

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

EFFECT OF SUPERSTRUCTURES SHAPE ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS
IN SLOPING TOP CAISSON BREAKWATER COVERED
WITH WAVE-DISSIPATING BLOCKS

宮島正悟¹・岡島正彦²・森川高德³・奥田純生⁴
Shogo MIYAJIMA, Masahiko OKAJIMA, Takanori MORIKAWA and Sumio OKUDA

¹正会員 工修 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)

³正会員 玉野総合コンサルタント(株)環境防災部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜2-17-43)

⁴玉野総合コンサルタント(株)環境防災部 (〒461-0005 名古屋市東区東桜2-17-43)

In recent years, there have been an increasing number of projects where construction of a “sloping top caisson breakwater” is contemplated with a view toward a reduction in cost involved in implementation of such projects. Using five different shapes of a superstructure work of a “sloping top caisson breakwater”, this study was conducted to elucidate the wave dissipating work characteristic, transmitted wave characteristic and stability characteristic of rear mound covering stone on the basis of hydraulic model tests. The basic data obtained is expected to be greatly helpful in future breakwater design.

Key Words. *Sloping top caisson breakwater, Wave-dissipating block,
Transmitted wave, Back mound covering stone, Hydraulic model tests.*

1. はじめに

最近、外洋に面した海域における防波堤の建設コスト削減の観点より、滑動抵抗力に優れた「消波ブロック被覆タイプ」の上部斜面式防波堤（以降、上部斜面堤と呼ぶ）が多く計画されている。

このタイプの防波堤は、斜面部の存在により、伝達波を促進しやすい特性を有することが知られており¹⁾、天端高の設定が非常に重要となる。ただ、天端高を高く設定すると、巨大な上部工となり、当該工程のコスト増や施工性に問題が生ずるため、天端高を下げつつ、所要の伝達率を満足できる上部工形状の検討が必要となる。併せて、天端高の変化は、前面の消波ブロックや背後のマウンド被覆材の安定性にも影響を与えることが予想され、その特性を把握することも重要である。

以上を踏まえ、本研究は、外洋に面する防波堤を対

象に、上部工形状の異なる5タイプの上部斜面堤について、その消波工安定特性、伝達波特性、背面マウンド被覆石の安定特性を水理模型実験により把握し、経済性を含めた最適な防波堤断面を提案するための基礎資料を得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 伊勢湾水理環境実験センターが所有する長さ 30m、幅 1m、深さ 1.2mからなるピストン型単一方向不規則波造波装置（吸収制御タイプ）が設置された断面二次元水路において実施した（図-1 参照）。

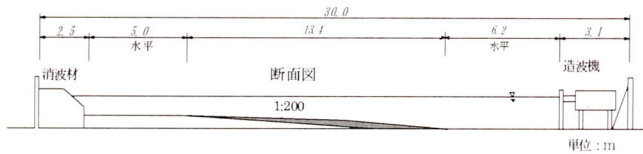


図-1 実験水路

(2) 実験条件

実験縮尺は1/60とし、実験潮位は、消波工及び背面マウンド被覆石の安定実験ではH.H.W.L+2.12m、及びL.W.L±0.0mの2種類の潮位で、伝達波実験ではH.H.W.L+2.12mの潮位で行った。実験波はいずれも不規則波で、周波数スペクトルは、プレートシュナイダー・光易型を目標とした(表-1 参照)。なお、堤前の海底勾配を1/200とするため、既設の水路床中央に合板製の固定床を設けた(図-1 参照)。

表-1 実験に用いた潮位・波浪諸元

実験潮位	実験波浪		実験種類
	H _{1/3}	T _{1/3}	
H.H.W.L+2.12m	9.1m	17.1s	消波工・背面マウンド被覆石安定実験、伝達波実験
L.W.L±0.0m	8.6m	17.1s	消波工・背面マウンド被覆石安定実験

