

人工リーフ被覆ブロックの配列方法と安定性の 関係についての実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY OF RELATION BETWEEN ARRAY METHOD AND STABILITY OF ARTIFICIAL REEF ARMOR BLOCK

田代洋一¹・飯干富広²・山村明³・金子靖祐⁴・

Yoichi TASHIRO, Tomihiro IIBOSHI, Akira YAMAMURA and Yasuhiro KANEKO

¹正会員 財団法人土木研究センター 河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

²正会員 工修 財団法人土木研究センター 河川・海岸研究部 (〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4)

³日建工学株式会社 事業統轄本部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-10-1)

⁴日建工学株式会社 環境河川研究所 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-10-1)

The concrete block used as an armor material of an artificial reef is various shape. The stable performance of the armor block is evaluated by the stability number. By researching the past, it is clarified that the stability of the armor block depended on the array method. This book is a report of the relation between the array method and stability, the characteristic of the action pressure, the behavior of the block.

Key Words : Relation between Array method and Stability, artificial reef, pressure, behavior

1. はじめに

人工リーフや突堤の本体を被覆する材料として、自然石や被覆ブロックが用いられる。被覆ブロックは多様な形状および配列方法があり、その安定性は水理模型実験により得られる①ハドソン公式に用いる K_D 値、②ブレブナー・ドネリー式に用いる N_s 値、③土研式に用いる $S_n \cdot K_v$ 値により評価される。これら値を用いることで来襲波浪に対して安定な被覆材の重量設計を行うことができる。しかし、厳密にはリーフ沖側法面、法肩近傍、リーフ天端部では作用外力の形態、大きさが大きく異なり、より安定性の高い形状や配列方法を模索する上で、断面位置ごとに外力特性とブロックの挙動特性を知ることはきわめて重要な知見である。

従来の研究で竹内ら¹⁾は、ある形状の被覆ブロックを用いて配列方法とブロックの被災個数および安定数 N_s 値の関係を、中村ら²⁾は、人工リーフの被覆工として設置された被覆ブロックに作用する波力特性等について研究を行っている。

本研究では、これまでの知見も踏まえて配列方法により安定性が異なる点に着目し、図-1に示す①突合せ配列、②かみ合わせ配列の2種の配列方法を対象とし、水理模型実験により①配列方法による被害

率の違い、②法面、法肩、天端に敷設されたブロックの挙動と圧力の違いについて計測を行い、配列方法による安定性の違いとその要因について検証することを目的とした。また併せて、被災が集中し易い法肩部に専用ブロックを用いた際の効果についても検証を行った。本稿は、これら検証結果を報告するものである。

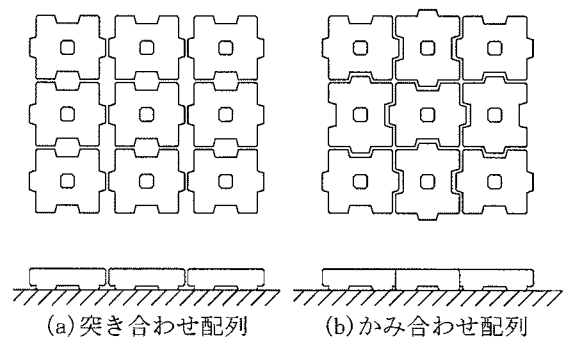


図-1 被覆ブロックの配列方法

2. 実験内容

(1) 実験水路

実験は、幅0.8m×長さ50m×高さ1.5mの二次元造

波水路を用いて実施した。水路内は、海底勾配1/30を再現した固定床とした。実験では、固定床の上に図-2に示す「天端幅B=30.1m、堤脚水深h=5.0m、天端水深R=1.0m、沖法勾配1:3.0、岸法勾配1:2.0」の縮尺S=1/20の人工リーフ模型を設置した。リーフ本体は、粒径 $\phi=300\text{mm}$ 、重量350kg/個を想定した砕石を利用した。

(2) 模型ブロック

実験では、図-3に示す「幅1.20m×長さ1.44m×高さ0.40m」の縮尺1/20の模型ブロックを使用した。この模型を使用し、図-1に示した①突き合わせ配列、②かみ合わせ配列の2種類について実験を行った。突き合わせ配列は被覆率73%、かみ合わせ配列は被覆率82%と突き合わせ配列の方が隣接するブロック間に空隙を大きく持つ配列である。

