斜め入射波に対するフレア型護岸の換算天端高係数と 護岸端部の越波について

Wave Overtopping and Coefficient of Equivalent Crown Height on Flaring Shaped Seawall against Oblique Incident Waves

村上啓介¹・真木大介²・竹鼻直人³

Keisuke MURAKAMI, Daisuke MAKI and Naoto TAKEHANA

This study conducts two series of hydraulic experiment under some oblique incident wave conditions. One of the purposes of these experiments is to obtain the coefficient of equivalent crown height on Flaring Shaped Seawall. The other one is to clear the characteristic of wave overtopping at the joint section between Flaring Shaped Seawall and vertical one. The coefficient of equivalent crown height on Flaring Shaped Seawall shows different character under the oblique incident waves in comparison with conventional vertical seawalls. This study indicates that the value of Flaring Shaped Seawall could be taken as $\beta=1.0$ in the cases of longer incident wave period, such as $T=1.6$ sec. and 2.0 second. On the other hand, the coefficient tends to increase, $\beta=1.15-1.3$ with increase of incident wave angle under the shorter wave period. The increase of wave overtopping was observed at the joint section due to the run up of stem waves onto the wave dissipating blocks, though the wave dissipating works reduce the wave disturbance in front of the joint section.

1. はじめに

越波問題に対する波向きの影響についてこれまで多くの研究がおこなわれてきた。例えば、細井ら（1962）や井上ら（1971）は規則波を用いた水理模型実験を実施し、波向きの増大に伴って越波量が減少することを示した。その後、高山ら（1984）は斜め入射不規則波を用いた水理模型実験を実施し、換算天端高係数は入射波角度 θ の増大に伴い $\sin\theta$ に比例して減少する傾向を持ち、入射波角度が 30° の場合の所要天端高は直角入射の場合に比べて7割程度に低下することを示している。また、平石ら（1996）、富田ら（2000）、大野ら（2004）は多方向不規則波を用いた水理模型実験を実施し、多方向不規則波浪場における越波量は多方向性の影響により一方向波の場合よりも小さくなるが、越波量に対する多方向波の入射角度の影響は小さく、入射角度 30° では単一方向の越波量と同等になることを示している。

これら既往の研究は、越波量に対する波向きの影響を知る上で有用であるが、それらは主に直立護岸や消波護岸を対象としたものである。そのため、新たな護岸断面の採用を検討する際、越波量の特性は護岸断面の形状に強く依存することから、上記等の既往の研究成果を直接的に活用することは難しい。

筆者らは深い円弧状の断面を持つ護岸（以下、フレア

型護岸と呼ぶ）を提案し、その越波制御機能を検討してきた（例えば、村上ら、1996；上久保ら、2000）。フレア型護岸の施工事例が報告されつつあるなか（例えば、片岡ら、2005）、斜め入射波に対する護岸天端高の算定が現地への適用性の検討において散見されるようになった。ただし、斜め入射波に対するフレア型護岸の換算天端高係数は具体的に定められておらず、護岸の適用性を検討する際の課題となっていた。斜め入射波に対する護岸の適用性を評価する際、直立護岸等を対象とした既往の研究を参考にすることも考えられるが、フレア型護岸は深い円弧状の断面における強い波返し機能により越波を阻止することから、直立護岸等に用いられる値をそのまま適用することには疑問が残る。

また、フレア型護岸の採用を検討する際、既設護岸の一部をフレア型護岸断面に改良する場合がある。断面形状が異なる護岸接続部では、沿い波の打ち上げ等によって水面の擾乱や越波量の増大が懸念されることから、斜め入射波に対するフレア型護岸端部（既設護岸との接合部）の越波について明らかにする必要がある。

以上の背景から、本研究は斜め入射波に対するフレア型護岸の換算天端高係数を求めるとともに、既設護岸との接合部となるフレア型護岸端部の越波特性について明らかにすることを目的とする。

2. 水理模型実験方法と実験条件

(1) 水理模型実験に用いた装置の概要

実験は図-1に示す長さ20m、幅15m、高さ0.7mの平面

1 正会員 博(工) 宮崎大学准教授
2 正会員 修(工) 宮崎大学教育研究支援技術センター
3 正会員 工修 (株)神戸製鋼所

図-1 実験装置の平面図 (上段) と断面図 (下段)

図-2 [実験B]で比較した護岸接合部の概略図

水槽を用いて実施した。本研究は1/30程度の模型縮尺を想定し、フレア型護岸模型の高さは $h=0.16\text{m}$ 、天端高さは $h_c=0.08\text{m}$ 、円弧部の奥行き深さは $D=0.08\text{m}$ とした。護岸模型は高さ $h_M=0.1\text{m}$ のマウンド上に設置して実験をおこなった。フレア型護岸の模型は、幅 0.6m 、奥行き深さ 0.3m を1ブロックとし、水槽中央に14ブロックを入射波の波向きに対して傾けて設置した。

