斜め入射波に対するフレア型護岸の 作用波圧特性に関する検討

村上 啓介¹・陶山 亮哉²・黒枝 亮太³・
真木 大介⁴・竹鼻 直人⁵

¹ 正会員 宮崎大学工学教育研究部 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

E-mail: keisuke@cc.miyazaki-u.ac.jp

² 大分県土木建築部 (〒870-8501 大分市大手町 3 丁目 1 番 1 号)

³ 九州建設コンサルタント株式会社 (〒870-0946 大分市大字曲 936 番地 1)

⁴ 正会員 宮崎大学工学部技術支援センター (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

E-mail: maki@cc.miyazaki-u.ac.jp

⁵ 正会員 (株) 神戸製鋼所鉄構・砂防部 (〒651-8585 神戸市中央区脇浜海岸通 2-2-4)

E-mail: takehana.naoto@kobelco.com

深い円弧状の断面を持つフレア型護岸が提案され、その越波阻止機能や波圧特性が、主に断面二次元の条件下で検討されてきた。フレア型護岸の実海域における検討事例や適用事例が増え、斜め入射波に対する越波阻止機能や波圧特性に関する知見が求められている。斜め入射波に対するフレア型護岸の換算天端高係数の考え方については既に検討されている。一方で、作用波圧の特性に対する波の入射角度の影響については検討されていない。斜め入射波に対するフレア型護岸の波圧強度の考え方を整理することは、護岸断面の設計において重要である。本研究では、斜め入射波がフレア型護岸に作用する場における波圧特性を水理模型実験により検討した。また、フレア型護岸の実海域における検討断面を対象に、作用波圧に対する入射波角度の影響を数値計算により評価した。

Key Words : Flared shape seawall, wave pressure, oblique incident wave, hydraulic experiment, numerical simulation, Cadmas-sruf/3D

1. はじめに

海岸構造物を設計する際の入射波の波向きは現場によって様々で、場合によっては相当に大きな角度を持って入射する場合がある。そのため、構造物の設計における波向きの影響を明らかにするための実験的な検討が行われてきた^{1),2),3)}。

海岸構造物の設計に用いられる波圧公式は、直角入射の場合を基本に、入射波角度に応じて補正する考え方を取る。例えば、構造物に作用する最大波圧を求める際には、 $p_1=0.5(1+\cos\theta)(a_1+a_2\cos^2\theta)\rho_w gH$ ($\rho_w g$ は水の単位体積重量、 H は設計波高、 a_1 , a_2 は設計条件から決まる係数)の関係式が一般的に用いられ、式中の θ が入射波角度の影響を表している⁴⁾。

筆者らは、深い円弧状の断面を持つフレア型護岸を提案し、その越波阻止機能や波圧特性について、主に断面二次元の条件で検討してきたが⁵⁾、実海域における検討事例や適用事例が増えるにつれ、斜め入射波に対する越波阻止機能や波圧特性に関する知見が求められるようにな

った。斜め入射波に対するフレア型護岸の換算天端高係数の考え方については既に検討されている⁶⁾。一方で、作用波圧の特性に対する入射波角度の影響については検討されていない。

斜め入射波に対するフレア型護岸の波圧特性を整理することは、護岸断面の設計において重要である。本研究では、斜め入射波に対するフレア型護岸の波圧特性を水理模型実験により検討する。次に、実海域におけるフレア型護岸の検討断面を対象に、作用波圧に対する入射波角度の影響を数値計算により評価する。

2. 水理模型実験による波圧特性の検討

(1) 実験方法と条件

実験には、図-1に示す長さ20m、幅15m、高さ0.7mの屋外平面水槽を用いた。実験の縮尺は1/20程度を想定し、水槽のほぼ中央に護岸模型を設置した。護岸模型は幅0.6mを1ユニットとし、図-1に示すように入射波の波向きに対

して θ の角度で10ユニットを一行に配置した。水槽の床勾配は約1/105である。実験に用いた護岸模型の断面を図-2に示す。護岸の高さは $S_h=0.16\text{m}$ 、曲面部の奥行き深さは 0.08m である。この護岸模型を高さ 0.1m のマウンド上に設置して実験を行った。

