

## 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。

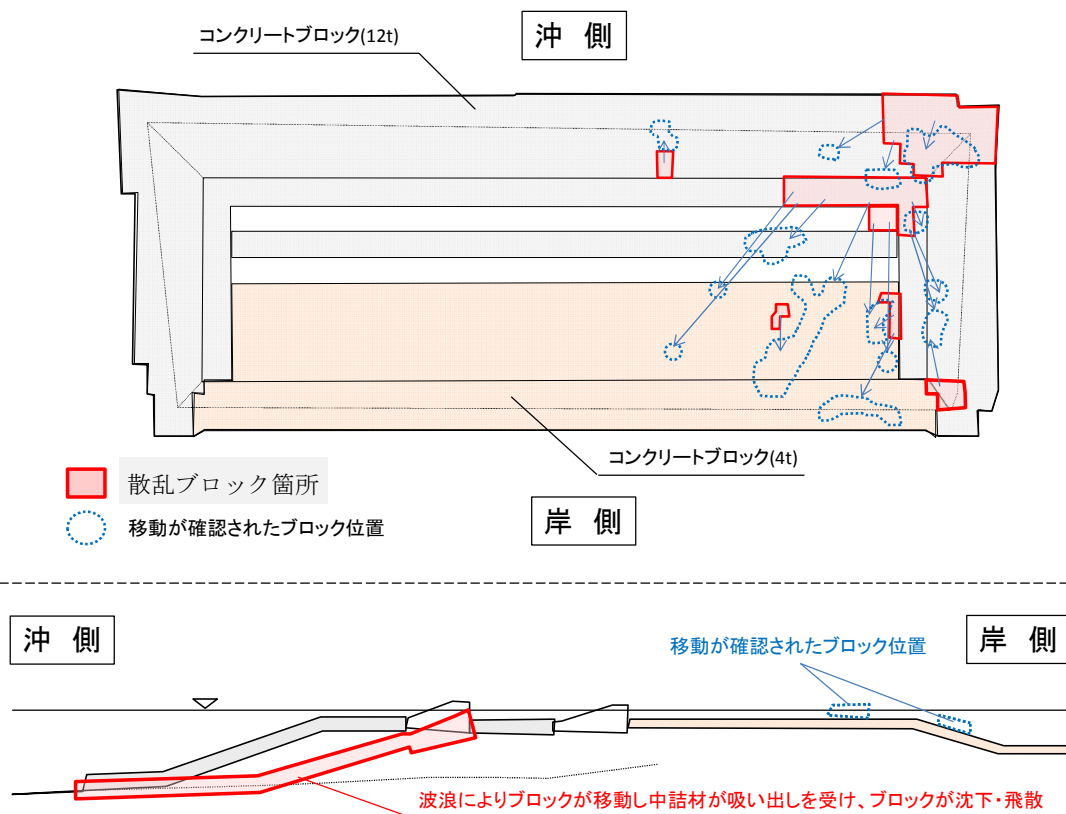


図-1.1 被災状況（上図：平面図イメージ、下図：断面図イメージ）

<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。

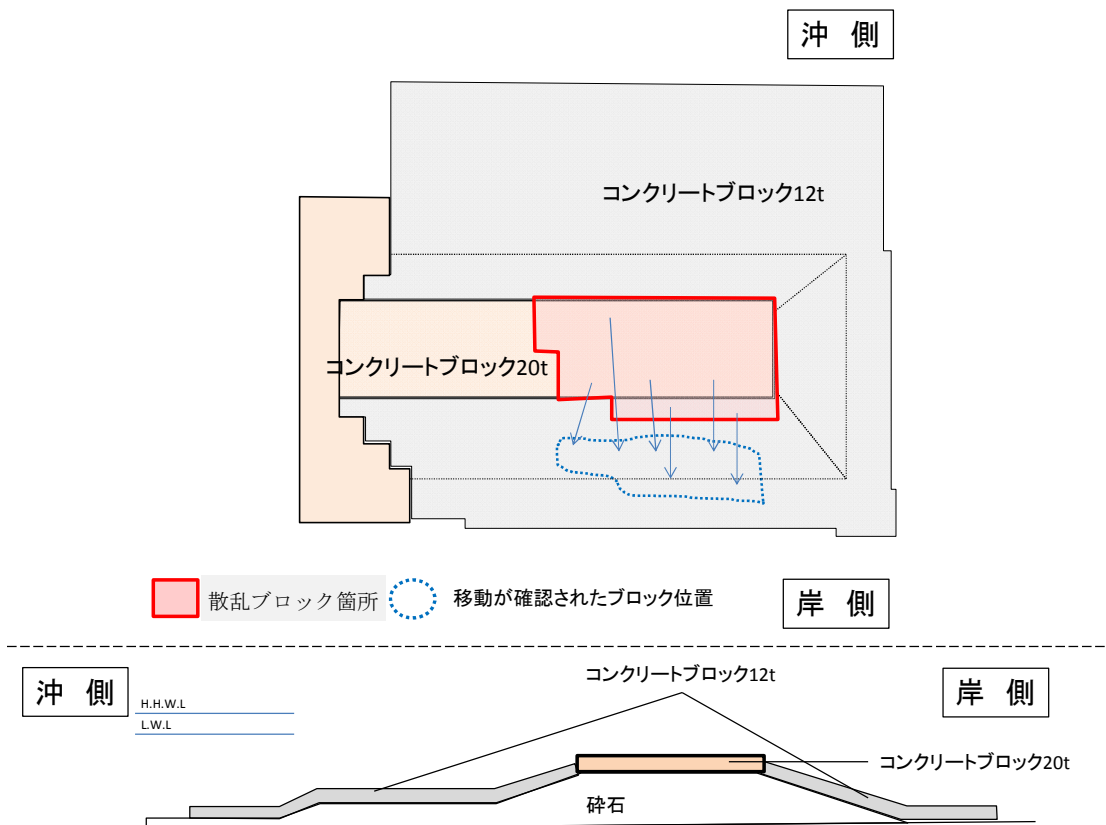


図-1.2 被覆ブロックの被災状況イメージ（上図）と代表断面図イメージ（下図）

<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。

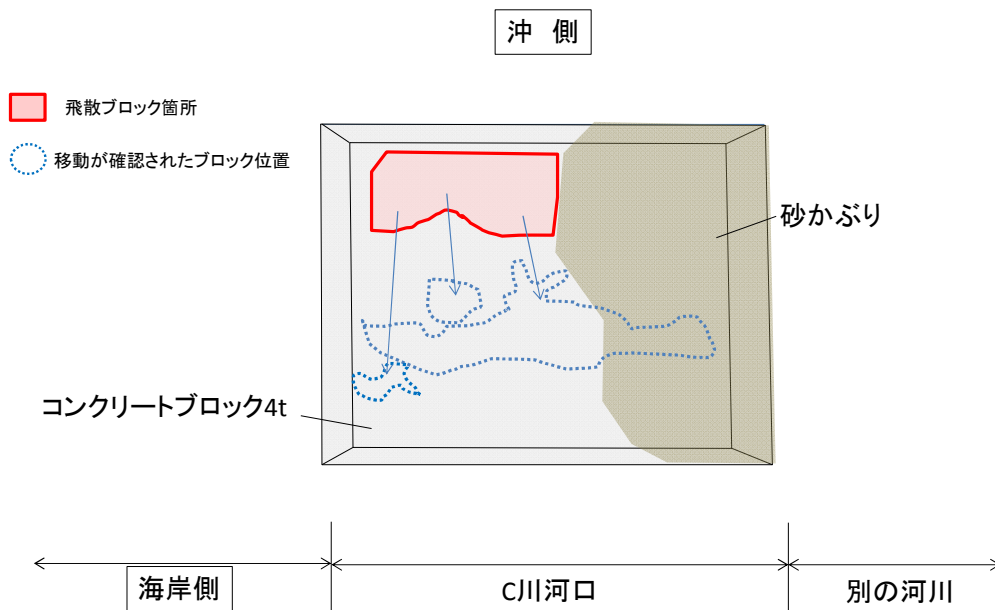


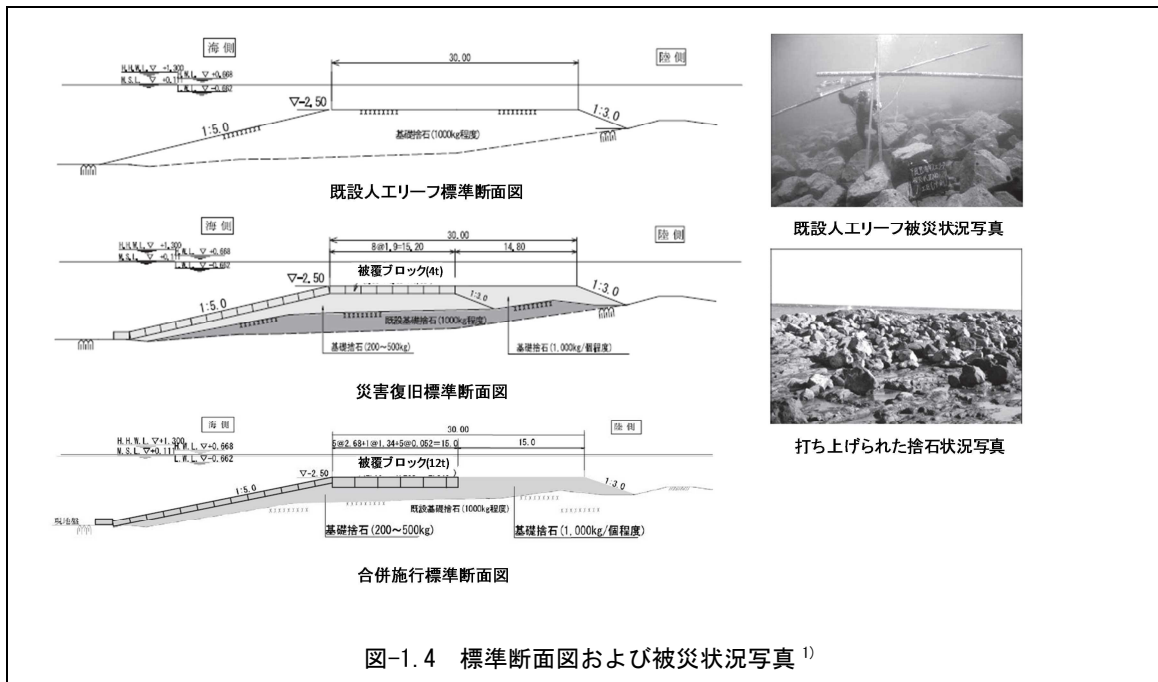
図-1.3 被災状況イメージ

（計画波以上の波高で被災した事例）<事例④> <sup>1)</sup>

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。

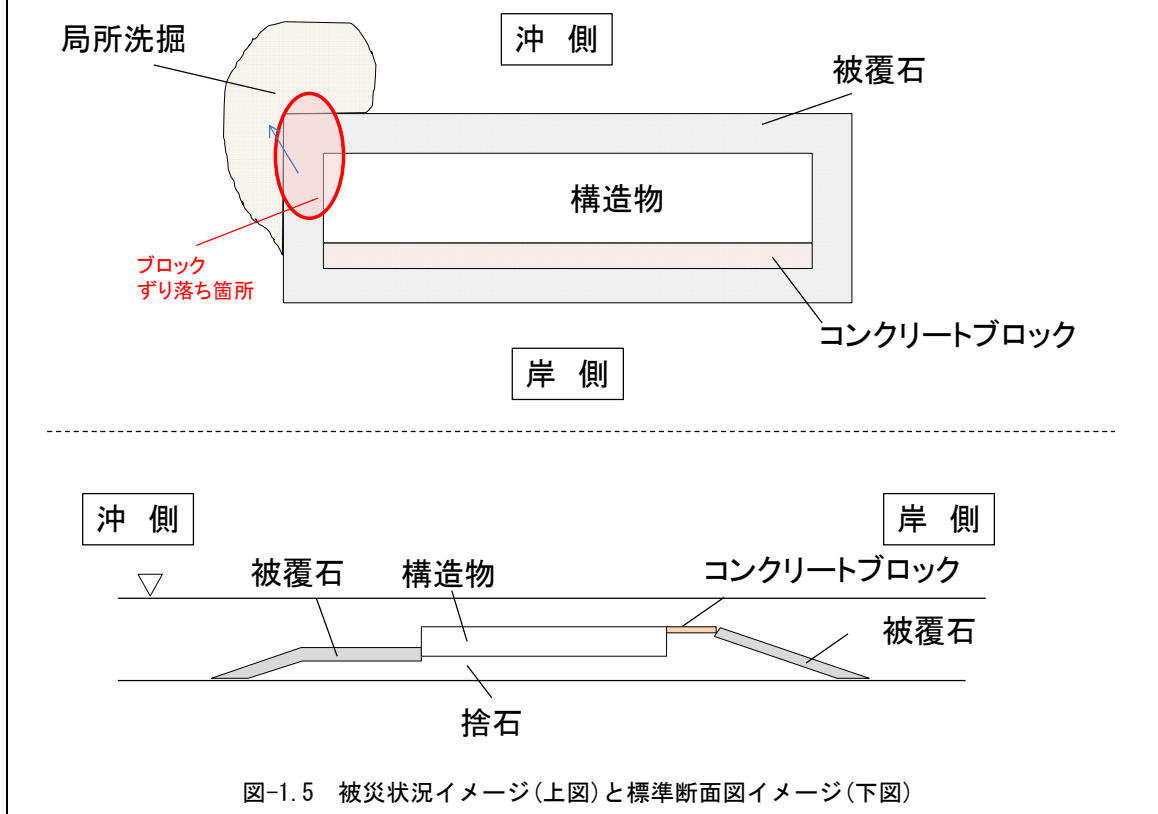
参考文献

- 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。波条件は情報が無いため記載しない。



## ○ ヒアリングの概要

No.	概 要
1	<p><b>A事務所 ヒアリング (実施日：平成26年6月6日)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>2. NETISは登録だけでなく、実績があれば評価する。</li> <li>3. 実績を元にNsや必要重量が書いてあるとよい。</li> </ol>
2	<p><b>B事務所 ヒアリング (実施日：平成26年7月8日)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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</li> <li>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。</li> <li>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</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>
3	<p><b>C事務所 ヒアリング (実施日：平成26年7月18日)</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>

4	<p><b>D事務所 ヒアリング（実施日：平成26年7月18日）</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>
5	<p><b>E県 ヒアリング（実施日：平成26年7月18日）</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ol>

