

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

EXPERIMENTAL STUDIES ON STABILITY OF ARMOR BLOCKS IN COASTAL STRUCTURES

竹内秀典¹・清水敬三²・島田広昭³・藤井伸啓⁴
南井 隆⁵・井上雅夫⁶

Hidenori TAKEUCHI, Keizou SHIMIZU, Hiroaki SHIMADA, Nobuaki FUZII,
Takashi Minai and Masao INOUE

¹学生員 関西大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

²正会員 三基ブロック株式会社 技術部 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-11-7)

³正会員 工博 関西大学講師 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁴株式会社加賀田組 (〒950-8586 新潟市八千代1-5-32)

⁵関西大学 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

⁶正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

In this study, the hydraulic model experiments on stability of armor blocks are carried out for sloping breakwater and artificial reef. Especially, the influence of incident wave characteristics and arrangement of armor blocks on stability of coastal structures is discussed. As the result, stability of armor blocks depends on the wave period and arrangement of blocks. And the mechanism of disaster damage on armor blocks is different from coastal structures. That is to say armor blocks are damaged by the uplift pressure due to return flow of swash waves in the sloping breakwater, but by the horizontal wave force from breaking waves on the artificial reef. Additionally, initial damage place and damage process are clarified experimentally.

Key Words : armor block, sloping breakwater, artificial reef, stability number

1. 緒言

近年, 我が国における海岸整備においては, 環境や景観にも配慮した海岸構造物が求められており, これまで数多く施工されてきた直立護岸や離岸堤に代わって, 緩傾斜護岸や人工リーフなど, のり面などをブロックで被覆した消波構造物が全国各地で施工されるようになってきた. 一般に, 消波構造物に用いられる被覆ブロックは, 捨石よりも安定性が高く, かつ透水性も大きいため, 打ち上げ高の低減効果は大きい. しかし, 被覆ブロック上での波の挙動は極めて複雑であることから, 被覆ブロックの安定性は, その形状や配列方法などの設置条件によって大きく変化するものと考えられる.

そこで本研究では, 傾斜堤や人工リーフにおける被覆ブロックの安定性に及ぼす諸要素の影響を明らかにするために, 入射波の特性, ブロックの配列方

法などを変化させた水理模型実験を行い, 被覆ブロックの被災特性を検討しようとした.

2. 傾斜堤における被覆ブロックの安定性

本実験においては, 模型縮尺は1/50を想定し, 以後は現地換算した値を用いることにする. なお, これは人工リーフの場合も同じである.

(1) 実験条件および方法

全長30m, 幅0.7m, 深さ1.0mの二次元不規則波造波水槽内に, 勾配が1/30の傾斜海浜を設け, その上に図-1に示すような捨石と被覆ブロックで傾斜堤を設置した. マウンドに用いた捨石の直径 ϕ は $\phi=0.5\sim 0.65\text{m}$ とし, そののり面勾配は1.5割, 2割および3割の3種類とした. 使用した被覆ブロックは平型ブロック (質量3.9t, 比重2.2) である. なお, 被覆ブ

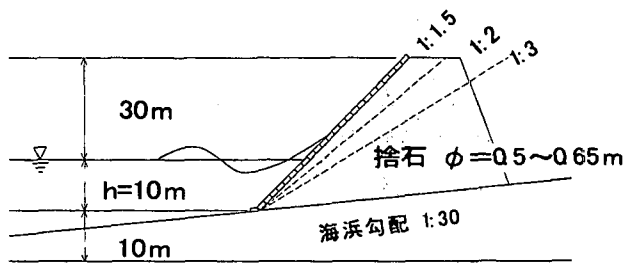


図-1 実験装置 (傾斜堤)

