

傾斜堤の越波量等に及ぼす被覆ブロックと上部工の影響

Effect of Armor Layer and Crown Wall on Wave Overtopping of Rubble Mound

高橋重雄¹・下迫健一郎²・近藤充隆³・山口貴之⁴

Shigeo TAKAHASHI, Kenichiro SHIMOSAKO, Mitsutaka KONDOH and Takayuki YAMAGUCHI

1 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部耐波研究室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)

2 正会員 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官

3 正会員 運輸省港湾技術研究所 海洋エネルギー利用研究室

4 運輸省港湾技術研究所 研修生 (シバタ工業(株))

Recently, randomly placed special armor blocks with single unit versus double unit width are being gradually used for protecting rubble mound breakwaters. With this in mind, we conducted a series of experiments to examine wave overtopping of various types of rubble mound breakwaters. Results indicate that (i) differences in width and void ratio of the armor layer affect both wave energy dissipation on the armor layer and in turn the wave overtopping and wave forces on the crown wall, and (ii) wave overtopping is affected by differences in the height of the armor layer relative to the crown wall height. Also discussed is an alternative design of the crown wall using a perforated wall concept to reduce wave overtopping.

Key Words : Wave-overtopping, rubble mound breakwaters, perforated wall, armor layer, armor blocks, wave wall, high mound composite breakwaters

1. まえがき

傾斜堤は、我が国の主要な防波堤構造の一つであり、比較的水深の小さいところを中心に多くの実績がある。傾斜堤の設計においては、被覆材の安定性が最も重要であり、波力に対して十分安定な被覆材を用いる必要がある。ある程度波高が大きいところでは、被覆ブロックが用いられ、2個分の厚さで被覆層を形成する2層被覆が一般的である。

最近、ヨーロッパを中心に1個分の厚さで被覆層を形成する1層被覆ブロックが開発され、次第に採用実績を増やしている。これまでも1層被覆はあったが、比較的薄い平らなブロックで被覆面に規則的に置かれる張りブロックであった。最近開発された1層被覆ブロックは張りブロックではなく乱積みブロックであり、2層被覆に比べると層厚が小さいため、経済的となる。同様なブロックは、アメリカや我が国でも開発されており、今後増加すると考えられる。ただし、被覆材の違いは、そこでの波の変形、すなわち碎波や被覆材によるエネルギー消費が異なり、そうした影響を考慮した設計が必要となっている。

著者らは、空港護岸や親水性護岸として低天端でも越波量の少ない構造について研究(高橋ら1995、

1997、下迫ら1996)を進めており、斜面の勾配、上部工の形状あるいは被覆材の天端高さによる影響を検討している。本研究はそうした一連の研究の一つであり、傾斜堤を対象に、被覆材の違いによる越波量や上部工に作用する波力の変化について実験的に検討している。また、被覆材の天端高さの影響についても検討している。さらに上部工として直立壁に加えて消波構造のスリット型を用いた場合についても実験を行っている。実験では、越波量だけでなく打ち上げ高さや反射率、あるいは上部工に作用する波力等も測定している。

なお、護岸の越波流量に関する研究は、例えば合田・岸良(1975、1976)、高山ら(1982)、谷本ら(1976)など、多くの研究が行われており、一般的な算定法は確立されている。しかしながら、上述した新しい問題に対しては、十分なデータが無いのが現状であり、今回の実験は条件が限られているが、影響を把握する目安となると考えられる。

2. 実験方法

(1) 実験の目的

実験は4つに分かれ、それぞれの目的を以下に示す。

① 被覆材の違いに関する実験

被覆材の違いによる影響を明らかにする。特に1層と2層被覆の違いを検討する。同時に張りブロックとの違いも検討する。

② 被覆材の天端高さに関する実験

捨石マウンドを出来るだけ小さく経済的にするために、被覆層の天端高さ h_s を上部工の天端高さ h_c より低くする場合も少なくない。特に、同じ捨石マウンドの高さで被覆層厚が一層被覆であれば h_s はより小さくなる。 h_s が h_c より低ければ、上部工に被覆されていない部分ができ、そこに波が衝突し、越波の様子や上部工への波力に変化するとと思われる。