## 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：

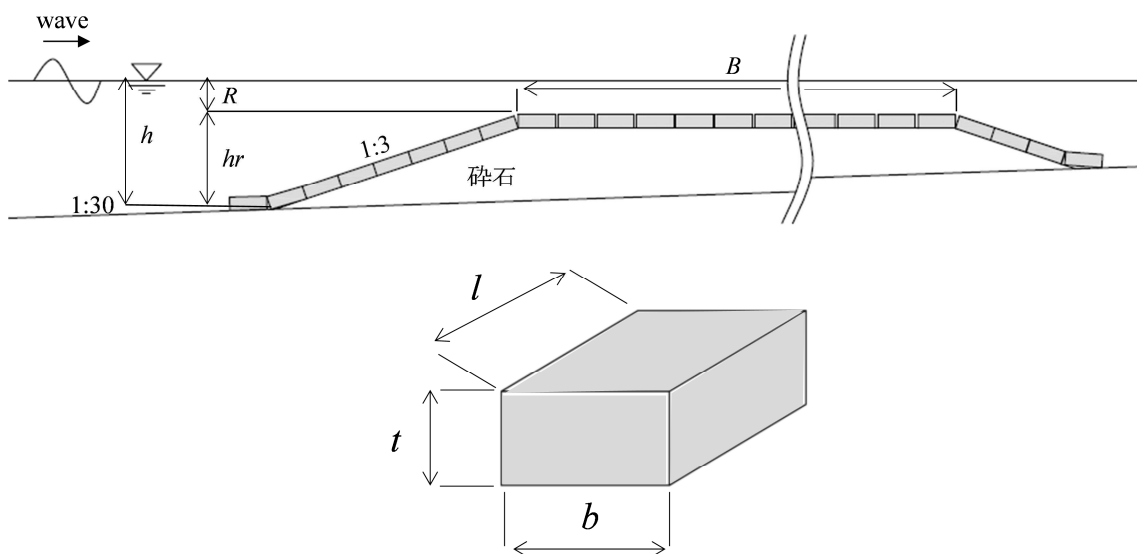


図-1 人工リーフ断面図（上）と使用ブロック形状

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 $\rho_r$	2.3g/cm <sup>3</sup>

- ・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

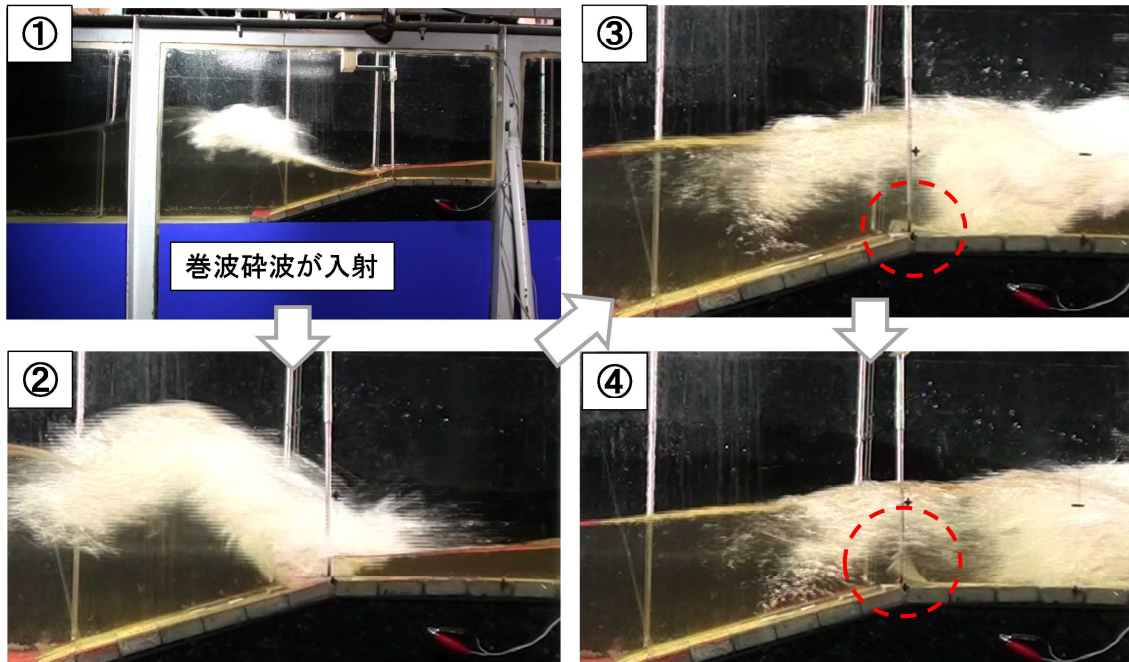
表-3 実験結果総括表

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	$N_3$ 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

