

高天端人工リーフの水理模型実験による 安定性検討について

室蘭開発建設部 苫小牧河川事務所 計画課 ○白戸 暢彦
中村 洋祐
治水課 入交 泰文

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。昨年度は、設置地盤高が高い箇所へ高天端の人工リーフを設置した場合の水理模型実験を行い水理特性について検討を行った。併せて、検討事例が少ない消波ブロック構造について断面二次元の固定床水理模型実験を行い、被災形態の分析、堤体安定性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、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たり(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である離岸堤と人工リーフは、日本国内において多数整備されている¹⁾。これらのうち、所定の波浪低減・海浜安定効果を満足したうえで、離岸堤と比較して反射率が低減され、L.W.L.以下(朔望平均干潮位)で設置される一般的な人工リーフと比較して天端幅が狭くなることで漁業への影響を抑制する沖合消波施設として、岸に近く設置地盤高の高い箇所へ高天端の人工リーフの設置が考えられる。

しかし、離岸堤や設置水深の大きい一般的な人工リーフの知見は多くあるものの、天端高がH.W.L.(朔望平均満潮位)からH.H.W.L.(設計高潮位)程度であり設置水深の小さい「高天端人工リーフ(図-2)」の安定性の知見は、表面をブロックで被覆した構造については、松田ら²⁾など一部の既往研究が存在するのみであり、消波ブロックで構成する構造についての研究事例はほとんどな

い。天端高が設計高潮位程度まで高い人工リーフの場合、波の衝撃による波力と堤体上での砕波や戻り流れの両方が堤体安定性に影響すると考えられ、一般的な離岸堤や人工リーフより複雑な波浪・流況場となり、ハドソン式等による机上検討で安定性を評価できるかが不明確である。

そのため、本研究では、断面二次元の固定床水理模型実験を実施し、検討事例が極めて少ない高天端人工リーフの被災形態を分析するとともに、堤体安定性の検討を行った。



図-1 位置図

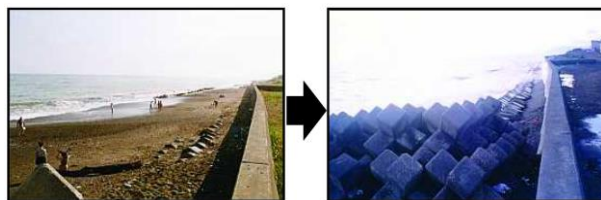


写真-1 砂浜の後退状況(左：昭和50年頃、右：平成9年)



写真-2 越波状況(左)及び直立護岸被災状況(右)(平成6年)

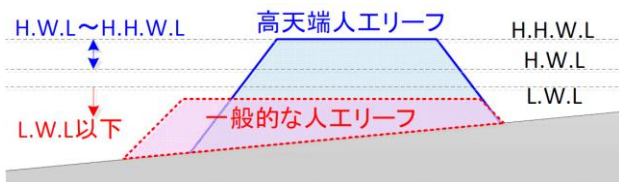


図-2 高天端の人工リーフの断面イメージ

表-1 実験条件の一覧表

波浪条件	計画波浪	$H'_0=9.2\text{m}, T'_0=14.00\text{s}$
	長周期波浪	$H'_0=5.3\text{m}, T'_0=16.05\text{s}$
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	1,000波
	種類	不規則波
	スペクトル	修正B-S
人工リーフ設置水深	H.H.W.L	6.00m (沖側法先部)
	L.W.L	3.62m (沖側法先部)

3. 水理模型実験

(1) 実験模型の概要

実験に使用した実験水路の写真を写真-3、使用した実験模型及び実験水路の模式図を図-3に示す。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である。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1/70に設定した。緩傾斜護岸(1/5勾配)および海浜地形は、モルタル固定床とし、対象とする胆振海岸の2007～2017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断面形状を設定した。

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(最低現地で0.5 m厚以上)は碎石により、ブロック部分は現地相当の比重となるように調整したブロック模型により再現した。なお、現地では地盤面に捨石マウンドが食い込むことにより、マウンド材は移動しないと想定して、固定床と捨石マウンドの境界面は滑り止めシートを用いて固定して実験を行っている。現地には緩傾斜護岸背後に排水工が設置されているが、本実験では人工リーフの安定性に着目したため、排水工は模型で再現していない。また、護岸背後への越波に伴う水槽内の水位低下を抑制するため、事前に予備実験として越波する流量を計測しておき、越波量/造波時間で算定した流量を沖側に還流させるようにポンプをコントロールした。

