

## 第 6 章 構造に関する留意事項

### 6.1 被覆工

人工リーフの被覆工は、波や流れの作用に対して堤体が安定となるように設計する。被覆材には、堤体の安定上必要とされる質量の自然石、あるいはコンクリートブロックなどを用いる。被覆材の安定性については、被覆材の質量、層厚により検討する。

#### 解 説

第 3 章で述べたように、人工リーフには被覆工を設け、堤体形状を維持するとともに、海底地形変化への追従性の確保や、沖側のり肩および堤体端部の保護を図るなど、堤体全体が急激な破壊に至らないようにしなければならない。そのため、被覆工には屈撓性を持たす必要があり、一般に被覆材には十分な質量の自然石やコンクリートブロックが用いられる。また、被覆材の安定性は、被覆材の所要質量、および層厚に関係する。

#### (1) 被覆材質量の算定法

##### a) 被覆材の所要質量算定時の基本的考え方

被覆材の所要質量に関しては、被覆材の形状・かみ合わせ、堤体形状、砕波状況、天端水深、波の波長などの要因が複雑に関係するため、被覆材の種類および被覆工の構造に応じて水理模型実験により決定することが望ましい。

ただし、被覆材形状、堤体形状、海底地形が単純な場合には、次項に示す算定法を用いることもできる。コンクリート被覆ブロックを用いる場合には、安定数  $N_s$  は人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能を評価するための実験方法を定めた国総研資料 927 号「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」（以下、水理実験マニュアル）に従い実施され、取りまとめられた係数を使用することを原則とする。

また、被覆材の質量を定める際に用いる潮位と波の条件は、1.4(設計条件)の記述に従うものとする。

以下に、被覆材質量の決定に関する留意事項、および既往知見を示す。

##### 1) 被覆石の被災のメカニズム

人工リーフの被覆石の被災は、およそ次の 3 タイプの被覆石移動(図-6.1(1))により生じる(宇多ら 1990)<sup>1)</sup>。

- ①のり面上または天端上の被覆石が岸向きの高流速により浮上し、岸向きに移動する。
  - ②のり面上またはのり肩の被覆石が岸向きの高流速により浮上してずれ、引き波時の流れにより転落する。
  - ③波の作用の繰り返しにより、のり面上の被覆石が相互にずれ、引き波時の流れの作用を受け転落する。
- ②と③のタイプは、特に天端水深が小さい場合に生じやすいと考えられる。多くの場合、①、

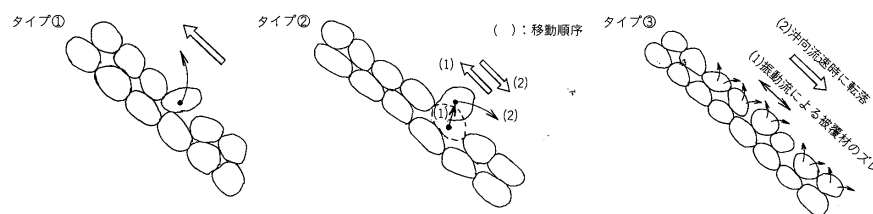


図-6.1(1) 被覆石の移動のタイプ

②のタイプのように、岸向きの高流速時に作用する揚力により被覆石が浮上することが被覆石移動の原因になる。この場合、被覆石に作用する揚力は、図-6.1 に示すように、同じ波浪条件、堤体形状であっても被覆石の形状・配置・相互のかみ合わせなどによって変化する。

## 2) コンクリート被覆ブロックの被災のメカニズム

被覆ブロックの変状連鎖としては図-6.1(2)が報告されている。最初の変状は、沖側天端部のブロックが岸側に滑動して岸側天端部ブロック間のクリアランスが小さくなるとともに、沖側天端のり肩部のブロックのクリアランスが大きくなる。次いで沖側天端のり肩部のブロックが転動・浮き上がって散乱等が発生する。そこから沖側天端・沖側のり面のブロック散乱等が拡大し、マウンド材が抜け出すようになる。

