

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

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

静穏な広い海域を確保する目的で各種の海域制御構造物の研究開発が進められている。しかし、設置水深がかなり大きい海域となり、侵入波の波高も増大するため、構造物の大型化は避けられず、また従来の防波堤などの構造形式をそのまま採用することはできない。

それは海域の波や流れ、そして漂砂などを最小限に食い止め、構造物背後の静穏度を維持できるような波浪制御機能を有する構造物でもなければならない。また、同時に構造物からの反射波による周辺への影響などをも考えると低反射の構造物でなければならない。そして、特に配慮しなければならない事は最大波高を設計波高に取ることはないので、構造物を越える波が必ず存在することで、海域制御構造物として、それらの波に対してどう対応するかという問題がある。

通常、構造物の設計に当たっては、有義波高を対象としているが、設計波高より大きい波による打ち込みが背後水域の静穏度に著しい影響を与えるうへ海域を常時有効に利用したいというニーズも、より一層強まっているので、設計波高以上の大きい波高の波に対しても有効で、その上、機能面の定量的な評価ができるような設計法の確立が望まれる。

そこで本研究では、ケーソン式防波堤の天端の陸側の一部にステップを設けた型の構造物を対象に通常の設計波高と異常気象時に発生するような著しく波高の大きい波をも同時に考慮した計画法を提案するとともに、その構造物の波浪制御機能や実用性などについて水理模型実験によって検討を行った。

2. 構造及び特徴

海域制御構造物の設置水深は、利用海域の拡大から水深 20.0m 以上の海域にまで達しつつあり、最近研究の進められている直立型の構造物では、その安定性の面から天端幅が 20~30m 以上にもおよんでいる。このように、海域制御構造物は長大な天端幅を有するので、少しでも天端を低くでき、しかも波浪制御効果をもつ構造物でなければならない。

一般に、海域制御構造物の基本的な機能としては、背後水域の静穏度を維持するという観点から、波のうち上げ、あるいは越波を低減し波浪制御機能を有すること、また、周辺海域に著しい影響を与えない

ために低反射で、流れや漂砂に対しても制御機能を持つことなどが挙げられる。しかし、流れや漂砂は波によって生じる訳で、結局、波浪制御機能が最も基本的な機能で、構造物の形状はこの機能によって決められるべきである。

いま、構造型式を考えるに当たり、大水深に設置される直立の大型構造物を調べてみると、多少の構造形式の違いはあっても、その安定性の面から長大な天端幅を持つものが多い。そこで本論では、この長大な天端幅あるいは天端上のスペースに着目し、広い天端上を波浪制御に活用し、より効果的な海域制御構造物を開発しようとするものである。

本研究で対象としたステップ型天端を有する海域制御構造物とは、図-1 に示す断面の構造物である。この種の構造物では、構造物の天端上に打ち上げられた越波水塊が天端の陸側にあるステップの作用によって一時的にせき止められ、背後への越波量を減少させる効果を持つので、そのような越波制御機能をもつ構造物を考えようとするものである。

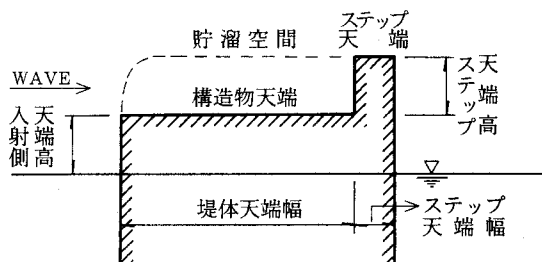


図-1 ステップ型海域制御構造物

このステップ型の構造物では、ステップ天端高はある程度の高さを有するが、ステップ部の天端幅はきわめて小さくすることができるので構造物の大部分の天端高を低く計画することができ、その上、越波量を著しく低減することができるので海域制御構造物として背後水域の静穏度の維持の面から有効と考えられる。

また、この構造物の特徴は、長大な天端幅とステップを有することから、天端上へうち上げた越波水は、天端上を越波流れとなって流れ、その後、ステップ面で衝突し、再度うち上げるという過程を経るが構造物天端とステップで囲まれた仮想の貯溜空間が波エネルギーの減殺に有効に作用し、著しい越波抑制効果の期待される構造物でもある。入射側の天端高の決定には、従来の設計波高としての有義波高を一つの目安とするが、仮想貯溜空間の決定には

