

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.927

August 2016

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

国土技術政策総合研究所河川研究部海岸研究室

A Manual on Hydraulic Model Test to Evaluate the Stability
of Artificial Reef Blocks against Waves

Coast Division, River Department, NILIM

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

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

諏訪 義雄	*
野口 賢二	**
中村 英輔	***

概要

本稿は、人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能を求めるための実験を統一的に実施するために作成された実験手法および結果評価のためのマニュアルである。水理模型実験とブロックの安定数 N_s の算定図作成について、標準的な方法を定めている。水理実験結果をもとに変状連鎖の整理を行うこととし、安定数 N_s を評価するパラメータとして、従来から考慮している天端水深比 R/H に加えて水深波長比 h/L も取り入れることを標準とした。なお、本マニュアルは、人工リーフの手引き（第2回改訂版）に記載された技術的補完を示したマニュアルである。

キーワード：人工リーフ被覆ブロック、安定数 N_s 、水理模型実験、水深波長比 h/L 、変状連鎖

*	河川研究部海岸研究室長
**	河川研究部海岸研究室主任研究官
***	(研究当時) 河川研究部海岸研究室交流研究員

A Manual on Hydraulic Model Test to Evaluate the Stability
of Artificial Reef Blocks against Waves

Yoshio Suwa *

Kenji Noguchi **

Eisuke Nakamura ***

Synopsis

This note is a manual on hydraulic model tests to evaluate the stability of artificial reef blocks against waves. This manual shows requirements of model tests and evaluations of test results. The evaluations is conducted with the stability number N_s . The stability of concrete blocks is described by introducing the fault tree diagram and the relative water depth h/L in front of the structure, in addition to the relative crown depth R/H used in the existing design. This manual fills in the details of the design guideline of artificial reef, second revised edition.

Key Words : artificial reef blocks, stability number N_s , hydraulic model test, relative water depth h/L , fault tree diagram

-
- * Head of Coast Division, River Department
- ** Senior Researcher of Coast Division, River Department
- *** Former Guest Research Engineer of Coast Division, River Department

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

目次

まえがき	1
第1章 はじめに	3
1. 1 目的・背景	3
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	4
補足①：本マニュアルの課題（土研式への対応）	5
1. 3 適用範囲	14
第2章 マニュアルの概要	20
2. 1 マニュアルの構成	20
2. 2 安定数（Ns）の評価手順	21
第3章 水路（実験）断面の設定方法	23
3. 1 実験縮尺	23
3. 2 海底勾配	24
3. 3 人工リーフ断面	26
3. 3. 1 人工リーフ法面勾配	26
3. 3. 2 天端幅	27
3. 4 堤脚水深・天端水深	27
3. 4. 1 堤脚水深	27
3. 4. 2 天端水深	29
3. 5 還流施設（戻り流れ）	30
第4章 人工リーフ模型の設定方法	33
4. 1 マウンド材	33
4. 2 被覆ブロックの配置とクリアランス	34
4. 3 ブロック質量の種類	34
4. 4 人工リーフ模型製作上の留意点	35
補足②：模型ブロックの比重・密度・質量	35
補足③：模型ブロックの摩擦抵抗	37

第5章 波浪条件の設定方法	42
5.1 不規則波とスペクトル	42
5.2 波高と周期	43
5.3 波作用時間（波列の作成方法）	46
第6章 実験と結果の整理	48
6.1 実験波造波試験	48
6.1.1 水位の測定（沖側波算定位置、沖側堤脚位置）	48
6.1.2 入反射分離と入射波の波高 H_1 ・周期 T_1 の算定 （沖側波算定位置）	48
補足④：水位測定結果からの波浪 (H_2, T_2) の算定と保管（沖側堤脚位置）	49
6.1.3 入射波からの換算沖波波高 (H_{01}) の算定	49
6.1.4 合田による堤前波高 (H_{i1}) の算定	49
補足⑤：沖側堤脚位置波浪 (H_3) と合田による堤前波算定結果 (H_{i1}, H_{i2}) の比較	50
6.1.5 堤前波長 (L_i) の算定	50
6.1.6 各実験条件の N_s 算定式	50
6.2 N_s 値評価実験	51
6.2.1 各指標の実験方法	51
6.2.1.1 実験上の留意点	51
6.2.1.2 水位の測定 （沖側波算定位置、沖側堤脚位置、岸側堤脚位置）	51
6.2.1.3 岸側堤脚位置水位測定結果からの 透過波高 H_t と波高伝達率 K_t の算定	52
6.2.1.4 入反射分離と入射波の波高・周期 (H_2, T_2) の算定 （沖側波算定位置）	52
6.2.1.5 沖側入射波 (H_2, T_2) から換算沖波波高 H_{02} の算定と 合田による堤前波高 (H_{i2}) の算定	52
補足⑥：沖側堤脚位置水位測定結果から堤前波 (H_4, T_4) 算定と保管	53
6.2.1.6 堤前波長 (L_i) の算定	53
6.2.1.7 各ケースの N_s 算定	53
6.2.1.8 人工リーフ背後の水位上昇量 ($\bar{\eta}_t$) の算定	53
6.2.1.9 変状の撮影・記録	54
6.2.1.10 N_s 値評価の被害基準・ブロックの被害判定	55
6.2.1.11 変状連鎖図の作成	57
6.2.1.12 保管データのフォーマット例	62

6. 2. 2	実験総括	63
6. 2. 2. 1	実験結果総括表の整理	63
6. 2. 2. 2	安定性能曲線 (Ns^3 算定図) の作成	64
6. 2. 2. 3	人工リーフ性能 (波高伝達率 K_t 、水位上昇量 $\bar{\eta}_t$) の整理	69
参考資料：マニュアル作成の参考とした諸調査		72
参考1	人工リーフ被災事例	73
参考2	海岸管理者へのヒヤリング	77
参考3	国総研実施矩形ブロック水理模型実験	80

まえがき

人工リーフは、海岸の景観を損なうことなく消波あるいは漂砂制御を行う沖合施設として活用されている。特に、国定公園や親水等の利用が盛んな海岸でその特長を発揮できる施設であり今後も活用が期待される。

建設省河川局海岸課（当時）監修により平成4年に最初の「人工リーフの設計の手引き」（以下「手引き」と呼ぶ）が作成され、平成16年には平成11年の海岸法改正や性能規定化の動向に沿った改訂をするにあたり「人工リーフの設計の手引き検討会」を設立し改訂版（以下「手引き（改訂版）」と呼ぶ）が作成された。人工リーフを設計するにあたっては、「人工リーフの設計の手引き」が参照されてきた。改訂後12年が経過し平成26年に海岸法が改正されたことに合わせて、(1)人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能の評価方法、(2)維持管理について部分的な改訂（以下、「第2回改訂版」と呼ぶ）を行うことになった。

本マニュアルは、「人工リーフの設計の手引き」に対して水理模型実験で波浪安定性能を評価するための実験条件や実験結果の整理方法等の標準的な手法を補完するために、新たに作成したものである。本マニュアルは、(1)「人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能の評価方法」の改訂内容を網羅している。

以下に、本マニュアルの必要性和要点を示す。

・本マニュアルの必要性

人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性能評価は、人工リーフのための標準的な実験方法を定めたマニュアル等が存在しなかったために、混成堤等の消波ブロックの評価手法に準じて行われることが多かった。しかし、これは人工リーフの設置される環境を再現していない可能性があった。人工リーフが混成堤等と異なる1点目としては、人工リーフは混成堤に比べて設置位置が浅く波の浅水変形や砕波を生じる複雑な水理環境である。さらに、安定性を評価する被害基準について、被覆ブロックは人工リーフ本体を形成しているため被覆ブロックの安定性が施設の安定性に直結する重要な部材であるが、多少の変状を許容する消波ブロックと同等に設定されている点である。

被覆ブロックの選定では、安定数 N_s を係数とした算定式により所要質量を算定して既製型枠のブロック重量で安定であるかを評価される。逆に、異なる形状の被覆ブロックであっても、質量を揃えれば安定数 N_s により安定性能を比較することができる。この点から被覆ブロックの特性比較を可能とするために、実験条件等の統一が求められていた。

被災実績では、適切に設計・設置された被覆ブロックが散乱する事例がある。それらの原因は、海岸侵食による外力の変化によるものか被覆ブロックの性能上の問題によるものか通常は判別できない。しかし、近年直轄海岸での水理模型実験による検討から、長周期の波の影響がある可能性が示されている。また、最近の海岸災害によると、2004年台風23

号による菜生海岸高波災害、2007 年台風 9 号による西湘バイパス崩落災害、2008 年 2 月の富山湾「寄り回り波」による高波災害は、いずれも外洋外海における周期（波長）が比較的長いうねり性の高波浪による災害であった。1966 年の富士海岸の高波災害もうねり性の高波浪による災害であった。このように長周期の波が、低頻度の災害リスクとして注目されるようになってきている。

・本マニュアルの要点

海岸保全のために設置される人工リーフの現場の実験条件として、設置実績と被災事例を参考に設定した。標準として定めた重要なパラメータは、海底勾配や外力とする沖波（周期 T 、換算沖波波高 H_0 ）、設置条件（堤脚水深 h 、天端水深 R ）である。これらの条件が統一されるように現地量により規定した。

被害基準の設定については、配置された個々ブロックが被害を受けたことを判定する被害判定基準を規定した。また、実験者が安定性を判定した際の被害率を明示することとした。また、散乱が連鎖的に拡大する過程を「変状連鎖図」として作成することとした。

安定数 N_s の算出には、ブレブナー・ドネリー式（安定数を用いたハドソン式）を用いることとした。ブレブナー・ドネリー式は、緩傾斜堤や離岸堤、混成防波堤等で用いられているため、実務者にとっての扱いやすさも継承している。

波の周期の影響を人工リーフ被覆ブロックの所要質量算定法において考慮するために、水深波長比 h/L （波長 L は周期の関数である）を安定数 N_s の判定曲線（ N_s^3 算定図）に反映する方法を提示した。流速と関係が深い水深波長比 h/L を取り入れることで土研式の優れた点である高流速による被覆材の散乱メカニズムの考慮を継承している。

安定性能の評価結果である N_s^3 算定図を天端水深・波高比（ R/H_i ）と堤脚水深・堤前波長比（ h/L_i ）の 2 つのパラメータで表示することを標準とした。堤脚水深・堤前波長比（ h/L_i ）による評価は、同じ堤脚水深 h 、波高 H_i 、天端水深 R であっても波長 L_i （周期 T ）により被覆ブロックに作用する流速が異なることを評価するためである。

本マニュアルとりまとめにあたっては、手引き「改訂版」検討委員会及び第 2 回改訂検討委員会の委員である大阪大学大学院青木伸一教授、一般財団法人土木研究センターの宇多高明理事、東京大学大学院佐藤慎司教授に有益なご助言を頂いた。

なお、本研究は平成 25～27 年度に国総研海岸研究室で実施された研究「人工リーフの手引き改訂に関する調査」等の研究成果の 1 つである。

平成 28 年 8 月 9 日

国土技術政策総合研究所

河川研究部海岸研究室長 諏訪義雄

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、高波浪時に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¹⁾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。

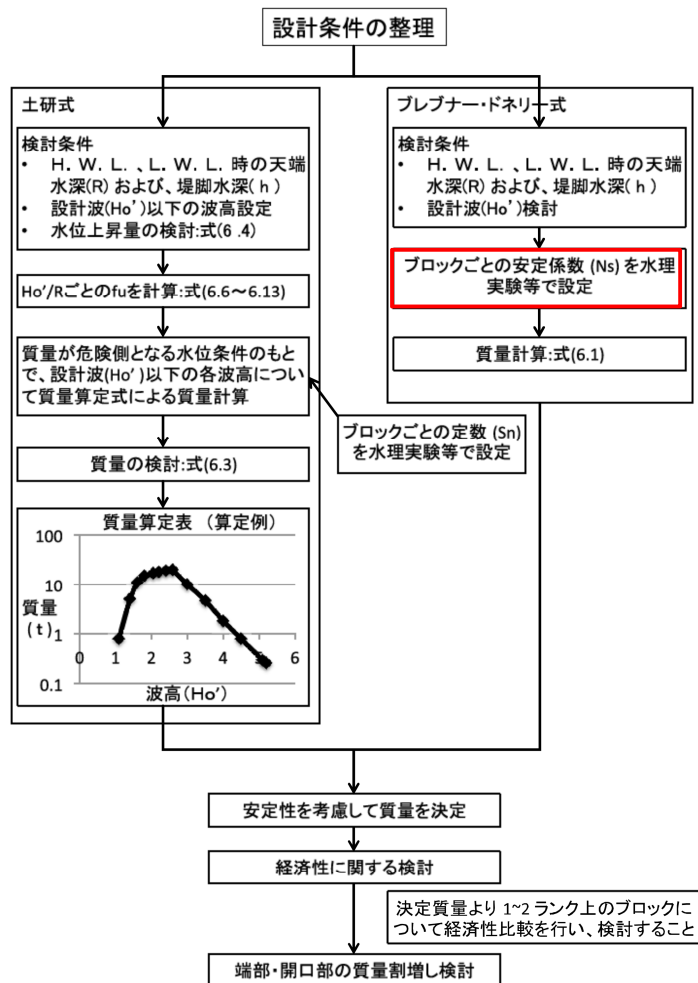


図-1.1 被覆材質量の検査フロー（人工リーフの設計の手引き（改訂版）， p.68）¹⁾

(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 ≤ 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。」²⁾ 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。」³⁾ 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、 ρ_s ：被覆材の密度、s：被覆材の水中質量 ($=(\rho_s - \rho_w) / \rho_w$)、 ϕ ：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), γ_r : 被覆材の単位体積重量 (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, γ_w : 海水の単位体積重量 (t/m^3), α : 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。」²⁾ 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。

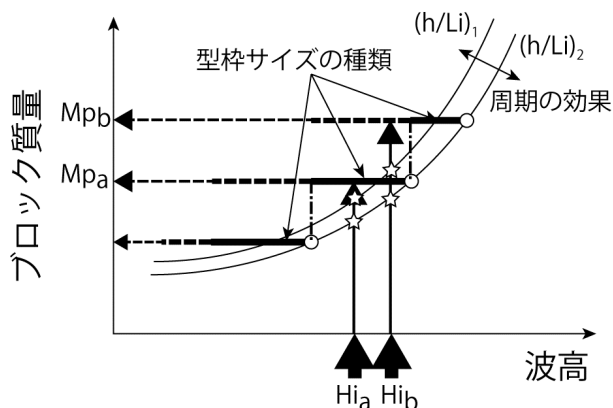


図-1.2 型枠サイズ選定のイメージ

(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。」²⁾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 $N_s^3 = K_D \cot \alpha$ としたことから、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⁴⁾(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⁵⁾。人工リーフ被覆材についても、竹田ら⁶⁾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。

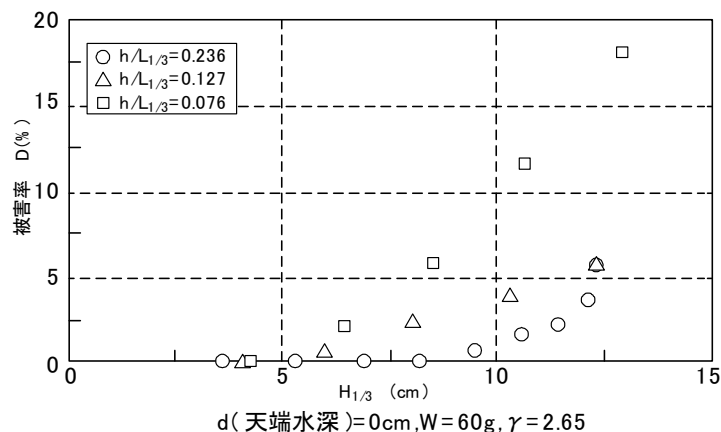


図-1.3 水深波長比 h/L_i の違いによる波高と被害率 D (%) との関係⁶⁾

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。

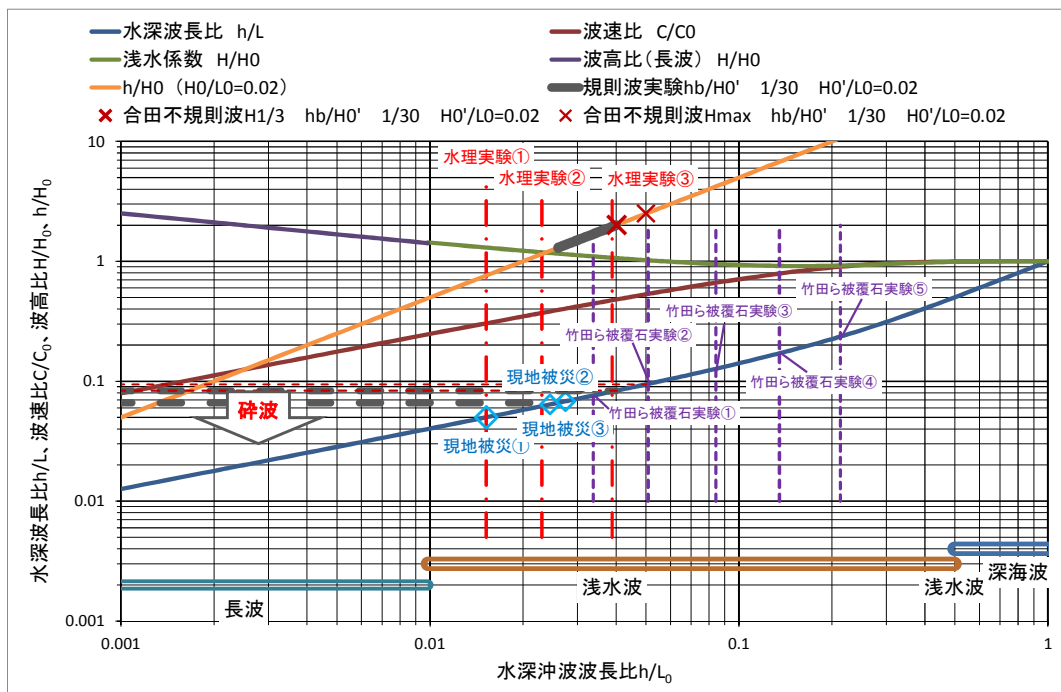


図-1.4 微小振幅波理論による水深波長比 h/L と碎波の関係

海底勾配 1/30；波形勾配 0.02 における砕波帯

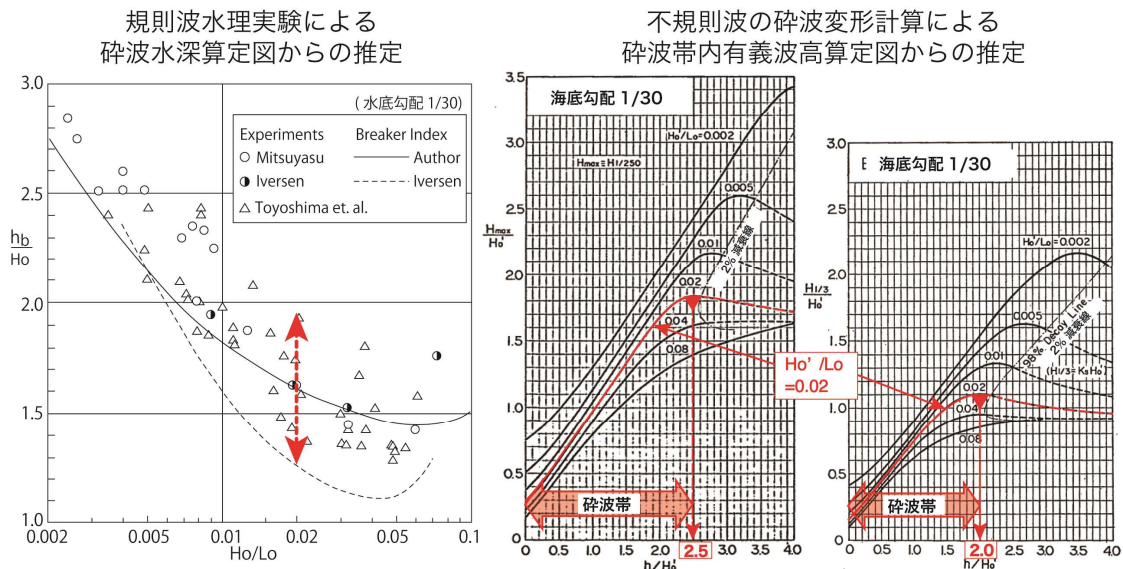


図-1.5 (左) 規則波水理実験の砕波水深⁷⁾、(右) 合田不規則波波高図から読み取った砕波水深⁸⁾

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）。

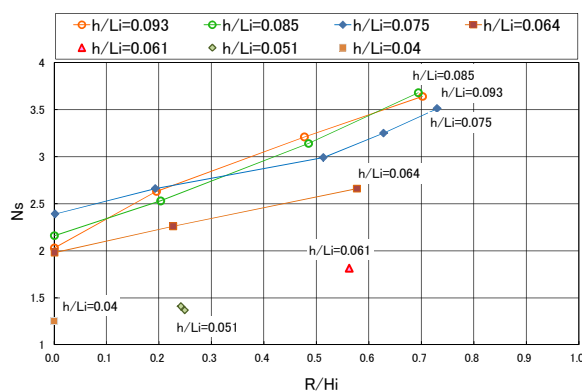


図-1.6 水深波長比 h/L_i の違いによる安定数 N_s と R/Hi との関係（ブロック A）

(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。

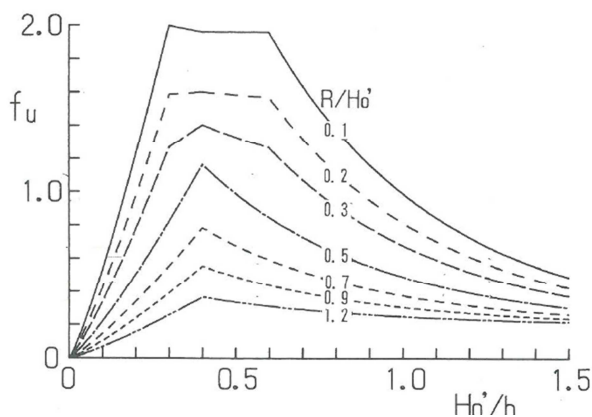


図-1.7 f_u と H_0'/h 、 R/H_0' の関係⁹⁾

ここでは、宇多ら¹⁰⁾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。

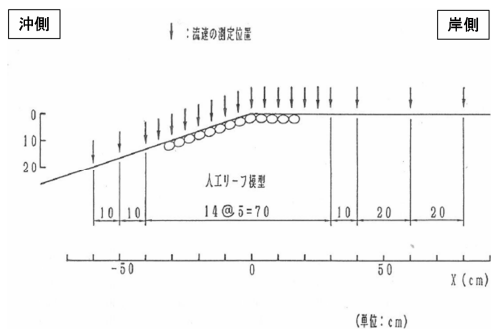


図-1.8 流速の測定位置 (規則波実験)

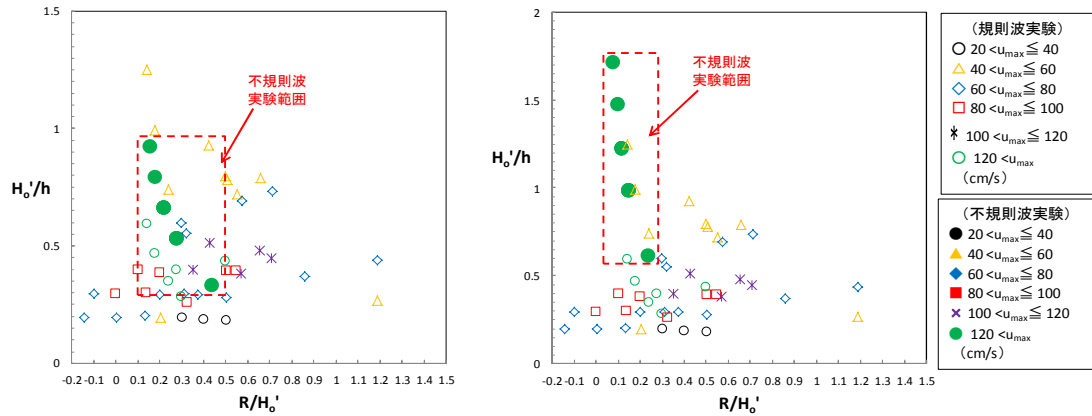


図-1.9 岸向き最大流速の発生状況

(不規則波実験結果で $H_0' = H_0' / 1/3$ 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。

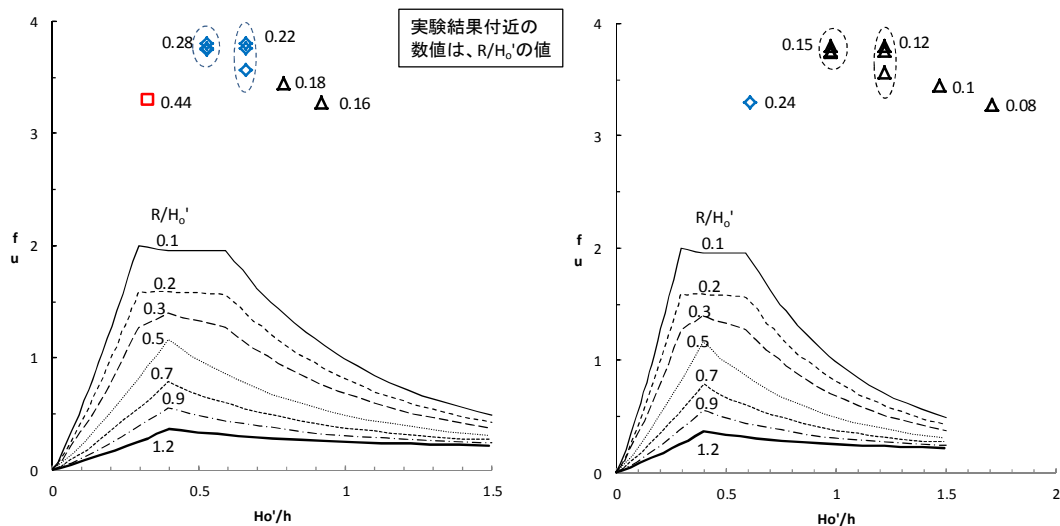


図-1.10 f_u と H_0'/h 、 R/H_0' の関係

(不規則波実験結果で $H_0' = H_0' / 1/3$ 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。

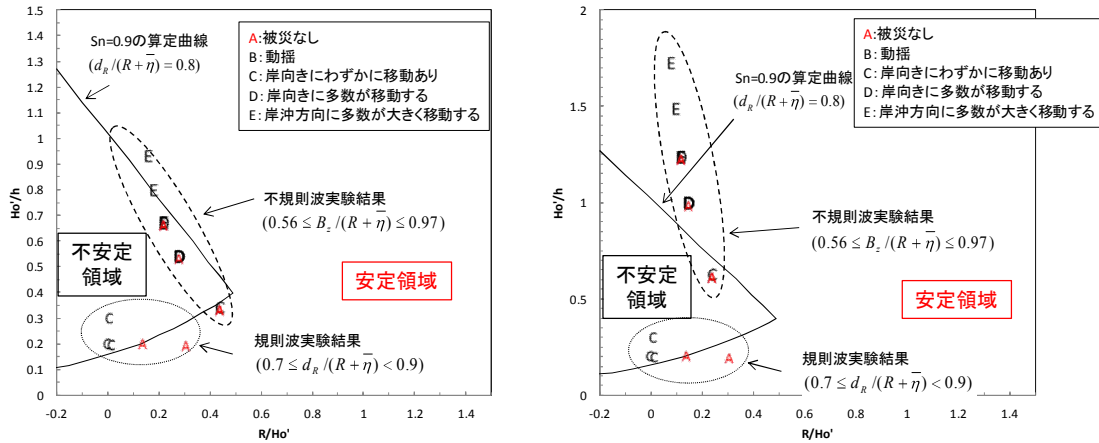


図-1.11 被災状況

(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）で示すように修正プ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。

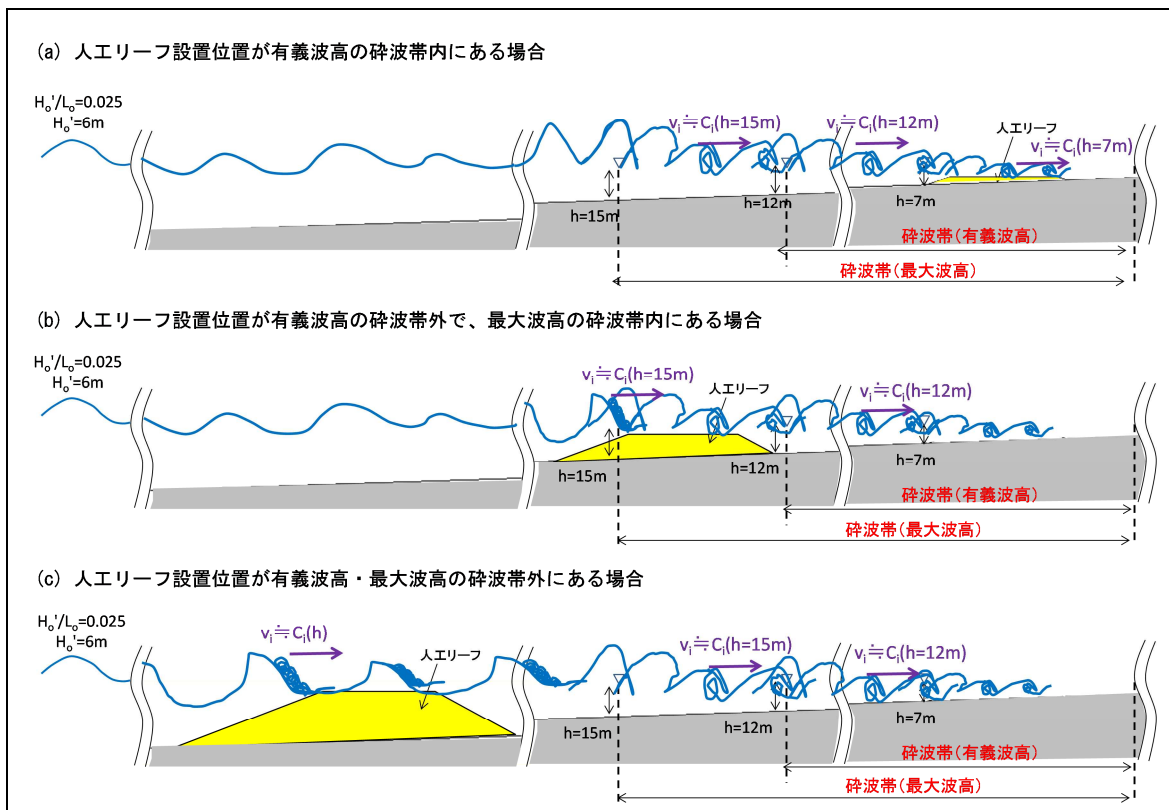


図-1.12 人工リーフと碎波帯の関係（設定条件： $H_0'=6m, T_0=12.4s, H_0'/L_0=0.025, R=3m$ ）

- 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との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。) ³⁾」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 ⁶⁾ 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。

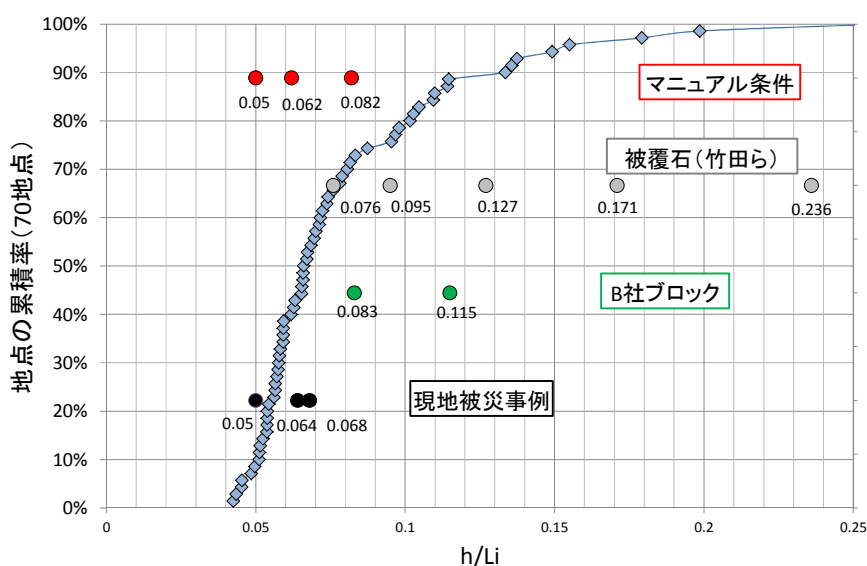


図-1.13 h/L_i の現場実績

(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⁵⁾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¹¹⁾。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¹²⁾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 ³

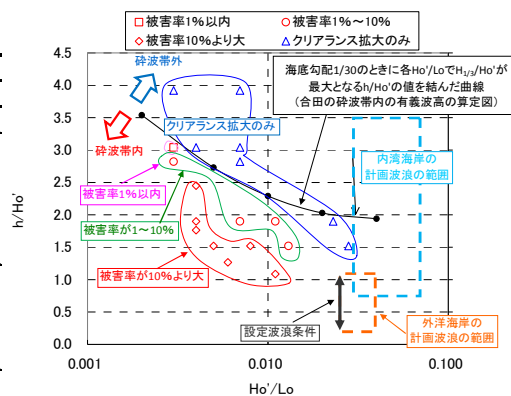


図-1.14 堤脚水深沖側有意波高比 h/H_0' と波形勾配 H_0'/L_0 による被覆ブロックの散乱状況の関係

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¹³⁾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 7m 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¹⁴⁾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。

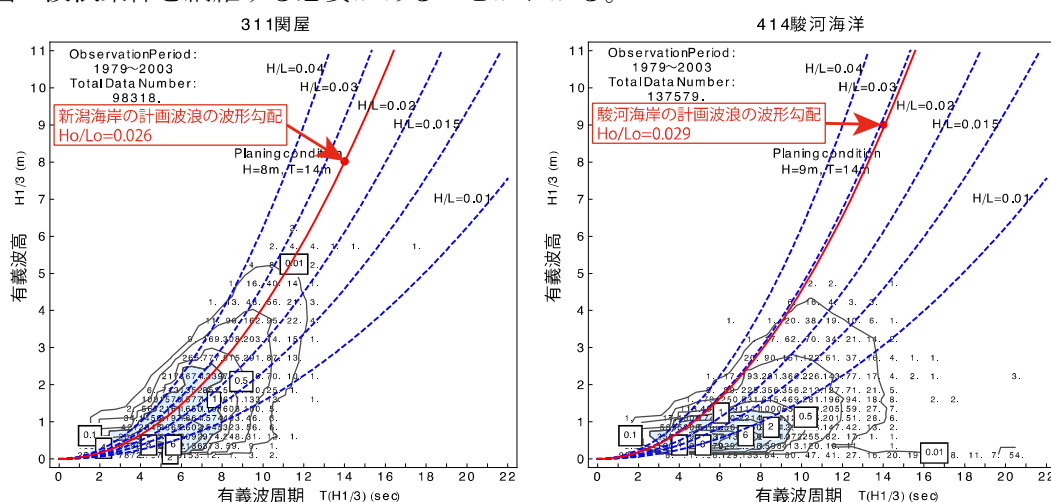


図-1.15 有義波の波高と周期の結合分布図(左：関屋観測所(新潟市)、右：駿河海洋観測所(大井川町))¹⁵⁾

(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¹⁴⁾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。^{例えば 15)}

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.