フレア型護岸の波返し効果は護岸天端高さによって異なる。本実験では護岸天端高さが $h_c=0.038\text{m}$ と 0.064m の2ケースについて実験を行った。表-1に実験条件を示す。Case-1は護岸天端高さが 0.038m の場合で、護岸前面水深は 0.222m である。Case-2は天端高さが 0.064m の場合で、静水面の高さは護岸曲面部の最奥部にほぼ一致する。

護岸の設置角度(以下、入射波角度と呼ぶ)は $\theta=0, 15, 30, 45, 60^\circ$ の5種類とした。実験波は規則波で、入射波の周期は $T=0.9\sim 1.6\text{s}$ の範囲で設定した。また、入射波高は $H_0=0.04\text{m}\sim 0.12\text{m}$ の範囲で変えて実験を行った。なお、Case-2の周期が $T=1.0\text{s}$ で波高が $H_0=0.12\text{m}$ の場合は、入射波は護岸の沖側で明らかに砕波する条件であった。それ以外の入射波条件では概ね非砕波であった。本研究では、護岸高さが等しい直立護岸断面についても上記の条件で

図-1 実験に用いた平面水槽の概略図

図-2 フレア型護岸模型の寸法

表-1 水理模型実験のケース

実験 ケース	護岸天端高さ (護岸前面水深)	入射波条件		入射波 角度
		周期	波高	
Case-1	0.038m (0.222m)	0.9s	0.04m	$0^\circ, 15^\circ$
		1.1s		
		1.3s	0.06m	$30^\circ, 45^\circ$
		1.5s	0.08m	60°
Case-2	0.064m (0.196m)	1.0s	0.08m	$0^\circ, 15^\circ$
		1.2s	0.10m	$30^\circ, 45^\circ$
		1.4s	0.12m	60°
		1.6s		

実験を行い、護岸断面の違いについて比較した。

護岸列中央のユニットで作用波圧の測定を行った。圧力計の設置位置は図-2に示す $P_1\sim P_4$ である。Case-1では圧力計 P_2 の位置が静水面と一致し、Case-2では P_3 が静水面と一致する。水槽内が多重反射になる前の波圧波形を対象に波圧のピーク値を読み取り、その平均を計測値とした。計測は同一の入射波条件で3回繰り返し、その平均値を波圧値とした。使用した圧力計は(株)SSK社製のP310型で、サンプリング周波数 500Hz でデータを収録した。また、図-1に示す6箇所波高の計測を行った。

(2) 実験結果と考察

護岸に到達した波は、護岸曲面部で越波と波返しをしながら護岸に沿って伝播する。また、入射波角度が大きくなるに従い、波返しの程度は徐々に弱くなる傾向が目視で観察された。

図-3はCase-1とCase-2の波圧分布を比較したもので、入射波がCase-1は $H_0=0.08\text{m}$, $T=0.9\text{s}$, Case-2は $H_0=0.08\text{m}$, $T=1.0\text{s}$ の条件である。図の縦軸は、圧力計の取り付け位置を護岸高さ S_h で割った値で示しており、静水面高さが

(a) Case-1 ($H_0=0.08\text{m}$, $T=0.9\text{s}$)

(b) Case-2 ($H_0=0.08\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)

図-3 入射波角度の違いによる波圧分布の相違

(a) Case-1

(b) Case-2

図-4 フレア型護岸に作用する波圧分布の $\theta=0^\circ$ と $\theta=60^\circ$ における比較 ($H_0=0.08\text{m}$)

原点である。また、図の横軸は、計測した波圧を入射波高相当の静水圧で無次元化した値で示している。図中には、直立護岸の波圧分布も比較として示している。

Case-1 と Case-2 に示すフレア型護岸では、両ケースとも入射波角度 θ の増加にともない各計測点の波圧は低下する傾向を示している。入射波角度の増加にともなう波圧の低下傾向は直立護岸でも見られるが、入射波角度の影響はフレア型護岸の方が大きい。この傾向は護岸沖側で碎波が生じない他の入射波条件の場合も同様であった。

入射波角度が大きくなるに従い護岸曲面部での波返し程度が徐々に小さくなる様子が実験で観察された。護岸曲面部での波返し運動はフレア護岸の特徴的な現象であることから、その変化により直立護岸に比べて入射波角度の影響が明確に現れたものと考えられる。

