

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

日本大学生産工学部 正会員 遠 藤 茂 勝
日本大学生産工学部 正会員 落 合 実
日本大学生産工学部 正会員 三 浦 晃

1. はじめに

広い静穏な海域を確保する目的で設けられる海域制御構造物の1つとして、幅の広い天端上にステップを設けた直立型の構造物を考え、海域制御構造物としての機能を検討した。

この構造物の特徴は、大水深に設けられる直立型の構造物であるため広い天端幅を持つことから、この天端上を波の制御に有効利用しようとするもので、形状の概略は、図-1に示されるように、構造物の入射側天端高を低くし、天端の大部分を入射側天端と同一レベルとしてあるが、構造物の陸側部の天端の一部にステップを設けることにより高くし、入射波によるうちあげに対して、仮想の貯溜空間をもたせたもので、構造物の天端上にうちあげられた越波水流の抑制による貯溜効果を考え背後越波量の低減を期待したものである。

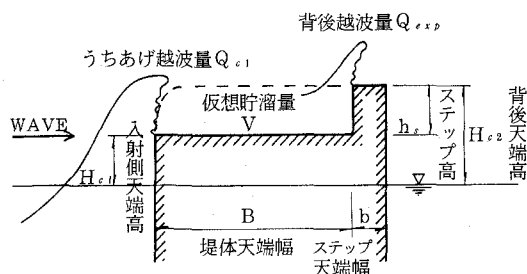


図-1 堤体諸元

また、この構造物の計画に当っては、入射側天端高については、有義波高などこれまでの設計波高を一つの目安として用いるが、仮想貯溜空間の容積の決定に当っては、最大波高など、構造物の被災に係る危険波高の入射側天端高に対するうちあげ越波量を考慮して決めるので、設計波高以上の波に対する機能的な評価をも設計時に考慮することができ。従って、従来の設計波高の他に危険波高をも同時に考慮した計画が可能となる利点を有している。

一方、このようなステップ型構造物の越波制御機能に関する実験結果^{1), 2)}によれば構造物背後への越波量は、ステップ天端を天端高とする一様天端の直立構造物の越波量より減少することが示されている。特に、本論で対象とする構造物の背後越波量 Q_{c2} は、入射波のうちあげ越波量 Q_{c1} から天端上の仮想貯溜量 V を差し引いた越波量よりかなり少

なくなり、ステップ型構造が越波制御にきわめて有効であることが明らかとなった。

このようにステップ型構造物の越波制御機能については、有効性が認められるが、波の反射による構造物前面海域への影響については、検討が残されている。そこで本研究では、天端高が低く構造物を越えて、波が越波する場合の部分重複波の反射率について検討するとともに反射率と越波量の点から海域制御構造物としての特性を評価しようとするものである。

2. 理論式の適合性

反射率の測定には、一般的に微小振幅波理論に基づいた Healy の方法が用いられているが本研究で対象となっているような直立壁を越波するような現象でも、波の反射の割合が著しいため、入射波の特性によっては入射波高を過大に評価することによって、事実上、反射率を過小評価することになる。

従って、ここでは反射率の検討に当って有限振幅波理論に基づいた第3次近似式を用いることとし、理論式の検証に当っては、進行波や重複波に関するデータから特に静水面を基準とした波頂高、波底高および振幅などの実験結果をもちいて検討することとした。

2. 1 進行波の検討

有限振幅波理論に基づく進行波に関する第3次近似式は、次式で示される。³⁾

$$k\eta = \left[\varepsilon + \frac{1}{2} \varepsilon^3 b_{11} \right] \cos(kx - \sigma t) + \varepsilon^2 b_{22} \cos 2(kx - \sigma t) + \frac{1}{2} \varepsilon^3 b_{33} \times \cos 3(kx - \sigma t) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 h は水深、 $k = 2\pi/L$ 、 $\varepsilon = ka$ 、 $b_{11} = (3C^4 + 8C^2 - 9)/8$ 、 $b_{22} = (3C^3 - C)/4$ 、 $b_{33} = 3(9C^6 - 3C^4 + 3C^2 - 1)/32$ 、 $C = \coth kh$ 、 $\sigma = \sigma_0 [1 + \varepsilon^2 C_1/2]$ 、 $C_1 = (9C^4 - 10C^2 + 9)/8$ 、 $\sigma_0^2 = gk \tanh kh$