(3) 計測機器および計測方法

実験では、模型ブロックに作用する圧力を計測するためにブロックの天端面および底面に圧力計を取り付けた計測用ブロックと、模型ブロックの挙動を計測するためにブロック内に加速度計を埋設した計測用ブロックを用いた。圧力、挙動の計測は、造波開始後から約100s間、0.05s間隔で計測を行った。

また、水路内の波高を計測するために図-4に示すように合計8台の容量式波高計を、図-5に示すようにリーフ沖側法面、法肩部、天端面の流速を計測するために合計3台の電磁流速計を使用した。波高、流速とも計測は、造波開始後から約100s間、0.05s間隔で計測した。

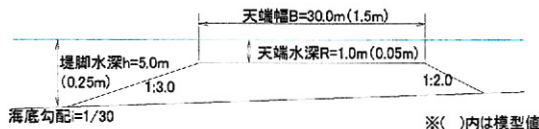
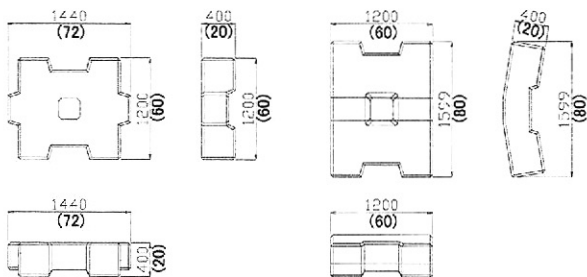


図-2 人工リーフ模型



(a) 標準型

(b) 法肩専用

図-3 模型ブロック単体図

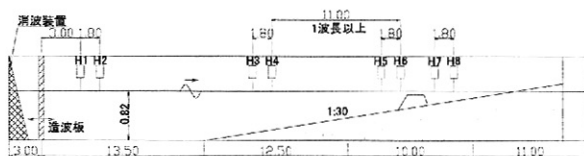


図-4 波高計配置図



図-5 圧力計と流速計配置図

表-1 波浪条件一覧

	実験値 (1/20)		現地換算値	
	波高H(m)	周期T(s)	波高H(m)	周期T(s)
CASE 1	0.125	2.012	2.5	9.0
CASE 2	0.150	2.012	3.0	9.0
CASE 3	0.175	2.012	3.5	9.0
CASE 4	0.125	2.683	2.5	12.0
CASE 5	0.175	2.683	3.0	12.0
CASE 6	0.125	2.683	3.5	12.0

(4) 波浪条件

実験は、安定常数 K_D 値および N_s 値、 $S_n \cdot K_V$ 値が既知である被覆ブロックを使用し、安定限界波高に近い波浪条件に対するブロックの挙動および作用圧力を計測し、配列方法による違いを検証することを目的としている。そのため、実験の波浪条件としては、「人工リーフの設計の手引き 改訂版」³⁾を参照に、図-1で示した突き合わせ配列の安定限界波高 $H \approx 2.5\text{m}$ を実験最小波高とし、3.0m、3.5mの3種類の波高で実施した。周期については、 $T=9.0\text{s}$ 、 $T=12.0\text{s}$ を各波高条件に対して実施した。表-1に実験波浪条件を示す。ここで示す波浪はすべて規則波である。

3. 配列方法の影響

(1) 配列方法と被害率

ここでは、周期 $T=9.0\text{s}$ 及び 12.0s 、波高 $H=2.5\text{m} \sim 3.5\text{m}$ の場合の①突き合わせ配列、②かみ合わせ配列、③法肩用ブロックを用いた配列の被害率の比較を行う。被害率の定義は、水路両端列のブロックは除外し、それより内側を検査対象として、被害率=(ブロック被害個数)/(ブロック全体個数)とした。

表-2に配列方法と被害率の計測結果の一覧を示す。はじめに、突き合わせ配列とかみ合わせ配列について比較を行う。図-6より、突き合わせ配列の安定限界波高近傍である $H=2.5\text{m}$ の場合、突き合わせ配列で

表-2 配列方法と被害率の計測結果

波高	周期		被害率		
現地換算値 (m)	実験値 (cm)	現地換算値 (s)	実験値 (s)	突き合わせ 法肩専用無し	突き合わせ 法肩専用無し
2.5	12.5	9.0	2.01	0.0%	2.2%
3.0	15.0	9.0	2.01	2.1%	7.9%
3.5	17.5	9.0	2.01	9.7%	11.5%
2.5	12.5	12.0	2.68	2.1%	6.1%
3.0	15.0	12.0	2.68	10.6%	8.8%
3.5	17.5	12.0	2.68	7.4%	11.7%