これらの被災においても、被覆石の被災と同様、岸向きの高流速が主たる原因となっている。

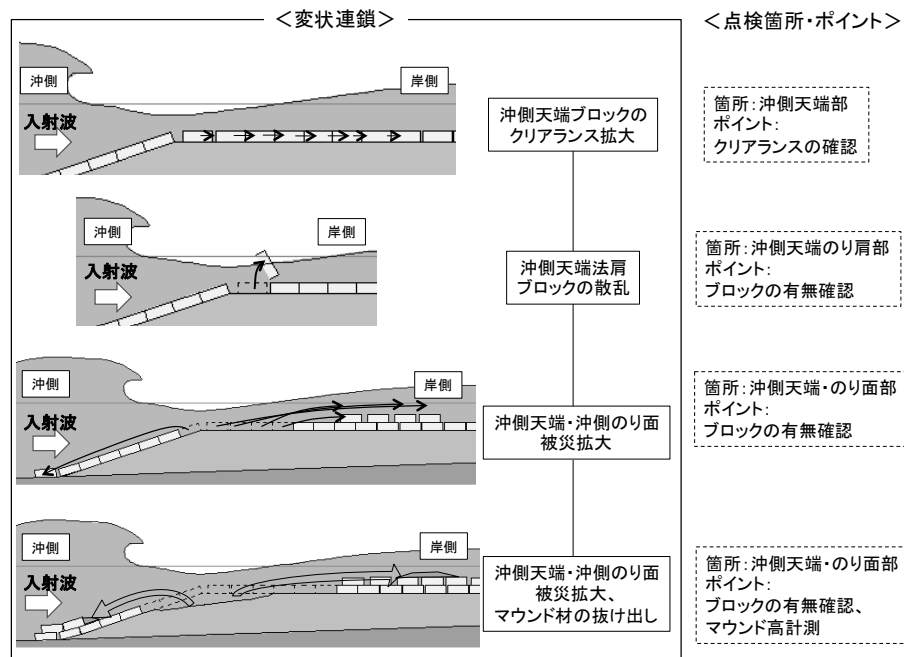


図-6.1(2) 水理模型実験で確認された被覆工ブロックの変状連鎖例

出典：中村ら(2015)：人工リーフ変状連鎖に及ぼす砕波と設置位置の関係，土木学会論文集B 2（海岸工学），Vol.71, No.2, I\_1147-I\_1152.

## 3) 水深波長比 ( $h/L_i$ ) の影響

図-6.1(3)は、被覆石構造の人工リーフに対する不規則波水理実験における波高と被害率の関係から水深波長比 ( $h/L_i$ ) をパラメータにして図示したものである。図から、同じ波高でも水深波長比 ( $h/L_i$ ) が小さい方の被害率が大きいこと、すなわち被覆石の波浪安定性には水深波長比 ( $h/L_i$ ) が影響することがわかる。

図-6.1(4)は、国総研による矩形ブロックで被覆した人工リーフに対する不規則波水理実験の結果（現地換算値）を、図-6.1(3)と比較ができるよう、換算沖波波高 ( $H_0'$ ) と被害率の関係から水深波長比 ( $h/L_i$ ) をパラメータにして示したものである。図から、被覆ブロック構造において同じ波高の場合でも水深波長比 ( $h/L_i$ ) が小さい方の被害率が大きいこと、すなわち被覆ブロックの波浪安定性には水深波長比 ( $h/L_i$ ) が影響することがわかる。

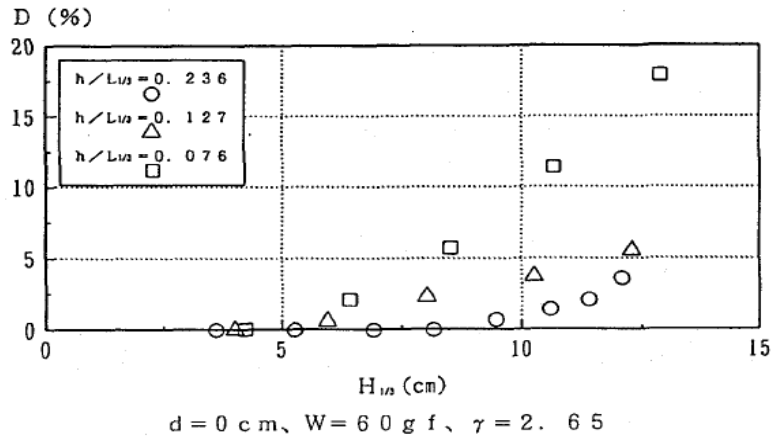


図-6.1(3)水深波長比  $h/L_i$  の違いによる波高と被害率  $D$  (%) との関係

出典：竹田ら（1994）：不規則波による潜堤被覆材の安定に関する研究（第2報），海洋開発論文集，Vol.10，pp.183-188.

