

## 第1章 はじめに

### 1.1 目的・背景

人工リーフの被災は、地盤変状に伴う法先洗掘や開口部・端部における波・流れ場の集中によるもの等とならび被覆ブロックの散乱が発生している。

本マニュアルは、被覆ブロックの安定性能に起因する散乱被災が生じないようにするため、質量を算定する安定数を評価する過程の標準的な実験条件と解析手法について示したものである。

さらに、長周期の波への安定性も網羅するため、堤前波高  $H_i$  とともに人工リーフ堤前の水深波長比  $h/L_i$  の影響も考慮して被覆ブロックの安定数  $N_s$  を求めることとした。

本マニュアルでは、現地の設置実績が多い砕波帯内や計画波浪の周期を考慮した標準条件において  $N_s$  を求めることとする。また、不規則波による水理実験が一般化したので、不規則波実験を標準とする。

#### 解 説

今までも、人工リーフの被覆ブロックの飛散を防ぐ取組みがなされてきているものの、現場では人工リーフが被災する事例が依然として発生している（参考 1, p.73～76 参照）。設置実績によれば、高波浪時では多くの人工リーフが、波浪・流れ場が複雑な砕波帯内に相当する位置に設置されている。また、近年の人工リーフの被災のうち被覆ブロックの散乱についてみたとき、観測結果や知見の蓄積から照らして長周期の波が要因となって発生していると推定されるものがある。長周期の波は、砕波および砕波帯内のボアの発生・移動等による高流速を生じさせる。砕波頂部やボア発生時の流速  $u$  は当該地点の波速  $C$  と関連が深いと考えられ、さらに、波速  $C$  は水深波長比  $h/L$  と深い関係にある。

この高流速の影響は、従来一般的に用いられる被覆材の所要質量算定式（ブレブナー・ドネリー式・ハドソン式）のような堤前波高  $H_i$  の関数だけでは表現しきれず、堤前波長  $L_i$  の影響も考慮する必要がある。ブロック散乱を減らすためには、これらを反映することが必要であると判断した。

また、人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能評価の標準的な実験方法を記したマニュアルがなく、消波ブロックの安定性能照査手法に準じて行われることが多かった。このことは、人工リーフの設置条件の再現性や施設の重要性の観点から不十分となる可能性が否めない。加えて、異なる実験設定による必要質量値を比較することになる可能性もあり、横並びの比較が妥当であるかの問題があった。

本マニュアルの適用により、現地の設置実態に即した砕波現象を含む場や周期の長い波に対応した水理実験結果から所要質量の算定が可能となると期待される。さらに、被覆ブロックの安定数  $N_s$  の算出の過程でブロックの特徴に応じた被災メカニズムが明らかにできる可能性もあり、安定性の高いブロックの開発促進につながることも期待される。

## 1.2 本マニュアルの被覆ブロック波浪安定性照査法の特徴

本マニュアルの特徴を、人工リーフの設計の手引き（「手引き（改訂版）」および「第2回改訂版」）における位置付け、および人工リーフ設置位置の水深波長比  $h/L_i$  の採用、 $N_s$  値評価方法の標準化、変状連鎖図の作成について以下に示す。

### (1) 本マニュアルの手引き（改訂版）の質量算定の流れにおける位置付け

手引き（改訂版）では、図-1.1のフロー<sup>1)</sup>により算出していた。本マニュアルで対象とするのは、ブレブナー・ドネリー式の列の赤で囲った「ブロックごとの安定数 ( $N_s$ ) を水理実験等で設定」の部分の標準的な実験条件と解析手法を示したものである。

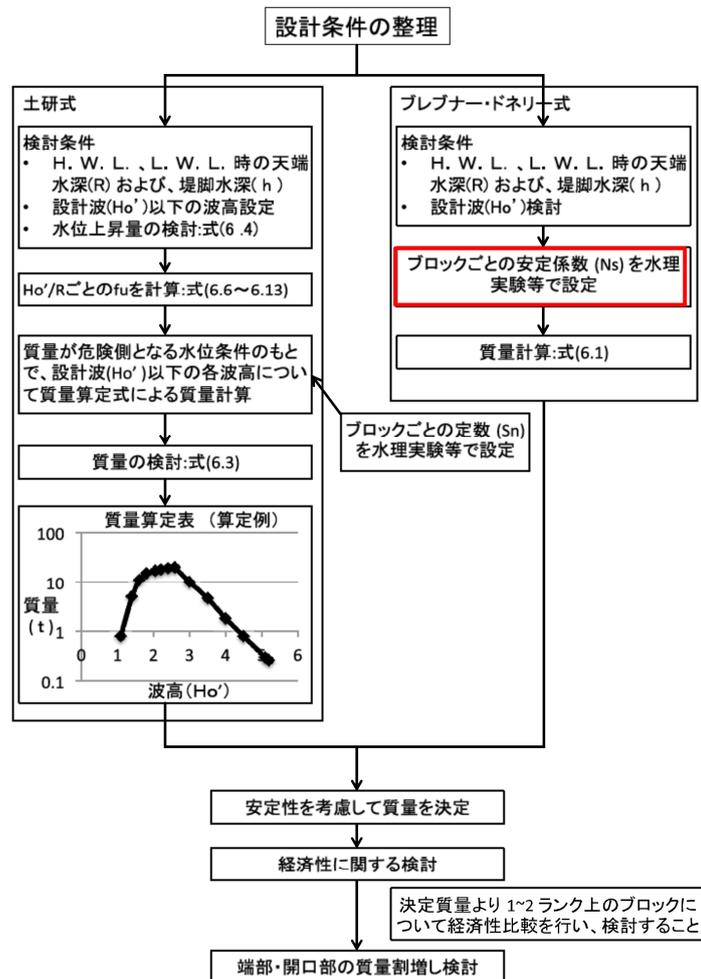


図-1.1 被覆材質量の検討フロー（人工リーフの設計の手引き（改訂版）， p.68）<sup>1)</sup>

### (2) $N_s$ 値評価方法の標準化

本マニュアルは手引き（第2回改訂版）を補完するものであり、水理模型実験で安定数  $N_s$  を算出するための実験条件や実験結果の整理方法等を設定している。また、本マニュアルでは、 $N_s^3$  算定図の作成にあたり、実験で確認した条件や算定線を引く根拠となる実験結

果を示すことを標準とした。

本マニュアルでは、実験結果の  $N_s$  算定に用いる堤前波高は、6.1.4（合田による堤前波の算定）に示すように設計との整合を図る観点から、換算沖波  $H_0'$  から合田の碎波帯内の波高変化図より算定した堤前波高を用いることを標準とした。

本マニュアルでは、人工リーフの設置箇所の実績が碎波帯内であることが多いことを踏まえ、実験条件に碎波帯を加えることを強調した。また、 $N_s^3$  算定図も従来一般的に作成されている  $N_s^3-R/H_0$  図に加えて、 $N_s^3-h/L_i$  図も作成することを標準とした。

### （3）人工リーフ設置位置の水深波長比 $h/L_i$ の採用（堤前波長 $L_i$ （周期 $T$ ）の考慮）

人工リーフの被覆材の所要質量を算定するために開発された土研式は、被覆材に作用する最大流速  $u_{max}$  によって所要質量が決まる式であるが、最大流速  $u_{max}$  が沖波波高  $H_0'$  に依存する算出手法となっている。一方、自然石被覆人工リーフにおいて  $h/L_i$  が小さくなるほど被害率が大きくなることや斜面被覆材や混成堤マウンドで堤前波長  $L_i$ （周期  $T$ ）も所要質量に影響するという研究がある。

これらを踏まえ、本マニュアルでは、人工リーフ設置位置実績の水深波長比  $h/L_i$ （特に碎波水深以下とも重なる  $\leq 0.08$ ）をカバーできるよう実験条件を設定することとした。

