

フレア型護岸前面の洗掘特性に関する 実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON SCOURING
IN FRONT OF THE FLARING SHAPED SEAWALL

村上啓介¹・中野恵理香²・上久保祐志³・片岡保人⁴

Keisuke MURAKAMI, Erika NAKANO, Yuji KAMIKUBO and Yasuto KATAOKA

¹正会員 博士（工学） 宮崎大学 工学部土木環境工学科（〒889-2192 宮崎市学園木花台西1-1）

²非会員 ダイケンエンジニアリング株式会社（〒102-0084 東京都千代田区二番町12-2）

³正会員 博士（工学） 八代工業高等専門学校（〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627）

⁴正会員 博士（工学） （株）神戸製鋼所 機械研究所（〒651-2271 神戸市西区高塚台1-5-5）

Characteristics of scouring at the foot of the Flaring Shaped Seawall were investigated in this study. Two-dimensional hydraulic experiment on a movable bed was conducted to obtain topographic changes in front of the seawall under some incident wave conditions. The scouring depth in front of the Flaring Shaped Seawall becomes large with increase of the incident wave height in longer waves, and this increase tendency is similar to that of the vertical seawall. In shorter wave conditions, the scouring depth shows almost constant even under the large incident wave height. Both scouring depth and scoured sand volume at the foot of the Flaring Shaped Seawall are smaller than those of the vertical seawall under the small incident wave height. On the other hand, those scouring values of the Flaring Shaped Seawall become slightly larger than that of the vertical seawall under the large incident wave height. The occurrence of scouring in front of the Flaring Shaped Seawall is closely related to the generation of the undertow at the foot of the seawall.

Key Words : *Flaring Shaped Seawall, scouring, wave reflection, undertow*

1. はじめに

フレア型護岸は高潮対策事業として 2004 年度に現地施工が初めて実施された¹⁾。この工事では、パラペット型の既設護岸の前面に捨石マウンドを作

成し，その上にフレア型護岸を腹付けする形式で実施された。フレア型護岸を設置する以前は写真-1に示すような数メートル幅の砂浜が護岸前面に沿って存在していたが，この砂浜はフレア型護岸の設置範囲であったため消失した。写真-2 は写真-1 の

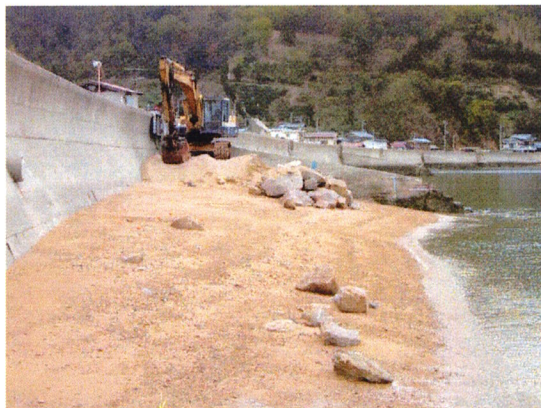


写真-1 既設護岸前面の海岸
(2004年12月撮影)



写真-2 フレア型護岸設置直後の状況
(2004年12月撮影)



写真-3 フレア型護岸設置から約1年後
(2006年3月撮影)

既設護岸の横でフレア型護岸が施工されている途中の様子を写したものである。当初から既存の砂浜を残す計画はなかったが、フレア型護岸設置から約1年後には、写真-2の護岸前面には写真-3に示すように護岸設置以前と同程度の砂浜が回復する状況に変化した。

フレア型護岸はその深い円弧部での強い波返し機能を伴って越波低減機能を発揮するので、護岸前面での波運動は既設の直立護岸とは大きく異なる。そのため、護岸前面の地形変化の特性も同様に異なることが考えられる。特に、護岸堤脚部付近での局所洗掘の発生は構造物の安定性を大きく損なうので、その発生機構や洗掘量を把握しておくことは護岸断面の設計において重要である。

