透過であるような壁面では、波の反射の割合が顕著となるため入射波の特性によっては入射波高を過大評価することになり、事実上、反射率を過小評価するような結果が生じることがある。従って、ここでは、有限振幅重複波の第 3 次近似式の利用、無堤時の入射波高と壁面の重複波高との比較、そして越波時と無越波時の波頂高、波底高の変化率をもちいた反射率の推定などについて検討を試みた。なお、ここでは、鉛直壁面の重複波高と $1/2$ 波長ごとに現れる重複波高は、ほぼ等しく、重複波高の壁面からの距離による違いは認められなかったので振幅をもちいた反射率の検討では全て鉛直壁面の実験結果をもちいた。

*正会員 日本大学生産工学部土木工学科 (〒275 習志野市泉町 1-2-1)

2. 1 有限振幅重複波理論と反射率

有限振幅重複波理論による重複波の壁面での波形の第3次近似解は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{\eta}{a} = & \lambda \varepsilon b_{02} + \left\{ (1+\lambda) + \frac{1}{2} \varepsilon^2 (1+\lambda^3) b_{11} \right. \\ & + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \lambda (1+\lambda) (b_1 + b_{13}) \} \cos \sigma t \\ & + \varepsilon b_{22} (1+\lambda^3) \cos 2\sigma t + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \{ (1+\lambda^3) \\ & \times b_{33} + \lambda (1+\lambda) b_{31} \} \cos 3\sigma t \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで a は第1近似式による振幅、 λ は反射係数、 $\varepsilon = ka$ 、 $k = 2\pi/L$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 b_{nm} は、 $\coth kh$ で示される定数。

(1)式で $\lambda = 1.0$ 、 $t = 0$ とおくと完全重複波すなわち無越波時の静水面上の波頂高 η_{max} が得られる。
すなわち

$$\eta_{max} = [2\varepsilon + \varepsilon^2 (2b_{22} + b_{02}) + \varepsilon^3 (b_{11} + b_{33} + b_1 + b_{31} + b_{13})] / k \dots\dots\dots (2)$$

また最低水位となる時の静水面を基準とした波底高 η_{min} は、次式で示される。

$$\eta_{min} = [-2\varepsilon + \varepsilon^2 (2b_{22} + b_{02}) - \varepsilon^3 (b_{11} + b_{33} + b_1 + b_{31} + b_{13})] / k \dots\dots\dots (3)$$

従って完全反射となる無越波時の重複波の波高 H_s は、次式で示される。

$$H_s = [4\varepsilon + 2\varepsilon^3 (b_{11} + b_{33} + b_1 + b_{31} + b_{13})] / k \dots\dots (4)$$

一方、(4)式に含まれる ε は、次式で示される。

$$\varepsilon = ka \dots\dots\dots (5)$$

ここで示される ε は、波形勾配に関連したパラメータで、(2)、(3)、(4)式にみられるような重複波の波頂高、波底高あるいは重複波高に関係する量である。従ってパラメータ ε で示される理論式の適合性が問題となるので、これらについては実験結果との比較検討を要するが、実験値との適合性が良く、その上、それらの結果で示される ε が越波を伴う部分重複波の場合にも適用できると仮定するならば、(1)式で示される波形を用いることにより、波頂高に関する実験結果との関係からそのときの反射の割合を示す λ を求めることができる。

2. 2 Healy の反射率

反射率の測定方法として通常用いられるのが微小振幅波理論による Healy の方法である。この方法は、既に述べたように非線形干渉の著しい重複波に

は、単純に適用することは問題がある。すなわち、Healy の方法では、入射波の波高 H_i と反射波の波高 H_r は、次のように定義されている。

$$\left. \begin{aligned} H_i &= \frac{1}{2} (H_{max} + H_{min}) \\ H_r &= \frac{1}{2} (H_{max} - H_{min}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 H_{max} および H_{min} は、それぞれ入射波と反射波で合成された最大振幅の波高および最小振幅の波高である。従って、反射率 K_r は、次のように示される。

$$K_r = \frac{H_r}{H_i} = \frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max} + H_{min}} \dots\dots\dots (7)$$