図-4 は、フレア型護岸に作用する波圧分布を、入射波角度が $\theta=0^\circ$ と $\theta=60^\circ$ の場合について比較したものである。図-3 で示したように、入射波角度が $\theta=60^\circ$ の場合の波圧は $\theta=0^\circ$ の場合に比較して明らかに低下していることが確認できる。また、直角入射の場合は静水面高さ付

(a) P_2 での波圧の変化 (Case-1) (b) P_3 での波圧の変化 (Case-2)

図-5 入射波角度に対する静水面高さの波圧の低下傾向

近で最大波圧が生じる分布特性が見られるが、入射波角度が大きい $\theta=60^\circ$ では平坦な波圧分布形に変化している。入射波角度が大きい条件では、護岸法線に対して直角方向への波返し運動が $\theta=0^\circ$ の場合に比べて弱くなり、波当たりの程度が低下したことによると考えられる。

護岸に作用する最大波圧は、図-4 にも示すように、静水面付近で生じるのが一般的である⁵⁾。そこで、静水面高さの波圧 (Case-1 では P_2 , Case-2 では P_3) について入射波角度に対する波圧の低下傾向を検討した。

図-5 は、入射波角度に対する P_2 および P_3 の波圧変化を入射波高が $H_0=0.08\text{m}$ の場合について示したもので、図中には直立護岸の結果も示している。図-5(a)のフレア型護岸について見ると、入射波角度に対する波圧の変動が大きく、変動傾向は入射波周期によって異なるが、入射波角度が大きくなるに従い波圧が低下する傾向が読み取れる。図-5(a)の実験条件を合田式⁴⁾にあてはめると、入射波角度が $\theta=60^\circ$ の場合の最大波圧は $\theta=0^\circ$ での波圧の70%~71%となり、図-5(a)に示したフレア型護岸の波圧の低下割合は、 $T=1.5\text{s}$ を除き合田式から求めた低下割合よりも大きい。

図-5(b) に示す Case-2 においても, Case-1 と同様に入射波角度の増加にともない波圧が低下する傾向が読み取れる. 図-5(b)の実験条件を合田式にあてはめると波圧の低下割合は 67%~68%となる. 図に示すフレア型護岸の低下割合が 40%前後であることから, Case-2 においても合田式から求めた値よりも大きい低下割合となった.

図-6 は, 図-2 に示す $P_1 \sim P_4$ で計測した波圧を平均した断面平均波圧を, 入射波角度に対して示したものであ

る. 入射波角度に対する断面平均波圧の変化傾向は図-5 と類似している. 図-4 で示したように, $T=1.5s$ の場合を除くと, 入射波角度の増加にともない護岸上部から下部にかけて全体的に波圧が低下している.

3. 現地検討断面を対象とした入射波角度と波圧の関係について

(1) 現地検討断面の概要と数値計算の条件

本研究では, 現地での適用が検討されているフレア型護岸断面を対象に, 作用波圧に対する入射波角度の影響を数値計算により検討した. 現地は 7 工区に別れており, そのうちの 3 工区について検討した結果を示す. 表-2 に現地条件の概要を示す. 表中の H.H.W.L., 地盤高, 天端高さは基準面からの値で示している.

数値計算には Cadmas-Surf/3D⁷⁾を用いた. まず, 模型スケールの数値計算を行い, 数値計算の妥当性を水理模型実験との比較から検証した (以下, 数値計算 A と呼ぶ). 次に, 表-2 に示す護岸設置条件をもとに現地スケールの数値計算を行った (以下, 数値計算 B と呼ぶ).

数値計算 A では, 長さ 3.76m, 幅 5m, 高さ 0.7m の

(a) Case-1

(b) Case-2

図-6 入射波角度に対する断面平均波圧の低下傾向 ($H_0=0.08m$)

表-2 検討対象護岸の設計条件等の概要

設計条件	A 工区	B 工区	C 工区
換算沖波波高 (m)	1.33	1.57	2.98
沖波周期 (s)	6.8	6.8	6.8
入射波角度 (°)	55	45	30
H.H.W.L. (m)	+5.92	+5.92	+5.92
地盤高 (m)	+1.49	+1.38	+2.94
護岸前面水深 (m)	4.43	4.54	2.98
天端高さ (m)	+7.10	+7.40	D.L.+8.20
護岸高さ (m)	5.61	6.02	5.26