第2章 マニュアルの体系

2.1 マニュアルの構成

水理実験マニュアルの主要となる章は4つの章で構成されており、

- ・「水路（実験）と人工リーフの断面の設定方法」について示した3章
- ・「人工リーフ模型の材料や設」について示した4章
- ・「人工リーフ断面に作用させる実験条件」について示した5章
- ・ 「実験と結果の整理法」について示した6章

となっている。

解 説

・ 3章（水路（実験）断面の設定方法）

5.2（波高と周期）に示す波浪条件で、人工リーフ設置位置が砕波帯内となるよう、実験の断面（固定床の海底勾配）や人工リーフの断面（人工リーフ沖側法面勾配、天端幅、堤脚水深、天端水深）を設定している。

・ 4章（人工リーフ模型の設定方法）

人工リーフを構成するマウンド材、被覆ブロック等の設定方法を示している。被覆ブロック質量の種類は、現地換算でブロック質量を2種類以上実験することを標準としている。また、人工リーフの岸側から沖側への戻り流れによる被災にとって危険側となるよう、人工リーフ背後には沖側に還流させる設備を設けないこととしている。

・ 5章（波浪条件の設定方法）

人工リーフ模型に作用させる実験波は不規則波を用いることを標準としている。波高は現地の主な設置実績と砕波帯内の条件を満たしつつ、段階的に大きくしていき、累積で評価することを標準とし、周期は外洋海岸を対象として計画波浪を網羅するよう $T_0=10s, 13s, 16s$ の3種類を標準とする。波作用時間は、有義波周期の1000倍以上と設定している。

・ 6章（実験と結果の整理）

実験波造波試験と N_s 値評価実験の実験方法および結果の整理方法を示している。実験波造波試験では、水位測定と波高算定方法および換算沖波・堤前波の算定方法について示している。 N_s 値評価実験では、人工リーフの変状を観察・記録するために撮影方法、取得したデータの整理方法、安定数 (N_s) 評価のための被害基準、変状連鎖図の作成方法、 N_s 算定図の作成方法、人工リーフ性能（波高伝達率 K_t 、水位上昇量 η_t ）の整理方法について示している。

2.2 安定数 (Ns) の評価手順

人工リーフ被覆ブロックの安定数 N_s を評価する手順を図-2.1 に示す。各箱書き付近の【○. □】は関係する章節を示す。

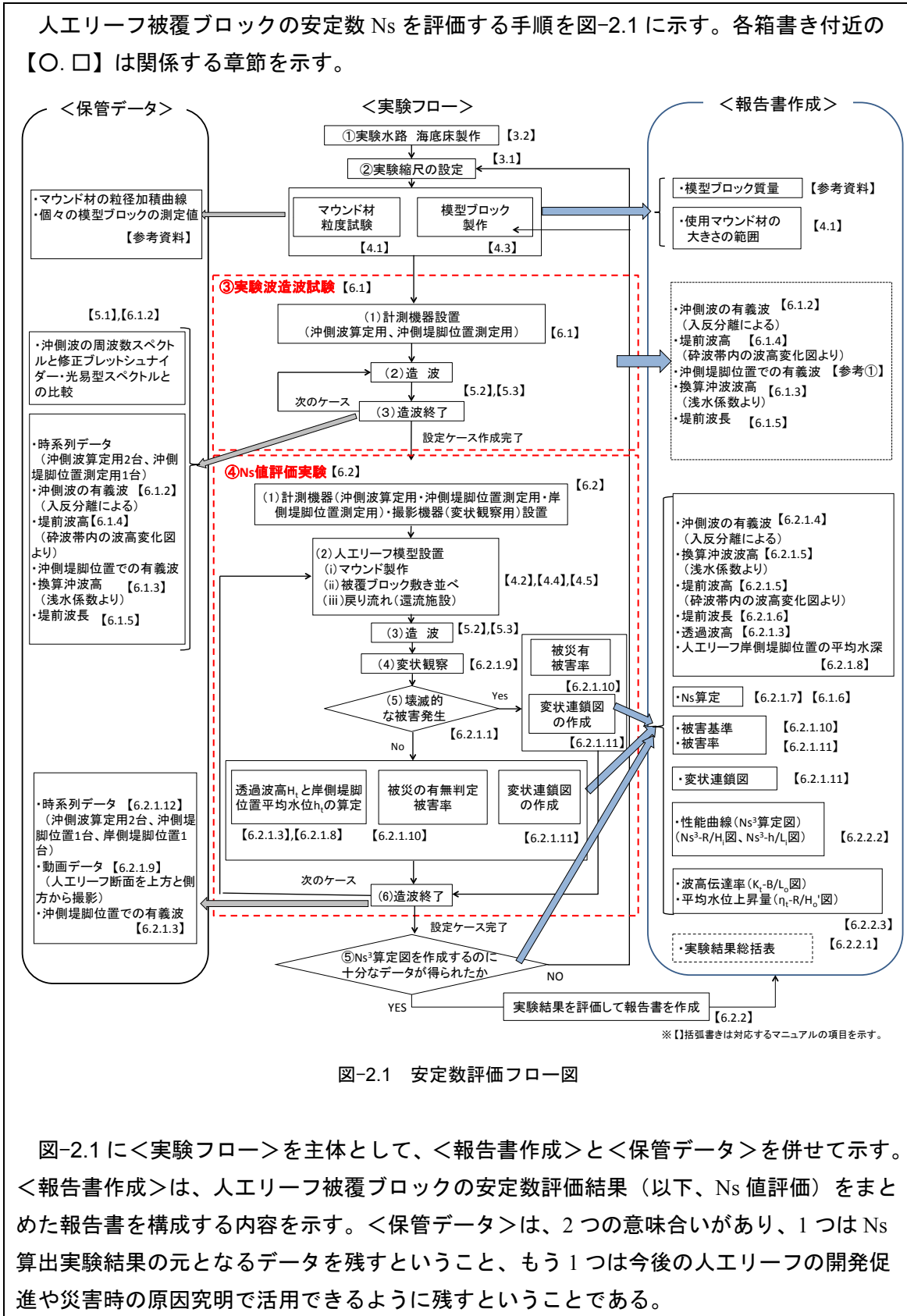


図-2.1 安定数評価フロー図

図-2.1に<実験フロー>を主体として、<報告書作成>と<保管データ>を併せて示す。<報告書作成>は、人工リーフ被覆ブロックの安定数評価結果(以下、 N_s 値評価)をまとめた報告書を構成する内容を示す。<保管データ>は、2つの意味合いがあり、1つは N_s 算出実験結果の元となるデータを残すということ、もう1つは今後の人工リーフの開発促進や災害時の原因究明で活用できるように残すということである。

解 説

以下に、図-2.1 の〈実験フロー〉の各箱書きについて説明を記す。

- ① 実験水路内に海底床（固定床）を製作する。
- ② 実験施設の造波性能を考慮して実験縮尺を設定する。
 - ・ 模型ブロックを製作する。
 - ・ 使用する石についてふるい分けを実施してマウンド材の大きさを管理する。
- ③ 実験波造波試験
堤体が無い状態で造波し、沖側波の測定を行い、本マニュアルで設定した実験波を作成する。
 - (1) 沖側波を算定するため波高計 2 台を設置し、その水位データを用いて入射波の分離を行って、その入射波の波高と周期で実験波を管理する。また、人工リーフ沖側堤脚位置に波高計 1 台を設置し、その水位データを用いて有義波を算定する。
 - (2),(3) 実験波は不規則波を用い、目標とする理論スペクトルは修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルを標準とする。
- ④ N_s 値評価実験
堤体を設置して造波し、人工リーフの変状を観察して、変状連鎖図を作成する。実験波を作用させ、堤体に壊滅的な被害が無い場合には、人工リーフ岸側堤脚位置での水位の測定を継続し、透過波高 H_t と人工リーフ岸側堤脚位置の平均水位 \bar{h}_t を算定する。
 - (1) 波高計は沖側波算定用に 2 台、人工リーフ沖側堤脚位置に 1 台、人工リーフ岸側堤脚位置に 1 台で、合計 4 台設置する。撮影機器は堤体の変状を観察・記録するために、堤体の上方と側方から撮影できるようビデオカメラを設置する。
 - (2) 人工リーフ模型の設置を行う。
 - (i) マウンドを製作する。
 - (ii) 被覆ブロック同士のクリアランスを設定し、マウンドに敷き並べする。
 - (iii) 人工リーフの岸側から沖側への還流設備は設けない
 - (3) ③（実験波造波試験）で作成した実験波を人工リーフ模型に作用させる。
 - (4) 人工リーフの変状を観察する。
 - (5) 人工リーフに壊滅的な被害が発生した場合は、実験波を全て作用させずに途中でも造波を終了させ、変状連鎖図を作成する。壊滅的な被害が無い場合は、実験波を全て作用させ、変状連鎖図の作成、および透過波高 H_t と人工リーフ岸側堤脚位置の平均水位 \bar{h}_t を算定する。
 - (6) 実験波を作用させ終わったら、次の実験波のケースを作用させる。
- ⑤ 実験を終えたケースの被害と無被害の分布の結果から、 N_s^3 算定図の作成に十分なデータが得られていない場合には、実験縮尺を変えて実験する等を行う。
- ⑥ 実験結果を評価して、 N_s^3 算定図を作成し報告書として取りまとめる。

第3章 水路（実験）断面の設定方法

実験水路内には、造波板から水平床を設置し、途中より一様な海底勾配の地形とする。そこに現地で実績の多い断面形状の人工リーフ模型を設置して、水理模型実験を実施する。図-3.1 に実験断面のイメージを示す。ここでは実験断面の諸元は海底勾配 ($\tan\theta$) のみ示しており、人工リーフ断面の諸元は 3.3（人工リーフ断面）に示す。

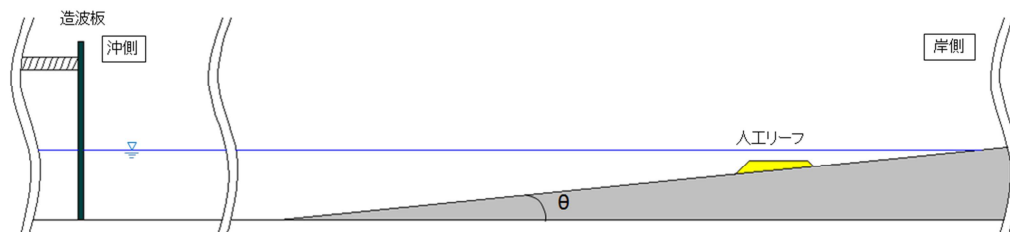
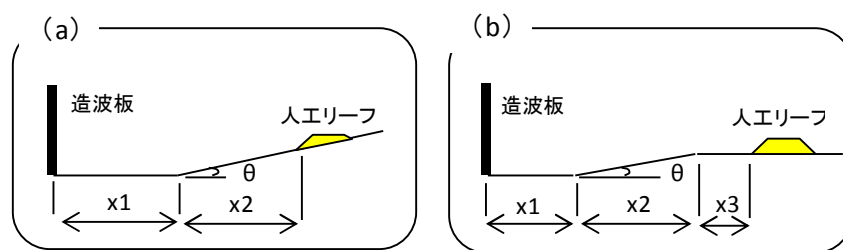


図-3.1 実験断面のイメージ

解説

実験実態調査では、図-3.2 で示すように実験水路内に造波板から水平床を設置して、勾配が $\tan\theta$ の斜面を水路岸側端部まで延ばす(a)と斜面に続く浅海平坦面を有する(b)の2つの地形で実験されている。



(a)の地形は22種

(b)の地形は3種
それぞれ $\tan\theta=1/6、1/7、1/30$

図-3.2 実験で使用されている海底地形（データ数 25）

3.1 実験縮尺

実験施設の造波性能のもとで、5.2（波高と周期）に示す沖波と周期に対して造波可能な波高から実験縮尺を考慮し、可能な限り大きな縮尺を設定する。

解説

波浪による被覆材の安定性についての水理模型実験にはフルードの相似則を用いる。あまり小さな縮尺模型を使うと水の粘性や表面張力の影響が表れて実際現象との相似性を保てなくなる等から、実験縮尺はできるだけ大きなほうが精度の良い実験結果が得られる¹⁾。このことから防波堤の安定性や護岸の越波実験などは実験縮尺 1/10～1/50 が多い。

被覆ブロックの安定性に関する水理模型実験については、水の粘性や表面張力の影響が出にくくなるよう縮尺 1/50 よりも大きい縮尺とすることが望ましい。一方で、本マニュアル

ルでは5.2（波高と周期）に沖波の周期を規定しているので、それらの各周期において造波可能な最大波高が得られる。その際に、実験施設の造波性能によっては1/50より大きい実験縮尺とすることは難しい場合も出てくる可能性がある。その場合には、実験縮尺は施設の能力を考慮して可能な限り大きいものを設定する。

3. 2 海底勾配

海底勾配 $\tan\theta$ は、一様勾配で 1/30 を標準とする。

解 説

海底地形は固定床として、図-3.1 のような地形とする。また、作用させる沖波外力の最大波高が、沖側の水平部で碎波しないように沖側水平部の水深を碎波水深以上とする。

現地の海底勾配は一様の 1/30 勾配ではないが、被覆ブロックの波浪安定性能を統一された条件で実験できるよう $\tan\theta=1/30$ を標準値として設定している。

実験で確認した安定性能は、海底勾配が 1/30 より緩勾配の海岸ではそのまま用いることは可能である。しかし、海底勾配が 1/30 より急勾配の海岸や人工リーフ設置位置で非一様勾配やバートラフ地形の影響で高流速が発生することが明らかな場所で一様海底勾配 1/30 で得られた結果をそのまま用いると被災する可能性があることに注意する。このような海底地形の場合には、ブロック質量の割り増しの考え方を示すことや個別に現地の性能値を実験で確認すること等が必要となる。

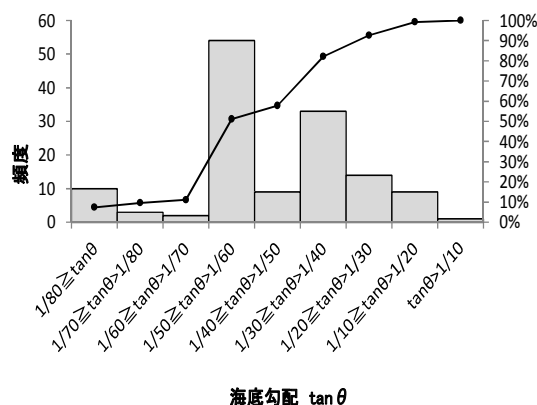


図-3.3 全国実態調査による海底勾配 $\tan\theta$ の頻度分布 (データ数 135)

(1) 現地海岸の海底勾配

全国設置実績実態調査では、図-3.3 で示すように勾配が 1/30~1/60 の海底模型に設置されているケースが多く、全体の約 82%であった。

図-3.4 に主要海岸の海底勾配²⁾に海底勾配 1/30 の線を加えたものを示す。太平洋沿岸では、常磐沿岸（浪江）・鹿島灘（鹿島港）・九十九里沿岸・有明海は海底勾配 1/30 と同程度かそれより緩勾配の海底地形であり、海底勾配 1/30 でカバーできている。一方、相模湾（二宮）・駿河湾（田子の浦）・駿河海岸（大井川河口）・遠州灘（天竜川河口）・土佐湾（物部川河口）は、海底勾配 1/30 より急な勾配の海底地形である。相模湾・駿河湾では、急勾配の海底地形のため、人工リーフの設置には向かない。

日本海沿岸では、離岸距離が 100m 以上、高波浪時の堤脚水深 6m に相当する T.P-5~6m 以深は、富山県下新川海岸（田中）を除いた海岸で海底勾配 1/30 より緩勾配の海底地形で

ある。これらの海岸では、本マニュアルで標準としている海底勾配 1/30 の水理模型実験で計画波浪規模の高波浪の影響についてはカバーできていると考えられる。

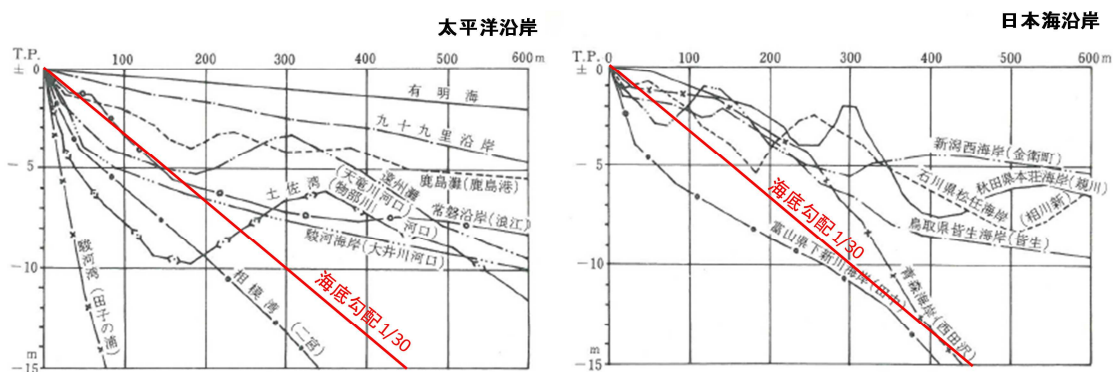


図-3.4 主要海岸の海底勾配²⁾

(2) 海底勾配 1/30 の実験での砕波現象

国総研では、海底勾配が 1/30 の条件で実験を実施した³⁾。写真-3.1 に示すように人工リーフ模型に砕波が直接作用する状況に加え、砕波のボアが作用する状況もあり、砕波形態がさまざまであった。海底勾配 1/30 は、ブロックの性能を見るのに適した標準的な条件であると言える。

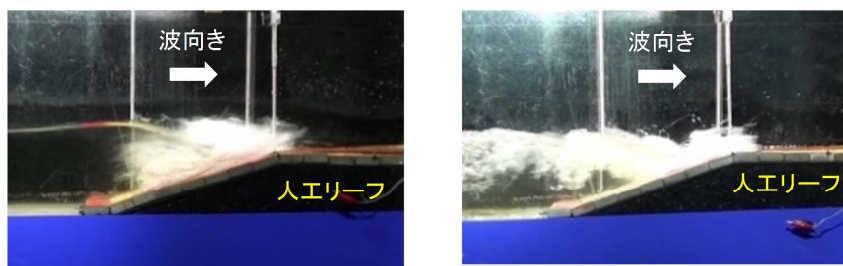


写真-3.1 人工リーフ上での砕波状況例（左写真：砕波が直接作用、右写真：砕波のボアが作用）

3. 3 人工リーフ断面

現地で実績の多い人工リーフの断面を標準的な断面形状とみなして、水理模型実験を行う。図-3.5に、人工リーフ断面形状の諸元の定義とマニュアルで設定している範囲を示す。諸元は、人工リーフの沖側法面勾配 ($\tan\alpha$)、天端幅 (B)、堤脚水深 (h)、天端水深 (R) である。

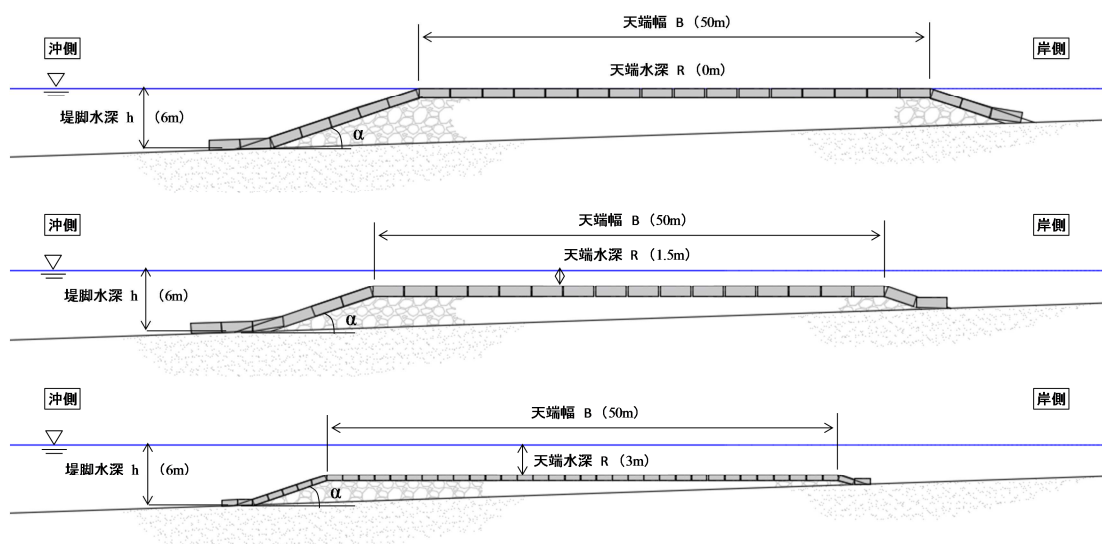


図-3.5 人工リーフの断面形状

3. 3. 1 人工リーフ法面勾配

人工リーフ沖側法面勾配 $\tan\alpha$ は $1/3$ を標準とする。

解説

全国実態調査では、図-3.6で示すように $\tan\alpha = 1/3$ が全体の約86%を占める。

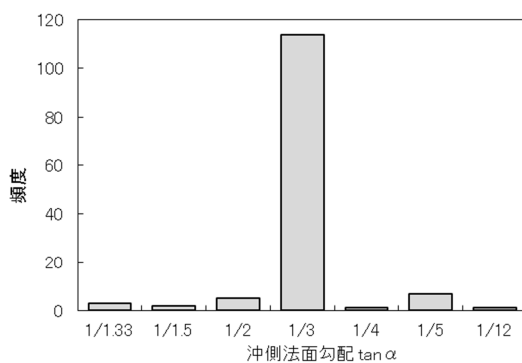


図-3.6 全国実態調査による沖側法面勾配 $\tan\alpha$ の頻度分布 (データ数 133)

3. 3. 2 天端幅

天端幅 B は、現地量で B=50m を標準とする。

解 説

全国実態調査では、図-3.7 に示すように、 $20\text{m} < B \leq 50\text{m}$ までで全体の 63% を占めている。天端幅 20m よりも 50m の方が多様な碎波現象が生じると考え、50m を標準の条件とする。

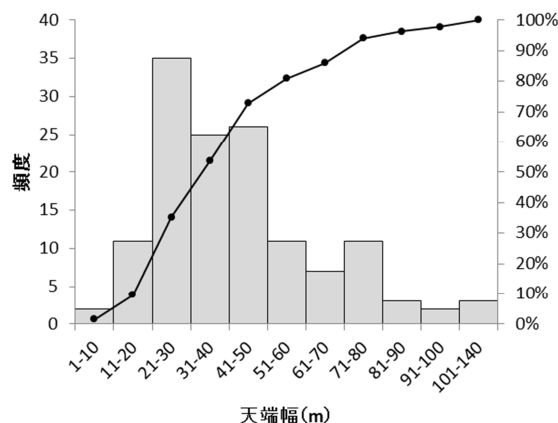


図-3.7 全国実態調査による天端幅 B の頻度分布（データ数 136）

3. 4 堤脚水深・天端水深

3. 4. 1 堤脚水深

堤脚水深 h は、現地量で 6m を標準とする。

解 説

(1) 現地の堤脚水深実績

全国実態調査では、図-3.8 で示すように現地実績は $4\text{m} < h \leq 7\text{m}$ に全体の約 78% が含まれ、 $h=6\text{m}$ が最も頻度が高い。

(2) 実験の堤脚水深

実験実態調査では、図-3.9 で示すように $4\text{m} < h \leq 7\text{m}$ を赤線で囲っているが、ブロック 24 種で $h=7\text{m}$ より大きい堤脚水深で実験を実施している。この意図としては、現地で多い設置状況と同様の実験条件とすると、波が人工リーフより沖側で碎波してしまう。そのため実験ではあらかじめ堤脚水深を大きく法高の高い人工リーフとし、人工リーフ上で碎波させることで、ブロックの被災限界波高を見つけている。しかし、被覆ブロックの移動限界や変状連鎖をみるにあたって、碎波帯内である現地設置条件とかけ離れた深い堤脚水深の条件で波浪安定性能を評価することは、現場の現象を再現出来ていないので、堤脚水深は碎波帯内である現地設置条件に則したものを標準とする。

(3) 堤脚水深の設定

堤脚水深 h の標準設定の考え方は以下の通りである。既往の知見⁴⁾より、 h/L_i (堤脚水深と堤前波長の比) が安定性能を評価する上で無視できないことがわかっているため、現地の条件を網羅したものとする必要がある。

全国実態調査の結果である図-3.8より、頻度が最も多い堤脚水深 $h=6\text{m}$ を標準の実験条件として考えた。周期については、5.2 (波高と周期) より外洋海岸の計画波浪条件を網羅すると考えられる $T_0=10\text{s}, 13\text{s}, 16\text{s}$ の3種類を標準としているので、 $h/L_i=0.05, 0.062, 0.082$ となる。これは、図-3.10で現地実績の約80%が含まれている $0.05 \leq h/L_i \leq 0.1$ を網羅できる。

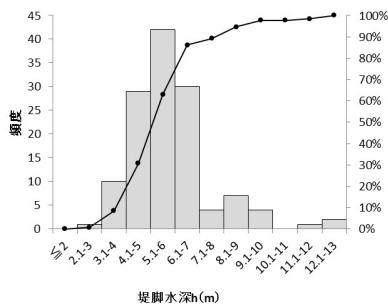


図-3.8 全国実態調査による堤脚水深 h の範囲 (データ数 130)

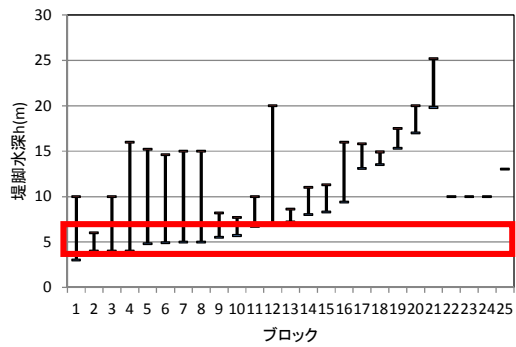


図-3.9 実験実態調査による各ブロックの堤脚水深 h の範囲 (データ数 25)

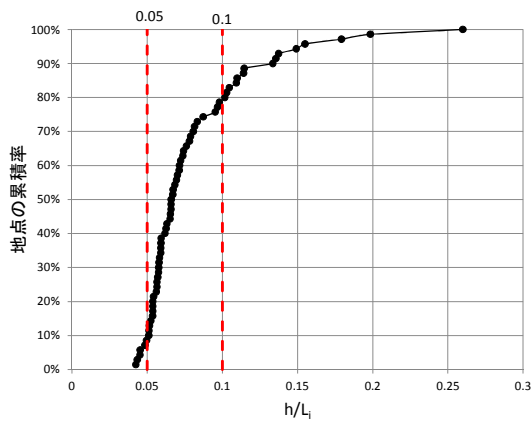


図-3.10 全国実態調査による堤脚水深 h/L_i の範囲 (データ数 70)

3. 4. 2 天端水深

天端水深 R は、図-3.11 に示す全国実態調査結果より現地実績の範囲から現地量で $R=0\text{m}, 1.5\text{m}, 3\text{m}$ の 3 種類を標準とする。ただし、 $T_0=16\text{s}$ のときは $R=0\text{m}, 1\text{m}, 2\text{m}$ の 3 種類を標準とする。

解 説

(1) 現地の天端水深実績

全国実態調査では、図-3.11 に示すように天端水深 R は $0\text{m} < R \leq 3\text{m}$ に全体の約 93% が含まれている。また、図-3.12 に示すように天端水深堤前波高比 R/H_i は $0 \leq R/H_i \leq 0.6$ に全体の約 85% が含まれている。

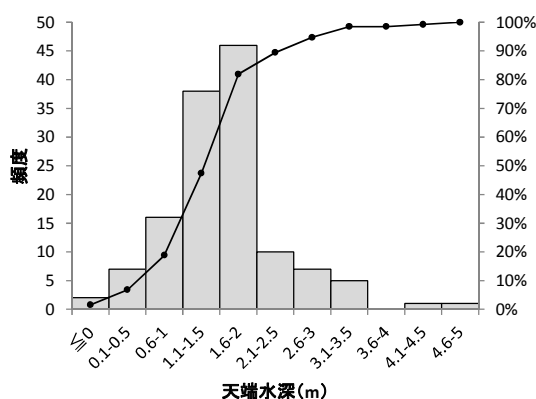


図-3.11 全国実態調査による天端水深 R の
頻度分布 (データ数 133)

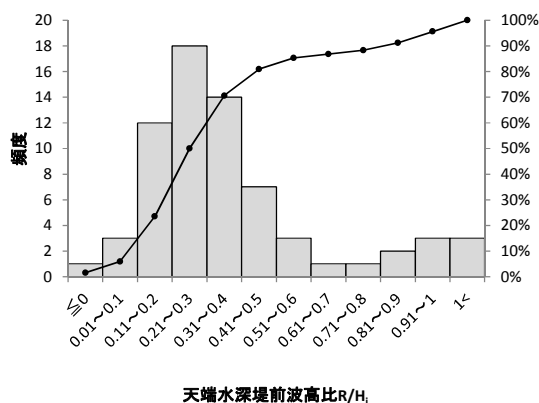


図-3.12 全国実態調査による天端水深堤前波
高比 R/H_i の頻度分布 (データ数 68)

(2) 実験の天端水深

現場実績において、 $R=0\text{m}$ としている事例は少なかったが、波と流れの現象としては天端ブロックが露出状態から急激に水中に没する条件であり、大きな揚圧力が加わる厳しい条件となりブロックが飛散する可能性があるのでケースに加えた。また、国総研の実験³⁾より、天端水深の影響で被覆ブロックの散乱メカニズムが異なることがわかった。天端水深のケースは現地量で $R=0.5\text{m}, 1\text{m}, 3\text{m}$ で実施しており、被災の拡大過程はどの天端水深でも沖側天端法肩位置の被覆ブロックが散乱することで連鎖的に被災する傾向であったが、写真-3.2に示すように $R=3\text{m}$ では天端上の巻波砕波により天端中央付近の被覆ブロックが散乱して連鎖的に被災していくケースもみられた。

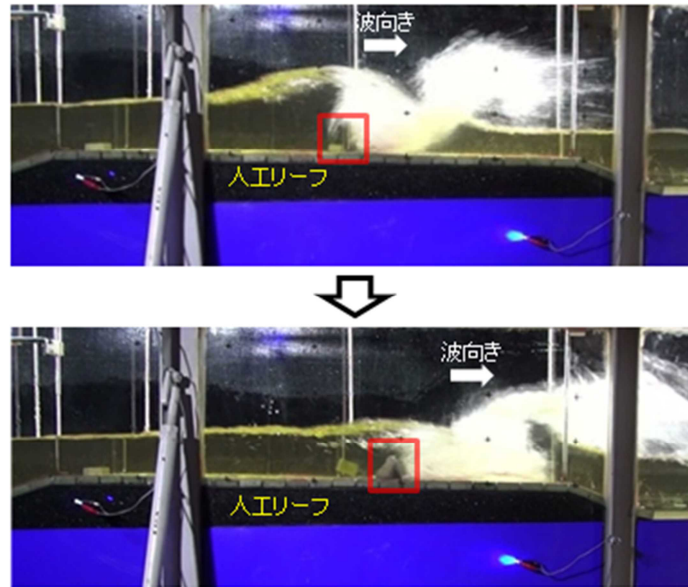


写真-3.2 人工リーフ天端上での被覆ブロックの被災例（赤枠：被災箇所）

（3）天端水深の設定

天端水深 R の標準設定の考え方は、以下の通りである。安定数 N_s の算定に必要な N_s 算定図 (N_s - R/H_i 図) の表示を統一するために、 R/H_i の標準範囲を決める必要がある。なお、 N_s 算定図の作成方法については、6.2.2.2 (性能曲線 (N_s 算定図) の作成) に示している。

$R \leq 3\text{m}$ とすれば、図-3.11 の天端水深の実績から 9 割以上をカバーでき、かつ写真 3-2 に示すような天端上での被災も含めることができる。天端水深 $R=0\text{m}$ については、被覆ブロックにとって最も厳しい条件と考えられることや近年の被災の動向を踏まえて、標準値に加える。堤脚水深 $h=6\text{m}$ 地点の H_i はせいぜい 9m と考えられるので、 R/H_i は、図-3.12 に示す全国実態調査結果において 85% を占める $0 \leq R/H_i \leq 0.6$ を網羅できる。 $T_0=16\text{s}$ のときは、 $R=3\text{m}$ とすると人工リーフ断面を確保しにくくなるので $R=2\text{m}$ としている。

3.5 還流施設（戻り流れ）

人工リーフ背後には沖側に還流させる設備は設けず、人工リーフ上またはマウンド内からのみ通水する条件とする。

解説

人工リーフの実験を造波水路で実施すると人工リーフ背後において側方（沿岸方向）への水の流出が遮られるため、水位が上昇する。この水位上昇を制御するために図-3.13 のようにパイプ等により環流施設を設ける場合がある。しかし、本マニュアルでは、還流施設を設けない条件を標準とした。これは、手引き（改訂版）で示された性能と比較のために実験条件を揃え、設備が複雑となることによる実験条件のばらつきを防ぎ、および、人工リーフの性能を左右する要素の 1 つである水位上昇量について悪条件を基本とするため

ある。また、人工リーフ上の岸側から沖側への戻り流れによる沖側への散乱にとって危険側となるようにする意図もある。なお、ブロックの岸側への散乱にとっては水位上昇が小さい方が、波力が大きくなり危険側となるとも考えられるので実験結果の解釈にあたっては注意が必要である。

図-3.14 は還流のあり・なしの条件での水位上昇について実験を行った結果である。還流がある場合には、ない場合よりも水位上昇量は小さく、その減少割合は天端水深が小さいほど大きい。

図-3.15 は人工リーフの岸側からの戻り流れがある場合とない場合についての水位と波高の岸沖分布に関する実験結果である。戻り流れを許すと、平均水位の上昇は約 1/2 になる。波高についてはほとんど変化しないことがわかる。

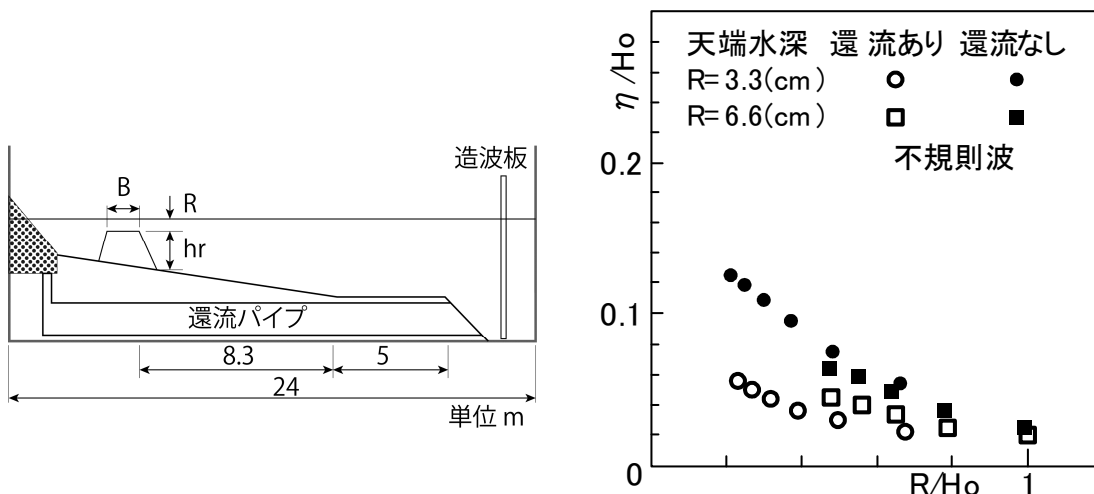


図-3.13 人工リーフ背後から還流させる実験例²⁾

図-3.14 平均水位上昇量 (山下ら, 1995)³⁾

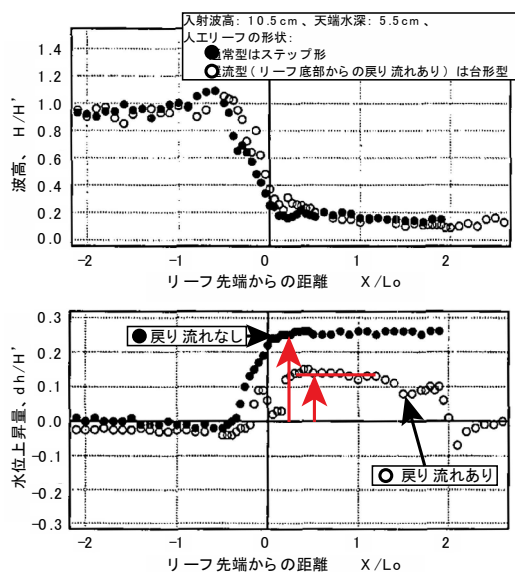


図-3.15 波高分布と水位分布 (仲座ら, 1995)²⁾

参考文献

- 1) 合田良実 (2008) : 「耐波工学-港湾・海岸構造物の耐波設計」, p193.
- 2) 社団法人全国海岸協会、監修国土交通省河川局海岸室 (2002) : 「海岸便覧 (2002 年版)」, p403.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 山下俊彦・平野明德・小野敏行・佐伯浩 (1995) : 人工リーフの水理特性とブロックの安定への還流の効果に関する実験的研究、海岸工学論文集、第 42 巻、pp.766-770.
- 6) 仲座栄三・津嘉山正光・川中匠・玉城重則・大城真一 (1997) : 潜堤背後の水位上昇量と海浜流の制御に関する研究、海岸工学論文集、第 44 巻、pp.756-760.