(2) 実験の計測項目と評価方法

実験では、マウンド材及びブロックの被害状況を把握することを主目的として、実験水路側面と上面から高



写真-3 実験水路の全景写真

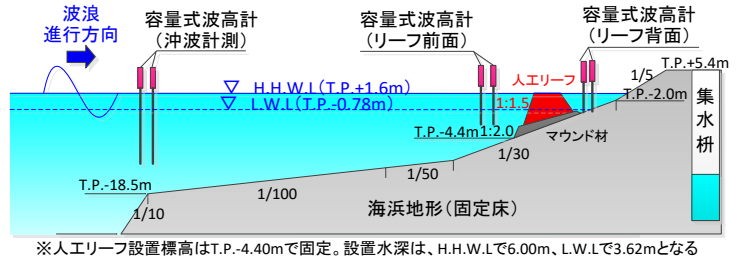


図-3 断面固定床実験模型の模式図(縮尺:1/70)

天端人工リーフの時間変化をビデオカメラにより撮影した。また、人工リーフ沖側と岸側に容量式波高計を設置し、人工リーフに作用する波浪や人工リーフ背後での水位上昇量、透過率等の水理量の把握を行ったが、ブロックの被災状況によってこれらの諸元は変動することとなるため参考扱いとした。

マウンド材の安定性は、水路側面に設置したビデオカメラの映像から碎石の移動状況(飛散の有無)及びマウンド材上部に設置したブロック模型の移動状況(移動・回転の有無)から評価した。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³⁾」や「港湾の施設の技術上の基準・同解説⁴⁾」に記載されているブロックの移動の定義に準じ、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式(1)の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、岩佐ら⁵⁾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。

$$D=(X_b/X)\times 100 \quad (1)$$

ここに、 D :被害率(%), X_b :造波後の被災ブロックの個数、 X :水槽の壁面沿いのブロックを除いた設置ブロックの総個数である。

(3) 実験条件

実験条件の一覧を表-1に示す。本実験では、海岸保全施設に用いるブロックの安定性を評価する一般的な実験³⁾として、不規則波を1,000波造波させる条件で実施した。

波浪条件は、対象とする胆振海岸の計画波浪に加え、対象海岸において度々発生し、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浪の2つを対象とした。長周期波浪は、対象海岸・近傍観測所で観測された波高・周期を参考とし、最も人工リーフ近傍において流

速が大きくなる波浪を断面二次元の数値解析⁵⁾⁶⁾を実施することで設定した。

潮位条件は、高天端人工リーフの天端高が潮位と同等もしくは高くなる場合の両方の安定性を確認すること、人工リーフ近傍での砕波状況の変化に伴う安定性を確認することを踏まえ、HHWLとL.W.L.の2条件とした。なお、波浪に関していえば、HHWLは、人工リーフ沖側での砕波によるエネルギー減衰が生じにくく、前面波高が大きくなる条件である。

対象とする高天端人工リーフは、岩佐ら⁷⁾を参考に天端高T.P.+1.6 m (HHWL相当)、天端幅18 mとし、ブロックは消波ブロックとした。

(4) 実験結果

本検討では、まず捨石マウンドの安定性の評価を実施し、捨石マウンドが安定しない場合には捨石マウンドを設置せずにブロックの安定性の検討を行う方針とした。

なお、捨石マウンドを設置する場合については、ブロックの敷設面の高さを均一にすることが可能であるためブロックの設置方法は層積とした。一方、捨石マウンドを設置しない場合については、ブロックの設置面の高さが不均一となり、層積によるブロックの敷設が困難と想定されるため、乱積とした。

a) 捨石マウンドの安定性

本検討で対象とした人工リーフ等の沖合消波施設は、一般的に捨石マウンドを設ける場合が多いが、マウンドを構成する捨石はブロックよりも質量が小さいため安定性が低いおそれがある。そこで、捨石マウンドの形状や捨石の質量を変化させたマウンド材の安定性の検証実験を行った。実験は、他の人工リーフの施工事例を参考として、表-2に示す3種類の捨石マウンドの条件で実施した。

