

不透過矩形潜堤前面に生じる局所洗掘と 洗掘深の定式化に関する研究

STUDY ON LOCAL SCOUR IN FRONT OF IMPERMEABLE SUBMERGED
BREAKWATER AND ITS ESTIMATION METHOD

李光浩¹・水谷法美²
Kwang-Ho LEE and Norimi MIZUTANI

¹工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (同上)

Local scour around coastal structures may lead instability of them. This study investigates experimentally the local scour in front of an impermeable submerged breakwater with vertical front face. Experimental results show that the scour pattern in front of the submerged breakwater is similar to that in front of a vertical breakwater, although there is a little difference in locations of the scour and deposition. Also, the maximum scour depth normalized by the incident wave height is found to decrease exponentially with relative water depth to the wavelength. The scour depth depends much on the reflection coefficient. This study proposes the estimation method of the scour depth considering the effect of wave reflection and it is demonstrated that the proposed method gives good estimations of the scour depth for various reflection coefficient.

Key Words : *scour, impermeable submerged breakwater, maximum scour depth*

1. はじめに

海岸構造物の周りに発生する洗掘は、構造物の本来の機能を低下させるだけでなく、構造物の安定性をもおびやかす原因の一つにもなる。これまで様々な海岸構造物を対象に、波や流れによって発生する局所洗掘について多くの研究がなされてきた。Xie¹⁾は直立防波堤前面の洗掘を対象に2次元水理実験を行い、直立防波堤の洗掘と堆積の位置は堤体前面に形成される重複波と深い関係があることを明らかにした。入江ら²⁾は混成堤に対する実験と理論解析を行い、水平床における底質は重複波の腹から節に移動するN-タイプ、節から腹に移動するL-タイプがあることを明らかにした。木原ら³⁾は混成堤の洗掘対策工に対して室内実験と現地調査を比較した。鈴木・高橋⁴⁾は洗掘がケーソンの消波ブロックの沈下を引き起こす過程を水理実験より検討した。Sumer and Fredsøe⁵⁾は捨石式防波堤前面の洗掘に対して2次元水理実験を行い、Xie¹⁾の直立防波堤前の地形変化と比較し、直立防波堤とは若干異なることを示した。このように、

防波堤に対しては多くの知見が得られている。

一方、潜堤に対しては荒木⁶⁾が水理実験から透過潜堤の法先洗掘と堤体の変形を調べているが、一般的な防波堤に比べて検討例は少なく、特に不透過潜堤の場合の洗掘の検討例は非常に少なく、その知見はほとんどないのが実情である。直立潜堤は人工干潟の砂留工として施工例が増えることが予想され、したがって不透過潜堤周辺の局所洗掘の発生機構やその実態を明らかにしておくことは重要である。そこで、本研究では、2次元水理模型実験を行って不透矩形潜堤の前面で生じる洗掘の実態を明らかにすると同時にその特性を明らかにすることを目的とする。

2. 水理実験

(1) 実験装置

水理模型実験を名古屋大学の二次元造波水路 (長さ

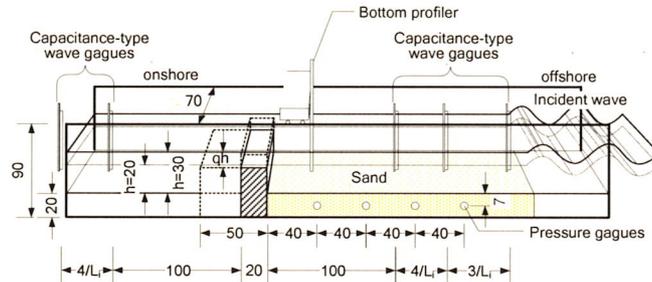
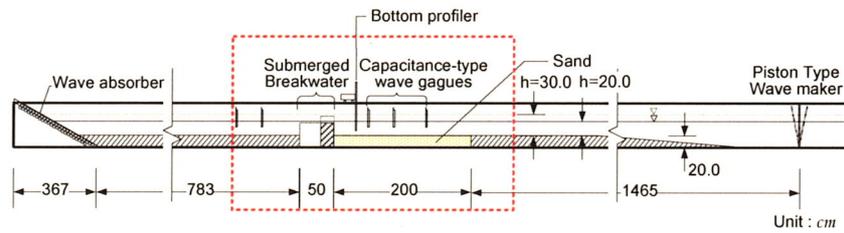