しかし、(7)式からわかるように反射率は、入射波と反射波の合成波の最大波高および最小波高によって算定されるが、鉛直壁面に生じる非線形性の著しい有限振幅の重複波では節の位置に2倍周波数の振動が現れることなどのために入射波高を過大に評価する結果となり、見掛け上、反射率は小さくなる。このように合成波の振幅から反射率を求めると見掛け上の反射率を求める結果となる。しかし、(6)式より反射率 H_r/H_i は、入射波高と最大重複波高で表わされる。すなわち

$$\frac{H_r}{H_i} = \frac{H_{max}}{H_i} - 1 \dots\dots\dots (8)$$

一方、実験では、構造物の設置地点での入射波高を予め測定してあるので、重複による最大波高 H_{max} をできるだけ正確に測定することにより、(8)式より反射率を容易に求めることができるので、反射率は、重複波の最大波高 H_{max} だけから求めることができる。

2. 3 波頂高比と反射率

鉛直壁面に生じる部分重複波の波頂高が天端高より高く、重複波が天端を越えて越波する場合について、天端高の変化に対する静水面上の波頂高および波底高については、次のような実験結果が示されている。^{2) 3) 4) 5)}

$$\left. \begin{aligned} \eta_{ec} &= 0.65\eta_{emax} + 0.35H_c \\ \eta_{et} &= 0.05H_c + 0.73H_i \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ただし、

$$\eta_{emax} = [1 + (14.83 - 52.81h/L_A) H_i/L_A] H_i \dots\dots (10)$$

ここで、 η_{emax} は完全重複波の波頂高、 η_{ec} および η_{et} はそれぞれ越波を伴う部分重複波の波頂高および波底高、 H_c は、静水面上の鉛直壁の天端高、 h は鉛

直壁の設置水深を L_A は、微小振幅波の波長を示す。

これらの結果によれば、鉛直壁の天端高の増大に対して波頂高は増大するのに波底高の変化はきわめて少ないことがわかる。従って天端高の増大による反射率の増大は、重複波の波頂高を支配することがわかるので、反射率を波頂高の変化として把握することができるものと考えて、ここでは越波時と無越波時の波頂高比で反射率を検討した。

3. 部分重複波の反射率

鉛直壁面における部分重複波の反射率については、前節で述べたように有限振幅重複波理論、Healy の方法あるいは波頂高比などで表わすことができるのでつぎにそれらの結果について示す。

3. 1 有限振幅重複波理論の反射率

有限振幅重複波理論による部分重複波の波形は、(1)式で示されるが、(1)式中に含まれる ε は、重複波の非線形性を著しく支配する波形勾配に關したパラメータなので、まずこれらの理論式の適合性を検討する。(1)式中の反射係数 λ が $\lambda = 1.0$ の時、(1)式は、完全反射の重複波の波形を示すので、 $t = 0$ とおくことにより(2)式に示す波頂高 η_{max} が得られる。また同時に波底高 η_{min} および振幅はそれぞれ(3)式、(4)式で示される。そこで、実験結果との適合性を調

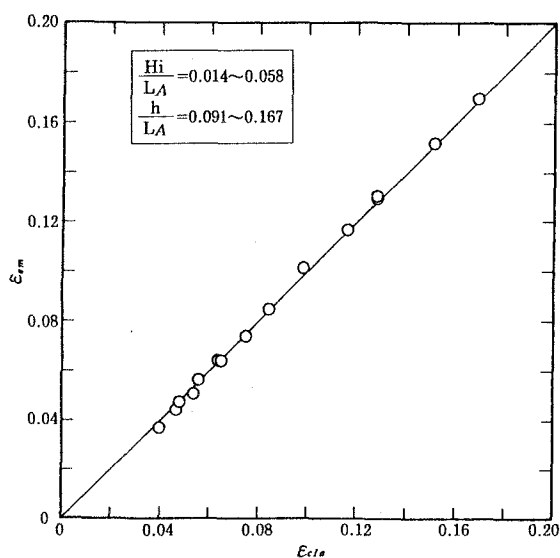


図-1 波形勾配のパラメータ ε の計算結果

べるため鉛直壁面で静水面を基準として測った完全重複波の峯までの波頂高 η_{em} と重複波高 H_{cla} に関する実験結果を用いて求めた ε について示したものが図-1である。この結果は、相対水深 $h/L_A = 0.097 \sim 0.167$ 入射波の波形勾配 $H_i/L_A = 0.014 \sim 0.058$ までの波についての実験結果のうち、完全重複波の重複