構造物前面の洗掘に関する検討事例は多い。入江ら²⁾は比較的水深の深い防波堤や護岸を対象に洗掘発生機構を検討し、洗掘形式が Ursell 数と底面流速の関係によって L-タイプと N-タイプに分類されることを示している。田中ら³⁾は現地調査結果をもとに、防波堤堤頭部における洗掘深さと有義波高との関係を示している。また、榎木ら⁴⁾は護岸前面の堤脚水深が浅い場合には護岸壁面での戻り流れが護岸法尻先端部の洗掘に大きく寄与することを示している。

これらの知見は主に直立護岸を対象に得られたもので、深い円弧断面を有するフレア型護岸に対しても同様に適用できれば護岸断面の設計において有用な情報となり得る。本研究は、フレア型護岸と直立護岸前面の地形変化を水理模型実験で計測し、両者の比較をもとにフレア型護岸前面の洗掘発生機構と洗掘特性を検討することを目的に実施した。

2. 実験の方法

(1) 実験装置と実験条件

実験は図-1に示す長さ15m、高さ0.6m、幅0.4mの反射吸収式の2次元造波水路を用いて実施した。

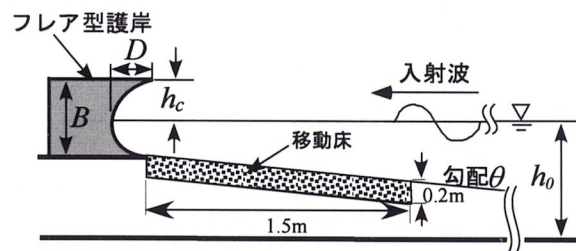


図-1 実験装置の概略

水路内に設けた1/20勾配の一樣斜面の一部に長さ1.5m、深さ0.2m、幅0.4mのピットを作成し、その中に底質を充填して移動床とした。

実験模型の護岸高さBは0.115m、奥行き深さDは0.055mとした。護岸はピットの陸側端に設置し、静水面が護岸最奥部に一致するように水路の沖水深 h_0 を0.465mとした。その時の護岸設置水深は0.055m、護岸天端高さ h_c は0.06mである。現地のフレア型護岸高さが3.7mであることから本実験の模型縮尺は1/30程度となる。

入射波の周期は $T=1\text{sec}$, 1.5sec , 2sec の3通り、波高は $H=0.02\text{m}$, 0.04m , 0.06m の3通りとし、それらを組み合わせた条件の規則波を一定時間造波することで実験をおこなった。比較として直立護岸を設置した場合についても同様の波浪条件で実験をおこなった。なお、実験で造波した入射波高は上記の値と若干の差異があったが、以下の説明では便宜的に上記の値を代表値として用いることとする。移動床実験では縮尺効果が問題となる。ここでは既往の移動床実験手法⁵⁾を参考に軽量物質メラミン（平均粒径0.2mm、比重1.5）を底質に用いた。

なお、写真-1～写真-3に示した現地施工の主な設計条件は、沖波換算波高1.86m、沖波波長42.51m、海底勾配1/10である。

(2) 地形変化と水理諸量の計測

実験の計測項目は、護岸前面の地形変化、波高分布、護岸反射率、護岸堤脚部付近の流速変動である。まず、ピット内に勾配が一樣な初期断面を形成し、規則波を一定時間作用させた後の地形変化を、砂面計を用いて0.05m間隔で計測した。一樣勾配の移動床に波を作用させると地形は急激に変化し、その後の変化量は微小となる。そこで造波開始から60分間は15分間隔で断面を計測し、その後は30分間隔とした。地形変化の計測をおこなった後に護岸前面の波高分布と護岸反射率を計測した。護岸反射率は分離推定法により求めた。

次節でも述べるが、ほとんどの実験ケースにおいて造波開始から90分程度経過すると地形の変化量が概ね微小となった。そこで、護岸堤脚部付近の平均的な流場を知る目的で、地形変化量が微小となった90分後に電磁流速計を用いて流速を測定した。測定は、護岸堤脚部から沖側に約0.02m離れた位置で