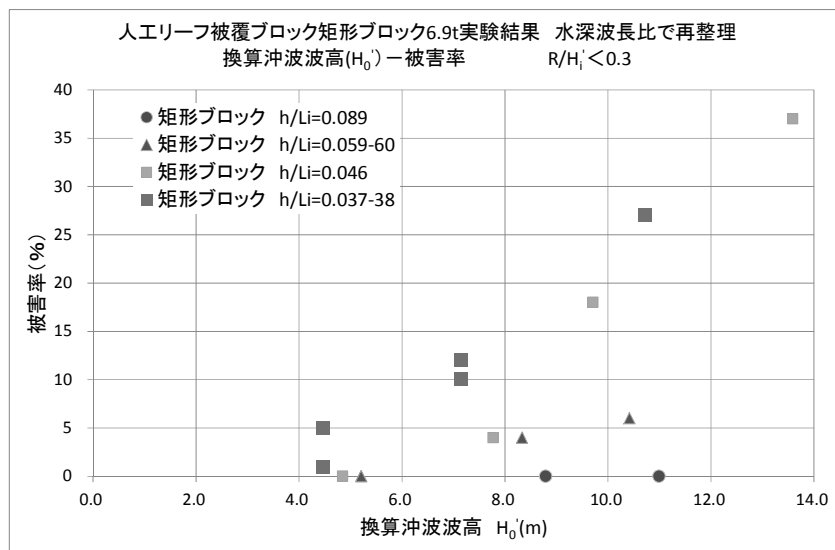


図-6.1(4)水深波長比  $h/L_i$  による波高  $H_0'$  とブロック被害率 (%) との関係

出典：中村ら（2015）：人工リーフ変状連鎖に及ぼす砕波と設置位置の関係，土木学会論文集B 2（海岸工学），Vol.71, No.2, I\_1147- I\_1152.の実験データより作成

#### 4) 質量算定における 3 次元的評価の必要性

被覆材の安定には、上記の断面 2 次元的な考え方に加えて、平面を加えた 3 次元的な視点で評価する必要がある。すなわち、3 次元的な人工リーフ上の被覆ブロックの移動や散乱は、2 次元の場合と異なり、開口部付近に位置するブロックで著しく、2 次元の場合より低い波高で生じる。これは天端上の波高分布や波の屈折特性と密接に関係している。したがって、被覆材の安定質量の算定には、開口部の効果など 3 次元的な影響を考慮しなければならない(中村ら、1995)。

波浪が斜め入射する場合には、図-6.1(5)に例示したとおり入射方向の隅角部が特に被災しやすい。

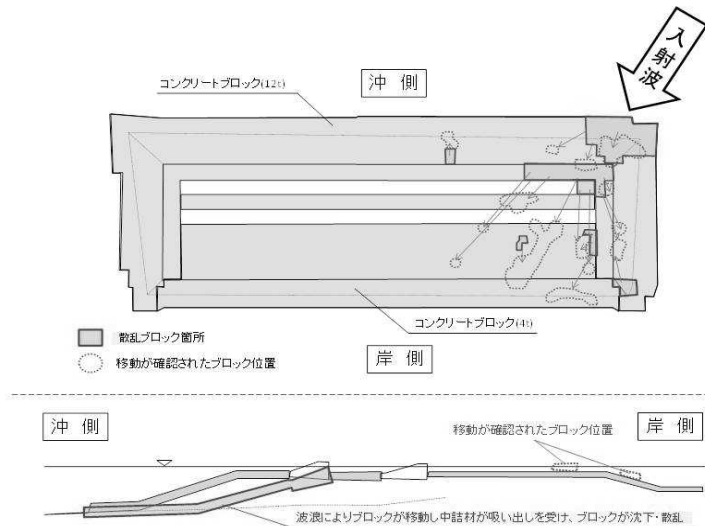


図-6.1 (5) 斜め入射による隅角部被災の事例 (A 海岸)