③ 上部工の違いに関する実験（スリット型の実験）

上部工は直立の壁であることが多いが、ここをスリット壁とすることによって越波量や上部工に作用する波力を低減できる。特に、被覆層の天端高さ h_s が低い場合には有効と思われ、その効果を検討する。

④ その他

斜面を緩傾斜とした緩傾斜堤における、越波量や上部工に作用する波力の低減について検討した。また、緩傾斜堤では被覆材の必要重量が小さくなり、被覆材として被覆石も採用が考えられるため、被覆石の実験も行った。さらに、被覆材の天端幅を大きくすることによる越波量の低減についても実験を行っている。

(2) 実験方法

実験は、小型造波水路（長さ35m、幅0.5m、高さ1m）において、模型縮尺は1/25を想定して行っている。

図-1は、実験の基本断面を示すものであり、①の被覆材の違いに関する実験断面である。水深 h が37.6cm（9.4m）、マウンドの勾配が1:4/3、上部工の天端高さ h_c と被覆材の天端高さ h_s が同じで $h_c = h_s = 13.2$ cm（3.3m）である。表-1は、実験に用いた被覆材の一覧であり、通常の2層被覆（A）、2種類の一層被覆（B、C）、そして張りブロック（D）を用いている。2種類の1層被覆ブロックの違いは、空隙率の違いであり、従って同じ重量ではあるが被覆層の厚さ D_b が異なる。

図-2（a）は、②の被覆材の天端高さの実験に用いた被覆材低天端と呼ぶ断面である。捨石マウンドの天端高さを上部工底面に一致させ、それぞれの被覆材を設置しており、上部工の天端高さ $h_c = 13.2$ cm（3.3m）、被覆材の天端高さ $h_s = 2.3$ cm～6.8cm（0.58m～1.7m）となっている。ブロックAでは被覆材が上部工の天端高さの半分ほど（ $h_s/h_c = 0.52$ ）被覆しており、ブロックB・Cはほとんど被覆していない（B:0.24、C:0.18）条件となっている。

図-2（b）と（c）は、③の上部工の違いに関する実験に用いた断面であり、スリット型の上部工を用いている。ただし、（b）は基本型の断面と同じで（c）は被覆材低天端の断面と同じである。なおこのスリット壁は直径3.2cm（0.8m）の円柱で開口率は25%であ

る。また、スリット壁を含めた遊水部の幅は8.4cm（2.1m）である。なお、遊水室の幅がほぼ2倍の16.2cm（4.1m）のスリット壁（中型）についても実験している。

図-2（d）は、④のその他の実験で用いた1:3の緩傾斜断面であり、被覆材についても80gf（1tf）の捨石を用いた場合も実験している。また、マウンドの天端幅 B_M を16cm（4m）と1.5倍程度にした場合も実験している。

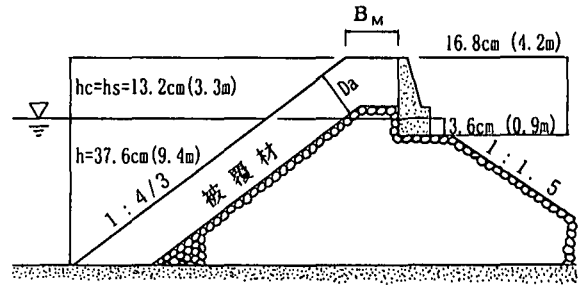
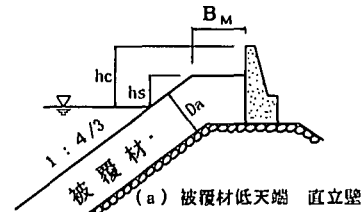
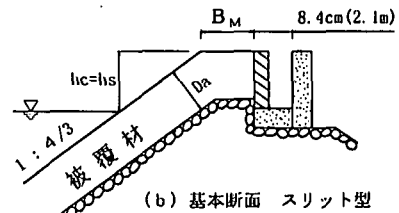


