

上部斜面堤堤頭部周辺における消波工及び背面マウンド被覆材の安定特性について

STABILITY OF WAVE-DISSIPATING BLOCKS AND BACK-MOUND COVERED BLOCKS AROUND THE HEAD OF SLOPING TOP CAISSON BREAKWATER

内田吉文¹・神藤明彦¹・鬼頭孝明¹・林友弥¹・森川高德²・池尾進³

Yoshifumi UCHIDA, Akihiko SHINDO, Takaaki KITOU, Tomoya HAYASHI, Takanori MORIKAWA and Susumu IKEO

¹国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所（〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町1-57-3）

²正会員 玉野総合コンサルタント（株）流域技術部（〒461-0005 名古屋市東区東桜2-17-14）

³玉野総合コンサルタント（株）流域技術部（〒461-0005 名古屋市東区東桜2-17-14）

Sloping top caisson breakwater is selected at a port on the Pacific Ocean because it needs a lower construction cost and has stronger resistance for caisson sliding than some other types. But the design should take care of the disadvantage that the top slope of the breakwater permits massive wave-overtopping removing wave-dissipating blocks and back-mound blocks around the head. This study, therefore, conducted the plane hydraulic model test with a scale ratio of 1/60 and measured the damage rate of wave-dissipating blocks and back-mound blocks around the top caisson for irregular waves on the L.W.L. and H.H.W.L. The test led the result that the weight of the wave-dissipating block on the top caisson needs twice or more the block on the trunk caisson. The back-mound blocks are unstable for the H.H.W.L. due to massive wave overtopping.

Key Words: *Sloping top caisson breakwater, Wave-dissipating blocks, Back-mound covered blocks Breakwater head, Wave overtopping, Plane Hydraulic model tests.*

1. はじめに

近年、外洋に面した港湾における防波堤の建設コスト削減の観点より、滑動抵抗性に優れた「消波ブロック被覆上部斜面堤」の採用事例が多くなっている。しかし、上部斜面堤はその斜面構造に起因して通常の箱型消波堤（以降、箱型と呼ぶ）に比べ越波が発生しやすくなることが知られている。

こうした中、本研究は、消波ブロック被覆上部斜面堤（以降、上部斜面型と呼ぶ）の堤頭部周辺を対象に、消波工及び背面マウンド被覆材の安定特性を平面水理模型実験により把握し、今後の防波堤設計の基礎資料に資することを目的とした。

2. 実験内容

(1) 実験装置

実験は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所が所有する長さ30m、幅19m、深さ

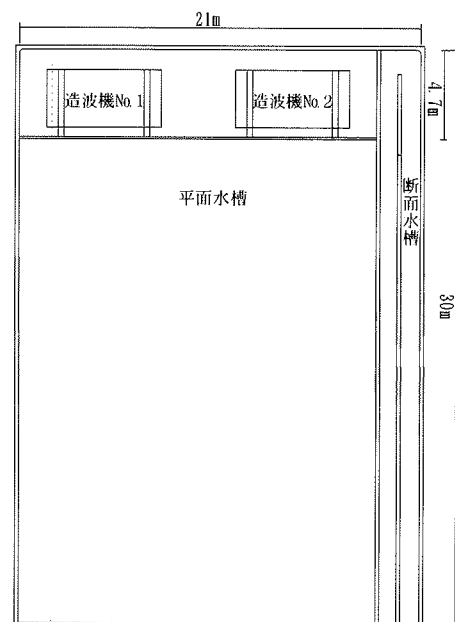


図-1 実験水槽

1. 2mからなるピストン型単方向不規則波造波装置（位置制御）が設置された平面水槽において実施した（図-1参照）。

(2) 実験条件

模型縮尺は1/60で実施した。対象とした防波堤は、図-2に示すとおりで、上部斜面型の対象範囲は堤頭部1函（15.9m）、A区：3函（47.7m）、B区：6函（95.4m）、計10函（159.0m）であり、その他は通常の箱型とした。