本研究では、上述の護岸模型を用いてフレア型護岸の換算天端高係数を求める実験 (以下、[実験A]と呼ぶ) と、フレア型護岸端部の越波特性を明らかにする実験 (以下、[実験B]と呼ぶ) を実施した。

(2) 実験条件と計測方法

換算天端高係数を求める[実験A]では、幅 0.6m 、奥行き深さ 0.3m の護岸模型を、図-1に示すように14ブロックを一列に並べて実験をおこなった。実験装置は造波側で波向きを制御することができないため、護岸法線を入射波の波向きに対して傾けることで斜め入射波の状況を再現した。[実験A]では、護岸に対して入射波が直角に作用する場合を含め、 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ の3ケースについて実験をおこなった。

越波量の計測は、周期 $T=1.2$ 秒、 1.6 秒、 2.0 秒の3種類の波について規則波を造波しておこなった。入射波高は $H_0=0.1\text{m}$ 程度を目安とし、図-1に示すCh1の地点に容量

式波高計を配置して入射波高を計測した。また、Ch2～Ch6において護岸前面の水面変動を計測した。なお、実験水位は護岸円弧部の最奥に静水面が一致するように調整し、この時のCh1における水深は 0.23m である。造波開始後に護岸に作用する4～6波の越波水を各護岸模型の背後に設けた越波升に集め、メスシリンダーにより越波水量を測った。計測は同一の入射波条件について3回おこない、その平均値を越波量とした。

[実験B]では図-1の護岸模型ブロックの1～11をフレア型護岸断面、12～14を直立護岸断面とし、フレア型護岸端部の越波について検討した。入射波に対する護岸の設置角度は $\theta=15^\circ$ とし、図-2に示す4通りの護岸接合部の断面について越波量の計測実験をおこなった。

Case-Aは、フレア型護岸と直立護岸が接続する部分に消波工等の対策は無く、鉛直の壁で仕切られているケースである。Case-BからCase-Dはフレア型護岸と直立護岸が接続する部分を消波ブロックで被覆した場合で、それぞれ消波ブロックの被覆幅と天端高さが異なる。Case-Bは、村上ら (1998) を参考に護岸円弧部での波返しの効果を期待する目的で、消波ブロックの天端を静水面と同じ高さとし、フレア型護岸の端部1ブロックのみ被覆している。Case-CはCase-Bの被覆範囲を直立護岸部の1ブロックまで広げたケース、また、Case-DはCase-Cの消波ブロックの天端を護岸頂部まで上げたケースである。消波ブロックを設置するケースでは一般的な消波工断面を参考に、法勾配は $1:4/3$ の乱積とした。

[実験B]における波高と越波量の計測方法は[実験A]と同様であるが、越波量の計測は護岸接合部近傍の8～13の範囲で実施した。

3. 換算天端高係数と護岸端部の越波

(1) 換算天端高係数について

写真-1はフレア型護岸に対して斜め入射波が作用した際に沿い波が伝搬する様子を示したものである。波峰が護岸曲面部に到達した個所では、護岸に沿った方向の波運動と、護岸の法線方向に巻き波状に波返す運動が同時に発生する。

このような護岸前面における波運動のもとで計測した越波量の空間分布を図-3に示す。図の縦軸は無次元越波量 $q' = q/(2g)^{1/2}(H_0)^{3/2}$ (q は単位幅当たりの越波量、 H_0 は入射波高)、横軸は越波量を計測した護岸模型の番号 (図-1参照) を示している。各図は入射波の周期が異なり、図中には各周期における波形勾配を記している。

入射波の周期が比較的短い $T=1.2$ 秒の場合について見ると、越波量の空間的なばらつきは若干あるが、入射波角度が大きくなるにしたがって越波量は全体的に増大する結果となった。図-3 (b) に示す $T=1.6$ 秒の場合は、入

写真-1 斜め入射波がフレア型護岸に作用した場合の波返しの状況 ($T=1.6\text{sec.}$ $\theta=15^\circ$)

射波角度による越波量の差は小さく、 $T=2.0$ 秒の場合は入射角度が 0° に比べて 15° や 30° の場合の越波量が若干大きな値を示している。

高山ら (1984) は、入射波角度を $0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で変えた場合の不規則波に対する越波量を直立護岸と消波護岸を対象に計測している。その結果、護岸に対する入射角度 θ が大きくなるにしたがって越波量は減少し、換算天端高係数は $\sin\theta$ に比例して小さくなることを示している。