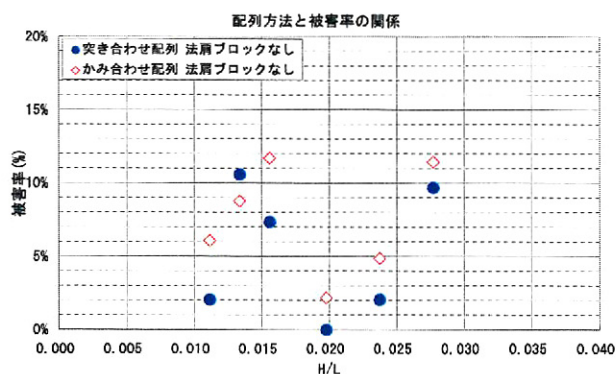


図-6 配列方法による被害率の計測結果

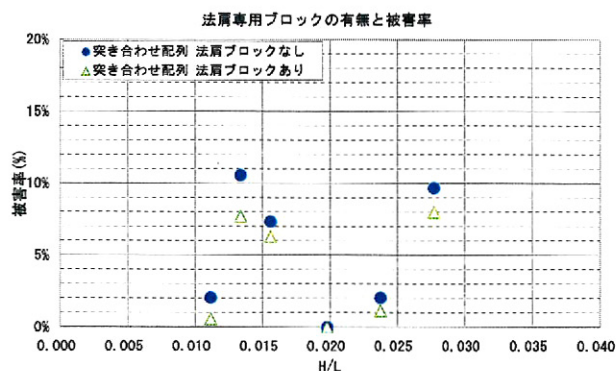


図-7 法肩専用ブロックの有無と被害率の計測結果

は $T=9.0s$ で被害率0.0%, $T=12.0s$ で被害率2.1%なのに対して, かみ合わせ配列では $T=9.0s$ で2.2%, $T=12.0s$ で6.1%と被害率が抑制された。一部波浪条件で両者の関係が逆転しているが, 概ね2~4%程度突き合わせ配列の方が被害率は低下した。次に, 法肩ブロックの影響について検証を行う。図-7より, 波高 $H=2.5m$ では双方とも安定限界波高近傍であるため被害率に差は出ない。しかし, 波高を挙げていくとわずかに1~2%程度ではあるが, 法肩専用ブロックを使用することで安定性の向上が確認できた。

以上のことから, 被害率という指標を用いて比較を行うと, 被害率は, 法肩ブロックを用いた突き合わせ配列<突き合わせ配列<かみ合わせ配列の関係にあることがわかる。

次に, 法面, 法肩, 天端部と各セッションでの被害率の比較を行った。ここでの被害率の定義は, 図-2に示した計測機器を取りつけた前後一列を含む行列を全体個数とした。この際, 全体の被害率算出時と同様に両側面の一列は除外した(図-8参照)。セッション1は圧力計①の前後1列, セッション2は圧力計②の前後1列, セッション3は圧力計③の前後1列, セッション4は圧力計④の前後1列と定義した。

図-9, 10に結果を示す。セッション毎の被害率を見ると法肩近傍の被害率が突出していることが分かる。法肩専用ブロックを用いることで若干被害率を低減することができる。