本防波堤模型の平面水槽への配置は図-3のとおりであり、導波板で仕切った幅11.7mの区間の端部にダミー区間を含め5.4m分（ケーソン部分4.5m）を、造波板に平行に設置した。なお、模型前面には、海底勾配1/65の固定床を設けた。

各区における上部斜面型の断面は図-4のとおりで、いずれも、前面水深 $h = -17.6\text{m}$ 、マウンド水深 $h' = -9.0\text{m}$ 、上部工天端高 $+7.0\text{m}$ （ $hc/H_{1/3} = 0.54$ ）、消波工天端高 $+2.5\text{m}$ である。なお、上部工天端高を $hc/H_{1/3} < 1.0$ とした理由は、既往断面実験¹⁾の結果、高天端高の場合、上部斜面からの戻り波で消波ブロックの被害が増大することが確認されたためである。なお、 $hc/H_{1/3} = 0.54$ 時の波高伝達率は0.2である。

実験潮位はH.H.W.L+2.12m、L.W.L $\pm 0.0\text{m}$ の2種類、実験波はH.H.W.L時が $H_{1/3} = 9.1\text{m}$ 、L.W.L時が $H_{1/3} = 8.6\text{m}$ （周期 $T_{1/3} = 17.1\text{s}$ で一律）であり、いずれも不規則

波で、周波数スペクトルは、プレットシュナイダー・光易型を目標とした。

実験では、堤頭部周辺の各種消波工及び背面マウンド被覆材に着目し、同条件における箱型（図-5参照）と比較しながら、その安定特性を検討した。ここに、被覆材に対してもH.H.W.L時を検討した理由は越波の影響が大きいことが推測されるためである。

(3) 実験方法

実験で用いた消波ブロック及び背面マウンド被覆ブロックは表-1に示すとおりである。

実験では、先の対象波について、3種類の波群を準備し、各種条件の消波ブロック、被覆ブロックに対して、各々、1000波以上を作用させた。

被害状況は、消波ブロックについては「被災度」、被覆ブロックについては「被害率」として整理し、1ケースに対し、3波群（＝繰り返し回数3回）の平均を代表値とした。

(4) 解析方法

消波ブロックの被災度は、A区、B区、堤頭部前面、側面、背面の5エリア、背面被覆ブロックはA区、B区、堤頭部背面の3エリア毎に整理し、前者は許容被災度0.3、後者は許容被害率1%を指標として、その安定特性を評価した。ここに、被災度は、各エリア内（延長L）で発生した被害個数をプロッ