一方、フレア型護岸の越波量特性は直立護岸や直立消波護岸とは異なる結果を示している。その理由として、フレア型護岸の越波低減効果は、主に護岸曲面部における波返し運動によるものであり、護岸前面での波返しの機能が入射波角度の増大に伴い低減したためと考えられる。このように、斜め入射の場合のフレア型護岸の越波抑制効果は直角入射の場合に比べて若干低下するが、同一天端高さの直立護岸に比べて越波量を低く抑える機能は保たれている (真木ら, 2011)。

図-3に示すように、越波量の空間分布に若干のばらつきは見られたが、本研究では護岸ブロック2～12における越波量の平均値を各実験ケースの代表越波量 (以下、平均無次元越波量と呼ぶ) として換算天端高係数を検討することとした。図-4は平均無次元越波量を各実験ケースで比較したものである。図-3で示したように、入射波周期が $T=1.2$ 秒の場合は、入射波角度が大きくなるに従い明らかな越波量の増大傾向が見られる。また、 $T=1.6$ 秒と 2.0 秒の場合も、入射波角度の増加に伴う越波量の

(a) $T=1.2\text{ sec.}$

(b) $T=1.6\text{ sec.}$

(c) $T=2.0\text{ sec.}$

図-3 入射波の波向きに対する無次元越波量の分布

変化は小さく減少傾向は見られない。

図-4に示す平均無次元越波量をもとに、本研究では次の手順で斜め入射波に対する換算天端高係数を求めた。まず、図-4に示す $\theta=15^\circ$ と 30° の場合の平均無次元越波量の $\theta=0^\circ$ に対する比 α_i を各入射波周期について求める。次に、実験で得られた各入射波周期の無次元越波量 q'_i を α_i で割った換算越波量を求め、換算越波量に対するフレア型護岸天端高さを図-5に示す越波量算定図から読み取った。そして、その値と $\theta=0^\circ$ の場合の天端高さとの比を各入射波角度に対する換算天端高係数とした。なお、フ

図-4 平均無次元越波量の比較

図-5 フレア型護岸の越波量算定図例 ($H_0/L_0=0.036$)

レア型護岸の越波量算定図は沖波波形勾配が0.012と0.036、海底勾配が1/10と1/30についてのみ作成されている。ここでは、海底勾配1/30の算定図で実験の波形勾配に近いものを便宜的に用いることとした。このようにして求めた換算天端高係数 β を図-6に示す。入射波周期が $T=1.2$ 秒の場合、 $\theta=15^\circ$ で $\beta=1.15$ 、 $\theta=30^\circ$ では $\beta=1.3$ 程度の値となる。一方、入射波周期が長くなる $T=1.6$ 秒と2.0秒では入射波角度によらず $\beta=1.0$ となる結果を得た。

斜め入射波に対する直立護岸の換算天端高係数は、入射波角度 θ に対して $\beta=1-\sin^2\theta$ ($\theta<30^\circ$)で求められ(例えば、高山ら, 1984)、入射波角度 θ が大きくなるにしたがい β は小さい値を取る。一方、フレア型護岸の護岸前面における波返し運動の程度は入射波の周期に依存することから、フレア型護岸の換算天端高係数の検討では入射波角度に加えて入射波周期も考慮する必要がある。

(2) 護岸接合部における越波について

断面形状が異なる護岸接合部では、沿い波の打ち上げ等によって護岸前面の水面の擾乱や越波量の増大が懸念される。そこで、斜め入射波に対するフレア型護岸端部(既設護岸との接合部)の越波について検討をおこなった。ここでは、図-2に示したフレア型護岸端の接合部付近の越波量特性について検討する。

一例としてCase-Dの断面に対して周期1.2秒の波が入射角度 $\theta=15^\circ$ で入射した場合の護岸接合部付近における

図-6 入射波の波向きに対するフレア型護岸の換算天端高係数

写真-2 護岸端部の越波状況 (Case-D, $T=1.2$ sec, $\theta=15^\circ$)

沿い波の状況を写真-2に示す。護岸接合部を消波ブロックで被覆しないCase-Aの場合は、護岸接合部の鉛直面に沿い波が直接作用して沿い波の打ち上げ等により水面は乱れた状況になる。一方、護岸接合部を消波ブロックで被覆した場合は、接合部の波当りは緩和されるが、入射波の周期と消波ブロックの設置状況によっては、消波ブロックを乗り越えて越波する状況が見られた。