第4章 人工リーフ模型の設定方法

4.1 マウンド材

マウンド材は、石を用いることとする。マウンド材の大きさは、現地量で 10～500kg/個に相当するものを使用することを標準とする。

使用する石についてふるい分け試験を実施して粒径加積曲線を作成する。石のふるい分け試験では、全部通過するふるいと全部残留するふるいの間に 1 つ以上ふるいの種類があることが望ましい。なお、粒径加積曲線は報告書に表示する必要はないが、データとして保管しておくこととする。

解 説

(1) マウンド材の設定

マウンド材の標準を設定することで、実験方法の統一を図ることが目的の 1 つであり、現地で使用されている粒径範囲を含めることにより、ブロック孔やブロック同士の目地より小さな粒径のものが抜け出すかどうかを確認する目的もある。

(2) マウンド材の大きさ

「人工リーフの設計の手引き」¹⁾を参考として、マウンド材の大きさは 10～500kg/個に相当とするものを標準とした。石を球形状と考えて単位体積重量を 2.7g/cm^3 で計算すると、粒径は現地量で約 192mm～708mm、実験縮尺を 1/50 とした場合は粒径が約 3～14mm 程度の石となる。

マウンド材の粒径の目安を設定したことで、人工リーフ堤体マウンドの透水性が高いことにより前章「3.5 還流施設（戻り流れ）」で示した戻り流れによる効果が実験毎に異なることを最小限に抑える。

(3) 粒径加積曲線例

図-4.1 は、国総研で実験用マウンド材とした市販の単粒度碎石 7 号の粒径加積曲線と 10～500kg/個の範囲の粒径を比較した例である。縦軸は通過質量百分率(%)、第 1 横軸は縮尺を 1/50 とした場合の模型量の粒径(mm)、第 2 横軸は現地換算量の粒径(m)としている。図-4.1 は、ふるいの目の都合上粒径加積曲線が 10～500kg/個の範囲を粒径が小さい方にならされているが、ブロック孔やブロック同士の目地より石の抜け出しが発生しやすい悪条件であるので安定性を見る実験としては問題ない。

(4) マウンド材の抜け出し・流出による影響

人工リーフは被覆ブロックのみで構成されるのではなく、マウンドとの複合体である。マウンド内に及ぼす水理現象により細粒分が流出することで、マウンド内に局部的に空洞が生じるとブロックに作用する流体力の増大を助長する不陸の発生につながる懸念がある。

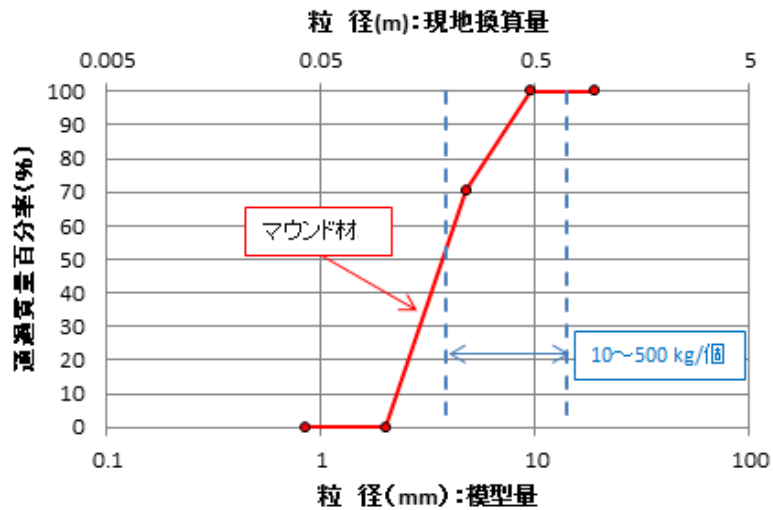


図-4.1 現地量に換算した粒径におけるマウンド材の粒径加積曲線
 (実験縮尺 $S=1/50$ 、使用したふるい : 19mm,9.5mm,4.75mm,2mm,0.85mm)

4. 2 被覆ブロックの配置とクリアランス

被覆ブロックのクリアランスは、そのブロックの形状に対して現場の施工で必要となる大きさ以上となるように設置する。

解説

被覆ブロックのクリアランスは、施工性（吊り具の装着等）により決まるものである。実験においてはブロック同士の摩擦が過大に作用することがあり、そのために散乱が生じにくくなることがある。これを避けるためブロック同士が完全に接しないように留意する必要がある。

4. 3 ブロック質量の種類

被覆ブロックの所要質量算定式であるブレブナー・ドネリー式の安定数 N_s の算定図上の N_s 算定線を引くためには、被災限界を確認できる十分な実験結果が必要となり、現地で被災しないブロック質量を示すことが重要である。

また、 N_s の信頼性向上を図る意味合いでスケール効果をみるが、現地換算量を変えたものでブロック質量を2種類以上実験する等の方法が考えられる。

解説

実験実態調査によると、実験に用いられたブロック模型の質量は 10g~300g の範囲に含まれていた。ブロック模型 11 種類が 50g 以下、ブロック模型 17 種類が 100g 以下のブロック質量で実施されていた。

4. 4 人工リーフ模型の製作上の留意点

マウンドとブロック配列は初期状態がケースごとに均一となるようにすることを標準とする。

水路側壁沿いの被覆ブロックは側壁の影響によりブロックが散乱しやすいので、両側の側壁沿い1列分を固定する。

解 説

1 ケースごとに人工リーフ断面を作り直すかどうかの判断材料として、マウンド材の抜け出しの有無を確認することがある。各実験ケース終了後に変状が認められない場合は、そのまま次の実験ケースを実施してもよい。

側壁沿い1列分のブロック固定は、比重の大きいブロックを製作して並べる方法等が考えられる。

補足②：模型ブロックの比重・密度・質量

報告書には安定数 N_s を算定するときに使用する模型ブロック質量を記載し、個々の模型ブロックの測定結果は記載する必要はないが、データを保管しておくこととする。

(1) モルタル製模型ブロックの密度算定方法

以下に参考として、モルタル製模型ブロックの密度算定方法を2種類示す。

<方法1>

- ① 模型ブロック脱型後、気中にて養生を行う。
- ② 水中にて24時間吸水させる。
- ③ 模型を水中より取り出し、吸水性の布を使用して目視で確認できる水膜を拭い去り、表乾状態（表面乾燥飽水状態）とする。
- ④ 模型の質量 m_1 を0.1gの桁まで測定する。
- ⑤ 図-4.2に示すように模型を金網かごに入れ、水中で模型が入った状態で金網かごの見かけ質量 m_2 を0.1gの桁まで測定する。
- ⑥ 金網かごの水中における見かけ質量 m_3 を0.1gの桁まで測定する。
- ⑦ 下記に示す(a)式により、模型ブロック密度 ρ_r (=表乾密度 D_s) を算定する。

$$D_s = \frac{m_1}{\left[\frac{m_1 - (m_2 - m_3)}{\rho_w} \right]} = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_1 - m_2 + m_3} \dots (a)$$

ここに、 D_s ：表乾密度 (g/cm³)

m_1 ：表乾状態における模型質量 (g)

m_2 ：模型と金網かごの水中の見掛け質量 (g)

m_3 : 金網かごの水中の見掛け質量 (g)

ρ_w : 水の密度 (g/cm^3) ($\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$) とする。

<方法 2>

①～④は<方法 1>と同様。

⑤ 図-4.3 に示すように模型を金網かごに入れ、水中に金網かごと模型が入った状態で質量 m_2 を 0.1g の桁まで測定する。

⑥ 水中に金網かごが入った状態で質量 m_3 を 0.1g の桁まで測定する。

⑦ 下記に示す(b)式により、模型ブロック密度 ρ_r (=表乾密度 D_s) を算定する。

$$D_s = \frac{m_1}{\left[\frac{m_2 - m_3}{\rho_w} \right]} = \frac{m_1 \times \rho_w}{m_2 - m_3} \dots (b)$$

ここに、 D_s : 表乾密度 (g/cm^3)

m_1 : 表乾状態における模型質量 (g)

m_2 : 模型と金網かごが水中にあるときの見掛け質量 (g)

m_3 : 金網かごが水中にあるときの見掛け質量 (g)

ρ_w : 水の密度 (g/cm^3) ($\rho_w = 1.0\text{g/cm}^3$) とする。

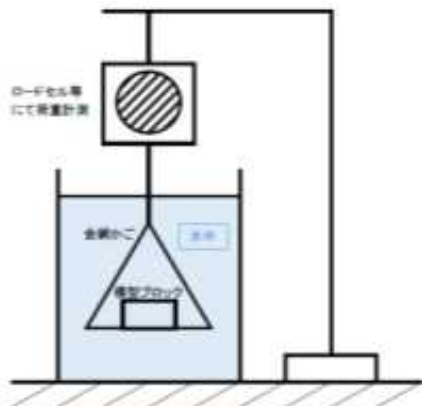


図-4.2 金網かごと模型ブロックの測定
イメージ



図-4.3 金網かごと模型ブロックの測定
イメージ

(2) 安定数 N_s を算定するときに使用する模型の質量と密度の算定方法

以下に参考として、ブレブナー・ドネリー式の安定数 N_s を算定するときに、使用する模型の質量と密度の算定方法例を示す。

- ① 水理模型実験で使用する模型全数について、模型の質量と密度を測定・算定する。
- ② 模型の質量と密度ともに、模型全数の平均値が目標値の $\pm 3\%$ の範囲にあり、そのばらつきが平均値の $\pm 3\%$ 以内に入っているものを合格とし、水理模型実験に使用する。

③ 合格した模型全数の質量と密度の平均値を使用して、安定数 N_s を算定する。

以下に、模型の質量と密度の測定・算定例を示す。

- 模型質量：実機質量の縮尺 1/50 の模型質量の目標値が 20g の場合
 - ・ 模型全数の平均値が $20g \pm 3\% = 19.4 \sim 20.6g$ に入ること。
 - ・ たとえば模型全数の平均値が 20.2g の場合、全ての模型ブロックが $20.2g \pm 3\% = 19.6 \sim 20.8g$ に入ること。
- 密度：目標値 $2.30g/cm^3$ の場合
 - ・ 模型全数の平均値が $2.30g/cm^3 \pm 3\% = 2.23 \sim 2.37g/cm^3$ に入ること。
 - ・ たとえば模型全数の平均が $2.37g/cm^3$ の場合、全てのブロックが $2.37g/cm^3 \pm 3\% = 2.30 \sim 2.44g/cm^3$ に入ること。

補足③：模型ブロックの摩擦抵抗

模型ブロックの材質は原則モルタル材とする。しかし、他の材質で比重を合わせた模型において摩擦抵抗の測定を行い、モルタル模型と比較して大きく違いがないことを確認できれば使用可能とする。

解 説

ブロックの摩擦力はブロック形状（底面突起の有無）によって異なるので、模型ブロックのマウンド材に対する摩擦係数を求めることを標準とする。摩擦係数は、ブロックの波浪安定性能に関わってくる性能値として示すことも考えられる。

以下に、模型ブロックの摩擦抵抗の測定事例を示す。

①模型ブロックの摩擦抵抗 測定事例（1）

1. 測定方法

測定位置の写真を図-4.4 に示す。測定は以下のようにして行った。

- ① アクリル製の容器に石を入れ、水平にならす。
- ② 石の天端面まで水を張る。
- ③ ブロックを水平に引っ張る。図-4.4 に示すようにこの測定例では、ブロックを 3 個設置して釣り糸で 3 個まとめて水平に引っ張った。
- ④ 容器に少しずつおもり（鉛の粒）を入れていき、徐々に荷重を大きくする。その際、入れた鉛の重さを測ることで荷重を求める。
- ⑤ ブロックの変位を測定する。図-4.4 に示すようにこの測定例では、レーザー変位計によりブロックの変位を測定した。
- ⑥ 測定は 3 回行う。

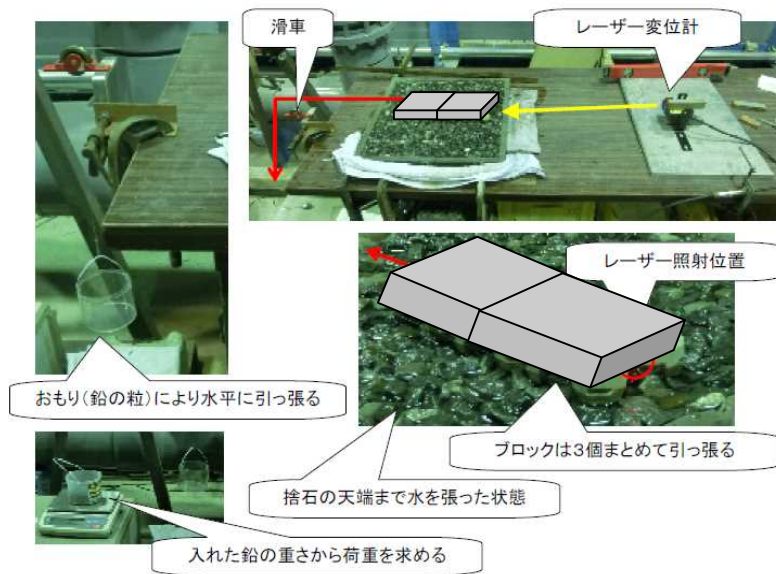
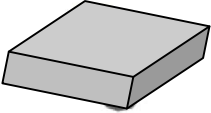


図-4.4 測定装置および試験状況

実験に用いたブロックの諸元を表-4.1 に示す。

表-4.1 ブロック諸元

ブロック種類	規格	質量 (実測値) ※
	2t 型 1/50	15.5 g

※実験で用いた3個のブロックの平均値

実験に用いた石の諸元を表-4.2 に、質量加積百分率を図-4.5 に示す。

表-4.2 石の諸元

規格	密度 (実測値)	空隙率 (実測値)
(現地量) 100~500 kg/個 (模型量) 0.8~4.0 g/個	2656 kg/m ³	39.3 %

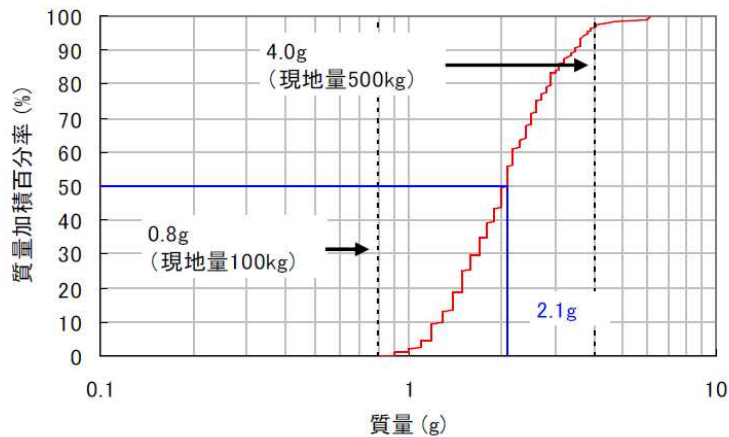


図-4.5 石の質量加積百分率

2. 測定結果

測定結果の例を図-4.6に示す。横軸はレーザー変位計で測定した変位、縦軸は摩擦係数 μ (c)式)である。以下の整理では、変位が10mmとなったときの摩擦係数を用いた。

$$\mu = \frac{F}{mg} \quad \dots(c)$$

ここに、 μ ：摩擦係数、 F ：引っ張り荷重(N)、 m ：ブロック質量(kg)、 g ：重力加速度(m/s^2)である。

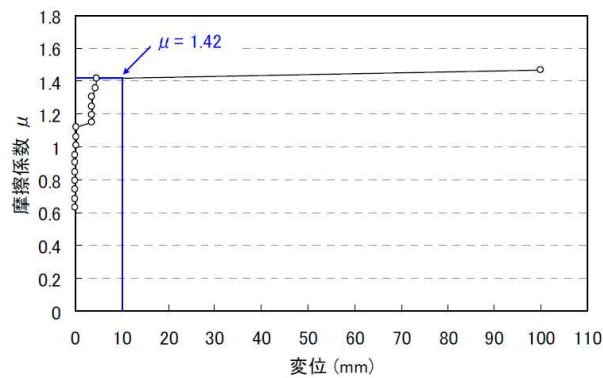


図-4.6 測定結果 (1回目)

摩擦係数の一覧を表-4.3に示す。

表-4.3 摩擦係数測定結果

ブロック種類・大きさ		1回目	2回目	3回目	平均
ブロックA	2t型 1/50	1.42	1.67	1.09	1.39

②模型ブロックの摩擦抵抗 測定事例（２）

石でマウンドを形成し、その上にブロック模型を載せ、ウインチで引っ張った。ロードセルの性能によるが、ある程度大きなサイズの模型が必要である。以下に、間瀬ら（2013）²⁾より摩擦抵抗測定方法部分を引用する。

1. 測定方法

水槽内に水を張らずにマウンドとブロック模型を設置し、ウインチで等速に引っ張ることにより、引っ張りチェーン間に挿入したロードセルで変動張力を測定する。ブロックが滑り出す直前の移動限界値（最大摩擦力） F を mg で割り、静止摩擦係数 μ を求めた。 F には移動限界の5回測定平均を使用した。また、ばねばかりの値は kg で読み取るため、 F は読み取り値に重力加速度 g をかけて N 表示に換算した。 m はブロックあるいはブロックと碎石（中詰石）を加えた質量で、 g は $9.8(m/s^2)$ を採用した。

$$\mu = \frac{F}{mg}$$

ここに、 μ ：静止摩擦係数、 F ：移動限界の5回測定平均(N)、 m ：ブロックあるいはブロックと碎石（中詰石）を加えた質量(kg)、 g ：重力加速度(m/s^2)である。

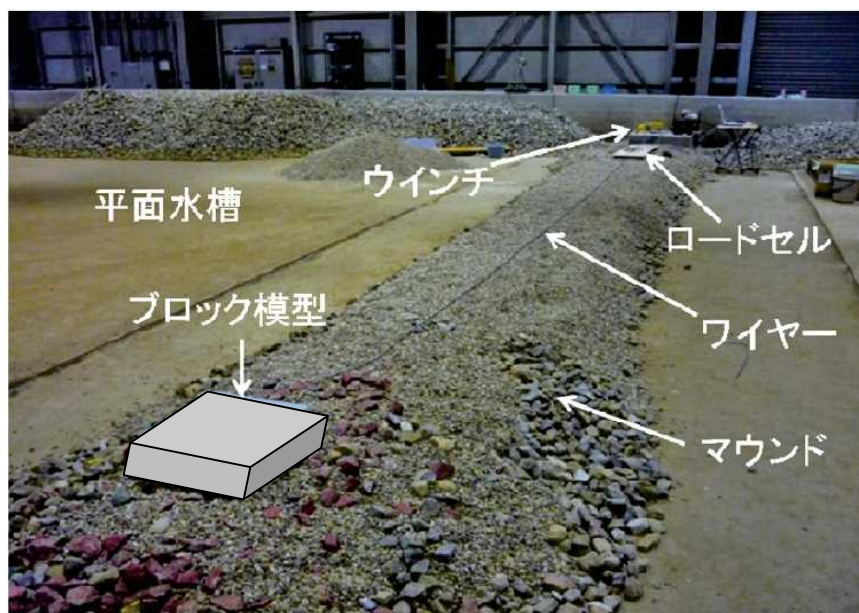


写真-4.1 測定装置および試験状況（参考文献4）に一部加筆）

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）」，pp.66-83.
- 2) 間瀬肇・平石哲也・川田達也・行本卓夫・徳永誠之（2013）：偶発波浪荷重対策としてのカウンターウェイトブロックの開発，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol.67, No.2, pp.696-700.

第5章 波浪条件の設定方法

5.1 不規則波とスペクトル

波の種類は、規則波に比べて現実の海の波により近い不規則波を用いるものとする。
スペクトルは1種類として、修正ブレットシュナイダー・光易型を標準とする。なお、入射波スペクトルの結果はデータ保管する。

解 説

(1) 入射波スペクトルと留意事項

不規則波は、振幅、周期、初期位相が異なる正弦波の重ね合わせにより形成される。したがって、波形をフーリエ変換した周波数と波高についてのパワースペクトルから、正弦波の重ね合わせにより再生できる。ただし、パワースペクトルは初期位相の情報を有さないため、無数の組合せが存在することになる。このとき、正弦波を成分波、重ね合わせる正弦波の個数を成分波数と呼ぶ。

図-5.1 に修正ブレットシュナイダー・光易型の周波数スペクトルの例を示す。スペクトルの誤差許容範囲の設定はしないが、十分な成分波を有していることを証明するために、入射波スペクトルの結果はデータ保管する。ここで言う入射波スペクトルは、人工リーフ断面を設置しない条件において、沖側水平部の砕波帯外での入・反射波の分離を行った入射波スペクトルの結果である。水路内の不規則波の入・反射波を分離する方法としては、合田ら(1976)¹⁾等がある。なお、本マニュアルでは、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、現地で発生する波浪が必ずその通りである保障はないことに留意する必要がある。

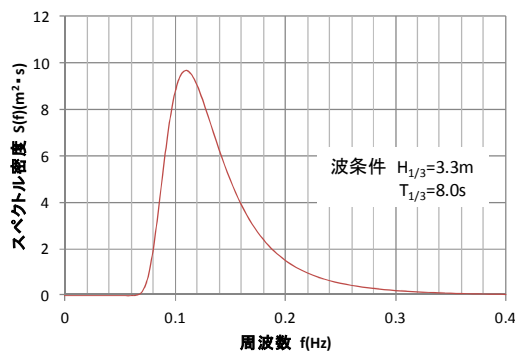


図-5.1 修正ブレットシュナイダー光易型の周波数スペクトル例

(2) 実験の波種類とスペクトル

図-5.2 に、ブレットシュナイダー・光易型と修正ブレットシュナイダー・光易型の2つのスペクトル形式のスペクトル密度を示す。比較すると、若干修正ブレットシュナイダー・光易型スペクトルの方が長い周期成分側へ拡張されていることがわかる。

また、合田(2008)²⁾によると、修正ブレットシュナイダー・光易型は、ブレットシュナイダー・光易型のピーク周波数や波の全エネルギーと有義波高の関係について若干修正して、

より風波のスペクトルの標準形として適当なものとしていると説明している。

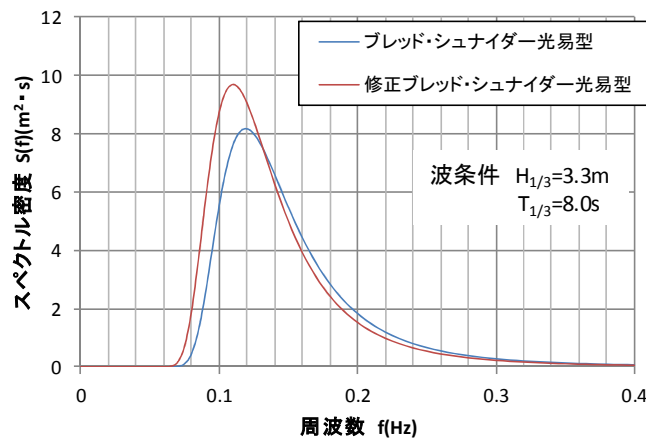


図-5.2 周波数スペクトルの比較

(3) 造波装置の機能

造波装置の機能について、波の反射を吸収する機能を持つものと持たないものがあるが、人工リーフによる反射率は比較的小さいことから、人工リーフ断面の設置の有無による波の性質の違いについて規定はしない。

5. 2 波高と周期

波高のケースは、周期を固定して砕波帯内の条件を満たしつつ、段階的に波高が大きくなるように設定することを標準とする。周期は、現地換算で $T_0=10s, 13s, 16s$ の 3 種類を標準とする。

解 説

(1) 周期の設定

現場で適切に被覆ブロックの質量を算定したが、散乱被害が生じている事例があり、水理模型実験において適切な外力を作用させて、性能評価を行うことが求められる。また 1 章で述べたとおり、 N_s は水深波長比 h/L_i によっても変化することから、これを考慮して N_s の評価線を求めることが重要である。そこで、作用させる沖波波浪の周期の標準値を設定した。図-5.3 に、内湾・外洋海岸の代表的な海岸の計画波浪³⁾について示す。周期は、外洋海岸の計画波浪を網羅すると考えられる周期 $T_0=10s, 13s, 16s$ の 3 種類を標準とした。

内湾の計画波浪は、図-5.3 の白抜き丸で示している。周期は外洋海岸に比べて小さいので、外洋の条件で N_s 値が評価されていれば安全側となると考えられる。また、内湾を網羅する周期のケース設定を行うとケース数がさらに増大しその労力が過大なものとなるため、内湾のためのケース設定は標準とはしない。

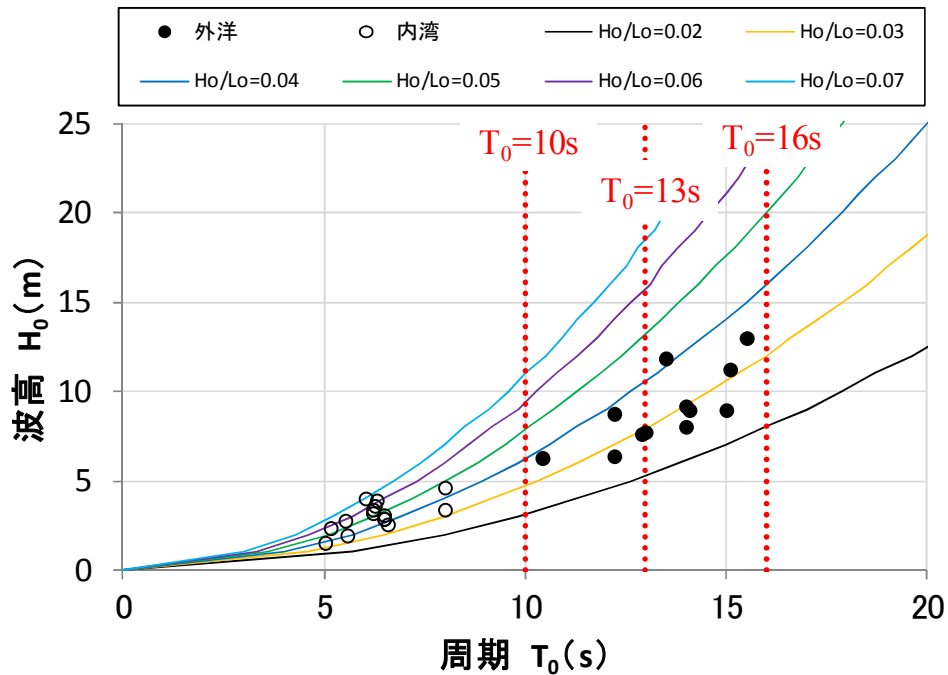


図-5.3 内湾・外洋海岸の計画波浪と波形勾配の関係

(2) 現場の周期条件

図-5.4 に全国実態調査で得られた設計外力の沖波周期の頻度分布を示す。図-5.4 より、設計外力の沖波周期は 14 秒までに全体の約 80%が含まれている。

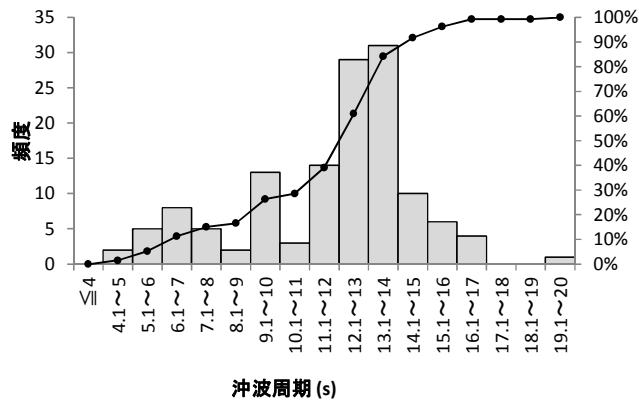


図-5.4 全国実態調査による沖波周期の頻度分布（データ数 133）

(3) Ns 算定ブロック以外のブロックの本マニュアルで設定した波浪条件での性能評価

Ns 算定ブロックに限らず、Ns 以外で所要重量を算定するブロックについても外洋海岸に設置する場合には、本マニュアルで設定した周期の条件で波浪安定性能を評価することが望ましい。

(4) 人工リーフ設置位置が内湾海岸の場合の留意事項

本マニュアルで設定している波高と周期の条件は、図-5.3 に示す外洋海岸の計画波浪を網羅すると考えられる周期より設定しているため、人工リーフ設置位置が内湾海岸に適用すると厳しい条件で評価した N_s 値を用いることとなる。そのため内湾海岸において、過大な大きさのブロックが選定されて、経済性が良くないことになる可能性があり、周期を固定して波高を変化させる従来の実験設定で求めた N_s 値のほうが適した場面もあると考えられる。そのような場合には、内湾海岸の条件に適合した波高と周期の条件で実施した実験に基づく性能値を用いることが考えられる。

(5) 既設の人工リーフに設置されている被覆ブロック

本マニュアルに従い評価した N_s 値を用いる場合、すでに現地に設置されている被覆ブロックが小さすぎるもしくは大きすぎるといったことが出てくる可能性がある。重量不足の状況によって対応を考えることが望ましい。大幅な重量不足でなければ、重点監視対象にしつつ、高波浪によって変形・被災した場合に、適正なブロック重量にして補強・復旧することが考えられる。

(6) 消波性能・海浜安定性能の評価 (再掲)

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、他の条件でも照査することが必要である。

図-5.3 より決めた波浪条件に加えて、エネルギー平均波相当の波浪条件も実施することとする。図-5.5 に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⁴⁾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。これからも、広い範囲の波浪条件を網羅する必要があることがわかる。

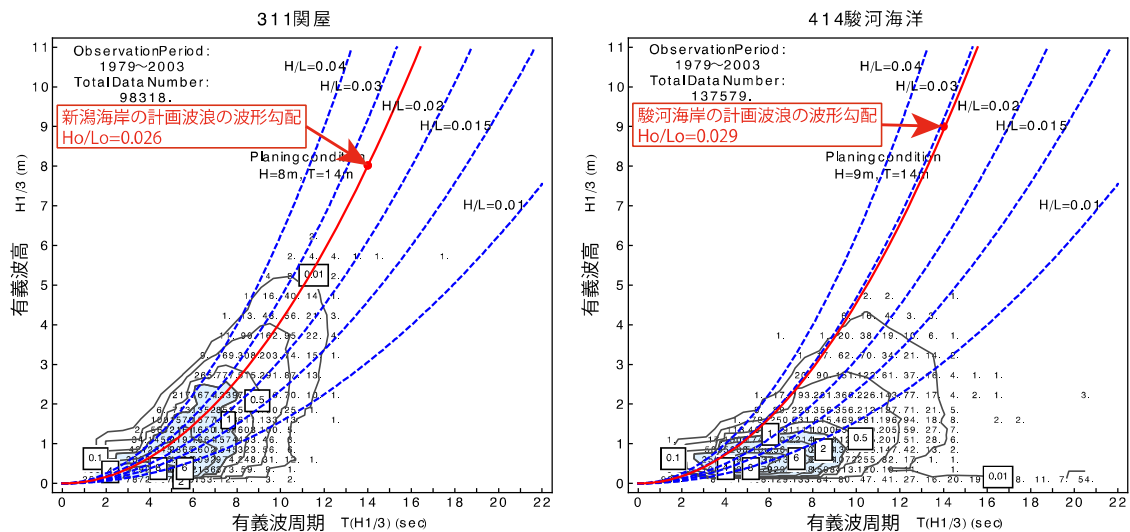


図-5.5 有義波の波高と周期の結合分布図(左: 関屋観測所(新潟市)、右: 駿河海洋観測所(大井川町))⁴⁾

(7) 波高条件の設定

現場で設計する場合は、必ずしも設計位置の換算沖波波高が計画波高と一致するとはかぎらない。むしろ、計画波の波向と海岸の等深線が直角でない場合は換算沖波波高の方が計画波浪より小さくなる。実験条件で、換算沖波波高を採用しているのは、換算沖波波高がもっとも大きくなる状態である計画波の波向と海岸の等深線の角度が直交している条件を想定しているためである。

(8) 砕波帯の内か外かの判定方法

砕波帯内の有義波高の算定図⁵⁾より砕波帯の内外を判定する。実験条件である $T_0=10s, 13s, 16s$ で $h=6m$ のとき、 h/L_0 の取りうる値は $h/L_0=0.0385, 0.0228, 0.015$ となり、各 h/L_0 での砕波減衰の開始限界はおおよそ $H_0'/h=0.45, 0.39, 0.33$ である。したがって、 $h=6m$ のとき $T_0=10s, 13s, 16s$ で、順に $H_0'=2.7m, 2.34m, 1.98m$ より大きい場合を砕波帯内、小さい場合を砕波帯外とすることが考えられる。

5.3 波作用時間（波列の作成方法）

波作用時間は、有義波周期の1000倍以上とする。連続作用波数は、 $600T_{1/3}$ 以上とするのが望ましいが、装置の性能上無理な場合は $80T_{1/3}$ 以上とすることができる。その場合、成分波の初期位相をずらすことや成分波数を変えること等を実施して、多様な波連となるよう（同じ波連の繰り返しとならないよう）にする。

解 説

(1) 波作用時間の設定の考え方

波作用時間は、区切りのいい数値として有義波周期の1000倍以上とすると、前述5.2(波高と周期)で示した周期のケースを現地に換算すると2時間45分～4時間30分以上となり、現地量で2時間以上とれるので、時化のピーク時間を網羅できると考えられる。

また、高橋ら(1998)⁶⁾が提案した消波ブロック被覆堤の重量算定式において波数を変化させてブロック質量の変化を試算しており、500波までの変化が大きく1000波以降の変化は比較的小さいという結果を報告している(図-5.6)。人工リーフの変状連鎖を把握する上でも有義波周期の1000倍以上とすることは、適切であると考えられる。

ここで、波数とは、水位の時系列に対してゼロアップクロス、ゼロダウンクロス、ピークトゥピーク等の手法による波の分割を行って得られる、波の分割数である。

(2) 連続作用波数の設定の考え方

大野ら(2004)⁷⁾は、捨石被覆傾斜堤を対象に同一波浪スペクトルおよび同一造波作用時間における波数(波の分割数から得られる(前節))と被覆捨石の被災量の関係について模型実験より検討している。被災限界波高以上の波高の出現平均回数が波数71以上になると

ほぼ一定値になるが、その発生回数のバラツキについては、波数が約 600 波以上で一定となることを報告している。これに倣って連続作用波数は 600 波以上とするのが望ましいが、装置の性能上無理な場合は 80 波以上とすることができるとした。図-5.7 には波作用時間と構成波数（信号長）の関係について示す。

図中で、作用時間が有義波周期の 1000 倍以上となり、信号 A や信号 B は有義波周期の 80 倍以上、信号 B は有義波周期の 600 倍以上となる。そのため、用いる造波システムの方法を理解しておく必要がある。方法(A)で信号 A および方法(B)で信号 B について、図では繰り返り返しとしているが、2 回目以降で初期位相を変化させれば信号 C と同等と言える。ただし、造波システムの緩起動・緩停止の時間を含まないように注意する。