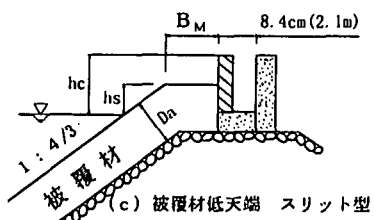
図-1 実験断面（基本型）



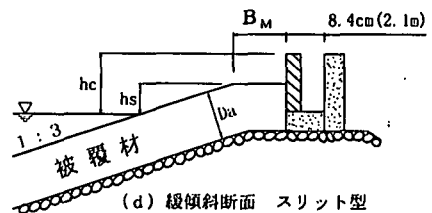
(a) 被覆材低天端 直立壁



(b) 基本断面 スリット型



(c) 被覆材低天端 スリット型



(d) 緩傾斜断面 スリット型

図-2 実験断面

表-1 被覆ブロックの種類

被覆材	重量 W (tf)	移動限界水深 $H_{L/2}$ (m)	空隙率 (%)	K_0 値	天端高さ h_c (m)	被覆厚 D_b (m)	天端幅 B_M (m)
ブロックA (二層被覆)	4.7	3.68	50	8.3	1.7	2.80	2.90
ブロックB (一層被覆)	3.1	3.98	60	16	0.8	1.70	2.79
ブロックC (一層被覆)	3.4	3.73	50	12	0.58	1.48	2.79
ブロックD (一層張り)	8.1	—	—	—	—	1.33	2.58
被覆石	0.956	2.08	—	2	0.58	1.48	2.79
							4.00

(3) 実験波と計測

実験波は規則波 ($T=1.44\text{s}$ (7.2s)、 $H=4\sim 28\text{cm}$ ($1\sim 7\text{m}$)) と不規則波 ($T_{1/3}=1.44\text{s}$ (7.2s)、 $H_{1/3}=4\sim 17\text{cm}$ ($1\text{m}\sim 4.25\text{m}$)) を用いた。また規則波では越波量、打ち上げ高さ、滑動量について計測を行い、不規則波では越波量、反射率、ブロックの安定性についてそれぞれ計測を行っている。

3. 波の作用と打ち上げ高さ、反射率

(1) 波の作用状況

図-3は、波の作用状況を示すもので、波高 $H=6\text{m}$ (規則波) の場合である。(a)の二層被覆で被覆材の天端が上部工の天端に一致している場合には、ブロック斜面を駆け上がるように砕波しており、打ち上げ高さは小さい。これに対して、(c)の被覆材の天端が低い場合は、静水面付近で波が砕けて衝撃的に上部工に作用し、大きく打ち上げられている。ただし、(b)の上部工をスリット型にした場合には、スリットによって波面が乱され、ここに波がトラップしているのがわかる。一方、(d)の被覆材が一層被覆の場合 (被覆材低天端・直立壁上部工) は、二層被覆の場合より、さらに厳しく上部工に衝突しているのがわかる。