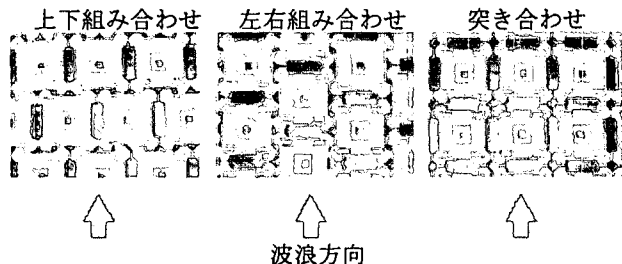


図-2 ブロックの配列方法

ロックの配列方法は、図-2に示すような3パターンとした。なお、空隙率は上下および左右組み合わせでは16.3%、突き合わせでは21.6%である。実験波は、Bretschneider・光易型スペクトルを有する有義波周期 T が8.5s、11.3sおよび15.6sの不規則波とした。

まず、所定の半波高の波を71分間作用させ、堤体を締め固めてから本実験を開始した。本実験では、波高を小さいものから順次増大させて行い、同じ条件で最大3回繰り返し行った。1回の作用時間は、211分間で、作用波数としては800~1500波となる。港湾の施設の技術上の基準・解説²⁾によると、1000波以上を与えるものとしている。これに対し周期15.6sのケースは波数が少なくなるが、波の作用時間の増加に伴う被災個数の増加が認められなかったため、800波程度でも実験の結果に影響が少ないと判断した。その後、被災したブロックの個数や被災箇所を目視により計測した。ここでの「被災」の定義は、ブロックがほぼ1個分以上移動したものとした。

(2) 実験結果および考察

a) 波高と被害率との関係

本実験では、被覆ブロックの配列方法が突き合わせの場合、ブロックの被災は全くなかった。一般に、傾斜堤における被覆ブロックの被災は、遡上波の戻り流れによる揚圧力がブロックを持ち上げて、ブロックをのり面前方に移動させるメカニズムで発生するものと考えられる。したがって、突き合わせの場合、ブロック間の空隙率が上下組み合わせや左右組み合わせより大きい場合、ブロックに作用する揚圧力が小さくなり、被災しにくい安定な配列になっているものと言える。

図-3は、傾斜堤ののり面勾配が1.5割の場合における被害率 $D(\%)$ と堤前波高 $H(m)$ との関係を示した。ここで、被害率とは、被災したブロックの個数を有

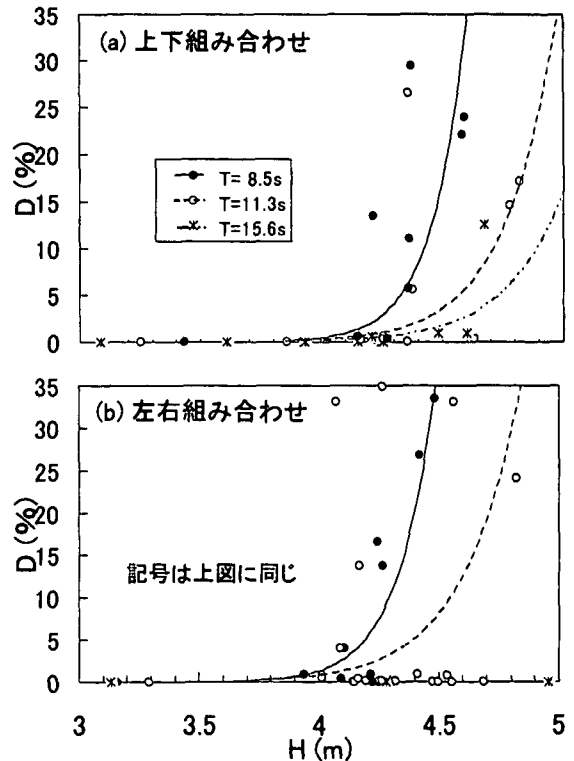


図-3 被害率と波高との関係(1.5割の場合)