波高 H_{cla} をもちいて求めたパラメータ ε_{cla} と波頂高 η_{em} をもちいて求めたパラメータ ε_{em} を示したものであるが、両者はきわめて良く一致しており、理論式の適合性が良いことが認められる。このように ε は、完全重複波の実験結果より求められるので、この結果が部分重複波にも適用できるとすれば、(1)式の関係から、つぎに部分重複波の波頂高などの実験結果をもちいることにより、その時の反射率に相当する λ を求めることができる。

(i) ε_{cla} をもちいた時の反射率

波形勾配に關連するパラメータ ε_{cla} をもちいて任意の天端高の反射率を求める場合でも部分重複波の重複波高 H_{cla} あるいは波頂高 η_{ec} などをもちいることもできるが、ここでは、天端高が変化したときの鉛直壁面に生じる振幅、すなわち重複波高 H_{cla} をもちいて、反射率を求めた。それらの結果を

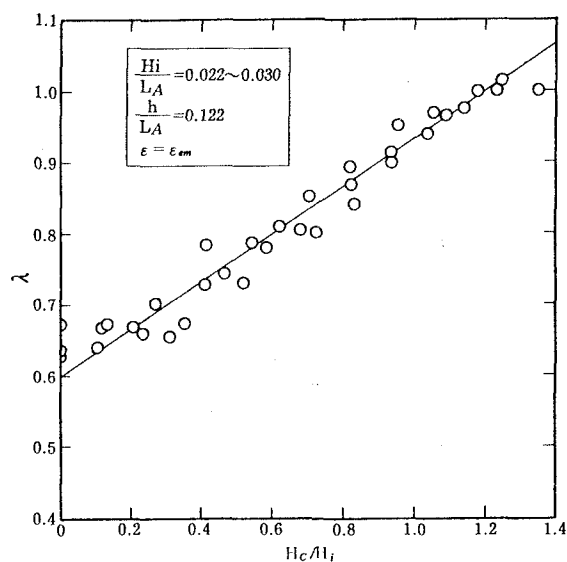


図-2 天端高と反射率

示したものが図-2である。この結果は、横軸に天端高 H_c/H_i を、また縦軸には λ をとって示したもので相対水深 $h/L_A = 0.122$ で入射波の波形勾配 $H_i/L_A = 0.022 \sim 0.030$ の場合で、静水面に天端のあるときの反射率は、約 60 % で相対天端高 $H_c/H_i = 1.2$ のときにはほぼ完全反射となることがわかる。

(ii) ε_{em} をもちいた場合の反射率

次にパラメータ ε_{em} をもちいた場合で、(i)と同様に部分重複波の重複波高 H_{cla} をもちいて反射率を求めた結果を示したものが図-3である。この結果は、相対水深が $h/L_A = 0.141$ で入射波の波形勾配は、 $H_i/L_A = 0.032 \sim 0.042$ の結果を示したものである。図-2に比較して天端高の変化に対する反射率の傾向は、ほぼ類似した直線的な傾向を示しているが、天端高が静水面にある時の反射率は約 50 % で、反射率が $\lambda = 1.0$ となるのは相対天端高が $H_c/H_i = 1.4$ 程度のときで、入射波の波形勾配が多少