図-1 潜堤による洗掘実験の概略図

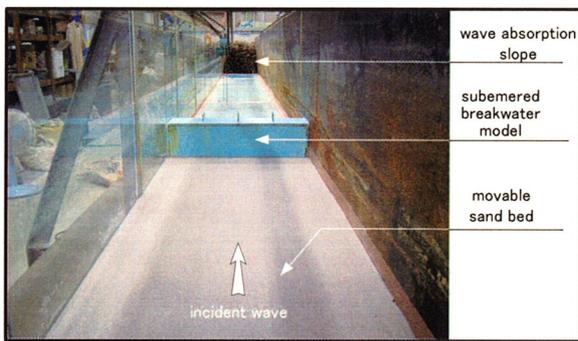


写真-1 実験装置の様子

30m, 幅70cm, 高さ90cm) を用いて行った。水路の一端にはフラップ式造波装置が設置されている。この造波板より岸側約17mの位置にベニヤ板製の不透過矩形潜堤の模型を設置し、不透過矩形潜堤の前面には $D_{50}=0.20\text{mm}$ (D_{50} : 中央粒径)の砂を用いて長さ 2m, 厚さ 20cmの水平移動床を作製した。

本実験では不透過矩形潜堤前面に生じる洗掘の発生に着目しているため、洗掘によって引き起こされる構造物の変位と波が互いに干渉することと、それによって最終の地形変動が変わることを避けるため、不透過矩形潜堤の模型は水槽底面上に直接設置した。すなわち、波や波に起因する流れによる漂砂以外の効果は排除するようにした。実験装置の詳細、および潜堤の模型や移動床設置状況をそれぞれ図-1と写真-1に示す。

(2) 実験条件

水深 h を20cm及び30cmの2種類変化させた。いずれも水平床とした。入射波は規則波とし、洗掘が発生しやすいように、造波水路の許容範囲の中でできるだけ大きい波を入射させた。ただし、不透過矩形潜堤の前面で形

成される重複波が崩れない範囲で実験を行った。不透過矩形潜堤の模型は、天端幅や天端水深を変化させ、4種類の形状を採用した。これらの波と不透過矩形潜堤の形状条件を組み合わせることによって計36ケースの実験を行った。これらの実験ケースの詳細を表-1に示す。

不透過矩形潜堤による波の変形を測定するため、図-1に示すように前面に3本、背後に2本の電気容量式水位計を設置した。また、数値モデルの検証のため移動床の内部には間隙水圧計を設置している。ただし、本研究では数値モデルに対しては検討を行っておらず、別途報告する予定である。また、波によって引き起こされた不透過矩形潜堤の前面の移動床の変動を非接触式連続砂面計を使って計測した。

表-1 実験の条件

Test	水深 (cm)	潜堤の模型		波の周期	波形勾配
		幅 (cm)	天端水深 (cm)		
1	30	20	4	1.20~2.05	0.022~0.052
2	"	"	14	1.30~1.80	0.030~0.038
3	20	"	4	1.10~1.90	0.020~0.037
4	"	50	"	1.20~1.90	0.019~0.037

(3) 移動床の初期条件

本研究で用いた造波水路のような小規模の水力実験では波によって引き起こされる地形変動の絶対値は大きくないことが予測され、したがって、移動床の初期不整は最終的な結果に大きく影響をおよぼす可能性がある。そこで、本実験では移動床の初期地形の不整について、絶対誤差が2mm以内になるまで調整し、地形を作成した。図-2は波作用前の初期地形を非接触式連続砂面計で測