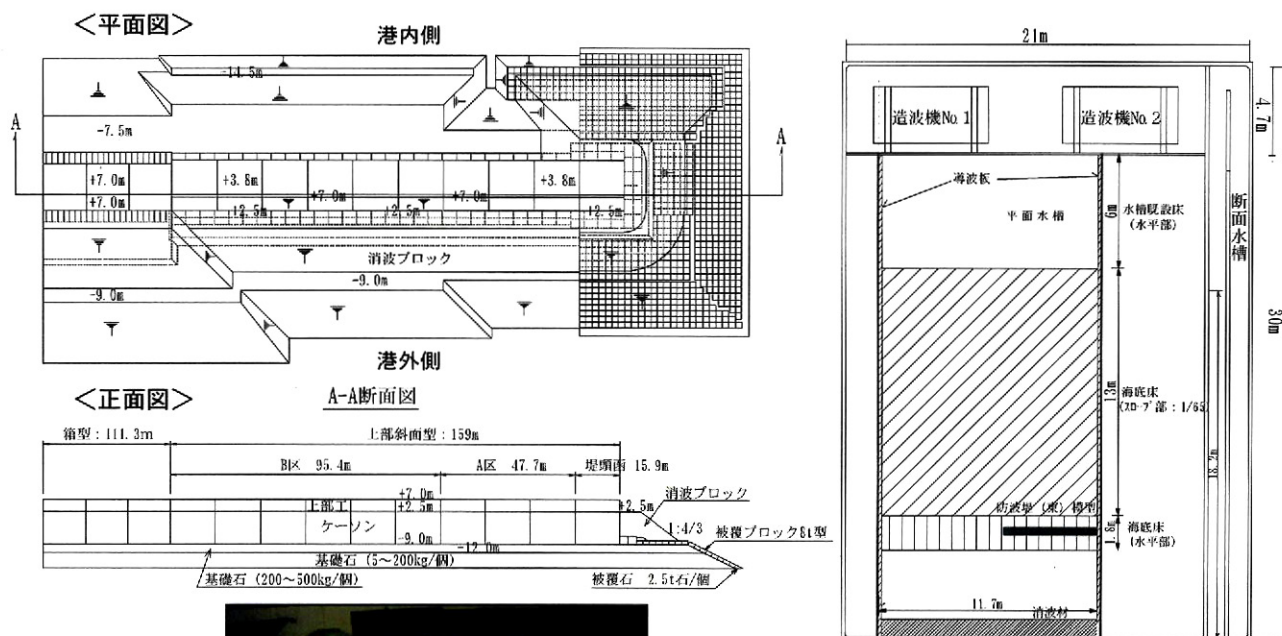


図-3 防波堤模型の配置

表-1 実験に使用した消波ブロック・被覆ブロック

消波ブロック			被覆ブロック	
形式	比重	KD値	形式	比重
50型	2.3	8.3	8型	2.3
80型	2.3	8.3	16型	2.3
80型	2.6	8.3	20型	2.3
50型	2.36	20.0	-	-
80型	2.36	20.0	-	-



図-2 防波堤全体

ク代表径 $D_k (= (\text{質量 } W / \text{比重 } \rho)^{1/3})$ 当りの個数に換算することで求めるが、堤頭部側面についてのみ、消波工法肩部の周長を L とみなした。

一方、被害率は背面マウンドに設置した全被覆ブロック数に対する被害個数の割合として求めた。

なお、消波ブロックについては、実験より得られた所要質量 W_e とハドソン式²⁾を用いた計算質量 W_c との比を求め、エリアによる質量割増しの必要性を検討した。