(1)式から進行波としての波高 H を求めると次のようになる。

$$kH = 2\varepsilon + \varepsilon^3 (b_{11} + b_{33}) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $k = k_A[1 - \varepsilon^2 K_1/2]$

$$\text{また、} K_1 = \frac{2C_1}{1 + k_A h (\coth k_A h - \tanh k_A h)}$$

$k_A = 2\pi/L_A$ 、 L_A ：進行波の波長（第1次近似解）である。

これら(1)式、(2)式とも ε の関数で表わされているので、まず ε を求める必要があるが、(1)式で $x = 0$ における波頂高 η を与えても求められるし、(2)式に振幅 H を与えても求めることができるので、両者について検討した。

(イ) 進行波の波頂高による場合

(1)式に進行波の波頂高に関する実験結果を η に用いれば、 ε が求まるので、波形が得られる。その式をもとに波頂高と波底高をそれぞれ求め、実験によって測定されたそれぞれの結果とを比較することにより(1)式の検討ができる。

この結果では、波頂高を与えて、 ε を求めているので波頂高は一致するものの波底高が小さくなり、結果として振幅が小さくなり、この方法による結果は一致しない。

(ロ) 進行波の振幅による場合

(2)式に進行波の振幅に関する実験結果を H に代入することにより、同様に ε が得られるので、その結果を(1)式に用いて、波頂高や波底高を求め、実験結果と比較する。この場合は、振幅としては一致するものの静水面を基準として、振動中心が上方へ移動したような結果となり、波頂高、波底高がともに一致しない。

以上のように進行波の第3次近似式を用いた場合では、いずれも実験結果を十分満足するものとはならず理論式の適合性が良くないことが明らかとなった。

2. 2 重複波の検討

有限振幅波理論による重複波の波形式は、次式となる。³⁾

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

ここで、 a は第1次近似式による振幅、 λ は反射係数、 $\sigma = \sigma_0 [1 + \varepsilon^2 (C_1 - C_2)/2]$ 、 $C_2 = (C^2 + 6 + C^{-2})/4$ である。

(3)式で $\lambda = 1.0$ 、 $t = 0$ とすると無越波時すなわち

完全重複波の波頂高 η_{max} が得られる。ゆえに

$$\eta_{max} = [2\varepsilon + \varepsilon^2 (2b_{22} + b_{02}) + \varepsilon^3 (b_{11} + b_{33} + b_1 + b_{31} + b_{13})]/k \dots\dots\dots (4)$$

また、最小水位となる波底高 η_{min} は、次式となる。

$$\eta_{min} = [-2\varepsilon + \varepsilon^2 (2b_{22} + b_{02}) - \varepsilon^3 (b_{11} + b_{33} + b_1 + b_{31} + b_{13})]/k \dots\dots\dots (5)$$

従って、(4)式と(5)式から無越波で完全反射となる重複波の波高 H_{max} は、次のようになる。

$$H_{max} = [4\varepsilon + 2\varepsilon^3 (b_{11} + b_{33} + b_1 + b_{31} + b_{13})]/k \dots\dots (6)$$

