

高天端人工リーフの水理模型実験における洗掘に対する安定性検討について

室蘭開発建設部 苫小牧砂防海岸事務所 計画課 ○白戸 暢彦
竹原 隆博
入交 泰文
治水課

胆振海岸では、昭和63年に直轄海岸保全施設整備事業に着手し、海岸侵食及び越波対策として人工リーフ等の整備を進めている。設置地盤高が高い箇所へ消波ブロック構造の高天端人工リーフを設置した場合の被災形態及び堤体安定性に関し、これまで断面二次元固定床水理模型実験にて確認した。今回、断面二次元移動床水理模型実験により洗掘による被災メカニズムを確認し、洗掘対策工の検討を行ったので、その結果について報告する。

キーワード：人工リーフ、水理模型実験、洗掘、安定性

1. はじめに

北海道南西部に位置する胆振海岸(図-1)は、昭和40年代から急速に海岸侵食が進行し、100m程度あった砂浜が大きく後退している(写真-1)。そのため、荒天時には激しい越波が発生し直立護岸が被災を受けるとともに(写真-2)、海岸に隣接する道路においても越波により多くの交通障害が発生した。特に平成6年9月は、前述の被害とともに住宅や下水処理場が浸水する等、多くの被害が発生した。現在、胆振海岸では海岸侵食の防止及び50年確率の波浪に対し背後への越波低減を目標に人工リーフ等の海岸保全施設の整備を進めている。

2. 本研究の目的

波浪低減効果及び海浜安定効果が期待できる沖合消波施設の人工リーフは、日本国内において多数整備されており、整備に際して洗掘対策工が実施されている。人工リーフ基部での波浪による洗掘現象は複雑であることから、水理模型実験等による詳細な検討を実施することが望ましいものの、既往事例を踏襲するなどの机上検討による対策がなされている場合が多い。また、地形変化数値シミュレーションから洗掘対策工の範囲を検討する方法も考えられるが、洗掘現象の複雑さに加え、数値シミュレーションの精度を確保するために必要となる水理模型実験の研究事例が少ないため、数値シミュレーションによる洗掘対策の研究事例は少ない。

沖合消波施設近傍の洗掘量の定量評価を試みた既往研究があるものの(例えば、山田ら²⁾)、知見が少ないことに加え、算定した洗掘量から洗掘対策工を評価・選定するにはいたっていない。さらに、今回検討の対象とした天端高がH.H.W.L.程度まで高く設置水深が浅い高天端

人工リーフ(図-2)は、波浪・流況場が一般的な人工リーフほど解明されておらず、一般的な洗掘対策では安定性を確保できるか不明確である。

本研究では断面二次元移動床実験より、高天端人工リーフ近傍の洗掘とそれに伴う構造物の被災メカニズムを把握したうえで、洗掘対策工の検討を行った。



図-1 位置図

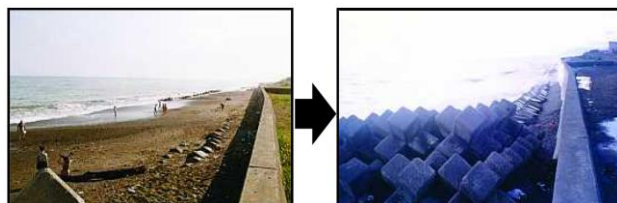


写真-1 砂浜の後退状況(左：昭和50年頃、右：平成9年)



写真-2 越波状況(左)及び直立護岸被災状況(右)(平成6年)

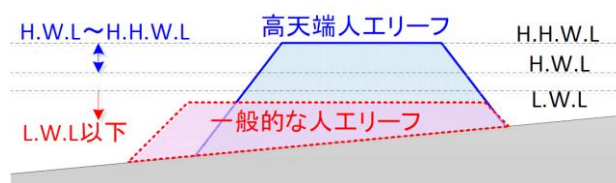


図-2 高天端の人工リーフの断面イメージ

2. 水理模型実験

(1) 実験模型の概要

使用した実験模型の模式図を図-3に示す。実験水路は、ピストン型造波機を有しており、幅0.5 m、高さ1.0 m、延長35.0 mとなっている。模型縮尺は、波浪規模、水路諸元、造波性能を勘案し、フルードの相似則で1/40に設定した。