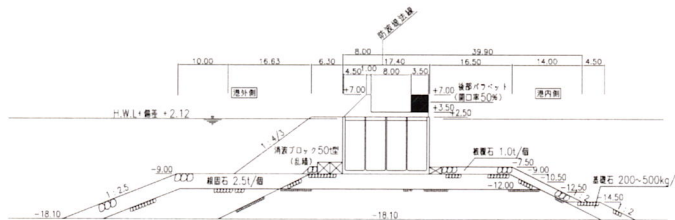
実験で対象とした防波堤は、表-2 及び図-2 に示す5タイプである。まず、上部工天端高の変化による特性を知るため、設計波高と同程度(設計潮位2.12m+設

計波高9.1m×1.0)の天端高+11.3mを有するタイプ(以降、タイプ4と呼ぶ)、上部工天端高を+7.0mまで下げたタイプ(以降、タイプ2と呼ぶ)、タイプ2とタイプ4のほぼ中間の天端高+9.0mを有するタイプ(以降、タイプ3と呼ぶ)の3タイプを設定した。また、後部パラベットの効果を知るため、タイプ2と同じ天端高+7.0mで、後部パラベット(開口率50%)を有するタイプ(以降、タイプ1と呼ぶ)を設定した。さらに、天端高を通常の防波堤に対する式(設計潮位2.12m+設計波高9.1m×0.6)から求めた+7.6mとし、斜面部に50%の開口を設け、さらに、後部パラベット(開口無し)を有するタイプ(以降、タイプ5と呼ぶ)を含め、計5種類を対象とした。

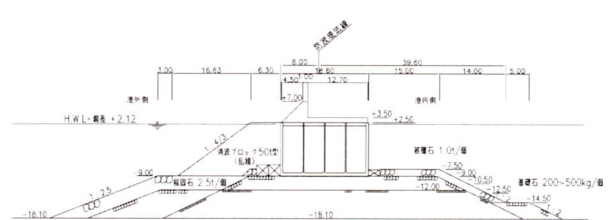
なお、いずれのタイプも、設計波に対する各種断面検討を受けて、所要のケーソン諸元、マウンド諸元を決めている。

表-2 実験で対象とした防波堤

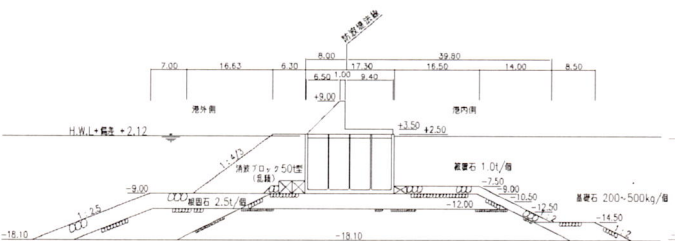
着目点	種類	天端高	斜面部の開口部	後部パラベット
天端高による特性	タイプ2	+7.0m	無し	無し
	タイプ3	+9.0m	無し	無し
	タイプ4	+11.3m	無し	無し
パラベット、斜面構造の特性	タイプ1	+7.0m	無し	有り(開口率50%)
	タイプ5	+7.6m	有り(開口率50%)	有り(開口無し)



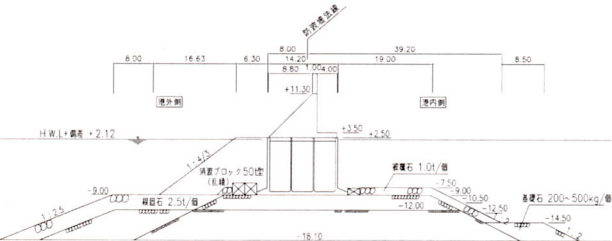
＜タイプ1：天端高+7.0m、斜面部開口無し、後部パラベット有り(開口率50%)＞