### （4）変状連鎖図の作成

手引き（改訂版）では、「…被覆材に被覆ブロックを用いる場合には、連鎖的に被災する可能性があることにも配慮する。」<sup>2)</sup> としており、被覆ブロックが1個被災するとそこから被災が拡がる可能性があることに留意が必要である。また点検・補修・復旧の観点からは、人工リーフは水中構造物で点検が困難であり、施工は難易度が高く労力を要するので、離岸堤や消波工のように被災を受けるたびにブロックを追加投入して復旧する方法はなじまない。したがって、被災を受けにくい・被災が拡大しにくいブロックを選定することが重要となる。

そこで、本マニュアルでは、6.2.1.11（変状連鎖図の作成）に示すように、被災が連鎖的に拡大する過程を表す変状連鎖図を水理実験結果から作成することを標準とした。

## 補足①：本マニュアルの課題（土研式への対応）

コンクリートブロックを被覆材に用いる場合について、手引き（改訂版）では、「…コンクリートブロックなどを被覆材に用いる場合には、該当する被覆材について行われた水理模型実験に基づく適切な算定方法より所要質量を求めることが望ましい。また、適切な方法が見当たらない場合には、下記5)を参考に  $S_n$  と  $K_v$  を定め、式(6.3)を準用してコンクリートブロックを被覆材とする場合の所要質量を求めてもよい。」<sup>3)</sup> としている。「下記5)」とは、「5)ブロック毎の安定係数  $S_n$  と  $K_v$ 」の項を指し、自然石被覆工の算出方法が示されている。

$$M = K_L \frac{\rho_s (R + \bar{\eta}_t)^3}{s^3 \cos^3 \phi}, \quad K_L = S_n^3 f_u^6 K_v \quad (\text{手引き (改訂版) の 6.3})$$

ここに、M：被覆材の所要質量、 $\rho_s$ ：被覆材の密度、s：被覆材の水中質量 ( $=(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ )、 $\phi$ ：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、R：天端水深、 $\bar{\eta}_t$ ：人工リーフ岸側の水位上昇量、 $S_n$ ：安定係数、 $f_u$ ：堤体表面上の無次元最大流速、 $K_v$ ：被覆材形状に関する係数である。

本マニュアルに基づき、不規則波による実験結果からコンクリートブロックの  $S_n$ 、 $K_v$  を評価する方法を検討してみたが、実用に供する方法まで提示できていない。課題が残された土研式を用いた検討は今後研究していく予定であるので、本マニュアルでは土研式による所要質量算定については記載していない。

## 解 説

### (1) 本マニュアルの手引き (改訂版) の質量算定の流れにおける位置付け

一般に被覆材の所要質量の算定手法は、傾斜堤の被覆石の所要質量を算定するハドソン式をもとにして被覆材の安定性能に関わる係数である  $K_D$  値の算出を工夫するか、式の形状を踏襲して作られている。

$$\text{ハドソン式：} \quad W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (\gamma_r / \gamma_w - 1)^3 \cot \alpha}$$

W: 所要質量 (kg),  $\gamma_r$ : 被覆材の単位体積重量 ( $\text{t/m}^3$ ), H: 設計波高 (m),  $K_D$ : 被覆材の形状や被害率等によって定まる係数,  $\gamma_w$ : 海水の単位体積重量 ( $\text{t/m}^3$ ),  $\alpha$ : 斜面の角度

人工リーフの被覆材の所要質量を算定するために天端上の流速を念頭におき開発された土研式 (図-1.1 被覆材質量の検討フローの左側) と斜面や混成堤の被覆材所要質量を算定に実績が豊富なすブレブナー・ドネリー式 (同図 右側) の2つの算定式の結果を比較することで、両者の弱点を補う方法がとられていた。安定数の評価 (実験及び結果の解析から図表にする) と質量算定の手順が単純で、かつ直ちに不規則波への対応が可能なブレブナー・ドネリー式に周期の効果として水深波長比  $h/L$  を取り込む工夫をすることで、両者の考え方を融合した質量算定とすることとした。

手引き (改訂版) では、「…被覆材形状、人工リーフの堤体形状、海底地形が単純な場合には、第6章 (構造に関する留意事項) に示す算定法を用いることもできる。」<sup>2)</sup> としている。これに基づき多くのコンクリート被覆ブロックでは、水理模型実験で安定数  $N_s$  を求めカタログ化して用いている。水深波長比  $h/L$  を取り込んだ時のブロック選定のイメージを図-1.2 に示す。従来は  $h/L$  の区別なく一本の線で引かれていたものを  $h/L$  ごとに安定数の算定線が引かれることになるので、所要重量の線もその本数分描くことができる。一方でブロックは大まかな質量毎に型枠が用意されることから、図中の横直線のように型枠サイズ分の線が描かれる。選定される型枠サイズは、算定された所要重量よりも大きい質量に

対応できる必要がある。一つのHに対して数本のh/Lが存在するので、図中Hibのように型枠サイズをまたぐことがあり得る。この際には、無用に過大とならないように、その現場に適切なh/Lの範囲を設定して活用することが必要である。

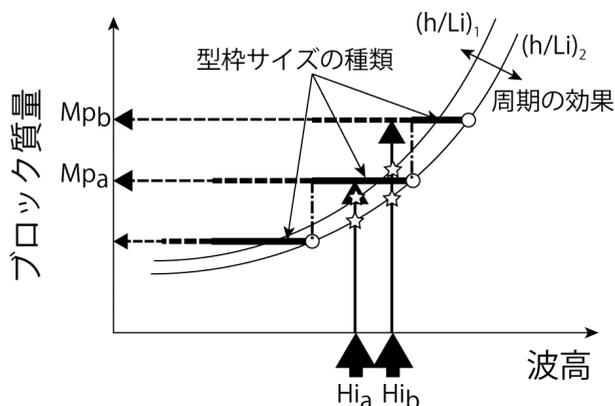


図-1.2 型枠サイズ選定のイメージ

## (2) $N_s$ 算定方法の標準化

### ・水理模型実験による安定性確認

手引き（改訂版）では、「…被覆材の形状・かみ合わせ、堤体形状、砕波状況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。」<sup>2)</sup>としている。本マニュアルは手引き（改訂版）のこの部分を補完するものであり、水理模型実験で安定数  $N_s$  を算出するための実験条件や実験結果の整理方法等を設定している。具体的には、砕波状況下での波浪安定性能をみるため、本枠書き項目（2）で述べたように、人工リーフ設置位置を砕波帯内としている。波高と周期は、5.2（波高と周期）に示すように、外洋を対象とする計画波浪と現地設置実績の多い  $h/L_1$  を網羅するようケースを設定している。

安定数  $N_s$  は、ハドソン式  $K_D$  を  $N_s^3 = K_D \cot \alpha$  としたもののから、利便性から  $N_s^3$  算定図が作成される。一般に  $N_s^3$  算定図には算定線（ $N_s^3-R/H$  線）のみ示されており、根拠となる実験結果（実験で確認された被災の有無や被災率）との関係を合わせて表示されていない。このため、手引き（改訂版）で推奨している「水理模型実験による確認」のデータとして用いることは困難である。本マニュアルでは、現地条件から  $N_s$  を算定するために必要な  $N_s^3$  算定図の作成にあたり、6.2.2.2（安定性能曲線（ $N_s^3$  算定図）の作成）で示すように、実験で確認した条件や  $N_s^3$  算定線を引く根拠となる実験結果を示すことを標準としている。これは、実験で確認した範囲を明確にすることで現地との対応を明確にし、手引き（改訂版）で推奨している「水理模型実験による確認」にも用いやすくした意味合いがある。