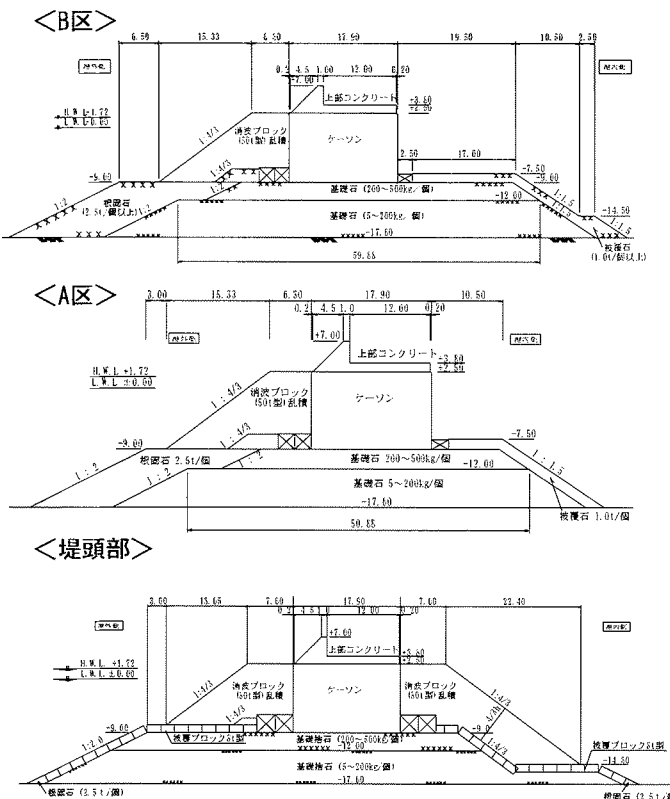


図-4 実験対象断面（上部斜面型）

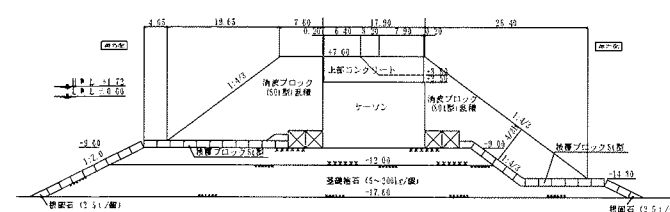


図-5 実験対象断面（箱型の基本断面）

3. 実験結果及び考察

(1) 消波ブロックの安定特性

a) 消波ブロックの被災度

図-6 は、上部斜面型及び箱型について、両潮位における各種消波ブロックの被災度をエリア別に比較したものである。

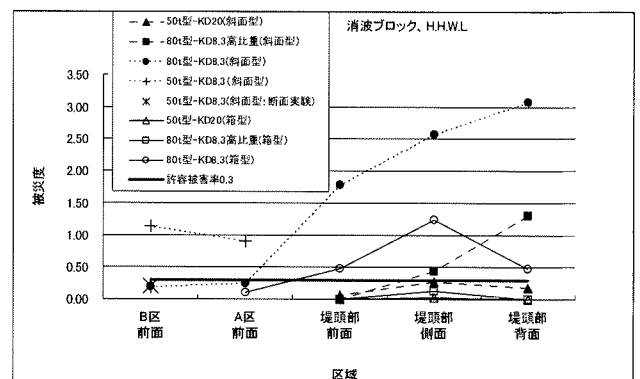
はじめに、潮位による違いをみると、消波ブロックの被災度は、H. H. W. Lで高い傾向にある。

この要因は、本潮位の波高が $H_{1/3} = 9.1\text{m}$ ($> \text{L. W. L}$

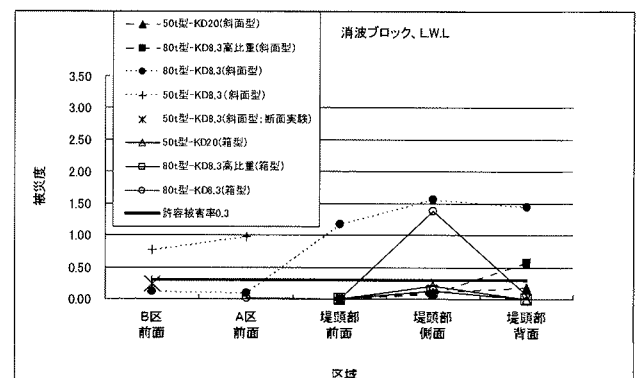
時: 8.6m) と高いことに加え、消波工天端高が H. H. W. L+ 2.2m に近い $+2.5\text{m}$ となっており、ブロック間のかみ合わせが不連続となる消波工法肩付近に強大な波力が作用しやすいと推測される。

次いで、上部斜面型（図中黒塗り系マーク）に着目して、エリア毎の被災度をみると、A～B区にかけては 50 t 型 (KD8.3) が被災度 0.8～1.5 であるのに対し、堤頭部は 80 t 型 (KD8.3) でも被災度 1.2～3.0 と高く、特に側面、背面は被害が発生しやすいエリアとなっている。その結果、A～B区は 80 t 型 (KD8.3) で許容被災度を下回るのに対し、堤頭部では 50 t 型 (KD20) でも波群によって許容値を超える場合があり（平均では許容値未満）、80 t 型 (KD20) まで上げて、ようやく被害が起きないことを確認している（図中からは割愛）。

なお、箱型でも、上部斜面型同様、堤頭部の被災度が高くなっているが、その水準は相対的に低く、結果、堤頭部では、80 t 型 (KD8.3・高比重) や 50 t 型 (KD20) にサイズダウンしても、十分、許容値未満に収まっている。



<H. H. W. L時>



<L. W. L時>

図-6 消波ブロックの被災度

目視観察によれば、上部斜面型の場合、堤頭部周辺では、以下の擾乱が確認されている。

① $H_{1/3}$ レベル以上の波が来襲すると（押し波時）、ケーソン正面では、斜面上部工を乗り越え越波水塊が背面や側面後部の消波工（天端部）に激しく打ち込む。