人工リーフの法肩付近は, 一般的に碎波点となっており, 波浪の影響に加えて流れの影響などが混在する複雑な波浪場となっている。また, 今回の実験

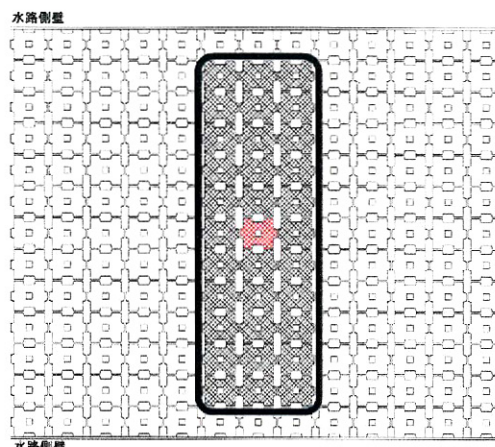


図-8 セクションの定義

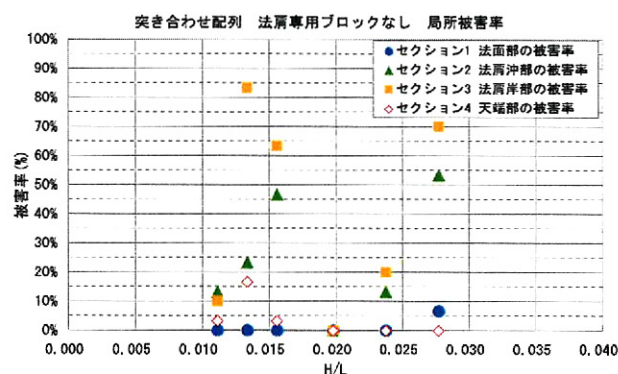


図-9 突き合わせ配列・法肩ブロックなし
各セッションの被害率

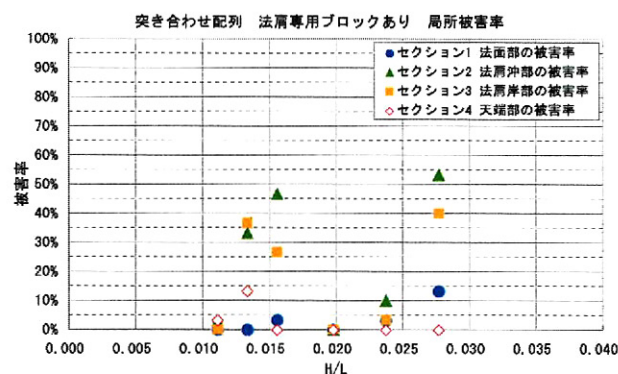


図-10 突き合わせ配列・法肩ブロックあり
各セッションの被害率

はこれ以降に示す挙動と圧力の関係を明確にするために規則波で実施したが, 不規則波が作用した場合には, 引き波時に人工リーフ天端水深が著しく低下し, 場合によっては水面に露出する可能性もある。そこに波高の大きな波浪が作用することにより被災が生じ易くなる。そのため, 法肩部付近には十分な重量の被覆ブロックを用いることが全体の安定性を考える上でも重要である。