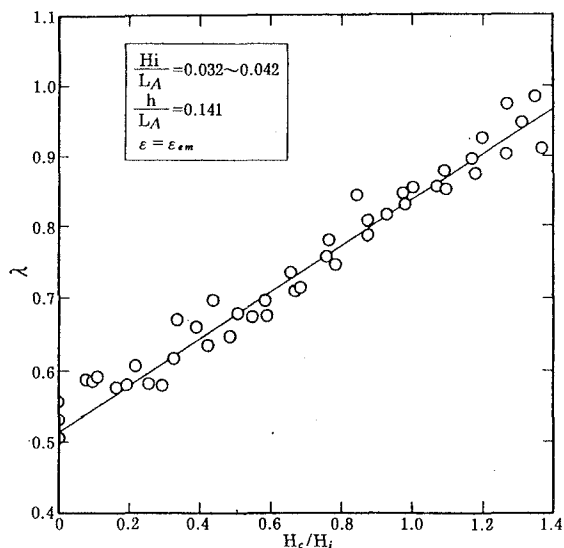


図-3 天端高と反射率

増大した事による影響がみられるが、平均的な反射率の差は、約 10 % 程度である。

3. 2 Healy の反射率

Healy の方法では、重複波の最大波高と最小波高を用いて入射波高や反射波高を推定しているが、本実験では鉛直壁の設置地点で予め測定した入射波高がわかっているので、(8)式に示すように壁面の部分重複波の波高 H_{ocla} と入射波高 H_i の関係から反射率 H_r/H_i を求めた。それらを示したのが図-4 である。相対水深や入射波の特性は図-2 と同じである。全体の傾向としては、有限振幅重複波理論で求めた

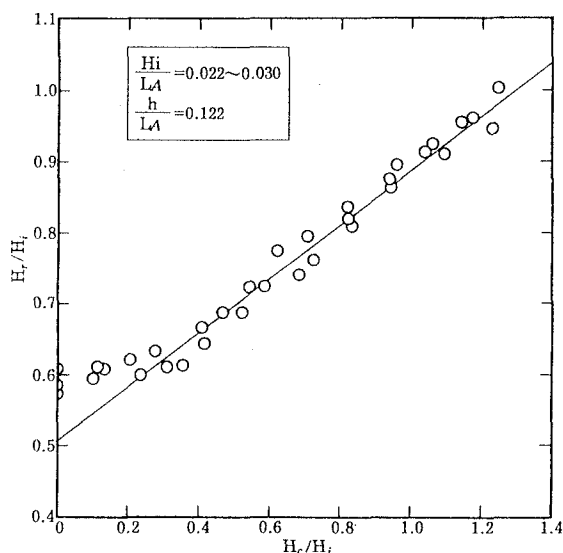


図-4 天端高と反射率

反射率と同様な傾向を示しているが、鉛直壁の天端高が低く、 $H_c/H_i \leq 0.3$ の範囲と、それより天端高が高い範囲ではやや傾向が異なるようである。

3. 3 波頂高比

鉛直壁を越波する部分重複波の挙動を調べる目的で、鉛直壁の天端高がきわめて低く、潜堤状態から無越波に至るまでの波頂高と波底高の変化についての例を示したものが図-5 である。

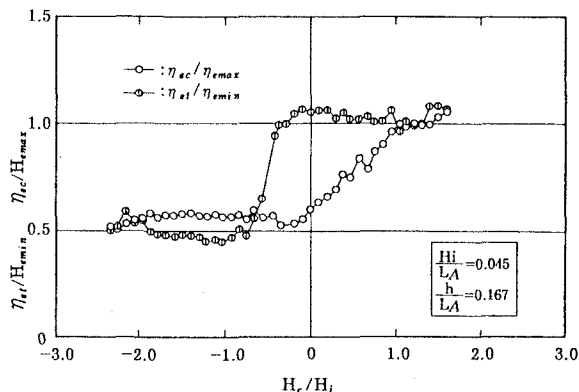


図-5 波頂高および波底高の水面度部

この結果は、 $h/LA=0.167$ で $Hi/LA=0.045$ の場合で横軸に静水面を基準とした鉛直壁の天端高と入射波高の比 H_c/H_i をまた縦軸には無越波時の重複波の波頂高 η_{emax} に対する任意天端の波頂高 η_{ec} との比 η_{ec}/η_{emax} と重複波の波底高 η_{emin} と任意天端高の波底高 η_{el} との比 η_{el}/η_{emin} をそれぞれ示したもので、 $H_c/H_i < 0$ は潜堤領域を示す。