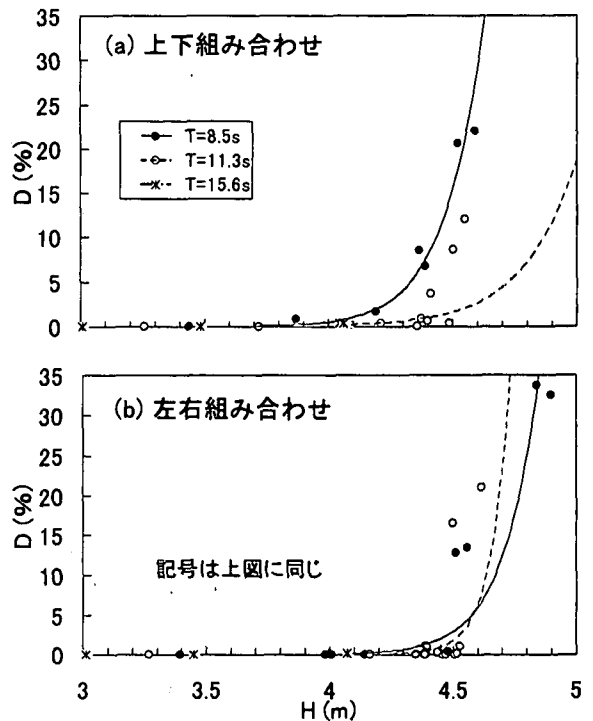


図-4 被害率と波高との関係(2割の場合)

効ブロック数(最大遡上高を考慮した領域に含まれる総ブロック数)で除して、百分率で表したものである。なお、(a)図は、配列方法が上下組み合わせの場合、(b)図は、左右組み合わせの場合のものである。(a)図によると、いずれの周期 T においても、 D は H の増大とともに、増加する傾向を示している。しかし、被災し始めてからの H の増大に対する D の増加の割

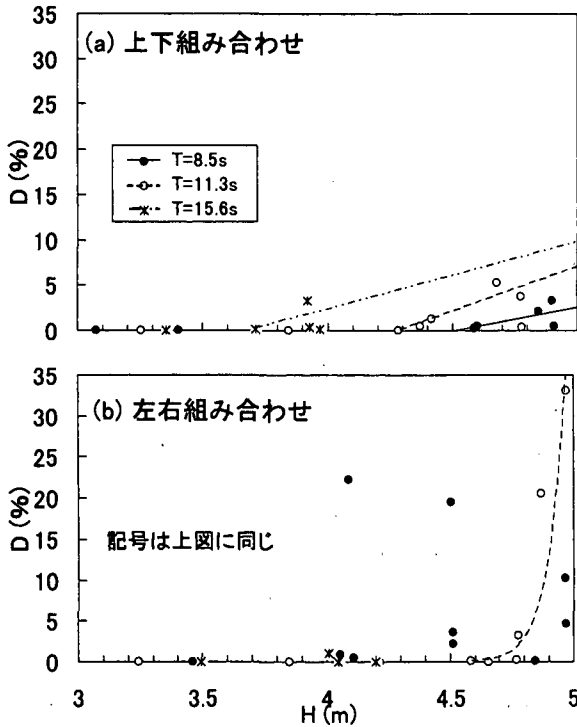


図-5 被害率と波高の関係(3割の場合)

合は、 T が短いほど大きい。すなわち、ブロックの安定性に及ぼす周期の影響は大きいと言える。また、(b)図においては、 T が8.5sおよび11.3sの場合には、(a)図の場合とほぼ同様な傾向がみられるが、 $T=15.6s$ の場合には、ほとんど被災しない。

図-4は、図-3と同様なものを、のり面勾配が2割の場合について示した。(a)図によると、図-3の場合と同様に、 D は H が大きくなると増大する傾向がみられ、また周期が短いほどブロックは被災しやすい。被災し始めてからの H の増大に対する D の増加の割合も周期が短いほど大きい。なお、15.6sの場合には被災はしなかった。(b)図によると、 T が短いほど被災しやすいが、被災し始めてからの H に対する D の増加の割合は、 T が11.3sのほうが大きい。