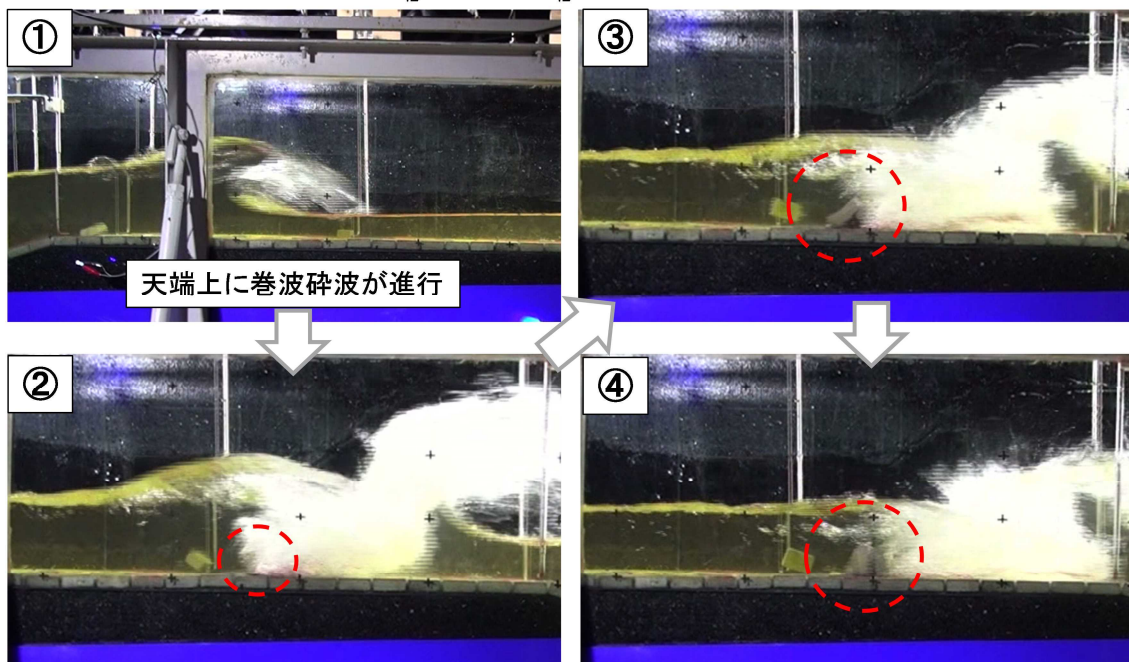
## 2. 2 初期被災状況

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。

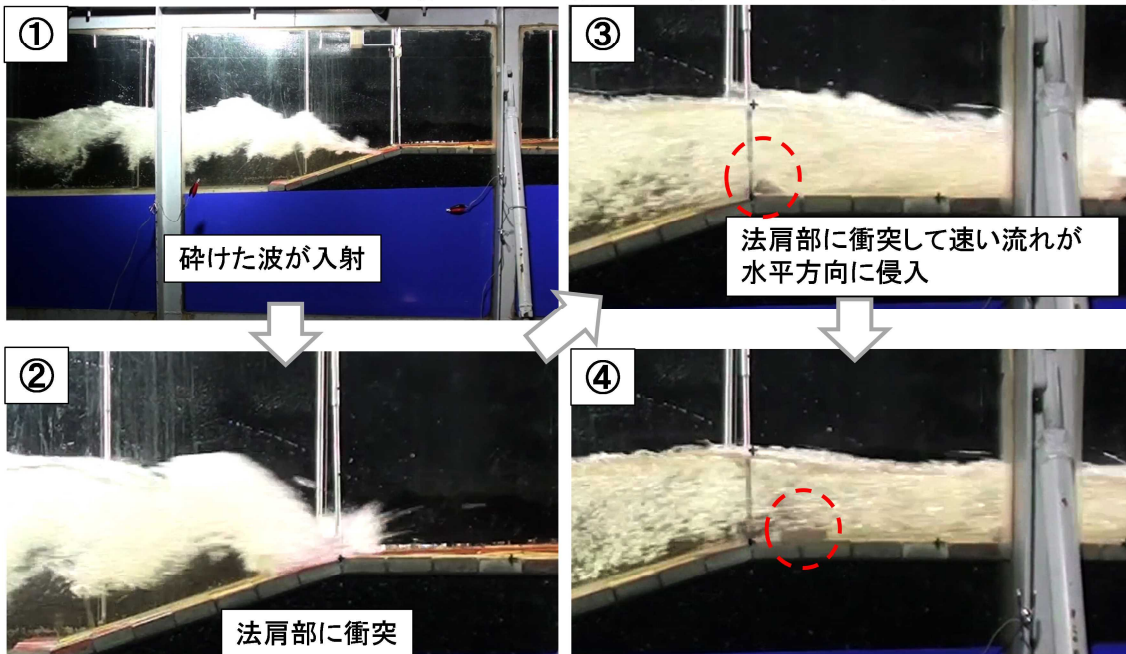
ケース1 :  $h=19.6(\text{cm})$ ,  $R=6.6(\text{cm})$ ,  $H_{i2}=12.6(\text{cm})$ ,  $T_2=3.5(\text{s})$ ,  $L_{i2}=478(\text{cm})$ ,  $h/L_{i2}=0.041$ ,  $R/H_{i2}=0.52$



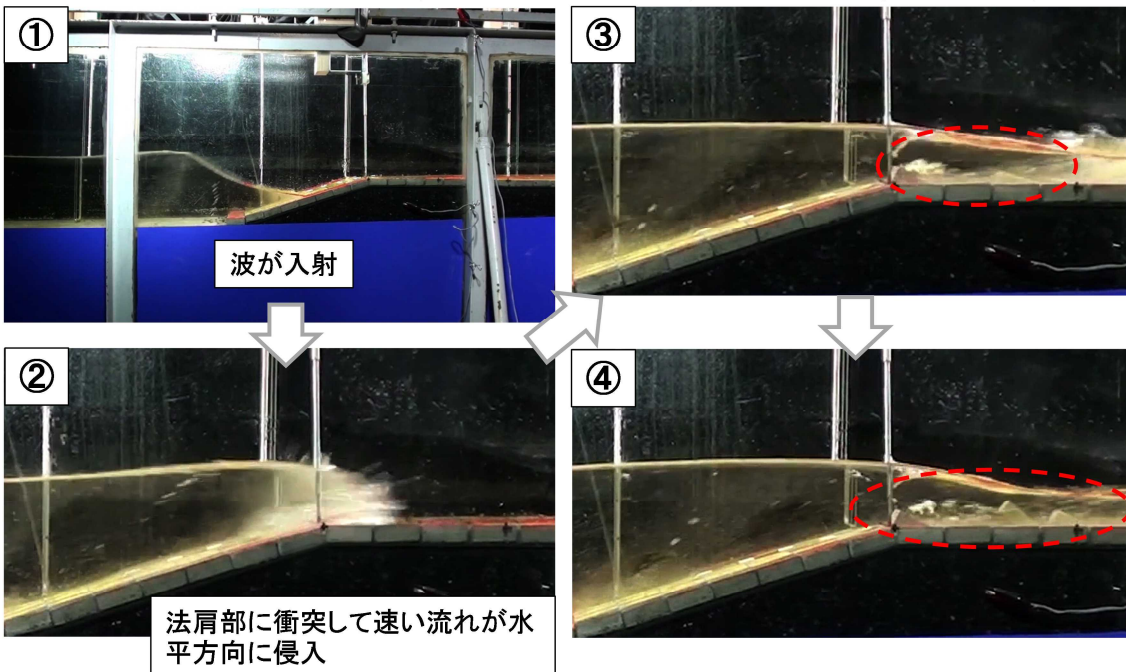
ケース1 (天端ブロック被災) :  $h=19.6(\text{cm})$ ,  $R=6.6(\text{cm})$ ,  $H_{i2}=12.6(\text{cm})$ ,  $T_2=3.5(\text{s})$ ,  $L_{i2}=478(\text{cm})$ ,  
 $h/L_{i2}=0.041$ ,  $R/H_{i2}=0.52$



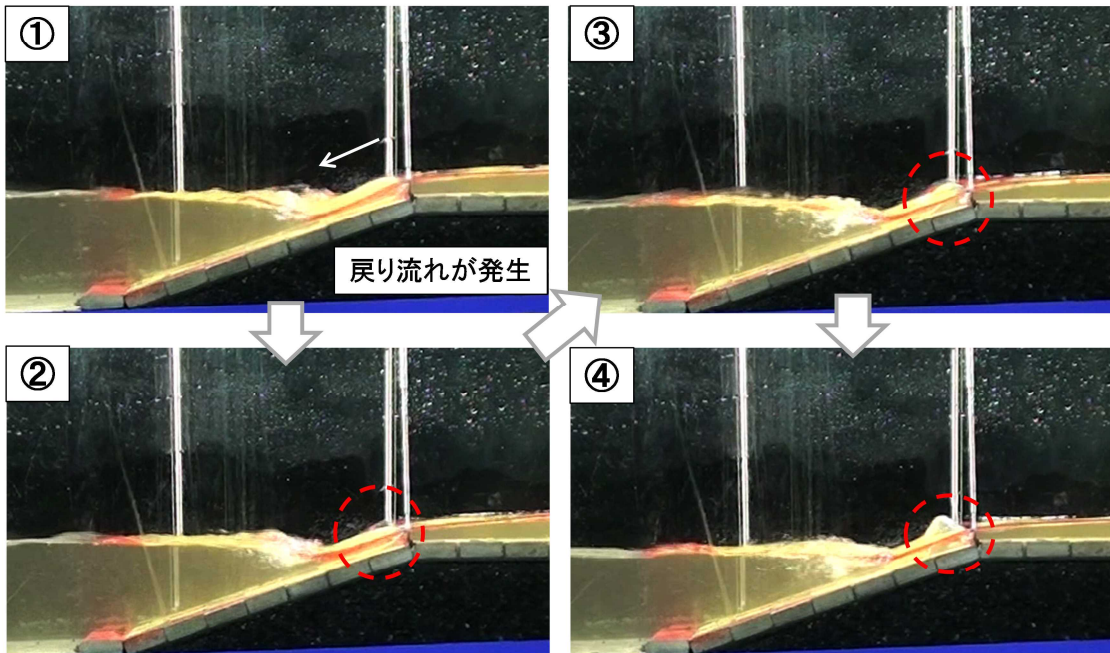
ケース4:  $h=15.2(\text{cm})$ ,  $R=2.2(\text{cm})$ ,  $H_{i2}=11.7(\text{cm})$ ,  $T_2=2.8(\text{s})$ ,  $L_{i2}=337.8(\text{cm})$ ,  $h/L_{i2}=0.046$ ,  $R/H_{i2}=0.19$