②同時に、端部の消波工正面でも、越波が発生して側面後部天端に打ち込む。

③引き波時には、堤頭部背後から側面に向かって激しい渦流が発生する。

こうした擾乱により、堤頭部の消波ブロックは、以下のメカニズムで被害を受けているものと判断される（図-7 参照）。

①ケーソン正面及び端部正面から発生した越波水塊は、ほぼ、同時に背面や側面後部の消波工天端に衝突するため、ブロック間のかみ合わせが崩れる（図-7 (a)、(b)）。

②背面や側面後部の消波工は、後ろに支えるものがないため、かみ合わせが大きく緩んだものは、次の越波時に、斜面下部へ転落する（図-7 (a)、(b)）。

③併せて、引き波時の渦流でもかみ合わせが弱まったブロックは被害を受ける（図-7 (b)）。

上記のとおり、堤頭部背面及び側面後部の消波ブロックは、主に、「越波水塊の衝突によるかみ合わせの崩れ」と「後ろに支えがないことによる転落」によって発生しており、前面とはまったく異なった要因で被害に至っている。

加えて、側面天端部も、消波工天端高（+2.5m）が低いこと及び背後の支えが弱いことに起因して、直接的な波の衝突による被害が発生しやすい（図-7 (c)）。

また、相対的に被災度が低い堤頭部前面では、傾向的に、B区側よりも端部側の被害が多く、これは、端部のブロックが被害を受けることで、連鎖的に被

害が進展したものと推測される。

なお、箱型では、越波水塊は流れに近い状態で背面に滑り落ちる状況が確認されており、上部斜面堤のように、越波水塊が跳ね上がって背後に打ち込む現象はみられていない。

先の図-6 を詳細にみると、箱型の場合、最も被災度の高いエリアは堤頭部側面であり、上部斜面型と異なって、背面では被災度は急激に低下しており、前述のとおり、背後への激しい越波の打ち込みが減少したことを示している。

このことより、本来的に被害が増加しやすい堤頭部において、越波エネルギーが高まりやすく、かつ、消波工天端高が低い「上部斜面堤」は、一層、被害の発生度を高めることがわかった。