一方、直立壁面での無越波時の重複波の波頂高に関する実験結果は、次のように示される。⁴⁾

$$\eta_{emax} = [1 + (14.83 - 52.81h/L_A) Hi/L_A] Hi \dots\dots (7)$$

ここで、 Hi は無堤時の入射波高である。また、直立壁を波が越える時の部分重複波の波頂高 η_{ec} と静水面を基準とした波底高 η_{et} に関する実験結果は、次式で示される。⁴⁾

$$\left. \begin{aligned} \eta_{ec} &= 0.65 \eta_{max} + 0.35 Hc \\ \eta_{et} &= 0.05 Hc + 0.73 Hi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 $Hc \leq \eta_{emax}$ で、 Hc は、直立壁の静水面上の天端高である。また、 η_{et} は、無越波時でも同じ値となる。次にこれらの結果を用いて理論式を検討する。

直立壁面を波が越えない場合には、反射係数 $\lambda = 1.0$ と考えることができる。一方、この時は、非線形性が顕著となるが、その時にも波頂高が実験値に一致しなければならないので、まず、無越波状態について検討する。

無越波状態の振幅は、(6)式で示されるので、実験から得られた(7)式と(8)式中の η_{et} とから振幅 H_{max} に対応する無越波時の振幅が求められるので、(6)式中の ε を求めることができる。従って、求められた ε を用いれば、(4)式と(5)式より、静水面上の波頂高 η_{max} と波底高 η_{min} が得られる。そこで、このようにして求められた理論式上の η_{max} 、 η_{min} と実験から得られた η_{emax} 、 η_{emin} を比較検討したものが図-2である。

この結果は、横軸に入射波の波形勾配 Hi/L_A を取り、縦軸には入射波高 Hi で無次元化した水位を示したものであるが、実験値の方は、 Hi として無堤時の進行波としての入射波高を用い、また、計算値の方は、(6)式で得られた ε を(1)式または(2)式に代入して得られる進行波の波高を用いた。

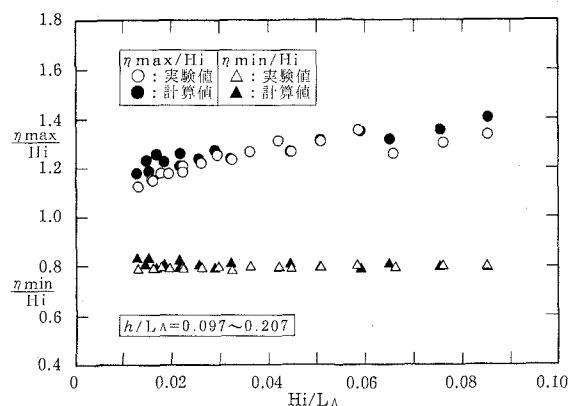


図-2 完全重複波の波頂高及び波底高

これらの結果で示されるように無越波時で完全反射となる時の振幅を用いて求めた波頂高、波底高の結果は、実験値と良く一致していることがわかる。すなわち、理論式中の ε は、完全重複波の実験結果から定めることができる。

3. 部分重複波の反射率

有限振幅波理論による重複波の理論式と実験結果から無越波時については、ほぼ妥当な波形を示す ε が求められた。従って、無越波時については、実験値を用いて得られた ε を用いれば(3)式の波形が十分満足するものであることがわかった。次に部分重複波の反射率を求めるために越波する場合の波形について検討する。

3. 1 波頂高、波底高および振幅について

本研究で対象としたステップ型天端を有する直立構造物前面の水位は、入射側天端高の等しい一様天端を有する直立構造物における前面水位の変動量と比較すると波頂高についてはやや減少する傾向にある。これは、天端上へうちあげた越波のもどり流れによる作用のためで、うちあげ波とその流れが干渉して波頂高が減少するものと思われるが平均すると5～10%程度の減少率で、それほど顕著なものではなく、ステップ型構造物の入射面での水位変動量が同一天端を有する一様天端の構造物前面の水位変動とほぼ等しいことから、ここでは一様天端をもつ直立構造の実験結果を用いて波形を検討する。

重複波を表わす(3)式中の ε は、越波時でも変わらないと考えれば、越波時の波頂高 η_c と波底高 η_t は、 λ の関数として得られる。一方、任意の天端高に対する越波時の波頂高と波底高については、(8)式で示される実験結果が得られている。