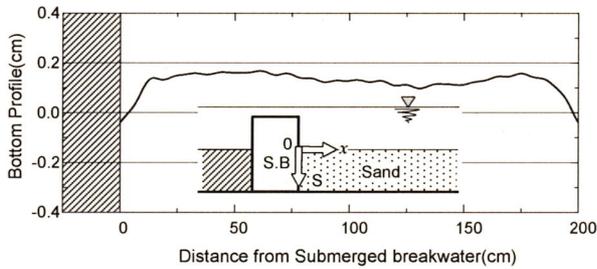


図-2 移動床の初期地形の例

定一例である。

3. 実験結果及び考察

(1) 洗掘のパターン

Xie¹⁾は直立防波堤を対象にして洗掘に関する水理実験を行い、図-3に示すように、細砂の場合は洗掘が重複波の節の位置に、堆積が重複波の腹の近くで発生すること、一方、粗砂の場合、洗掘が重複波の腹と節の間で発生することを明らかにした。底質にしたがう洗掘のパターンに関するこれらの現象はSummer and Fredsøe⁵⁾の水理実験によっても示されている。一般的に細砂と粗砂は底面近傍の最大流速と砂粒子の沈降速度の比として式(1)のように分類される。

$$(1) \quad \begin{cases} \frac{U_{b\max}}{w_s} < 10 : \text{粗砂} \\ \frac{U_{b\max}}{w_s} > 10 : \text{細砂} \end{cases}$$

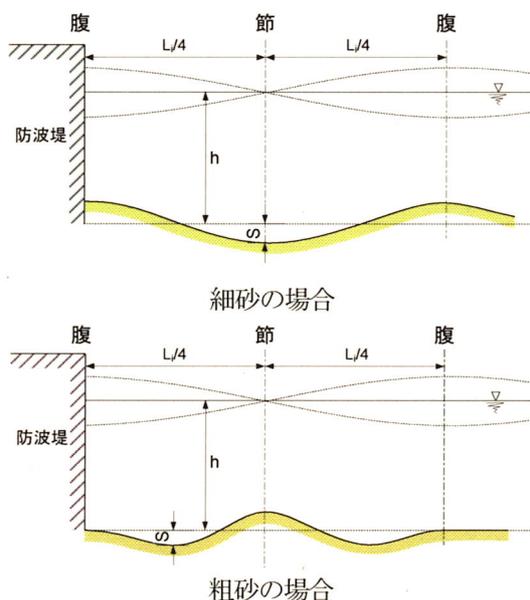


図-3 底質による洗掘のパターン¹⁾
(直立防波堤の場合)

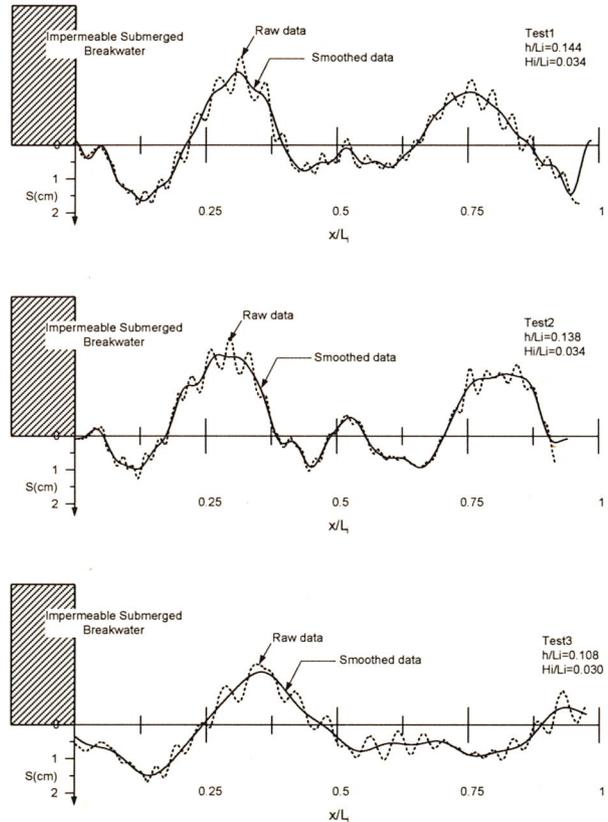


図-4 不透過矩形潜堤前面の地形変化

本実験で用いた砂粒子の沈降速度 w_s を Soulsby⁷⁾が提案した式(2)で計算すると $w_s = 2.61 \text{ cm/s}$ となり、入射波による底面近傍の最大流速を微小振幅波理論で評価すると本実験の底質は粗砂に分類されることになる。

$$(2) \quad w_s = \frac{\nu}{D_{50}} \left[(10.36^2 + 1.049\hat{D}^3)^{0.5} - 10.36 \right]$$