図-7はフレア型護岸断面が直立護岸断面と接合する付近の越波量の空間分布について入射波の周期が $T=1.2$ 秒と2.0秒の場合について示している。越波量の空間分布に若干の変動は見られるが、護岸接合部に隣接するフレア型護岸部分では顕著な越波量の増大は見られないのに対して、直立護岸部分で越波量が増大していることがわかる。また、周期が長くなるに従い、消波工の設置方法の違いによる越波量の差は小さくなっている。実験の観察より、消波ブロックを設置した場合(Case-B～D)の護岸接合部の模型番号11から12にかけての越波量の増大は、主に消波ブロックの設置により沿い波がブロックを遡上して越波していることによるものと考えられる。

図-7 フレア型護岸端部付近の越波量分布

村上ら (1998) は、消波ブロック天端を静水面程度の高さに抑えることでフレア型護岸の波返し機能による越波抑制効果が期待できることを垂直入射の場合について示している。斜め入射の場合も、消波工天端を静水面程度に低くすることで、護岸接合部近傍の水面の擾乱を抑制するとともに、消波ブロック天端が高い場合に比べて波返し機能が発揮されることを実験の観察から確認した。ただし、消波ブロックを設置することにより沿い波がブロック法面を遡上して越波を招く場合があることから、護岸接合部付近の水面の擾乱と接合部下手の越波を同時に抑制することが可能な消波構造物が必要と考える。

4. まとめ

斜め入射波に対するフレア型護岸の換算天端高係数は直立護岸等とは異なる特性を持つ。入射波周期が短い条件では換算天端高係数は入射波の角度に応じて増加する傾向を示し、実験周期が $T=1.2$ 秒の場合は入射波の角度が $\theta=15^\circ$ で $\beta=1.15$ 、 $\theta=30^\circ$ では $\beta=1.3$ 程度の値をとる。このようにフレア型護岸の換算天端高係数が直立護岸等と

は異なる特性を持つことは、護岸前面での波返しの機能が入射波角度の増大に伴い低減するためと考えられる。また、入射波周期が長い条件では入射波の角度によらず換算天端高係数は $\beta=1.0$ となる。本研究では、換算天端高係数の一般式の導出までは至らなかったが、フレア型護岸前面における波返し運動は入射波周期に依存することから、換算天端高係数の検討では入射波角度に加えて入射波周期も考慮する必要がある。

フレア型護岸が直立護岸と接合する場合、沿い波が護岸接合部の鉛直面に直接作用して波の打ち上げ等の水面の擾乱を受ける。この水面の擾乱は護岸接合部を消波ブロックで被覆することで低減されることは確認したが、消波ブロックを設置することで沿い波がブロック法面を遡上して護岸接合部下手側の越波を招く場合があることも明らかとなった。斜め入射波に対するフレア型護岸端部の越波処理に関して、護岸接合部付近の水面の擾乱と越波を同時に抑制することが可能な消波工断面について検討を進める予定である。

参考文献

- 井上雅夫・土屋義人 (1971)：斜め入射波による鉛直堤の越波に関する実験的研究，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 259 - 264.
- 大野賢一・松見吉晴・竹田 壘・塚本倫也・木村 晃 (2004)：多方向不規則波浪場における護岸越波量の空間分布特性，海岸工学論文集，第51回，pp. 631 - 635.
- 片岡保人・堀 洋二・竹鼻直人・奥村昌好・村上啓介 (2005)：フレア型護岸の実海域への設置を考慮した水理実験，海洋開発論文集，Vol.21，pp. 529 - 534.
- 上久保祐志・入江 功・村上啓介・神田一紀・鮎川慶一郎・片岡保人 (2000)：非越波型防波護岸の防災特性に関する研究，海岸工学論文集，第47回，pp. 796 - 800.
- 高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志 (1984)：斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 542 - 546.
- 富田孝史・河合尚男・平石哲也 (2000)：斜め一方向不規則波および多方向不規則波による隅角部を有した消波ブロック被覆堤の越波特性，港湾技研資料，No.968，pp. 1-22.
- 平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 鋼・榎本達也 (1996)：護岸越波量における波の多方向性の影響，港湾技術研究所報告，第35巻，第1号，pp. 39-46.
- 細井正延・首藤信夫 (1962)：堤防に斜めに入射する場合のうちあげ高について，第9回海岸工学講演会講演集，pp. 149 - 152.
- 真木大介・村上啓介 (2011)：斜め入射波に対するフレア型護岸の越波制御機能，土木学会西部支部研究発表会概要，II，pp. 289 - 290.
- 村上啓介・入江 功・上久保祐志 (1996)：非越波型防波護岸の護岸天端高さとは作用は圧について，海岸工学論文集，第43回，pp. 776 - 780.
- 村上啓介・上久保祐志・入江 功・香月 理・片岡保人・中岡威博 (1998)：低天端消波工による非越波型防波護岸に作用する衝撃波圧の低減，海洋開発論文集，Vol.14，pp. 375 - 380.