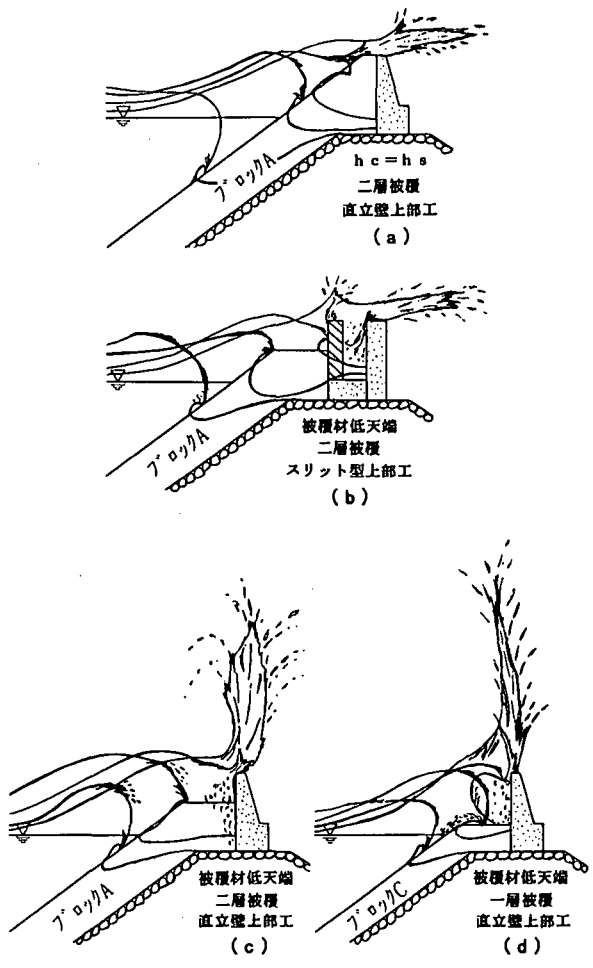


図-3 波の作用状況

(2) 打ち上げ高さ

図-4は、上述した条件について、打ち上げ高さを見たものであり、波高を横軸にとって示している。打ち上げ高さは波高に比例して上昇しているが、 $H=4.5\text{m}$ 付近を境にして減少傾向にある。これは、波高が大きいと上部工を越えてしまうようになり、かえって打ち上げ高さが下がるためと思われる。

いずれにしても、図-4で見たように打ち上げ高さは、基本断面の二層被覆、被覆材低天端でスリット壁、同直立壁、被覆材低天端で一層被覆の順となっている。なお、打ち上げ高さが小さくなるほど大きな波高で打ち上げ高さのピーク値になることが興味深い。

(3) 反射率

図-5は反射率の測定結果を示すものである。被覆ブロックの違いで見ると、ほとんどのケースで、一層被覆より二層被覆の方が反射率が小さいことがわかる。また、上部工をスリット壁にすることによっても反射率がやや低下している。さらに、緩傾斜では20%程度とかなり小さくなる。

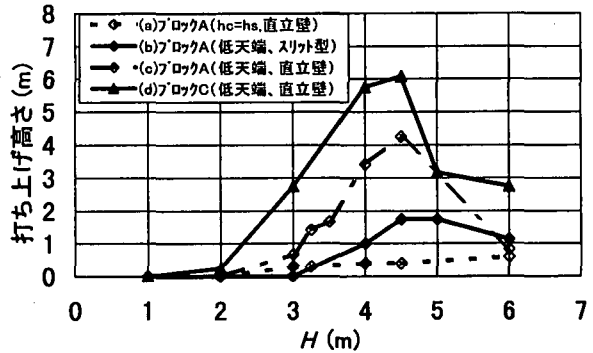


図-4 打ち上げ高さ

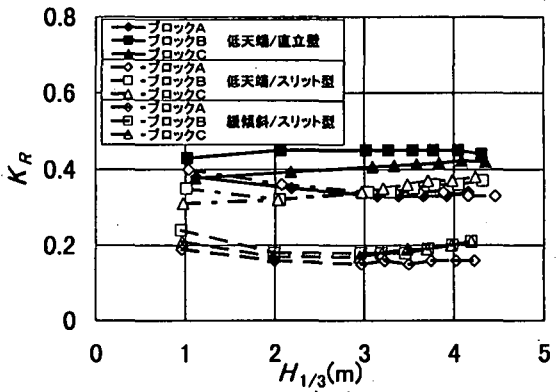


図-5 反射率

4. 越波量に関する実験結果

(1) 被覆ブロックの違いによる越波量の比較

図-6は4種類のブロックの越波量を比較するものであり、横軸に有義波高をとって示している。

二層被覆のブロック (A) の越波量は、一層被覆ブロック (B、C、D) より小さい。ただし、一層被覆の中では空隙率の高いブロック B (60%) が比較的二層被覆ブロックに近く、空隙率が二層被覆ブロックと変わらないCブロック (50%) が、張りブ

ロックにやや近い値となっている。越波量は被覆材の消波効果に依存しており、被覆材の被覆層の厚いものほど、また空隙率の高いものほど越波量が少なくなる傾向があるようである。

なお、許容越波量を $0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ とした場合の相対天端高さ ($h_c/H_{1/3}$) について、ブロックごとに算出を行って比較すると、ブロックAは0.94で、ブロックBは0.98、ブロックCは1.07、ブロックDは1.13 (付表-1 参照) となる。被覆層によって必要となる天端高さが異なることに注意が必要である。