海底面から上方に0.01m間隔に取った4点でおこなった。

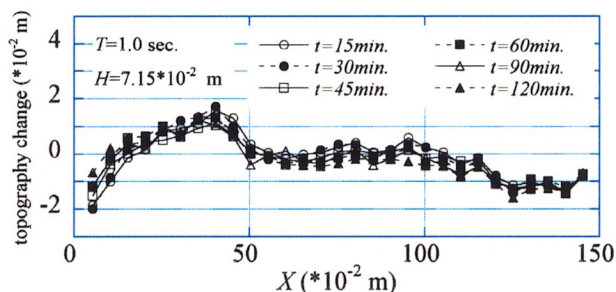
3. 結果と考察

(1) 波作用開始後の護岸前面地形の変化状況

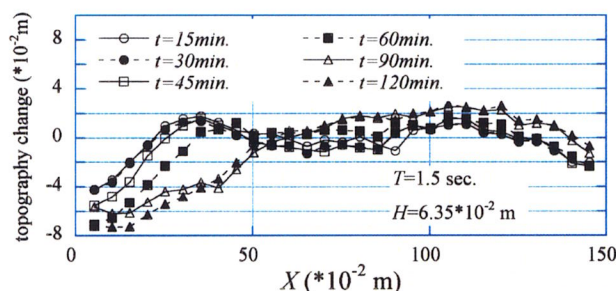
ピット内に作成した一様勾配の移動床に波を作用させると地形が急激に変化し始める。地形変化がある程度収束した後にフレア型護岸と直立護岸前面の洗掘特性を比較することを考え、事前に地形変化の収束状況について確認した。

図-2は、フレア型護岸前面の地形変化の様子を示したものである。横軸は護岸堤脚部から海底面に沿って沖向きに計った距離、縦軸は海底断面を計測した各時刻における初期断面からの地形変化量を表している。図は上段から順に入射波周期が $T=1\text{sec}$, 1.5sec , 2sec の場合について、入射波高が最も大きい場合(約0.06m)の結果を示している。

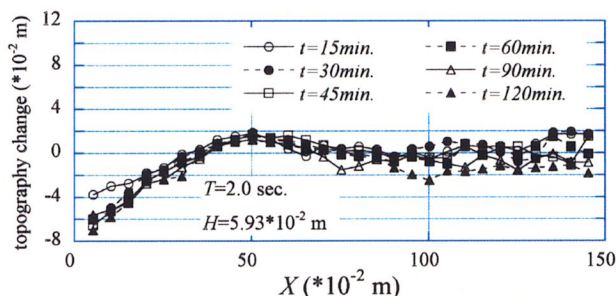
図-2(a), (c)に示す $T=1\text{sec}$ と 2sec の場合は、波作用開始から15分までの地形変化が最も大きく、その後の地形変化は微小である。一方、図-2(b)に示す $T=1.5\text{sec}$ の場合は造波開始から15分までの間に地



(a) $T=1.0\text{sec}$, $H=7.15 \times 10^{-2}\text{m}$



(b) $T=1.5\text{sec}$, $H=6.35 \times 10^{-2}\text{m}$



(c) $T=2.0\text{sec}$, $H=5.93 \times 10^{-2}\text{m}$

図-2 初期断面からの偏差の経時変化

形が大きく変化することは同様であるが、60分から90分の間にも大きな地形変化が生じている。今回の実験では、直立護岸を設置した全ての実験ケース、およびフレア型護岸を設置した場合で図-2(b)に示したケースを除く全てで図-2(a), (c)と類似した地形変化の収束状況を呈していた。

図-2(b)では60分から90分の間に大きな地形変化が生じたが、90分後と120分後の地形変化の差は小さいことと、これ以外のケースでは地形変化の収束状況がほぼ同様であったことから、ここでは波作用開始から90分経過した時点での護岸前面地形についてフレア型護岸と直立護岸で比較をおこない洗掘特性を検討することとした。

(2) 護岸堤脚部の洗掘深と洗掘土量

図-3はフレア型護岸(FSS)と直立護岸(VW)の堤脚部の洗掘深を各入射波周期について比較したものである。図中の横軸は実験時の入射波高、縦軸は実験で計測した護岸堤脚部の洗掘深(マイナスが洗掘, プラスが堆積)を表している。