入射側天端高に対し設計波高のおよそ1.5~2.0倍程度の最大波高の越波量が仮想貯溜空間に貯溜できるようにし、断面の決定に当たって、通常の設計波高のほかに最大波高のような被災に関係する危険波高をも同時に設計に加味することにより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しようとするものである。

そして、この構造物は、広い天端幅を有するので天端高をわずかでも低減させることができればそれだけ経済的となるばかりか、それによって天端とステップ部で囲まれる仮想貯溜空間は、著しく増大するので構造物背後への越波量が許容される範囲で天端を低くすることができる。

このように、この種の構造物は、入射面での天端が低く背後面のステップ天端が高いため越波しにくい構造となっているが、次のような利点をも有している。

1) この構造物は入射面の天端が低いため静水面付近に集中している入射波のエネルギーがうち上げと砕波により減殺され、堤体に作用する水平力を低減することができる。従って反射波の割合も低減するので海域を乱す割合が少ない。

2) 入射面の部分重複波の波頂高より天端が低いいため構造物に作用する水平波力の一部を受けない。また天端上への越波によって生じる流れの流体力のステップ部への作用と、入射面での水平波力の作用が同位相でないので転倒モーメントが低減される。

3) 天端上に一時的に貯溜された越波水が入射波の引き波時に戻り流れとして入射面に落下するため、連続するうち上げ波と干渉し、反射波および波のうち上げ高の低減に寄与する。

4) この種の構造型式への波のうち上げによる越波制御効果は顕著なものがあるが、天端幅とステップ高を変えることにより、背後への越波量をコントロールすることができるので設計上有利な特性を有している。

以上のように海域制御構造物としていくつかの水利的な利点を有するので、その構造物の合理的な計画法を検討すると共に、その特性について水理実験から検討した。

3. 断面の計画法

この構造物の計画では、海域制御構造物として背後水域の静穏度に最も関係のある越波量を計画上の基本量にとり、さらに断面の計画過程で最大波による越波量を計算に取り入れるなど、より安全な構造物の計画ができるよう工夫されている。次にその手順を示す。

3. 1 越波量の算定

海域制御構造物の設置水深は、比較的深い水深領域となるので入射波は砕波せず直接構造物に入射す

る。そして、ここで考えている構造物は直立壁を有するが、入射側の天端高が低いので入射波の一部は天端上にうち上げ、越波を生じ、構造物前面の波は越波を伴う部分重複波となる。

部分重複波の越波量算定式については、2、3の研究^{1)・2)}があるが、ここでは次の算定式を用いることとした。すなわち、越波量算定を行う場合重要なのは、部分重複波の波頂高、すなわち、入射面における水位の時間波形である。そこで波頂高については著者らの研究³⁾結果から、また波形については有限振幅重複理論による近似式を用いることとし、式の適用に当たっては土屋、山口の研究⁴⁾に基づき無越波時の波高を補正して理論式を用いることとし、波高の補正に当たっては著者らの実験結果⁵⁾を用いることとした。

以上の考えに基づく部分重複波の越波量は次のように求められる。

(1) 壁面での時間波形

有限振幅重複波理論による部分重複波の第3次近似解⁶⁾によると壁面での水面変動は、次式で示される。

$$\begin{aligned} \frac{\eta}{a} \Big|_{x=0} = & \lambda \varepsilon b_{02} + \left[(1+\lambda) + \frac{1}{2} \varepsilon^2 (1+\lambda^3) b_{11} \right. \\ & + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \lambda (1+\lambda) (b_{11} + b_{13}) \Big] \cos \sigma t \\ & + \varepsilon b_{22} (1+\lambda^2) \cos 2\sigma t + \frac{1}{2} \varepsilon^2 \left[(1+\lambda^3) b_{33} \right. \\ & \left. + \lambda (1+\lambda) b_{31} \right] \cos 3\sigma t \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここで a は、第一次近似式における振幅、 λ は第一次近似式における反射波の入射波に対する振幅比、 $\varepsilon = ka$ 、 $k = 2\pi/L$ 、 $\sigma = 2\pi/T$ 、 b_{nm} は $\coth(2\pi h/L)$ の関数、 L は重複波の波長。