(2) 越波量に及ぼす被覆材天端高さの影響

図-7は、被覆材が上部工天端まで覆っていない被覆材低天端断面での越波量を示すもので、A、B、Cのブロックの実験結果を示しており、同時に前掲図-6の被覆材の天端が上部工天端と等しい基本断面の結果も併せて示している。

被覆材低天端の条件では、ブロック上で砕けた波が上部工に当たり、打ち上げるようになる。したがって、二層被覆のブロックAでは、波が打ち上がることによって返って上部工を越えるものが少なくなり、越波量が少なくなっている。越波量が $0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ の時の ($h_c/H_{1/3}$) でみると、0.94が0.89に下がる。

しかしながら、一層被覆のものは空隙率に係わず同じ値となり、基本断面の空隙率50%のものよりやや上回る結果となった。この場合はブロックの天端が下がることによってブロックによる消波効果がさらに低くなる。そのため打ち上げ高さが大きくなり、越波量が増えたものと思われる。

(3) スリット型上部工による越波量の低減

図-8は上部工にスリット型を用いたときの越波量を示したものである。被覆材の天端が上部工と同じ基本断面の場合であり、直立壁の上部工と比較している。越波量はすべてのブロックにおいて1/2から1/3に減少している。これはスリット壁による消波機能に起因するものと考えられる。特に越波量の低減効果は消波効果の低かったブロックCで顕著に現れている。結果として、3つのブロックの差がかなり小さくなっていることが興味深い。許容越波量を $0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ とした場合の ($h_c/H_{1/3}$) でみると、0.80~0.87程度となる。このように上部工にスリット型を用いることは、消波を促進するとともに、そこで越波する水塊をトラップし、越波量の低減にも有効であると考えられる。

一方、図-9は被覆材の天端が低い場合である。スリット型による低減効果が、一層被覆の場合小さいことがよくわかる。これは、先に述べたように低天端では消波が十分でなく、スリット壁でも越波の低減効果が十分には現れなかったためと思われる。すなわち、もともと越波流量が大きくスリット壁による消波および水塊のトラップ効果が十分発揮されていないと思われる。