そこで、反射係数 λ を検討するために部分重複波の振幅について考えることとし、(3)式で得られる計算による振幅と(8)式で得られる実験による振幅が一致するように λ を決め、それを用いて得られる波形

から波頂高と波底高を個々に求め、実験結果と比較したものが次の図-3a、b、cである。

これらの結果は、それぞれの波に対して無次元天端高 H_c/H_i が変化する場合の波頂高 η_{ec}/H_i 、 η_e/H_i と波底高 η_{et}/H_i 、 η_t/H_i を示したものであるが、波底高は、静水面を基準とした時、下向きとなるのでマイナス符号とし、右側の目盛で示した。いずれの波の場合も無越波となる附近では計算値と実験値が一致するものの天端高が低く、越波量が多く

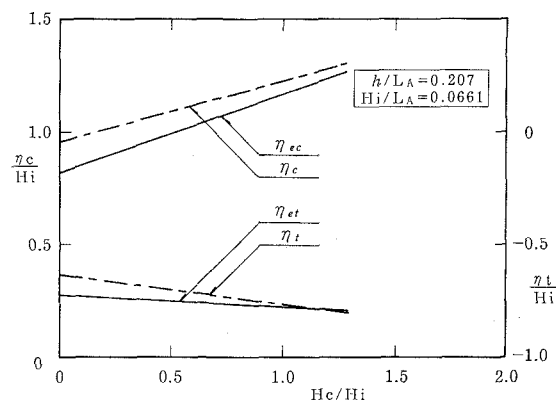


図-3 a 部分重複波の波頂高及び波底高

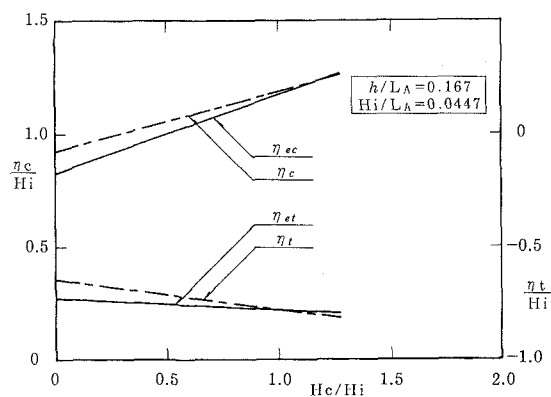


図-3 b 部分重複の波頂高及び波底高

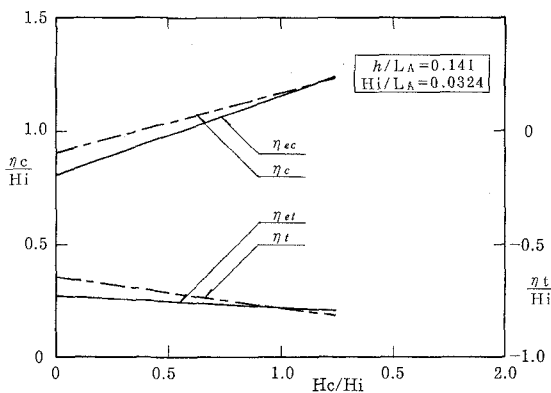


図-3 c 部分重複波の波頂高及び波底高

なると波頂高、波底高共に 10 % 程度の差が生じ、計算値の波頂高の方が全体として高くなり、その分、波底高も上がってくるのがわかる。しかし、水位としての振幅が一致するように λ を決めてあるので、波頂高、波底高の多少の違いはあるものの越波時の振幅を与えることにより、波形は求まる。