人工リーフ近傍の2 m区間（実験スケール）に移動床材料を敷設し、それ以外の緩傾斜護岸（1/5勾配）や人工リーフ沖側の海浜地形は、モルタル固定床とした。移動床材料の粒径は、現地粒径を縮尺倍するとシルト・粘土による粘着性の影響を受け洗掘現象を再現できないことから、粘性の影響を受けない最小粒径程度の0.1 mmの7号珪砂を水洗いして表面に浮遊する細粒土砂を除去して使用した。中央粒径は0.13 mmである。海浜断面形状は、対象とする胆振海岸の2008～2017年までの10年間の2測線の測量から平均断面を算定し、波浪が減衰しにくく危険側となるよう平均断面を単純化した形状を設定した。高天端人工リーフの模型は、捨石マウンド部と消波ブロック部で構成し、捨石マウンド部は碎石とし、消波ブロックは現地相当の比重となるように調整したコンクリートを用いた。

(2) 実験の基本条件

実験条件の一覧を表-1と表-2に示す。本実験は、複雑な洗掘現象をシンプルに評価するために規則波とした。造波波数は、現地で観測された高波浪の継続時間を参考に7,000波（現地時間で28時間程度）とした。また、段階的な地形変化状況の把握と長時間の造波による水槽内での重複波の発生を抑制するため、造波は1,000波、3,000波、5,000波、7,000波ごとに停止した。

波浪条件は、対象とする胆振海岸の計画波浪に加え、波浪の違いによる洗掘状況を把握するため、対象海岸において海岸保全施設の被災要因の1つとして考えられている長周期波について、近傍観測所で観測された波高・周期を参考として、断面二次元の数値解析³⁾⁴⁾から最も人工リーフ近傍において流速が大きくなる波浪と年数回波程度となる波浪の2種類を選定した。

潮位は、洗掘に対して危険な条件の把握が困難であったため、碎波状況の変化に伴う洗掘の安定性を確認することを目的とし、高天端人工リーフの天端高と同等のH.H.W.L.とL.W.L.の2条件とした。

人工リーフ模型は、岩佐ら⁵⁾を参考に天端高T.P.+1.6 m (H.H.W.L.)、天端幅18 m、ブロックは20t型とした。

(3) 実験の計測項目と評価方法

造波停止時ごとに水路中央測線をレベル測量した。これにより把握した時系列の海浜地形及び人工リーフ形状から、洗掘状況を把握した。また、ブロックの被害状況を把握するため、実験水路の側面と上面から高天端人工リーフの近傍をビデオカメラで撮影した。ただし、ビデオカメラから算定した水路壁面の地形変化は、水路壁面の影響を受けるため参考扱いとし、以降で示す断面は全て水路中央側面をレベル測量より把握したものである。

ブロック模型の安定性は、「人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能評価のための水理実験マニュアル⁶⁾」や「港湾の施設の技術上の基準・同解説⁷⁾」に記載されているブロックの移動の定義に準じ、ビデオカメラから把握した造波後の被災ブロックの個数を設置ブロック個数で除することで算定する被害率を用いて評価を行った。

人工リーフの被災・安定の評価は、半沢ら⁸⁾の検討と同様に消波ブロックにより構成された人工リーフであるため、一般的な人工リーフと比較して簡易に補修が可能であることを勘案し、被害率1%を基準として実施した。