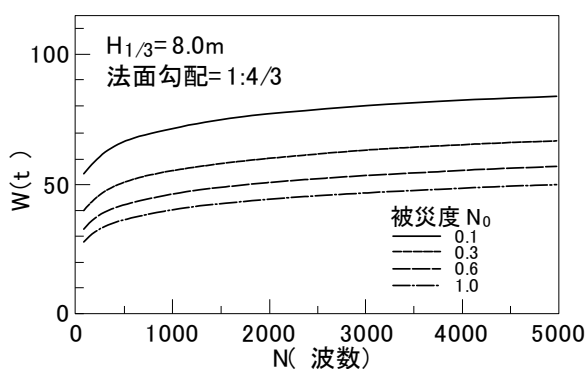


図-5.6 波数に対する重量の変化図（高橋ら，1998）⁶⁾

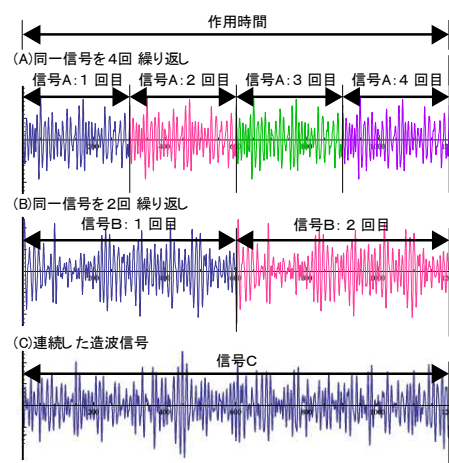


図-5.7 作用時間と信号長の説明

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池治(1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No.248
- 2) 合田良実 (2008)：「耐波工学-港湾・海岸構造物の耐波設計」，pp.18-22
- 3) (社) 全国海岸協会 (2008)：海岸 - 50年のあゆみ - ，pp.597-871.
- 4) 加藤史訓 (2005)：海象年表 25 年統計、国総研資料、第 274 号.
- 5) 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.
- 6) 高橋重雄・半沢稔・佐藤弘和・五明美智雄・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利(1998)：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量-消波ブロック被覆堤の設計法の再検討，第一報-，港湾技術研究所報告，第 37 巻、第 1 号
- 7) 大野賢一・松見吉晴・児玉広子・木村晃 (2004)：不規則波実験に必要とされる造波のための構成波数に関する考察、海洋開発論文集 第 20 巻、pp791-796

第6章 実験と結果の整理

6.1 実験波造波試験

N_s 算定に用いる実験波を作成する。5.1（不規則波とスペクトル）に示すように、波の種類は不規則波を用い、スペクトルは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。波高は碎波帯内の条件をみたとしつつ段階的に波高を大きくしていくため5種類程度必要と考え、周期は5.2（波高と周期）で設定した3種類、天端水深は3.4.2（天端水深）で設定した3種類とすると、作成する実験波のケース数は合計45ケース程度となる。

図-6.1.1に、実験波造波試験での実験断面上の波高計設置位置を示す。波高計は、沖側波算定位置での水位測定用に2台、沖側堤脚位置での水位測定用に1台で合計3台使用することを標準とする。

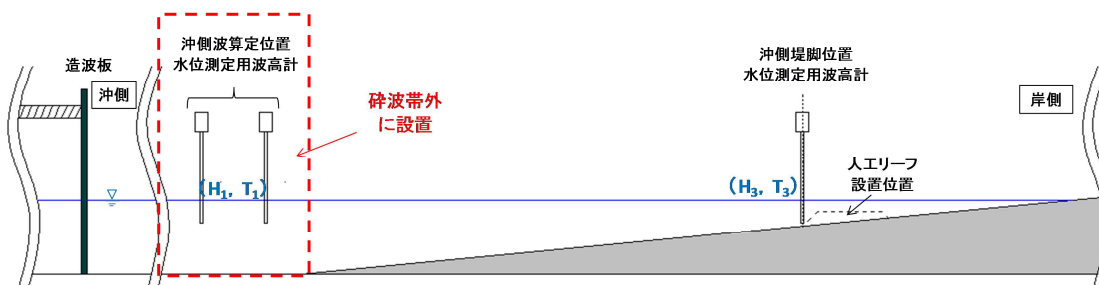


図-6.1.1 実験波造波試験での波高計位置

6.1.1 水位の測定（沖側波算定位置、沖側堤脚位置）

（1）沖側波算定位置

図-6.1.1に示すように、沖側波算定位置2箇所での水位を測定する。水位の測定位置は、実験波の碎波水深以上の位置に設置する必要がある。水位の時系列データは保管データとする。

（2）沖側堤脚位置

図-6.1.1に示すように、人工リーフ沖側堤脚位置での水位を測定する。水位の時系列データは保管データとする。

6.1.2 入反射分離と入射波の波高 H_1 ・周期 T_1 の算定（沖側波算定位置）

沖側波 (H_1 , T_1) は、図-6.1.1に示す沖側波算定位置2箇所での測定した水位の時系列データを用いて算定する。5.1（不規則波とスペクトル）に示すように入反射分離推定を行い、入射波を算定して沖側波 (H_1 , T_1) とする。沖側波 (H_1 , T_1)、入射波のスペクトル推定結果を保管データとする。

補足④：水位測定結果からの波浪 (H_3 , T_3) の算定と保管（沖側堤脚位置）

沖側堤脚位置での有義波 (H_3 , T_3) は、図-6.1.1 に示す人工リーフ沖側堤脚位置の水位の時間系列データより算定する。安定数 N_s を算定する際には使用しないが、6.1.4 で算定する堤前波高との関係を見ることを目的として算定する。沖側堤脚位置での有義波 (H_3 , T_3) は保管データとする。

6. 1. 3 入射波 (H_1 , T_1) からの換算沖波波高 (H_{01}) の算定

換算沖波波高 (H_{01}) は、6.1.2 で求めた沖側波 (H_1 , T_1) を用いて、図-6.1.2 に示す浅水係数の算定図¹⁾より算定する。換算沖波波高 (H_{01}) は保管データとする。

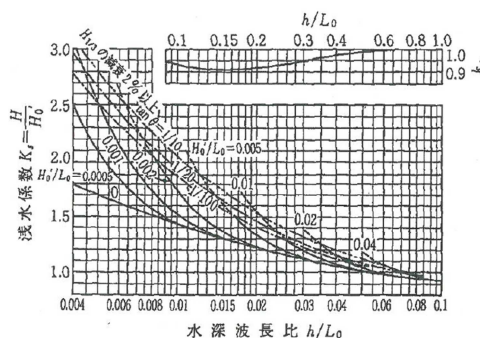


図-6.1.2 有限振幅性を考慮した浅水係数の算定図

6. 1. 4 合田による堤前波高 (H_{i1}) の算定

堤前波高 (H_{i1}) は、安定数 N_s を算定するために必要である。堤前波高 (H_{i1}) は、6.1.3 で求めた換算沖波 (H_{01}) を用いて、図-6.1.3 に示す砕波帯内の有義波高の変化図（海底勾配 1/30）²⁾より算定する。堤前波高 (H_{i1}) は保管データとする。

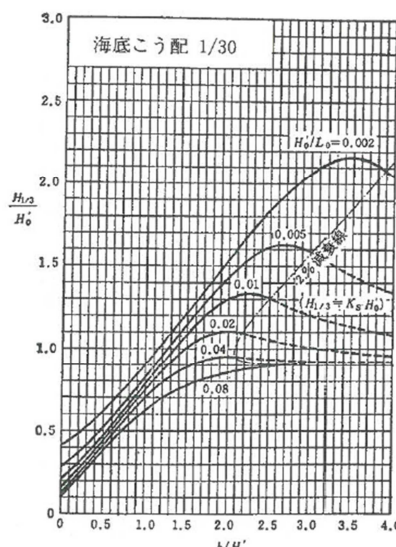


図-6.1.3 砕波帯内の有義波高の算定図，海底勾配 1/30

解 説

従来は、上記補足④で求めた沖側堤脚位置での有義波 (H_3, T_3) を N_s 算定に用いていたブロックがあったが、本マニュアルでは実験と設計との整合を図るために、砕波帯内の有義波高の変化図より得られる $H_{1/3}/H_0'$ に換算沖波波高 H_{01}' をかけて算定した堤前波高 H_{i1} を N_s 算定に用いることを標準とした。 N_s 算定の堤前波高を H_{i1} としているのは、設計時は人工リーフがない状態で設計堤前波高を算出するのでそれに整合させる意図からである。

補足⑤：沖側堤脚位置波浪 (H_3) と合田による堤前波算定結果 (H_{i1}, H_{i2}) の比較

水理模型実験における砕波帯内（人工リーフ沖側堤脚位置）の有義波について、参考①で算定した有義波 H_3 と、6.1.4 合田の算定図で求めた有義波 H_{i1}, H_{i2} を比較できるように整理する。

6. 1. 5 堤前波長 (L_i) の算定

堤前波長 (L_{i1}) は、安定数 N_s に影響を及ぼす指標である相対水深 h/L_i を求めるために必要である。堤前波長 (L_{i1}) は、微小振幅波理論における分散関係式を変形した次式³⁾から求められ、算定結果は保管データとする。

$$L_i = L_0 \times \tanh(2\pi h/L_i) \cdots (a)$$

ここに、 L_i : 堤前波長（ここでは L_{i1} ）、 L_0 : 沖側波長 ($gT_1^2/2\pi$ (T_1 : 沖側波周期、 g : 重力加速度))、 h : 堤脚水深である。

解 説

N_s 算定の堤前波長を L_{i1} としているのは、設計時は人工リーフがない状態で設計の堤前波高を算出するのでそれに整合させる意図からである。

6. 1. 6 各実験条件の N_s 算定式

各実験条件の評価前の安定数 N_s をブレブナー・ドネリー式を変形した (b) 式により算定する。算定結果は保管データとする。

$$N_s = \frac{\rho_r^{1/3} \cdot H_i}{M^{1/3} \cdot (S_r - 1)} \cdots (b)$$

ここに、 N_s : 安定数、 ρ_r : 被覆ブロックの密度、 S_r : 被覆ブロックの比重、 H_i : 堤前波高（ここでは 6.1.4 で算定した堤前波高 H_{i1} ）、 M : 被覆ブロックの質量である。

解 説

ここで、(b)式から実験条件での N_s 値を事前に算定して、散乱限界として安定性能曲線である N_s 算定図を効率的に作成するために実験波造波試験のための実験条件設定の手段として示した。

6. 2 Ns 値評価実験

被覆ブロックの波浪安定性能評価実験を行う。6.1（実験波造波試験）で作成した実験波浪を作用させる。

図-6.2.1にNs値評価実験での実験断面上の波高計設置位置を示す。波高計は、沖側波算定位置での水位測定用に2台、人工リーフ沖側堤脚位置での水位測定用に1台、人工リーフ岸側堤脚位置での水位測定用に1台で、合計4台使用することを標準とする。

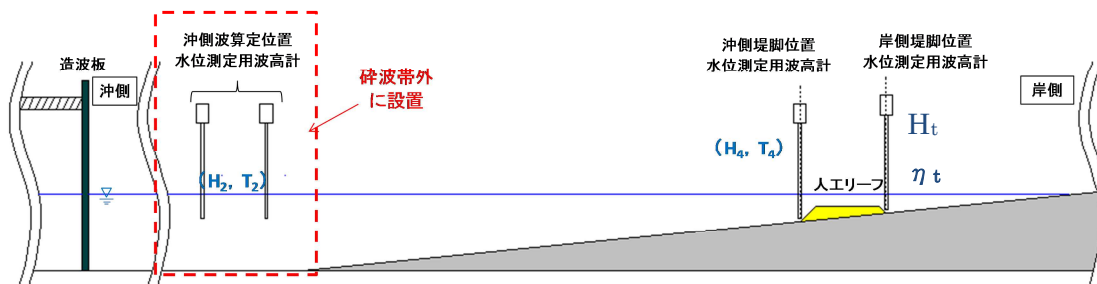


図-6.2.1 Ns 値評価実験での波高計位置

6. 2. 1 各指標の実験方法

岸側堤脚位置での波高伝達率 K_t (6.2.1.3)・水位上昇量 η_t (6.2.1.8)、Ns 値評価の被害基準 (6.2.1.10)、変状連鎖図の作成 (6.2.1.11) についての実験方法を示す。

6. 2. 1. 1 実験上の留意点

5.3（波作用時間（波列の作成方法））で波作用時間は、有義波周期の1000倍以上としているが、人工リーフが壊滅的な被害を受けた場合においては、全ての波を作用させる必要はなく、岸側堤脚位置での波高伝達率・水位上昇量の算定もする必要はない。

6. 2. 1. 2 水位の測定（沖側波算定位置、沖側堤脚位置、岸側堤脚位置）

（1）沖側波算定位置 (H_2 の測定位置)

図-6.2.1に示すように、沖側波 (H_2, T_2) 算定位置2箇所での水位を測定する。水位の測定位置は、実験波の碎波水深より深となる位置に設置する。水位の時系列データは保管データとする。

（2）沖側堤脚位置 (H_4 の測定位置)

図-6.2.1に示すように、人工リーフ沖側堤脚位置での水位を測定する。水位の時系列データは保管データとする。

（3）岸側堤脚位置 (H_t の測定位置)

図-6.2.1に示すように、人工リーフ岸側堤脚位置での水位を測定する。水位の時系列データは保管データとする。

6. 2. 1. 3 岸側堤脚位置水位測定結果からの透過波高 H_t と波高伝達率 K_t の算定

(1) 透過波高 (H_t) の算定

透過波高 (H_t) は、人工リーフ岸側堤脚位置での水位の時系列データ (6. 2. 1. 2 (3)) より算定した有義波である。

(2) 波高伝達率 K_t の算定

各ケースの波高伝達率 K_t は、(c) 式で算定する。

$$K_t = \frac{H_t}{H_0'} \quad \dots (c)$$

ここに、 H_t : 透過波高 (上記 (1) で算定した波高)、 H_0' : 換算沖波波高 (6. 2. 1. 5 で算定した波高 H_{02}') である。

当該被覆ブロックの波高伝達率 K_t が、手引き (改訂版) に示されている「人工リーフの波高伝達率 K_t と B/L_0 の関係」⁴⁾ と同様か確認する目的がある。透過波高 H_t と波高伝達率 K_t は報告書に記載する。

解 説

K_t 評価にあたって用いる換算沖波波高を H_{02}' としているのは、手引き (改訂版) との比較の整合を図るためである。

6. 2. 1. 4 入反射分離と入射波の波高・周期 (H_2 , T_2) の算定 (沖側波算定位置)

沖側波 (H_2 , T_2) は、図-6.2.1 に示す沖側波算定位置 2 箇所測定した水位の時系列データを用いて算定する。5. 1 (不規則波とスペクトル) に示すように入反射分離推定を行い、入射波を算定して沖側波 (H_2 , T_2) とする。沖側波 (H_2 , T_2) は報告書に記載し、入射波のスペクトル推定結果を保管データとする。

6. 2. 1. 5 沖側入射波 (H_2 , T_2) から換算沖波波高 H_{02}' の算定と合田による堤前波高 H_{i2} の算定

換算沖波波高 (H_{02}') は、6. 2. 1. 4 で求めた沖側波 (H_2 , T_2) を用いて、図-6.1.2 に示す浅水係数の算定図¹⁾より算定する。換算沖波波高 (H_{02}') は報告書に記載する。

堤前波高 (H_{i2}) は、換算沖波波高 (H_{02}') を用いて、図-6.1.3 に示す砕波帯内の有義波高の変化図 (海底勾配 1/30)²⁾より算定する。 N_s 算定にあたって用いる H_i は H_{i1} を用いることを原則とするが、施設の制約等がある場合は H_{i2} を用いることも可能とする。堤前波高 (H_{i2}) は報告書に記載する。

解 説

N_s 算定にあたって用いる堤前波高 H_i を原則 H_{i1} としているのは、設計との整合を図るためである。 N_s 算定に H_{i2} を用いる場合とは、反射・吸収型造波装置を用いている等で

人工リーフ模型を設置した N_s 値評価実験で、造波板の動きが実験波造波試験時と変わってしまう場合等が想定される。

補足⑥：沖側堤脚位置水位測定結果から堤前波 (H_4, T_4) 算定と保管

沖側堤脚位置での有義波 (H_4, T_4) は、図-6.2.1 に示す人工リーフ沖側堤脚位置の水位の時系列データより算定する。安定数 N_s を算定する際には使用しないが、6.1.4 で算定する堤前波高との関係を見るため算定する。有義波 (H_4, T_4) は保管データとする。

6. 2. 1. 6 堤前波長 (L_i) の算定

堤前波長 (L_i) は、安定数 N_s に影響を及ぼす指標である相対水深 h/L_i を求めるために必要である。堤前波長 (L_i) は 6.1.5 に示す式から求められる。 N_s 算定にあたって用いる T 及び L_i は、 T_1 と L_{i1} を用いることを原則とするが、施設の制約等がある場合は T_2 と L_{i2} を用いることも可能とする。 T_2, L_{i2} は報告書に記載し保管データとする。

解 説

N_s 算定にあたって用いる堤前波長 L_i を原則 L_{i1} としているのは、設計との整合を図るためである。 N_s 算定に T_2, L_{i2} を用いる場合とは、反射・吸収型造波装置を用いている等で人工リーフ模型を設置した N_s 値評価実験で、造波板の動きが実験波造波試験時と変わってしまう場合等が想定される。

6. 2. 1. 7 各ケースの N_s 算定

各ケースの安定数 N_s を 6.1.6 に示したブレブナー・ドネリー式を変形した (b) 式により算定する。そのとき堤前波高は 6. 2. 1. 5 に述べたとおり原則 H_{i1} を用いる。施設の制約等がある場合は H_{i2} を用いることも可能とする。 N_s の算定結果は報告書に記載する。

解 説

N_s 算定にあたって用いる堤前波高 H_i を原則 H_{i1} としているのは、設計との整合を図るためである。

6. 2. 1. 8 人工リーフ背後の水位上昇量 ($\bar{\eta}_i$) の算定

人工リーフ背後の水位上昇量 $\bar{\eta}_i$ は、(d) 式に示す通りである。

$$\bar{\eta}_i = \bar{h}_i - \bar{h} \cdots (d)$$

ここに、 \bar{h}_i : 人工リーフ岸側堤脚位置の平均水深、 \bar{h} : 人工リーフ岸側堤脚位置の初期水深である。

人工リーフ岸側堤脚位置の平均水深 \bar{h}_i は、人工リーフ岸側堤脚位置で測定した時系列データより算定した平均水深である。

水位上昇量 $\bar{\eta}_i$ が手引き (改訂版) に示されている人工リーフの岸端での水位上昇量 $\bar{\eta}_i$ と換算沖波波高 H_0' 比 $\bar{\eta}_i / H_0'$ と天端水深換算沖波波高比 R/H_0' の関係³⁾と同様を確認する目的

がある。人工リーフ岸側堤脚位置の平均水深 \bar{h}_l と水位上昇量 $\bar{\eta}_l$ は報告書に記載する。

解 説

手引き（改訂版）との比較にあたって用いる換算沖波波高は、手引き（改訂版）との比較の整合を図るため H_{02} とする。

6. 2. 1. 9 変状の撮影・記録

Ns 値評価実験において、被覆ブロックの被災が連鎖的に拡大する過程を観察・記録するためビデオによる撮影を行う。図-6.2.2 にビデオ設置位置および撮影アングル例を示す。

ビデオは、上方からの撮影用に1台、側面からの撮影用に2台設置している。また、動画データと水位の時系列データについて時刻の同期をすることとする。変状や被害の発生・拡大に関する撮影動画は保管することが望ましい。

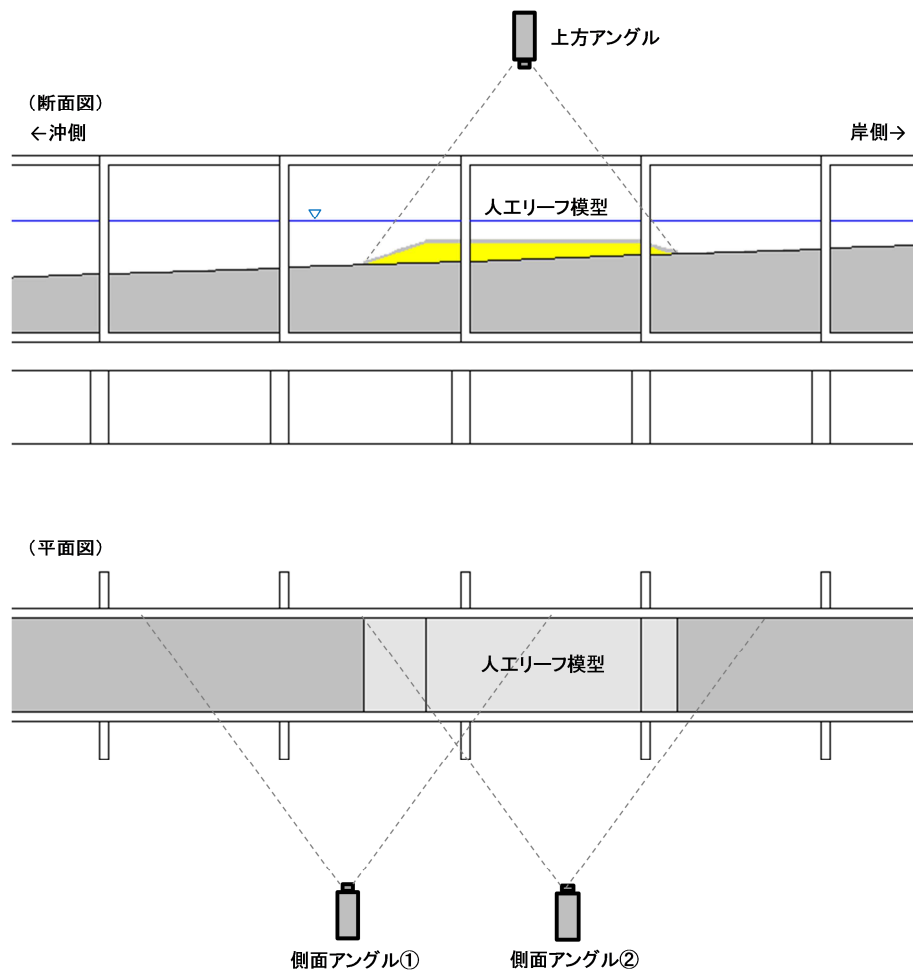


図-6.2.2 ビデオ設置位置および撮影アングル例

6. 2. 1. 10 Ns 値評価の被害基準・ブロックの被害判定

被覆ブロックの所要質量の安定数 N_s を評価する際の被害率等の被害基準は、変状連鎖等ブロックの特性及び人工リーフの重要性を考慮して適切に定める。人工リーフは、消波工等のような補助構造物ではなく、それ自身が防護を担う重要な施設である。また、被害を受けた箇所から連鎖的に被災が拡大していく構造物である等の点に留意して被害基準を設定する。性能評価の被害基準は報告書に明記する。実験で得られた各ケースの被害率は報告書に記載する。

個々の被覆ブロックを被害とする現象を表-6.2.1 の通りとする。なお、4.4 で述べたとおり水路側壁沿いの被覆ブロックは側壁の影響によりブロックが散乱しやすいので、両側の側壁沿い 1 列分を固定する。固定ブロックは被害率の算定では考慮しない。

表-6.2.1 個々のブロックの被害判定基準

被害現象	
	詳細説明
転動(めくれ)	-
滑動	ブロックの岸沖方向長の1/2以上の水平移動
沈下・回転	ブロックの厚さの1/2以上の不陸による沈下・回転
マウンドの吸出し	

以下には表-6.2.1 の説明を示す。

- 1) 転動(めくれ)したブロックは被害を受けたとする。
- 2) 岸沖方向長の 1/2 以上水平移動したブロックは被害を受けたとする。
- 3) マウンド材の沈下により厚さの 1/2 以上回転したブロックは被害を受けたとする。
- 4) マウンド材の吸出しによりマウンドがブロック厚さの 1/2 以上低下した場合、被災したとする。

被覆ブロックに被害が無い場合でも、ブロックの動揺やマウンド材の抜け出し等の変状があれば記録する。被害発生前に見られる変状も、6. 2. 1. 11 の変状連鎖図に反映する。

解 説

(1) 従来実験の被害判定

実験実態調査によると、被覆ブロック性能の評価にあたっての被害基準は、被害率 1% 以上となったときが 9 種、被覆ブロック 1 個被災したときが 7 種であり、その他は 7 種であった(図-6.2.3)。被害基準は被害率 1% としているブロックが多く、次いで 1 個被災とし

ているブロックも多い。

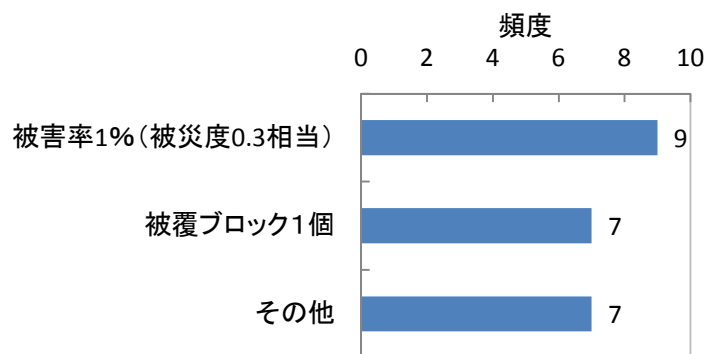


図-6.2.3 Ns 算定における被害基準の採用実態 (データ数 23)

個々のブロックの被害判定については、図-6.2.4に示すようにブロック 22 種でブロックの大きさの 1/2 以上動いたものを、ブロック 18 種で隣接するブロックの高さ以上にめくれ上がったものを、ブロック 14 種で 45 度以上回転したものを、被害と判定している。

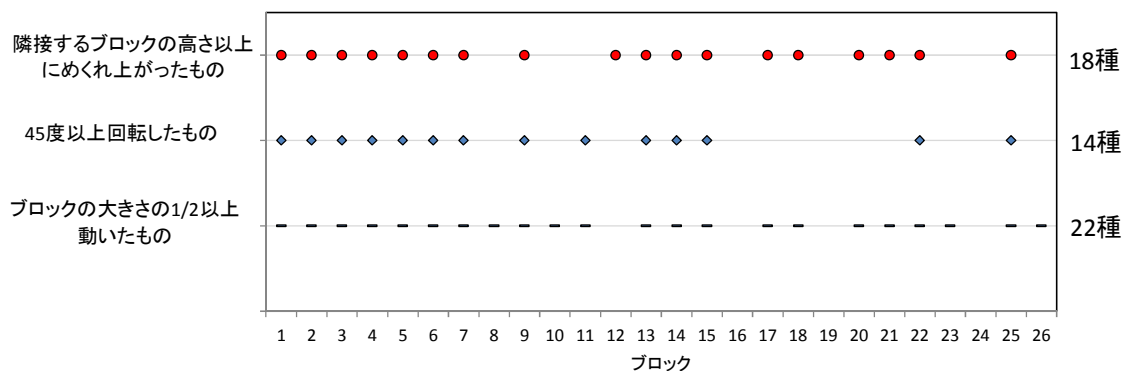


図-6.2.4 ブロックの被害の判定基準の採用実態 (データ数 26)

(2) 被害発生前の変状

被害発生前の変状についての知見は、施設点検のポイント抽出に有効な情報となる。たとえば、散乱しにくいブロックであっても、繰り返し振動を受けることによりひび割れ等の劣化が生じる可能性がある場合には、点検ポイントとしてブロックの振動が発生しやすい場所を抽出し、ブロックひび割れが生じていないか定期的に確認することで劣化の早期発見ができる。

6. 2. 1. 11 変状連鎖図の作成

人工リーフの変状連鎖図を作成することを標準とする。変状連鎖図とは、人工リーフの被災が連鎖的に拡大する過程を表したもので、図-6.2.5 に例示する。変状連鎖は、現地でどの程度の波の大きさのときにどの場所を点検調査すればよいかの目安となる重要な情報である。

国総研で実施した矩形ブロック実験⁴⁾でみられた人工リーフの変状連鎖図作成例と、各変状時の点検箇所・ポイントを図-6.2.5 に示す。図-6.2.5 以外の変状連鎖として、①沖側天端法肩ブロックの散乱、②沖側天端ブロックのクリアランスの拡大、③沖向きの流れによる沖側法面法肩ブロックの散乱（人工リーフ背後に壁を設置したケース）、が見られた。

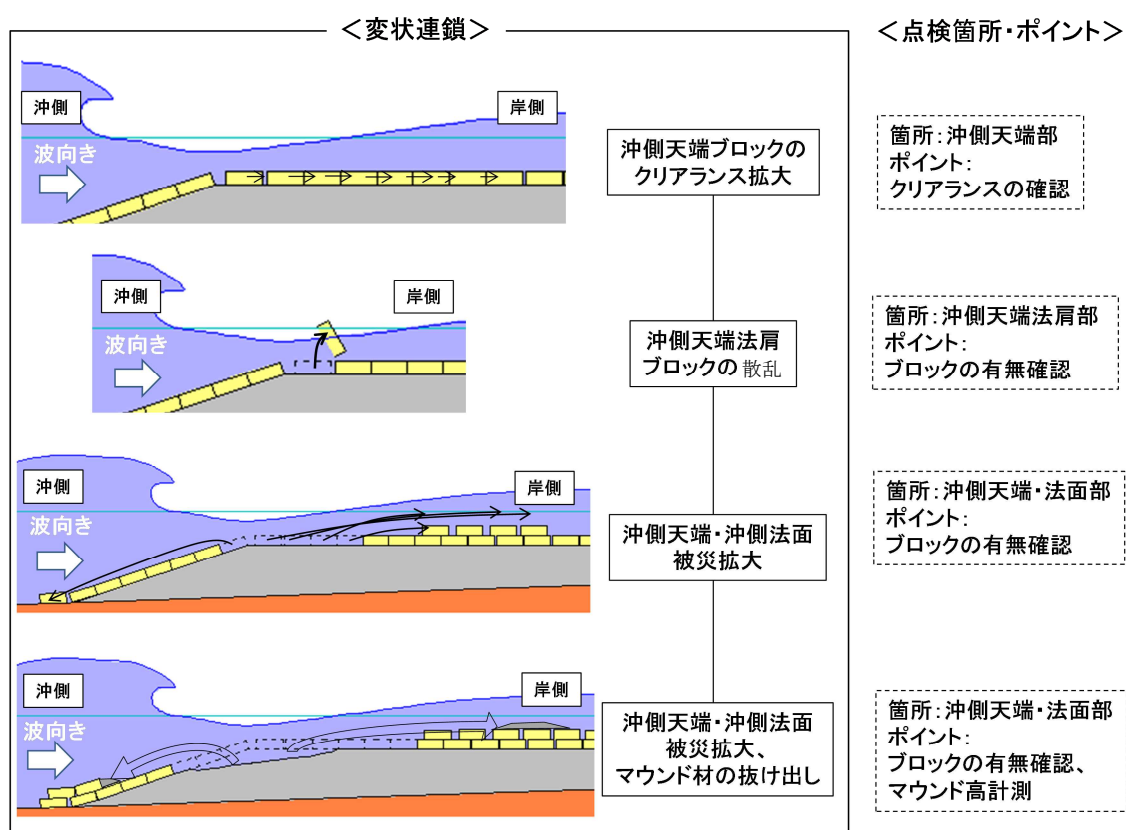


図-6.2.5 人工リーフの変状連鎖図例⁴⁾

解 説

(1) 変状連鎖図の作成目的

人工リーフは主たる沖合消波施設・侵食防止施設であるので、海岸管理者が適切にそれを設計管理するためには限界状態での応答を知っていることが望ましい。また、ブロック形状によって被災発生・拡大過程が異なる可能性があり、これらの情報は被覆ブロックの改良や性能向上にも資することが期待される。被害が発生しやすい場所がわかれば、施設管理者が当該箇所を重点的な点検対象として時化後等の点検を行うことにより早期の

被害・変状の発見と修復が可能となる。

(2) 変状連鎖の整理例

図-6.2.5 に示す人工リーフの変状連鎖図を作成するためには、観察された変状連鎖を記録・整理しておく必要がある。以下に、変状連鎖の整理例を示す。なお、本マニュアルでは、以下の解説に例示する変状連鎖の整理は標準としては規定しない。

<変状連鎖を整理するにあたっての留意事項>

- ・被災の前兆として観察された現象（図-6.2.6）と被災拡大過程（図-6.2.7(1)）を示す。
- ・被災の前兆として観察された現象には、被災発生を助長させる現象の画像を示す。たとえば、クリアランスのつまりや石の抜け出し等である。
- ・被災拡大過程には、被災発生時から被災の拡大が終局する状態までがわかる画像を示し、被災発生時からの時間と有義波周期の比($t_d/T_{1/3}$)を併せて記載する。
- ・示した画像の状況をコメントする。
- ・変状連鎖図から点検・維持管理上の注意点をコメントする。
- ・示した画像に対応する動画と水位データの時間を示す。
- ・被害率の推移をグラフにする（図-6.2.7(2)）。

現地量: R=1(m), h=6.9(m), H=2.3(m), T=23.5(s)
波数(造波時間/有義波周期): 1029 波

模型量: R=2.2(cm), h=15.2(cm), H=5(cm), T=3.5(s)

造波時間: 60(min)

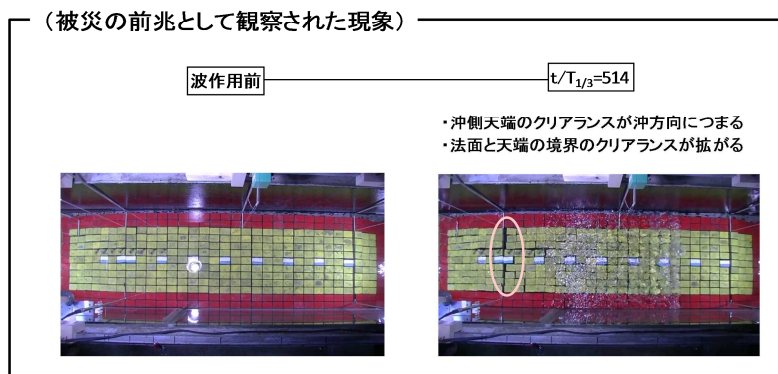


図-6.2.6 人工リーフの変状連鎖整理例（被災の前兆として観察された現象，国総研実験⁴⁾より）

現地量: R=1(m),h=6.9(m),H=6.3(m),T=18.8(s) 模型量: R=2.2(cm),h=15.2(cm),H=14(cm),T=2.8(s) 造波時間: 40(min)
 波数(造波時間 t /有義波周期 $T_{1/3}$): 857 波

(被災拡大過程)