また、静水面を基準とした越波時の部分重複波の波頂高 η_c は、実験結果より次の式で与えられる。

$$\eta_c = 0.65 \eta_m + 0.35 H_c \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $H_c \leq \eta_m$

ここで H_c は直立壁の静水面上の天端高、 η_m は壁面における無越波時の重複波の波頂高を表し、次式で示される。

$$\frac{\eta_m}{H_i} = 1 + \delta_{exp} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{ただし、} \delta_{exp} = (14.83 - 52.81 \frac{h}{L_A}) \frac{H_i}{L_A}$$

ここで δ_{exp} は、有限振幅重複波の非線形量、 H_i は入射波高、 L_A は微小振幅波の波長である。また(2)式中の波頂高 η_c は、天端高 H_c が、

$$H_c = \eta_m \dots\dots\dots (4)$$

となる時に最大となり無越波時の波頂高に一致する。

(2) 時間波形と越波量

直立壁の入射面での部分重複波の水位は、越波量と反射波の効果によって異なるが、主として越波量が増大すれば反射率が低下し波頂高も減少する。そこで波頂高の減少量が、越波量に相関すると仮定すると越波量は、図-2に示すように、無越波時の時間波形 $\eta(t/T)$ と越波時の時間波形 $\eta'(t/T)$ との差分によって求められる。

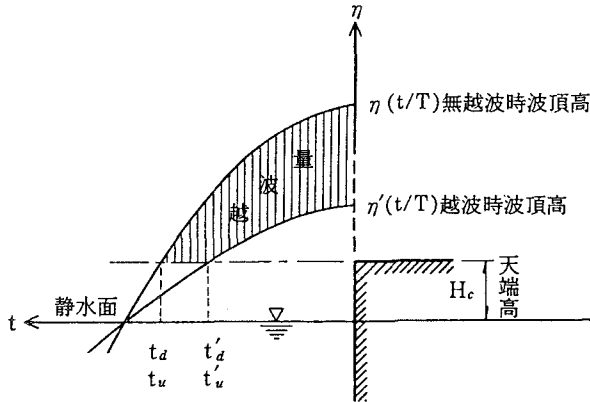


図-2 時間波形と越波量

さらに重複波が定常波であることを考慮し堰の越流の計算を適用すると任意天端高 H_c に対する部分重複波の越波量 Q_c は、次式で示される。

$$Q_c = \frac{2}{3} \sqrt{2g} K_f B \left[\int_{t_u}^{t_d} \{ \eta(t/T) - H_c \}^{\frac{3}{2}} dt - \int_{t'_u}^{t'_d} \{ \eta'(t/T) - H_c \}^{\frac{3}{2}} dt \right] \dots\dots\dots(5)$$

ここで K_f は、越波量係数で実験結果より $K_f=0.7$ 、 B は越波幅、 t_u 、 t_d および t'_u 、 t'_d は無越波時の時間波形 $\eta(t/T)$ または越波時の時間波形 $\eta'(t/T)$ が

$$\eta(t/T) = H_c \text{ または } \eta'(t/T) = H_c \dots\dots\dots(6)$$

となる時間である。(5)式中の右辺の第2項の量は、越波中も直立壁前面に常に存在すると考えられる量である。

3. 2 構造物断面の計画

構造物断面の計画に当たって、ここでは構造物の入射面からのうち上げ越波量から断面を計画しようとするもので、次にその手順を述べる。

(1) 入射側天端高について

入射側の天端高は、天端上への越波を許容すると言う考えからすれば、かなり低く取ることもできる。しかしあまり低いと越波量が著しく増大し、ステップ高を大きく取らないと背後地への越波量も増大し、静穏度が悪くなる可能性が生じるので通常設計に用いられる有義波高 $H_{1/3}$ を想定し、その波の $1/2$ 波高程度に取るものとする。

(2) 堤体天端幅およびステップ高について

ここでは構造物の天端上に打ち上げた越波水塊がステップの作用によって一時的に天端上に貯蔵されると考えて天端上の単位幅当りの貯留量を考える。

一方、入射波高として波数 N 波中の最大波高 H_{max} は Rayleigh 分布より次式で示される。

$$H_{max} = 1.07 \sqrt{\log N} H_{1/3} \dots\dots\dots(7)$$

いま、波数 N を 1000 波程度で考えると $H_{max} = 1.85 H_{1/3}$ となるので、この程度の波を、想定される最大波高と考える。

次に、この最大波高 H_{max} が入射した時の入射側天端高に対する単位幅当りの越波量 Q_{max} を求める。越波量 Q_{max} は、(5)式から求められるのでこの越波量が天端上の貯留量 V に対して $V \approx Q_{max}$ となるように天端幅とステップ高を決める。