(H.H.W.L., 地盤高, 天端高さは基準面からの値)

(a) $\theta=45^\circ$

(b) $\theta=0^\circ$

図-7 フレア型護岸周辺の波高分布の例 (B 工区)

数値波動水槽を設定した。図-2に示す護岸断面を持つ幅1.5mのフレア型護岸を入射波に対して角度 θ で水槽中央設置し、護岸中央に検査断面を設定して波圧分布を求めた。計算格子の大きさは $\Delta x=0.02\text{m}$, $\Delta y=0.02\text{m}$, $\Delta z=0.01\text{m}$ とした。

数値計算Bでは、長さ130m、幅175m、高さ25mの数値波動水槽を設定し、表-2に示す3つの工区を対象に計算を行った。フレア型護岸は、各工区の入射波角度に応じて数値波動水槽内に一列に配置し、護岸列の中央付近に波圧を求める検査断面を設定した。計算格子の大きさは $\Delta x=0.7\text{m}$, $\Delta y=0.7\text{m}$, $\Delta z=0.35\text{m}$ とした。なお、現地の海底勾配は3工区ともに1/10であるが、数値計算の容量の関係から水平床として計算を行った。従って、護岸前面での碎波状況が実際とは異なる可能性がある。

数値計算Aと数値計算Bでは、いずれも規則波を造波した。数値計算Bの計算結果の一例を図-7に示す。B工区の入射波角度は $\theta=45^\circ$ で、その場合は図-7(a)に示すように沿い波が護岸に沿って伝播する様子を確認できる。一方、図-7(b)に示す $\theta=0^\circ$ とした場合は、沖向きの反射波により護岸の長手方向に対称な波高分布となり、入射波角度の違いにより沿い波状況と波高分布は大きく異なる。

(2) 計算結果と考察

数値計算Aで得られた波圧を水理模型実験と比較した結果を図-8に示す。図-8(a)は、入射波高が $H_0=0.08\text{m}$ の場合の波圧分布を比較したものである。入射波周期が $T=1.4\text{s}$ の場合を除くと、計算結果と実験結果は護岸上部から下部にかけて概ね良好に一致している。なお、 $T=1.4\text{s}$ では最上部の計算結果が実験結果を過小評価、最下部の計算結果が実験結果を過大評価となっているが、それ以外の箇所では両者は概ね一致している。

図-8(b)は、静水面位置に設けた計測点における波圧を入射波角度が異なる場合について比較したものである。図中には、直立護岸に関する計算結果と実験結果の比較も示している。フレア型護岸について見ると、水理実験結果と数値計算結果において入射波角度が増加するに従って波圧が低下する傾向が確認できる。また、波圧の低下傾向や波圧強度は、数値計算と水理実験で良好に一致している。同様に、直立護岸についても概ね一致していることが確認できる。

図-8に示すように、Cadmus-Surf/3Dを用いた数値計算は概ね現象を再現できていることを確認した。そこで、現地検討断面を対象とした数値計算Bを実施し、波圧に対する入射波角度の影響を評価した。

図-9は、表-2に示した3工区で検討されているフレア型護岸断面に作用する波圧分布を示したものである。A工区とB工区の入射波角度は 55° と 45° で、図中には比較として直角入射を仮定した場合の結果を $\theta=0^\circ$ と

(a) フレア型護岸に作用する波圧分布の比較

(b) 入射波角度に対する波圧変化の比較

図-8 数値計算結果と実験結果の比較

図-9 検討断面における波圧分布に対する入射波角度の影響

して示している。護岸断面に作用する波圧分布を直角入射の場合と比較すると、両工区ともに波圧値は全体的に低下していることが確認でき、静水面付近の波圧はA工区で約15%低下、B工区で約8%低下している。表-2に示した諸元を合田式にあてはめて最大波圧を概算すると、A工区の $\theta=55^\circ$ での波圧は $p_1/pgH_0=0.699$ となり、直角

入射の場合 ($p_1/\rho g H_0=0.890$) に比べて約 21%低下している。また、B 工区の $\theta=45^\circ$ での波圧は $p_1/\rho g H_0=0.756$ となり、直角入射の場合 ($p_1/\rho g H_0=0.889$) に比べて約 15%の低下となった。