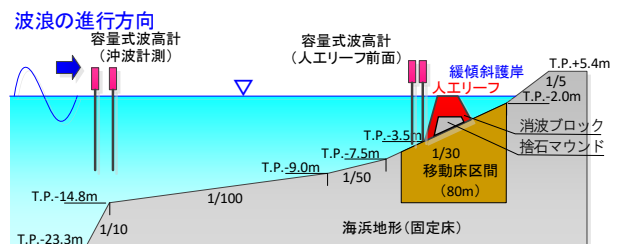


図-3 実験模型の模式図

※図中の値は現地スケール

表-1 実験の基本条件の一覧

| 項目 | 設定諸元 | |
|-----------|---------|--|
| 模型縮尺 | 1/40 | |
| 波浪条件 | 計画波浪 | $H'_0=9.20\text{m}, T_0=14.00\text{s}$ |
| | 長周期波浪1 | $H'_0=5.30\text{m}, T_0=16.05\text{s}$ |
| | 長周期波浪2 | $H'_0=3.18\text{m}, T_0=18.10\text{s}$ |
| 潮位条件 | H.H.W.L | T.P.+1.60m |
| | L.W.L | T.P.-0.78m |
| 造波条件 | 波数 | 7,000波 |
| | 種類 | 規則波 [*] |
| 人工リーフ設置水深 | H.H.W.L | 5.10m (沖側法先部) |
| | L.W.L | 2.72m (沖側法先部) |

※シンプルな条件で洗掘現象を把握したいため

表-2 実験ケース及び実験条件の一覧

| ケース | 1-1 | 1-2 | 2-1 | 2-2 | 2-3 |
|-----------|--------------|-------|--------------------|--------|--------|
| 波浪条件 | 計画波浪 | | | 長周期波浪1 | 長周期波浪2 |
| 潮位条件 | H.H.W.L | L.W.L | H.H.W.L | | |
| ブロック質量・形状 | 20t(放射型ブロック) | | | | |
| 洗掘対策工 | (対策工なし) | | アスファルトマットの敷設(一般諸元) | | |

3. 無対策時の洗掘による被災メカニズム

計画波浪を対象として、ケース1-1 (H.H.W.L.) とケース1-2 (L.W.L.) の2種類の潮位で洗掘の時系列変化及び人工リーフ構造の被災過程を把握した。H.H.W.L.とL.W.L.の実験では、図-4に示すように、どちらのケースも造波波数が増加するに従って縦断距離0 m近傍の人工リーフの沖側基部から洗掘が拡大する傾向となる(図中の人工リーフの消波ブロック上はブロックの凹凸部を含めて高さ計測しているため計測誤差を含んだ評価となっている)。これは、写真-3に示すように人工リーフ岸側から沖側への戻り流れと入射波が衝突することで土砂が巻き上げられたためと考えられる。人工リーフの沖側基部の洗掘が拡大することにより、沖側ブロックが段階的に沈下し、沖側から人工リーフが被災する。被災の要因は、人工リーフ沖側の洗掘に伴うブロック高の1/2以上の沈下であるが、被災時にブロックの飛散はない。人工リーフの被害率は、図-5に示すようにH.H.W.L.の実験とともに、2,000波時点で被災基準となる1%を超えており、7,000波造波時点でH.H.W.L.では74%、L.W.L.では28%となり、人工リーフが大きく被災していることがわかる。

これらの結果により、計画波浪を対象とした場合には、潮位条件によらず高天端人工リーフでは沖側の洗掘を始端とした被災が発生する可能性が高いことが示唆される。また、潮位ごとの7,000波造波時点の洗掘形状の比較は図-6に示すとおり、人工リーフの沖側基部の洗掘深及び天端の沈下量はL.W.L.よりもH.H.W.L.の方が大きくなり、洗掘に対する構造物の安定性については、H.H.W.L.の方が危険側となった。その要因は、今回の波浪および設置地盤高においては、H.H.W.L.の方が人工リーフ近傍で碎波が生じやすくなっていたためと考えられる。