なお、遊水室幅の大きいスリット壁 (中) では、消波および水塊のトラップ効果が大きく、越波量が

1/2程度となる。

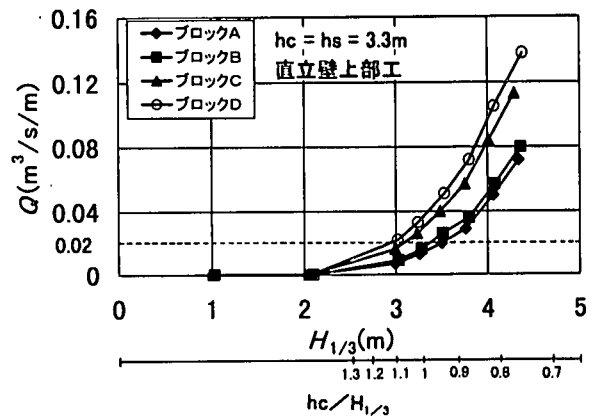


図-6 基本断面での被覆ブロックの違いによる越波量の比較

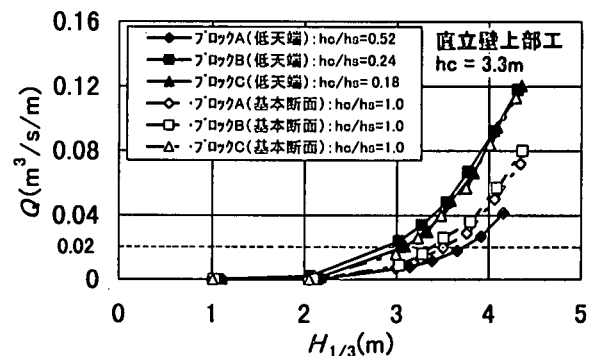


図-7 被覆材天端高さの違いによる越波量の比較

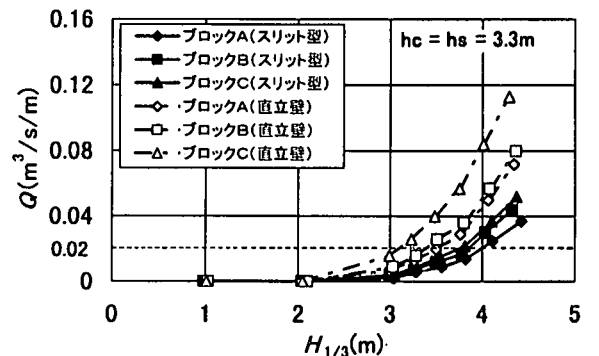


図-8 スリット壁による越波量の低減、基本断面の場合 ($h_s/h_c = 1.0$)

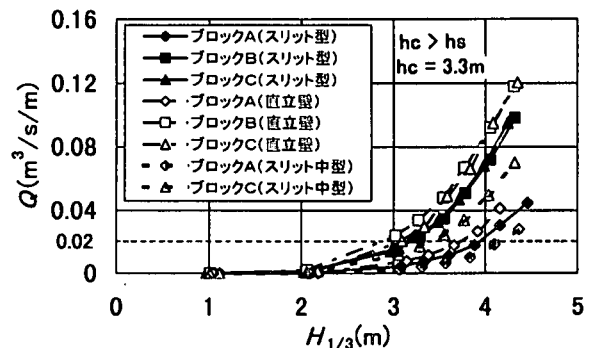


図-9 スリット壁による越波量の低減低天端断面の場合 ($h_s/h_c < 1.0$)

(4) 緩勾配斜面による越波量の低減

図-10は、緩傾斜とした場合の越波量を見たものであり、スリット型の上部工を用いた被覆材低天端断面における越波量を比較したものである。1:4/3の越波量に比べ1:3では1/2から1/3の越波量になっており、緩勾配による越波低減効果が顕著である。これは十分な碎波が長い斜面上で起こり、波力が低減し、越波量が減少したと考えられる。越波量が0.02m³/s/mの時の ($h_c/H_{1/3}$) でみると、0.7程度に下がる。

(5) 被覆石の場合の越波量

図-11は、被覆材に被覆石(956kgf/個)を用いた場合の越波量の計測結果である。また、上部工前面の肩幅 B_M を2.79mから4mに変えた場合も示している。ただし、上部工がスリット壁で、緩傾斜マウンド、そして被覆材の天端が上部工より低い場合であり、比較のためにブロックA、B、Cの結果も示している。

被覆石の越波量は一層被覆ブロックとほぼ同じ越波量となっているのが明らかである。被覆石は2層被覆であるが、結果的に層厚は一層被覆ブロックと同じであり、同じ越波量になっていると思われる。