C 工区では護岸の下部ほど波圧が高くなる分布を示し、入射波の波向きが変化してもその分布形を変えずに波圧は低下している。C 工区の波圧分布から静水面付近の波圧の低下割合を求めると約 25%であった。一方、表-2 に示した諸元を合田式にあてはめると、 $\theta=30^\circ$ での静水面付近の波圧は $p_1/\rho g H_0=0.962$ となり、 $\theta=0^\circ$ の直角入射の場合 ($p_1/\rho g H_0=1.059$) に比べて約 9%低下している。数値計算で求めた各工区の波圧値や低下割合が合田式の結果と比べて過大あるいは過小になった理由として、造波条件と海底勾配の設定条件の違い等が考えられる。

4. まとめ

本研究では、斜め入射波に対するフレア型護岸の波圧特性を水理模型実験により検討した。次に、フレア型護岸の実海域における検討断面を対象に、作用波圧に対する入射波角度の影響を数値計算により評価した。

入射波角度が大きくなるに従いフレア型護岸に作用する波圧は低下する。入射波角度の増加にともなう波圧の低下は直立護岸でも見られたが、入射波角度の影響はフレア型護岸の方が強くなる傾向にあることを確認した。護岸曲面部での波返し運動はフレア護岸の特徴的な現象で、入射波角度が大きくなると護岸曲面部での波返しの程度が徐々に小さくなり、このことが直立護岸に比べて入射波角度の影響が強く現れた理由と考えられる。

入射波角度によって越波と波返しの状況は変化するため、入射波条件や護岸設置条件によって波圧の低下割合

は異なる。そのため、合田式から求めた波圧の低下割合は、条件によっては過大あるいは過小評価になる場合がある。入射波角度を考慮に入れたフレア型護岸の波圧分布の算定が必要であることを確認した。

Cadmas-Surf/3D による数値計算結果は実験結果と概ね一致することを確認した。造波条件と海底勾配の設定条件が現地条件と若干異なるが、現地検討断面における入射波角度に応じた最大波圧の低下割合は、A 工区では約 21%、B 工区では約 15%、C 工区では約 9%であることを確認した。なお、本研究では計算時間と計算容量の制約から造波条件と海底勾配の設定条件が現地とは異なる。今後は現地条件の下で、不規則波で検討する必要がある。

参考文献

- 1) 合田良実：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第 12 巻，第 3 号，pp.31-69，1973.
- 2) 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利：斜め入射波に対する混成堤マウンド被覆材の安定重量算定法，海岸工学論文集，第 38 巻，pp.596-600，1991.
- 3) 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎・細山田得三：混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案，海岸工学論文集，第 39 巻，pp.676-680，1992.
- 4) 土木学会：海岸施設設計便覧，pp.89-90，2000.
- 5) 村上啓介・入江功・上久保祐志：非越波型防波護岸の護岸天端高さと作用波圧について，海岸工学論文集，第 43 巻，pp.776-780，1996.
- 6) 村上啓介・真木大介・竹鼻直人：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，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.68, No.1, L721-725，2012.
- 7) 財団法人 沿岸技術センター：CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究・開発，pp8-9，2010

(2016.2.4 受付)

CHARACTERISTICS OF WAVE PRESSURE ON FLARED SHALE SEAWALL UNDER OBLIQUE INCIDENT WAVES

Keisuke MURAKAMI, Ryoya SUYAMA, Ryota KUROEDA,
Daisuke MAKI and Naoto TAKEHANA

Flared Shape Seawall with a deeply curved front section was proposed, and its hydraulic characters such as wave overtopping prevention function and wave pressure have been examined mainly under normal incident wave conditions. The construction site of the seawall has a different incident wave angle, and above hydraulic characters are needed to be examined under oblique incident wave conditions. This study was conducted to clear the characteristics of wave pressure distribution on Flared Shape Seawall under some oblique incident wave conditions. The magnitude of wave pressure on the seawall decreases with incident wave angle, and its decreasing rate differs from an upright seawall. Furthermore, this study evaluated the influence of incidence wave angle on wave pressure that acts on Flared Shape Seawall which is planned on an actual construction site.