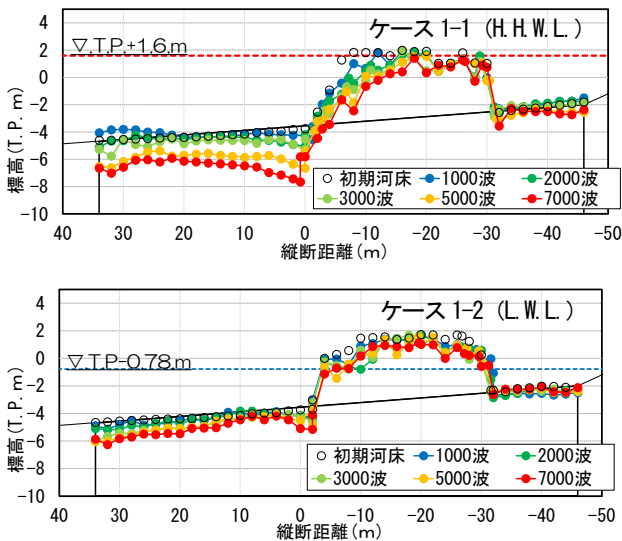


図-4 無対策時の造波波数ごとの地形変化

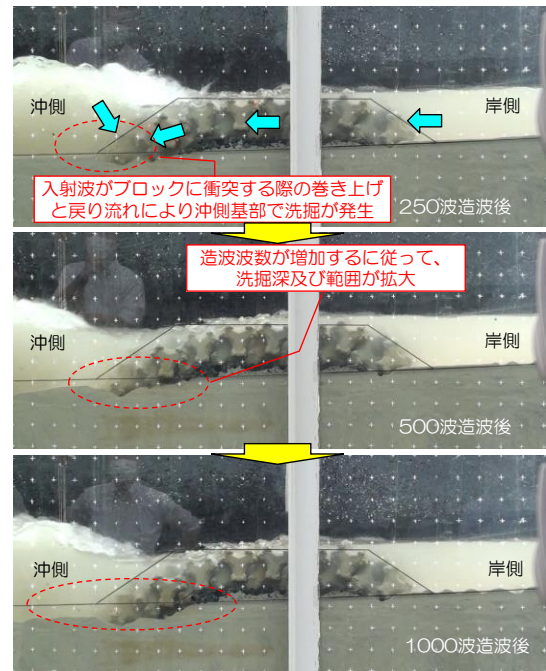


写真-3 人工リーフ基部の洗掘現象 (ケース 1-1)

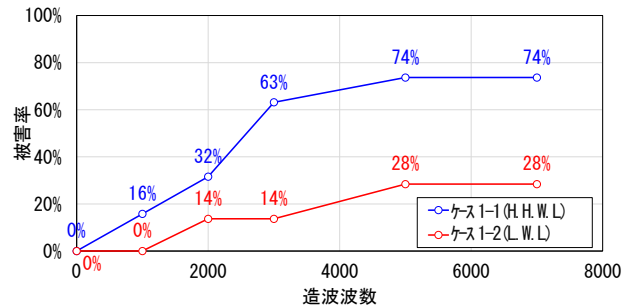


図-5 無対策時の造波波数ごとの被害率

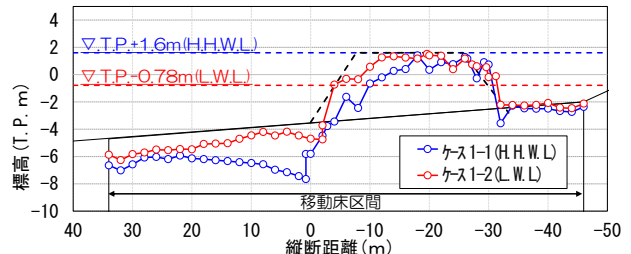


図-6 7,000波造波後の無対策時の洗掘形状

4. 洗掘対策工の効果検証

3.の「無対策時の洗掘による被災メカニズム」の実験結果を踏まえ、洗掘量が大きくより危険となるH.H.W.L.の条件で対策工の効果検証を行った。検証で対象とした対策工は、洗掘対策での実績が豊富なアスファルトマット (Asマット) とし、張り出し長さ等の諸元は、星野ら⁹⁾や技術基準を踏まえ設定した。実験水路内へ敷設したAsマットと敷設のイメージを図-7に示す。

洗掘対策工を設置した条件 (ケース2-1) では、図-8に示すように、無対策 (ケース1-1) の実験と同様に時間の経過に伴って、高天端人工リーフの沖側が洗掘されるが、洗掘は人工リーフから離れた縦断距離20 ~ 30 m

の範囲で拡大する傾向となる。これは、無対策時に洗掘された箇所が洗掘されなくなり、人工リーフの沖側で碎波後の冲向きの流れが変化したことが要因として考えられる。なお、人工リーフ沖側に設置した波高計のデータはケース1-1と1-2で明確な差異はなかった。