実験結果の  $N_s$  算定に用いる堤前波高として、これまでは実験で実測した波高と合田の砕波帯内の波高変化図から求めた波高を用いる 2 つの方法が混在していた。本マニュアルでは、実験結果の  $N_s$  算定に用いる堤前波高は、6.1.4（合田による堤前波の算定）に示すよ

うに設計との整合を図る観点から、実験において実測した堤前波高ではなく、換算沖波  $H_0'$  から合田の砕波帯内の波高変化図より算定した堤前波高を用いることを標準とした。

また、 $Ns^3$  算定図も従来一般的に作成されている  $Ns^3-R/H_0$  図に加えて、長周期の波に対する効果の特性を把握できるように  $Ns^3-h/L_i$  図も作成することを標準とした。

#### ・現地実績と水理模型実験条件の関係

本マニュアルは、現地実績から条件を設定している。本マニュアルの作成には、国土交通省河川局海岸室で実施された人工リーフと緩傾斜堤に関する平成13年全国実態調査<sup>4)</sup>(以下、全国実態調査)を参考にしている。また、本マニュアルを作成するにあたり、人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能を照査した実験の実態を調査した(以下、実験実態調査)。

安定数算出のための水理実験において、現地では砕波帯内である  $4m < h \leq 7m$  の実績が多いのに対して、水理実験では  $h \geq 7m$  の非砕波条件(来襲した波が人工リーフ上に到達して初めて砕波が生じる強制砕波の状態)となる堤前波高の大きい領域(堤脚水深を大きくする)における被覆ブロックの安定限界を見つけようとしている事例が少なくない。

人工リーフの設置箇所の実績が砕波帯内である場合が多いことを踏まえ、実験条件に砕波帯を加えた。このために、本マニュアルでは、1.3(適用範囲)で述べるように、実験条件を統一するために堤前水深波長比  $h/L_i$  を  $0.05 \sim 0.082$  とする条件で設定している。

#### (3) 人工リーフ設置位置の水深波長比 $h/L_i$ の採用(堤前波長 $L_i$ (周期 $T$ ) の考慮)

斜面や混成堤の被覆材所要質量を算定する際に一般的に用いられるハドソン式とブレブナー・ドネリー式は、堤前波高  $H_i$  によって所要質量が決まるものである。

一方、堤前波高  $H_i$  に加えて堤前波長  $L_i$ (周期  $T$ ) も所要質量に影響するとの考え方が、斜面被覆材や混成堤マウンドでは、既にファン・デル・メイヤーや谷本によって提案されている<sup>5)</sup>。人工リーフ被覆材についても、竹田ら<sup>6)</sup>が、被覆石を用いた潜堤について不規則波実験による安定検討を行い、図-1.3に示すように  $h/L_i$  が小さくなるほど被害率が大きいことを示し、 $h/L_i$  の影響も考慮するハドソン式における  $K_0$  値の算定式を提案している。

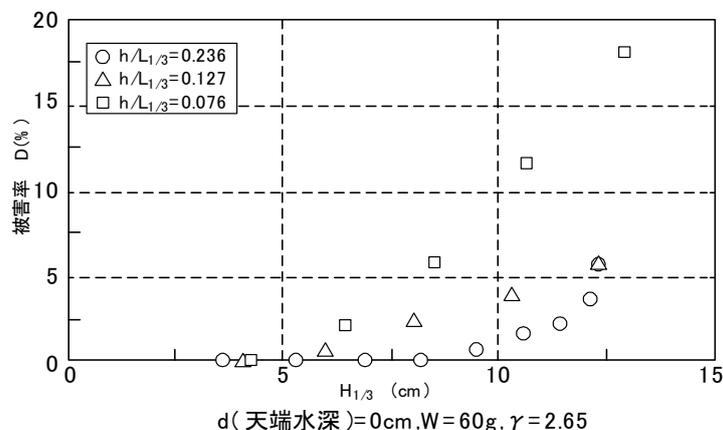


図-1.3 水深波長比  $h/L_i$  の違いによる波高と被害率  $D$  (%) との関係<sup>6)</sup>

水深波長比  $h/L$  は深海波・浅海波・長波の区分に用いられる指標である。微小振幅波理論によれば波速  $C$  は (1) 式、極浅海域に適用されるクノイド波の第一次近似解の波速  $C$  は (2) 式であり、水深波長比  $h/L$  は波速  $C$  を規定する指標の1つでもある。

$$C = C_0 \tanh(2\pi h/L) = \sqrt{\frac{g \cdot L_0}{2\pi}} \tanh(2\pi h/L) \quad (1)$$

$$C = \sqrt{gh} \left[ 1 + \frac{1}{2m^2} \left( \frac{H}{h} \right) \left( 2m^2 - \frac{3E}{K} - 1 \right) \right], \quad 4mK = \left( 3 \frac{H}{h} \right)^{1/2} \frac{L}{h} \text{ or } \left( 3 \frac{H}{h} \right)^{1/2} \frac{CT}{h} \quad (2)$$

図-1.4 は、微小振幅波理論による  $h/L_0$  に対する  $h/L$ 、 $C/C_0$ 、 $H/H_0$  の変化を図示したものである。図には、本マニュアルで対象とする  $h/L_i$ 、現地被災実績の  $h/L_i$ 、竹田らの実験における  $h/L_i$ 、 $h/H_0$  を合わせて示している。図から、現地の被覆ブロック散乱被災の実績は、 $h/L_i=0.05\sim0.07$  の範囲にある。その条件は外洋から来襲する波浪を想定した  $H_0/L_0=0.02$  では  $h/H_0$  が 1.4 以下となっており、海底勾配 1/30 における規則波水理実験結果(図-1.5(左))から得られている碎波水深・沖波波高比  $hb/H_0=1.4\sim 2$  以下であり、散乱被災は碎波帯の中で起きていると推定される。参考までに、合田の不規則波の波高分布図(図-1.5(右))の  $H_0/L_0=0.02$  から読み取れる有義波碎波水深  $hb_{1/3}/H_0=2$ 、最大波の碎波水深  $hb_{max}/H_0=2.5$  よりも散乱実績のある  $h/L_i=0.05\sim0.07$  に相当する  $h/H_0=0.75\sim 1.4$  は小さく、このことから散乱被災は、碎波帯の中で起きていると推定される。