この結果によれば、天端高がきわめて低く潜堤状態の $H_c/H_i < -0.7$ では $\eta_{ec}/\eta_{emax} \approx \eta_{el}/\eta_{emin} = 0.5 \sim 0.6$ 程度で波頂高も波底高も完全重複波の約 1/2 の値となっている。しかしそれより天端が高く $-0.7 \leq H_c/H_i \leq 0$ の範囲では、波底高 η_{el}/η_{emin} の値が著しく増大し、 $H_c/H_i=0$ の付近では $\eta_{el}/\eta_{emin}=1.0$ となり重複波が十分越波しているにもかかわらず部分重複波の波底高 η_{el} は完全重複波の波底高 η_{emin} に等しいことを示している。この傾向は天端高が $H_c/H_i \geq 0$ の範囲でも一定して維持されている。

これに対して波頂高 η_{ec}/η_{emax} の値は天端高が $H_c/H_i \geq 0$ の範囲では天端高 H_c/H_i の増大とともに増大の傾向をたどり、無越波となる所で $\eta_{ec}/\eta_{emax} \approx 1.0$ となる。

これらの結果を入射波高との関係で示したものが図-6、図-7 である。図-6 は、天端高 H_c/H_i の増大とともに波頂高 η_{ec}/H_i が増大することを示し、また、図-7 では波底高 η_{el}/H_i が天端高の変化に対してもほぼ一定であることを示している。その値は $\eta_{el}/H_i \approx 0.78$ 程度である。

これらのことは静水面を基準として考えた場合、天端高が静水面またはそれ以上高い場合には静水面以下の鉛直壁の部分が波の反射に影響を及ぼすに際し、水面以下の部分は、主に波底高を支配し、静水面以上の部分の鉛直壁は、波頂高の増大に寄与するものと考えられる。従って鉛直壁の増大に伴う反射率の