7,000波造波後の沖側での最大洗掘深は、図-9に示すように無対策時と殆ど変化はない（標高TP.8 m程度までの洗掘）が、洗掘対策工を設置したことにより、無対策時に被災の要因となった縦断距離0 m近傍の人工リーフ沖側基部での洗掘が抑制される。これは、Asマットが人工リーフ基部を被覆するように保護し、波浪による地盤の洗掘を抑制できているためと考えられる。この人工リーフ基部での洗掘の抑制により、図-10に示すように人工リーフの被害率が0%となり、被災が生じないことが確認された。

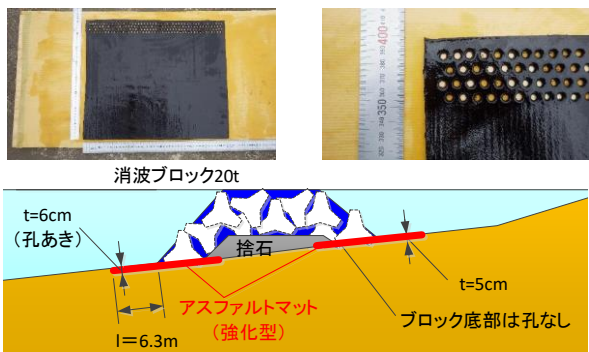


図-7 As マット模型写真と水路への敷設のイメージ

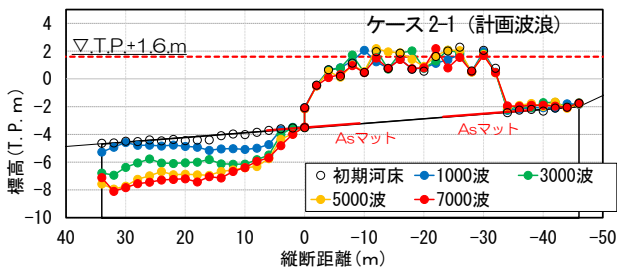


図-8 洗掘対策設置時の造波波数ごとの地形変化

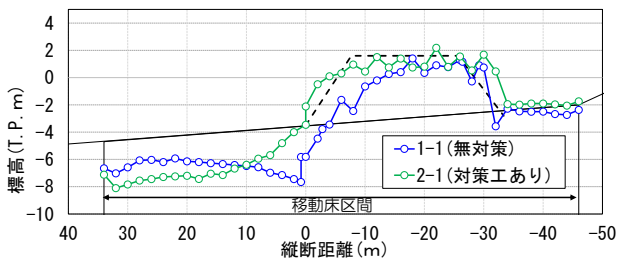


図-9 7,000波造波後の洗掘形状の比較 (ケース 1-1 と 2-1)

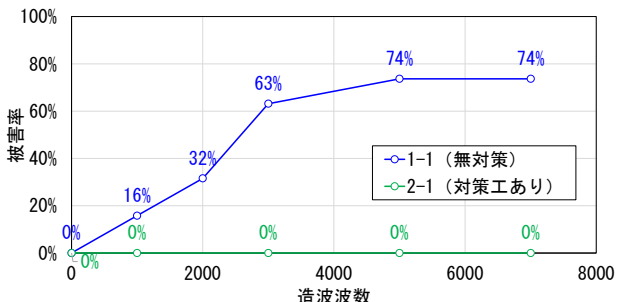


図-10 造波波数ごとの被害率の比較 (ケース 1-1 と 2-1)

5. 波浪規模ごとの洗掘特性

4の「洗掘対策工の効果検証」で洗掘抑制効果を確認した対策工について、波形勾配の異なる2種類の長周期波浪を対象に洗掘対策工の評価と洗掘特性の違いを把握した。

(1) 人工リーフ近傍の波浪特性

今回の実験条件では、写真-4に示すようにケース2-1 (計画波浪) では縦断距離約 20 ~ 30 mの地点で、ケース2-2 (長周期波浪1) では縦断距離 0 ~ 10 mの地点で、ケース2-3 (長周期波浪2) では縦断距離 -10 ~ 0 mの地点で碎波することが確認され、波形勾配が小さくなるに従って碎波水深が小さくなり、碎波が岸側で発生するようになった。