現地観測をふまえた質量算定手法に関する事例

青野ら (1995)<sup>3)</sup> は、神奈川県湯河原海岸での現地観測の結果、リーフ上の無次元岸向き最大流速に関する現地観測結果と経験式 (宇多ら、1990)<sup>1)</sup> との関係は、沖波換算値をそのまま用いると過小評価となるが、観測有義波高の沖波換算値の 1.8 倍 ( $H_o = 1.8H_{1/3}$ ) を用いることにより、経験式の適用がある程度可能であるとした。

また、図-6.2 に示すように、人工リーフ端部では沖から入射する波浪と沿岸方向から急激に屈折してくる波浪との重合によって、人工リーフ中央部より大きな波高値を示す。この傾向は高波浪時により顕著に現れ、最大で中央部の波高値に対し 5 割程度大きくなる。このことはリーフ端部における被災が多い原因となっていると考えられ、端部における被覆ブロックの質量算定についても別に考慮する必要があることを示している。

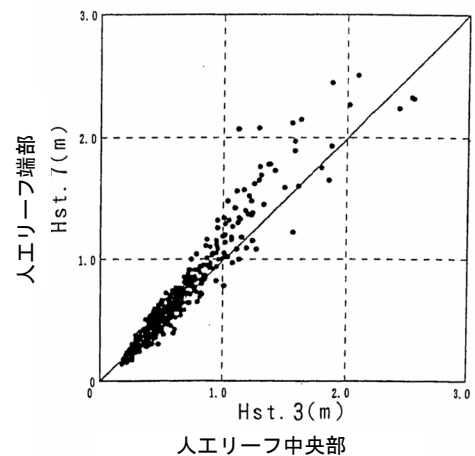


図-6.2 リーフ中央部と端部の波高値の相関 (青野ら、1995)<sup>3)</sup>

b) 被覆材の所要質量算定式

被覆材の所要質量の算定は、図-6.3 の検討フローに基づいて行う。被覆材の安定性に関しては、実験の観察によれば人工リーフの沖側のり面、天端上の沖側端近傍で被覆材が動く場合がほとんどである。のり面についてはハドソン式を用いて質量算定が可能であるが、平坦な天端上でも被覆材が移動しているため、のり面勾配の効果を含まないブレブナー・ドネリーの算定式および土研式を用いて検討することを基本とし、安定性を十分に考慮して設定する。

図-6.3 のフロー右側 2 段目の枠「ブロックごとの安定数 ( $N_s$ ) を水理実験等で設定」部分については、水理実験マニュアルに標準的な水理模型実験方法と  $N_s$  の評価方法を定めている。水理模型実験及び  $N_s$  の評価は水理実験マニュアルに従って評価するものとする。

ここで、留意すべきは、a) 2) で例示したとおり、ブロックによって変状連鎖が異なる可能性があるため、ブロックごとの変状連鎖の特性を踏まえて、設計・点検・管理に反映させることが望ましい。

また、a) 3) で述べたとおり、被覆ブロックの波浪安定性能には、人工リーフの堤前における水深波長比 ( $h/L_i$ ) が影響するので、 $N_s$  の算定には、これまでも一般的に用いられているパラメータである天端水深波高比 ( $R/H_i$ ) に加えて、人工リーフ堤前の水深波長比 ( $h/L_i$ ) も考慮されたものを用いるものとする。

水深波長比  $h/L_i$  は波速  $C$  を規定する指標の 1 つである。現地で確認されている被覆ブロック散乱被災の水利条件を見ると、多くは砕波帯の中で起きていると推定される。砕波直後のボア（波が砕けた後に多くの気泡を伴って進行する水塊）の流速は波速  $C$  程度と考えられ、砕波後の流速が大きい場所でブロック散乱による被災が生じている可能性が高い。つまり水深波長比 ( $h/L_i$ ) を考慮することは、ボア流速の影響を考慮していると解釈できる。以上を踏まえ、水利実験マニュアルに基づき、水深波長比 ( $h/L_i$ ) の影響を考慮した安定数  $N_s$  で算出した所要質量であれば、図-6.3 の左側のフローの所要質量も満足するとみなすことができる。