(3) 構造物の安定性と天端幅について

構造物諸元を決定するのに、ここでは天端上での一時貯蓄を考えているので越波量から天端幅を考えるが、天端幅は、構造物の安定性に関する主要な諸元であるため基本的には安定性の面から決められるべきで、あらかじめ天端幅を試算した上で堤体の天端高を変化させ、それに対する最大越波量 Q_{max} を求め、ステップ天端高が著しい高さとならない程度に決める方が合理的といえる。

ステップ部の天端幅は、天端にうち上げられた越波水が天端上を流れとなって進行した際にステップ壁面で衝突し、うち上げるがそれらの作用に対して十分安全な強度が得られる範囲内で最小限で良い。

4. 水理特性および越波制御機能

この構造物は、波や流れの水理学的特性を利用して越波を制御しようとするもので、天端上へうち上げた水塊の挙動や、天端上からの戻り流れ、そして戻り流れと入射波との干渉などいくつかの複雑な現象が考えられるので、まずこの構造物の基本的な特性を知る目的で水理実験を行った。次にそれらの結果について述べる。

(1) 堤体諸元

この実験では、有義波高 $H_{1/3}$ に相当する波を仮定しその波の波高の $1/2$ を入射側天端高に取り、その天端高に対する H_{max} による越波量 Q_{max} を求め、天端幅およびステップ高を決めるが、ここでは、特に天端上での貯留効果を確認することに主眼をおいたので図-3に示した諸元に対して次のような条件で実験を行った。

有義波高 $H_{1/3}$ に相当する波高を仮に $H_{1/3} = 8.0$ cm と仮定する。従って入射側天端高 $H_{c1} = 4.0$ cm ($= 1/2 H_{1/3}$) また、最大波高 $H_{max} = 1.85 H_{1/3}$ により $H_{max} = 14.8$ cm となるので、およそ 13.0 ~ 15.0 cm の波を考えて $H_{c1} = 4.0$ cm に対する越波量 Q_{max} を

求めると単位幅当り、最大越波量 $Q_{max} = 170.0 \sim 230.0 \text{ cm}^2$ となる。

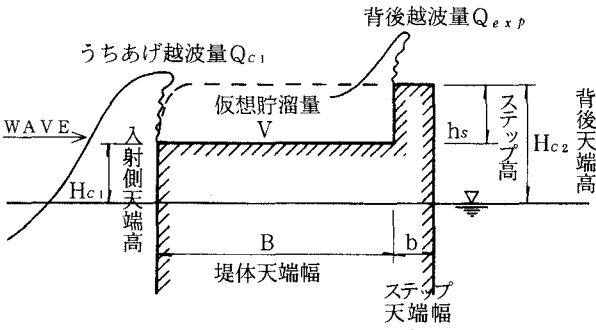


図-3 堤体諸元

一方、パラペット後退型護岸の研究結果⁷⁾から天端幅 B については、 $B = 3.5H_i$ 程度が効果的と考えられるのでここでは、 $B = 28.0 \text{ cm}$ とし、ステップ天端高 h_s は、最大越波量 Q_{max} より求めると $h_s = 6.0 \sim 8.0 \text{ cm}$ となる。しかし、今回の実験では、これより少し低くし、 $h_s = 4.0 \text{ cm}$ として、越波量 Q_{max} が貯溜量 V の $2.5 \sim 3.0$ 倍程度の波についての検討も行うこととしたので、主要な条件は、次の表-1に示すとおりである。

表 1 実験条件

H_i/L_A	0.012~0.077
h/L_A	0.097~0.167
H_i/H_{c1}	0.965~4.630
H_i/H_{c2}	0.483~2.310
B/L	0.068~0.117
Q_{max}/V	2.96

(2) 入射面におけるうち上げ高について

この構造物の場合、天端上に一時貯溜された越波水塊は、入射波の引き波時に戻り流れとして構造物前面に落下する。そしてその流れと入射波の進行方向が逆向のため構造物前面ではぶつかり合うので、戻り流れが入射波のうち上げ高の低減に寄与するものと思われる。そこで、うち上げ高について調べた結果を示したものが次の図-4である。