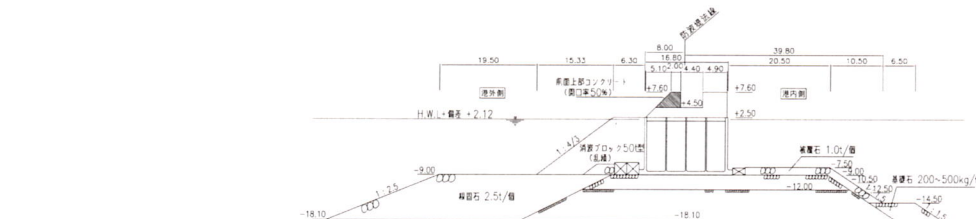
＜タイプ2：天端高+7.0m、斜面部開口無し、後部パラベット無し＞



＜タイプ3：天端高+9.0m、斜面部開口無し、後部パラベット無し＞



＜タイプ4：天端高+11.3m、斜面部開口無し、後部パラベット無し＞



＜タイプ5：天端高+7.6m、斜面部に開口有り(開口率50%)、後部パラベット有り(開口無し)＞

図-2 実験対象とした上部斜面堤

(3) 実験方法

消波工の安定実験では、水路幅1mの中央50cm幅分を検査域として、50t型消波ブロックに対する被害状況を目視観察により把握し、許容レベルを越える被害となった場合には、64t型以上へ移行することとした。ここに、許容レベルを越える「被害」とは、ブロックほぼ一個分の幅以上の移動があったものとし、それ以下の移動は「動揺」として定義する（被害の対象とはしない）。

背面マウンド被覆石の安定実験では、水路幅1mの中央50cm幅分の背面マウンド天端、法面を検査域として、5つのエリア（天端部は2エリア、法面は水深1.5～2.0mピッチで3エリア）に区分し、そこに被覆した1.0t石のエリア別被害状況を目視観察により把握し、許容レベルを越える被害となった場合には、2.5tへ移行することとした。なお、「被害」の考え方は消波工安定実験と同様である。

伝達波実験では、ケーソン背後から実験相当水深波長 L （4m弱）にして $1/2L$ 離れた地点及びそこからさらに $1/8L$ ずつ港内側に進んだ2地点の計3地点に波高計を設置し、越波による擾乱状況を把握した。

いずれの実験も、作用波数は1000波、繰り返し回数は3回とし、特に、消波工安定実験及び背面マウンド被覆石安定実験では、各回とも波群の異なる波（計3波群）を作用させた。

(4) 解析方法

消波工の安定実験では、検査域内の被害個数を基に被災度²⁾（法線方向におけるブロック代表径幅の当りの被害個数）を求め、許容被災度0.3（被害率1%程度に相当）を指標にその安定性を評価した。

背面マウンド被覆石の安定実験では、各エリア内の被害個数を当該エリア内の設置個数で除してエリア別被害率を算出し、許容被害率5%を指標に、その安定性を評価した。

伝達波実験では、防波堤背後における3地点での平均波高を入射波高9.1mで除して波高伝達率を求め、許容伝達率0.2を指標に、その特性を評価した。

なお、いずれの実験も、繰り返し回数3回の平均値を解析対象とした。

3. 実験結果及び考察

(1) 消波工の安定特性

図-3は、各防波堤タイプで使用した消波ブロック質量をパラメータとして、天端高と消波ブロック被災度の関係を示したものである。図中には、今回設定した許容被災度0.3も併記してある。また、被災度は、両潮位のうち、高い結果を掲載している。

これをみると、消波ブロックの被災度は、天端高が

高くなるほど（すなわち、上部斜面の規模が大きいほど）増加する傾向となっている。その結果、規模の大きいタイプ3（天端高+9.0m）及びタイプ4（同+11.3m）の場合、50t型消波ブロックでは、いずれも許容被災度0.3を大きく越えてしまい、許容値未滿とするためには、1ランク上の64t型ブロックにする必要があることがわかった。