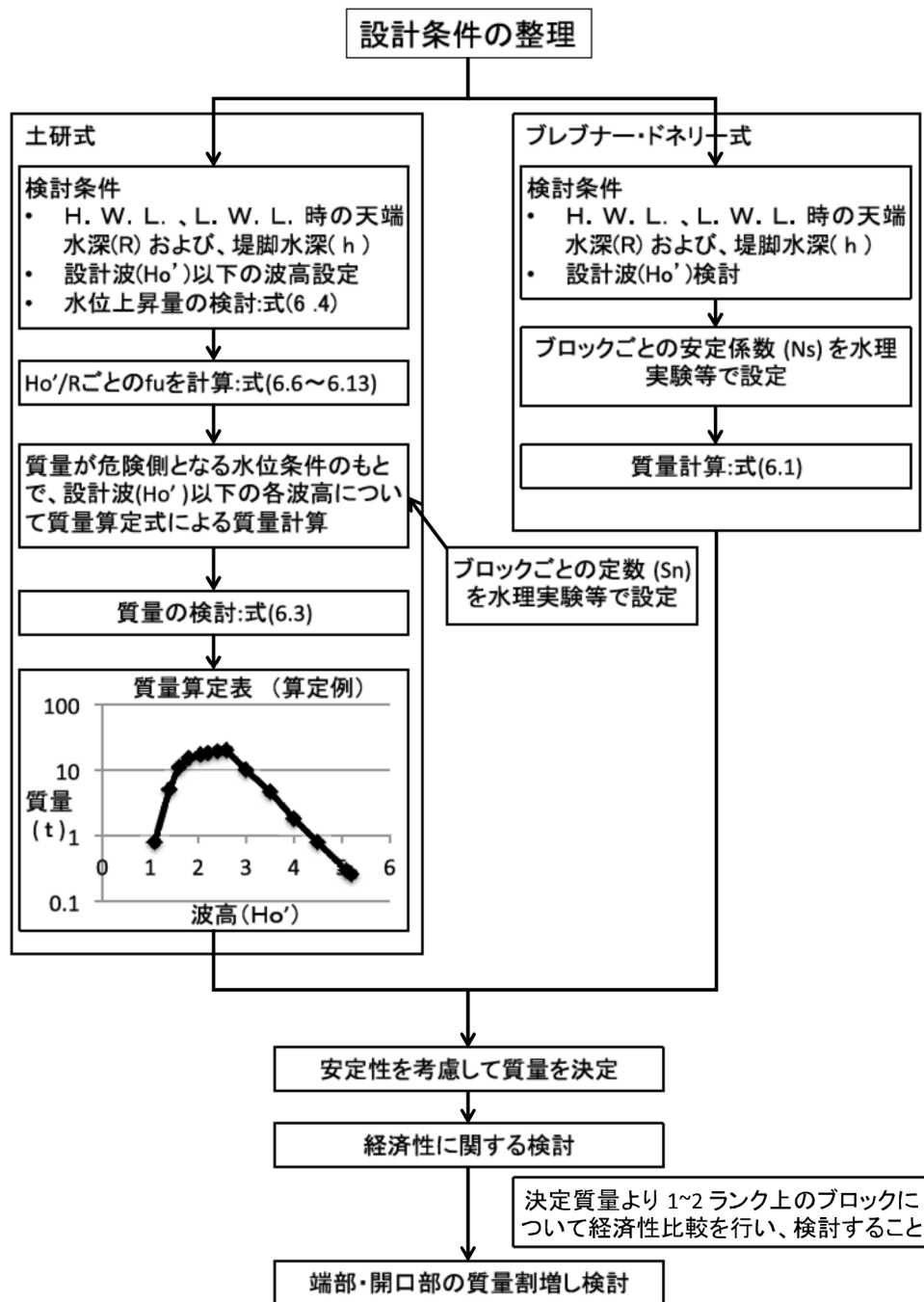


図-6.3 被覆材質量の検討フロー

以下に、ブレブナー・ドネリーの算定式および土研式を示す。

1) ブレブナー・ドネリー式

ブレブナー・ドネリーの式は以下に示すとおりである。

$$M = \rho_r H_i^3 / (N_s^3 (S_r - 1)^3) \quad (6.1)$$

ここに、M: 被覆材の安定質量、 $\rho_r$ : 被覆材の密度、 $S_r$ : 被覆材の比重、 $N_s$ : 安定数、 $H_i$ : 堤前波高(人工リーフすぐ沖の波高)である。 $N_s$  の値については、水理実験マニュアルに従った水理実験と波浪安定性能評価法に基づく、天端水深波高比 ( $R/H_i$ ) 及び水深波長比 ( $h/L_i$ ) との関係式から算出する。なお、安定数 ( $N_s$ ) と天端水深波高比 ( $R/H_i$ ) 及び水深波長比 ( $h/L_i$ ) との関係式は、ブロックごとに異なる。

なお、 $\alpha$  をのり面の傾斜角度とすると、ハドソン式の  $K_D$  値、ブレブナー・ドネリーの  $N_s$  の関係は式(6.2)となる。

$$K_D \cot(\alpha) = N_s^3 \quad (6.2)$$

2) 土研式

土研式は、宇多ら (1990)<sup>1)</sup> の示した堤体表面上の流速の評価式に修正を加えたものであり、以下に示すとおりである。

$$M = K_L \frac{\rho_s (R + \bar{\eta}_t)^3}{s^3 \cos^3 \phi} \quad (6.3)$$

$$K_L = S_n^3 f_u^6 K_v$$

ここに、 $\rho_s$ : 被覆材の密度、 $s$ : 被覆材の水中比重 ( $= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ )、 $\phi$ : 堤体表面上の最大流速発生地点の堤体表面と水平面のなす角度、 $\bar{\eta}_t$ : 平均水面からの高さ、 $S_n$ : 安定係数、 $f_u$ : 堤体表面上の最大流速の無次元係数、 $K_v$ : 被覆材形状に関する係数である。