初期被災時			$t_d/T_{1/3}=107$	$t_d/T_{1/3}=214$																						
・沖側天端法肩1列目および5~7列目で被災			・沖側天端法肩1列目は全て被災																							
・沖側天端法肩から岸側へ被災拡大																										
<ul style="list-style-type: none"> ・沖側天端法肩から岸側へさらに被災拡大 ・沖側法面へ被災拡大 			<ul style="list-style-type: none"> ・沖側天端法肩から岸側へさらに被災拡大 ・沖側法面へさらに被災拡大 ・マウンドの抜け出しを多く確認 																							
<ul style="list-style-type: none"> ・沖側天端法肩から岸側へさらに被災拡大 ・マウンドの抜け出しが多く、マウンドの変形を確認 																										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>データ</th> <th>ファイル</th> <th>時間 or データNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">動画</td> <td>上方から撮影</td> <td>file① 4:38</td> </tr> <tr> <td>横から撮影</td> <td>file②-1 4:20</td> </tr> <tr> <td>水位データ</td> <td>file③</td> <td>-17.5s</td> </tr> </tbody> </table>			データ	ファイル	時間 or データNo	動画	上方から撮影	file① 4:38	横から撮影	file②-1 4:20	水位データ	file③	-17.5s	<table border="1"> <thead> <tr> <th>データ</th> <th>ファイル</th> <th>時間 or データNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">動画</td> <td>上方から撮影</td> <td>file① 9:38</td> </tr> <tr> <td>横から撮影</td> <td>file②-1 9:20</td> </tr> <tr> <td>水位データ</td> <td>file③</td> <td>282.5s</td> </tr> </tbody> </table>		データ	ファイル	時間 or データNo	動画	上方から撮影	file① 9:38	横から撮影	file②-1 9:20	水位データ	file③	282.5s
データ	ファイル	時間 or データNo																								
動画	上方から撮影	file① 4:38																								
	横から撮影	file②-1 4:20																								
水位データ	file③	-17.5s																								
データ	ファイル	時間 or データNo																								
動画	上方から撮影	file① 9:38																								
	横から撮影	file②-1 9:20																								
水位データ	file③	282.5s																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>データ</th> <th>ファイル</th> <th>時間 or データNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">動画</td> <td>上方から撮影</td> <td>file① 24:38</td> </tr> <tr> <td>横から撮影</td> <td>file②-1 24:20</td> </tr> <tr> <td>水位データ</td> <td>file③</td> <td>1182.5s</td> </tr> </tbody> </table>			データ	ファイル	時間 or データNo	動画	上方から撮影	file① 24:38	横から撮影	file②-1 24:20	水位データ	file③	1182.5s	<table border="1"> <thead> <tr> <th>データ</th> <th>ファイル</th> <th>時間 or データNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">動画</td> <td>上方から撮影</td> <td>file① 34:38</td> </tr> <tr> <td>横から撮影</td> <td>file②-2 9:44</td> </tr> <tr> <td>水位データ</td> <td>file③</td> <td>1782.5s</td> </tr> </tbody> </table>		データ	ファイル	時間 or データNo	動画	上方から撮影	file① 34:38	横から撮影	file②-2 9:44	水位データ	file③	1782.5s
データ	ファイル	時間 or データNo																								
動画	上方から撮影	file① 24:38																								
	横から撮影	file②-1 24:20																								
水位データ	file③	1182.5s																								
データ	ファイル	時間 or データNo																								
動画	上方から撮影	file① 34:38																								
	横から撮影	file②-2 9:44																								
水位データ	file③	1782.5s																								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>データ</th> <th>ファイル</th> <th>時間 or データNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">動画</td> <td>上方から撮影</td> <td>file① 14:38</td> </tr> <tr> <td>横から撮影</td> <td>file②-1 14:20</td> </tr> <tr> <td>水位データ</td> <td>file③</td> <td>582.5s</td> </tr> </tbody> </table>			データ	ファイル	時間 or データNo	動画	上方から撮影	file① 14:38	横から撮影	file②-1 14:20	水位データ	file③	582.5s	<table border="1"> <thead> <tr> <th>データ</th> <th>ファイル</th> <th>時間 or データNo</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">動画</td> <td>上方から撮影</td> <td>file① 44:38:00</td> </tr> <tr> <td>横から撮影</td> <td>file②-1 19:44</td> </tr> <tr> <td>水位データ</td> <td>file③</td> <td>2382.5s</td> </tr> </tbody> </table>		データ	ファイル	時間 or データNo	動画	上方から撮影	file① 44:38:00	横から撮影	file②-1 19:44	水位データ	file③	2382.5s
データ	ファイル	時間 or データNo																								
動画	上方から撮影	file① 14:38																								
	横から撮影	file②-1 14:20																								
水位データ	file③	582.5s																								
データ	ファイル	時間 or データNo																								
動画	上方から撮影	file① 44:38:00																								
	横から撮影	file②-1 19:44																								
水位データ	file③	2382.5s																								

(維持管理上の注意点)

・沖側天端法肩位置が被災しやすいので、被災の無いようにその位置のブロック質量の割増し等の対策をすることがよい。

図-6.2.7(1) 人工リーフの変状連鎖整理例 (被災拡大過程, 国総研矩形ブロック実験⁴⁾より)

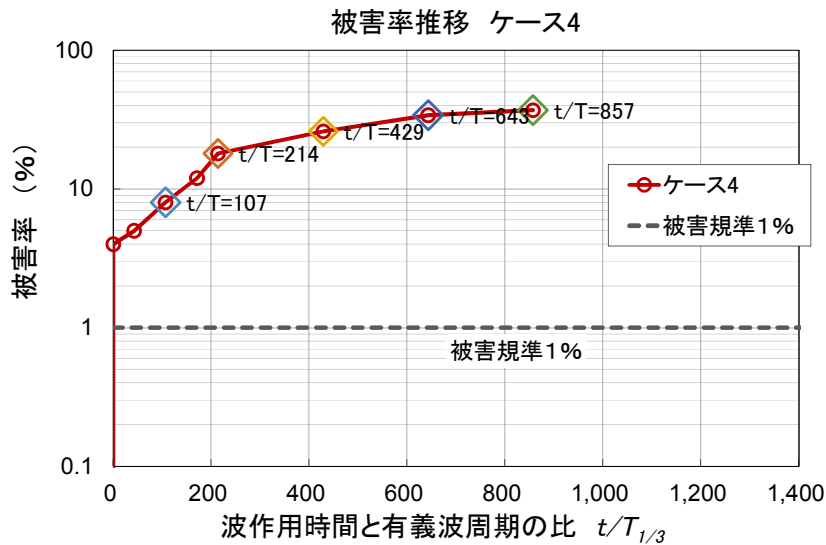


図-6.2.7(2) 人工リーフの変状連鎖整理例 (被災拡大過程, 国総研矩形ブロック実験⁴⁾より)

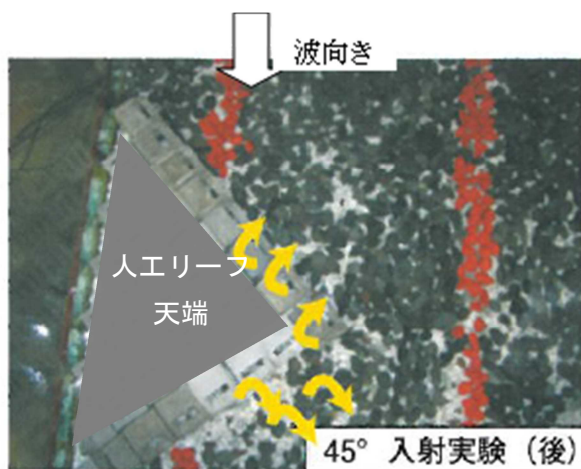
(3) 被災拡大過程が実験でみられない場合

標準の実験ケースで被災拡大過程がみられなかった場合には、どのような状況のときに被災が拡大して性能を保てないか示すことが留意事項として有効である。たとえば、段階施工断面時や施工端部では被災が拡大する等を示すことは工事における留意事項として有効な情報である。また、設計を超過する外力が来襲した際に現れる変状を示すことは点検・管理に有効な情報となる。

(4) 弱点となりやすい状態の波浪安定性能の確認

1.1 (目的・背景) で記述しているが、人工リーフの被災要因としては地盤変状による法先洗掘や開口部・端部に波流れ場が集中すること等が言われており、このような弱点となりやすい状態で波浪安定性能を確認することは重要である。以下に弱点となりやすい状態の実験例を示す。

- ・ 端部を再現した実験 (図-6.2.8)。
- ・ 人工リーフ法先の洗掘により法面ブロックが下にずれて、天端法肩ブロックの横面が露出することにより散乱するパターンを再現した実験。



(a) 入斜角 45°を想定の実験例⁵⁾



(b) 入斜角 0°を想定 (国総研実験より)

図-6.2.8 断面水路での端部実験のイメージ (水路上方からのアングル)

(5) 被災発生時の流況

図-6.2.9 に示すように、ブロックの被災発生時の砕波位置や砕波形態、ブロックの被災現象を整理することで、安定性の高いブロックの開発に繋がると考えられる。本マニュアルでは、被災発生時の流況を整理することは標準として規定しない。

現地量: R=1(m), h=6.9(m), H=6.3(m), T=19(s) 模型量: R=2.2(cm), h=15.2(cm), H=14(cm), T=2.8(s) 造波時間: 40(min)
 波数(造波時間 t /有義波周期 $T_{1/3}$): 857 波



図-6.2.9 被災発生時流況整理例 (水路側方からのアングル)

6. 2. 1. 12 保管データのフォーマット例

各実験時の水位測定等の時系列データは、動画との同期がわかるように整理する（表-6.2.2に例示）。

表-6.2.2 水位測定データ整理例

○実験波作成実験時測定データ				○Ns評価実験時測定データ					
計測時間 t	波高計			ビデオとの 同期用 LED	波高計				
	沖側波算定用		沖側堤脚位置 測定用		沖側波算定用		沖側堤脚位置 測定用	岸側堤脚位置 測定用	
	水位 1ch	水位 2ch	水位 3ch		水位 1ch	水位 2ch	水位 3ch	水位 4ch	
(sec)	(cm)	(cm)	(cm)	(sec)	(V)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
60.0	-0.48	-3.35	-2.42	60.0	2.10	-0.48	-3.35	-2.42	2.75
60.1	0.00	-3.42	-2.64	60.1	2.87	0.00	-3.42	-2.64	5.75
60.2	0.33	-3.19	-2.59	60.2	2.87	0.33	-3.19	-2.59	6.02
60.3	0.72	-2.37	-2.49	60.3	2.85	0.72	-2.37	-2.49	3.11
60.4	1.21	-1.30	-2.40	60.4	2.86	1.21	-1.30	-2.40	2.33
60.5	1.75	-0.33	-2.23	60.5	2.85	1.75	-0.33	-2.23	2.48
60.6	2.16	0.43	-1.79	60.6	2.85	2.16	0.43	-1.79	2.57
60.7	2.34	1.15	-1.25	60.7	2.86	2.34	1.15	-1.25	2.32
60.8	2.09	1.64	-0.77	60.8	2.86	2.09	1.64	-0.77	1.73
60.9	1.64	2.07	-0.53	60.9	2.86	1.64	2.07	-0.53	1.85
61.0	0.94	2.39	0.15	61.0	2.86	0.94	2.39	0.15	1.39
61.1	0.26	2.16	0.10	61.1	2.85	0.26	2.16	0.10	1.52
61.2	-0.36	1.51	-0.05	61.2	2.85	-0.36	1.51	-0.05	1.27
61.3	-1.06	0.74	0.18	61.3	2.85	-1.06	0.74	0.18	0.96
61.4	-1.80	-0.21	0.05	61.4	2.85	-1.80	-0.21	0.05	0.71
61.5	-2.45	-0.72	-0.08	61.5	2.85	-2.45	-0.72	-0.08	0.65
61.6	-2.94	-1.17	0.38	61.6	2.85	-2.94	-1.17	0.38	0.81
61.7	-3.22	-1.58	1.24	61.7	2.85	-3.22	-1.58	1.24	0.80
61.8	-3.24	-2.04	2.15	61.8	2.85	-3.24	-2.04	2.15	0.50
61.9	-2.98	-2.50	2.69	61.9	2.85	-2.98	-2.50	2.69	0.23
62.0	-2.54	-2.74	2.63	62.0	2.84	-2.54	-2.74	2.63	0.53
62.1	-2.21	-2.83	1.87	62.1	-0.10	-2.21	-2.83	1.87	0.42
62.2	-2.09	-2.65	1.09	62.2	-0.09	-2.09	-2.65	1.09	0.04
62.3	-1.85	-2.39	0.64	62.3	-0.10	-1.85	-2.39	0.64	-0.14
62.4	-1.42	-2.04	0.18	62.4	-0.10	-1.42	-2.04	0.18	-0.38
62.5	-0.73	-1.71	-0.62	62.5	-0.11	-0.73	-1.71	-0.62	-0.25

色塗り部は、LEDが点灯

解 説

(1) 保管データ項目

水位データ以外の保管データは以下のとおりである。

(実験波造波試験) : 沖側波(H_1 , T_1)、沖側波のスペクトル推定結果、

沖側堤脚位置での有義波(H_3 , T_3)、換算沖波波高(H_{01})、堤前波高(H_{i1})、
堤前波長(L_{i1})、Ns 値

(Ns 値評価実験) : 沖側波のスペクトル推定結果、沖側堤脚位置での有義波(H_4 , T_4)

(Ns の評価を H_2 で行っている場合は) 沖側波(H_2 , T_2)、

(〃) 沖側波のスペクトル推定結果、換算沖波波高(H_{02})、堤前波高(H_{i2})、

(〃) 堤前波長(L_{i1})、Ns 値

(2) データ整理の際の留意事項

- ・ サンプル時間は 0.1(s) とする。
- ・ 水位の単位は (cm) とする。

6. 2. 2 実験総括

6. 2. 2. 1 実験結果総括表の整理

6.1、6.2.1で取得した実験結果を整理する。

解説

表-6.2.3 に実験結果の整理方法例を示す。報告書に記載する実験結果総括表に示すデータは以下のとおり。

(Ns 値評価実験)：沖側波 (H_2 , T_2)、換算沖波波高(H_{02})、堤前波高(H_{12})、堤前波長(L_{12})、Ns 値、被害率、透過波高 H_t 、人工リーフ岸側堤脚位置の平均水深 \bar{h}_t 、波高伝達率 K_t 、人工リーフ背後の水位上昇量 $\bar{\eta}_t$

表-6.2.3 実験結果の整理例（国総研矩形ブロック実験⁴⁾）

ブロック名：矩形ブロック

縮尺：1/45

被害基準：被害率1%以上となった場合に被災とする。

ブロック模型：75.8g

ケース	天端水深 R(cm)	Ns評価実験																被災判定 ○:被災 なし ×:被災	透過波高 H_t (cm)	人工リーフ 岸側堤脚位置 の平均水深 \bar{h}_t (cm)	波高伝達 率 K_t	人工リーフ背後 の水位上昇量 $\bar{\eta}_t$ (cm)	R/H_{02}	B/L_{02}	H_{02}/L_{02}	h/H_{02}	砕波帯 内・外	
		沖側波		換算沖波 波高 H_{02} (cm)	堤前波高 H_{12} (cm)	堤前波長 L_{12} (cm)	R/H_{12}	h/L_{12}	Ns値	Ns ³ 値	被害率 (%)	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値											算定値
		波高 H_2 (cm)	周期 T_2 (s)																									
1	6.6 (h=19.6cm)	8	3.5	3.5	7.3	12.6	478	0.52	0.041	3.02	27	14%	×	5.5	20.2	0.757	0.63	0.91	0.062	0.0038	2.70	砕波帯内						
2		5	3.5	3.5	4.6	8.8	478	0.75	0.041	2.12	9	0%	○	3.9	19.7	0.864	0.11	1.45	0.062	0.0024	4.31	砕波帯外						
3		5	2.2	2.2	5.3	6.4	297	1.03	0.066	1.54	4	0%	○	3.5	19.8	0.665	0.15	0.42	0.158	0.0070	3.73	砕波帯外						
4	2.2 (h=15.2cm)	14	2.8	2.8	13.6	11.7	337.8	0.19	0.046	2.80	22	37%	×	4.9	18.3	0.362	3.13	0.16	0.097	0.0111	1.14	砕波帯内						
5		10	3.5	3.5	10.7	11.3	422.2	0.19	0.037	2.71	20	27%	×	4.7	18.2	0.442	2.97	0.21	0.062	0.0056	1.45	砕波帯内						
6		10	2.8	2.8	9.7	11.2	337.8	0.20	0.046	2.68	19	18%	×	3.9	17.5	0.398	2.27	0.23	0.097	0.0079	1.60	砕波帯内						
7		10	2.2	2.2	10.4	10.7	262.1	0.21	0.059	2.57	17	6%	×	4.0	17.7	0.385	2.52	0.21	0.158	0.0138	1.49	砕波帯内						
8		10	1.5	1.5	11.0	9.9	174.7	0.22	0.089	2.37	13	0%	○	2.7	17.2	0.241	1.97	0.20	0.339	0.0313	1.41	砕波帯内						
9		8	3.5	3.5	7.1	11.0	422.2	0.20	0.037	2.64	18	10%	×	3.8	17.3	0.525	2.14	0.31	0.062	0.0037	2.17	砕波帯内						
10		8	2.8	2.8	7.8	10.8	337.8	0.20	0.046	2.59	17	4%	×	3.4	17.6	0.441	2.42	0.28	0.097	0.0064	1.99	砕波帯内						
11		10	2.2	2.2	8.3	10.3	262.1	0.21	0.059	2.46	15	4%	×	3.2	17.2	0.381	1.98	0.26	0.158	0.0110	1.86	砕波帯内						
12	8	1.5	1.5	8.8	9.1	174.7	0.24	0.089	2.17	10	0%	○	2.1	16.7	0.239	1.52	0.25	0.339	0.0250	1.76	砕波帯内							
13	5	3.5	3.5	4.5	9.6	422.2	0.23	0.037	2.30	12	1%	×	2.4	16.3	0.531	1.1	0.49	0.062	0.0023	3.48	砕波帯外							
14	5	2.8	2.8	4.9	8.3	337.8	0.27	0.046	1.98	8	0%	○	2.3	16.4	0.466	1.24	0.45	0.097	0.0040	3.20	砕波帯外							
15	5	2.2	2.2	5.2	7.3	262.1	0.30	0.059	1.75	5	0%	○	2.0	16.4	0.382	1.16	0.42	0.158	0.0069	2.98	砕波帯外							
16	1.1 (h=14.1cm)	8	3.5	3.5	7.1	10.4	402.9	0.11	0.038	2.49	15	12%	×	3.2	16.5	0.445	2.44	0.15	0.062	0.0037	2.17	砕波帯内						
17		5	3.5	3.5	4.5	9.4	402.9	0.12	0.038	2.26	12	5%	×	2.8	16.0	0.628	1.93	0.25	0.062	0.0023	3.48	砕波帯内						
18		5	2.2	2.2	5.2	7.6	256.4	0.15	0.060	1.81	6	0%	○	1.9	15.8	0.355	1.72	0.21	0.158	0.0069	2.98	砕波帯外						

模型質量 75.8
 ρr 23
 St-1 13
 B 119

※国総研矩形ブロック実験⁴⁾は、実験波造波試験の波浪データ (H_1, T_1) を保管していなかったため Ns 算定は (H_2, T_2) で実施。本来は (H_1, T_1) で評価することが望ましい。

6. 2. 2. 2 安定性能曲線 (Ns^3 算定図) の作成

(1) Ns^3 - R/H_i 図

各ケースの実験結果から、ブレブナー・ドネリー式を変形した(b)式により求めた安定数 Ns の3乗を縦軸にとり、横軸に天端水深堤前波高比 R/H_i をとった図を h/L_i 毎に作成する(図-6.2.10 に例示)。

(2) Ns^3 - h/L_i 図

各ケースの実験結果から、安定数 Ns の3乗を縦軸にとり、横軸に相対水深 h/L_i をとった図を R/H_i 毎に作成する(図-6.2.11 に例示)。

(3) Ns^3 算定式の作成

(1)、(2) で作成した Ns^3 - R/H_i 図、 Ns^3 - h/L_i 図から安定性能曲線 (Ns^3 算定式) を作成する。

(4) 実験で確認された現地換算安定質量

現地確認の水理模型実験の代用としても利用できるよう、実験で安定が確認できた質量と換算沖波 (H_0' 、 T)、堤前波浪 (H_i 、 T) を現地換算値で報告書に記載する。

解 説

(1) Ns^3 算定図を作成するにあたっての留意事項

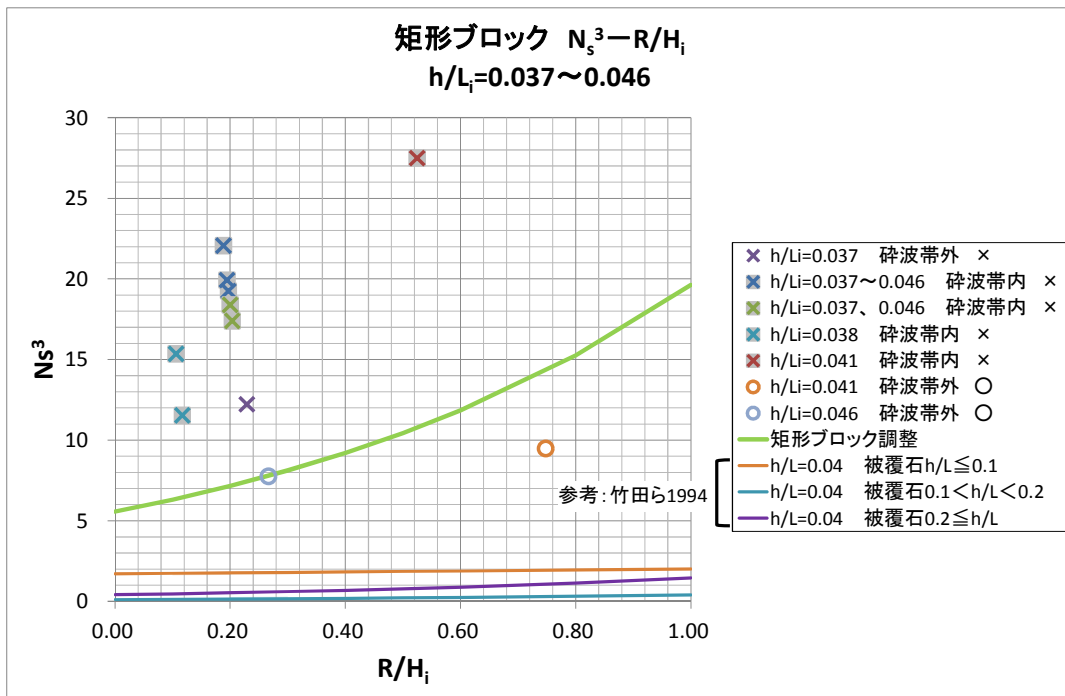
R/H_i 、 h/L_i を横軸に、 Ns^3 を縦軸にしたグラフに実験結果をプロットした図を作成する。図には、ブロックの安定性能曲線 (Ns^3 算定式) を設定し書き込む。

実験結果をプロットする記号の種類は○と×として、被害基準未満であったときは○、被害基準以上の被災があったときは×とする。×は○に重ねて最前面となるよう表示する。碎波帯内の条件を塗りつぶしにし、碎波帯外の条件を白抜きにする。

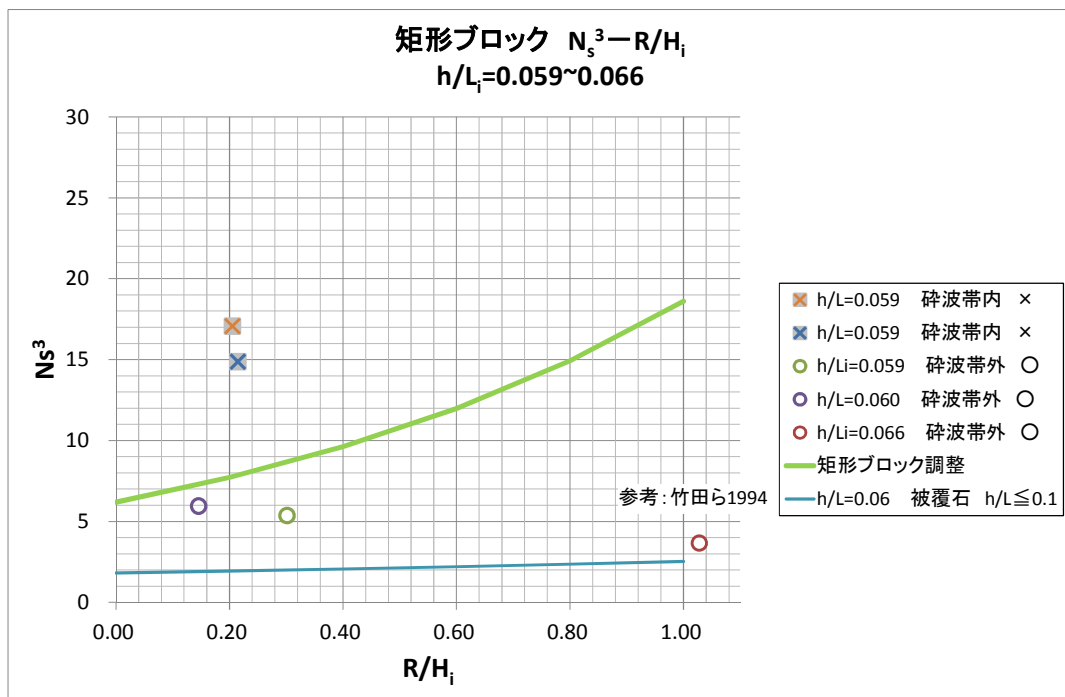
標準の実験条件で Ns^3 算定線を引けない場合、1)ブロック質量を変えて実施すること、2) 実験縮尺を変えて実施すること等で対応することが考えられる。

(2) Ns^3 算定図作成例

国総研が実施した矩形ブロックの実験結果⁴⁾をもとにした Ns^3 - R/H_i 図、 Ns^3 - h/L_i 図の作成例を図-6.2.10 及び図-6.2.11 に示す。実験結果と安定性能曲線を合わせて示すことで、安定性能曲線の設定根拠を知ることができる。

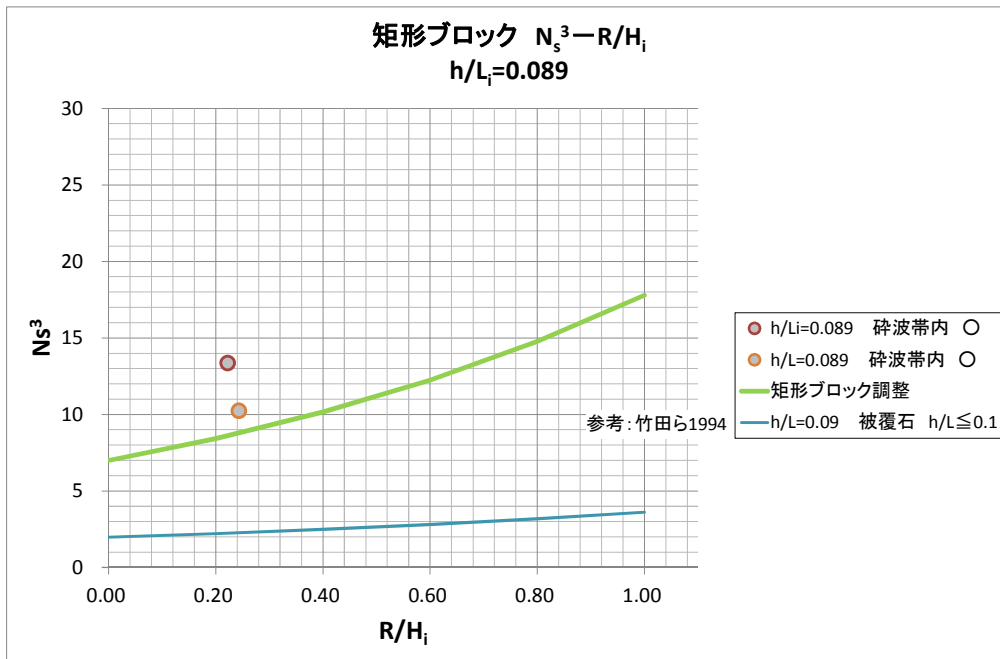


(a) ($h/L_i = 0.037 \sim 0.046$)



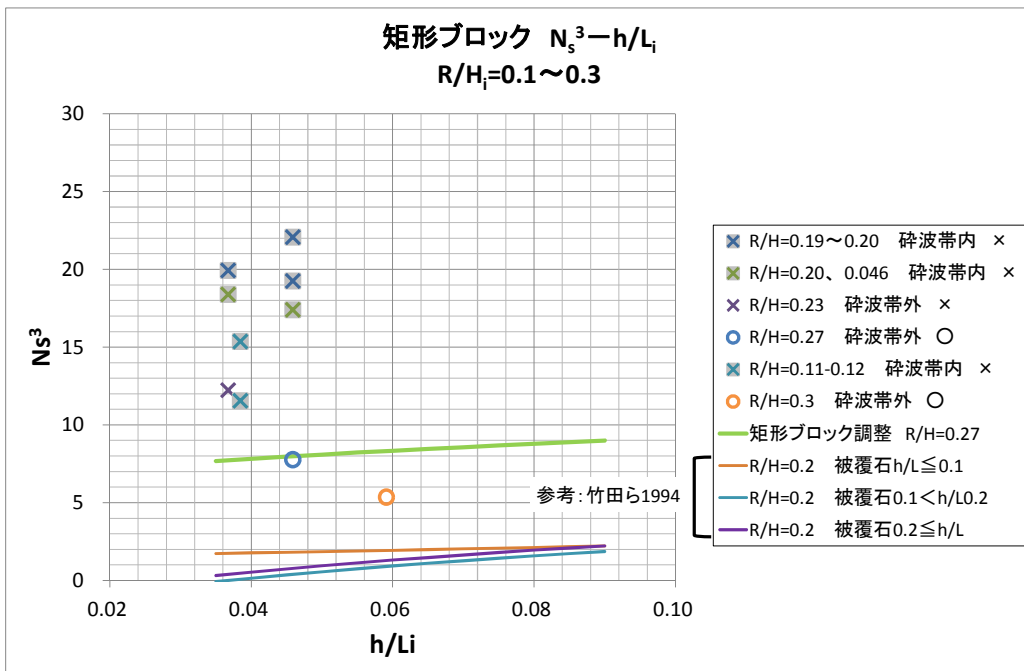
(b) ($h/L_i = 0.059 \sim 0.066$)

図-6.2.10(1) $N_s^3 - R/H_i$ 図の例 (出典: 国総研矩形ブロック実験⁴⁾)



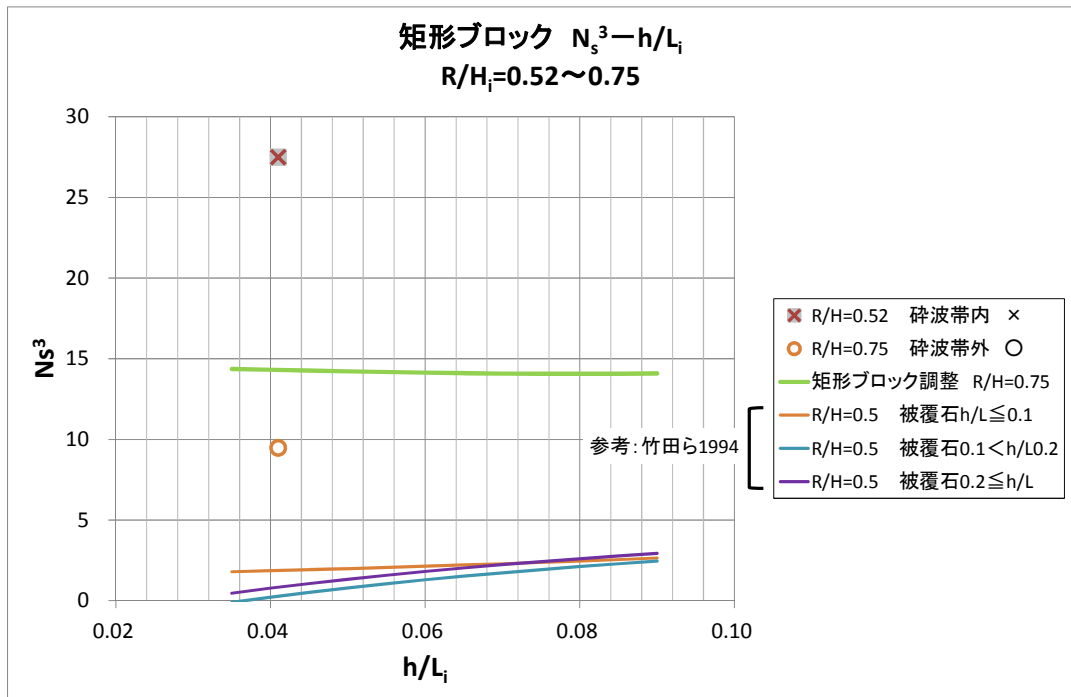
(c) $N_s^3 - R/H_i$ 算定図例 ($h/L_i = 0.089$)

図-6.2.10(2) $N_s^3 - R/H_i$ 図の例 (出典: 国総研矩形ブロック実験⁴⁾)

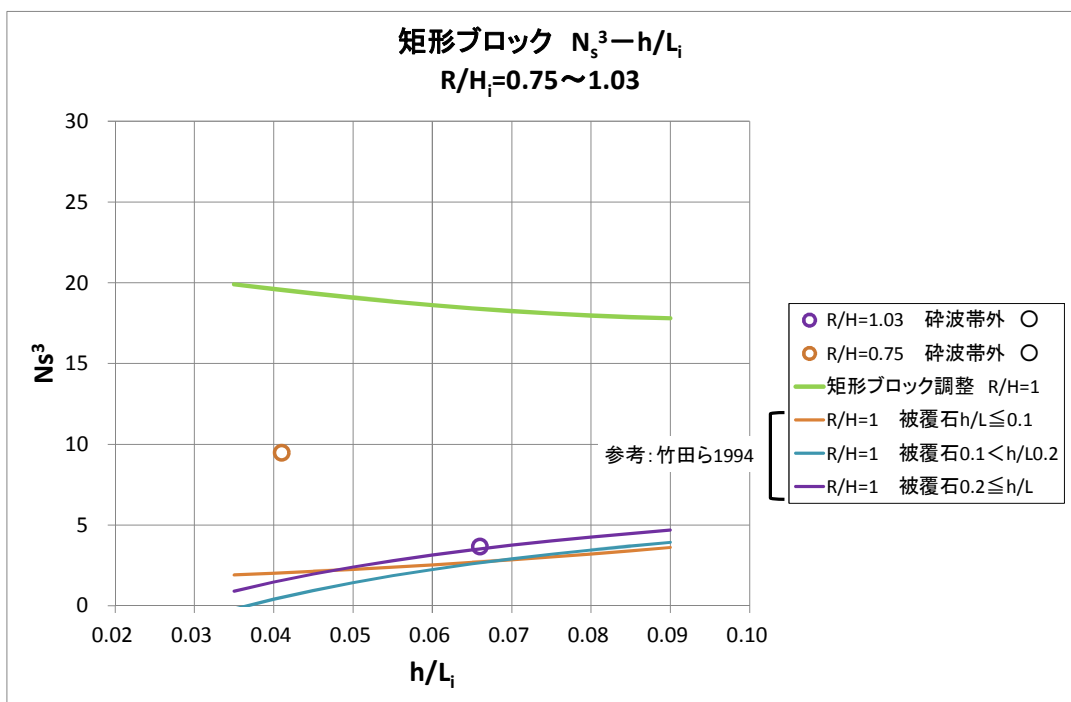


(a) ($R/H_i = 0.1 \sim 0.3$)

図-6.2.11(1) $N_s^3 - h/L_i$ 図の例 (出典: 国総研矩形ブロック実験⁴⁾)



(b) ($R/H_i=0.52\sim 0.75$)



(c) ($R/H_i=0.75\sim 1.03$)

図-6.2.11(2) N_s^3-h/L_i 図の例 (出典: 国総研矩形ブロック実験⁴⁾)

(3) Ns^3 算定式の作成例

実験結果 (Ns^3 - R/H_i 図、 Ns^3 - h/L_i 図) から、ブロックの安定性能曲線となる Ns^3 算定式を設定する。 Ns^3 算定式の例は以下に示す。この例は竹田ら(1994)⁶⁾の K_0 算定式を参考としている。

$$Ns^3 = A \times \exp[B \times (R / H_i)] + d$$

ただし、

$$A = a \times (h/L_i)^2 + b \times (h/L_i) + c$$

$$B = a' \times (h/L_i)^2 + b' \times (h/L_i) + c'$$

ここで、 a, b, c, a', b', c', d : 任意の係数とする。竹田ら(1994)⁶⁾の被覆石実験では各係数は表-6.2.4 の値としている。国総研が行った矩形ブロック実験から求めた係数は表-6.2.5 のようになった。

表-6.2.4 「竹田ら(1994)⁶⁾の被覆石」の実験結果に基づく係数設定結果例

適用範囲	a	b	c	a'	b'	c'	d
$0.2 \leq h/L_i$	-104	42	-1.1	50	-13	1.7	0
$0.1 < h/L_i < 0.2$	-104	42	-1.4	50	-13	1.7	0
$h/L_i \leq 0.1$	0	5.3	1	0	10.5	-0.2	0.5

表-6.2.5 「矩形ブロック」の実験結果⁴⁾に基づく係数設定結果例* (図-6.2.10、6.2.11の緑線)