写真-1 堤頭部側面・背面の消波ブロック被害状況

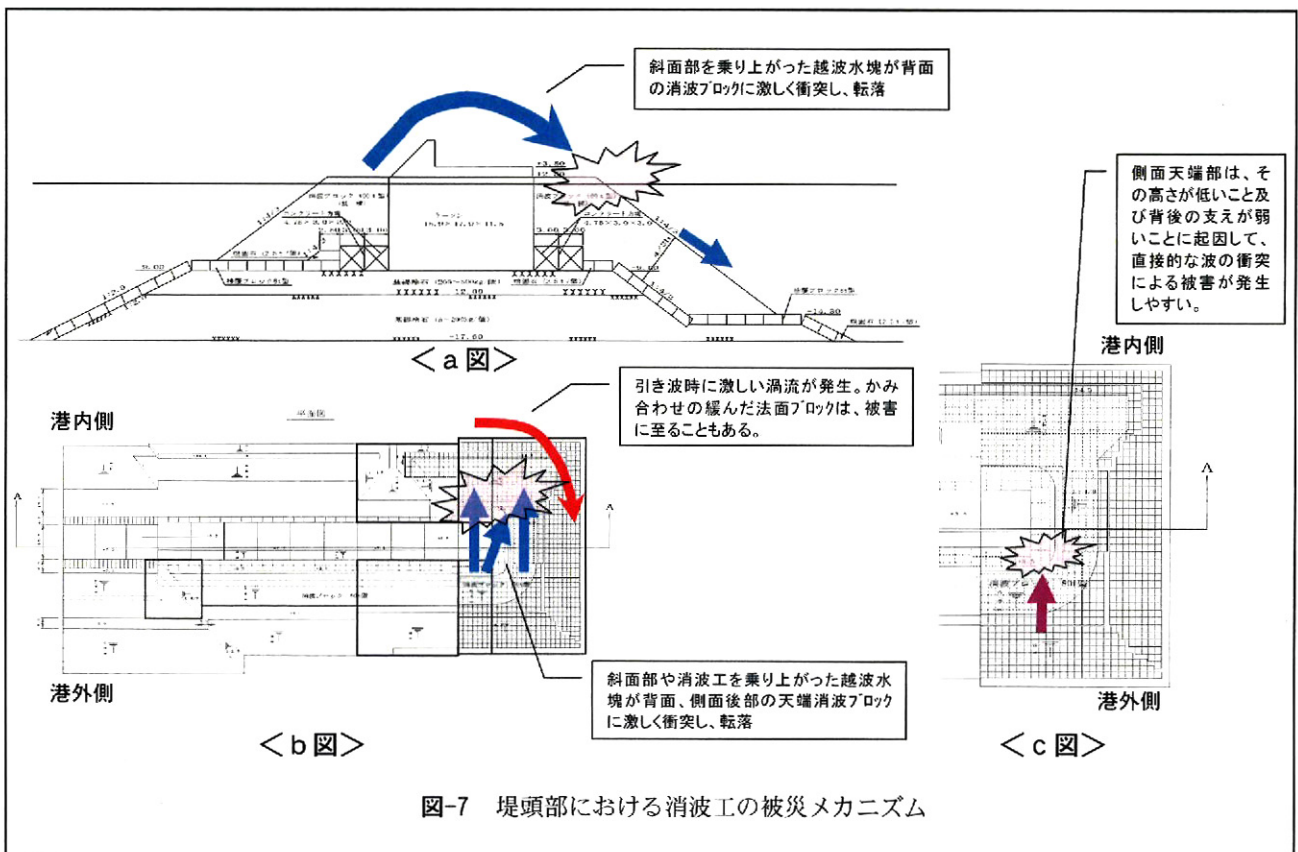


図-7 堤頭部における消波工の被災メカニズム

b) 堤頭部周辺における反射波の影響について

ここでは、堤頭部周辺での反射波による波高分布が消波工に及ぼす影響について考察しておく。

今回の実験対象範囲であるB区では、過去に断面実験¹⁾が実施されている。その結果を図-6(×印)よりみると、50t型(KD8.3)で許容被災度未満となっており、今回の平面実験(80t型(KD8.3))とは異なる結果となっている。

これを受け、各区の消波工前面で重複波高を測定し、入射波高に対する比(重複波/入射波)として示したものが図-8である。

これをみると、波高比は一律ではなく、A区～B区境界付近をピークとする分布がみられる。合田²⁾によれば、半無限堤の防波堤前面では、反射波の影響により、波高増大が発生するエリア(影響を受けない場合の波高比の約13%増:2.25/2.0)が存在することが知られている。

ここで、本実験で得られた波高比と先の計算波高比³⁾を比較すると、本実験値が低い水準となっているが、これは、以下の理由によっている。

①本実験は消波有り(反射率0.5程度)、計算値は消波無し(反射率1.0)の条件であること。

②本実験は、波高測定位置が反射面(消波ブロック)からやや離れているのに対し、計算値は直前面を想定していること。

こうした状況を考慮して、本実験結果を反射面直

前値に補正した場合、ピーク位置(A区～B区境界付近)での波高比レベルは、影響を受けない場合の波高比の約15%(1.73/1.5)と推定され、計算値とほぼ同様の増大率となっている。

以上のことより、本実験でも、A区～B区境界付近は、反射波の影響により、ほぼ理論に即した波高増大が発生しているものと考えられ、これが、既往断面実験に比べ、消波工の所要質量を高めたものと推測される。

c) 堤頭部における消波ブロックの割増について

上記までの結果、上部斜面型防波堤の堤頭部では、顕著な越波の発生により、特に、背面や側面後部の消波ブロックが被害を受けやすいことが明らかとなった。

以上の結果を受け、ここでは、上部斜面型、箱型両防波堤について、ハドソン式²⁾より「堤幹部」の計算所要質量 W_c を算出し、実験より得られた所要質量 W_e に対する比、すなわち、堤頭部の割増し係数 I を求めた。ここに、割増係数 I は、各種ブロックをKD=8.3、比重2.3相当の質量に換算して求めた。

その結果が表-2である。はじめに、箱型についてみると、係数 $I=1.65$ (換算質量138t)で許容被災度0.3を大きく下まわっており、技術基準(堤幹部の1.5倍以上)⁴⁾にほぼ準じた結果と言える。