ここに、 ν は水の動粘性係数、 \hat{D} は無次元砂粒子の粒径で(3)式のように定義される。

$$(3) \quad \hat{D} = \left[\frac{g(s-1)}{\nu^2} \right]^{1/3} D_{50}$$

図-4は各条件に対して、入射波を5000波作用させた後の不透過矩形潜堤の前面の地形変動を例示したものである。図に示すように、全般的な地形変動のパターンは図-3の直立防波堤と同様な傾向を示しており、洗掘の発生位置は全ケースにおいて不透過矩形潜堤の前面からおよそ $1/8L_i$ (ここに、 L_i は入射波長) 離れたところ、すなわち、部分重複波の腹と節の間である。これは本研究で対象とした不透過矩形潜堤は天端上の流水域を除けば直立防波堤との前面と類似な波浪場、すなわち部分重複波が形成されることに起因するためと考えられる。しかし、全体的に洗掘や堆積の位置が若干沖側に移動してい

ることが認められる。これはXie¹⁾の直立防波堤の結果と異なり、不透過矩形潜堤の場合には天端上で発生する砕波後に形成される冲向きの強い流れに起因すると考えられる。また、このような洗掘や堆積の位置の沖側への移動は全ケースにおいて不透過矩形潜堤の反射率に関わらず発生することを確認した。本実験では天端水深が4cmのTest 1, 3, 4の場合は川崎⁸⁾の定義によるとSpilling-Plunging型の砕波が、天端水深がより深い14cmの場合はSpilling型の砕波が発生した。なお、二次元の水理実験の場合、不透過矩形潜堤の背後でのわずかな水位が上昇し、冲向きの流れが助長されることも一つの原因として挙げられる。

法先での洗掘に着目すると、水深が30cmのTest 1とTest 2の場合、法先での洗掘はほとんど発生しない。一方、水深が20cmのTest 3の場合、わずかに法先での洗掘が認められる。さらに、Test 3の場合はTest 1とTest 2に比べて洗掘や堆積の位置が沖側方向にずれていることもわかる。このような法先での洗掘はSummer and Fredsøe⁹⁾の捨石式防波堤の結果と一致している。しかし、その発生機構は捨石式防波堤とは異なり、捨石式防波堤の場合は防波堤の内部からの流れによって起因するが、不透過矩形潜堤の場合は前述したように不透過矩形潜堤の天端での砕波に起因する冲向きの戻り流れが生じ、この流れによって形成される潜堤の前面での渦に起因すると考えられる。水深がより浅い20cmの場合には渦の影響が大きくなり、法先での洗掘が発生したと考えられる。なお、実験中の観察から水深が30cmの場合より20cmの場合に、より大きい渦が確認されている。