なお、式 (6.3) 中の諸量は次のようにして定められる。実験によると、被覆材に自然石を用いる場合  $S_n = 0.9$ 、 $K_v = 0.5$  となる。ただし、これらの係数は、被覆材の形状、かみ合わせにより変化するため、被覆材の種類および被覆工の構造ごとに定める必要がある。

例えば、岡本ら (1993)<sup>6)</sup> は、人工リーフの一層被覆ブロックの被災状況を不規則波による安定および波力実験を行って調べ、土研式との比較を行った。実験結果より、 $R/H_o'$ 、 $H_o' / h$  をとって整理し、 $R/H_o'$  と  $H_o' / h$  がともに大きくなるほど最適の安定係数  $S_n$  値が大きくなる傾向があることを示した。

式 (6.3) 中の  $\bar{\eta}_t$  は図-2.8 に示した実験値より求めるか、あるいは次の近似式を利用して求めてもよい。

$$\bar{\eta}_t = 0.2H_o' - 0.1R \quad R/H_o' < 2 \quad (6.4)$$

$$\bar{\eta}_t = 0 \quad R/H_o' \geq 2$$

また、実験によると、 $R/H_o' \leq 0.7$  では沖側のり面上で、 $R/H_o' > 0.7$  では天端上で堤体表面上の最大流速が発生することから、 $\cos \phi$  は次のように設定する。

$$\cos \phi = \cos \alpha \quad R/H_o' \leq 0.7 \quad (6.5)$$

$$\cos \phi = 1 \quad R/H_o' > 0.7$$

さらに、 $f_u$  は図-6.4 に示す堤体表面上の最大流速の無次元係数であり、次式で求められる。

## 第 7 章 維持管理に関する留意事項

### 7. 1 維持管理（点検・更新含）

人工リーフは、消波、漂砂制御のいずれかまたは両方の機能を有する重要な沖合に設置する海岸保全施設である。通常、天端が没水している不可視施設であるため目視点検や巡視による被災発見が難しい。当該施設の重要性に鑑み、適切な点検の時期や手法等をあらかじめ設定し、効率的な維持管理を実施する。