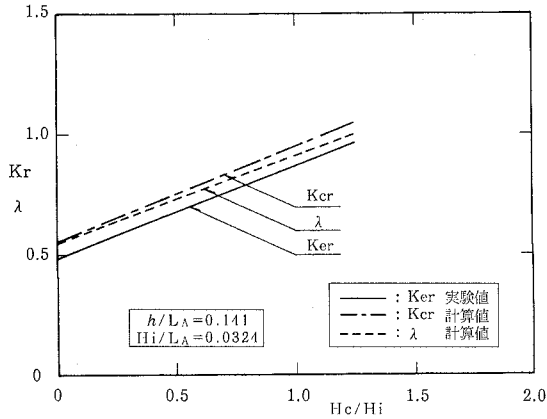


図-4 a 天端高と反射係数

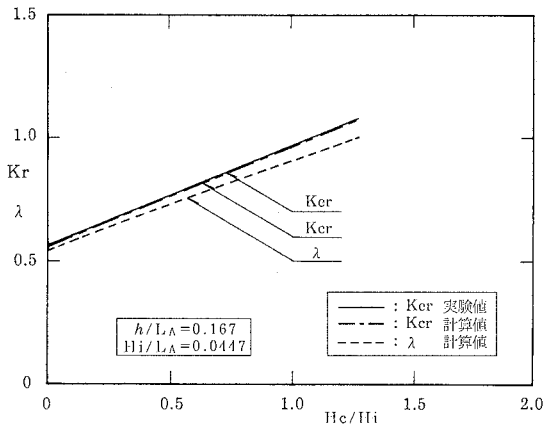


図-4 b 天端高と反射係数

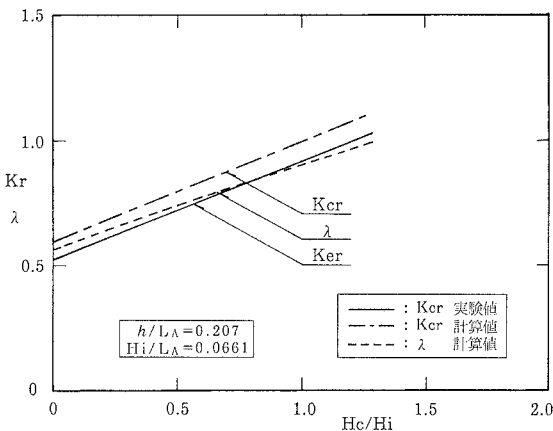


図-4 c 天端高と反射係数

3. 2 反射係数と反射率

無越波時の ε と越波時の振幅に関する実験結果から定められる λ は、理論式により反射波の割合を示す量として定義されている。一方、直立壁面における振幅と入射波高の関係から実験による反射率 K_{er} は、 $K_{er} = \{(\eta_{ec} + \eta_{et})/H_i\} - 1$ として求めることができる。厳密には、壁面から半波長ないしは 1 波長離れた地点の最大振幅を用いるべきであるが、ここでは便宜的に壁面での振幅を用いることとし、現象の非線形性があり、無越波の時の振幅の時に $\lambda = 1.0$ としているので λ との関係からここでは K_{er} のことを反射係数と呼ぶことにする。従って、有限振幅の近似理論式に含まれる λ も実験から得られる K_{er} も共に反射の割合を示すものと考えられるので、それら 2 つの結果および近似式で求められる振幅と入射波高から実験と同様な方法で求めた反射係数 $K_{er} = \{(\eta_c + \eta_t)/H_i\} - 1$ をまとめて示したものが図-4 a、b、c である。これらは、それぞれの波について天端高が変化した場合の反射率を示すもので、実験値と計算値で波によって 5~10 % 程度の差は認められるものの全体としては良い傾向を示していることがわかる。

4. ステップ型構造物の水利特性

ステップ型構造物は、入射側の天端高を低くしてあるので、入射波の天端上へのうちあげは容易となる。しかし、構造物の天端上の陸側の一部を高くしてあるので、うちあげ波は、その部分で衝突し、再度うちあげるが、衝突した波の大部分は、構造物の天端上に落下するので、背後へ越波する量は少ない。また、天端上のステップ部で衝突した越波流は、入射波とは逆向に天端上を戻り、構造物の入射面附近で入射波と干渉するので、入射面での振幅をやや減少させる効果があることもわかった。