現地の設計周期に近い $T=1\text{sec}$ の場合は、入射波高によらずフレア型護岸と直立護岸ともに護岸堤脚部に顕著な洗掘現象は見られない。一方、入射波周期が長い $T=1.5\text{sec}$ や 2sec になると、両護岸ともに入射波高が大きくなるに従い洗掘深が徐々に増大する傾向が見られる。

図-3に示すように、入射波高の増大に対する洗掘深の変化傾向は、各入射波周期においてフレア型護岸と直立護岸で類似している。また、入射波高が $H=0.02\text{m}$ や 0.04m の場合にはフレア型護岸の洗掘深は直立護岸よりも若干小さい結果を示した。一方、入射波高が更に大きい $H=0.06\text{m}$ の場合にはフレア型護岸堤脚部の洗掘深は直立護岸に比べて若干大きくなる場合が見られる。

田中ら³⁾は現地調査結果をもとに防波堤堤頭部における洗掘深さと有義波高の関係を検討し、洗掘深の最大は有義波高程度であることを示している。本実験においても $T=1.5\text{sec}$ や 2sec の場合の洗掘深は

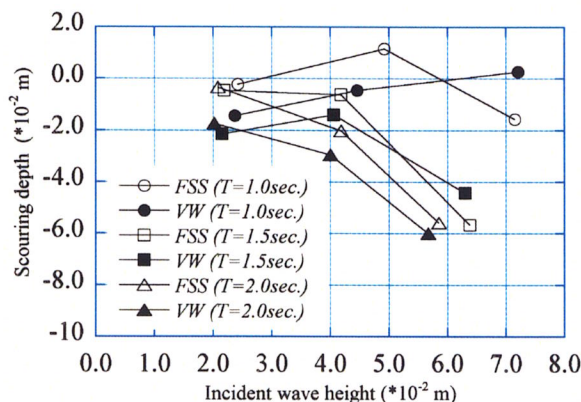


図-3 護岸堤脚部の洗掘深に関するフレア型護岸と直立護岸の比較

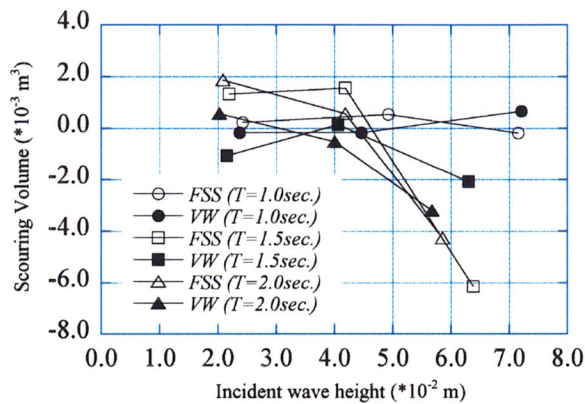


図-4 護岸前面の洗掘土量に関するフレア型護岸と直立護岸の比較

入射波高程度となっており、田中ら³⁾の検討と概ね類似した結果を示している。

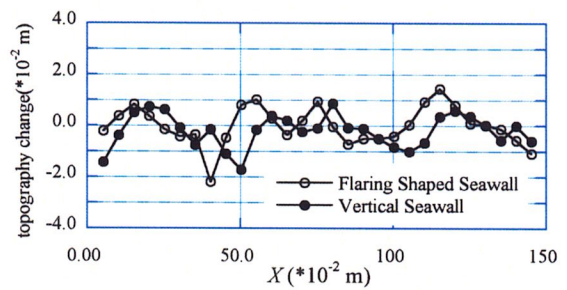
図-4はフレア型護岸 (FSS) と直立護岸 (VW) の護岸前面の洗掘土量を各入射波周期について比較したものである。ここでは堤脚部近傍の洗掘土量を比較する目的で、入射波の堤脚部における波長の1/8の範囲の土量変化を例に比較した。図の縦軸は土量変化量を示しており、マイナスは洗掘、プラスは堆積を表している。