(2) 配列方法と作用圧力

図-11に示すように, ブロック天端面および底面に取付けた圧力計により計測した上下面の圧力差分

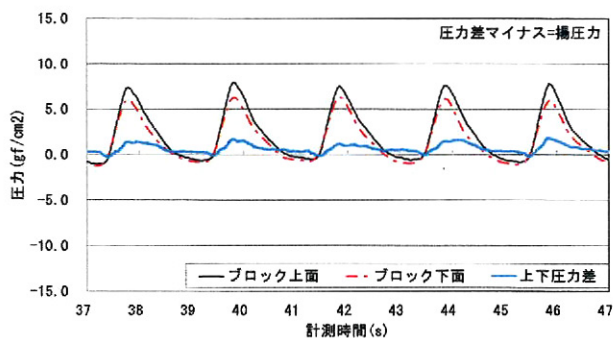


図-11 圧力解析の考え方

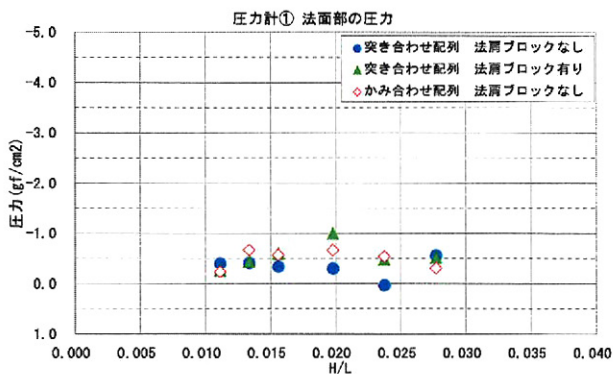


図-12 波圧計① 沖側法面部の作用圧力

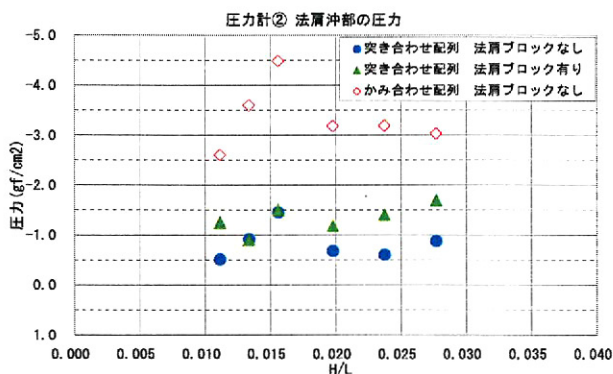


図-13 波圧計② 法肩沖側の作用圧力

を算出する。差分の算出は、波形が安定した時刻の5波形を抽出し平均値とした。この値がブロックに作用する揚圧力と考え、マイナスの場合ブロックを浮き上がらせる力が作用していると捉える。

図-12～15に波圧計毎の計測結果を示す。波圧計①は沖側法面、波圧計②は法肩沖側、波圧計③は法肩岸側、波圧計④は天端部である。

はじめに、「かみ合わせ配列」と「突き合わせ配列」の比較を行う。波圧計設置箇所毎の結果を見ると、特に法肩沖側のブロックに大きな圧力が作用している。「突き合わせ配列」の場合には作用圧力が $-1.0 \sim -1.5$ (gf/cm²)程度に対して、「かみ合わせ配列」では $-3.0 \sim -4.5$ (gf/cm²)程度の圧力が作用する。ここで、実験に用いた模型ブロックの重量は133.3gf、水中重量は75.2gf、平面投影面積は34cm²であり、単位面積当たりの水中重量に換算すると約2.2gf/cm²となる。つまり、かみ合わせ配列では、

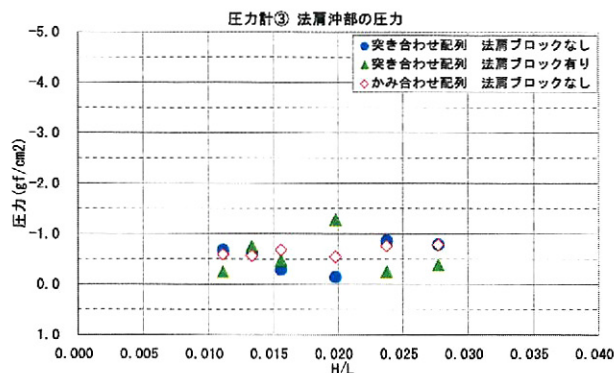


図-14 波圧計③ 法肩岸側の作用圧力

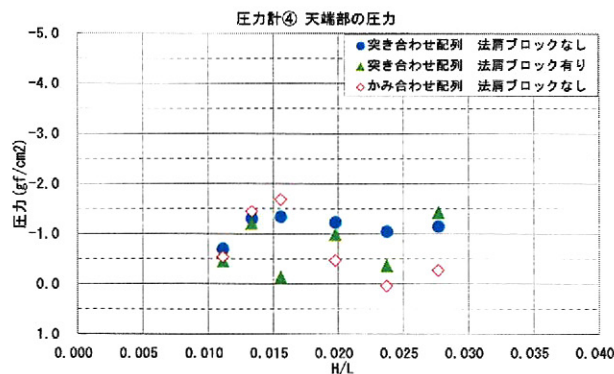


図-15 波圧計④ 天端部の作用圧力

(ブロックに作用する圧力) > (模型ブロックのm²当りの水中重量)の関係にある。厳密に考えると、ブロック面に作用する圧力は一様分布ではないが、ブロックを浮き上がらせるのに十分な圧力が作用しているといえる。

次に、法肩ブロックの影響について検討を行う。法肩沖側(三角印)の作用圧力は法肩ブロックを設置したほうが平均して $-1.4 \sim -1.5$ gf/cm²と大きくなっている。法肩専用ブロックの有無による違いは、法肩専用ブロックを使用した場合には法肩前後はかみ合わせ配列の状態になっていることである。つまり、法肩ブロック近傍では隣り合うブロック間の空隙が小さい。

以上、法肩近傍の結果を整理すると、被覆率は(かみ合わせ配列) > (法肩専用ブロックあり) > (突き合わせ配列)、作用する圧力も(かみ合わせ配列) > (法肩専用ブロックあり) > (突き合わせ配列)の関係にある。