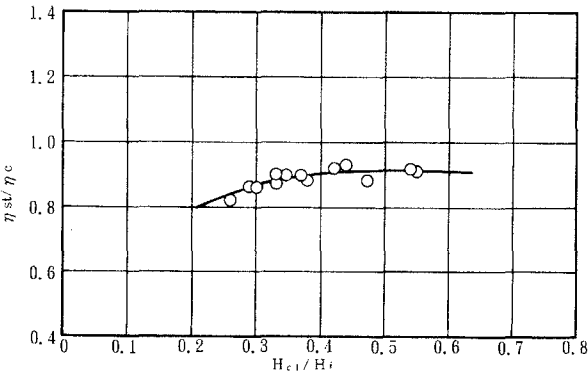


図-4 ステップ型構造物のうち上げ高

この結果は、入射側天端高 H_{c1} が同一高さで、ステップ型天端を有する構造物前面の打ち上げ高 η_{st} とスラップを有しない様天端の構造物前面の打ち上げ高 η_c と比較したもので、縦軸にうち上げ高の無次元量 η_{st}/η_c を取り、横軸に相対天端高 H_{c1}/H_i をとって示したものである。この結果によればステップ型天端を有する構造物のうち上げ高がステップのない構造物より約 10 パーセント程度ではあるが低減することを示している。このように、うち上げ高が少しでも低減することは天端上への打ち上げ越波量が減少するので、ステップが間接的に越波量を減少させる効果を有していることがわかる。

(3) 波浪制御効果について

ステップ型天端の構造物では戻り流れが生じ、この流れが構造物の入射面に落下するが、このタイミングは天端幅の長さが入射波の周期特性に支配されるので実験では、入射波の周期を $T = 1.4, 1.8, 2.2 \text{ sec}$ の 3 種類の波とし、入射波高を変化させて構造物背後への越波量を実測した。

その結果を示したものが図-5a、5b、5c である。縦軸には無次元越波量 $2\pi Q/H_i L_A$ を取り横軸には入射波の波形勾配 H_i/L_A を取って示した。

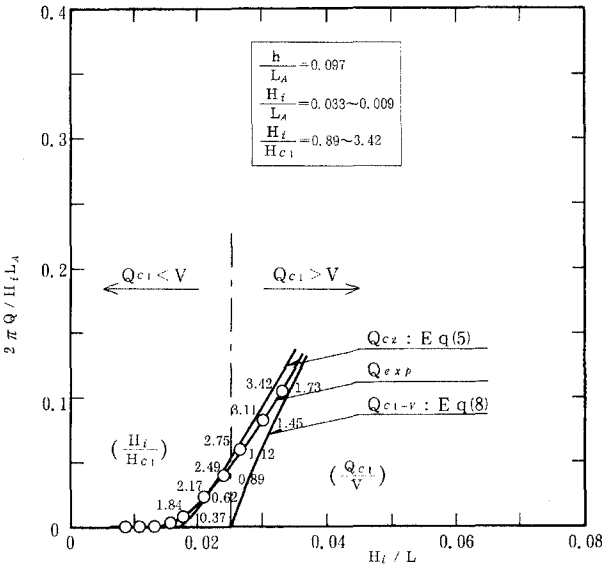


図-5 a ステップ型構造物の越波量
($h/L = 0.097$)

この構造物は、入射側の天端高は $H_{c1} = 4.0 \text{ cm}$ の高さを有しているがステップ天端で考えると天端高は $H_{c2} = 8.0 \text{ cm}$ となる。しかし、ステップの前面天端が低いので天端上への打ち上げ越波量の大部分は天端上に一時的にせき止められ、入射波の引き波時に逆向きの流れとなって戻るので構造物背後への越波とはならない。そこで、実験値の越波量を比較するため計算上の越波量を次のように考える。すなわち