(2) 最大洗掘の比較

図-5は不透過矩形潜堤の天端水深による最大洗掘を

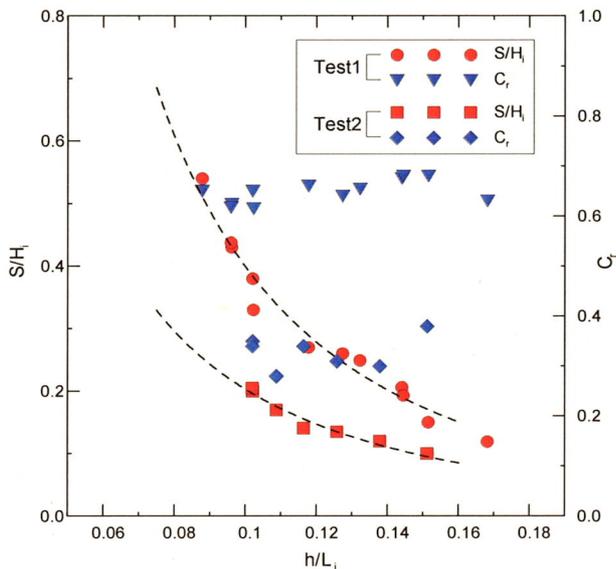


図-5 天端水深の違いによる最大洗掘の比較

考察するため、Test 1とTest 2の無次元最大洗掘 S/H_i を水深波長比 h/L_i に対して示した結果である。同図に潜堤前面の水面変動のデータを用いて入射分離法から求めた反射率も同時に示してある。なお、これらの反射率は顕著な地形変動が生じる前の水面変動を用いて算定してある。図からわかるように、反射率は潜堤の天端水深がより浅いTest 1の場合がTest 2より大きい。無次元洗掘深 S/H_i に注目すると、若干ばらつきがあるが、全般的に、入射波周期が長くなり、水深波長比が小さくなると洗掘深は増加していることがわかる。これは水深波長比の小さい方が同一の波高に対して底面付近の水粒子速度が大きくなるためであると考えられる。無次元洗掘深には若干のばらつきが認められるが、これは本実験装置では造波板からの再反射を完全に消

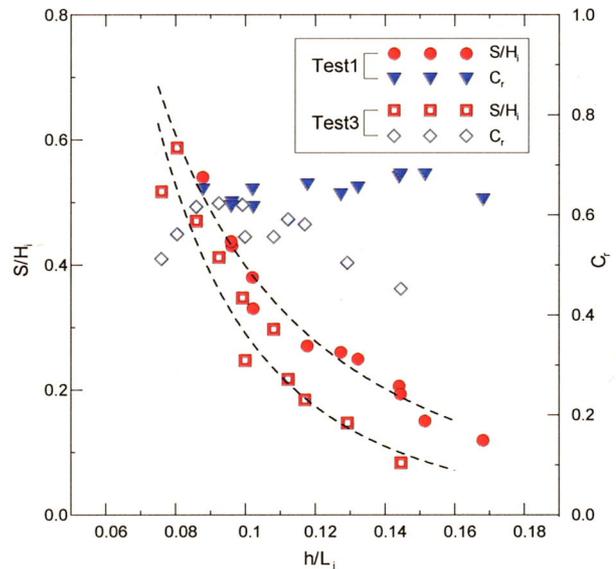


図-6 水深による最大洗掘の比較

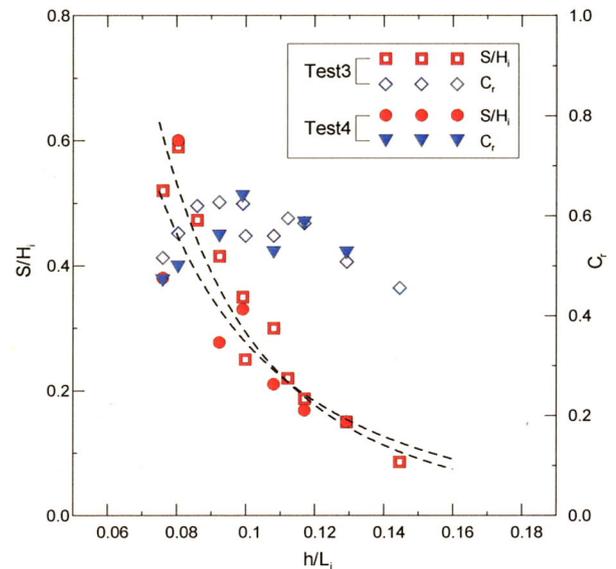


図-7 潜堤の幅による最大洗掘の比較

することができないため、水槽の中で多重反射の影響が多少現れたことが原因であると考えられる。また、Test 2の場合、Test 1に比べて、水深波長比の減少による無次元最大洗掘の増加率はゆるやかである。これは潜堤前面の洗掘は主に重複波から形成された定常流れによって引き起こされるため^{1),7)}、相対的に深い天端水深を持つTest 2の場合は天端上へ波が伝播しやすく、入射波の反射率が小さくなることに起因すると考えられる。

図-6は不透過矩形潜堤前面の無次元最大洗掘に及ぼす水深の影響を比較した結果を示す。図からわかるように、水深が20cmのTest 3の場合も図-5と同様に水深波長比の減少に伴って無次元洗掘深さは増加しているが、洗掘の深さは水深が30cmのTest 1の場合より小さいことがわかる。特に、水深波長比が大きいほどTest 1との洗掘深の差が大きくなる。この傾向はTest 1とTest 3の反射率の差にも認められ、したがって反射率の差の減少にともなって洗掘深の差が小さくなることが推察される。