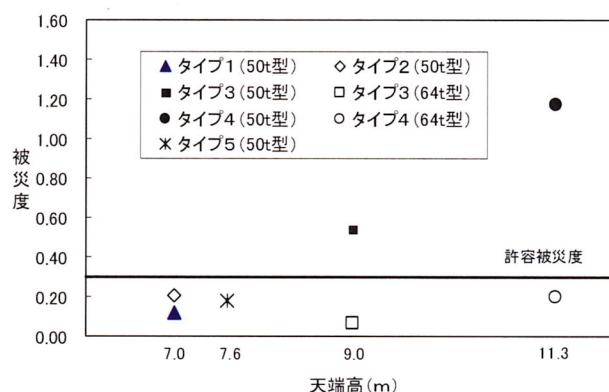
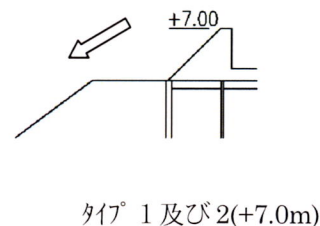
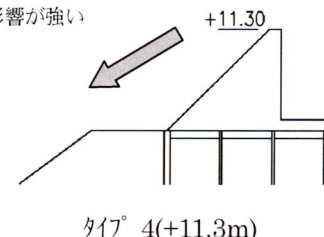


図-3 天端高と消波ブロック被災度の関係

タイプ1及び2の場合、斜面規模が小さく、反射水塊の影響が弱い



タイプ3及び4の場合、斜面規模が大きく、反射水塊の影響が強い



タイプ5の場合、斜面部に開口が有り、反射水塊の影響が抑えられる

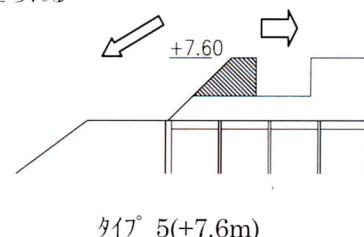


図-4 斜面の規模・形状による反射水塊の違い（模式図）

目視観察によれば、斜面規模の大きいタイプ3及び4では、高波高来襲の際、引き波時に、反射水塊が斜面部を勢いよく滑り降りる状況が確認されている（図-4参照）。

図-5は、防波堤前面から相当水深波長にして3L程度離れた位置における反射率を示したものである。

これをみると、斜面規模の最も大きいタイプ4の反射率が相対的に高い結果となっている。

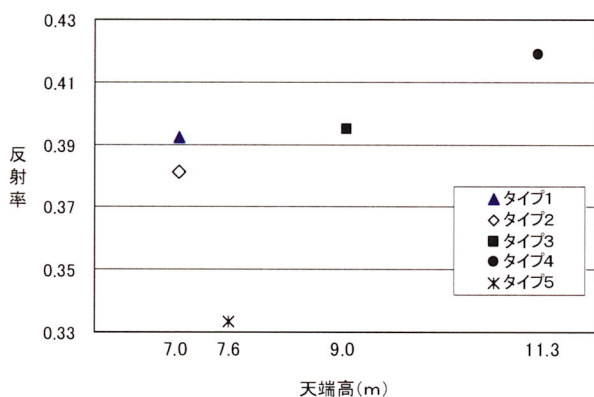


図-5 天端高と反射率の関係

このことから、上部斜面堤は、天端高が高く斜面部の規模が大きいほど、前面に被覆した消波ブロックは被害を受けやすくなることが判明し、それは、引き波時における反射水塊のエネルギーが高まるためと考えられる。

なお、タイプ5の場合、傾向がやや異なり、天端高は+7.6mとタイプ1及び2（天端高+7.0m）をやや上回るものの、被災度はそれらとほぼ同程度に収まっている。反射率をみても、5タイプの中で最も低い水準にある。この理由は、本タイプの場合、上部斜面部分が50%の開口部を有し、反射水塊の影響が弱まるためと推測される。