河川の護岸・根固めブロックを対象とした流れに対する実験⁵⁾では、孔部を持つブロックでは、孔部には圧力が作用しないため、分力計により計測される揚力が小さくなることが明らかになっている。

流れと波浪では、ブロックに作用する外力要因が異なるため一概に断定は出来ないが、揚力の大きさはブロック自体および隣り合うブロック間の空隙の大きさに依存する。

(3) 配列方法とブロック挙動

人工リーフで特に被災が集中しやすい法肩前後の

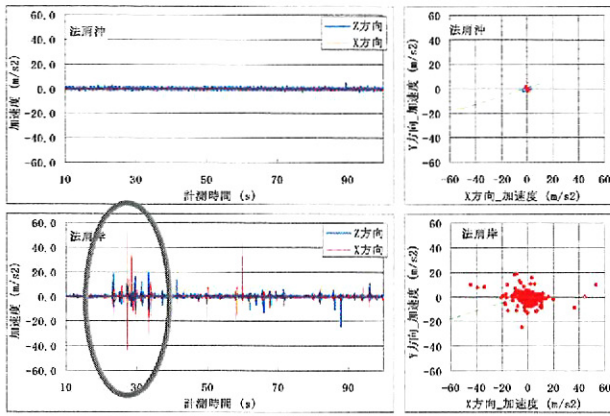


図-16 突き合わせ配列のブロック挙動

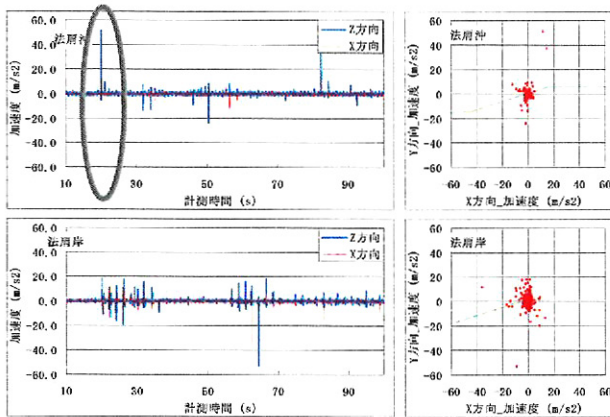


図-17 かみ合わせ配列のブロック挙動

ブロック挙動について解析を行い、「突き合わせ配列」と「かみ合わせ配列」の違いについて検証を行った。

図-16, 17に加速度計を設置した計測用ブロックの挙動をX, Y座標で示した結果と、計測用ブロックの挙動の経時変化を示す。また、図-18, 19に計測時間からある時間を抜粋した時刻の挙動と流速および作用圧力の経時変化を示す。ここで示す実験結果は、実験波浪 $H=0.15\text{m}$ 、周期 $T=2.01\text{s}$ である。

図-16, 17より、法肩沖の計測用ブロックは、「かみ合わせ配列」の方が挙動は大きく、特徴としては造波開始後 $t=25\text{s}$ 付近で鉛直方向へ大きく動いている。これは、造波開始後の第1波が到達する時刻に相当する。一方、法肩岸の計測用ブロックは、「突き合わせ配列」の方が挙動は大きく、特に造波開始後 $t=25\text{s}$ 前後に水平方向に大きな挙動を示す。

次に、ブロックの挙動と作用圧力および近傍の流速の関係を検証する。図-18より、「突き合わせ配列」の法肩岸に設置した計測用ブロックは、 $t=27\text{s}$ 付近でX方向に大きく変動する。このとき、流速もピークを示しているが、他時間に比べて挙動のピークが極端に大きい。「突き合わせ配列」では、隣り合うブロック間に空隙が大きいため、砕波点で砕波した波がブロック鉛直面に作用していると考えられる。一方、図-19に示す「かみ合わせ配列」では、流速変動とブロック挙動の位相および周期はほぼ等しく、水平方向の変動に比べて鉛直方向の変動のほ