図-7は同一な水深に対して不透過矩形潜堤の幅の変化が最大洗掘深に及ぼす影響を考察するため、Test 3とTest 4の無次元最大洗掘を比較したものである。図-5や図-6とは異なり、幅による無次元最大洗掘深の差はあまり認められない。不透過矩形潜堤の反射率は幅よりも天端水深により強く支配されると考えられ、そのため両条件では反射率にほとんど差が無いことが原因であると考えられる。

(3) 直立防波堤や捨石式防波堤との比較

既述したように、これまで様々な海岸構造物に対して局所洗掘が検討されてきたが、以下にこれらの構造物も含めて、構造形式による洗掘深の特性について検討する。

図-8は直立防波堤に対するXie¹⁾の提案式(4)による予測値と実験結果及び捨石式防波堤に対するSummer and Fredsøe⁵⁾の提案式(5)による予測値と不透過矩形潜堤に対する本実験の無次元最大洗掘の深さの結果を同時に示したものである。

$$\frac{S}{H_i} = A \sinh \left(2\pi \frac{h}{L_i} \right)^{-1.35} \quad (4)$$

$$\frac{S}{H_i} = f(\alpha) \sinh \left(2\pi \frac{h}{L_i} \right)^{-1.35} \quad (5)$$

ここに、 A は無次元係数で、細砂の場合は0.4、粗砂の場合は0.3、 $f(\alpha)$ は捨石式防波堤の斜面傾斜角 α の関数で、 $f(\alpha) = 0.3 - 1.77 \exp(-\alpha/15)$ で定義される。