(2) 伝達波特性

図-6は、各防波堤タイプ毎に、相対天端高（ $h_c/H_{1/3}$ ）と伝達率（伝達波高/入射波高）の関係を示したものである。図中には、伊藤ら³⁾の研究に基づく混成堤の推定値（以降、消波無しの推定値と呼ぶ）及び近藤ら⁴⁾の研究による消波ブロック被覆堤の場合の推定値（以降、消波有りの推定値と呼ぶ）と今回の許容伝達率0.2を併記してある。

はじめに、天端高+7.0mのタイプ1及び2についてみると、後者のタイプ2は、「消波有りの推定値」を上回る伝達率となっている。これは、一般に指摘されたとおり、上部工が斜面形状になっていることで、越波水塊の乗り上げ効果が働いたためであり、伝達波に対し不利な構造と言える。

これに対し、タイプ1（天端高+7.0m）の伝達率は「消波有りの推定値」をわずかに下回る結果となって

いる。これは、目視観察の結果、本タイプの場合、開口率50%の後部パラベットを有することで、乗り上げた越波水塊の一部がパラベットにより上部工上に捕捉され、エネルギーが減衰するためと考えられる。よって、後部パラベットは、伝達波を抑制する効果を有するものと推測される（写真-1参照）。

次いで、タイプ2より天端高の高いタイプ3（天端高+9.0m）及びタイプ4（同+11.3m）についてみると、天端高の増加に反し伝達率の低減はほとんどみられず、「消波工無しの推定値」を上回る結果となっている。

この要因は、タイプ3及び4の場合、斜面規模が大きいことで、越波水塊の乗り上げ効果が高まり、高波高が来襲すると、より遠くに激しく打ち込むためである。目視観察によれば、タイプ3及び4の場合、最高波高に近い波が来襲すると、現地換算にして防波堤背後100m前後まで越波水塊が及ぶことが確認されており、これが、天端高に対し伝達波高が下がらない主要因となっている（写真-2参照）。

よって、本研究の範囲では、上部斜面堤の場合、天端高による伝達率低減効果はほとんど期待できない結果となった。

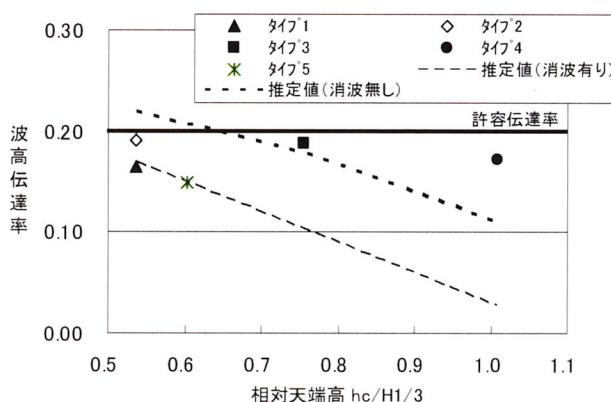


図-6 相対天端高と伝達率の関係

タイプ1より天端高が高いタイプ5についてみると、伝達率は「消波有りの推定値」と同水準で、タイプ1を下回る結果となっている。先のとおり、上部斜面堤の場合、天端高による伝達率低減効果は小さい傾向を示す中、タイプ5の伝達率が天端高に応じて低下した主な要因は、タイプ1同様、後部パラベットを有することに加え、そのパラベットが開口部を有さないことで水塊の捕捉率が向上したこと、さらには、斜面部に50%の開口部を有することで乗り上げ効果が低減したことなどが相互に効果を発揮したためと推測される。

以上のことから、上部斜面堤の場合、基本的には伝達波に対し不利な特性を持つものの、斜面部に開口を設けたり、後部パラベットを設置することで、通常の消波ブロック被覆堤と同水準まで伝達率を引き下げることが可能になるものと判断される。

同時に、こうしたタイプの上部斜面堤は、伝達率が

消波ブロック被覆堤に近似するという事で、今後、任意の天端高に対する概算伝達率を推定でき、当該堤の設計に資することが可能と考える。

なお、許容伝達率0.2と比較すると、いずれのタイプも、当該値未満に収まっており、所要の機能を果たしているものと評価できるが、タイプ3及び4は、先のとおり、越波水塊が港奥に及びやすいため、船舶の航行安全性の観点から注意が必要である。