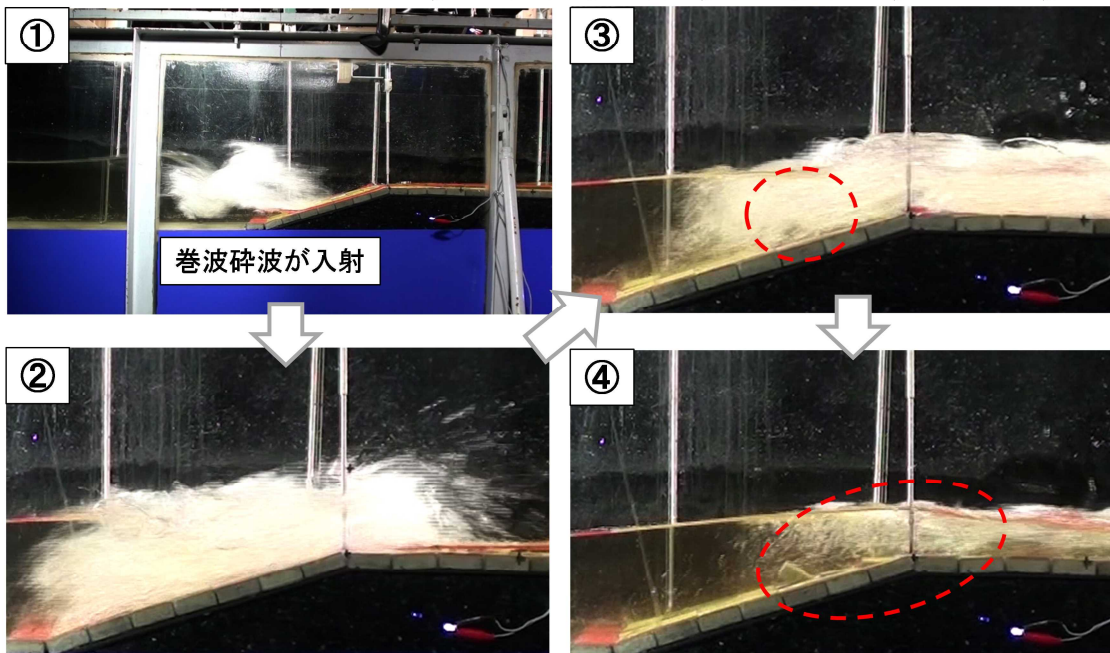
ケース5:  $h=15.2(\text{cm})$ ,  $R=2.2(\text{cm})$ ,  $H_{i2}=11.3(\text{cm})$ ,  $T_2=3.5(\text{s})$ ,  $L_{i2}=422.2(\text{cm})$ ,  $h/L_{i2}=0.037$ ,  $R/H_{i2}=0.19$



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



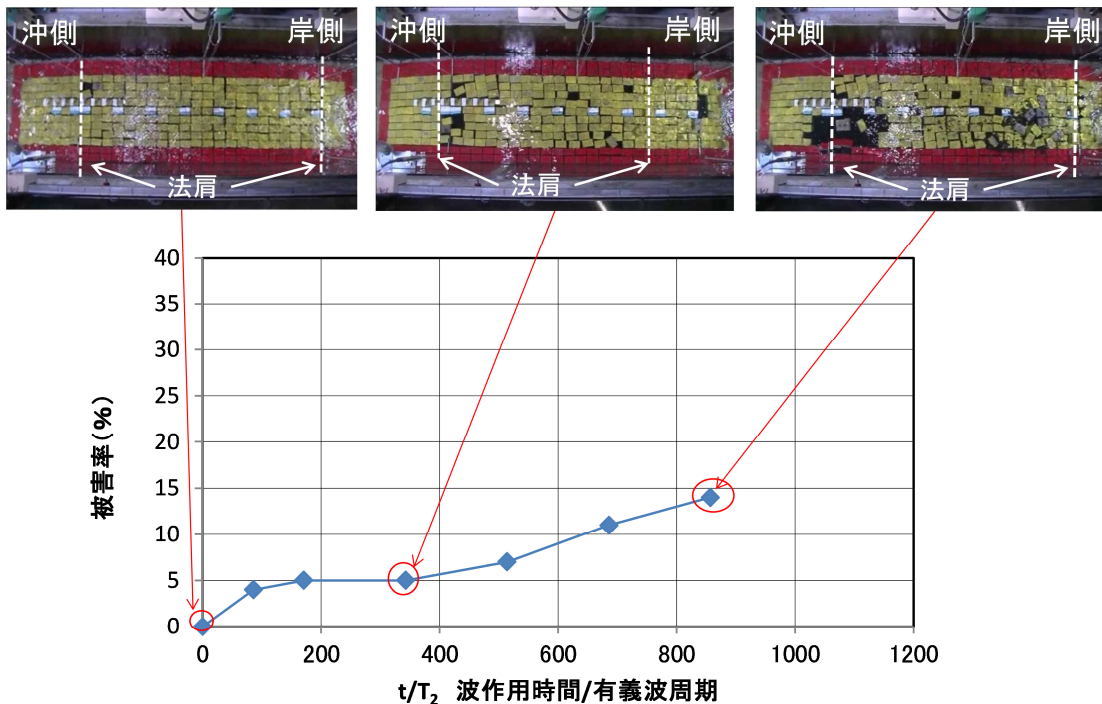
ケース16 :  $h=14.1(\text{cm})$ ,  $R=1.1(\text{cm})$ ,  $H_{12}=10.4(\text{cm})$ ,  $T_2=3.5(\text{s})$ ,  $L_{12}=402.9(\text{cm})$ ,  $h/L_{12}=0.038$ ,  $R/H_{12}=0.11$