図-3と同様に、現地の設計周期に近い $T=1$ 秒の場合の洗掘土量はフレア型護岸と直立護岸ともに非常に小さく、かつ入射波高による変動も小さい。一方、入射波周期が長い $T=1.5$ secや 2 secになると、両護岸ともに入射波高が大きくなるに従い洗掘土量が徐々に増大する傾向が見られる。特に入射波周期 1.5 secで波高 0.06 mの場合にフレア型護岸前面の洗掘土量が直立護岸に比べて大きくなっている。このケースは図-2(b)に示したように、他の実験ケースとは若干異なった地形の経時変化を呈していたことから特異な条件とも考えられる。次節で述べるが、フレア型護岸前面で顕著な洗掘が生じた理由として、護岸前面での流れが関係していると考えられる。ただし、洗掘土量が直立護岸に比べて大きくなった理由は明確ではない。

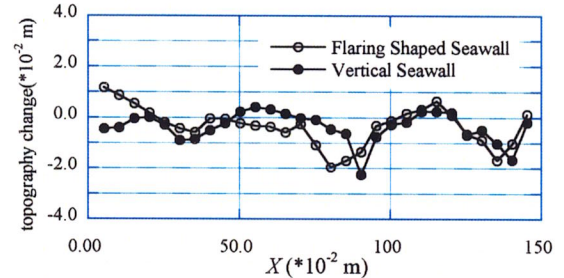
(3) 護岸前面の地形変化

図-5は、現地の設計周期に近い $T=1$ secの場合のフレア型護岸および直立護岸前面の地形変化を比較したものである。図中の横軸は護岸堤脚部から沖向きに計った距離、縦軸は造波開始から90分後の地形の初期断面からの偏差を示しており、マイナスが洗掘、プラスが堆積を表している。

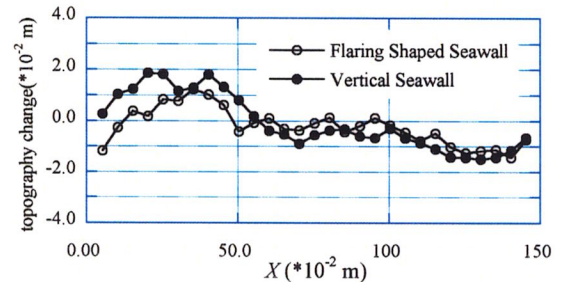
図-3、4に示したように、入射波の周期が 1 secの場合はフレア型護岸および直立護岸ともに護岸前面の洗掘深が小さく、かつ入射波高による変動も小さい。図-5(a)に示す入射波高が 0.02 mの場合は護岸前面では重複波的な運動が観察され、波高分布の腹と節に応じて洗掘と堆積が交互に生じている。入射



(a) $T=1.0$ sec., $H_{FSS}=2.42 \times 10^{-2}$ m, $H_{VW}=2.37 \times 10^{-2}$ m

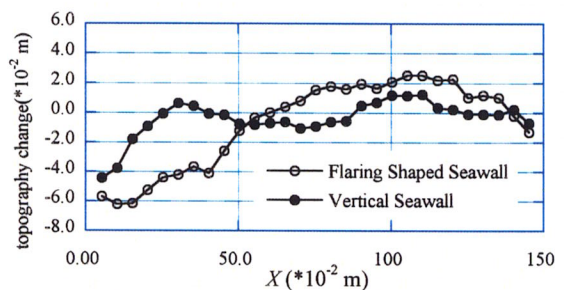


(b) $T=1.0$ sec., $H_{FSS}=4.92 \times 10^{-2}$ m, $H_{VW}=4.46 \times 10^{-2}$ m

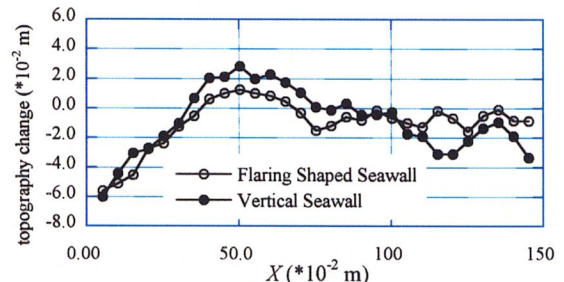


(c) $T=1.0$ sec., $H_{FSS}=7.15 \times 10^{-2}$ m, $H_{VW}=7.21 \times 10^{-2}$ m