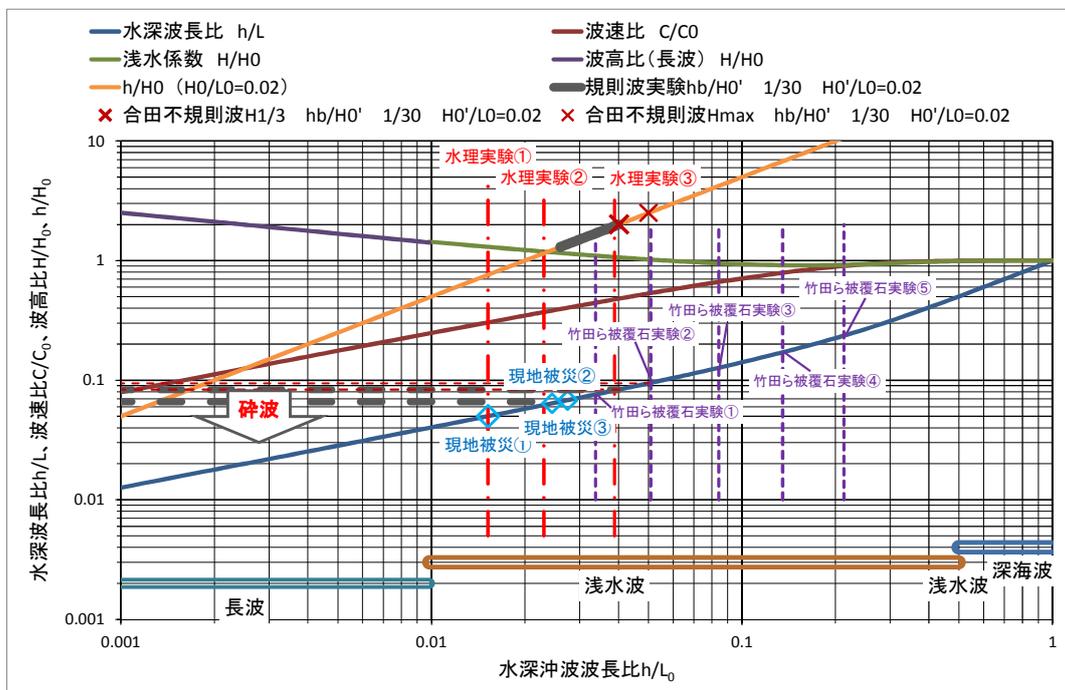


図-1.4 微小振幅波理論による水深波長比  $h/L$  と碎波の関係

## 海底勾配 1/30；波形勾配 0.02 における砕波帯

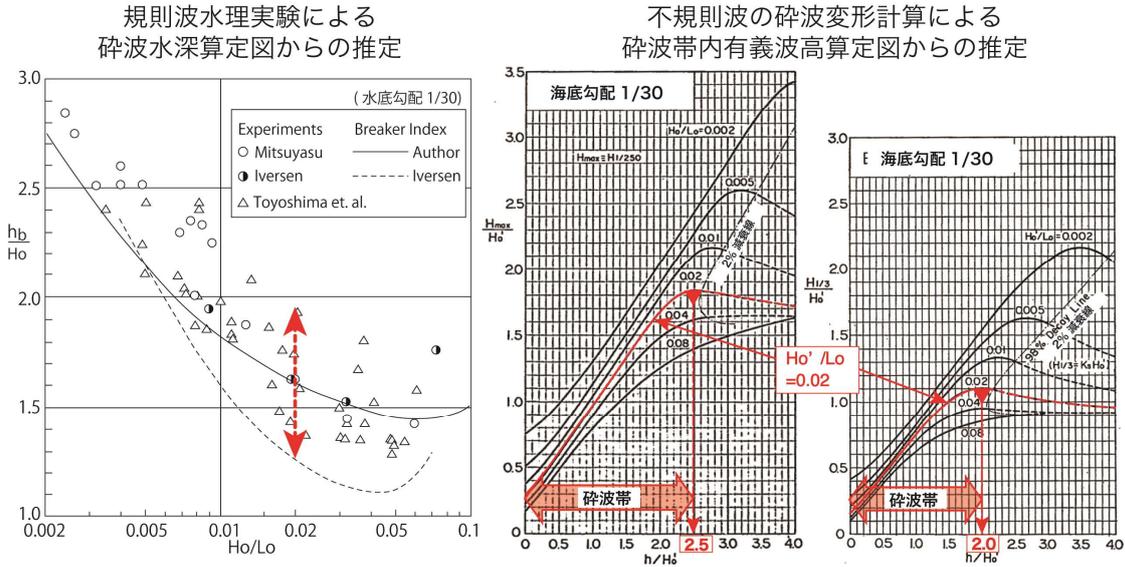


図-1.5 (左) 規則波水理実験の砕波水深<sup>7)</sup>、(右) 合田不規則波波高図から読み取った砕波水深<sup>8)</sup>

砕波直後のボアの流速は波速  $C$  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被災が生じている可能性が高いと推察される。つまり  $h/L_i$  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。なお、水理的に正しくかつ人工リーフ設置位置（砕波帯内）の最大流速（加速度も含む可能性もある）と波浪場の関係を簡便に推定する指標が他に見当たらないので本マニュアルでは微小振幅波理論による  $h/L_i$  を用いている。また、被覆ブロック A について不規則波実験で安定性能を検討した結果から、竹田らの実験結果と同様、 $h/L_i$  が小さくなると安定数  $N_s$  が小さくなる（同じ波高でも所要質量が大きくなる）結果となった（図-1.6）。

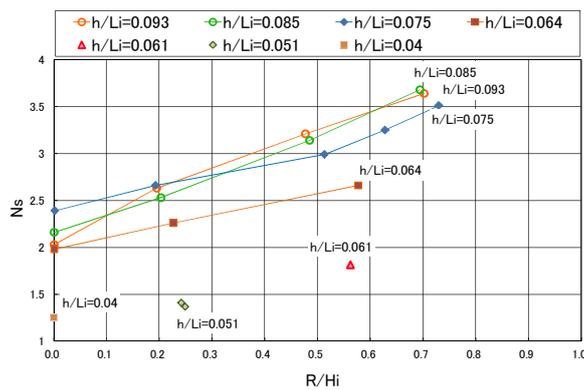


図-1.6 水深波長比  $h/L_i$  の違いによる安定数  $N_s$  と  $R/Hi$  との関係（ブロック A）

### (4) 土研式の課題

土研式は、揚力と重力との釣合いにより人工リーフ被覆材の所要質量を算定する手法で

ある。人工リーフ被覆材の安定性は、人工リーフ表面上の岸向き最大流速  $u_{\max}$  に支配される。土研式による所要質量算定を行う場合、(手引き (改訂版) の 6.3) 式に示す  $K_L$  を算定する。そのとき堤体表面上の無次元最大流速  $f_u$  を、手引き (改訂版) の図 (図-1.7) より  $H_0'/h$  と  $R/H_0'$  の関係から求める。

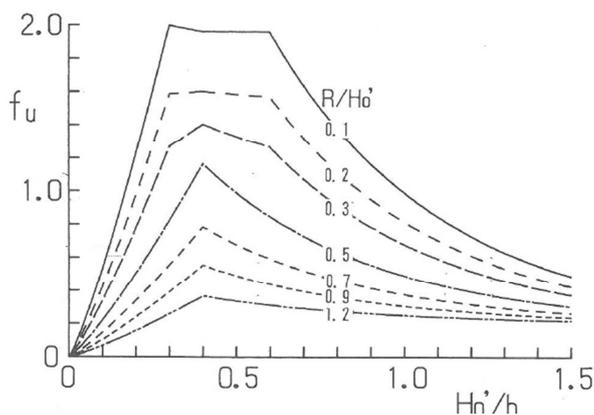


図-1.7  $f_u$  と  $H_0'/h$ 、 $R/H_0'$  の関係<sup>9)</sup>

ここでは、宇多ら<sup>10)</sup>の実験 (以下、規則波実験) 結果と国総研で実施した不規則波による実験 (以下、不規則波実験) 結果を比較し、不規則波による実験結果を土研式で推定できるかを検討した。被覆材は、規則波実験では碎石を、不規則波実験ではブロック模型を使用している。以下では、 $u_{\max}$  と  $f_u$  と被災状況について検討した。

#### ・人工リーフ表面上の岸向き最大流速 $u_{\max}$

人工リーフ表面上の岸向き最大流速  $u_{\max}$  の比較を行った。流速測定位置は、規則波実験では、図-1.8 に示すように沖側法面～沖側天端であり、不規則波実験では沖側法肩位置である。岸向き最大流速は、規則波実験ではリーフ上の各地点の岸向きピーク流速の最大値とし、不規則波実験では、測定時間内で測定した流速の最大値とした。図-1.9 には、最大流速  $u_{\max}$  の測定結果を  $R/H_0'$  と  $H_0'/h$  により整理したものを示す。波形勾配  $H_0'/L_0 \geq 0.02$  の場合である。不規則波実験結果では、 $H_0'$  として換算沖波の有義波高と最大波高の 2 つの場合で整理した。規則波実験結果では、 $H_0'/h$  と  $R/H_0'$  の変化に応じて  $u_{\max}$  が変化する傾向が見られるが、不規則波実験結果では全て  $u_{\max} > 120\text{cm/s}$  であった。