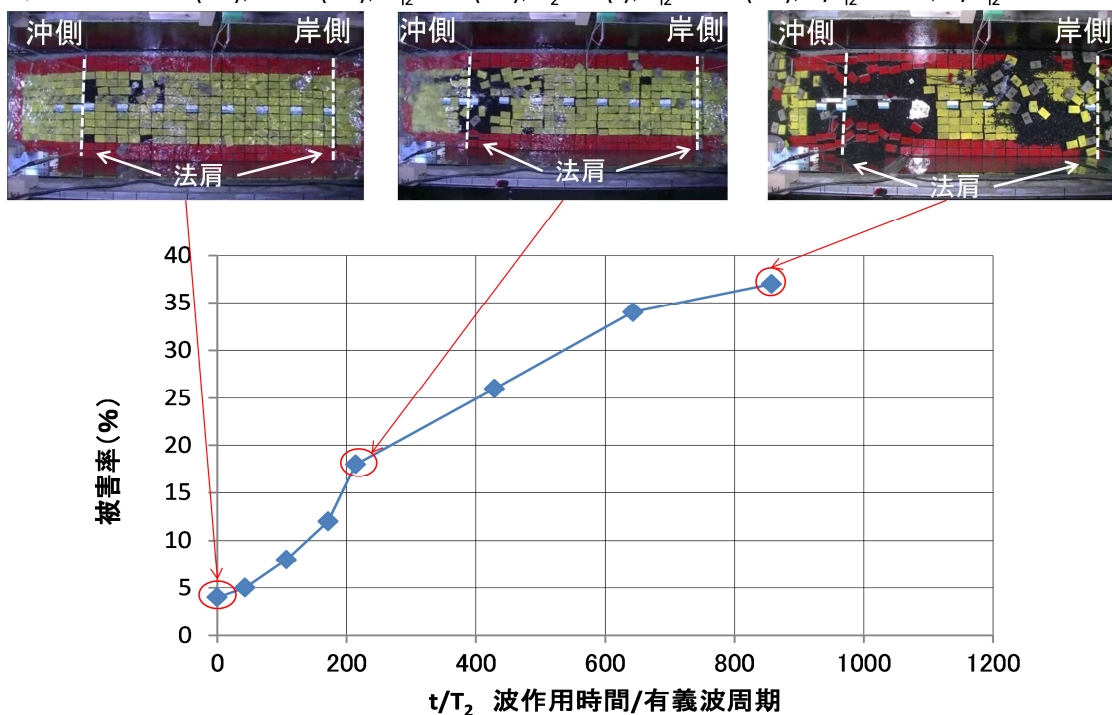
### 2. 3 変状連鎖

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。

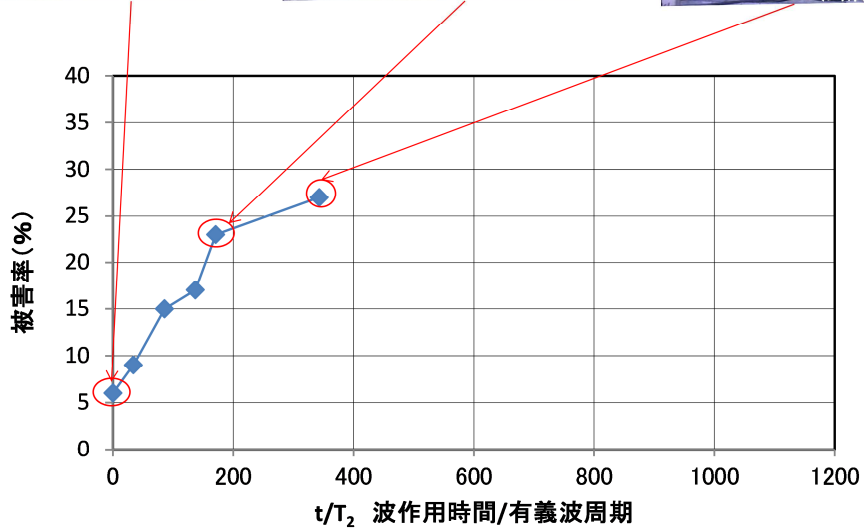
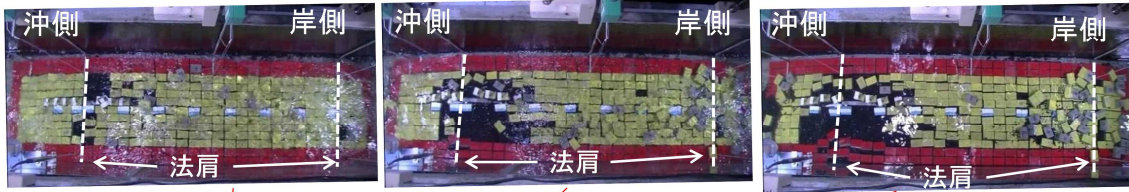
ケース1:  $h=19.6(\text{cm})$ ,  $R=6.6(\text{cm})$ ,  $H_{12}=12.6(\text{cm})$ ,  $T_2=3.5(\text{s})$ ,  $L_{12}=478(\text{cm})$ ,  $h/L_{12}=0.041$ ,  $R/H_{12}=0.52$



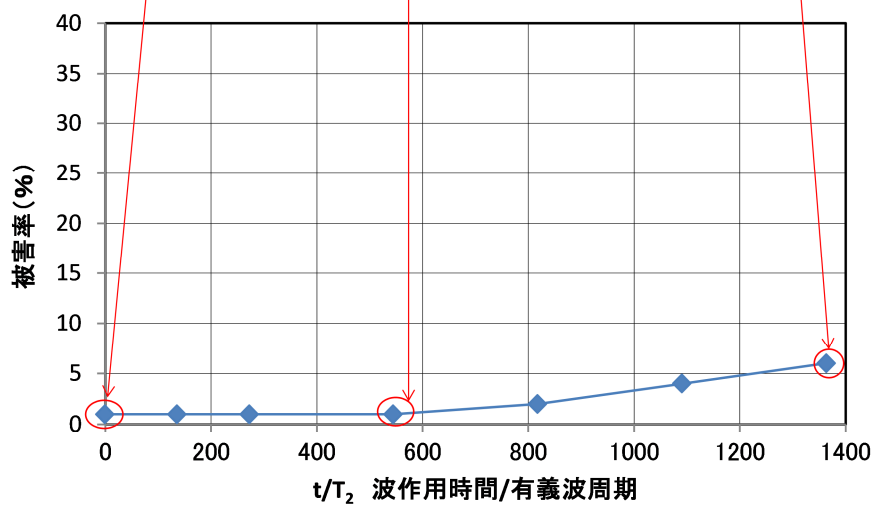
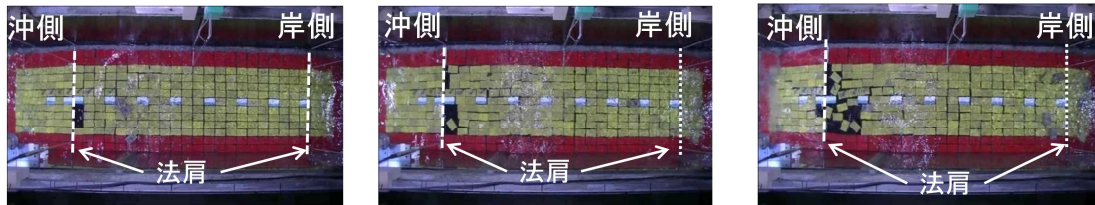
ケース4:  $h=15.2(\text{cm})$ ,  $R=2.2(\text{cm})$ ,  $H_{12}=11.7(\text{cm})$ ,  $T_2=2.8(\text{s})$ ,  $L_{12}=337.8(\text{cm})$ ,  $h/L_{12}=0.046$ ,  $R/H_{12}=0.19$



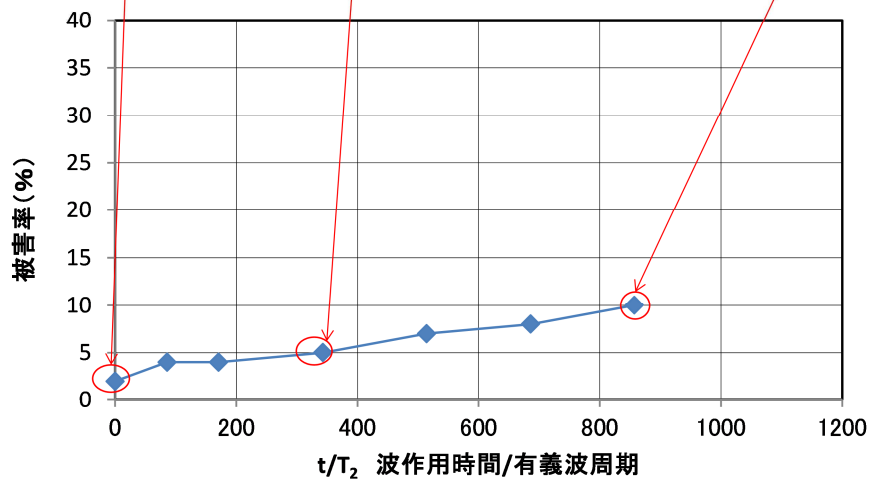
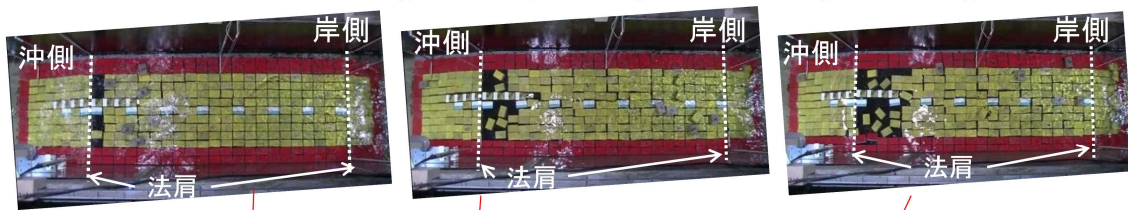
ケース5:  $h=15.2(\text{cm})$ ,  $R=2.2(\text{cm})$ ,  $H_{12}=11.3(\text{cm})$ ,  $T_2=3.5(\text{s})$ ,  $L_{12}=422.2(\text{cm})$ ,  $h/L_{12}=0.037$ ,  $R/H_{12}=0.19$