その結果、対象とした高天端人工リーフの諸元では、法面勾配や質量を変化させた3ケース全てにおいて、捨石（マウンド材）は写真-4に示すように沖側法肩部分から移動し、それに伴い上部のブロックが沈下・転倒することが確認された。捨石マウンドの被災時には、人工リーフの岸側の水位が沖側の水位と比較して約3~4 m（現地スケール）瞬間的に高くなり、その水位差による戻り流れにより、捨石マウンドの沖側法肩部が洗掘される現象が確認された。一般的な人工リーフではブロック質量に重点が置かれることが多いが、上記の結果から、特に浅い海域に高天端人工リーフを設置する場合、捨石マウンドの安定性にも留意する必要があることが示唆された。

b) ブロックの安定性

上述の捨石マウンドの安定性の検討の結果を踏まえ、捨石マウンドを設けず消波ブロックを乱積みで設置した条件で、複数の波浪・潮位条件における各ブロック質量の安定性確認実験を行った。対象とするブロックは、メーカ公表のKd値（乱積）がともに11.0⁸⁾である、写真-5

に示す放射型ブロックと有脚軸型ブロックの2種類のブロックを対象とした。ブロックの質量は、ハドソン式により算定した必要質量に安全率1.5を乗じた9.6 tを満たす質量として、対象ブロックの規格に適合する12 tのブロックを基本に検討を実施した。

表-2 捨石マウンドの安定性の実験条件結果の一覧

	1-1	1-2	1-3
波浪条件	計画波浪		
潮位条件	H.H.W.L		
ブロック質量	12t (層積)		
マウンド材	0.2~1.5t相当 法勾配1:2	4.0t相当 法勾配1:2	0.2~1.5t相当 法勾配1:3
マウンド材の被災	沖側法肩被災	沖側法肩被災	沖側法肩被災



写真-4 高天端人工リーフの捨石マウンドの被災過程

ブロック質量12 tの実験では、表-3に示すようにケース2-1-2を除くほとんどのケースで、ブロックの飛散が確認された。特に、有脚軸型ブロックは、放射型ブロックと比較して被災が顕著であり、全ての条件において被害率が大きくなる傾向となっている。これは、本実験が乱積を対象としており、有脚軸型ブロックにおいて期待されているブロック同士のかみ合わせ効果を十分に発揮しにくい条件となっていることが理由として考えられる。これらの結果より、本実験の限られた条件の中であるが、乱積によるブロック設置を行う場合には、放射型ブロックの方が安定性が高くなる場合があることが示唆された。ただし、本実験はブロックの優劣をつけるものではない。12 tブロックでは、放射型ブロック、有脚軸型ブロックともに被害率が1%以上となる結果であったため、比較的被害率が小さい放射型ブロックを対象として、安定するブロック質量の検討(表-4中のケース2-3~2-8)を実施した。これらの実験の結果、被害率が概ね1%程度となるブロック質量は16 tとなり、高天端人工リーフでは安定質量がハドソン式による算定質量よりも大きくなければいけないことが示唆された。

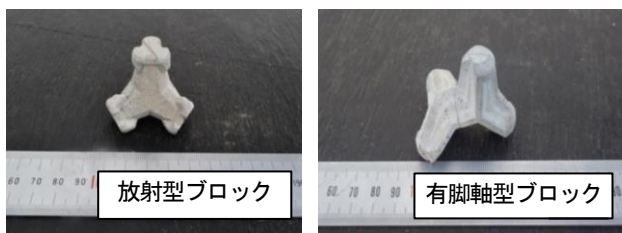


写真5 実験で対象としたブロック形状

表-3 ブロック種類ごとの比較検討結果の一覧 (12t ブロック)

	2-1-1	2-1-2	2-1-3	2-1-4	2-2-1	2-2-2	2-2-3	2-2-4
波浪条件	計画波浪		長周期波浪		計画波浪		長周期波浪	
潮位条件	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L
ブロック種類	放射型ブロック 12t (乱積)				有脚軸型ブロック 12t (乱積)			
マウンド材	なし							
被害率※1	0.5%	0.0%	0.5%	6.3%	1.8%	2.4%	2.4%	15.3%
被災形式※2	→	—	←	↔	↔	←	↔	↔

※1：被害率は、水路内に設置したブロック数の中の被災したブロック数の比率
 ※2：被災形式の「→」は押し波による被災、「←」は戻り流れによる被災を示す

表-4 条件ごとの安定性の結果の一覧 (放射型ブロック)