このようにステップ型構造物ではステップの作用により越波が、きわめて少なくなり越波量を低減させるので、背後領域の静穏度の維持にはきわめて有効であることがわかった。そこで、この構造物の水利的な特性として、反射特性と越波特性の関連を調べることにし、それらを示したものが図-5a、b、c である。横軸には、入射波波形勾配 H_i/L_A を取り、縦軸には、左側に無次元越波量 $2\pi Q/H_i L_A$ を、また右側には反射の割合を示す反射係数 λ を取って示した。

越波量に関しては、ステップ型構造物背後への実験による背後越波量 Q_{exp} (○印)、構造物の背後側が入射面と考えた時の背後天端高に対する越波量⁵⁾ Q_{c2} および入射側天端高に対するうちあげ越波量 Q_{c1} から天端上の仮想貯留量 V を算術的に差し引いた時の越波量 Q_{c1-v} をそれぞれ示したものである。また、図中の上側に示される反射係数も同様に背後

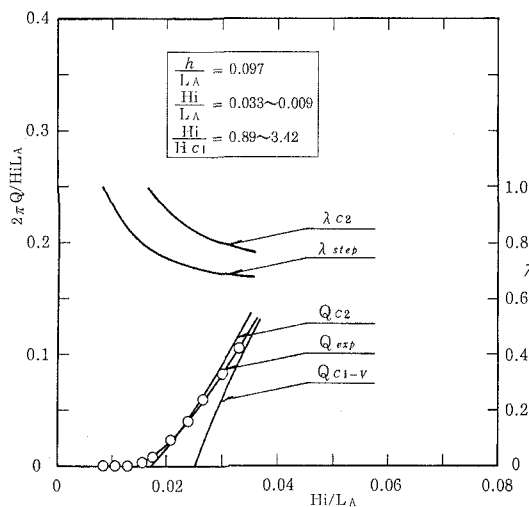


図-5 a 越波量と反射係数

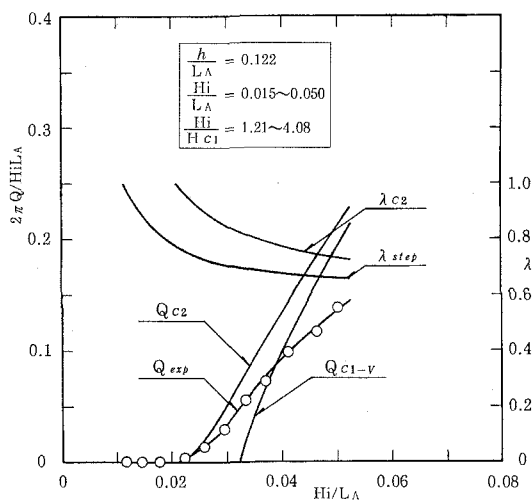


図-5 b 越波量と反射係数

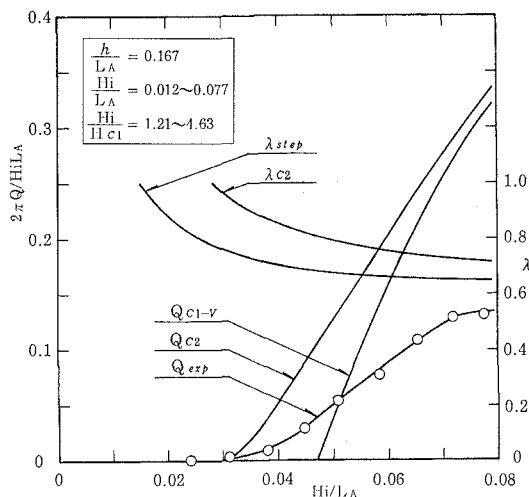


図-5 c 越波量と反射係数

天端高に対する結果を λ_{c2} 、ステップ型の結果に対するものを λ_{step} として示したものである。これらの結果によれば入射波の波型勾配 H_i/L_A が小さい場合には $\lambda_{c2} > \lambda_{step}$ となり、差は大きい H_i/L_A が大きくなるにつれてその差は小さくなってゆき、波が小さい場合には当然の事ながらステップからの反射はなく、波が大きくてうちあげ越波量が著しく増大してもステップの部分からの反射の影響がきわめて少ないことを示しており、波の反射に対してはステップ型構造物が有利な形状であることを示している。