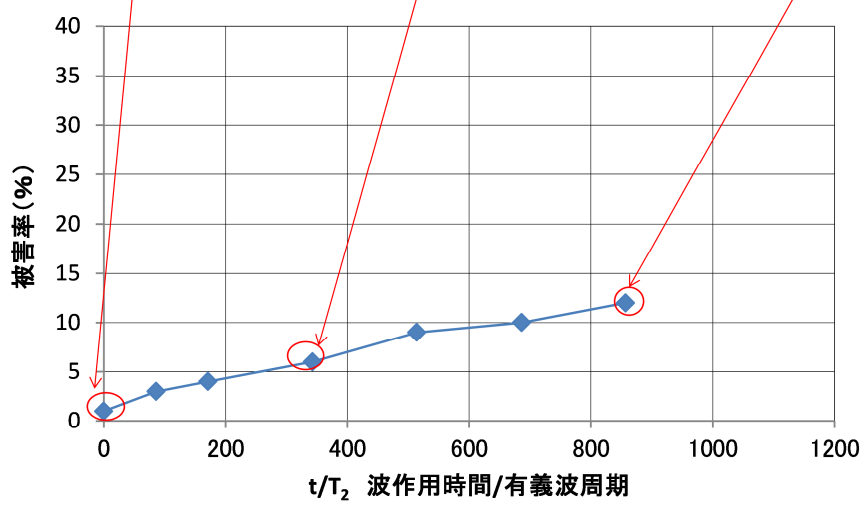
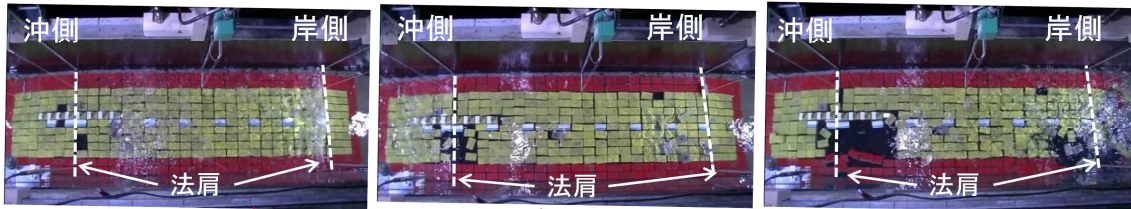
ケース7:  $h=15.2(\text{cm})$ ,  $R=2.2(\text{cm})$ ,  $H_{12}=10.7(\text{cm})$ ,  $T_2=2.2(\text{s})$ ,  $L_{12}=262.1(\text{cm})$ ,  $h/L_{12}=0.059$ ,  $R/H_{12}=0.21$



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<sup>1</sup>・野口 賢二<sup>2</sup>・岩佐 隆広<sup>3</sup>・二瓶 功<sup>4</sup>・伊藤 幸義<sup>5</sup>  
・諏訪 義雄<sup>6</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2,6</sup>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)

<sup>3,4,5</sup>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<sup>1)</sup>、田中ら<sup>2)</sup>) 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

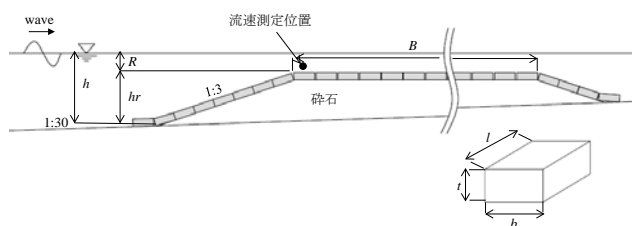


図-1 人工リーフ断面図とブロック形状

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って、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 $\rho_r$	2.3g/cm <sup>3</sup>