適用範囲	a	b	c	a'	b'	c'	d
$0.035 \leq h/L_i < 0.1$	-104	42	4.05	50	-13	1.7	0

※：竹田ら⁶⁾(1994)を参考に作成

(4) 現地換算安定質量

各実験ケースで、安定であった質量を堤前波浪等とともに現地換算量で示す。

表-6.2.6 矩形ブロックの実験結果⁴⁾ 現地換算値例

ブロック名：矩形ブロック 縮尺：1/45現地換算
被害基準：被害率1%以上となった場合に被災とする。
ブロック模型：6.9t

ケース	天端水深 R(m)	Ns評価実験 (現地換算値)														被災判定 ○:被災なし ×:被災	透過波高 H(m)	人工リーフ岸側堤脚位置の平均水深 \bar{h}_i (m)	波高伝達率 K_i	人工リーフ背後の水位上昇量 η_i (m)	R/H ₀ '	B/L ₀	H ₀ /L ₀	h/H ₀ '	砕波帯内・外
		沖側波		換算沖波			堤前波高 H ₂ (m)	堤前波長 L ₂ (m)	R/H ₂	h/L ₂	Ns値	Ns ³ 値	被害率 (%)												
		波高 H ₂ (m)	周期 T ₂ (s)	実験値	算定値	算定値																			
1 (h=6.84 m)	2.97	3.6	23.5	23.5	3.3	5.7	215.1	0.52	0.041	3.02	27	14%	×	2.5	9.1	0.757	0.28	0.91	0.062	0.0038	2.70	砕波帯内			
		2.25	23.5	23.5	2.0	4.0	215.1	0.75	0.041	2.12	9	0%	○	1.8	8.9	0.864	0.05	1.45	0.062	0.0024	4.31	砕波帯外			
		2.25	14.8	14.8	2.4	2.9	133.7	1.03	0.066	1.54	4	0%	○	1.6	8.9	0.665	0.07	0.42	0.158	0.0070	3.73	砕波帯外			
		6.3	18.8	18.8	6.1	5.3	152.0	0.19	0.046	2.80	22	37%	×	2.2	8.2	0.362	1.41	0.16	0.097	0.0111	1.14	砕波帯内			
		4.5	23.5	23.5	4.8	5.1	190.0	0.19	0.037	2.71	20	27%	×	2.1	8.2	0.442	1.34	0.21	0.062	0.0056	1.45	砕波帯内			
		4.5	18.8	18.8	4.4	5.0	152.0	0.20	0.046	2.68	19	18%	×	1.7	7.9	0.398	1.02	0.23	0.097	0.0079	1.60	砕波帯内			
		4.5	14.8	14.8	4.7	4.8	117.9	0.21	0.059	2.57	17	6%	×	1.8	8.0	0.385	1.13	0.21	0.158	0.0138	1.49	砕波帯内			
		4.5	10.1	10.1	4.9	4.5	78.6	0.22	0.089	2.37	13	0%	○	1.2	7.7	0.241	0.89	0.20	0.339	0.0313	1.41	砕波帯内			
		3.6	23.5	23.5	3.2	5.0	190.0	0.20	0.037	2.64	18	10%	×	1.7	7.8	0.525	0.96	0.31	0.062	0.0037	2.17	砕波帯内			
		3.6	18.8	18.8	3.5	4.9	152.0	0.20	0.046	2.59	17	4%	×	1.5	7.9	0.441	1.09	0.28	0.097	0.0064	1.99	砕波帯内			
		4.5	14.8	14.8	3.7	4.6	117.9	0.21	0.059	2.46	15	4%	×	1.4	7.7	0.381	0.89	0.26	0.158	0.0110	1.86	砕波帯内			
		3.6	10.1	10.1	4.0	4.1	78.6	0.24	0.089	2.17	10	0%	○	0.9	7.5	0.239	0.68	0.25	0.339	0.0250	1.76	砕波帯内			
		2.25	23.5	23.5	2.0	4.3	190.0	0.23	0.037	2.30	12	1%	×	1.1	7.3	0.531	0.50	0.49	0.062	0.0023	3.48	砕波帯外			
		2.25	18.8	18.8	2.2	3.7	152.0	0.27	0.046	1.98	8	0%	○	1.0	7.4	0.466	0.56	0.45	0.097	0.0040	3.20	砕波帯外			
		2.25	14.8	14.8	2.3	3.3	117.9	0.30	0.059	1.75	5	0%	○	0.9	7.4	0.382	0.52	0.42	0.158	0.0069	2.98	砕波帯外			
		0.5	3.6	23.5	23.5	3.2	4.7	181.3	0.11	0.038	2.49	15	12%	×	1.4	7.4	0.445	1.10	0.15	0.062	0.0037	2.17	砕波帯内		
		2.25	23.5	23.5	2.0	4.2	181.3	0.12	0.038	2.26	12	5%	×	1.3	7.2	0.628	0.87	0.25	0.062	0.0023	3.48	砕波帯内			
		2.25	14.8	14.8	2.3	3.4	115.4	0.15	0.060	1.81	6	0%	○	0.8	7.1	0.355	0.77	0.21	0.158	0.0069	2.98	砕波帯外			

6. 2. 2. 3 人工リーフ消波性能（波高伝達率 K_t 、水位上昇量 η_t ）の整理

(1) 波高伝達率 K_t - B/L_0 図

図-6.2.12 に波高伝達率 K_t と天端幅沖波波長比 B/L_0 の関係を示す。

図-6.2.12 には、実験結果の整理例として手引き（改訂版）⁷⁾p16 図-2.5 に、本マニュアルの実験範囲である $0.09 \leq B/L_0 \leq 0.21$ での国総研実験結果⁴⁾を加えたものと、宇多ら(1988)⁸⁾の実験結果 ($R/H_0' = 0.4, 0.6, 1$) を重ねて示している。

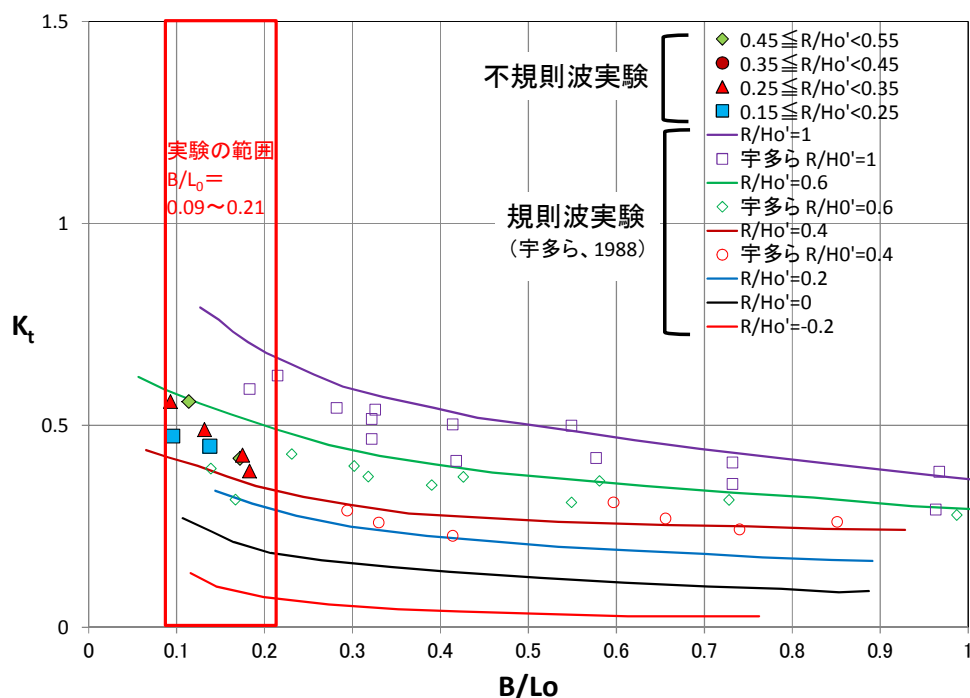


図-6.2.12 K_t - B/L_0 図（手引き（改訂版）p16 図-2.5 に、国総研実験結果⁴⁾ ($0.09 \leq B/L_0 \leq 0.21$) を加えたものと、宇多ら(1988)⁸⁾の実験結果 ($R/H_0' = 0.4, 0.6, 1$) を加えたもの）

図-6.2.12 のように波高伝達率を整理し、人工リーフの性能値に手引き（改訂版）の数値と同等かどうかをコメントする。手引き（改訂版）と比較して有意に波高伝達率が低い結果になった場合は、海浜安定性能の面からは想定よりも効きすぎて、設置目的を達成できない場合があるので留意する必要がある。

(2) 水位上昇量 $\bar{\eta}_t/H_0'$ - R/H_0' 図

図-6.2.13 に人工リーフ岸側堤脚位置の平均水位上昇量 $\bar{\eta}_t$ と換算沖波波高 H_0' の比と天端水深換算沖波波高比 R/H_0' の関係の図を示す。図-6.2.13 には、実験結果の整理例として手引き（改訂版）⁷⁾p18 図-2.8 の沖波の波形勾配毎の線に、本マニュアルの実験範囲である $0 \leq R/H_0' \leq 0.5$ での国総研実験結果を加えたものを示している。

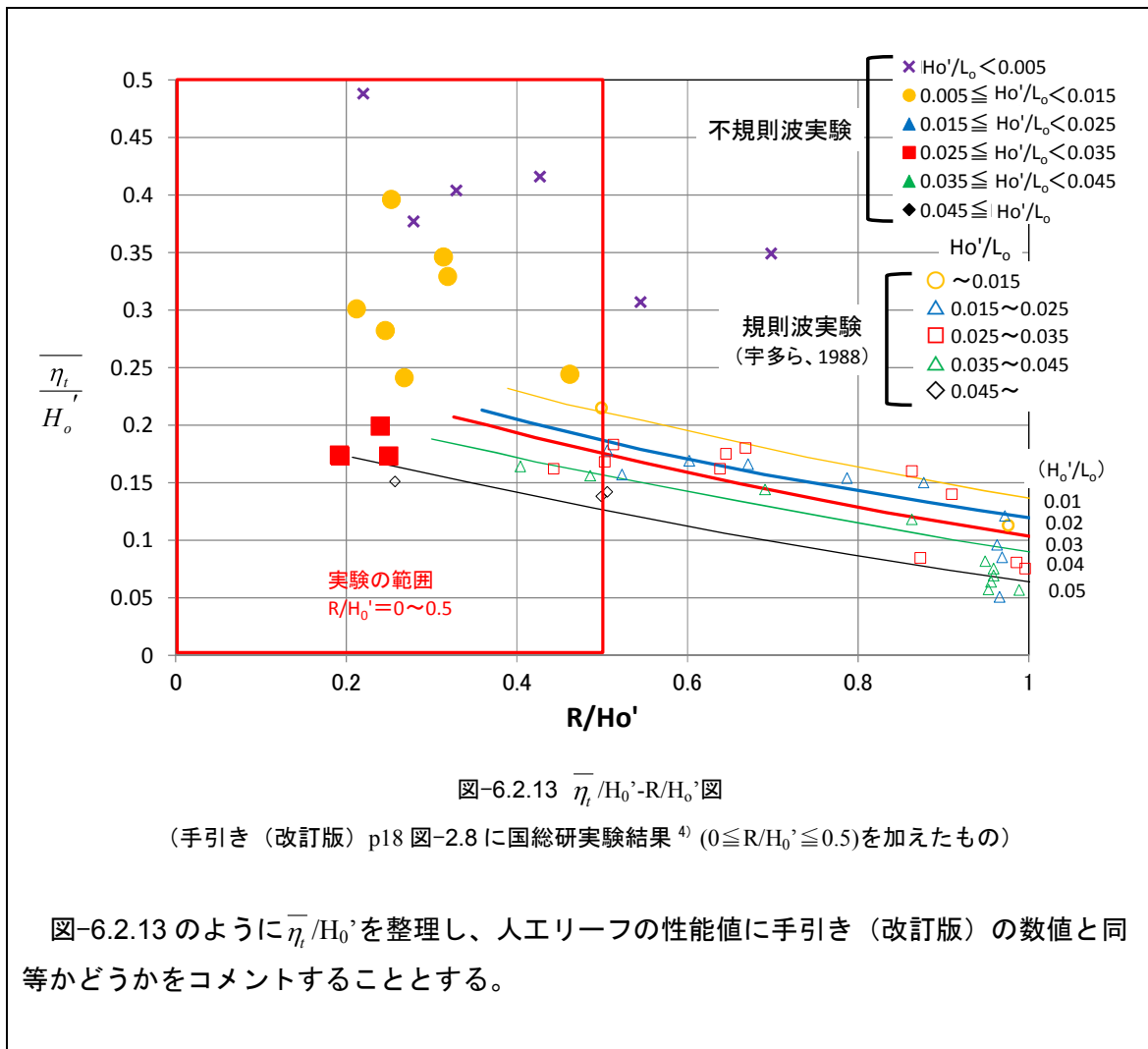


図-6.2.13 $\bar{\eta}_t/H_0'$ - R/H_0' 図

(手引き (改訂版) p18 図-2.8 に国総研実験結果⁴⁾ ($0 \leq R/H_0' \leq 0.5$)を加えたもの)

図-6.2.13 のように $\bar{\eta}_t/H_0'$ を整理し、人工リーフの性能値に手引き (改訂版) の数値と同等かどうかをコメントすることとする。

解 説

(1) 波高伝達率の実験結果に対するコメント例

国総研の矩形ブロックの実験結果⁴⁾を手引き (改訂版)⁷⁾p16 図-2.5 と宇多ら(1988)⁸⁾の実験結果 ($R/H_0'=0.4, 0.6, 1$) で比較した結果、 $0.15 \leq R/H_0' < 0.25$ の波高伝達率は $R/H_0'=0.2$ の手引き (改訂版) の曲線より大きな値であった。 $0.25 \leq R/H_0' < 0.35$ の波高伝達率は $R/H_0'=0.4$ の手引き (改訂版) の曲線より同等もしくは大きな値であり、 $R/H_0'=0.4$ の点のばらつきと比べて同程度にみえる。 $0.45 \leq R/H_0' < 0.55$ の波高伝達率は $R/H_0'=0.6$ の手引き (改訂版) の曲線と同等であり、 $R/H_0'=0.6$ の点のばらつきと比べて同程度にみえる。

規則波実験と不規則波実験の違いによる影響が含まれる可能性はあるが、この人工リーフの性能値は手引き (改訂版) に示す波高伝達率より $0.15 \leq R/H_0' < 0.35$ では大きく、 $0.45 \leq R/H_0' < 0.55$ では同等程度の性能であるため、効きすぎることはないと言える。

(2) 水位上昇量の実験結果に対するコメント例

国総研の実験結果⁴⁾と手引き (改訂版)⁷⁾p18 図-2.8 を比較した結果、 $0.025 \leq H_0'/L_0 <$

0.035 の水位上昇量は、手引き（改訂版）の実験結果よりもやや小さいが手引き（改訂版）の実験結果のバラツキの範囲内の値となっている。 $0.005 \leq H_0'/L_0 < 0.015$ の水位上昇量は手引き（改訂版）の実験結果と同等もしくはやや大きい値となっている。

規則波実験と不規則波実験の違いによる影響が含まれる可能性はあるが、矩形ブロックの人工リーフの性能値は、手引き（改訂版）に示されている水位上昇量と同等もしくはやや大きいことから、水位上昇量を緩和する性能はないと言える。

なお、手引き（改訂版）⁷⁾p18 図-2.8 は、宇多ら(1988)⁸⁾の規則波の実験結果であり、その人工リーフ背後水位測定位置は図-6.2.14 のような人工リーフ構造の岸側に位置する。

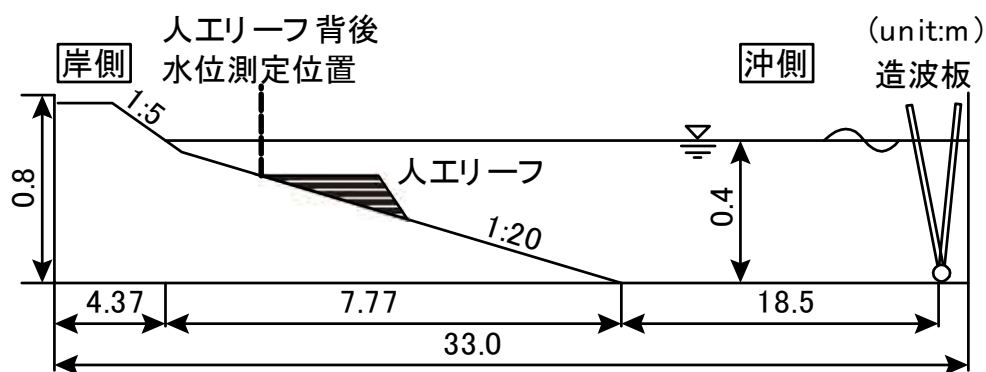


図-6.2.14 宇多ら(1988)⁸⁾の実験での人工リーフ背後水位測定位置

参考文献

- 1) 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. 2-33.
- 2) 文献 1) 参照，p. 2-35.
- 3) 社団法人土木学会(2000)：「海岸施設設計便覧[2000年版]」，p31.
- 4) 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.
- 5) http://www.toyo-suiken.co.jp/kouhou_jinko.html に加筆
- 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) 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）」，pp. 14-19
- 8) 宇多高明・小俣篤・横山揚久(1988)：人工リーフの機能と設計法，土木研究所資料、第 2696 号，p7.

参考資料 目次

参考1 人工リーフ被災事例	73
参考2 海岸管理者へのヒヤリング	77
参考3 国総研実施矩形ブロック水理実験	80

参考 1

被災事例

以下に、人工リーフの被災事例を示す。

(計画波未満の波高で被災した事例)

<事例①>

A海岸では、2007年の冬季風浪(6mを越える大しけ)により人工リーフの被覆ブロックが散乱する被災が発生した。設計波は7mとしていた。被災時の沖波波高は $H_{0,1/3}=4.36\text{m}$ 、周期は $T_0=14$ 秒であった。堤脚水深 $h=4.59\text{m}$ 、波長 $L_i=91.7\text{m}$ であるので、相対水深は $h/L_i=0.05$ であった。図-1.1に被災状況を示す。被災メカニズムは、法先の洗掘を受けたことにより法面上のブロックが沈下・移動を起こし、天端部のブロックに直接波が作用し散乱した。12tブロックでは散乱等を起こしたので、復旧においては再度災害防止の観点から16tブロックに重量アップした。

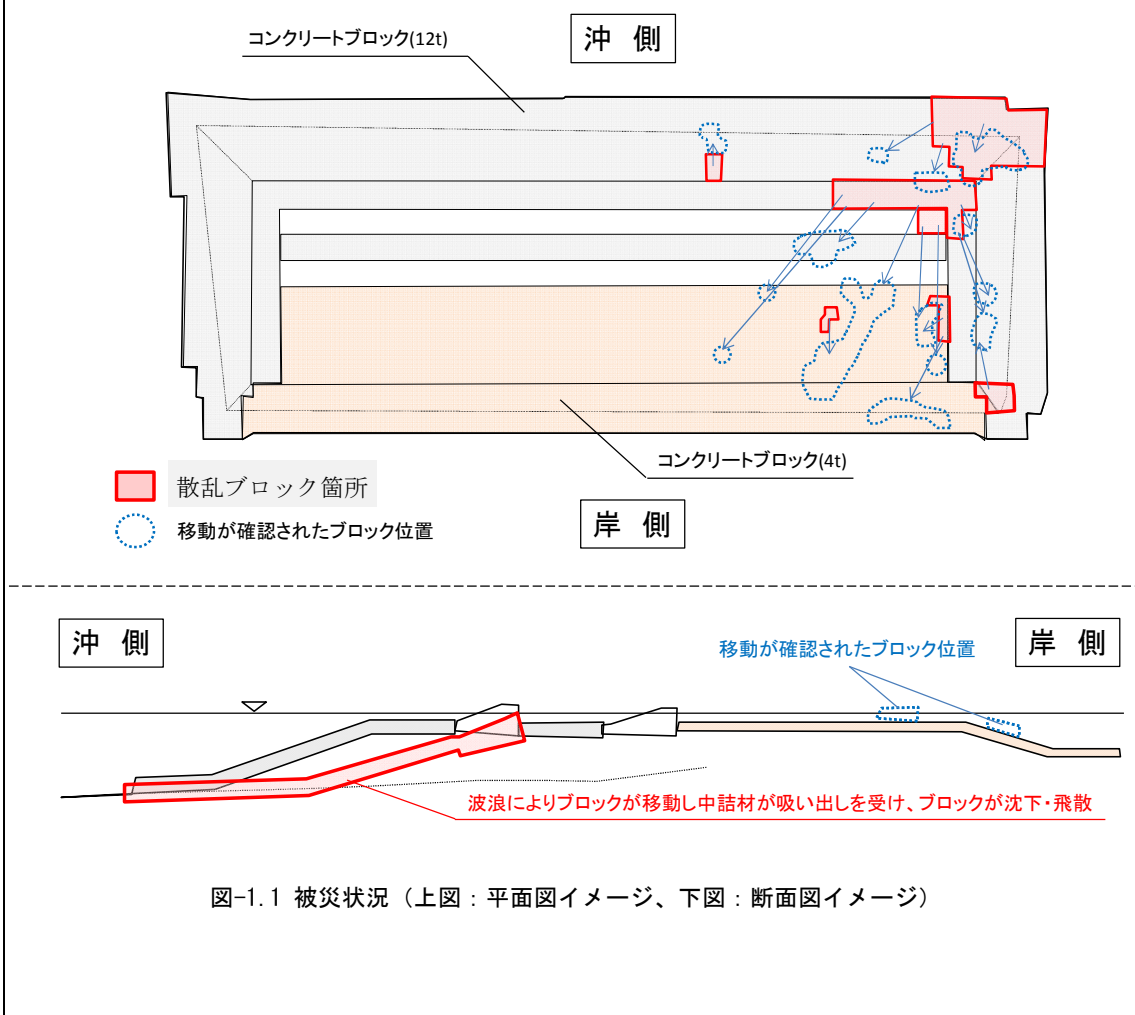


図-1.1 被災状況 (上図：平面図イメージ、下図：断面図イメージ)

<事例②>

B海岸では、2010年に高波浪（冬季風浪）により人工リーフ天端部ブロックが散乱する被災が発生した。沖波波高は $H_{0.1/3}=6.8\text{m}$ 、周期は $T_0=14$ 秒であり、設計波（8m）より小さい波浪（2010年11月～2011年3月の期間中最も大きい堤前位置での有義波高 4.51m）で、応急復旧していた 20t ブロックが被災した。堤脚水深 $h=8.4\text{m}$ 、波長 $L_i=123.4\text{m}$ であるので、相対水深 $h/L_i=0.068$ であった。復旧にあたっては、水理模型実験により再度災害が生じないことを確認したブロックを用いた。

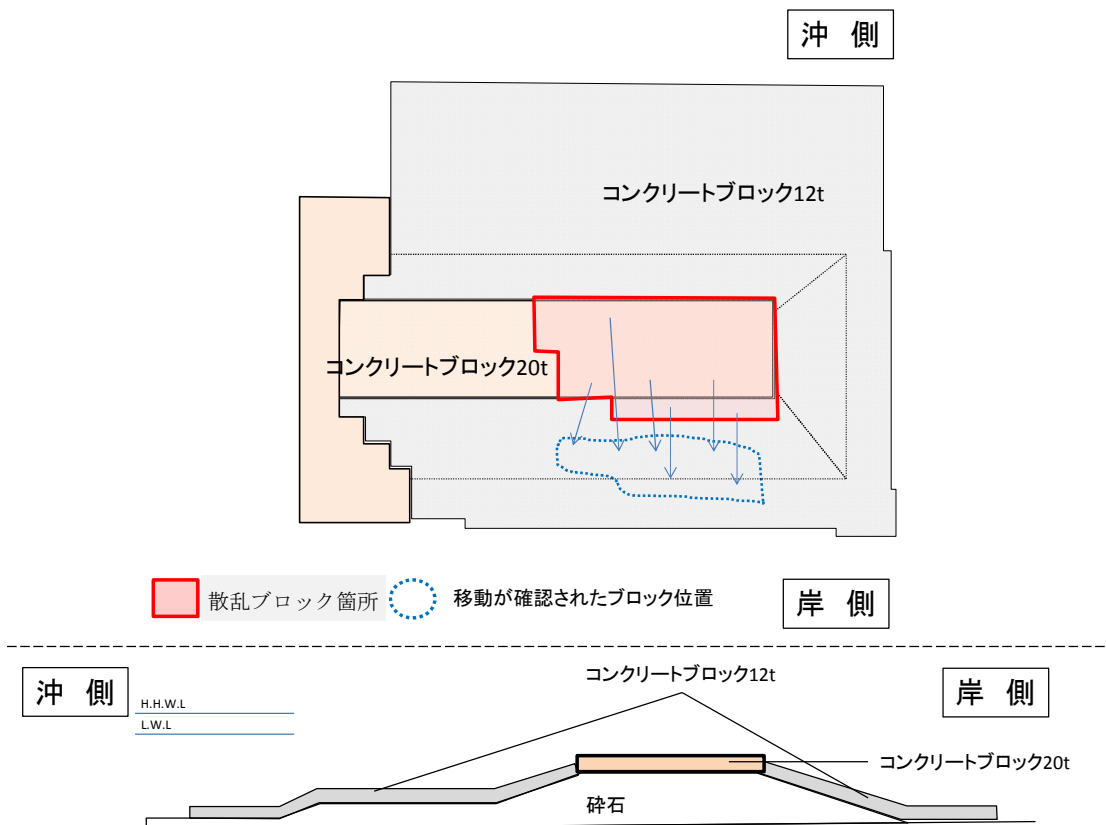


図-1.2 被覆ブロックの被災状況イメージ（上図）と代表断面図イメージ（下図）

<事例③>

C川河口に設置した人工リーフ（被覆ブロック重量 4t）の被覆ブロックが沈下・散乱する被災が発生した。被災メカニズムは高波浪の来襲により人工リーフ前面に局所洗掘が発生し、波高が増大しブロックに被災が生じたと推定される。設計波高 4.3m に対し、被災時の推定沖波波高 $H_{0,1/3}=5.94\text{m}$ 、周期 $T_0=8.2$ 秒であり、被災の推定堤前波高 4.0m（設計波高未滿）であった。推定の局所洗掘による堤脚水深 $h=6.8\text{m}$ 、波長 $L_i=62.4\text{m}$ であるので相対水深 $h/L_i=0.109$ であった。復旧にあたって再度災害防止の観点から安定性の高い 4t ブロック（被災ブロックの重量に換算すると 8t に相当）にランクアップした。

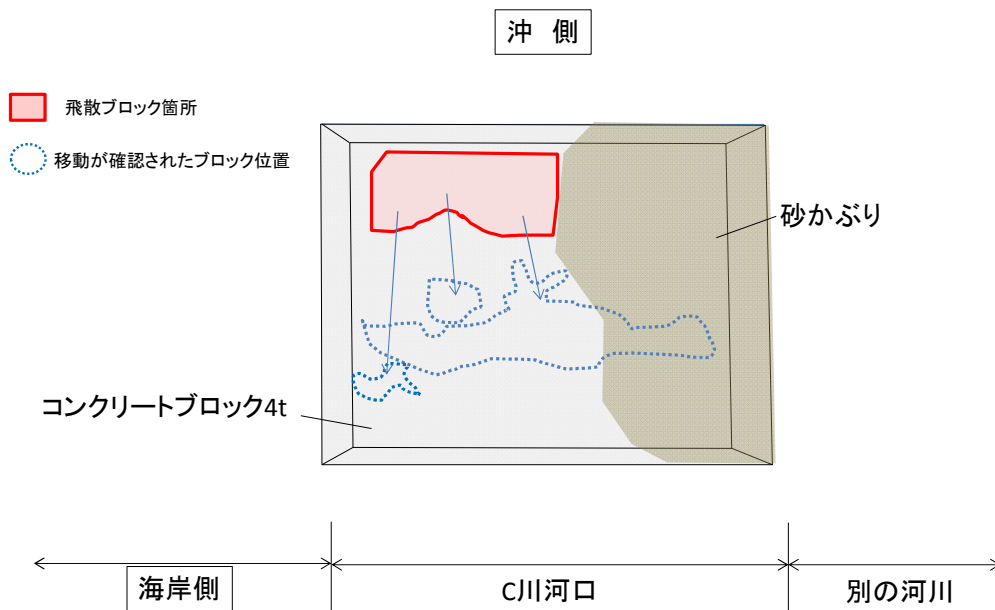


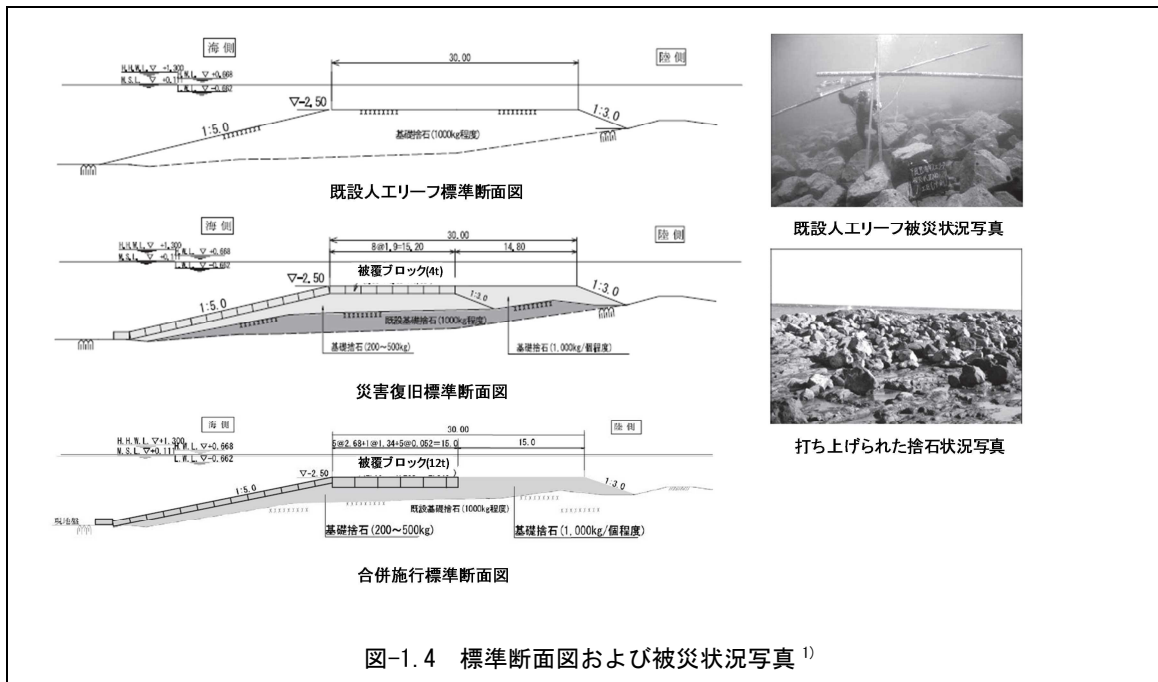
図-1.3 被災状況イメージ

（計画波以上の波高で被災した事例）<事例④> ¹⁾

D海岸では、2006年に設計換算沖波波高(3m)をはるかに上回る規模の波浪(4.8m)により人工リーフを構成していた捨石(1t/個程度)が海岸に打ち上げられる被災が発生した。被災時の沖波波高は $H_{0,1/3}=4.9\text{m}$ 、周期は $T_0=13.7\text{s}$ と推定される。また、その災害復旧の施工途中の2007年にも前回の来襲波を上回る規模の波浪(5.3m)により据付済みの天端ブロック(4t)が被災した。被災時の沖波波高は $H_{0,1/3}=5.6\text{m}$ 、周期は $T_0=14.6\text{s}$ と推定される。堤脚水深 $h=8.1\text{m}$ 、波長 $L_i=126.8\text{m}$ であるので、相対水深 $h/L_i=0.064$ であった。復旧にあたっては設計波浪を見直し、天端ブロック(12t)に重量アップした。

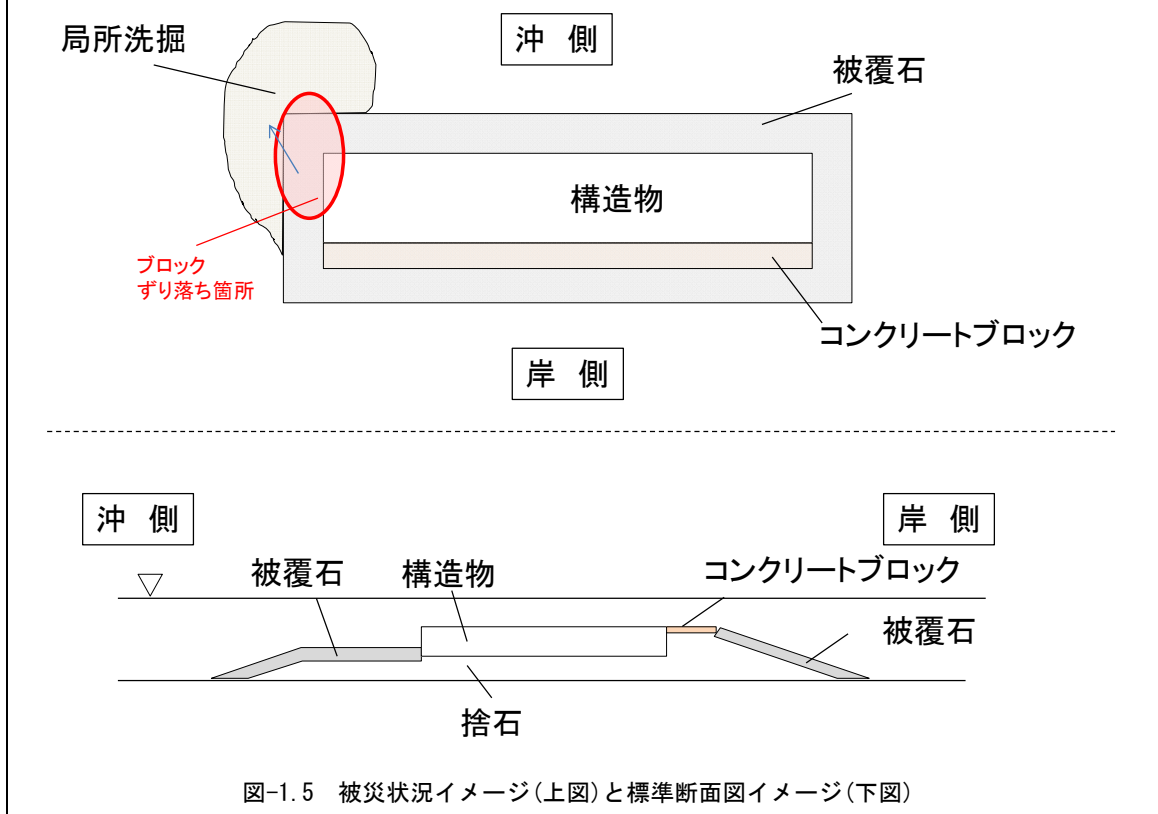
参考文献

- 1) 藤井洋介(2010), 平成21年度優秀災害復旧事業技術発表<優秀賞紹介> 平成18年災下風呂海岸災害復旧事業, 防災第732号, pp78-82, 平成22年6月1日,
<http://www.zenkokubousai.or.jp/monthly/image/no732high.pdf>



参考：地盤変状が起因して被災した事例<事例⑤>

E海岸では、2013年に冬季風浪により人工リーフ沖側端部の地形の侵食が進行し、前面波高が増大したことによりマウンドの崩壊と被覆石および被覆ブロックがずり落ちする被災が発生した。波条件は情報がなため記載しない。