図-5は、図-3同様なものを、のり面勾配が3割の場合について示した。(a)図によると、いずれの周期 T においても、 D は5%以下で非常に小さい。しかし、3割勾配の場合においては、1.5割および2割の場合とは異なり、 T が長いほど限界波高は小さくなる。(b)図によると、 $T=8.5s$ の場合にはデータに大きなばらつきがみられ、 D と H との関係を特定することはできない。11.3sの場合には、 D は H の増大とともに大きくなり、特に被災し始めてからの H の増大に対する D の増加割合も非常に大きい。このように被災が始まってからの D の増加が非常に大きくなる傾向は、図-4においてもみられ、このことは左右組み合わせの大きな特徴であると言える。

b) 配列方法と安定係数との関係

実験に用いたブロックの質量、安定限界波高およびのり面勾配からハドソン式¹⁾を用いて、被覆ブ

ロックの安定係数 K_D および安定数 N_s を求めた。表-1には、その計算結果を示した。

表-1によると、傾斜堤ののり面勾配が1.5割および2割の場合には、いずれの配列方法においても、入射波の周期が長いほど K_D は大きく、安定性は優れ

表-1 安定係数(K_D)と安定数(N_s)の計算結果

のり面勾配	配列方法	周期(s)	安定限界波高(m)	K_D	N_s
1.5割	上下組み合わせ	8.5	3.85	12.0	2.6
		11.3	3.90	12.5	2.7
		15.6	4.00	13.5	2.7
	左右組み合わせ	8.5	3.65	10.2	2.5
		11.3	3.70	10.7	2.5
		15.6	x	x	x
2割	上下組み合わせ	8.5	3.70	8.0	2.5
		11.3	4.10	10.9	2.8
		15.6	x	x	x
	左右組み合わせ	8.5	4.05	10.5	2.8
		11.3	4.25	12.1	2.9
		15.6	x	x	x
3割	上下組み合わせ	8.5	4.50	9.6	3.1
		11.3	4.28	8.2	2.9
		15.6	3.70	5.3	2.5
	左右組み合わせ	8.5	x	x	x
		11.3	4.58	10.1	2.5
		15.6	x	x	x

xは特定できなかったもの

ていると言える。しかし、3割の場合で、上下組み合わせの場合には、逆に T が短いと K_D は大きい。ブロックの配列方法で比較すると、のり面勾配が急な場合には上下組み合わせが、緩やかな場合には左右組み合わせの安定性が優れている。

c) 被害率分布

図-6は、傾斜堤ののり面勾配が1.5割で、 T が8.5sの場合における被害率分布を示した。(a)図は配列方法が上下組み合わせ、(b)図は左右組み合わせの場合のものである。ここでの被害率 D_r (%)は、波向きに

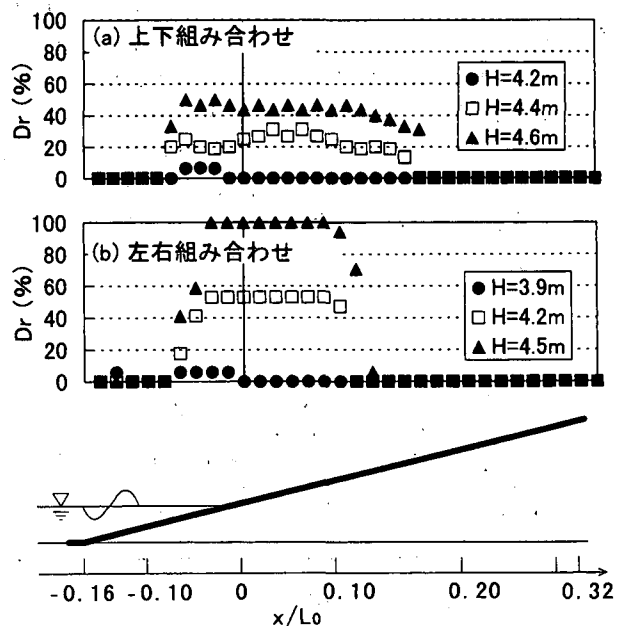


図-6 被害率分布(1.5割, $T=8.5s$ の場合)

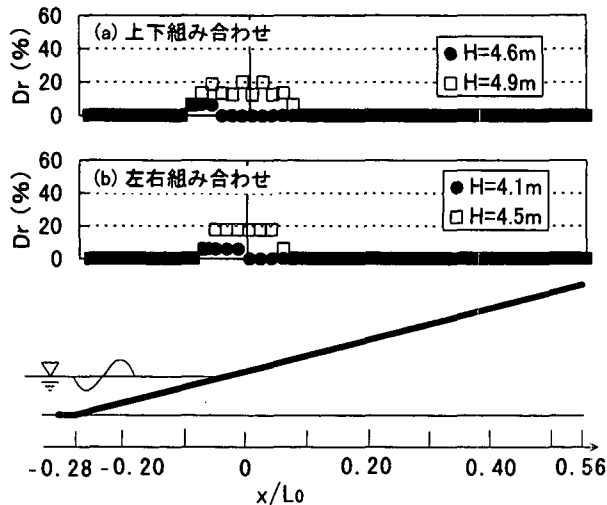


図-7 被害率分布(3割, T=8.5sの場合)