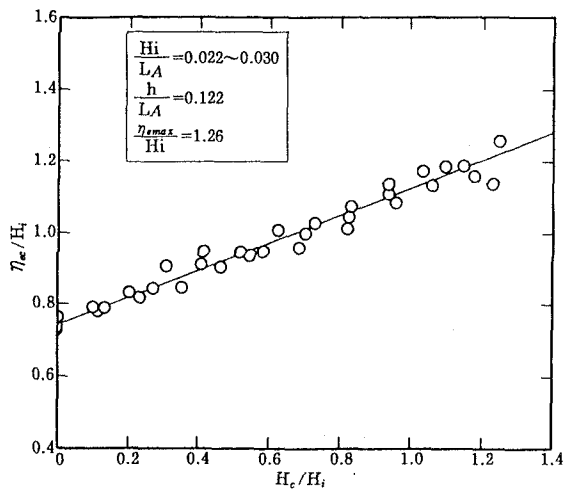


図-6 天端高と部分重複波の波頂高

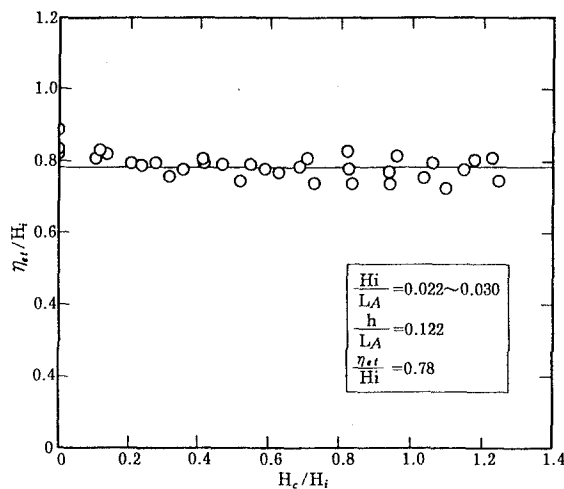


図-7 天端高と部分重複波の波底高

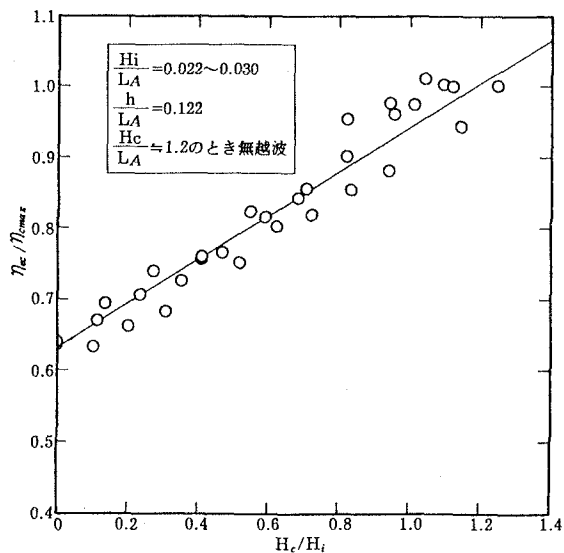


図-8 天端高と無越波時の波頂高に対する越波時の波頂高の比

する任意天端高の波頂高 η_{ec} の比を取れば天端高の低減に対する反射率の低減を示すものと考えられるので、ここでは、便宜的に反射率に対応させて、検討を試みた。図-8 は、その結果の一例を示したもので、実験条件は、図-2 と同じである。このように波頂高の比も他の結果とほぼ同様な結果となり、いずれも反射率を示すものと考えられる。

4. 結論

本論では、不透過な鉛直壁をもつ海域制御構造物が設置された場合、周辺海域へ影響を及ぼすと考えられる部分重複波について壁面での振幅や反射率について検討を行った。それらの結果を次に示す。

(1)有限振幅重複波理論で示される反射係数 λ は、波頂高、波底高あるいは重複波高の実験データを用いることによりその時の反射率を求めることができるが、波頂高や重複波高をもちいた反射率の結果は、ほぼ等しく、理論式の適合性が良いことを示している。

(2)反射率の算定に当って実験では、入射波高が既知なので Healy の方法による場合でも H_{max} のみを用いて反射率を求めることができる。そして、その結果は、有限振幅重複波の理論式と実験結果を用いて得られた反射率の結果とほぼ等しく良く一致している。

(3)鉛直壁面に生じる部分重複波の波頂高は天端高が静水面上にあって増加するとともに増大の傾向となるにもかかわらず波底高はほとんど変化せず一定の値を取り、その値は、無越波時の完全重複波の波底高の値と等しく、入射波高の 78 % 程度の値となっている。このことは、静水面上の天端高の増加による反射率の増大が波頂高の変化として現れるものと考えられる。

(4)静水面上の天端高の増加に伴う反射率の増大は、重複波の波頂高に現れるものと考え、無越波時の重複波の波頂高に対する越波時の重複波の波頂高の比を取り、有限振幅重複波理論より求めた反射率と比較した結果、それらは、ほぼ等しい値を取り、反射率の結果と一致した。

(5)鉛直壁面に生じる部分重複波について、実験から得られた波頂高や重複波高を用いて、有限振幅重複波の第 3 次近似理論、Healy の方法、および波頂高比などをもちいて、部分重複波の反射率について検討したが、それらの結果は、10 % 程度の差を認められるものの全体の傾向として良く一致し、部分重複波の反射率は、それぞれの方法で求められるものと考えられる。

参考文献

- 1) Y. Goda and Y. Abe : Apparent Coefficient of Partial Reflection of Finite Amplitude Wave,

増大は、静水面上の波頂高の増大として考えることができる。従って、完全重複波の波頂高 η_{max} に対

Report of Port and Harbour Rec. Inst., Vol.
7, No. 3, pp. 3~58, 1968

2) 遠藤、落合、三浦：重複波の水面変動特性について、第 27 回海講論文集、PP. 75~79, 1980

3) 遠藤、落合、三浦：越波のある場合の重複波の波頂高について、第 28 回海講論文集、PP. 320~324, 1981

4) S. Endo, M. Umeyama and F. Gerritsen :
Variation of Wave Crest Level and Reflection
Coefficient by Wave Overtopping on a Vertical
Wall, Report of Res. Inst. of Industrial Tech.,
Nihon Univ., No. 14, pp. 1~20, 1988

5) 遠藤、落合、三浦：ステップ型天端を有する海域制御構造物の越波制御機能と反射特性について、海洋開発論文集、Vol. 6, pp. 137~142, 1990