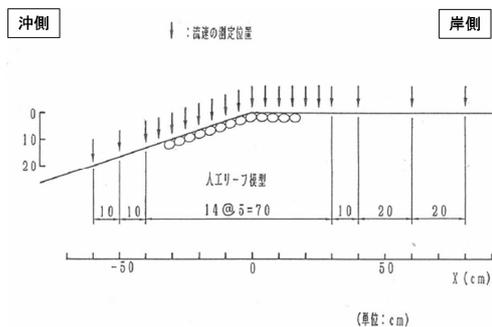


図-1.8 流速の測定位置 (規則波実験)

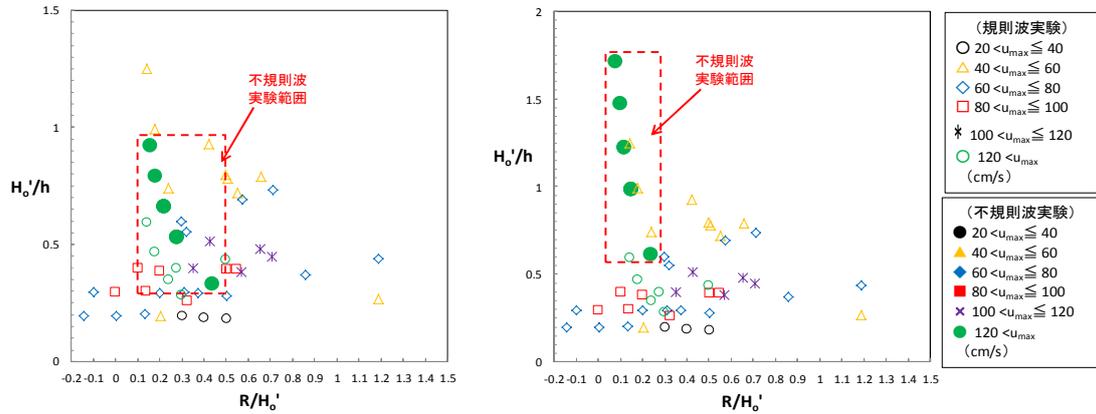


図-1.9 岸向き最大流速の発生状況

(不規則波実験結果で  $H_0' = H_0'/3$  としたものが左図、 $H_0' = H_0'_{max}$  としたものが右図)

・人工リーフ表面上の岸向き無次元最大流速  $f_u$

人工リーフ表面上の岸向き無次元最大流速  $f_u$  は次式で表すことができる。

$$f_u = \frac{u_{max}}{\sqrt{g(R + \bar{\eta})}}$$

ここに、 $g$  : 重力加速度、 $R$  : 天端水深、 $\bar{\eta}$  : 人工リーフ上の水位上昇量である。ただし、 $\bar{\eta}$  について、測定位置は規則波実験・不規則波実験ともに天端岸側法肩とし、不規則波実験の  $\bar{\eta}$  は、 $\bar{\eta} = \bar{h}_t - h_{t(t=0)}$  とした。

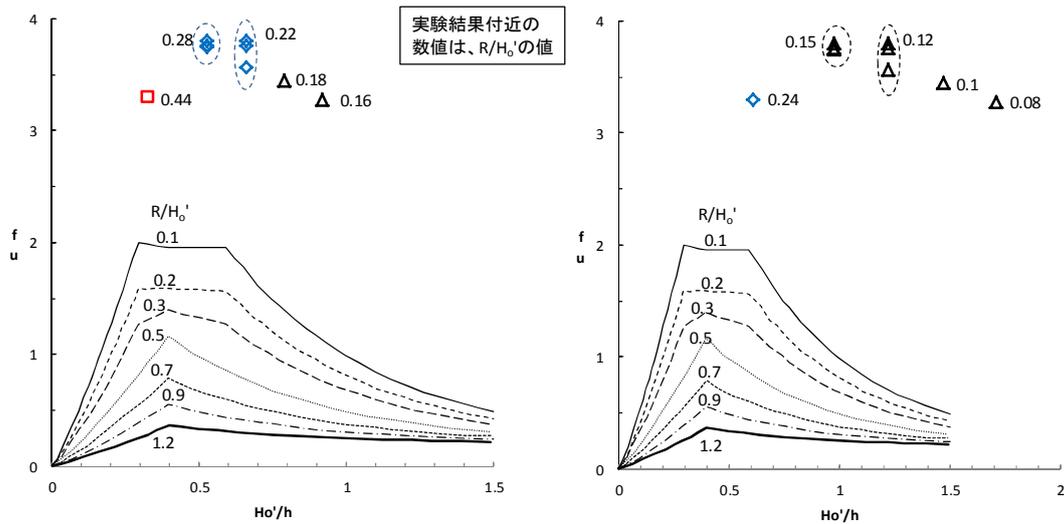


図-1.10  $f_u$  と  $H_0'/h$ 、 $R/H_0'$  の関係

(不規則波実験結果で  $H_0' = H_0'/3$  としたものが左図、 $H_0' = H_0'_{max}$  としたものが右図)

図-1.10 に  $f_u$  を  $R/H_0'$  と  $H_0'/h$  により整理したものを示す。図中の曲線は、手引き（改訂版）に示されている  $f_u$  (図-1.7) であり、プロット点は不規則波実験結果である。プロット点付近に示す数値は  $R/H_0'$  である。不規則波実験結果について、 $H_0'$  に換算沖波の有義波高と最大波高の2つの場合で整理した。これより、不規則波実験結果は  $H_0'/h$ 、 $R/H_0'$  が同じであっても手引き（改訂版）に示す  $f_u$  よりはるかに大きくなった。不規則波では、有義波や最大波を用いて手引き（改訂版）に示す  $f_u$  を算定しても大きく異なるので、そのまま用いることができない。今後、土研式を用いるには、不規則波での  $f_u$  算定図を整備する必要がある。

### ・被災状況

土研式では、規則波実験結果をもとに図-1.11 のように  $R/H_0'$  と  $H_0'/h$  により安定・不安定等の被災状況を整理しており、安定と不安定の境界は  $S_n$  の線で区分される。(a)式と、規則波実験結果を元に求められた  $f_u$  の算定曲線の式(b), (c)を用いて  $S_n=0.9$  の曲線を算定し、規則波実験と不規則波実験の安定・不安定結果を併せて図示した。不規則波実験結果は  $0.56 \leq B_z/(R+\bar{\eta}) \leq 0.97$  で、規則波実験結果は  $0.7 \leq d_R/(R+\bar{\eta}) \leq 0.9$  である。不規則波実験結果について、 $H_0'$  に換算沖波の有義波高と最大波高の2つの場合で整理した。

$$S_n = \frac{s \cos \alpha}{f_u^2} \cdot \frac{d_R}{R+\eta} \quad (\text{a})$$

ここに、 $s$ ：被覆材の水中比重 ( $=(\rho_s - \rho_w)/\rho_w$ )、 $\cos \alpha$ ：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、 $f_u$ ：堤体表面上の最大流速の無次元係数、 $d_R$ ：材料の代表長さ（石であれば代表粒径、コンクリートブロックでは代表長さ  $B_z$  とした）、

$$f_u = \frac{u_{\max}}{\sqrt{g(R+\eta)}} = 7.5 \exp\left(-2.0 \frac{H_o'}{h} - 2.5 \frac{R}{H_o'}\right) + 0.2 \quad (H_o'/h \geq 0.4) \quad (\text{b})$$

$$f_u = \frac{u_{\max}}{\sqrt{g(R+\eta)}} = \left\{ 7.5 \exp\left(-0.8 - 2.5 \frac{R}{H_o'}\right) + 0.2 \right\} \left( \frac{H_o'}{0.4h} \right)^{1.2} \quad (H_o'/h < 0.4) \quad (\text{c})$$