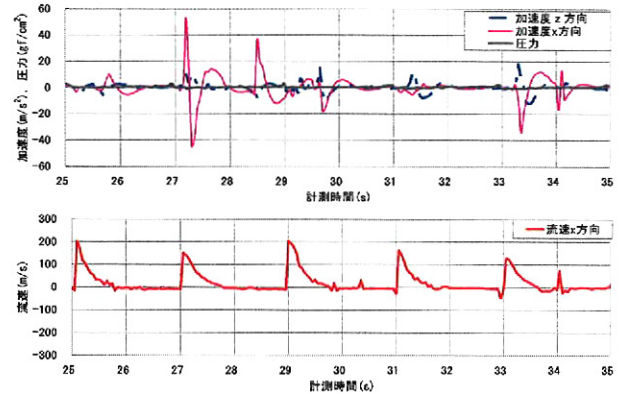


図-18 突き合わせ配列の挙動と圧力及び流速の関係

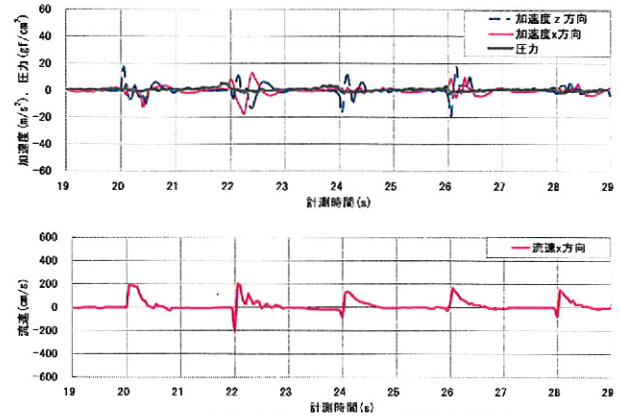


図-19 かみ合わせ配列の挙動と圧力及び流速の関係

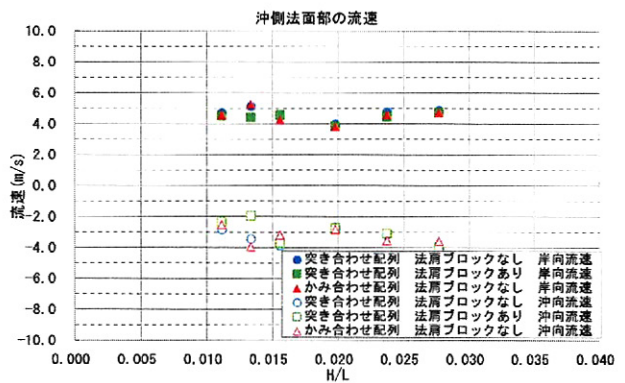


図-20 沖側法面部の流速

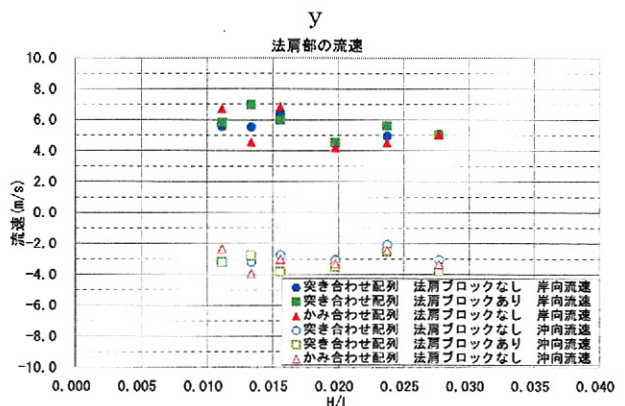


図-21 沖側法肩部の流速

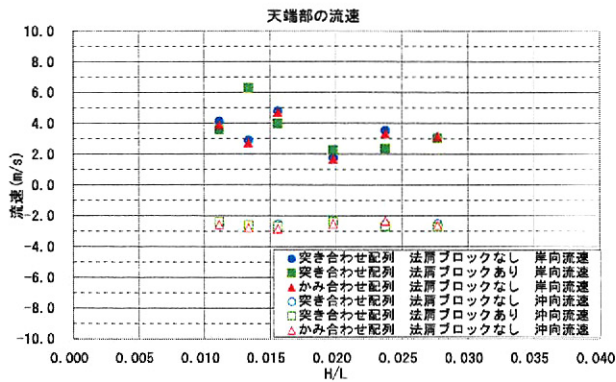


図-22 天端部の流速

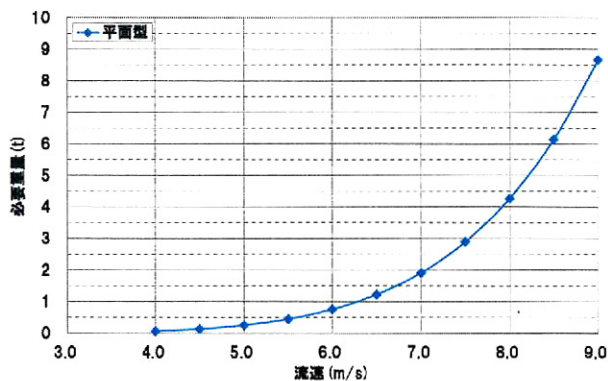


図-23 「護岸の力学設計法 改訂版」による流れに対する安定性

うが顕著に現れる。これは、かみ合わせ配列であるため水平方向への挙動が隣り合うブロックにより拘束されるためと推測できる。

(4) 人工リーフ近傍の流速場

流速の解析も圧力解析と同様に、波形が安定した時刻の5波形を抽出し、平均値として解析を行った。プラスを岸向き方向、マイナスを冲向き方向の流速とした。

図-20～22に、人工リーフ法面部、法肩部、天端部の岸向き方向流速の結果を示す。図より、人工リーフ法肩部付近では、流速が5.0m/s～7.0m/s発生している。法面部の5.0m/s、天端部の2.0m/s～5.0m/sと比べると流れが速いことが分かる。

本実験は、天端水深 $R=1.0\text{m}$ 、作用波浪が規則波の条件での結果である。実海域で施工されているものの中には、L.W.L.時にリーフ天端面と水面が等しい条件の海域や、不規則波が作用するため、波浪パターンによっては水位差が生じることで、より速い流れが生じる可能性がある。このため、流速に対する安定性照査を十分に検討しておく必要がある。

3種の安定照査法のうち土研式は流れの影響を考慮した照査法とされている。しかし、天端水深 $R/\text{波高}H$ がある値以下では土研式の適用外になるなど、完全に流れに対する安定照査がなされるとは言えない。ここでは、土研式自体が非常に複雑に構成されているなどの理由から、河川の根固めブロックの安