図-5 護岸前面の地形変化の比較



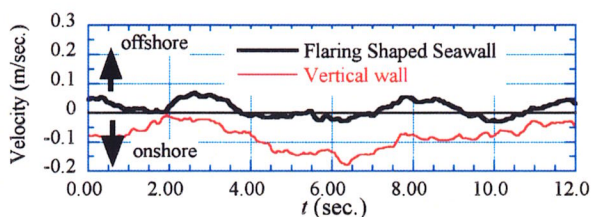
(a) $T=1.5$ sec., $H_{FSS}=6.35 \times 10^{-2}$ m, $H_{VW}=6.30 \times 10^{-2}$ m



(b) $T=2.0$ sec., $H_{FSS}=5.93 \times 10^{-2}$ m, $H_{VW}=5.99 \times 10^{-2}$ m

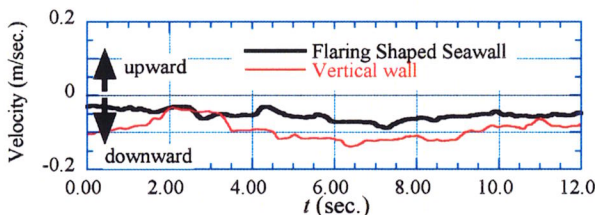
図-6 護岸前面の地形変化の比較

波高が徐々に大きくなり、護岸前面で碎波が生じる状況になると洗掘と堆積が交互に生じる様子は不明瞭になり、榎木ら⁴⁾の実験で述べられているよう



(a) 平均流の水平方向成分

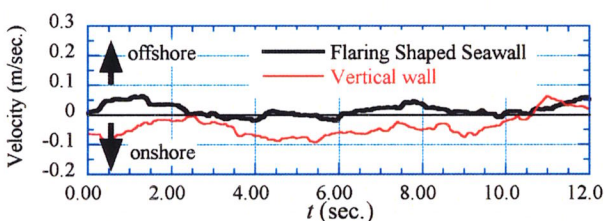
($T=1.5\text{sec.}$, $H_{FSS}=6.35 \times 10^{-2}\text{m}$, $H_{VW}=6.30 \times 10^{-2}\text{m}$)



(b) 平均流の鉛直方向成分

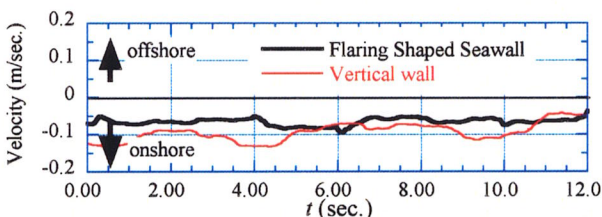
($T=1.5\text{sec.}$, $H_{FSS}=6.35 \times 10^{-2}\text{m}$, $H_{VW}=6.30 \times 10^{-2}\text{m}$)

図-7 護岸堤脚部付近の平均流



(a) 平均流の水平方向成分

($T=2.0\text{sec.}$, $H_{FSS}=5.93 \times 10^{-2}\text{m}$, $H_{VW}=5.99 \times 10^{-2}\text{m}$)



(b) 平均流の鉛直方向成分

($T=2.0\text{sec.}$, $H_{FSS}=5.93 \times 10^{-2}\text{m}$, $H_{VW}=5.99 \times 10^{-2}\text{m}$)

図-8 護岸堤脚部付近の平均流

に、護岸堤脚部で局所的な洗掘が生じその沖側に堆積箇所が形成されるような逆三角形型の洗掘形状を示す傾向が見られる。堆積箇所の位置や規模は異なるが、同様の洗掘形式は他のいくつかの入射波周期についても観察された。

図-6は、入射波高が0.06mで周期が1.5secと2secの場合の護岸前面地形をそれぞれ示したものである。図-4に示したように、入射波高が0.06mで周期が1.5secと2secの場合は、フレア型護岸前面で顕著な洗掘が生じた。このような顕著な洗掘が発生する機構は護岸前面での流れに関係していると考えられる。榎木ら⁴⁾は砕波点よりも陸側に護岸が設置される場合には、洗掘機構に護岸堤脚部付近での戻り流れの影響が大きく寄与することを示している。フレア型護岸断面の水面下部分は傾斜堤と類似した断面形