$$Q_{c1} - V = Q_{c1-v} \dots\dots\dots(8)$$

ここで Q_{c1} は、入射側天端高に対する計算越波量

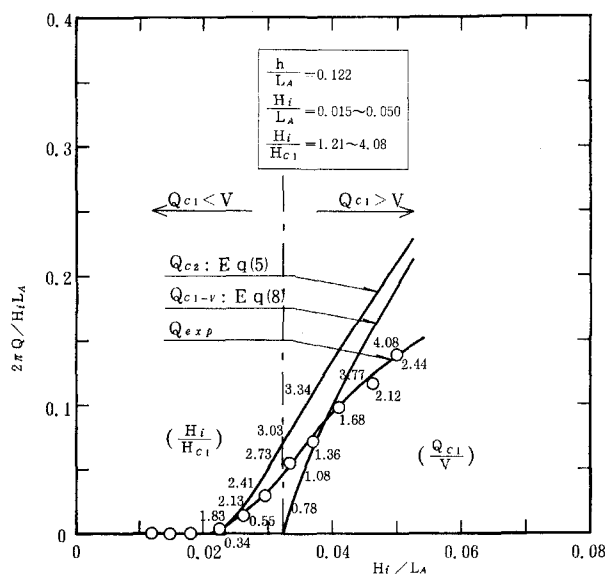


図-5b ステップ型構造物の越波量
($h/L = 0.122$)

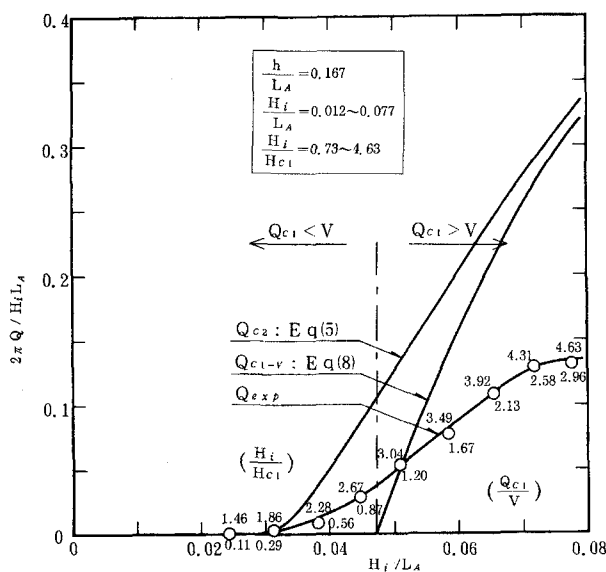


図-5c ステップ型構造物の越波量
($h/L = 0.167$)

で、 V は天端上の仮想貯留量である。この(8)式で与えられる量は、貯留量以上のいわゆる貯溜できないと考えられる量で、これが構造物背後に輸送されると考えるもので図-5a、5b、5c 中の下側の曲線で示される。

図中には、他にもう1本の曲線が示されているが、上側の大きな値を示している方の曲線は天端全体が一様でステップ天端の高さを持つ直立壁と考えた場合、すなわちステップ型構造物の背後側が入射面と考えたときの計算越波量 Q_{c2} を示したもので、ここでは $H_{c2} = 2H_{c1} = 8.0$ cm の天端を持つ直立構造物の越波量となる。

図-5a は相対水深 $h/L_A = 0.097$ の時の結果である。入射波の波形勾配 $H_i/L_A = 0.024$ 程度の波の時に打ち上げ越波量 Q_{c1} と貯留量 V がほぼ等しくなる。 $Q_{c1} < V$ の範囲では○印で示したステップ型構造物

越波量の実験値 Q_{exp} は、天端高さ H_{c2} をもつ直立構造の越波量 Q_{c2} にほぼ等しい値となっている。また、 $Q_{c1} > V$ の範囲では、 Q_{c2} と(8)式で求められる Q_{c1-v} との中間の値を取る傾向にある。

また図-5b は、相対水深が $h/L_A = 0.122$ のときであるが $Q_{c1} < V$ の範囲では Q_{c2} の値よりやや小さな値となっている。また $Q_{c1} \approx V$ の付近では、実験値 Q_{exp} は $Q_{c2} > Q_{exp} > Q_{c1-v}$ となり中間的な値をとっている。そして $Q_{c1} > V$ となる Q_{c1-v} より小さな値をとる傾向を示し、越波量は、減少していく。

さらに図-5c では相対水深 $h/L_A = 0.167$ の結果であるが $Q_{c1} < V$ の範囲では、 Q_{c2} の値より著しく減少し、 $Q_{c1} > V$ の範囲では、入射波の波高の増大とともに、 Q_{c2} および Q_{c1-v} などが著しく増大するのに対して、ステップ型の越波量 Q_{exp} は、ゆるやかに増加し、越波制御効果が著しいことがわかる。