定照査法として用いられる「護岸の力学設計法 改訂版」⁴⁾の α 、 β を使用した結果を図-23に示す。流れのみと流れと波浪の複合した外力に対する安定照査は同一ではないが、図より流速の増加に伴いブロック重量が急激に大きくなることが分かる。また、上流端ブロックのめくれの検討では、群中に敷設されたブロックの安定性に比べて半分以下となる。このため、特に上流端ブロックに相当する法肩前後のブロックの流れに対する安定照査については十分に検討を行った上で使用することが必要である。

4. まとめ

本研究から、人工リーフに用いる被覆ブロックの配列方法と安定性の関係について以下のことが明らかになった。

- (1) 隣り合うブロック間の空隙が大きな「突き合わせ配列」は「かみ合わせ配列」よりも安定流れに対する安定照査性が向上する。
- (2) 人工リーフ法肩部に法肩専用ブロックを用いることで、法肩部の隙間を無くすことや、ブロック重量が割増されるため被災率を低減することができる。
- (3) 被覆ブロックに作用する揚圧力は、ブロック自体の空隙に加え、敷設した場合の隣り合うブロック間の空隙にも関係している。
- (4) 人工リーフ法肩部では、揚圧力の増大に加えて表面の流速が大きくなる。このため、被覆ブロックに作用する外力要因が集中し、被災が集中し易い状況となる。
- (5) 法肩前後のブロックは、河川の根固めに置き換えると群体上流端ブロックと同じ状態となる。このため、めくれが生じやすい状況となる。一般に、めくれは群中に敷設されたブロックの安定性よりも大きく劣るため、法肩専用ブロックを使用することでめくれが生じにくくするなどの工夫は有効である。

参考文献

- 1) 竹内秀典，清水敬三ら：海岸構造物における被覆ブロックの安定性に関する実験的研究，海洋開発論文集 19 巻 pp.219-224, 2003.
- 2) 中村孝幸，大塚明人ら：人工リーフ上の被覆ブロックに作用する波力の特性について，海洋開発論文集 Vol.8, pp.69-74, 1992.
- 3) 社団法人全国海岸協会：人工リーフの設計の手引き 改訂版，2005.
- 4) 財団法人国土技術開発センター：護岸の力学設計法 改訂版，2007.
- 5) 田代洋一，飯干富広ら：護岸ブロックの水理特性値に関する実験的研究，河川技術論文集 16 巻 pp.357-362, 2009.