また、天端幅 B_M が広いとやや越波量が低減するが、二層被覆ブロックの越波量よりは大きくなっている。

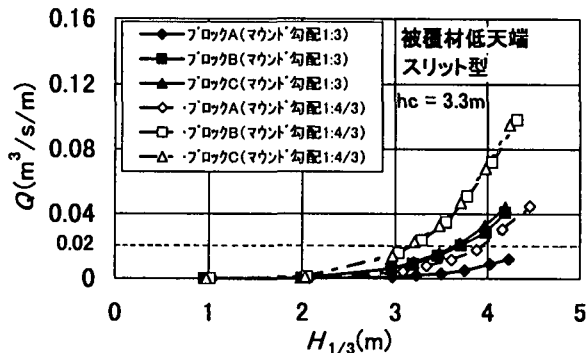


図-10 緩傾斜マウンドによる越波量の低減

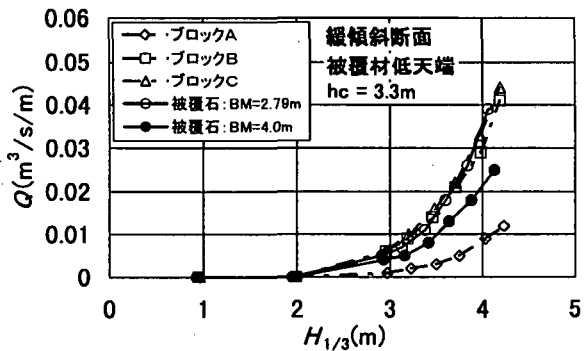


図-11 被覆石の越波量

5. 上部工の安定性

表-2は、二層被覆のブロックAと一層被覆のブロックCについて滑動実験結果から上部工の作用波圧強度を算出したものである。すなわち、それぞれ

の波高における上部工の滑動限界重量を求め、その重量から水平波圧 p が直立壁前面に一樣に作用し、三角形分布の揚圧力が底面に作用していると考えて波圧 p を逆算したものである。

いずれも被覆材低天端の条件であるが、二層被覆と一層被覆の直立壁の場合を比べると、明らかに一層被覆が大きく、波高の条件によっては1.0 w_0H を越えてしまう。これは、被覆されていない直立壁に厳しい碎波が作用するからである。

一方、上部工をスリット壁にすると波力の低減がはかれ、特に厳しい碎波の場合でも1.0 w_0H 以下の波圧となる。すなわち、消波型のスリット壁上部工は、衝撃的な碎波力の低減に効果がある。

表-2 上部工の安定性

被覆材	上部工形状	無次元波圧強度 P/w_0H ($H=3m\sim7m$)
ブロックA	直立壁	0.6~0.8
	スリット型	0.5~0.6
ブロックC	直立壁	0.8~1.4
	スリット型	0.6~0.8

6. ブロックの安定性

実験では、ブロックの安定性も観察しているが、有義波高4m程度でも大きく移動するブロックは認められなかった。前掲表-1で示すように重量から逆算される限界の有義波高は3.5m~3.8mであり、ある程度余裕があると思われる。ただし、動揺するものは実験でも認められている。たとえば、一層被覆のブロックCでは静水面付近のものに上下方向あるいは左右に渉り動揺するものが見られた。ブロックの動く状況は、静水面付近で碎波した波によって衝撃的な波力が作用し、不安定な状態になって引き波により動揺していた。

なお、被覆石の実験では、ほぼ1t石に対応する被覆石を用いている。K_p値を2とすると限界波高が2.1mであり、van der Meerの式では、波高が3mで初期被災レベル($s=2$)となり、3.6mでは中間被災レベル($s=6$)となる。実験では2m付近から動揺するものが見られ、3mまではそれほど大きな移動が認められなかった。有義波高3.5mでは大きく移動し被害率が22%程度となることがあった。ただし、この場合でも、被覆石の下のコア材は被覆されたままであった。

7. これまでの実験との比較 (高基堤との比較)

付表-1は、今回の実験結果をとりまとめたもので、許容越波量を0.02m³/s/mとした場合の 相対天端高さ ($h_c/H_{1/3}$) を示している。また、付表-2は、これまでの一連の実験における主要な結果をとりまとめたものである。

まず、付表-2の傾斜堤のデータを比べると、上部工が直立壁で二層被覆ブロックが上部工天端まで

あると、 $h_c/H_{1/3}$ は0.95でほぼ今回の実験結果と一致している。斜面勾配が1：3の緩傾斜で、二層被覆ブロックが直立壁の上部工天端までであるときは0.71である。これと同じ実験は今回行っていないが、同じく緩傾斜（1：3）で、二層被覆ブロックがスリット壁上部工の中間まで被覆した場合に0.72とほぼ同じ値になっている。

付表－2の高基堤は、低天端型の構造として開発してきた高基混成堤であり、基本型はマウンドが緩勾配の1：3で張りブロックで被覆し、上部工は大きなスリット壁を用いている。特にマウンドが静水面下に没しているのが特徴で、 hs/h_c が－1.1であり、この高基混成堤の基本型では、 $h_c/H_{1/3}$ が0.75となる。今回の実験では同じような実験条件がないが、表でわかるように $h_c/H_{1/3}$ が0.75～0.53とかなり低い値となっている。スリット壁の大きさが小さいこと、およびマウンドが没しており、砕波が斜面を遡ることがないためと思われる。このマウンドが没していることは高基堤の形状の長所であり、この影響等についてはさらに検討が必要である。