状になっているため直立護岸に比べて戻り流れが発生し易いことが考えられる。

図-7と図-8は、図-6に示した入射波条件について護岸堤脚部付近の水平方向と鉛直方向の平均流速を示したものである。平均流は、計測した流速の時間波形に対して入射波周期と同じ時間幅の移動平均を取って求めた。各図の横軸は時間、縦軸は平均流速を表している。水平方向流速のプラスは沖向き、マイナスは岸向き、鉛直方向流速のプラスは上向き、マイナスは下向きの流速をそれぞれ表している。

水平方向の平均流速を示した図-7(a)と図-8(a)について見ると、平均流速に時間変動はあるものの、直立護岸堤脚部付近では岸向きの平均流が生じているのに対してフレア型護岸では若干の沖向きの平均流が生じている。水平方向の平均流に関するこのような相異は入射波の波高が増大するに従い顕著になる傾向が見られた。一方、図-7(b)と図-8(b)に示した鉛直方向の平均流について見ると、直立護岸およびフレア型護岸ともに鉛直下向きの平均流を示している。フレア型護岸の流速は直立護岸に比べて小さいが、両者の差は入射波高が小さくなるに従い不明瞭になる。

砕波点よりも陸側にフレア型護岸が設置され、波長が比較的長い波が護岸に作用するような場合にはフレア型護岸は直立護岸に比べて沖向きの戻り流れが発生する機構が見られ、護岸堤脚部付近での戻り流れの影響によって図-6に示したように洗掘が発達し易い状況になったと考えられる。一方、直立護岸では岸向きの平均流が形成されているが、同時に鉛直下方の平均流も形成され、この流場が洗掘の発達と関係しているとも考えられる。洗掘の発達機構の詳細を明確にするためには、更に流場の詳細を空間的に把握する必要がある。

(4) 護岸堤脚部における洗掘発生状況の比較

佐伯ら⁶⁾は護岸堤脚部の洗掘深と護岸設置位置、設置水深、護岸法勾配、護岸反射率等の関係を整理

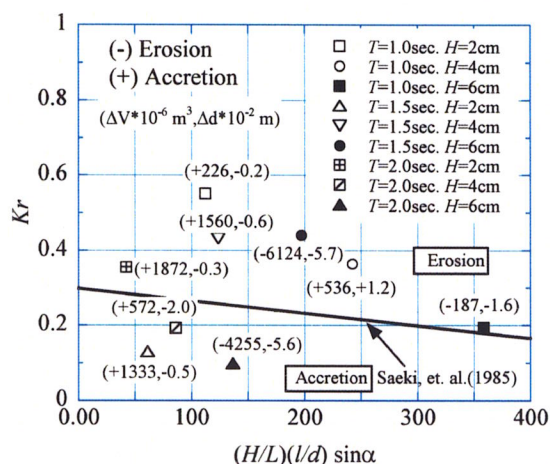


図-9 局所洗掘の発生状況 (フレア型護岸)

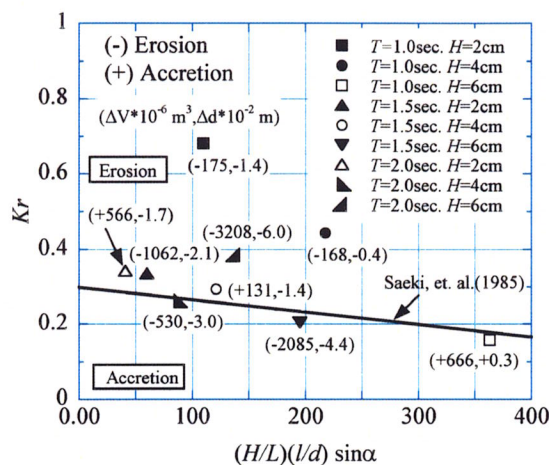


図-10 局所洗掘の発生状況（直立護岸）

して洗掘発生条件を検討している．ここではそれらと同様の整理をおこなってフレア型護岸の洗掘発生状況を直立護岸と比較した．

図-9は，佐伯ら⁶⁾と同様の指標に従ってフレア型護岸の洗掘発生状況を示したものである．縦軸は反射率，横軸は佐伯ら⁶⁾の指標を表している．ここで， H/L は入射波の波形勾配， l は護岸設置位置から波の最大遡上点までの距離， d は底質粒径， α は護岸法勾配である．図中の各プロットには洗掘土量と洗掘深を付記しており，洗掘土量がマイナスの場合にはプロットを塗り潰して示している．また，図中には，佐伯ら⁶⁾が判別の目安として引いた直線を併記している．