これに対し、上部斜面型は係数 $I=1.82$ (換算質量152t)でも許容値を満足せず、結果的に、係数 $I=2.66$ (換算質量222t)で被災度0に収まることを確認している。

よって、上部斜面型($h_c/H_{1/3}=0.54$)の場合、越波水塊の激しい打込みにより、堤頭部の消波ブロックは、少なくとも、堤幹部の2.0倍以上の質量が必要になるものと推測される。

なお、前項の検討では、反射波による波高増大を受けない場合(断面実験)、50t型で許容被災度未満になることを示したが、本実験の結果、堤頭部に対しては、あくまで、計算質量(83t)を基準に割増す必要があることがわかった。

表-2 堤頭部における消波ブロックの割増係数 I

	堤幹部 (計算値)	堤頭部 (実験値)		
上部斜面型	83t	50t型KD20 1.65(138t)	80t型KD8.3 高比重 1.82(152t)	80t型KD20 2.66(222t)
		△	×	○
箱型	83t	50t型KD20 1.65(138t)	80t型KD8.3 高比重 1.82(152t)	
		○	○	
計算値		125t(1.5)		

1) ()内はKD8.3、比重2.3の場合の換算質量

2) ○は平均被災度が許容値未満、×は許容値以上、△は波群によって許容値以上の結果を示す。

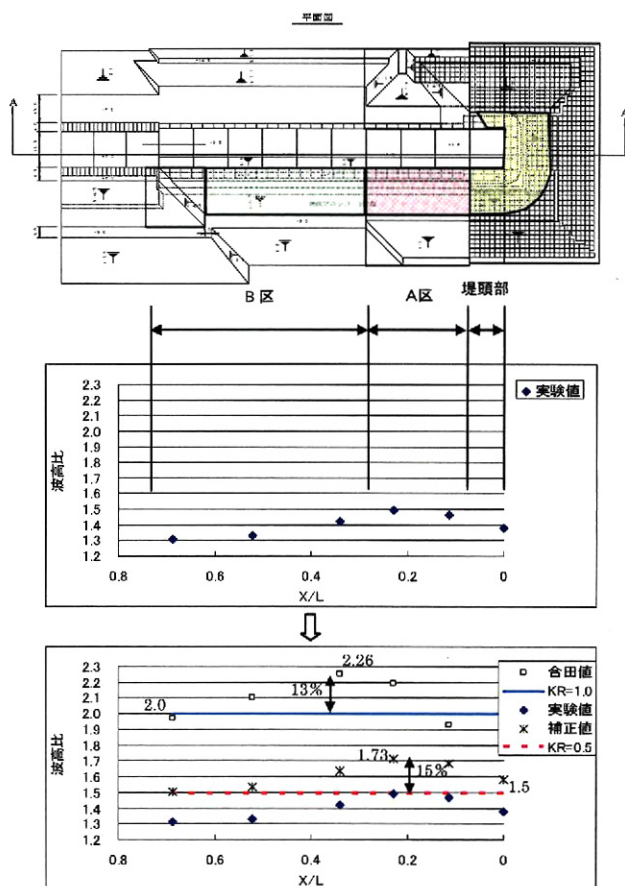


図-8 堤頭部周辺前面における波高分布

(2) 背面マウンド被覆ブロックの安定特性

図-9は、上部斜面型について背面マウンド被覆ブロックの被害率をエリア別に比較したものである。

はじめに、潮位による違いをみると、背面マウンド被覆ブロックの被害率は、H.H.W.L.で高い傾向にある。背面マウンドに対する外力は越波水塊の打ち込みであることから、本実験の結果、背面の場合、前面とは異なり、水面がマウンドに近づくL.W.Lよりも、越波エネルギーが高まりやすいH.H.W.Lに危険となることがわかった。

次いで、H.H.W.L.について、エリア毎の被害率をみると、A～B区については、16t型ブロックでも許容被害率1.0%を大きく超え、20t型ブロックまで高めて、ようやく安定性を満足できる結果となっている。こうした中、両区を比べると、L.W.L.時を含め、B区の被害が顕著に大きくなっている。