○ ヒアリングの概要

No.	概 要
1	<p>A事務所 ヒアリング (実施日：平成26年6月6日)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 民間業者（メーカ）の責任として、品質証明は必須であり、その点でこのようなマニュアルはあった方がよい。 2. NETISは登録だけでなく、実績があれば評価する。 3. 実績を元にNsや必要重量が書いてあるとよい。
2	<p>B事務所 ヒアリング (実施日：平成26年7月8日)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 積算時、ブロック種類ごとに5種類（築造基準、土研式、手引き、ブレブナー・ドネリー式、ハドソン式）の所要質量を算定し最大値を整理している 2. ブロック選定については、経済性のみを指標とすると最も安いブロック1つに決まってしまうことを懸念する。経済性に加えて個別海岸の条件にあった指標を加えることが望ましいと考える。 たとえば、被覆面が平坦で凹凸なく漁船操船上の安全性が高いことや、法肩強化の工夫がある等が追加指標にあたるのではないかと。 3. 固定床実験で被災を全てカバーできるのか疑問である。被覆ブロック質量のランクアップによって安心感が得られるのが現状であるため、余地は残すべし 4. 人工リーフの被災について、潮位と波高が小さく、周期が長い波の条件で飛散するケースがある。法肩というわけではなく決まって飛ぶ列がある。砕波の打ち込み位置と関連があるとみている。 5. （手引きについて）洗掘防止マットの基準を示してほしい。現状は港湾の基準より決めているが、被災が起きている。人工リーフは堤脚水深が小さく、砂が移動する条件なので港湾とは場が違う。 6. 個別海岸の特徴を反映した人工リーフの設計・施工事例集があったら便利である。 7. （手引きについて）マウンド材についても記述の充実が期待される。当海岸ではマウンド材の捨石粒径が、手引きに記載されている粒径よりも小さな10～200kgだったが、石の抜けはみられなかった。
3	<p>C事務所 ヒアリング (実施日：平成26年7月18日)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 経済性以外の選定としては施工性も重要で、仮置時に重ね合わせられるか、どんな手間がかかるかも選定のポイントとなる。 2. （手引きについて）現場条件に合わせた選定方法があるということを記載してもらいたい。 3. 民間業者（ブロックメーカー）には、安定性の係数を示すときに今までのものとは違う係数であることを明示してもらいたい。 4. ブロック選定の評価軸は安定性と長寿命化（ひび割れによる劣化を懸念）となる。 5. ブロックの被災がなかったことよりも被災があったことを知りたい。被災があったところの検証実験を行い原因究明してもらいたい。

4	<p>D事務所 ヒアリング（実施日：平成26年7月18日）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 人工リーフの選定に際して、当海岸の外力・地形条件の元、水理模型実験を行い、安定性と所定の消波性能および水位上昇量の抑制効果が得られることを確認した上で採用されている。 2. （手引きについて）標識について種別、選定条件、種別ごとの設計方法や全国的な設置概要、メンテナンス等の参考事例の記載をしてもらいたい。 3. （手引きについて）全体的な施工計画について加筆してもらいたい。計画段階からブロックの製作基地、積み出し位置を入れるようにしなくては実態と合わない。 4. （手引きについて）侵食対策として標準断面を決定する際の対象外力や透過率の設定等について、これまでの実績を踏まえた具体的手法を記載してもらいたい。 5. （手引きについて）人工リーフ法先で発生する洗掘深について、設計地盤に見込む場合の考え方を記載してもらいたい。 6. （手引きについて）人工リーフ端部、側面、背後法面の被覆ブロックの所要重量の算定方法を記載してもらいたい。 7. （手引きについて）所要重量の5割増し（港湾の施設の技術上の基準・同解説：堤頭部の消波ブロック・混成堤マウンド被覆材）の実施基準、実施箇所の明確化をしてもらいたい。 8. 変状があることを前提で、維持管理ができる構造を当初から考えておくことが必要。 9. 安定係数を算出する際には、民間業者（メーカー）によっては狭い範囲の外力条件のみによって実験が行われており、当該海岸が対象外になる場合もある。そこで全国各地の波浪外力や地形条件に対応できるよう、幅広い外力条件で実験を実施する必要がある。
5	<p>E県 ヒアリング（実施日：平成26年7月18日）</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 地引き網漁業が行われる箇所のブロック選定においては、突起が無いタイプのブロックを選定し、漁業者の理解を得ていることがあるが、本当に網がひっかからないかは不明。 2. （手引きについて）中詰め材の最低厚さを記載してはどうか。中詰め材のかみ合わせを考慮すると、最低1m以上の厚さが必要ではないか。50cmだと1層となり上下のかみ合わせがない。

参考2

人工リーフ被覆ブロック波浪安定性能水理実験マニュアル作成 に関するヒアリング

【目的】

海岸管理者に人工リーフ被覆ブロックの選定等についてヒアリングを行い、人工リーフ被覆ブロック波浪安定性能水理実験マニュアルや現行の「人工リーフの設計の手引き」に関して意見を聞いて、マニュアル作成の参考とした。

【実施状況】

第1回 A事務所

実施日：平成26年6月6日

第2回 B事務所

実施日：平成26年7月8日

第3回 C事務所

実施日：平成26年7月18日

第4回 D事務所

実施日：平成26年7月18日

第5回 E県

実施日：平成26年7月18日

【付属資料】

- ・ヒアリングの概要

参考 3

国総研実施矩形ブロック水理模型実験

1. 実験条件

- ・ 実験水槽：長さ 35m、高さ 1.0m、幅 0.5m
- ・ 実験縮尺：1/45
- ・ 海底勾配：1/30
- ・ 人工リーフ断面図及び使用ブロック：

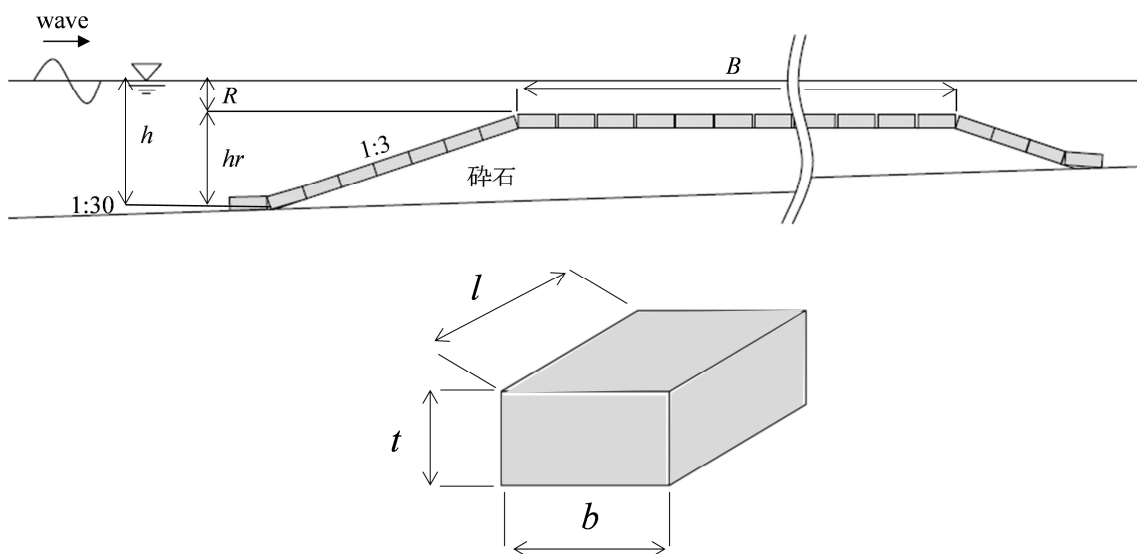


図-1 人工リーフ断面図（上）と使用ブロック形状

表-1 人工リーフ諸元とブロック諸元

人工リーフ高 hr	13cm
堤脚水深 h	14.1, 15.2, 19.6cm
天端水深 R	1.1, 2.2, 6.6cm
天端幅 B	119cm
法面勾配	1:3
ブロック模型	
質量 M	75.8g
寸法 幅 b × 長さ l × 高さ t	3.4cm×5.1cm×1.9cm
密度 ρ_r	2.3g/cm ³

- ・ 波浪条件：

実験波浪は不規則波とし、1 ケースの波作用時間は有義波周期の 1000 倍以上となるよう設定した。実験ケース（堤脚水深 h 、天端水深 R 、換算沖波 H_0' 、周期 T ）は表-2 に示す。

表-2 エアリー諸元とブロック諸元

No.	h (cm)	R (cm)	H_o' (cm)	T (s)
1	19.6	6.6	7.3	3.5
2			4.6	3.5
3			5.3	2.2
4	15.2	2.2	13.6	2.8
5			10.7	3.5
6			9.7	2.8
7			10.4	2.2
8			11.0	1.5
9			7.1	3.5
10			7.8	2.8
11			8.3	2.2
12			8.8	1.5
13			4.5	3.5
14			4.9	2.8
15	5.2	2.2		
16	14.1	1.1	7.1	3.5
17			4.5	3.5
18			5.2	2.2

2. 実験結果

2. 1 実験結果総括表

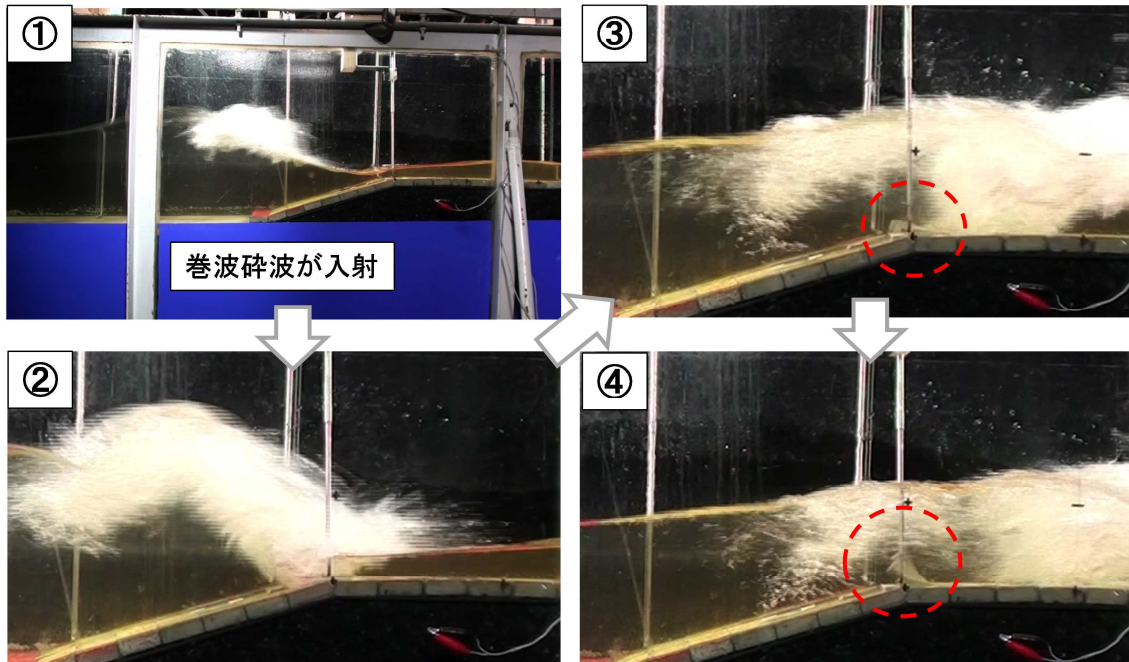
表-3 実験結果総括表

ケース	天端水深 R (cm)	N評価実験																				
		沖側波		換算沖波 波高 H_{02} (cm)	堤前波高 H_2 (cm)	堤前波長 L_2 (cm)	R/H_2	h/L_2	N_6 値	N_8 値	被害率 (%)	被災判定 ○:被災なし ×:被災	透過波高 H_1 (cm)	人工リーフ 岸側堤脚位置 の平均水深 \bar{h}_1 (cm)	波高伝達 率 K_t	人工リーフ背後 の水位上昇量 $\bar{\eta}_1$ (cm)	R/H_{02}'	B/L_{02}	H_{02}/L_{02}	h/H_{02}'	除波帯 内・外	
		波高 H_2 (cm)	周期 T_2 (s)																			実験値
		実験値	目標値	実験値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値	算定値
1	6.6 ($h=19.6$ cm)	8	3.5	3.5	7.3	12.6	478	0.52	0.041	5.26	145	14%	×	5.5	20.2	0.757	0.63	0.91	0.062	0.0038	2.70	除波帯内
2		5	3.5	3.5	4.6	8.8	478	0.75	0.041	3.69	50	0%	○	3.9	19.7	0.864	0.11	1.45	0.062	0.0024	4.31	除波帯外
3		5	2.2	2.2	5.3	6.4	297	1.03	0.066	2.68	19	0%	○	3.5	19.8	0.665	0.15	0.42	0.158	0.0070	3.73	除波帯外
4	2.2 ($h=15.2$ cm)	14	2.8	2.8	13.6	11.7	337.8	0.19	0.046	4.89	117	37%	×	4.9	18.3	0.362	3.13	0.16	0.097	0.0111	1.14	除波帯内
5		10	3.5	3.5	10.7	11.3	422.2	0.19	0.037	4.72	105	27%	×	4.7	18.2	0.442	2.97	0.21	0.062	0.0056	1.45	除波帯内
6		10	2.8	2.8	9.7	11.2	337.8	0.20	0.046	4.67	102	18%	×	3.9	17.5	0.398	2.27	0.23	0.097	0.0079	1.60	除波帯内
7		10	2.2	2.2	10.4	10.7	262.1	0.21	0.059	4.49	90	6%	×	4.0	17.7	0.385	2.52	0.21	0.158	0.0138	1.49	除波帯内
8		10	1.5	1.5	11.0	9.9	174.7	0.22	0.089	4.13	71	0%	○	2.7	17.2	0.241	1.97	0.20	0.339	0.0313	1.41	除波帯内
9		8	3.5	3.5	7.1	11.0	422.2	0.20	0.037	4.60	97	10%	×	3.8	17.3	0.525	2.14	0.31	0.062	0.0037	2.17	除波帯内
10		8	2.8	2.8	7.8	10.8	337.8	0.20	0.046	4.51	92	4%	×	3.4	17.6	0.441	2.42	0.28	0.097	0.0064	1.99	除波帯内
11		10	2.2	2.2	8.3	10.3	262.1	0.21	0.059	4.29	79	4%	×	3.2	17.2	0.381	1.98	0.26	0.158	0.0110	1.86	除波帯内
12		8	1.5	1.5	8.8	9.1	174.7	0.24	0.089	3.78	54	0%	○	2.1	16.7	0.239	1.52	0.25	0.339	0.0250	1.76	除波帯内
13		5	3.5	3.5	4.5	9.6	422.2	0.23	0.037	4.01	65	1%	×	2.4	16.3	0.531	1.1	0.49	0.062	0.0023	3.48	除波帯外
14		5	2.8	2.8	4.9	8.3	337.8	0.27	0.046	3.45	41	0%	○	2.3	16.4	0.466	1.24	0.45	0.097	0.0040	3.20	除波帯外
15	5	2.2	2.2	5.2	7.3	262.1	0.30	0.059	3.05	28	0%	○	2.0	16.4	0.382	1.16	0.42	0.158	0.0069	2.98	除波帯外	
16	1.1 ($h=14.1$ cm)	8	3.5	3.5	7.1	10.4	402.9	0.11	0.038	4.33	81	12%	×	3.2	16.5	0.445	2.44	0.15	0.062	0.0037	2.17	除波帯内
17		5	3.5	3.5	4.5	9.4	402.9	0.12	0.038	3.94	61	5%	×	2.8	16.0	0.628	1.93	0.25	0.062	0.0023	3.48	除波帯内
18		5	2.2	2.2	5.2	7.6	256.4	0.15	0.060	3.16	31	0%	○	1.9	15.8	0.355	1.72	0.21	0.158	0.0069	2.98	除波帯外

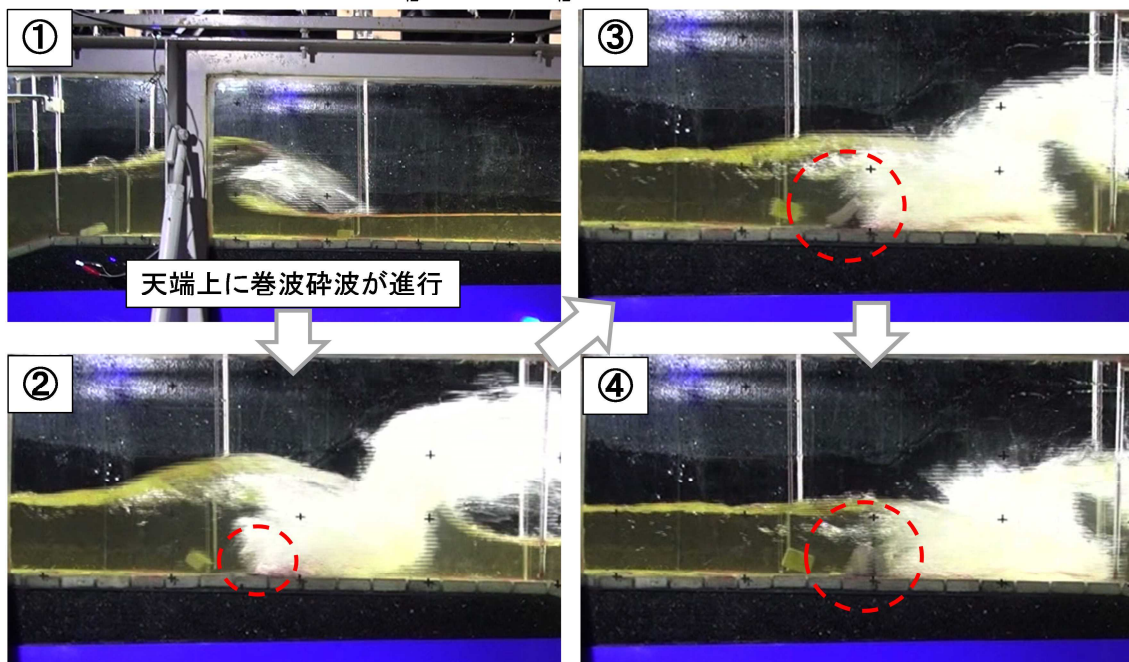
2. 2 初期被災状況

被災が発生したケースでみられた主な初期被災状況を以下に示す。ここで、ケース1は初期被災時に加えて巻き波砕波により天端ブロックが被災したものも示す。また、ケース7は初期被災時ではなく、波作用中に戻り流れにより被災した状況について示す。

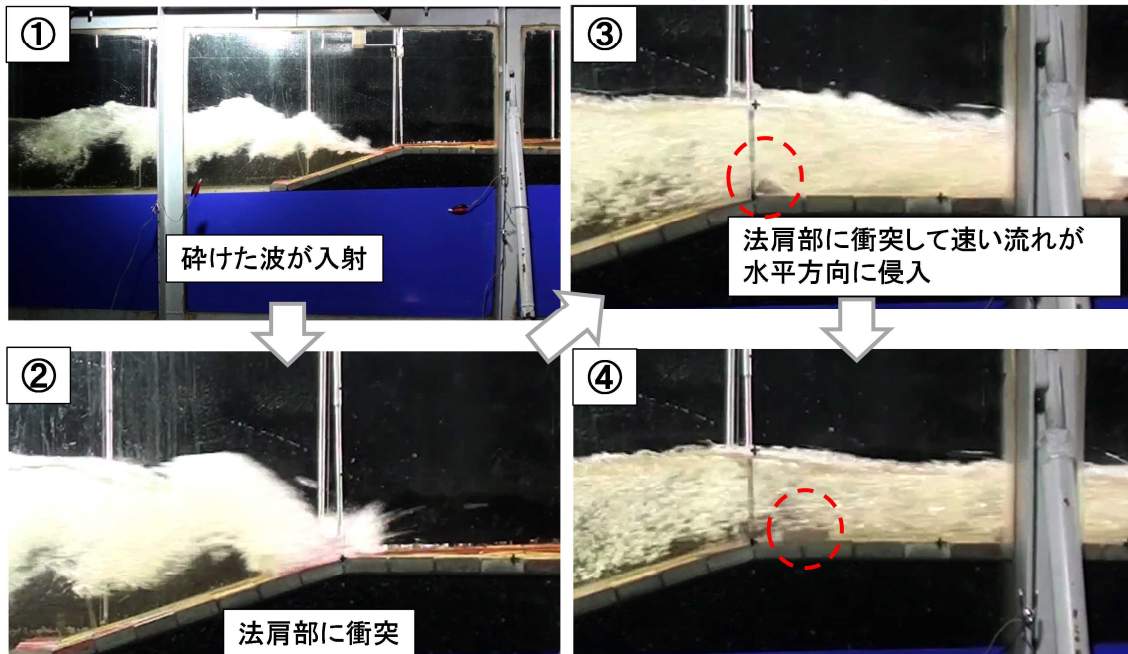
ケース1 : $h=19.6(\text{cm})$, $R=6.6(\text{cm})$, $H_{i2}=12.6(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{i2}=478(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.041$, $R/H_{i2}=0.52$



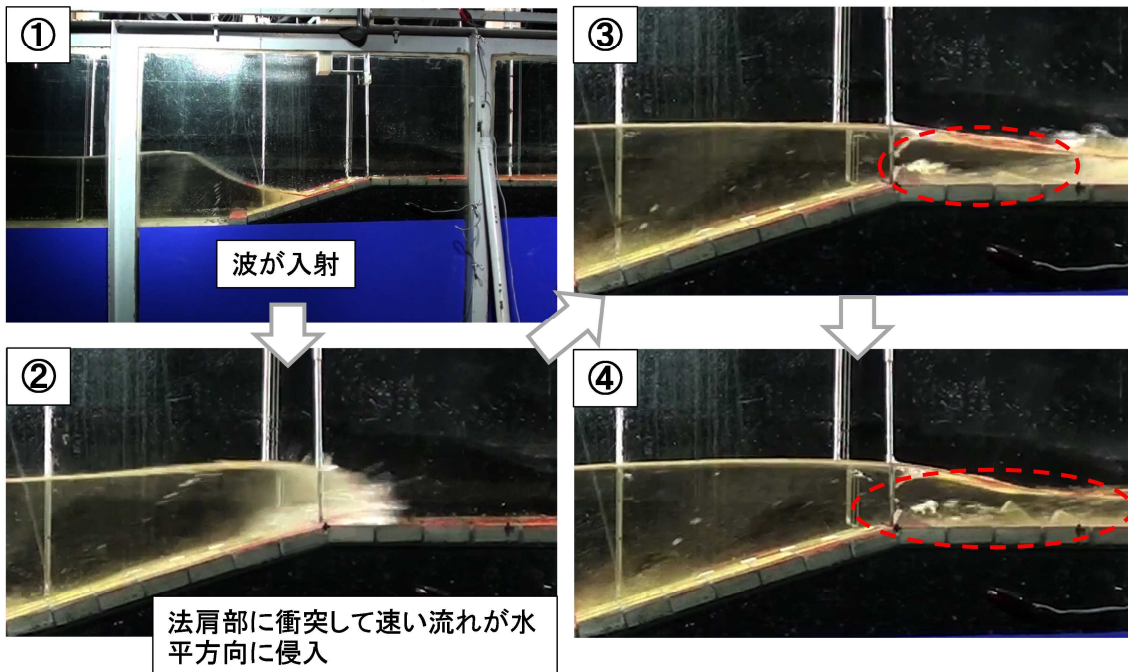
ケース1 (天端ブロック被災) : $h=19.6(\text{cm})$, $R=6.6(\text{cm})$, $H_{i2}=12.6(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{i2}=478(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.041$, $R/H_{i2}=0.52$



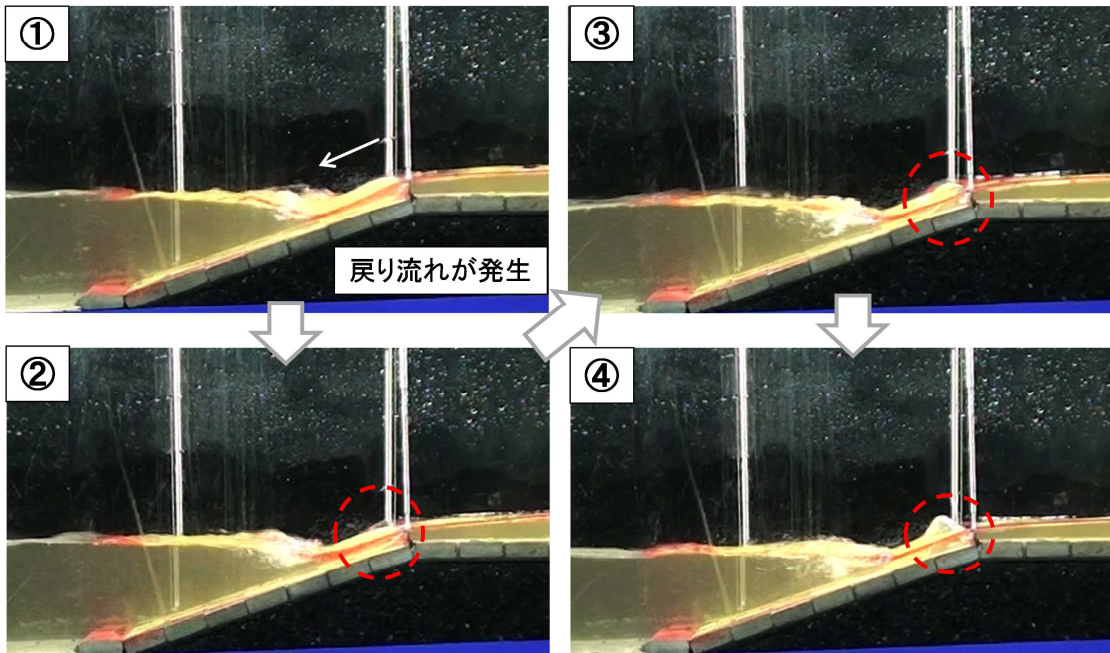
ケース4: $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{i2}=11.7(\text{cm})$, $T_2=2.8(\text{s})$, $L_{i2}=337.8(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.046$, $R/H_{i2}=0.19$



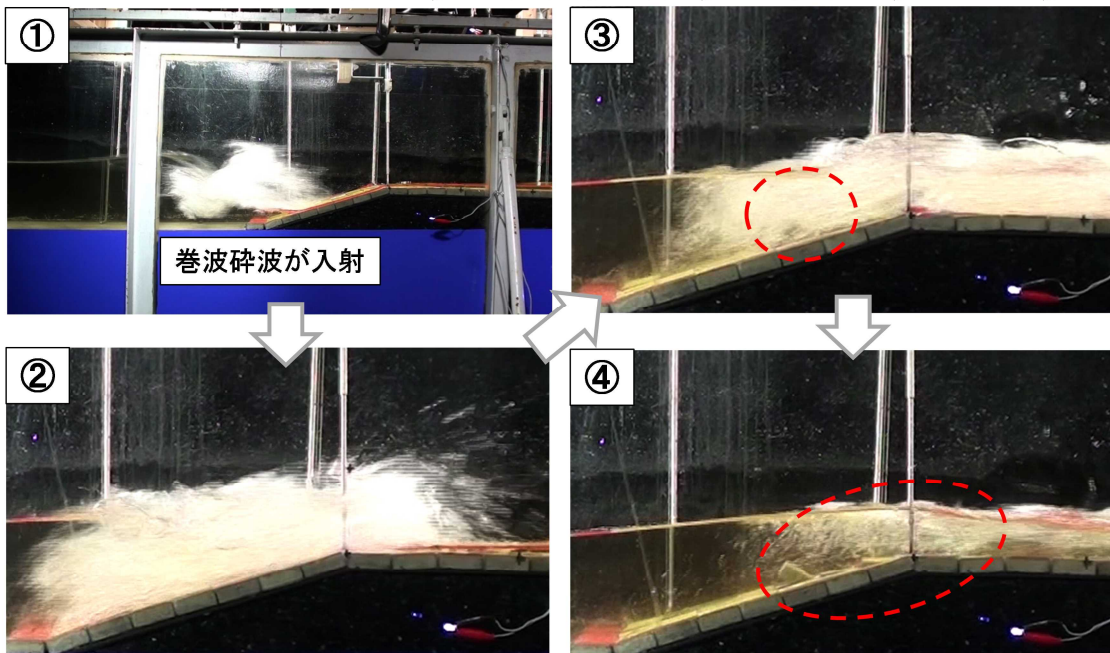
ケース5: $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{i2}=11.3(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{i2}=422.2(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.037$, $R/H_{i2}=0.19$



ケース7 : $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{i2}=10.7(\text{cm})$, $T_2=2.2(\text{s})$, $L_{i2}=262.1(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.059$, $R/H_{i2}=0.21$



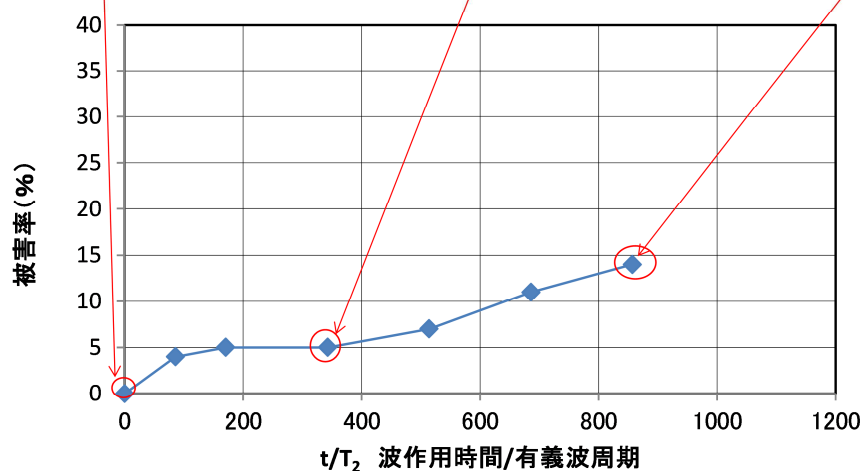
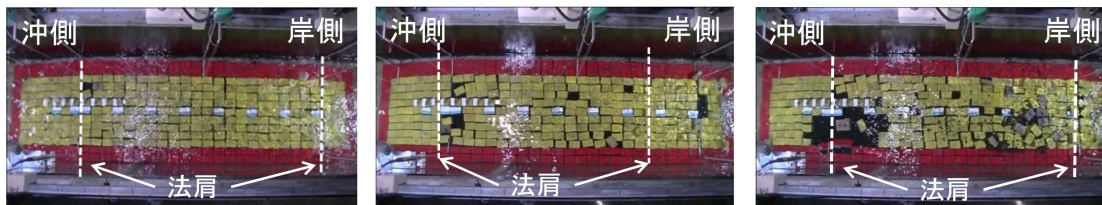
ケース16 : $h=14.1(\text{cm})$, $R=1.1(\text{cm})$, $H_{i2}=10.4(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{i2}=402.9(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.038$, $R/H_{i2}=0.11$



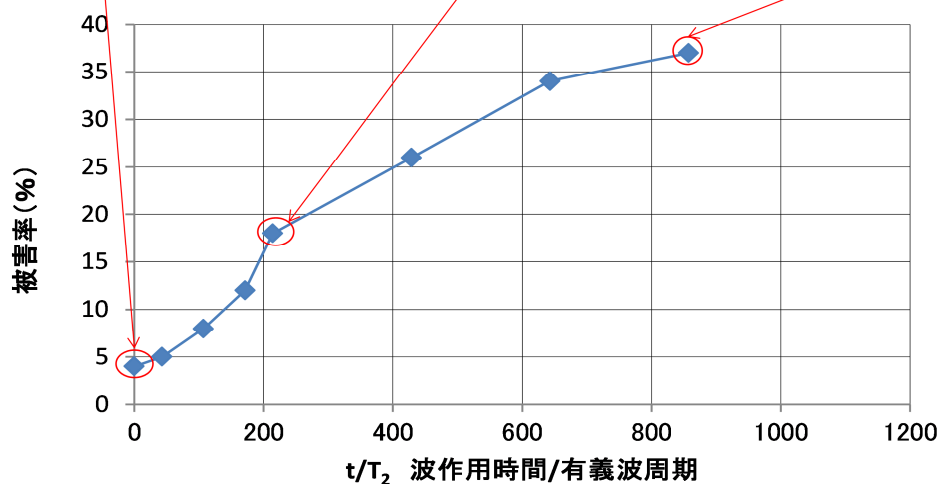
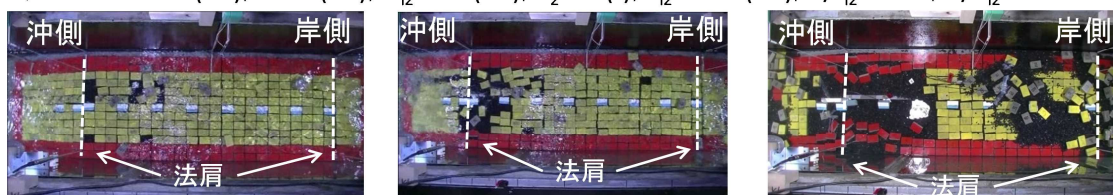
2. 3 変状連鎖

被災が発生したケースでみられた主な変状連鎖を示す。以下には、被害率（全設置ブロック個数と被災個数の比）の推移を波作用時間と有義波周期の比 t/T で整理したものにあわせて、人工リーフ真上からの状況写真を示している。

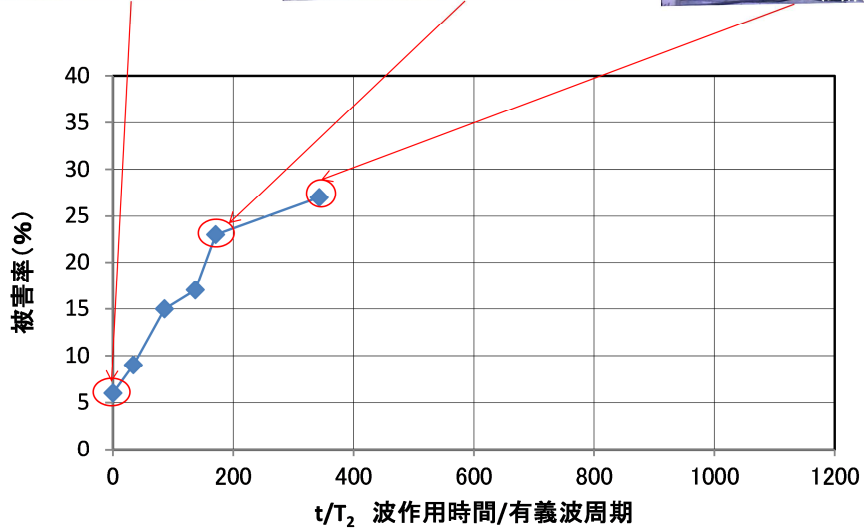
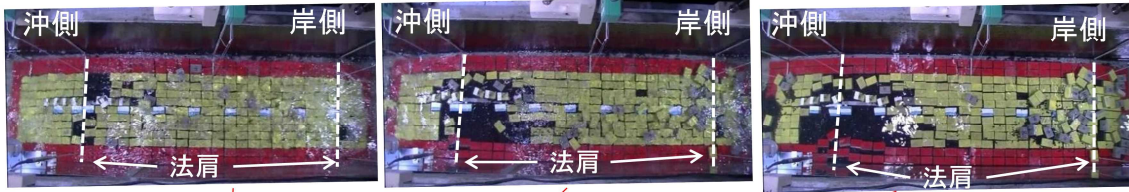
ケース1: $h=19.6(\text{cm})$, $R=6.6(\text{cm})$, $H_{12}=12.6(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{12}=478(\text{cm})$, $h/L_{12}=0.041$, $R/H_{12}=0.52$



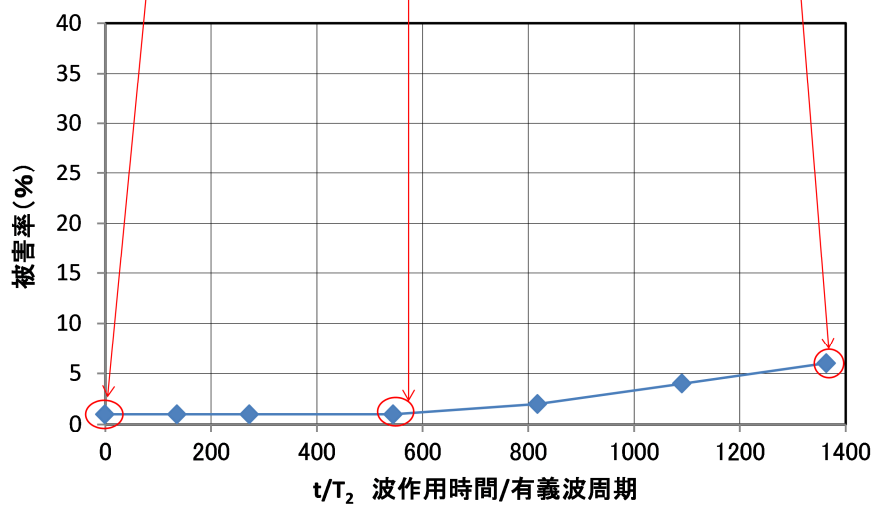
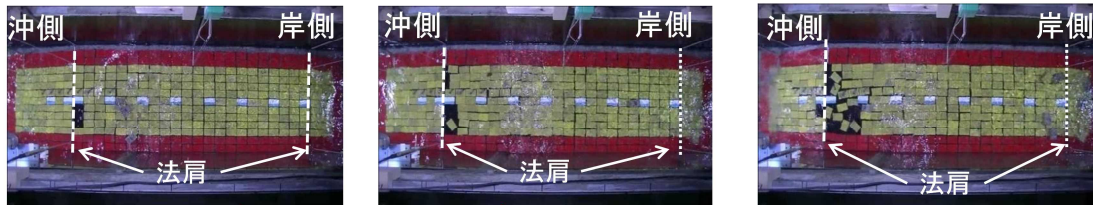
ケース4: $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{12}=11.7(\text{cm})$, $T_2=2.8(\text{s})$, $L_{12}=337.8(\text{cm})$, $h/L_{12}=0.046$, $R/H_{12}=0.19$