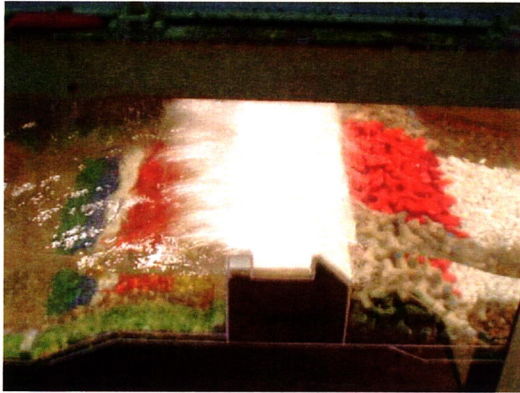


写真-1 タイプ1 (+7.0m) の越波状況



写真-2 タイプ4 (+11.3m) の越波状況

(3) 背後マウンド被覆石の安定特性

図-7は、各タイプにおける背後マウンド1.0t被覆石の被害率をエリア別・水深帯別に示したものである。図中には、許容被害率5%及び被害個数も併記している。ここに、タイプ2は潮位±0.0m時、その他は両潮位で、被害率の高い多い結果を掲載している。

これをみると、1.0t石の被害は、いずれのタイプにおいても、概ね-7.5m~-9.0mの水深帯で発生し、その中でも、天端中央から法肩にかけてのエリアで顕著となっている。

本エリアでの被害状況を詳細にみると、天端高+7.0mのタイプ2の場合、1.0t石の被害率は11.0%（被害個数64個）、2.5t石に置き換えても、被害率11.8%（被害個数37個）と許容値を大きく越える結果となっている。目視観察によれば、タイプ2の場合、高波高時の越波水塊が背後マウンド法肩付近へ落下する頻度が多くなっており、これが、他のタイプに比べ、被害

個数を押し上げた要因と判断される（写真-3参照）。

これに対し、天端高の高いタイプ3（天端高+9.0m）及びタイプ4（同+11.3m）の場合には、中規模の波高は越波の勢いが小さく、高波高来襲時には、マウンドを大きく越えて水塊が着水するため、マウンドへの影響は小さくなり、被害率3%以下（被害個数：タイプ3=19個、タイプ4=14個）と少なくなっている。

また、タイプ2と同じ天端高（+7.0m）のタイプ1の場合も、被害率2.4%（被害個数15個）とタイプ2を大幅に下回る状況となっている。この要因は、開口率50%の後部パラペットを有することで、越波水塊の一部が捕捉されたり、あるいは、転落水塊が分散し、1.0t石に作用するエネルギーが低減するためと考えられる。

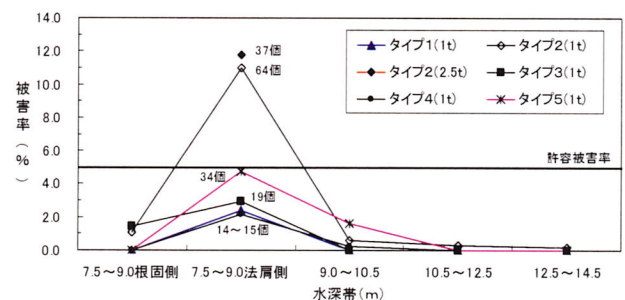
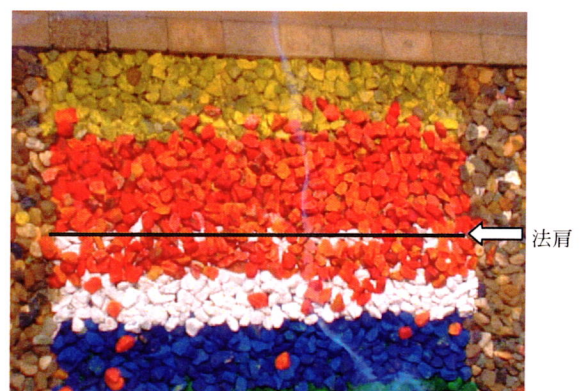