5. 結 論

本論で提案したステップ型天端をする海域制御構造物について、その計画法と越波制御機能について実験的に検討したが、それらの結果をまとめるとおよそ次のように要約される。

(1) 本研究で対象としたステップ型天端高の構造物を波が超える時の高速 VTR 記録を見ると入射面でうち上げられた越波水塊は、長い天端上を流れとなって進行し、その後、ステップ壁面に衝突し、再度うち上げるがステップ壁面でうち上げられる量は、天端上にうち上げられた量に比較して著しく少ない。また、ステップでせき止められた水塊は、沖側に向い、次の波の入射前に大部分は入射面に戻され、ステップによる越波制御効果が著しいことがわかる。

(2) この構造物は、入射面の天端高が低く計画されるので天端上への越波を容易にし、また、戻り流れの落下による入射面での水分子運動の攪乱などがあり、反射波の割合を低減させる効果がある。

(3) 入射面での天端高が低いので波が天端上にうち上げ、重複波の波頂高を低く抑えることができるが、その上、天端を越えた部分の重複波の水平波力を受けない。そしてステップ面での流れの衝突による水平力の作用が入射面での波力の作用と同位相でないので波力による転倒モーメントを低減させることができる。

(4) ステップ型構造物の背後水域への越波量は、ステップ天端と同一天端を有する一様天端の直立壁の越波量より少なく、また、うちあげ越波量が多くなると、入射面の越波量から貯留量を差引いた量より少なくなる傾向にある。そして相対水深によって多少異なるが、入射側の天端高のおよそ3.5倍～4.0倍の入射波高の波の時、入射面からの越波量は貯留量の約1.7倍～2.0倍にもなるが、背後への越波

量は、無次元越波量で $2\pi Q_{exp}/H_i L_A = 0.1$ 程度できわめて少ない。極端な例では、 $H_i/H_{c1} = 4.63$ で $Q_{c1}/V = 2.96$ の時でも越波量は、 $Q_{exp}/Q_{c1} = 0.28$ でうち上げ越波量の約 28% 程度となっている。

(5) ステップ型天端をもつ本構造物では、その断面の計画に当り最大波高 H_{max} を想定し、その波の越波量 Q_{max} を考慮することにより天端幅 B やステップ高 h_s を決められるので危険波高に対しても合理的な計画が可能となった。また越波量の計算に当って(5)式を用いたが、越波量算定式として十分有効であることがわかった。

(6) ステップ型構造物を超える波の現象を見ると入射側天端高 H_{c1} は、天端上へのうちあげ越波量 Q_{c1} を基本的に支配するが、ステップは、天端上を伝わってきた流れのせき止めに著しい効果をもち、ステップ高 h_s は、流れのせき上げに支配的な役割を果し、衝突した時のせき上げ高が戻り流れの速度に関係するようで、この種の構造では、波の入射面の天端高と流れが衝突するステップの高さが現象に支配的で、天端幅の効果は、比較的少ないようである。

以上、本研究の結果、明らかになったことをまとめたが、研究対象としたステップ型天端を有する構造物は、従来の設計波高のほかに想定される最大波高などの越波量を媒介として断面の合理的な計画ができるばかりでなく、この構造物は、異常気象時の著しい大きな波高の波に対しても越波制御機能を有

し、海域制御構造物として有利な機能をもつことなどが明らかとなった。

参考文献

- 1) H. Kikkawa H. Shiigai and T. Kono : Fundamental study of wave overtopping on levees, Coastal Engineering in Japan, Vol. 11, pp. 107 ~ 115, 1968
- 2) 高田 彰 : 有限振幅重複波の時間波形と越波量の相関特性、土木学会論文報告集、第 201 号、1972
- 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 回海溝論文集 pp. 320 ~ 324、1981
- 4) 土屋、山口 : 越波のある場合の重複波の特性について、第 17 回海溝論文集 pp. 79 ~ 84、1970
- 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 回年次学術講演会、II-281、昭和 63 年 10 月
- 6) 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
- 7) 高田、藤川 : パラベット後退型護岸の打ち上げ越波及び波圧の特性、第 25 回海溝論文集、pp. 283 ~ 287. 1978