(2) 異なる波浪における洗掘対策工の効果の評価

長周期波浪1~2の人工リーフ近傍の波数ごとの地形変化を図-11に示す。計画波浪の実験と同様に人工リーフの沖側が時間経過に伴い洗掘されていることがわかる。

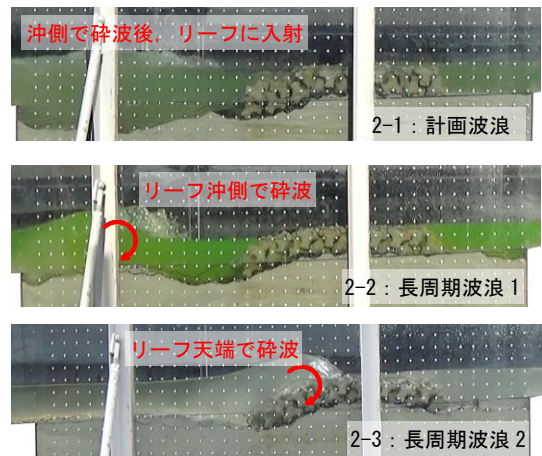


写真-4 波浪規模ごとの人工リーフ近傍の流況比較

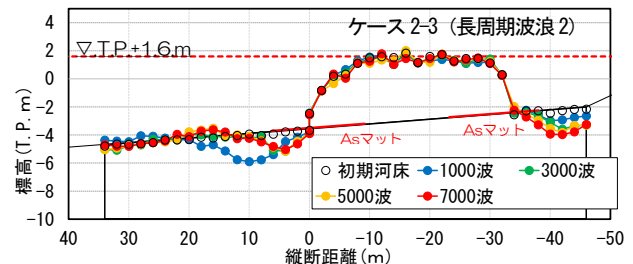
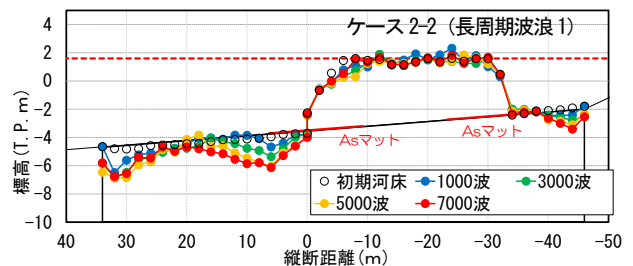


図-11 波浪規模ごとの人工リーフ近傍の地形変化

しかしながら、Asマットの効果により人工リーフの基部の洗掘は確認されず、人工リーフの天端高も造波前後で殆ど変化はない。ブロックの被害率は、2波浪条件ともに0%となっており、現地において発生する可能性がある長周期波浪においてもAsマットの洗掘抑制効果が発揮されることがわかった。

(3) 人工リーフ近傍の洗掘特性の評価

人工リーフの岸側と沖側の最大洗掘深の時系列変化を図-12に示す。なお、ここでの洗掘深の評価範囲は、人工リーフの安定性に寄与する洗掘を評価するため、人工リーフの設置範囲から20mの範囲（沖側：縦断距離20～0m、岸側：縦断距離-50～-30m）に限定した。

人工リーフ沖側の最大洗掘深は、波形勾配が最も小さくなるケース2-3（長周期波浪2）では、その他の2ケースと比較して洗掘深が小さい傾向となっている。一方、ケース2-1（計画波浪）とケース2-2（長周期波浪1）では、初期の洗掘状況は異なるものの、7,000波造波後の洗掘深は概ね同様の値となっている。これは、長周期波浪2の条件のみ人工リーフ上で碎波が発生し、波浪の洗掘に対するエネルギーを逸散していることが要因として考えられる。

人工リーフ岸側の洗掘は、波形勾配が大きくなるケース2-1（計画波浪）では殆ど確認されないが、波形勾配が小さくなる長周期波浪では約1.0m程度の洗掘が確認される。また、洗掘の規模は波形勾配が小さくなるに従って、大きくなる傾向となっている。これは、波形勾配が小さくなるほど波が人工リーフを通過しやすくなり、緩傾斜護岸を遡上した戻り流れと人工リーフを越波した波浪により生じる渦流が要因として考えられる。

これらの結果から、波形勾配等の波浪条件が異なる場合には、人工リーフ近傍での洗掘位置が変化し、人工リーフの沖側のみではなく、岸側の洗掘に対しても留意する必要があることが示唆される。