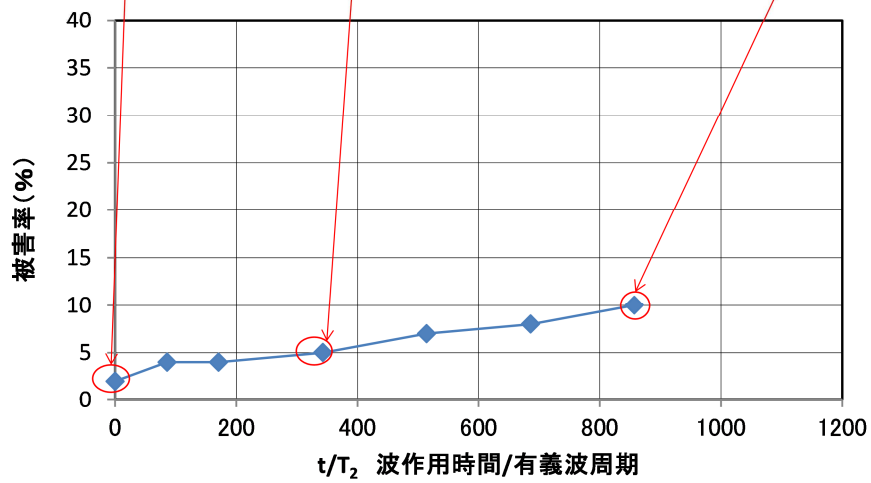
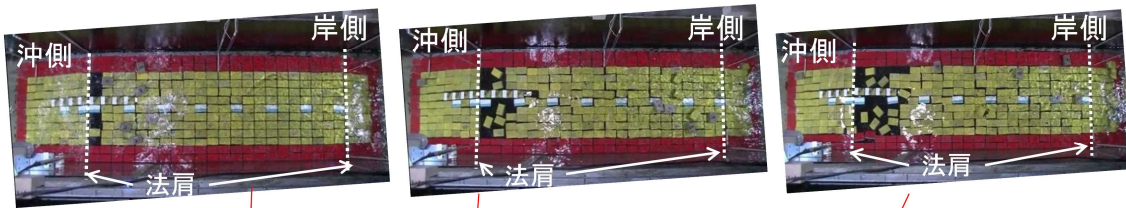
ケース5: $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{12}=11.3(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{12}=422.2(\text{cm})$, $h/L_{12}=0.037$, $R/H_{12}=0.19$



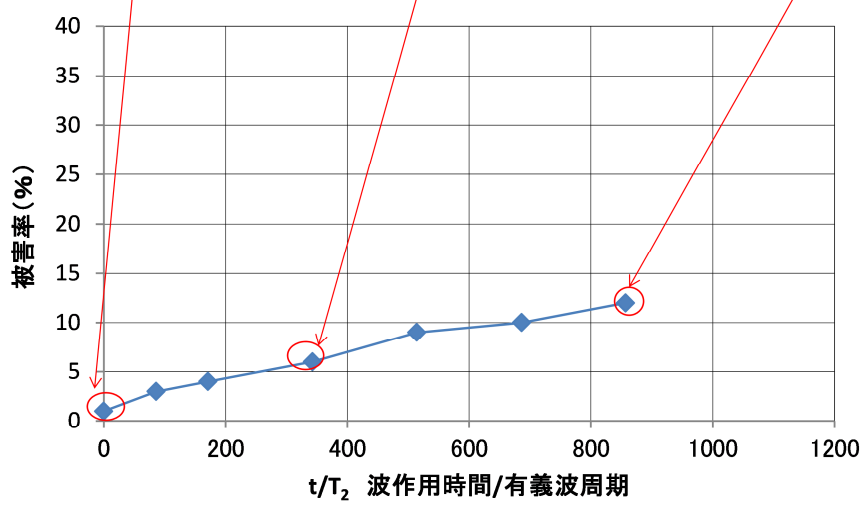
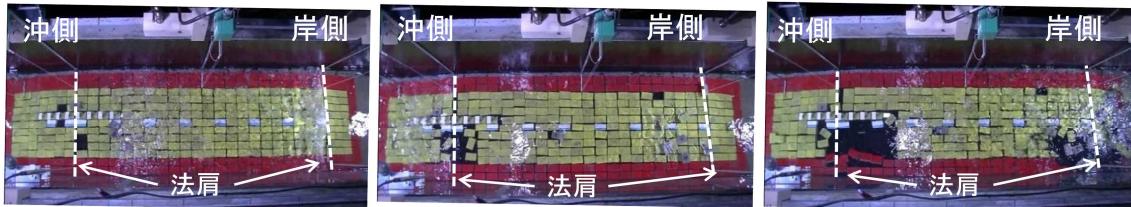
ケース7: $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{12}=10.7(\text{cm})$, $T_2=2.2(\text{s})$, $L_{12}=262.1(\text{cm})$, $h/L_{12}=0.059$, $R/H_{12}=0.21$



ケース9: $h=15.2(\text{cm})$, $R=2.2(\text{cm})$, $H_{i2}=11(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{i2}=422.2(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.037$, $R/H_{i2}=0.2$



ケース16: $h=14.1(\text{cm})$, $R=1.1(\text{cm})$, $H_{i2}=10.4(\text{cm})$, $T_2=3.5(\text{s})$, $L_{i2}=402.9(\text{cm})$, $h/L_{i2}=0.038$, $R/H_{i2}=0.11$



人工リーフ変状連鎖に及ぼす 砕波と設置位置の関係

中村 英輔¹・野口 賢二²・岩佐 隆広³・二瓶 功⁴・伊藤 幸義⁵
・諏訪 義雄⁶

¹元国土技術政策総合研究所 交流研究員 (株式会社不動テトラ) (〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町2-7)
E-mail:eisuke.nakamura@fudotetra.co.jp

^{2,6}正会員 国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地)

^{3,4,5}正会員 株式会社建設技術研究所 研究センターつくば (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1047-27)

人工リーフは天端が没水した施設であり、点検が容易でないので、効率的な点検・維持管理を行う上で、あらかじめ変状連鎖を知っておくことは重要であると考えられる。また、砕波帯の内外で人工リーフの変状連鎖が異なると考えられる。本研究は、水理実験を行って人工リーフの変状連鎖について整理し、砕波と人工リーフ設置位置の関係が及ぼす影響についても考察した。砕波帯内と考えた領域で被覆ブロックの被災が発生しており、砕波帯内に人工リーフが設置された条件はブロックの安定性に対して厳しい条件であると考えられる。

Key Words : process of expansion of the damage, submerged breakwaters, surf zone, wave breaking, flow

1.はじめに

近年、社会資本の維持管理が推進されてきており、海岸保全施設である人工リーフについても取り組んでいく必要がある。人工リーフは天端が没水した施設であり、景観の点では優れているが、点検が容易ではない。効率的な点検・維持管理を行う上で、あらかじめ波作用による人工リーフの変状連鎖を知っておくことは重要であると考えられる。

しかしながら、現在までに実施されてきた人工リーフ被覆ブロックの波浪安定性に関する実験的な検討においては、被覆ブロックの被災を確認しているものは多い(たとえば浅川ら¹⁾、田中ら²⁾) が、初期被災から被災が拡大していく過程について検討している例は見当たらなかった。

また、砕波帯と人工リーフ設置位置の関係によって、人工リーフの変状連鎖が異なると考えられる。これは人工リーフ近傍の流速に着目すると、砕波帯の外は波浪で決まる場であり、波浪による水粒子速度のみの速度成分である。一方、砕波帯の中では波浪と砕波による乱れた流れが混在している場であるため、波浪による水粒子速度に加えて、流れの速度を加えた速度成分となる。したがって、流速の傾向が異なると推定されるためである。

本研究は、水理実験を行って人工リーフ被覆ブロックの被害率を整理し、変状連鎖について検討した。また、砕波帯と人工リーフ設置位置の関係が人工リーフの変状連鎖に及ぼす影響についても考察した。

2. 水理模型実験

実験は、実験水槽(長さ35m、高さ1.0m、幅0.5m)内に勾配1/30のモルタル床を造り、その上に人工リーフ模型を設置して行った。図-1に人工リーフ断面図とブロック形状を示す。ブロック模型は矩形形状を使用した。マウンド材は、現地量で10~500kg/個に相当する石を使用した。表-1に実験条件を示す。波は不規則波を作用させて、1ケースの波作用時間は有義波周期の1000倍以上と

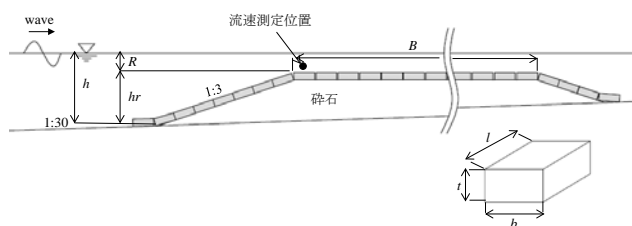


図-1 人工リーフ断面図とブロック形状

なるよう設定した。実験ケースは表-2に示す。堤脚水深 h と天端水深 R とともに3種類とし、換算沖波波高 H_o' と周期 T を組み合わせた18ケースとした。また、堤脚水深位置での有義波高 H_i と、波形勾配 H_o'/L_o と、堤脚水深と換算沖波波高の比 h/H_o' および被害率を併記してある。実験は、ブロックとマウンド材の変状を観察し、水位およびブロック表面上の流速の測定を行った。流速の測定は電磁流速計で行い、測定位置は図-1に示しており、ブロックの表面から鉛直方向に0.5cm離れた位置とした。測定箇所を決めるにあたり、人工リーフのブロックは沖側天端法肩部より被災が発生することが知られているため、沖側天端法肩とした。サンプリング間隔を0.01sとした。

(1) 人工リーフの変状連鎖

表-2に示す実験ケースのうち、ブロックの被災が確認された11ケースについて、人工リーフの変状連鎖を整理した。観察された変状連鎖例として、図-2に被災範囲が広がったケース4について示す。図-2には、被害率（全設置ブロック個数と被災個数の比）の推移を波作用時間と有義波周期の比 t/T で整理したものにあわせて、人工リーフ真上からの状況写真を示してある。それぞれ左から $t/T=0$ （被災直後）、 $t/T=214$ （被災直後から10分後）、 $t/T=429$ （被災直後から20分後）、 $t/T=857$ （被災直後から40分後）の状況である。なお、本実験では転動（めくれ）、滑動（ブロック岸沖方向長の1/2以上水平移動）、沈下・回転（ブロックの厚さの1/2以上の不陸による沈下・回転）を被害ブロックとして計上した。また、図-3と図-4に被災が確認された全ケースについて被害率を t/T で整理したものを示す。図-3には測定終了時に被害率が10%以上であったケースを、図-4には測定終了時に被害率が10%未満であったケースを示す。

図-2と図-3および図-4より、ブロックは数波の波で大きな被害が発生するのではなく、波が作用していくにし

たがい被災が拡大していくことがわかった。また図-4より、ケース10と11と13は被害の推移が落ちついてきており、波浪条件によっては人工リーフ沖側法肩部のブロックが数個程度の被災はするが、変状が小さく、波浪低減効果に影響しないものがあり得ることがわかった。ただこのような場合でも、人工リーフはブロックが被災する

表-1 実験条件

海底勾配	1:30
人工リーフ高 h_r	13cm
堤脚水深 h	14.1, 15.2, 19.6cm
天端水深 R	1.1, 2.2, 6.6cm
天端幅 B	119cm
法面勾配	1:3
波種類	不規則波
ブロック模型	
質量 M	75.8g
寸法 幅 b × 長さ l × 高さ t	3.4cm × 5.1cm × 1.9cm
密度 ρ_r	2.3g/cm ³

表-2 実験ケースおよび被災の有無

No.	h (cm)	R (cm)	H_o' (cm)	T (s)	H_i (cm)	H_o'/L_o	h/H_o'	被害率
1	19.6	6.6	7.3	3.5	12.6	0.004	2.70	14%
2			4.6	3.5	8.8	0.002	4.31	0%
3			5.3	2.2	6.4	0.007	3.72	0%
4	15.2	2.2	13.6	2.8	11.7	0.011	1.12	37%
5			10.7	3.5	11.6	0.006	1.42	27%
6			9.7	2.8	11.2	0.008	1.57	18%
7			10.4	2.2	10.7	0.014	1.46	6%
8			11.0	1.5	9.9	0.031	1.38	0%
9			7.1	3.5	11.0	0.004	2.13	10%
10			7.8	2.8	10.8	0.006	1.96	4%
11			8.3	2.2	10.3	0.011	1.82	4%
12			8.8	1.5	9.1	0.025	1.73	0%
13			4.5	3.5	9.6	0.002	3.40	1%
14			4.9	2.8	8.3	0.004	3.13	0%
15	5.2	2.2	7.3	0.007	2.92	0%		
16	14.1	1.1	7.1	3.5	10.4	0.004	1.97	12%
17			4.5	3.5	9.4	0.002	3.16	5%
18			5.2	2.2	7.6	0.007	2.71	0%

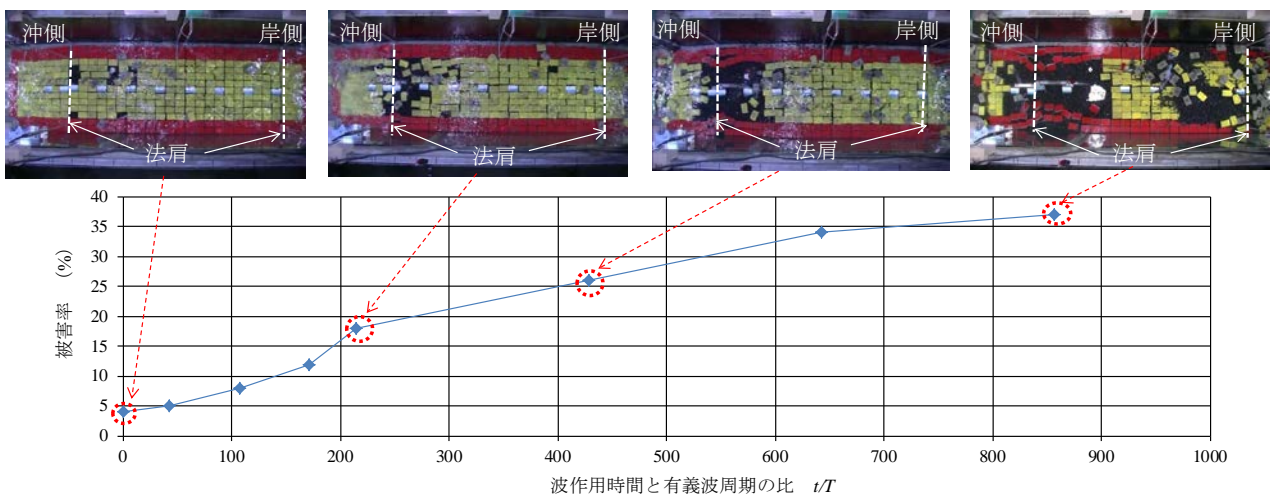


図-2 被害率の推移（ケース4： $R=2.2$ cm, $H_i=11.7$ cm, $T=2.8$ s）

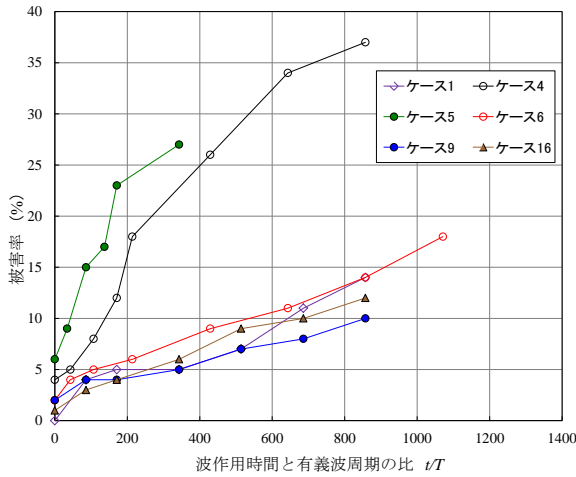


図-3 被害率の推移（被害率が10%以上）

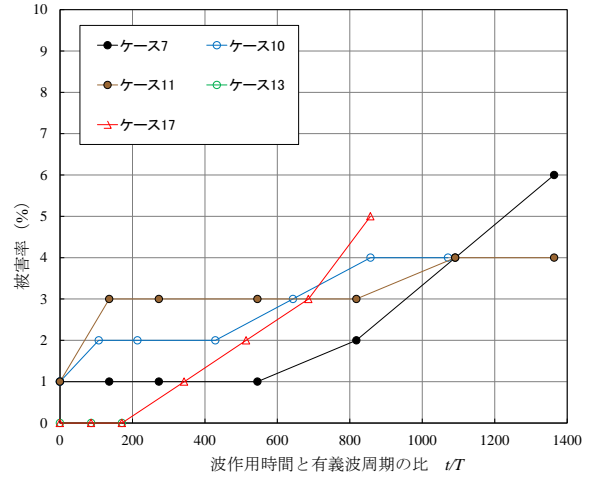


図-4 被害率の推移（被害率が10%未満）

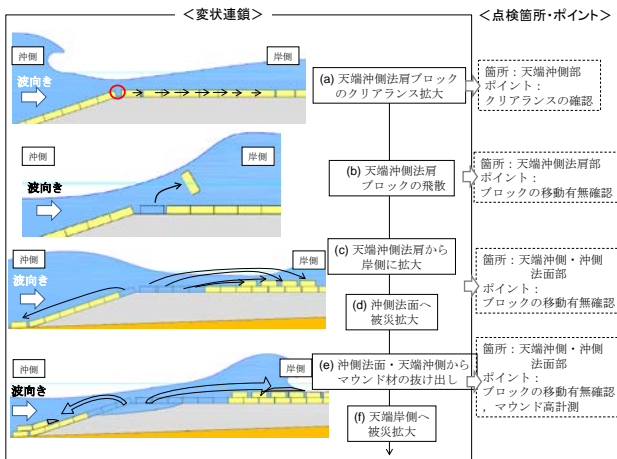


図-5 変状連鎖図

前よりも構造的に弱くなっているのので、復旧は必要と考える。

(2) 変状連鎖図の作成

図-5には、実験で観察された変状連鎖から変状連鎖図を作成し、それぞれの状態のときに考えられる点検箇所・ポイントを加えたものである。人工リーフの初期被災は多くのケースにおいて、図-5(a),(b)に示すような天端沖側法肩ブロックのクリアランス拡大により、天端沖側法肩部のブロックが飛散することで発生した。また大半のケースで、被災の拡大過程は天端岸側へ被災が拡大していき、途中から沖側法面へも拡大し、ブロックが被災した箇所よりマウンド材の抜け出しが発生し、天端沖側の天端水深が大きくなると岸側へ被災が拡大していくことがわかった。表-3には、実験ケースの最終的な変状が図-5に示す変状段階(a)~(f)のどこに当たるかを示してある。図-5および表-3のようなものを整理しておけば、現地においてどのような波浪条件のときにどのような変状が発生するか目安をつけられるので、点検が必要かどうか

表-3 各ケースの最終的な変状段階

最終的な変状段階	ケースNo
(a)	2,3,8,12,14,15,18
(b)	13
(c)	7,9,10,11
(d)	無
(e)	1,5,6,16
(f)	4

※ No.17は、天端沖側法肩ブロック飛散後、沖側法面部へ被災拡大

かの判断や点検箇所の絞り込みによる作業の効率化に役立てることができる。また、ブロック形状によって、変状連鎖が異なる可能性もあるので、ブロック形状で変状連鎖を整理することが必要となる。

(3) 砕波帯と人工リーフ設置位置の関係

人工リーフ設置位置が砕波帯の内外にあることで、ブロックの安定性に及ぼす影響を調べるため、被害率を整理した。また、観察された初期被災状況を説明し、ブロックに作用する力の関係からブロックの安定性について考察した。

a) 砕波帯内外での人工リーフ被覆ブロックの被害率

図-6にブロックの被害率を、波形勾配 H_0/L_0 と、堤脚水深と換算沖波波高の比 h/H_0' の関係により整理した。図中には、合田の砕波帯内の有義波高の算定図³⁾より、海底勾配1/30のときに砕波帯内で有義波高 $H_{1/3}$ が最大値を示す h/H_0' の値を結んだ曲線を引いており、この曲線より上の領域は人工リーフ設置位置を砕波帯外とした条件、下の領域を砕波帯内とした条件と考えてよい。図-6より、ほぼ砕波帯内でブロックは被災したが、 $H_0/L_0 \geq 0.025$ のケース8と12では被災の発生は確認できなかった。プロ

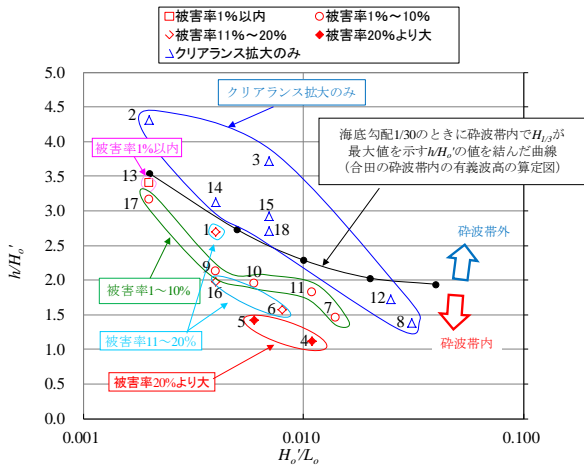


図-6 堤脚水深と換算沖波波高比 hH_0' と波形勾配 H_0'/L_0 による被覆ブロックの被害率 (図中の数字はケース No)

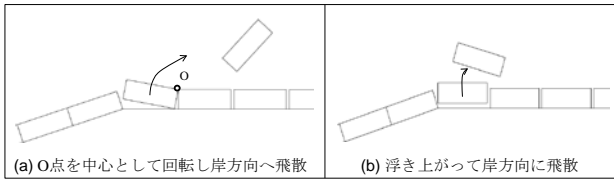


図-7 初期被災状況

ックの被害率は、 hH_0' および H_0'/L_0 が小さいほど、大きいことがわかった。

b) 被覆ブロックの初期被災状況

観察された初期被災状況を図-7に示し、写真-1に図-7(a)の実験で観察された状況を示す。被災が確認された11ケースのうち、ケース1は図-7(b)に示すようにブロックが鉛直方向に浮き上がって岸方向に飛散する被災であったが、その他のケースは図-7(a)に示すように岸側に隣接するブロックの沖側上端(図-7(a)のO点)を中心として回転し、岸方向へ飛散する被災であった。これより、天端沖側法肩ブロックの周辺流れからブロックに作用する力を推定し、安定実験の結果と比較し、砕波帯内外の水理場の違いを考察する。まず、水平流速による揚力を算定し、ブロックが浮き上がる条件であったかを確認した。

c) 被覆ブロックの浮き上がり頻度

ブロック直上の水平流速の測定結果を用いて、モリソン式により揚力 F_L を算定し、ブロック水中重量との比較から浮き上がる条件となる水平流速の頻度を整理した。揚力係数 C_L は、田村ら⁴⁾の張ブロック平板の値を参考にして0.25とした。

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho_w A_t u^2 \quad (1)$$

$$F_L > (\rho_r - \rho_w) V g \quad (2)$$

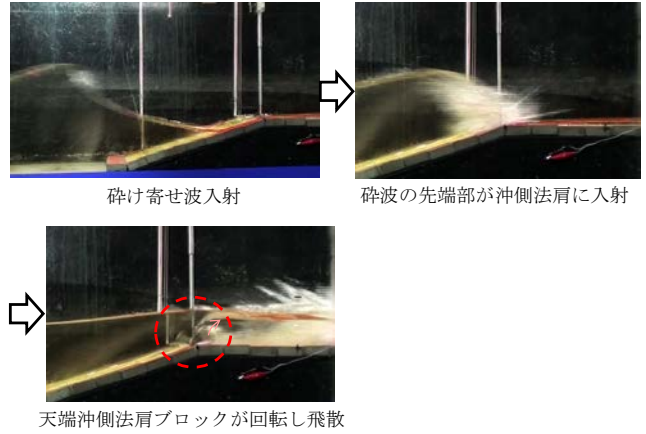


写真-1 初期被災状況 (図-7(a)の被災状況: ケース 10)

表-4 浮き上がり回転型被災となる頻度および被害率

No.	$u \geq 1.4(\text{m/s})$ の頻度	回転頻度		0~600(s) の被害率
		F_M 考慮	F_M 考慮し ない	
1	18	3	0	1.0%
2	0	0	0	0.0%
3	0	0	0	0.0%
4	163	65	33	18.0%
5	133	81	39	23.0%
6	60	48	23	6.0%
7	123	83	33	1.0%
8	76	57	23	0.0%
9	134	60	45	4.0%
10	95	39	14	6.0%
11	139	74	37	3.0%
12	46	28	13	0.0%
13	17	16	3	0.0%
14	12	7	0	0.0%
15	4	1	0	0.0%
16	103	90	33	4.0%
17	63	34	11	1.0%
18	12	5	0	0.0%

ここで、 A_t と V は被覆ブロックの鉛直方向の投影面積および体積、 u は水平流速、 ρ_w と ρ_r は水とブロックの密度、 g は重力加速度である。式(1)と式(2)より、水平流速 u が 1.4m/s 以上であるときに被覆ブロックが浮き上がる条件となる。算定対象時間は、0~600秒間(60000データ)とした。表-4に各ケースで計測された水平流速 u が 1.4m/s 以上の頻度および0~600秒間の被害率を示す。水平流速 u が 1.4m/s 以上となる頻度について、0~600秒間で被害がなく砕波帯外となる条件(ケース2, 3, 14, 15, 18)は10以下であり、砕波帯内となる条件は砕波帯の境界に近い条件(ケース1, 13)を除くと20以上であり、砕波帯内のほうが浮き上がる危険が高く、厳しい水理場であるといえる。一方、砕波帯内となる条件で被害のなかったケース8と12は、他の被害のあったケースと同等程度であるが、浮き上がり頻度の差がみられなかった。

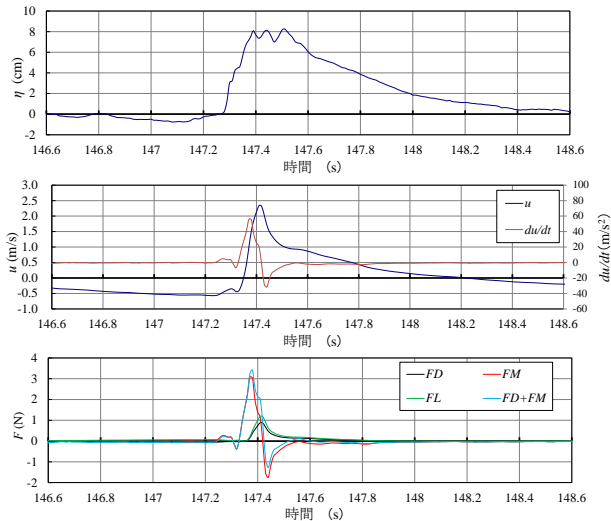


図8 被覆ブロック付近の水位，水平流速，加速度，被覆ブロックに作用する流体力（ケース4）

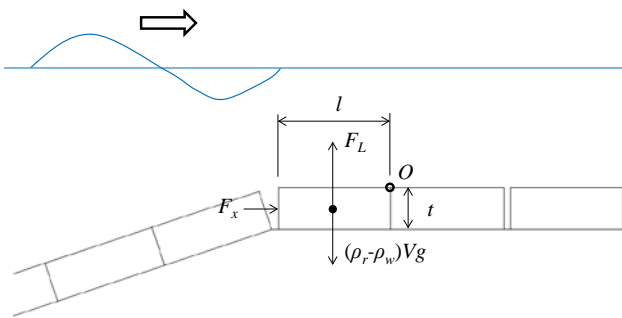


図9 ブロックに作用する力のつり合い

次に，図-7(a)に示す流体力によるO点を中心としたモーメントのつり合いを整理して，ブロックが回転して飛散するための条件を導出し，被災となる頻度を確認した。

d) 被覆ブロックの回転型被災の頻度

図-8にブロック周辺の水位と流速を測定した結果およびモリソン式で算定した流体力（抗力 F_D ，慣性力 F_M ，揚力 F_L ）を，代表として実験ケース4の結果について示す。ブロックの抗力係数 C_D は田村ら⁴⁾の張ブロック平板の値を参考にして0.5に，慣性力係数 C_M は立方体⁵⁾とみなして1.67とした。図-8には，上から順にブロック直上の水位，水平流速と加速度，ブロックに作用する抗力と慣性力と揚力の時系列を示す。水平流速と加速度と抗力と慣性力は岸向きを正，揚力は上向きを正とした。図-8は，写真-1に示すような碎波が人工リーフに入射してきたときの状況である。ブロックに作用する水平方向の力を見ると，慣性力のピーク値が抗力のピーク値と比べて大きく，抗力と慣性力の合力が安定性に影響していると考えられる。水位をみると，引き波時は水平流速と加速度ともに小さいが，押し波時に両者とも急に大きくなっており，押し波時の方がブロックの安定性に対して厳しい条

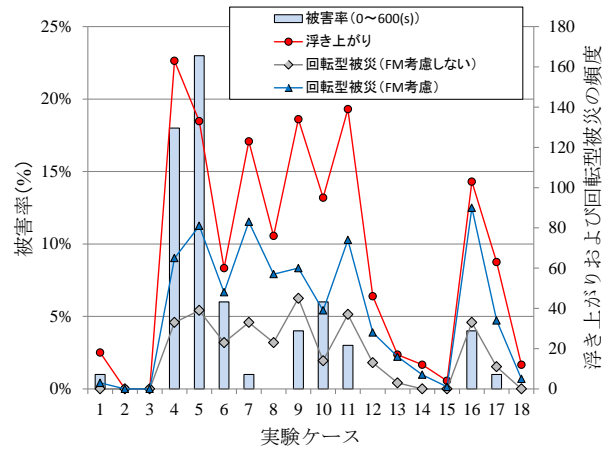


図-10 浮き上がりおよび回転型被災の頻度と被害率

件であるといえそうである。

図-9に，ブロックに作用する力のつり合いを示す。

$$F_x = F_D + F_M \quad (3)$$

$$= \frac{1}{2} C_D \rho_w A_s u |u| + C_M \rho_w V \frac{du}{dt}$$

$$\frac{F_L \cdot l/2}{F_x \cdot t/2 + (\rho_r - \rho_w) V g \cdot l/2} > 1 \quad (4)$$

ここで， F_x は抗力 F_D と慣性力 F_M の和， A_s は被覆ブロックの水平方向の投影面積， l と t はブロックの長さで高さである。

式(4)が成り立つときに，天端沖側法肩ブロックが図-7(a)に示すようにO点を中心として回転し飛散する。式(4)の条件に加えて，ブロックが岸向きに飛散するための条件として $F_D > 0$ とした。表-4に，算定対象時間内に図-7(a)の被災が発生する頻度を示す。また，慣性力がブロックの安定性に影響があるのかを検討するため，慣性力を考慮せず被災する頻度も算定した。表-4より，被害率と頻度の関係は，慣性力の有無に関わらず，被害率0%のとき頻度が小さい。被害率の大小は両者ともばらつきがあり，頻度では表現できていない。回転型飛散の頻度は，慣性力を考慮した方が考慮しない結果と比べて全体的に頻度が多かった。これは，冲向きの慣性力が作用することで，ブロックが回転型飛散しやすくなるためである。慣性力を考慮した方が，ブロックの安定性に対して厳しい評価といえる。

図-10には，浮き上がりおよび回転型被災（慣性力有無）と被害率の関係を示す。これより本研究では，慣性力を考慮しないで算定した回転型被災の頻度の被害率との相関が，他の算定結果より若干良く，実験結果にもっとも傾向が近かった。どの指標も被害率が0%については，ケース8と12を除いて，実験結果と傾向が近かった。しかし，被害率の大小に関しては，どの指標もうまく実験結果を表現できていない。これは，今回使用した流体

力係数（抗力係数 C_D 、慣性力係数 C_M 、揚力係数 C_L ）の値が最適なものではない可能性があることや、水平流速の成分のみでは不十分であり、鉛直流速の成分も考慮した力のつり合いとしていないことが要因として考えられる。流体力係数および鉛直流速の成分を考慮した力のつり合いを検討することが必要である。

今後の課題として、砕波帯内となる条件で $H_0/L_0 \geq 0.025$ のケース8と12について被災していない理由がわかっていないので、 H_0/L_0 が大きい条件の被災現象を解明することが課題である。

3. まとめ

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 人工リーフの変状連鎖図を作成することは点検・維持管理に役立つと考える。
- (2) 被覆ブロックの被害率は、 hH_0' が小さいほど、 H_0'/L_0 が小さいほど大きいことがわかった。
- (3) 砕波帯内と考えた領域で被覆ブロックの被災が発生しており、加えて砕波帯内は砕波帯外に比べて流速が大きく厳しい水理場であり、砕波帯内に人工リーフが設置された条件はブロックの安定性に対

して厳しい条件であると考えられる。

- (4) 被覆ブロックの安定性に関しては、慣性力を考慮しない力のつり合いで算定した回転型被災の頻度が実験結果に傾向が近かった。しかし、どの指標もうまく実験結果を表現できていないので、流体力係数および鉛直流速の成分を考慮した力のつり合いについても検討することが必要である。

参考文献

- 1) 浅川 勉, 佐藤弘和, ロノ町誠, 野口正昭: 人工リーフ被覆材の安定性に関する実験的研究, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp.656-660, 1992.
- 2) 田中茂信, 岩崎福久, 茂木裕治: 人工リーフ被覆材の飛散機構に関する研究, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp.786-790, 1994.
- 3) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻, 第 3 号, pp.59-106, 1975.
- 4) 田村正秀, 木下正暢, 浜口憲一郎, 阿部康紀: 護床ブロックの形状と抗力・揚力特性について, 第 2 回流体力の評価とその応力に関するシンポジウム, pp.1-8, 2003.
- 5) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (上・下), 204p, 2007.

(2015.3.18 受付)

EFFECT OF WATER DEPTH ON THE PROCESS OF EXPANSION OF THE DAMAGE TO THE SUBMERGED BREAKWATERS

Eisuke NAKAMURA, Kenji NOGUCHI, Takahiro IWASA, Isao NIHEI,
Yukiyoshi ITO and Yoshio SUWA

Submerged breakwaters are difficult to inspect visually because it is submerged. To perform efficient maintenance and management, it is desirable to understand the process of expansion of the damage to the submerged breakwaters caused by the progression of the wave action. In addition, the causes of the damage to the submerged breakwaters depend on the water depth. Therefore, the stability experiments were conducted under the various conditions including deep and shallow water depth. As a result, it is revealed that the stability of armor blocks for the submerged breakwaters installed inside the surf zone showed smaller stability comparing to that outside of the surf zone.

.....
国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of N I L I M

No. 927 August 2016

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

.....
本資料の転載・複写の問い合わせは

〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地

企画部研究評価・推進課 TEL 029-864-2675