図-7 背面マウンド被覆石の
エリア別・水深帯別被害率



<波作用前>



<波作用後>

写真-3 タイプ2における背面マウンド
被覆石 (1.0t) の状況

一方、タイプ5の場合、被害率4.7%（被害個数34個）となっており、同様な「後部パラペット」を有するタイプ1に比べ、かなり多い結果となっている。（局的に2層目の石も被害を受け、基礎マウンド石が露出する状況もみられる）。

タイプ5の場合も、後部パラペットにより、基本的には転落水塊のエネルギーは減少しやすい。ただ、タイプ1に比べ天端高が高く、ケーソン幅が狭く、かつ、後部パラペットは開口を有さないため、高波高が来襲した場合、波群によっては、上部工上から溢れ落ちる水塊の勢いが強まったり、越波水塊がともに背面に転落する可能性がある。実験では、繰り返し回数2回目（波群2）に、一波の越波水塊で顕著な被害を受けており、上部工形状のわずかな違いが、背面マウンド被覆石の安定性を大きく左右することがわかった。

4. 主要な結論

本研究で対象とした上部斜面堤の消波工安定特性、伝達波特性、背面マウンド被覆石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) 消波工の安定特性

消波ブロックの被災度は、上部斜面の規模が大きい（天端高が高い）ほど高まる傾向にあることがわかった。この要因は、斜面部の規模が大きいことで、引き波時に反射水塊が及ぼす「消波ブロックへの衝撃」が強まるためと推測される。

(2) 伝達波特性

斜面部による越波水塊の乗り上げ効果により、本研究の範囲では、天端高を+7.0m及び+7.6mから+11.3mに高めても、伝達率の低減はほとんど期待できない結果となった。ただし、後部パラペットの設置や、斜面部に開口部を設けることで、伝達率は通常の消波ブロック被覆堤と同水準に収まることが確認された。こ

れは、越波水塊の一部が上部工上に捕捉されたり、乗り上げ効果そのものが減少するためである。

なお、こうしたタイプの上部斜面堤は、伝達率が消波ブロック被覆堤に近似するという点で、今後、任意の天端高に対する概算伝達率を推定でき、当該堤の設計に資することが可能と考える。

(3) 背面マウンド被覆石の安定特性

斜面規模が小さく（天端高+7.0m及び+7.6m）、かつ、後部パラペットを有さない条件では、高波高時の越波水塊が背面マウンド法肩付近へ落下する頻度が高まり、法肩部の被覆石（2.5t）が顕著な被害を受ける場合があることから、設計に際し、留意する必要がある。

(4) 総括

本研究で対象とした上部斜面堤に対する各種水理特性を総括すると、斜面規模（＝天端高）は+7.0m及び+7.6m（ $h_c=0.55H_{1/3}$ 及び $h_c=0.6H_{1/3}$ ）程度、後部パラペット（開口率50%）を設けることで、所要の波高伝達率を満足しつつ、消波工及び背面マウンド被覆石の安定性を確保することができ、相対的に有利な条件になるものと判断される。

参考文献

- 1) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、1181p, 1999.
- 2) 高橋重雄・半沢稔・佐藤弘和・五明美智男・下迫健一郎・寺内潔・高山知司・谷本勝利：期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討、第1報一、港湾技術研究所報告、第37巻、第1号、pp. 3-32, 1998.
- 3) 伊藤喜行・谷本勝利：混成防波堤の蛇行災害、港湾技研資料、No112号、20p, 1971.
- 4) 近藤俣郎・佐藤功：防波堤天端高に関する研究、北海道開発局土木試験所月報、第117号、pp. 1-15, 1964.