これまでの結果からわかるように水深波長比 h/L_i が小さくなると、構造物の形式に関わらず、洗掘深さは増

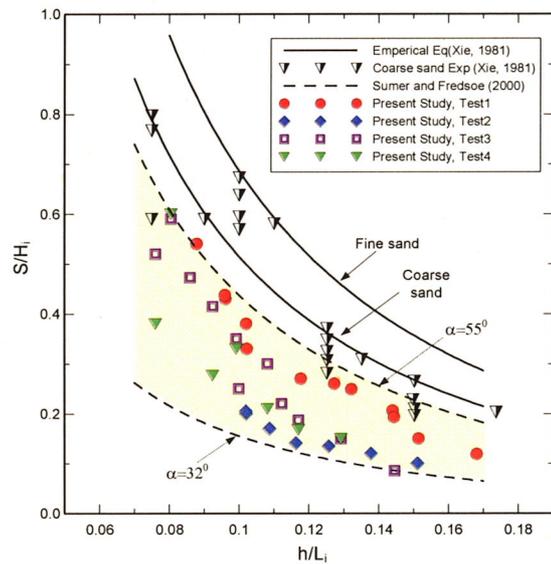


図-8 直立防波堤と捨石式防波堤との最大洗掘深さの比較

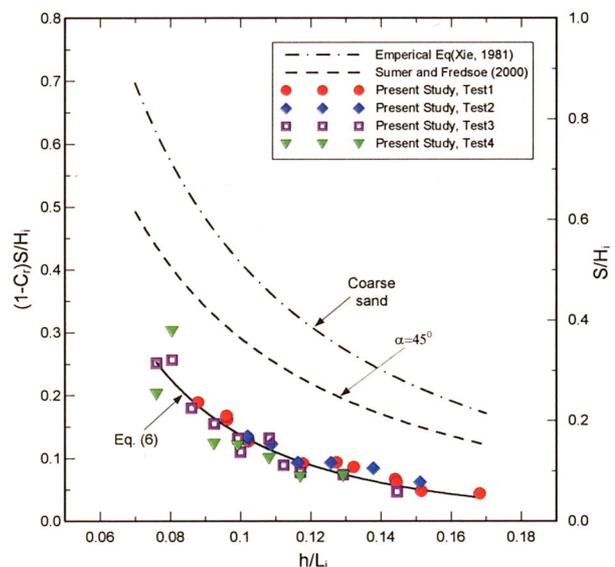


図-9 不透過矩形潜堤の反射率を考慮した最大洗掘深さの比較

加している。また、直立防波堤の場合、入射する波が構造物によってほぼ完全反射するため、不透過矩形潜堤や捨石式防波堤による洗掘深さより大きくなっているのがわかる。一方、本実験値と Summer and Fredsøe⁵⁾の経験式を比べると、不透過矩形潜堤による洗掘の深さは捨石式防波堤の斜面傾斜が約 $32^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ の範囲に良く対応することが認められる。このことは捨石式防波堤の反射率は防波堤の斜面傾斜によって異なるが、一般的に0.3~0.6の範囲になることが報告されている⁹⁾。本実験で得られた潜堤の反射率はTest 1の場合0.62~0.68、Test 2の場合0.28~0.38、Test 3の場合0.46~0.63、Test 4の場合

0.47-0.64の範囲であったが、これらの不透過矩形潜堤の反射率が捨石式防波堤の反射率とほぼ同様な範囲であり、したがって構造物前面に形成される部分重複波動場によく似た特性があることに起因すると考えられる。

(4) 不透過矩形潜堤による洗掘深さの定式化

これまでの洗掘深に関する検討結果から、不透過矩形潜堤による洗掘深は、構造物の前で形成される部分重複波動場に密接に関係すると考えられる。そこで、本研究では不透過矩形潜堤前面の波動場の影響を考慮するため、反射率 C_r の効果を含めて洗掘を式(6)のように表すこととした。

$$\frac{S}{H_i} = \frac{0.06}{(1-C_r)[\sinh(kh)]^{2.04}} \quad (6)$$

ここに、 k は波数である。

式(6)による算定結果を図-9に示す。図からわかるように、本実験の範囲では最大洗掘の深さは不透過矩形潜堤の形態に関わらず、直立防波堤や捨石式防波堤に対する算定式のように、一つの関数で近似できることが確認できる。すなわち、本実験の範囲では不透過矩形潜堤前面に形成される地形変化に見られる最大無次元洗掘深 S/H_i は反射率を考慮した式(6)で与えられるといえる。

4. おわりに

本研究では、不透過矩形潜堤を対象に、波によって引き起こされる局所洗掘を水理模型実験の結果に基づいて検討した。その結果、不透過矩形潜堤前面の地形変動は直立防波堤と定性的には同様な傾向であることを明らかにした。また、最大洗掘の深さは他の海岸構造物と同様

に水深波長比の減少にともなって増加するが、堤体の反射率に影響されることが確認された。本研究では、最大洗掘深に関する実験結果に基づいて不透過矩形潜堤の反射率の影響を考慮した新たな局所洗掘深の算定式を提案した。そしてその提案式の有効性を示した。

謝辞：本研究を行うに当たり財団法人掘情報科学振興財団より研究補助を賜った。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Xie, S.L. : Scouring patterns in front of vertical breakwaters, Acta Oceanol. Sin. 4(1), pp.153-164, 1985.
- 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一, 第31回海岸工学講演会論文集, pp.350-335, 1984.
- 3) 木原 力, 甲斐正義, 鳥居雅孝, 望月規行 : 防波堤前面の洗掘対策について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp.402-406, 1988.
- 4) 鈴木高二朗, 高橋重雄 : 消波ブロック被覆堤のブロック沈下に関する一実験-マウンドとブロック下部の洗掘- : 海岸工学論文集, 第45巻, pp.821-825, 1998.
- 5) Sumer, B.M., Fredøse, J. : Experimental study of two-dimensional scour and its protection at a rubble-mound breakwater, Coastal Eng. 40, pp.59-87, 2000.
- 6) 荒木進歩, 麓 博史, 三好宏和, 出口一郎 : 捨石潜堤の法先洗掘と洗掘に伴う堤体の変形, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.921-926, 2005.
- 7) Soulsby, R. : Dynamics of Marine Sands. Thomas Telford, London, 1997
- 8) 川崎浩司 : 潜水構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究, 名古屋大学博士学位論文, 2000.
- 9) Sawaragi, T. : Coastal Engineering-Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions, Elsevier, 1995.