直角方向に並べた被覆ブロックの1列中での被災ブロックの個数の割合であり、それを各列ごとに示した。なお、横軸の x/L_0 は傾斜堤の斜面長 x を波長 L_0 で除したものであり、 $x/L_0=0$ の位置が汀線を示している。

(a)図によると、被覆ブロックの初期被災の発生位置は、汀線よりもやや沖側である。また、 H が増大するにつれて、被災領域は波向き方向に大幅に拡大している。(b)図においては、初期被災の発生位置は(a)図と同様に汀線よりもやや沖側であるが、 H の増大とともに、被覆ブロックの被災領域は、波向きに直角方向にも大きく広がる。このことから、被災範囲の広がる過程は、被覆ブロックの配列方法によって異なることがわかる。これは、上下組み合わせの場合には波向き方向、左右組み合わせの場合には波向きに直角方向のブロックのかみ合わせが弱いためである。

図-7には、図-6と同様なものを傾斜堤ののり面勾配が3割の場合について示した。3割勾配のブロックの被災個数は1.5割のものに比べると少ない。しかし、配列方法の違いによる被災状況の差異はあまりみられない。これは、のり面勾配が緩くなると、のり面上方からのブロックにかかる重量が小さくなり、ブロック間のかみ合わせの効果が弱くなるためと考えられる。

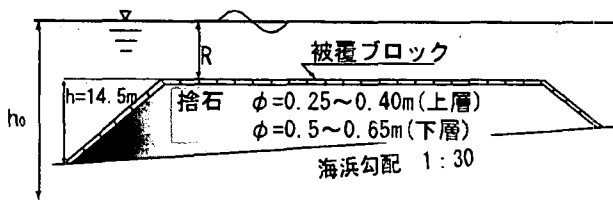


図-8 実験装置(人工リーフ)

3. 人工リーフにおける被覆ブロックの安定性

(1) 実験条件および方法

実験は、傾斜堤の場合と同様に、1/30の傾斜海浜を設け、その上に図-8に示すような人工リーフを設置した。人工リーフは、コアに $\phi=0.5\sim0.65\text{m}$ 、表面は $\phi=0.25\sim0.40\text{m}$ の捨石でマウンドをつくり、その上を平型ブロックで被覆した。マウンドののり面勾配は、表裏ともに2割とした。被覆ブロックの配列方法は、傾斜堤の場合と同じ3パターンとした。天端上水深 R は、5.0m、2.5mおよび0mの3種類とし、順次水深を下げて実験を行った。実験波は、Bretschneider・光易型スペクトルを有する有義波周期 T が8.5s、12.7sおよび17.0sの不規則波とした。なお、この実験では、作用波数は500波程度とした。港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾によると、1000波以上を与えるものとしている。本研究では被災が始まる限界波高を求めることを主たる目的としていたため500波としたが、この影響については、(2)において後述する。その他の実験方法などは傾斜堤の場合と同様である。

(2) 実験結果および考察

a) 作用波数の影響

図-9には、突き合わせで $R=0\text{m}$ の場合についての波高と被災ブロック数との関係を示した。これによると、安定限界波高は作用波数が500波で3.5m、1000波で3.3mであり、その差が小さいこと、また、被災率に関しては2~5倍程度に増加する場合もあるが、その定性的な傾向は変わらないことから、一応500波で実験を行った。しかし、過小評価になることは否めない。