一方、 λ_{c2} の結果によれば、入射波の増大に対して相対的な天端高の減少にもかかわらず反射の割合は著しく減少せず $\lambda = 0.7$ 程度のほぼ一定値に近づくような傾向となっている。これは、波の反射に対して静水面上の天端高が反射に及ぼす影響は比較的少なく、むしろ静水面以外の部分の反射の割合が支配的であることを示している。この事は、直立壁を波が越える場合、直立壁の天端を変化させても波頂高 η_c はそれに伴って変動するものの、波底高 η_t が $\eta_t/H_i \approx 0.7$ 程度でほぼ一定で変化しないことから裏づけられる。

5. 結 論

本論では、海域制御構造物としてステップ型天端を有する構造物についての反射および越波特性から周辺海域への影響を評価しようとするものであるが、ポテンシャルセオリーに基く有限振幅重複波理論の適用の妥当性および重複波の周期性の維持の問題などがあるが、工学的な見地から検討を試みた。それらの結果を次に示す。

(1) ステップ型構造物の波の入射面での水位変動量は、入射側天端の等しい様天端の直立構造物の前面水位とほぼ等しく、戻り流れの効果は比較的少ない。

(2) 重複波の理論式(3)式に $\lambda = 1.0$ として得られる振幅に関する(6)式に実験結果を代入して求められる ε を用いて求められる、(4)式、(5)式の波頂高と波底高の結果が実験値と良く一致することがわかった。

(3) (6)式より完全重複波と考えて得られた ε の値を越波時にも適用することとし、(3)式の振幅が(8)式の振幅と一致するよに求められた λ を用いて求められた波頂高と波底高を個々の実験結果と比較した結果は10%程度の差はあるものの全体として良く一致していることがわかった。

(4) ステップ型構造の入射面での振幅と入射波高から求めた反射係数 K_{cr} と非線形性を含んだ無越波時の ε と越波時のデータから得られる λ およびその ε と λ を用いて求められる振幅を用いて求めた反射係数 K_{cr} の結果は、入射波の特性によって多少バラツキはあるが、ほぼ同様な結果を示している。

(5) 波が構造物を越える事を考えると、ステップ天端と同一天端高を有し、貯溜空間を持たない直立構造とステップ型構造では、相対水深が大きい場合、前者では入射波の波高が増大すると越波量は著しく増大するが、反射の割合は、徐々に減少する。しかし、後者では、波高の増大に対しても直立構造に比較して越波量は著しく減少し、その上、反射率も減少するので、海域制御構造物として周辺海域への影響が少なく、優れた特性を有しているといえる。

以上のように、反射率および越波量について検討してきたが、有限振幅重複波の理論式に実験値を用いて補正した式がおおむね成立することおよび本論で対象としたステップ型構造物がすぐれた特性を有していることなどが明らかとなった。

参考文献

- 1) 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計画と越波制御機能について、海洋開発論文集、Vol.5、pp303~308、1989
- 2) 高田、藤川：パラペット後退型護岸の打ち上げ越波及び波圧の特性、第 25 回海講論文集、pp. 283~287、1978
- 3) Y. Goda and Y. Abe : Apparent Coefficient of Partial Reflection of Finite Amplitude Waves, Report of Port and Harbour Res. Inst., Vol. 7, No. 3, pp. 3~58, 1968
- 4) 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
- 5) 遠藤、梅山、落合、三浦：越波する重複波の時間波形と越波量の算定について、土木学会第 43 回年次学術講演回、II-281、昭和 63 年 10 月