#### 解 説

##### （1）点検の時期

人工リーフの被災としては、波力による被覆材の散乱と洗掘による堤体の変形が多く、これらの被災は高波時に発生しやすい。あわせて地震や津波による堤体変形も想定されることから、点検はそれらの事象の発生後が適切である。

波力や漂砂移動は、波高だけでなく波長（周期）によっても決まるので、年数回規模の波高であっても周期が長い高波の場合は被災が生じることがある。

また、事前の状態把握や所定の防護機能を確認するため、数年間隔で定期的に点検することが望ましい。点検時期はこれらに留意して適切に定める。

##### （2）点検の視点

人工リーフは、天端が没水している不可視施設であるため、被災しやすい箇所を重点的に点検する。

人工リーフの被覆材の散乱は、沖側ののり肩天端、波浪入射方向の隅角部で発生しやすいため、被覆ブロックの波浪安定性能評価の水理実験時に、被災のきっかけ・変状の進展を点検の視点として定めるとよい。

また、人工リーフ周辺は循環流や波の入射方向により、特に岸側のり先と沖合に戻る際に流れが集中する開口部で局所的な洗掘が発生しやすい。洗掘の発生によって、被覆材の滑落等が予想される場所が点検の視点となる。

##### （3）点検方法

人工リーフは陸上からの目視によって、その全貌を把握することは難しいため、静穏時空中写真の活用が有効である。近年は、航空機による撮影以外にドローンによる空中写真や動画の撮影、衛星による空中画像入手等の新技術も活用され始めている。被覆ブロックが被災するとブイが浮き上がり被災を発見しやすくする新技術なども提案されている。これらの新技術によって経済的かつ迅速に状態把握が可能となる場合があるため、その活用も選択肢に入れて、点検計画を検討することが望ましい。点検時には、前回の点検以降に来襲した波浪の情報を合わせて整理しておくことで被災時の外力を推定しやすい。

また、大きな変状が発生すれば、碎波の位置・様子の変化、被覆材や中詰材の変形によって海面上へ露出するなど、陸上からの目視で発見できる場合もある。これらの異常は日常的に海を見ている海岸利用者が先に気づく場合もあるので、一般の人からの通報も重要な情報である。

人工リーフの天端水深は浅い場合が多く、面的な計測を行なうのは困難である。上述の方法は、厳密な構造物形状の数値情報を得ることを求めているのではなく、変状が生じていないことを確認するための管理技術である。

#### （４）被災後の原因調査と結果の反映

人工リーフの被災が生じた場合には、その発生原因を明らかにし、再度の災害が生じにくくなるよう復旧に反映することが望ましい。たとえば、波力に対する被覆材の質量不足が原因であれば、最新の知見をもとに適切な質量で復旧することが再度の被害を防止することにつながる。

大きな被災が生じた場合の原因調査にあたっては、海底地形の測量、ダイバーによる水中からの点検を行うことで原因調査の情報量が増す。海底まで見える場所であれば、サンゴ礁海岸で実績の多いグリーンレーザーによる海底地形測量も有効である。原因の特定や復旧時の再度災害防止策の検討を行う際には、波浪や流れ、地形変化の数値計算、模型実験等も有効な手法である。

#### （５）標識灯被災への対応の工夫

人工リーフでは、船舶への注意喚起のために標識灯を設置する機会が多い。設置にあたっては、必要に応じて海域の利用者や海上保安署等と設置の有無も併せて協議されて決められることが多いようである。



写真-1 人工リーフ天端を露岩で型取る様に配置した例

標識灯は、天端の四隅に設置したり、堤体から離れた位置にブイを設置したりする場合がある。景観を重視する場合には、岩を露出させることもある。

人工リーフが設置される水深や天端上は最も波浪の作用が厳しい場所であるため、標識灯は被災しやすい。したがって、監視を計画的に行なうとともに被災時の対応を準備しておくことが重要である。