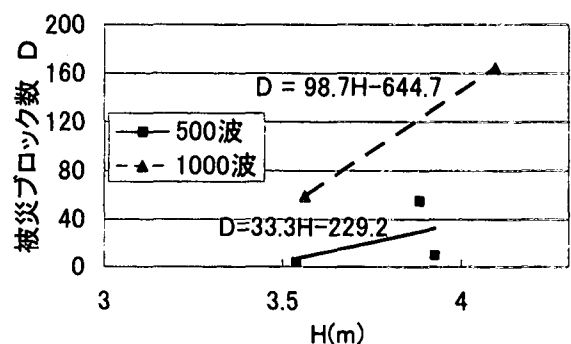


図-9 作用波数の影響

b) ブロックの被災個数と波高との関係

図-10には、天端上水深 $R=0\text{m}$ で周期 T が8.5s、12.7sおよび17.0sとした場合の被災ブロックの個数 D と堤前波高 H との関係を示した。なお、(a)図は配列方法が上下組み合わせ、(b)図は突き合わせ、(c)図は左右組み合わせの場合である。(a)図によると、いずれの T についても、 D は H の増大とともに大きくな

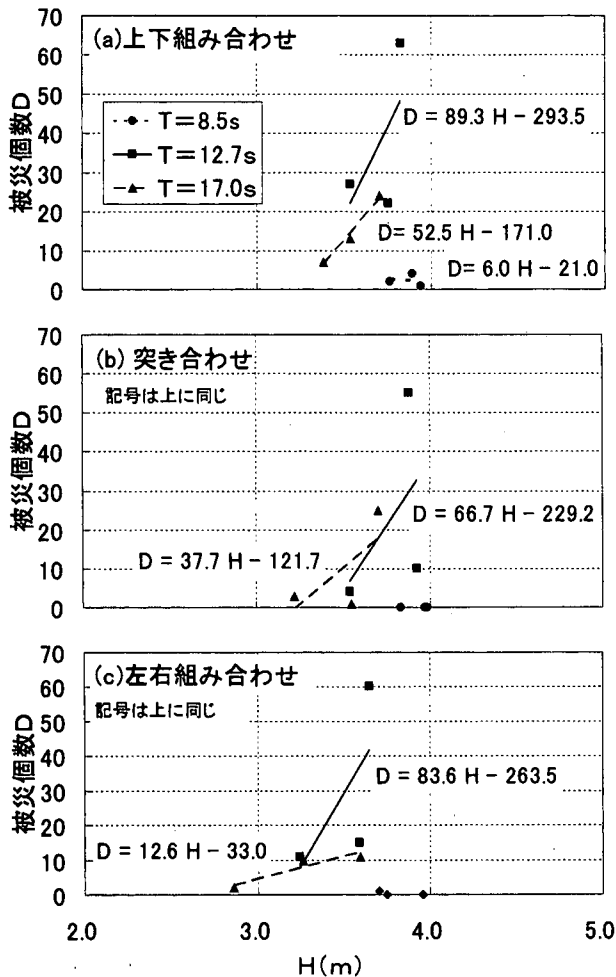


図-10 被災個数と波高との関係(R=0mの場合)

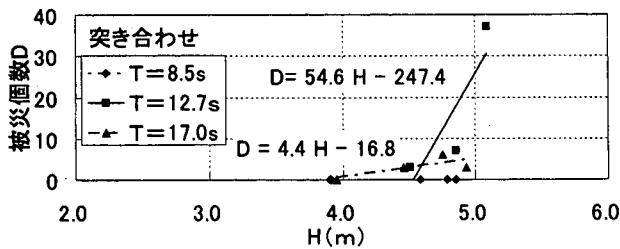


図-11 被災個数と波高の関係(R=2.5mの場合)

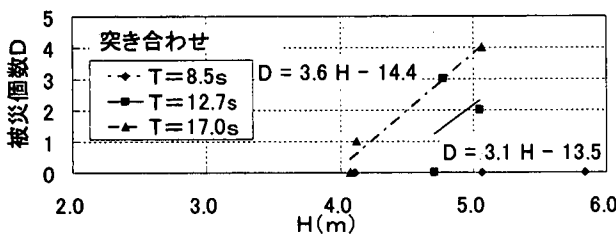


図-12 被災個数と波高の関係(R=5.0mの場合)