ここに、 $H_0'$ ：換算沖波波高、 $h$ ：堤脚水深である。

規則波実験の安定・不安定結果と  $S_n=0.9$  ( $d_R/(R+\bar{\eta})=0.8$ ) の曲線より、曲線の右側が安定な領域と区分できる。不規則波実験結果は、 $R/H_0'$  と  $H_0'/h$  が同じ値であっても被災がない場合と被災がある場合の両方混在している。規則波実験をもとに描かれた安定領域・不安定領域の区分では不規則波実験の安定・不安定は説明できない。

不規則波実験結果において、 $R/H_0'$  と  $H_0'/h$  が同じ値であっても被災がない場合と被災がある場合の両方混在しているうち、被災が発生しているのは波形勾配が小さいケースである。これを踏まえると、波形勾配の影響を考慮して安定・不安定の領域区分を整理する必要があると考えられる。また、被覆材料が、石とブロック模型であることの違いも含まれ

ている可能性がある。

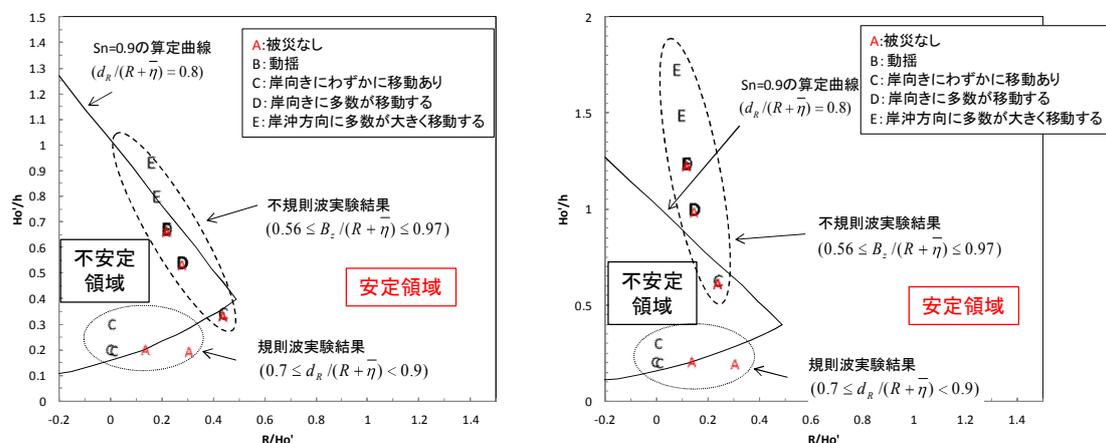


図-1.11 被災状況

(不規則波実験結果で  $H_0' = H_0'_{1/3}$  としたものが左図、 $H_0' = H_0'_{max}$  としたものが右図)

### 1.3 適用範囲

#### (1) 適用被覆ブロック

本マニュアルで対象とする被覆ブロックは、所要質量を算定式の1つであるブレブナー・ドネリー式を用いて算定するブロックとする。これらのブロックは、算定に安定数  $N_s$  を用いるので、以下では「 $N_s$  算定ブロック」と呼ぶ。

#### (2) 砕波帯と設置位置の関係

人工リーフ設置位置は、砕波帯との関係から3つのパターンに分けられると考えた。本マニュアルの適用範囲は、人工リーフ設置位置が設計有義波高の砕波帯内にある図-1.12(a)の条件の場合である。

#### (3) 留意事項

以下に示す①～⑥の事項については、本マニュアルで考慮していない。

- ① 実験波に用いる不規則波のスペクトルは、5.1 (不規則波とスペクトル) で示すように修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルに合わせることを標準とするが、現地が必ずその通りである保障はない。
- ② 実験水路の水路床は、固定床のため地盤変状は考慮できていない。たとえば、人工リーフ法先洗掘に起因する状況は考慮できていない。
- ③ 実験に使用する海底地形は、3.2 (海底勾配) で示すように単純化して一様勾配としている。非一様勾配の海底地形やバー・トラフの影響は評価していない。

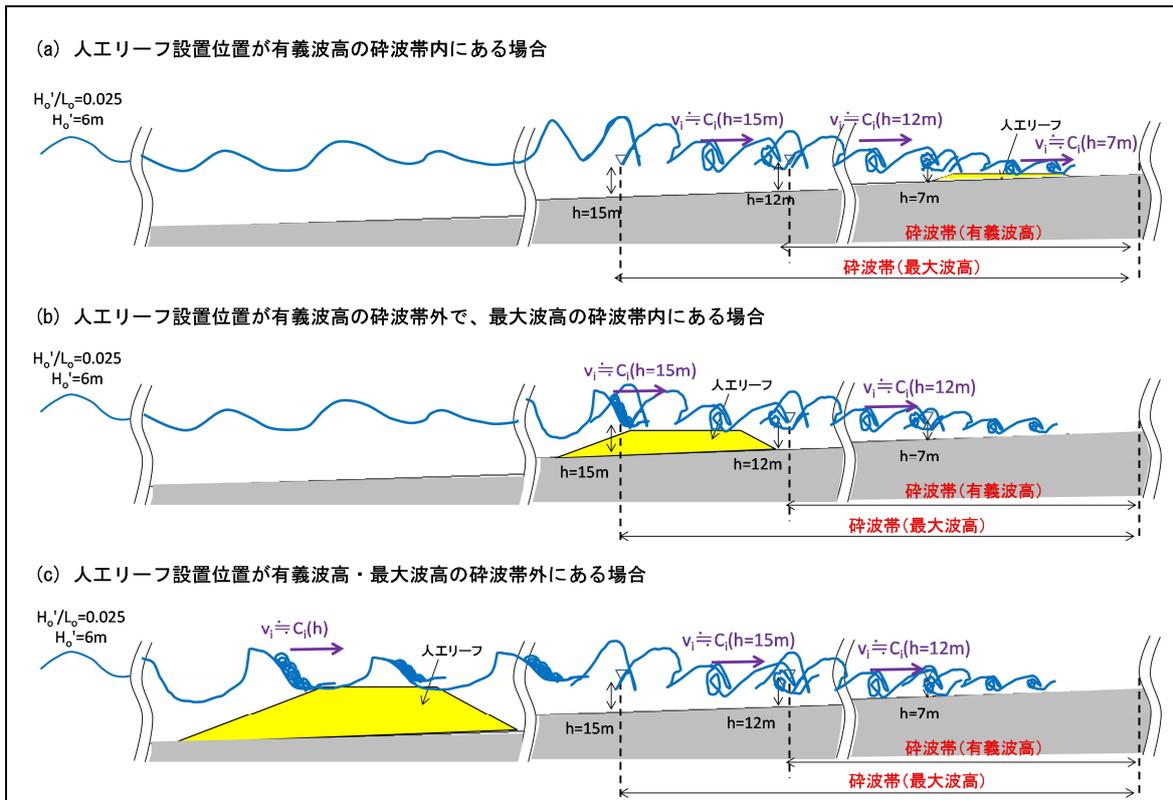


図-1.12 人工リーフと碎波帯の関係（設定条件： $H_0'=6\text{m}$ ,  $T_0=12.4\text{s}$ ,  $H_0'/L_0=0.025$ ,  $R=3\text{m}$ ）

- ④ 海底勾配は、3.2（海底勾配）で示すように 1/30 と設定している。一般的に海底勾配が急な地形では波力が大きくなるので、海底勾配 1/30 より急勾配の海底地形については注意が必要である。
- ⑤ 断面実験による評価なので、波の斜め入射や開口部の影響は考慮できていない。
- ⑥ 段階施工断面は考慮できていない。