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%

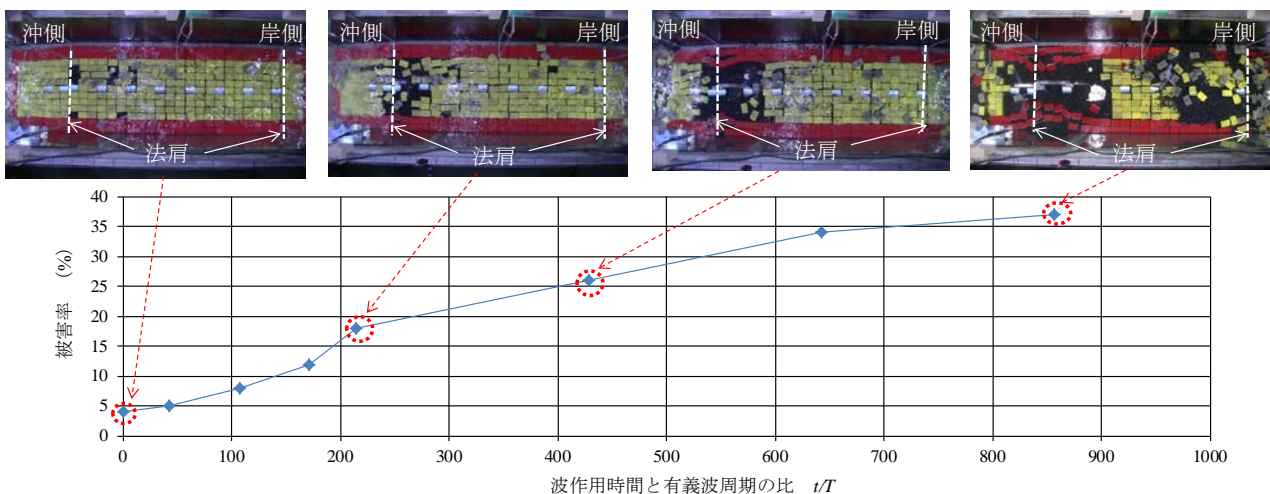


図-2 被害率の推移（ケース4：  $R=2.2$ cm,  $H_i=11.7$ cm,  $T=2.8$ s）

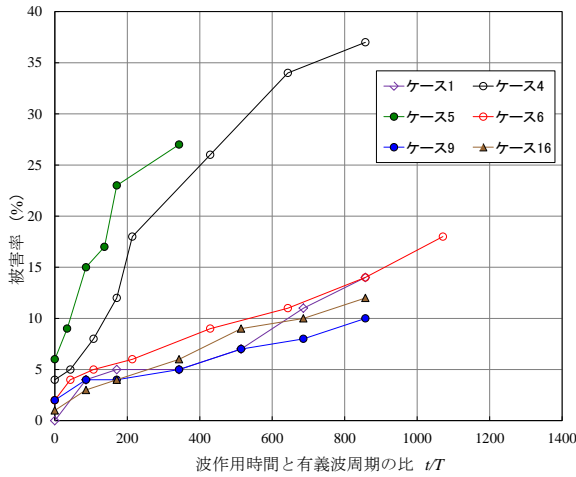


図-3 被害率の推移（被害率が10%以上）

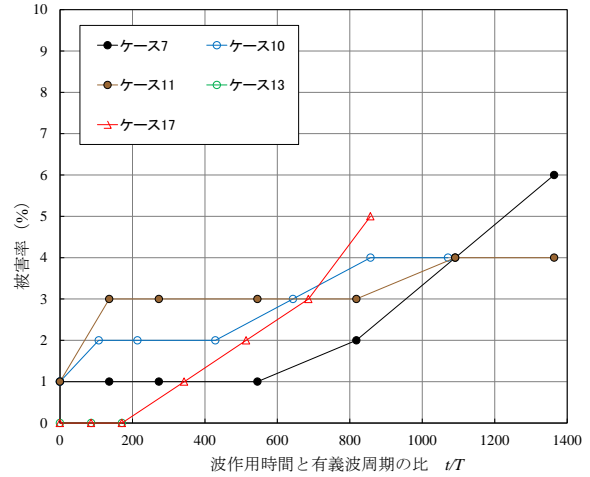


図-4 被害率の推移（被害率が10%未満）

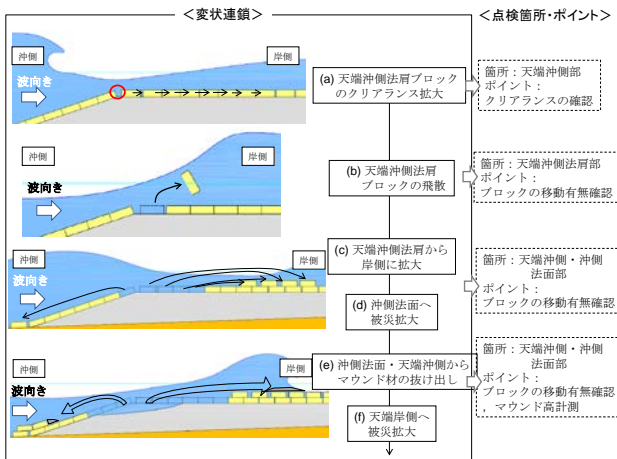


図-5 変状連鎖図

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<sup>3)</sup>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

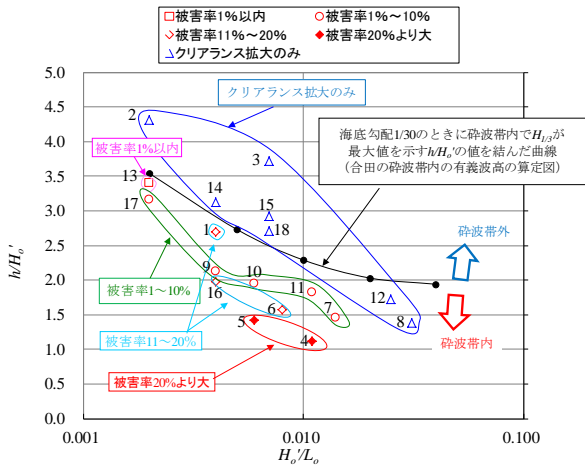


図-6 堤脚水深と換算沖波波高比  $hH_0'$  と波形勾配  $H_0'/L_0$  による被覆ブロックの被害率 (図中の数字はケース No)

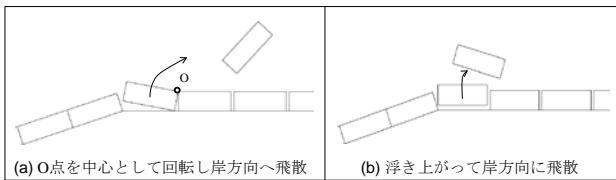


図-7 初期被災状況

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、碎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<sup>4)</sup>の張ブロック平板の値を参考にして0.25とした。

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

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

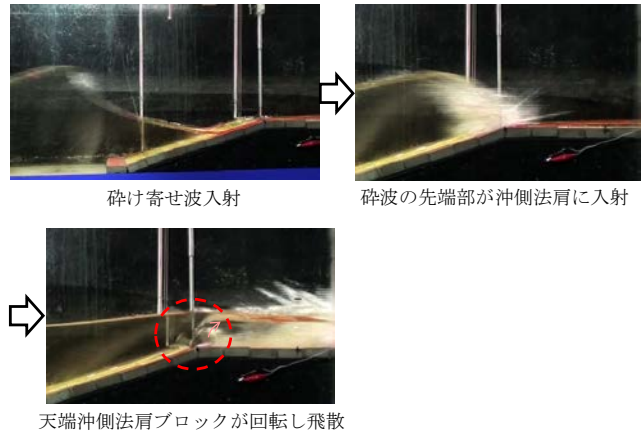


写真-1 初期被災状況 (図-7(a)の被災状況: ケース 10)

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、 $\rho_w$  と  $\rho_r$  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  $1.4\text{m/s}$  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  $1.4\text{m/s}$  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  $1.4\text{m/s}$  以上となる頻度について、0~600秒間で被害がなく碎波帯外となる条件(ケース2, 3, 14, 15, 18)は10以下であり、碎波帯内となる条件は碎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、碎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、碎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。

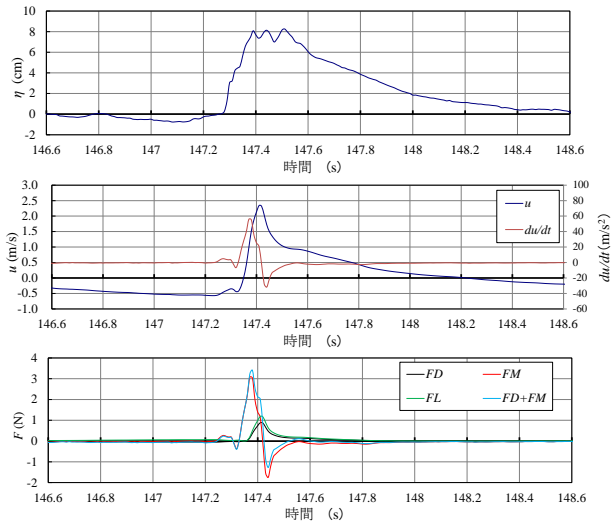


図8 被覆ブロック付近の水位，水平流速，加速度，被覆ブロックに作用する流体力（ケース4）

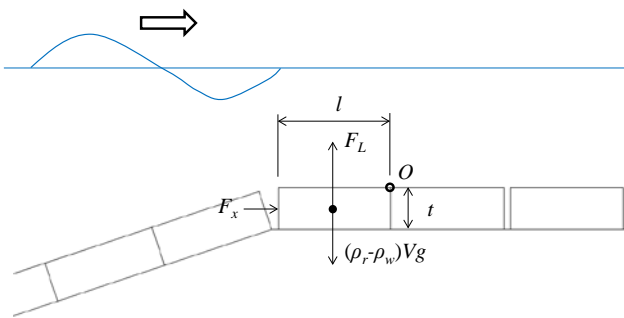


図9 ブロックに作用する力のつり合い

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<sup>4)</sup>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<sup>5)</sup>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

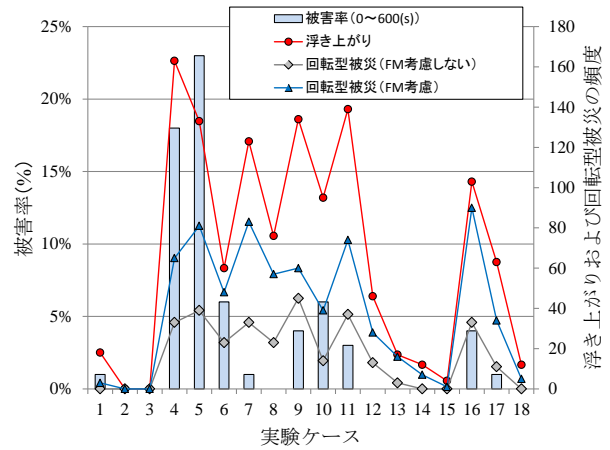


図-10 浮き上がりおよび回転型被災の頻度と被害率

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.