る傾向がみられる。しかし、被災し始めてからのHの増大に対するDの増加の割合は、Tが12.7sの場合が最も大きく、次に17.0s、8.5sである。すなわち、入射波の周期は、ブロックの安定性に大きな影響を

及ぼすことがわかる。また、(b)および(c)図の場合についても、(a)図とほぼ同様な傾向がみられるが、Tが8.5sの場合には、被災はほとんどしない。

図-11には、図-10と同様なものを、Rが2.5m、図-12にはRが5.0mの場合について示した。なお、いずれも突き合わせのものについて示した。これらによると、図-10の場合と同様に、Hの増大とともにDは増加する傾向がみられる。しかし、Rが大きくなるほど、Dは減少している。これは、天端上水深が大きくなるにつれて、リーフ上で発生する碎波がブロックの安定性にほとんど影響しなくなるためと考えられる。

c) 配列方法と安定数(Ns)との関係

図-10~12に示した線形近似直線から算出した安定限界波高Hと実験に用いたブロックの質量Mを用いて、被覆ブロックの安定数Nsをプレブナー・ドネリー式³⁾によって求めた。図-13には、縦軸にNs、横軸に比水深R/Hをとり、配列方法とNsとの関係を示した。これによると、上下組み合わせの安定性が最も優れ、次に突き合わせ、左右組み合わせの順序に

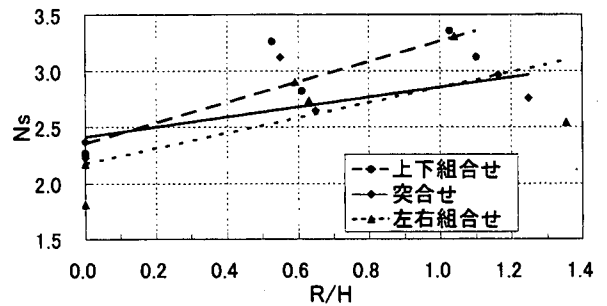


図-13 NsとR/Hとの関係

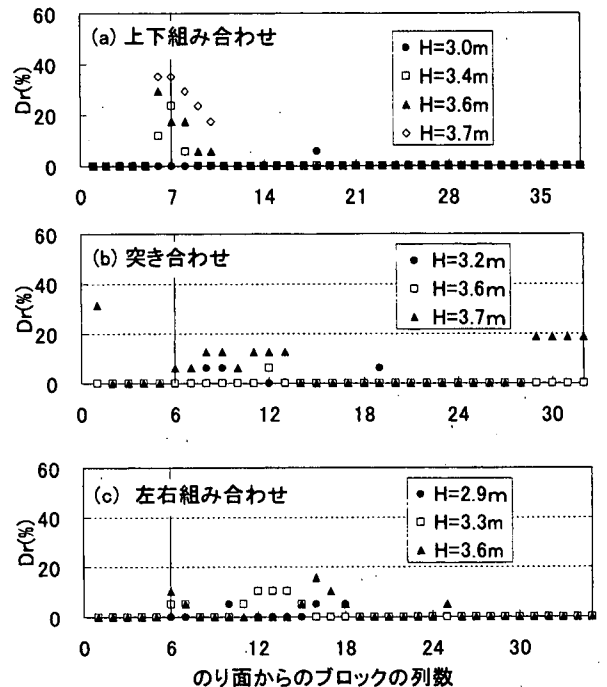


図-14 被害率分布(R=0m, T=17.0sの場合)

なっている。人工リーフにおけるブロックの被災は、リーフ上で砕波が発生し、その水塊による波の進行方向の水平力が被覆ブロックを岸側に散乱させるメカニズムで発生する。したがって、突き合わせと左右組み合わせの場合、波の進行方向に対してブロックが直線的に並んでいることから、被災が岸側に連鎖して発生しやすくなるため安定性は劣るものと考えられる。

d) 被害率分布

図-14には、 $R=0m$ で $T=17.0s$ における被害率分布を示した。(a)図は配列方法が上下組み合わせ、(b)図は突き合わせ、(c)図は左右組み合わせである。ここでの被害率 $D_r(\%)$ は、波向きに直角方向に並べた被覆ブロック1列中に占める被災ブロックの割合である。なお、横軸はのり尻から数えたブロックの列数を示し、(a)図では7列目、(b)および(c)図では6列目のり肩になっている。