	2-1-1	2-1-2	2-1-3	2-1-4	2-3	2-4	2-5	2-6	2-7	2-8	3-1	3-2	3-3
波浪条件	計画波浪		長周期波浪		計画波浪		長周期波浪				長周期波浪		
潮位条件	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	L.W.L	H.H.W.L	H.H.W.L	L.W.L
ブロック種類	放射型ブロック 12t (乱積)				16t (乱積)			20t (乱積)		16t端部 (乱積)		20t端部 (乱積)	
マウンド材	なし												
被害率※1	0.5%	0.0%	0.5%	6.3%	0.0%	0.0%	1.3%	0.0%	0.0%	0.0%	4.3%	0.0%	0.0%
被災形式※2	→	—	←	↔	—	—	→	—	—	—	↔※3	—	—

※1：被害率は、水路内に設置したブロック数の中の被災したブロック数の比率
 ※2：被災形式の「→」は押し波による被災、「←」は戻り流れによる被災を示す
 ※3：開口部端部において、戻り流れによる被災

被災のパターンは、写真-6に示すように押し波による波力・浮力による被災と岸側の水位上昇による戻り流れによる被災形態があり、高天端人工リーフでは戻り流れによる被災の方が多く発生することがわかった。また、表-4に示すように、潮位条件による被害率の大小に一定の傾向はない。一方、波浪に関しては計画波浪と比較して長周期波浪において被害率が増加する傾向があることが明らかとなった。これらの要因は、実験時の人工リーフ近傍の映像から判断すると、長周期波の方が波長が長いため、人工リーフ沖側での水位低下の継続時間が長く、人工リーフ岸側での水位との差が大きくなりやすい傾向になることが関係していると考えられる。



水位差による戻り流れで沖側ブロックが移動



天端上で碎波→ブロックが岸側に移動

写真6 波浪種類ごとのブロックの被災状況 (上段：ケース2-1-3, 下段：ケース2-1-4)



写真7 波浪種類ごとのブロックの被災状況 (ケース3-1)

また、安定性を確保できた16 tブロックを対象に、写真-7に示すように実験水路の半分を開口部とした人工リーフ端部の安定実験を実施した結果、16 tブロックでは開口部端部でブロックが飛散して被害率が1%以上となったが、1ランクアップの20 tブロックで被害率が1%以下となり、端部では更に大きな質量（中央部の約1.3倍程度）を要することがわかった。この結果は、一般的に堤頭部のブロック質量を5割程度の割増で設定する考え方⁷⁾と概ね近似しており、高天端人工リーフにおいても、一般的な海岸保全施設と同様の考え方を採用できることを示唆した結果となっている。

4. おわりに

知見の少ない高天端人工リーフについて、断面固定床実験を行うとともに、既往知見と比較分析することで、主に次に示す安定性に関する特性を明らかにした。

- (1) 高天端人工リーフの安定性を検討する場合、机上検討では必要なブロック質量に主眼が置かれるものの、特に浅い海域では捨石マウンドの沖側法肩部分での被災に伴い、ブロックの安定性が損なわれる危険性を示した。
- (2) 高天端人工リーフの被災形態は押波と戻り流れによるものの両方があり、戻り流れによって被災するケースが多く、ブロックの必要質量はハドソン式で算定した値よりも大きくなることがわかった。
- (3) 高天端人工リーフにおいて、乱積によるブロック設置を行う場合には、有脚軸型ブロックより放射型ブロックの方が安定性が高い可能性があることが示唆された。

なお、本検討では高天端の人工リーフに特化し、人工リーフを構成する捨石マウンドや消波ブロックの安定性に着目した結果を示したものである。

多くの場合、砂質の海底地盤上に人工リーフが設置されることから、沈下によるブロック安定性の確保を目的に捨石マウンドが設置されている。今後、捨石マウンドに変わる構造の検討が必要であるとともに、施設諸元の決定に際しては、周辺の漁業環境への影響、施工性等の更なる検討が必要で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)松田節男，錦織和紀郎，松本朗，田安正茂：天端の低い海岸構造物に用いる被覆ブロックの被災形態と安定数，海岸工学論文集，第48巻，pp.941-945，2001.
- 3)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.42-47, pp.55-56，2016.
- 4)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.
- 5)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.
- 6)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.
- 7)岩佐隆広，二階堂竜司，平間史泰，田所壮也，飯島直己，西藤浩二，吉川契太郎，中津隆文，熊谷直哉，水野雄三，山下俊彦，木村克俊，加藤史訓，平井康幸：高天端人工リーフの水理特性に関する検討，土木学会論文集 B2，Vol.76，No.2，pp.1_757-1_762，2020.
- 8)日本消波根固ブロック協会：<http://www.shouha.jp/>