図-3，4で示したように，入射波高が比較的小さい $H=0.02\text{m}$ や 0.04m の場合はフレア型護岸の洗掘深は微小で土量変化はプラスの値を取る場合が多い．そのため，図-9に示すように，佐伯ら⁶⁾の判別では洗掘が生じる条件（図中の直線より上の領域）においても有意な洗掘が発生しない場合が見られる．一方，洗掘が生じない条件（図中の直線より下の領域）においてもフレア型護岸の場合には有意な洗掘が生じるケース（例えば，図-6(a)のケース）も見られた．

図-10は直立護岸について同様の指標で実験結果を整理したものである．直立護岸では，洗掘が生じる条件において本実験でも洗掘が生じており概ね一致した結果となった．以上のことから，フレア型護岸の洗掘発生条件は佐伯ら⁶⁾の指標のみから判別することは難しく，護岸低脚部付近の流れの特性を加えて評価する必要があると考える．

4. まとめ

フレア型護岸と直立護岸前面の地形変化を水理模

型実験で計測し，両者の比較をもとにフレア型護岸前面の洗掘発生機構と洗掘特性を考察した．本研究で得られた結果は以下の項目に要約される．

- (1) 入射波高の増加に伴いフレア型護岸の洗掘深および洗掘土量は増大する．入射波高の増大に対する洗掘量の変化傾向はフレア型護岸と直立護岸で類似している．
- (2) 入射波高が比較的小さい条件ではフレア型護岸の洗掘深および洗掘土量は直立護岸に比べて若干小さい値を示す．一方，入射波高が大きい条件ではフレア型護岸堤脚部の洗掘量は直立護岸に比べて若干大きくなる場合が見られた．
- (3) フレア型護岸堤脚部で顕著な洗掘が発生する機構は，護岸低脚部付近での流れの特性と関係していると考えられる．砕波点よりも陸側にフレア型護岸が設置され，波長が比較的に長い波が護岸に作用するような場合にはフレア型護岸は直立護岸に比べて沖向きの戻り流れが発生する機構が見られ，護岸堤脚部付近での戻り流れの影響によって洗掘が発達しやすい状況になると考えられる．
- (4) 護岸反射率と洗掘発生との間には相関があるとされるが，フレア型護岸に関しては本実験で明瞭な相関は確認できなかった．フレア型護岸の洗掘発生機構には，護岸低脚部付近の流れの特性を評価することが重要と考える．

フレア型護岸前面の洗掘特性には捨石マウンドの影響も重要である．また，洗掘防止工の評価も必要と考える．それらについては更に検討を進める予定である．

参考文献

- 1) 竹鼻直人，濱崎義弘，奥村昌好，片岡保人，里一太：フレア護岸の設計・作成・施工，海洋開発論文集，Vol. 21, pp. 523-528, 2005.
- 2) 入江功，近藤隆道，赤石正廣，寺崎賢次：重複波による防波堤前面での海底洗掘-底質の移動機構に着目した研究-，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 440-444, 1984.
- 3) 田中則男：砂浜港周辺における海底および海浜の変化，昭和49年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 1-46, 1974.
- 4) 榎木亨，高畑市三：海岸堤防堤脚部の局所洗掘機構について（そのII），第18回海岸工学講演会論文集，pp. 371-376, 1971.
- 5) 山口洋：DRIMを用いた3次元の漂砂制御に関する研究，九州大学学位論文，pp. 117, 2003.
- 6) 佐伯浩，佐藤俊哉，小野敏行，浜中健一郎：海岸護岸堤脚部の洗掘に関する実験的研究，第32回海岸工学講演会論文集，pp. 440-444, 1985.