被覆ブロックの被災箇所は、いずれの配列においても、のり肩付近やその後方に集中している。これは、表のり面付近で砕波が多頻度で発生することや、のり肩でのブロックのかみ合わせが弱いためと考えられる。被災状況には、配列ごとの違いがみられる。(a)図では、波高が増大するとともに、波向きに直角方向に被災が広がる傾向がみられる。これは、上下組み合わせは、波向きと直角方向にブロックのかみ合わせが弱く、波向きと直角方向に被災が進行しやすいためと考えられる。(b)図は、波高が増大すると、天端上まで大きく被災が広がり、さらに波向きに直角方向にも拡大している。(c)図においても、(b)図とほぼ同様な傾向がみられる。これは、突き合わせおよび左右組み合わせは、波向き方向に対してブロックのかみ合わせが弱く、波向き方向にも大きく被災が広がるためと考えられる。

天端上水深 R が2.5mおよび5.0mの場合においては、いずれの配列でも被災は極めてわずかであり、明確な被災特性を明らかにすることは困難である。以上のことから、天端上水深が小さい場合に限って、ブロックの配列の違いが被災特性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。

4. 結 語

以上、被覆ブロックを用いた傾斜堤および人工リーフを対象とした水理模型実験を行い、被覆ブロックの安定性に及ぼす諸要素の影響や被災特性を検討してきた。その結果、以下のことが明らかになった。

傾斜堤についての結果

1) 安定性が優れた被覆ブロックの配列方法は突合わせ配列である。すなわち、傾斜堤の場合、遡上波の戻り流れによる揚圧力によってブロックが被災す

るため、空隙率の大きい突き合わせでは、ブロックに作用する揚圧力が小さくなり、被災しにくい。

2) 空隙率が同じ上下組み合わせと左右組み合わせでは、のり面勾配によって被災しにくい配列は異なり、のり面勾配が急な場合には上下組み合わせ、緩い場合には左右組み合わせの安定性がそれぞれ優れている。また、のり面勾配が急な場合には、入射波の周期が短いと、被覆ブロックは被災しやすい。逆に勾配が緩く上下組み合わせの場合には、周期が長くと被災しやすい。

被覆ブロックの被災箇所については、のり面勾配が急な場合にはブロックの配列方法による違いが見られるが、緩い場合には配列方法による違いはあまりみられない。

人工リーフについての結果

1) 安定性が優れた被覆ブロックの配列方法は、上下組み合わせである。人工リーフにおける被覆ブロックの被災は、入射波がリーフ上で砕波し、その水塊による進行方向の水平力が、被覆ブロックを岸側に散乱させることによって発生する。したがって、突き合わせと左右組み合わせの場合、波の進行方向にブロックが直線的に並び、被災が岸側に連鎖して発生しやすいため、上下組み合わせよりも安定性は劣る。

2) 配列方法が同じ場合、天端上水深が小さいほど被災規模は大きくなる。

3) 入射波の周期に関しては、12.7sの場合が最も被災規模が大きい。

4) 被覆ブロックの被災箇所は、いずれの配列方法でも、のり肩付近およびそれよりやや後方に集中する。これは、表のり面付近で砕波が多頻度で発生することやのり肩でのブロックのかみ合わせが弱いためである。

一般に被覆ブロックは平面形状が正方形を基本としているものが多く、実験に使用したブロックも同様であるが、かみ合わせの方向を変化させることができる特徴をもっている。当実験において被覆ブロックの配列方法による安定性が海岸構造物（傾斜堤護岸、人工リーフ）によって差異のあることが確認できた。

参考文献

- 1) Hudson,R.Y. : Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Proc.ASCE,Vol.85,WW3, pp.93~121,1959.
- 2) 運輸省港湾局：港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，pp.151-159,1999.
- 3) Brebner,A.and D.Donnelly : Laboratory study of rubble foundation for vertical breakwater, Proc.8th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp.99-121, 1962