対象とする現地が留意事項に合う条件で、かつ過去に  $N_s$  で算定した質量のブロックが被災している等の事象があった場合には、ブロック質量の割り増し等の設計上の留意や現地状況に合った水理模型実験を行い、所要質量を実験で確認すること等が必要である。

## 解 説

### （1）適用被覆ブロック

$N_s$  算定ブロック以外は、現時点ではブロック単体ではなく、列数で安定性能を評価して設計するブロック等を想定している。 $N_s$  算定以外のブロックは、本マニュアルの適用範囲外としているものの、本マニュアルの外力設定や碎波帯と設置位置、 $h/L_i$  の関係に該当するような場合、本マニュアルで設定している波浪条件や碎波帯との位置関係、 $h/L_i$  (3.4.1 (堤脚水深)、5.2 (波高と周期) に示す条件) で水理模型実験を行い、設計手法が評価されれば、手引き（改訂版）の「…コンクリートブロックなどを被覆材に用いる場合には、該当する被覆材について行われた水理模型実験に基づく適切な算定方法より所要質量を求

めることが望ましい。また、適切な方法が見当たらない場合には、下記5)を参考に  $S_n$  と  $K_v$  を定め、式 (6.3) を準用してコンクリートブロックを被覆材とする場合の所要質量を求めてもよい。) <sup>3)</sup>」を満足しているとみなすことが可能である。

## (2) 水深波長比 $h/L_i$

人工リーフ設置位置の水深波長比  $h/L_i$  は、現場の実績と被災事例を考慮したものとする。図-1.13 に  $h/L_i$  の現場の実績に加えて、被災事例の条件と被覆ブロック B および竹田ら <sup>6)</sup> の実験条件とマニュアルで標準とする条件を示す。本マニュアルの実験条件は、現場実績の7割以上をカバーする設定となっている。

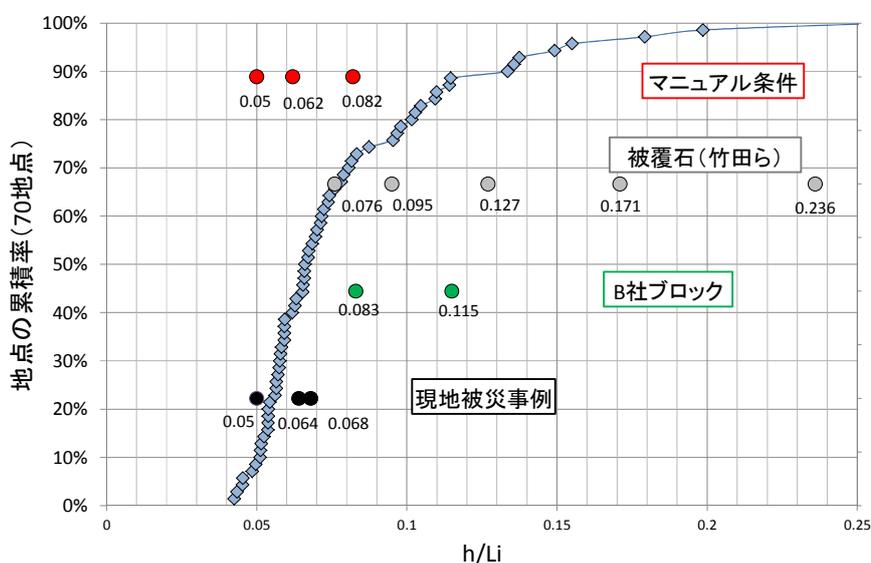


図-1.13  $h/L_i$  の現場実績

## (3) 砕波帯と設置位置

作用波を有義波と最大波の2つの波高について砕波する条件を考えた場合、図-1.12に示すような人工リーフ設置位置と砕波帯の関係が考えられる。図-1.12の波浪条件は、換算沖波波高  $H_0' = 6m$ 、周期  $T=12.4s$ 、波形勾配  $H_0'/L_0=0.025$  のものである。(a)は「人工リーフ設置位置が有義波高の砕波帯内にある場合」、(b)は「人工リーフ設置位置が有義波高の砕波帯外で、最大波高の砕波帯内にある場合」、(c)は「人工リーフ設置位置が有義波高・最大波高の砕波帯外にある場合」である。

3.4.1 (堤脚水深)の図-3.13に示す堤脚水深の現地実績より、人工リーフ設置位置は水深7m以下が多く、外海・外洋の計画波浪に対して砕波帯内となることが多い。砕波帯内では波と流れが混在し、加えて人工リーフ背後域からの戻り流れもあり複雑である。

したがって、砕波帯の内・外では波・流れ場が異なるので、 $Ns^3$ 算定図において、横軸の天端水深と堤前波高の比 ( $R/H_i$ ) が同じであっても、安定数  $Ns$  が同じとはかぎらない。

そのため、人工リーフが砕波帯に対してどのような設置位置にあるかが、 $N_s$  算定の前提条件として重要である。また、既往の知見<sup>5)</sup>より、人工リーフ堤脚における水深波長比  $h/L_1$  も安定性能を評価する上で無視できないことがわかっており、これも重要である。

国総研では、砕波帯と人工リーフ被覆ブロックの被災状況の関係について、水理模型実験による検討を行った<sup>11)</sup>。この水理模型実験結果より、本マニュアルで設置位置を砕波帯内として設定した条件が、被覆ブロックの波浪安定性能を評価する上で厳しい条件であるか検討した。実験条件を表-1.1に示す。被覆ブロック模型は矩形型のブロックを使用した。波浪は不規則波を用いた。図-1.14には、波形勾配  $H_0'/L_0$  と堤脚水深と換算沖波波高比  $h/H_0'$  の関係を、被覆ブロックの被害率により整理した。ここに、本マニュアルで設定した条件と、内湾・外洋海岸の計画波浪範囲(5.2(波高と周期))と、合田の砕波帯内に有意波高の算定図<sup>12)</sup>より、海底勾配1/30の各  $H_0'/L_0$  において有意波高と換算沖波波高の比  $H_{1/3}/H_0'$  が最大となる  $h/H_0'$  の値を結んだ曲線を引いた。図-1.14より、人工リーフ設置位置を砕波帯内とすることは、被覆ブロックの波浪安定性において厳しい条件であると判断できる。

表-1.1 実験条件

|            |                      |
|------------|----------------------|
| 実験水槽の長さ    | 35m                  |
| 実験縮尺S      | 1:45                 |
| 海底勾配       | 1:30                 |
| 天端水深 R     | 1.1, 2.2, 6.6cm      |
| 天端幅 B      | 119cm                |
| 法面勾配       | 1:3                  |
| 法高         | 13cm                 |
| 堤脚水深 h     | 14.1, 15.2, 19.6cm   |
| 波種類        | 不規則波                 |
| 有意波高       | 5, 8, 10, 12, 14cm   |
| 有意波周期      | 1.5, 2.2, 2.8, 3.5s  |
| 波作用時間      | 有意波周期の1000倍以上        |
| ブロック模型     |                      |
| 模型形状       | 矩形                   |
| 質量M        | 75.8g                |
| 寸法 幅×長さ×高さ | 3.4cm×5.1cm×1.9cm    |
| 密度         | 2.3g/cm <sup>3</sup> |