7. まとめ

- 本研究の主要な結論は以下のとおりである。
- ①越波量は被覆材の層厚が厚いほど少なくなり、さらに空隙率の大きいほど少なくなる。被覆材における消波効果が越波量の低減に大きく寄与しており、被覆材の選定ではそうしたことを考慮する必要がある。
 - ②被覆材の天端高さが、上部工の天端高さより低い場合には、被覆材天端上で砕けた波が上部工に作用する。天端高さと被覆材の高さの関係によっても異なるが、上部工に作用する波力は増大する。一方、越波量は、もともと小さい場合には上部工に打ち上がるようになって低下するが、大きい場合はかえって増大する。
 - ③上部工に消波構造のスリット型を採用することによって越波量の低減効果が上がり、さらに上部工に作用する波力も軽減できる。
 - ④マウンドを緩傾斜断面にすると、消波効果が促され越波量を低減できる。
 - ⑤被覆石は、ほぼ同じ被覆厚さであれば一層被覆と変わらない越波量となる。緩傾斜堤では、被覆石を用いることも考えられる。

なお、今回は限られた範囲の実験であり、今後さらに大型の実験等で検討を深めていきたいと考えている。

参考文献

合田良實・岸良安治・神山豊(1975)：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港研報告、第14巻4号、pp. 3-44。
合田良實・岸良安治(1976)：不規則波による低天端護岸の越波特性実験、港湾技研資料、No. 242、28p。

高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982)：各種消波工による越波流量の減少効果、港湾技術研究所報告、第21巻第2号、pp. 151-206。
谷本勝利・原中祐人・高橋重雄・小松和彦・轟正彦・大里睦男(1976)：各種ケーソン式混成堤の反射・越波および波力特性に関する模型実験、港湾技研資料、No. 246、38p。
高橋重雄・鈴木高二郎・三浦裕信・斉藤祐一(1995)：低天端型防波護岸の越波に関する一実験、海洋開発論文集、Vol. 11、pp. 193-198。
下迫健一郎・高橋重雄・斉藤祐一・三浦裕信(1996)・II. Oumeraci：消波型直立部を用いた高基混成堤の開発、海岸工学論文集、第43巻、pp. 851-855。
高橋重雄・下迫健一郎・斉藤祐一・三浦裕信・姜閔求(1997)：消波型高基混成堤の越波特性、海洋開発論文集、Vol. 13、1997、pp. 573-578。
(1999年4月2日受付)

付表－1 許容越波量における相対天端高さ
0.02m³/s/mとした場合の ($h_c/H_{1/3}$)

被覆材天端高 (hs/hc)	上部工	斜面勾配 cot α	被覆材	相対天端高さ $h_c/H_{1/3}$
1.0	直立壁	4/3	A	0.94
			B	0.98
			C	1.07
			D	1.13
0.52 0.24 0.18	直立壁	4/3	A	0.89
			B	1.11
			C	1.07
1.0	スリット壁	4/3	A	0.82
			B	0.85
			C	0.87
0.52 0.24 0.18	スリット壁	4/3	A	0.84
			B	1.04
			C	1.04
0.52 0.18	スリット壁(中)	4/3	A	0.80
			C	0.97
0.52 0.24 0.18	スリット壁	3	A	0.72
			B	0.91
			C	0.91
0.18	スリット壁(B ₁ =2m) (B ₂ =4m) スリット壁(中)(B ₂ =4m)	3	被覆石	0.91
				0.83
				0.81

付表－2 主要なこれまでの実験結果
0.02m³/s/mとした場合の ($h_c/H_{1/3}$)

被覆材天端高 (hs/hc)	上部工	斜面勾配 cot α	被覆材	相対天端高さ h _c /H _{1/3}
傾斜堤				
1.0	直立壁	4/3	A	0.95
		3	A	0.71
高基混成堤				
-1.1	スリット壁(大)	3	D	0.75
		スリット壁(大、パツパツ)	D	0.63
			B	0.60
		1.5	D/B	0.66
-1.1	スリット壁(大、上部梁付き)		D	0.53