この要因は、先の図-4に示したとおり、B区の場合、他のエリアに比べ背面マウンド幅が長く、被害を受けやすい法肩部が越波の打込位置に近いのである。

なお、H.H.W.L.時の図では、1.0t被覆石（B区）を対象に、上部斜面型と箱型での被害状況の違いを併記した。これをみると、上部斜面型の被害率は箱型

の2倍弱と高くなっており、背面マウンドへの影響は上部斜面型で高まることがわかる。

以上のことより、上部斜面型の場合、越波に起因して背面マウンド被覆材の安定性にも十分留意する必要があることがわかった。



写真-2 背面マウンド（B区）の被覆ブロック被害状況

4. 主要な結論

本研究で対象とした上部斜面型防波堤（ $hc/H_{1/3}=0.54$ ）の堤頭部周辺における消波工及び背面マウンド被覆材の安定特性に関する主要な結論は、以下のとおりである。

(1) 堤頭部における消波ブロックの被害特性

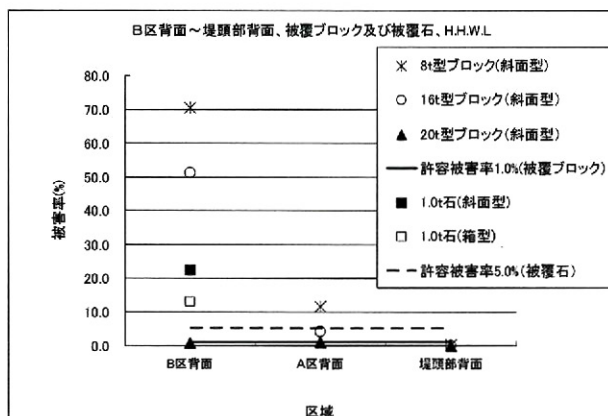
- ① 上部斜面型は、越波エネルギーが高まりやすいことに起因して、堤頭部の背面や側面後部の消波ブロックは、「越波水塊の衝突によるかみ合わせの崩れ」と「後ろに支えがないことによる転落」が発生する。
- ② 加えて、堤頭部の側面天端部は、消波工天端高（+2.5m）が低いことに起因して、直接的な波の衝突を受けやすく被害が発生しやすい。
- ③ ①、②の結果、上部斜面型の場合、通常の箱型に比べ、被災度は大幅に高まる。
- ④ 以上を受け、堤頭部に対する消波ブロックの割増量を検討した結果、上部斜面型の場合、堤幹部の2倍程度が必要となる。

(2) 背面マウンド被覆ブロックの被害特性

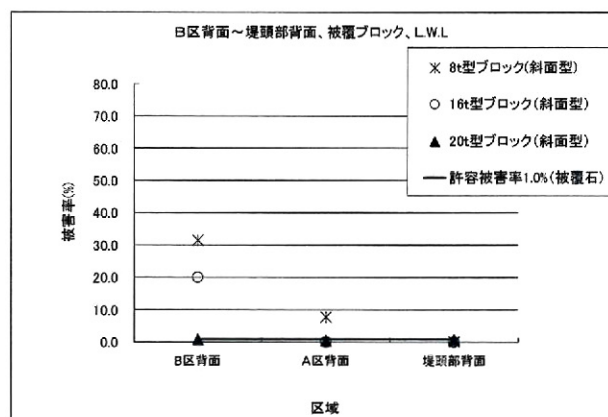
上部斜面型の場合、越波の打ち込みに起因して、特に、H.H.W.L.時に、背面マウンド被覆ブロックに被害を及ぼす場合があることから、十分留意する必要がある。

参考文献

- 1) 宮島正悟、岡島正彦 他：消波ブロック被覆上部斜面堤における上部工形状の影響について、海洋開発論文集、第22巻、pp715-720、2006。
- 2) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、552p、2007。
- 3) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、75p、鹿島出版、1990
- 4) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、556p、2007。



<H. H. W. L.時>



<L. W. L.時>

図-9 背面マウンド被覆ブロックの被害率