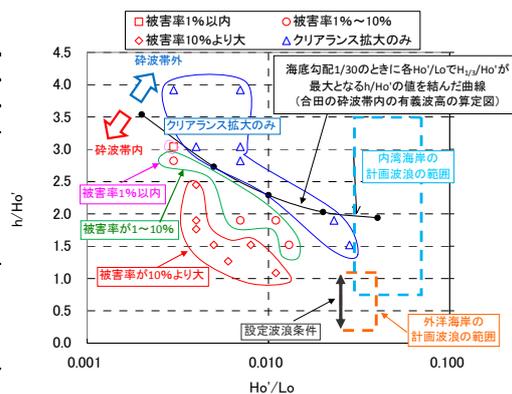


図-1.14 堤脚水深沖側有意波高比  $h/H_0'$  と波形勾配  $H_0'/L_0$  による被覆ブロックの散乱状況の関係

現地において砕波帯内に設置されるものは、本マニュアルに従って求めた  $N_s$  を用いることができる。現地の人工リーフ設置位置が砕波帯外(図-1.12の(b), (c))である場合には、本マニュアルで対象としている設置条件と異なる。砕波帯外に設置される場合のものは、砕波帯外の水理模型実験に基づいた設計法とするために、現地と同様の条件(人工リーフ設置位置と砕波帯の関係)での水理模型実験等により安定性を確認することが望ましい。

#### (4) 高機能型ブロックの波浪安定性能評価

現在のところ、 $N_s$  算定ブロック以外のものは手引き(改訂版)に示されている性能<sup>13)</sup>に比べて消波性能(波高伝達率)が高い、人工リーフ背後の水位上昇量を低下させる、堤体幅を小さくできる等の特徴を発揮して人工リーフの堤体までも構成するブロックである場合が多い。そこで、このような複数の機能に対して高い性能を有したブロックを高機能型ブロックと呼ぶこととした。

高機能型ブロックの波浪安定性能評価方法には、安定数  $N_s$  とは異なる各ブロックの特性に応じた設計方法を整理しているものや個別の現地を想定した実験を行うもの等がある。本マニュアルの考え方を踏まえつつ、人工リーフの性能・機能も含めて総合的に評価可能な結果を得られる実験が必要である。

設置実績によれば、高機能型ブロックは他の  $N_s$  算定ブロックと人工リーフ設置位置が異なり設置水深が深い。3.4.1（堤脚水深）の図-3.15 に示す堤脚水深の実績に高機能型ブロックの人工リーフの実績も示しているが、 $N_s$  算定ブロックは  $4\text{m} \leq h \leq 7\text{m}$  が多いのに比べて、高機能型ブロックは  $7\text{m}$  より大きい場合も多く、砕波帯外に設置されている可能性がある。高機能型ブロックは、本マニュアルの水理実験範囲（海底勾配・堤脚水深）で網羅できない水理条件で設置することを想定している。高機能型ブロックの設計方法を整理する場合、設置を想定している海底勾配や堤脚水深を考慮した上で、本マニュアルで設定している条件を網羅して波浪に対する安定性が確認されていることが望ましい。

### （5）消波性能・海浜安定性能の評価

消波性能や海浜安定性能を評価するにあたっては、本マニュアルで設定している実験範囲に加えて、他の条件でも実験することが必要である。

本マニュアルで設定する条件は被覆材の安定性に対するものなので、消波性能や海浜安定性能については、例えば、設置想定箇所のエネルギー平均波相当の波浪条件を対照とすることも必要である。図-1.15 は新潟海岸と駿河海岸の有義波の波高と周期の結合分布図<sup>14)</sup>を示しており、それぞれ計画波浪とその波形勾配を併せて示している。また、波浪の記録数の99%にあたる部分を青色で塗潰している。この図からも水理実験において消波性能や海浜安定性能を照査する場合には、本マニュアルで設定している実験範囲のみならず、広範囲の波浪条件を網羅する必要があることがわかる。

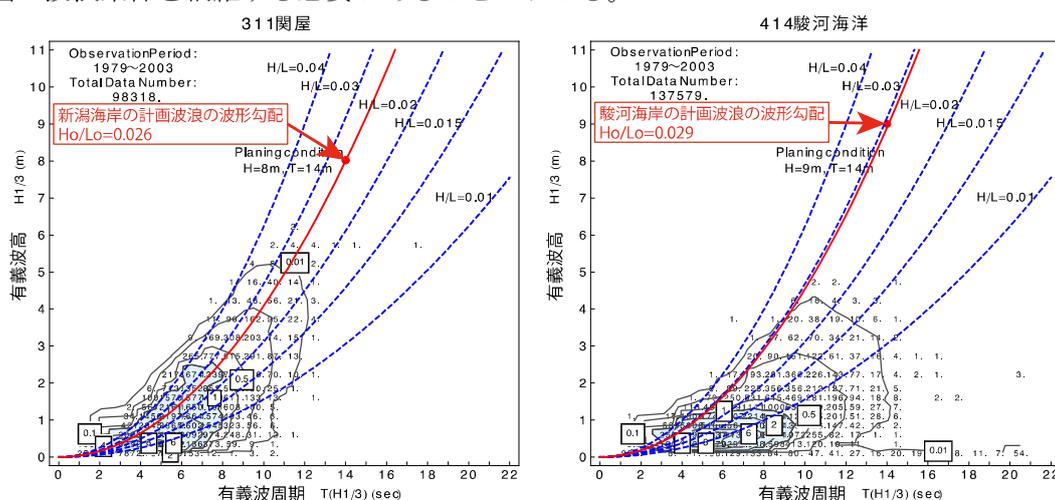


図-1.15 有義波の波高と周期の結合分布図(左：関屋観測所(新潟市)、右：駿河海洋観測所(大井川町))<sup>15)</sup>

## (6) $N_s$ 算定ブロックの消波性能等の確認

$N_s$  算定ブロックについて、手引き（改訂版）に示されている性能<sup>14)</sup>に比べて消波性能（波高伝達率）や人工リーフ背後の水位上昇量が同程度かどうかを 6.2.2.3（人工リーフ性能（波高伝達率、水位上昇量）の整理）で確認を行う。

確認の目的は、例えば、通常通りの消波性能と見込んで平面計画したにもかかわらず、想定以上に消波性能が高いことで、周辺砂浜の砂を集めて侵食を助長する副作用が生じる懸念があるからである。また、背後の海岸線の維持のために人工リーフの海浜安定性能に期待する場合には消波性能だけでなく、人工リーフにより生じる向岸流の影響を受けないことを確認する必要もある。<sup>例えば 15)</sup>

## 参考文献

- 1) 社団法人全国海岸協会、監修国土交通省河川局海岸室・国土技術政策総合研究所海岸研究室（2004）：「人工リーフの設計の手引き（改訂版）」，p. 68.
- 2) 文献 1) 参照，p. 32.
- 3) 文献 1) 参照，p. 74.
- 4) 野口賢二・鳥居謙一・人見寿・笛田俊治・丸山準・岸田弘之・山崎真（2002）：人工リーフと緩傾斜堤に関する平成 13 年実態調査，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 921-925.
- 5) 土木学会海岸工学委員会 海岸保全施設設計便覧小委員会（2000）：海岸施設設計便覧，p. 309.
- 6) 竹田英章・菊池聡一・木村克俊・笹島隆彦・水野雄三（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.
- 7) 合田良実（1970）：碎波指標の整理について，土木学会論文報告集，第 180 号，pp. 39-49.
- 8) 海岸保全施設技術研究会（2004）：海岸保全施設の技術上の基準・同解説，p. 2-35.
- 9) 文献 1) 参照，p. 70.
- 10) 宇多高明・小俣篤・齋藤友伸（1990）：人工リーフ被覆材の所要重量算定法，土木研究所資料，第 2893 号
- 11) 中村英輔・野口賢二・岩佐隆広・二瓶 功・伊藤幸義・諏訪義雄（2015）：人工リーフ変状連鎖に及ぼす碎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.
- 12) 合田良実（1975）：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第 14 巻，第 3 号，pp. 59-106.
- 13) 文献 1) 参照，pp. 14-19.
- 14) 加藤史訓（2005）：海象年表 25 年統計、国総研資料、第 274 号.
- 15) 野口賢二・諏訪義雄（2016）：人工リーフ背後で汀線後退を引起こす向岸流と循環流、その対処方針土木技術資料，Vol. 58，No. 2，pp. 42-45.