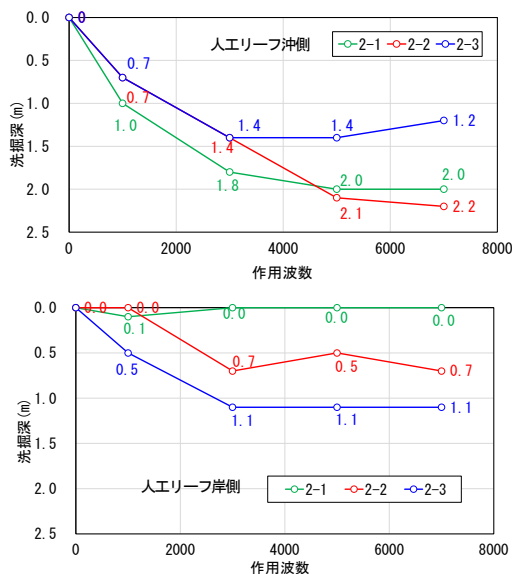


図-12 造波波数ごとの人工リーフ沖側と岸側の最大洗掘深の比較
SHIRATO Nobuhiko, TAKEHARA Takahiro, IRIMAJIRI Hirofumi

6. おわりに

知見の少ない高天端人工リーフについて、断面移動床実験を行い、主に以下の結論を得た。

- (1) 計画外力を対象とした洗掘対策のない実験では、高天端人工リーフの沖側基部の洗掘からブロックが沈下して被災するというメカニズムが確認された。
- (2) 洗掘対策工として高頻度で用いられるAsマットは、高天端人工リーフを対象とした場合においても、一般的な算定式で求められる諸元で、十分に洗掘を抑制する効果を発揮できることが確認された。
- (3) 波形勾配等の波浪条件が異なる場合には、高天端人工リーフ近傍での洗掘位置が変化し、高天端人工リーフの沖側のみではなく、岸側の洗掘に対しても留意する必要があることが示唆された。
- (4) 本研究では時系列での洗掘形状や入射波高を把握し、知見の少ない人工リーフ近傍の洗掘現象の解析の精度を高めるための基礎データとして整理した。

なお、本検討は胆振海岸をケーススタディの対象とし、洗掘による施設安定性に特化した基礎的検討であること、規則波を対象とした実験であるため現地（不規則波）の場合では洗掘量及び洗掘箇所が本実験と変わる可能性があることを付記する。

参考文献

- 1) 国土交通省：海岸統計平成28年度版，253p.，2016.
- 2) 山田浩次，田辺勇人，鳥居謙一，加藤史訓，山本吉道，有村盾一，Thanh Ca Vu：海岸構造物周辺の洗掘の定量的評価，海岸工学論文集，第48巻，pp.551-555，2001.
- 3) 一般財団法人沿岸開発技術研究センター：数値波動水路（CADMAS-SURF）の研究・開発，沿岸開発技術ライブラリー，No.12，457p，2001.
- 4) 一般財団法人沿岸技術研究センター：CADMAS-SURF 実務計算事例集，沿岸技術ライブラリー，No.30，368p，2008.
- 5) 岩佐隆広，二階堂竜司，平間史泰，田所壮也，飯島直巳，吉川契太郎，中津隆文，水野雄三，山下俊彦，木村克俊，加藤史訓，矢部浩規：高天端人工リーフの安定性に関する実験的検討，土木学会論文集 B2，Vol.77，No.2，pp.1703-1708，2021.
- 6) 国土交通省国土技術政策総合研究所：人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能評価のための水理実験マニュアル，国総研資料第927号，pp.55-56，2016.
- 7) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（上巻），pp.243-244，2018.
- 8) 半沢稔，周遠強，杉浦淳，佐藤弘和：消波ブロックを用いた人工リーフの機能・安定性に関する実験的研究，海岸工学論文集，第43巻，pp.821-825，1996.
- 9) 星野太，田崎邦男，福山貴子，秋山真吾，池谷毅：マット型海底面被覆工の耐波安定性能評価法，海岸工学論文集，第52巻，pp.831-835，2005.

