

消波ブロック被覆式上部斜面堤の天端高の設定と波力の 算定法に関する実験的考察

小 沢 大 造* ・ 岩 渕 哲 治** ・ 衛 藤 謙 介*** ・ 板 倉 新****
小 林 雅 幸***** ・ 溝 口 忠 弘***** ・ 海 原 敏 明*****

1. はじめに

大水深・大波浪海域に適用する防波堤の構造様式として、上部斜面堤の水理的な優位性が着目されている。上部斜面堤は防波堤背後へ波を伝播し易い形状であるため、相対的に直立混成堤よりも天端高を高くしなければならないが、斜面部による波力の低減効果によって結果的に直立混成堤よりも断面を小さくすることが可能である。更には消波ブロックで被覆することで、より耐波安定性に優れ、消波効果の高い防波堤とすることも可能である。

消波工の無い上部斜面堤（以下、上部斜面堤と略記）については、細山田ら（1994）の式により波力を推定することができ、波高伝達率は中田ら（1983）の実験結果などがある。また、高橋（1997）は波高伝達率に与える斜面部の影響を定式化している。しかしながら、消波ブロック被覆式上部斜面堤の水理特性については、佐藤ら（1992）の研究等があるに留まり、消波ブロックの被覆形状の詳細な影響検討は未だ行われていない。本研究では、著者らの管内において比較的設置水深の深い代表的な第一線防波堤の断面諸元とその設計条件をモデルに、消波ブロック被覆式上部斜面堤の現地適用性を二次元水理模型実験により検証するとともに、ケーソンの所要天端高と波力の算定方法を得ることを目的とした。

2. 実験の内容

二次元水路（長さ 38.0 m×幅 0.5 m×高さ 1.5 m）内に模型縮尺 1/50 として防波堤模型を設置し、伝達・反射波高、波圧および波力測定を行った。また、波力の測定値の妥当性を滑動実験で検証するとともに、実験中は消

波ブロック等の挙動を観察した。伝達波・反射波の測定は修正 Bretschneider-光易型のスペクトルを用いて不規則波を約 200 波、滑動実験では約 500 波を作用させた。規則波を用いた波力および滑動実験では、有効波数 5 波程度の作用とした。波浪条件は、管内の第一線防波堤の設計条件としてよく用いられる周期 $T=13.0$ s を波力の検討対象条件とし、伝達波・反射波測定は通常時化程度の周期 $T=8.0$ s, 10.0 s, 12.0 s も対象とした。波高 H は各波周期条件に対して 3～5 段階に変化させた。なお、実験結果は現地量に換算し、通過波諸元で整理している。

図-1 に各水理量の測定方法を示す。防波堤断面は、斜面傾斜角を 45° の同一条件とし、ケーソン天端高（6 条件： $h_c=4.5\sim7.7$ m）、斜面下端高（5 条件： $d_c=-4.0\sim+4.5$ m）、消波ブロック被覆高（7 条件： $B_c=-4.0\sim+4.5$ m）を適宜変化させて実験を行った。また、消波ブロックで被覆した場合としない場合とのケーソンの安定性、水理特性の違いについても検討した。

3. 所要天端高の検討

3.1 波高伝達率の変化特性

図-2 に波高伝達率の測定結果を示す。斜面の下端高 d_c が高いほど波高伝達率 K_t は小さくなることは明かで、消波ブロックの無い断面では $d_c/H_{1/3}$ と相対天端高 $h_c/H_{1/3}$ で結果を整理できる。ケーソン天端高を有義波高の 1.0 倍とすると、波高伝達率は 0.10～0.20 程度となり、通常の直立混成堤（ $h_c=0.6H_{1/3}$ ）と同程度の値となる。消波ブロックで被覆した断面は、消波ブロックの高さおよび天端列数を変化させて実験を行っている。そのため、波高伝達率は斜面下端高だけで整理できないので、消波ブロック被覆長 B_L と波長 $L_{1/3}$ の比で整理した。こ

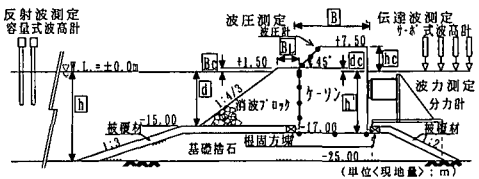
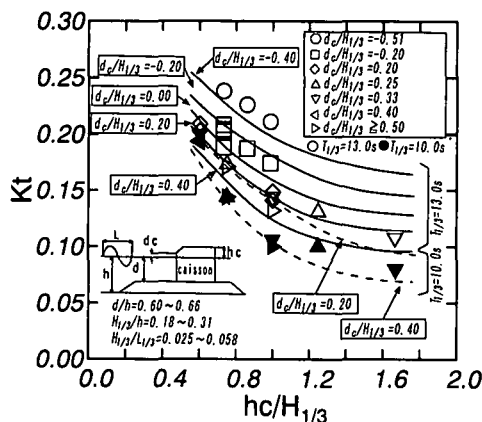
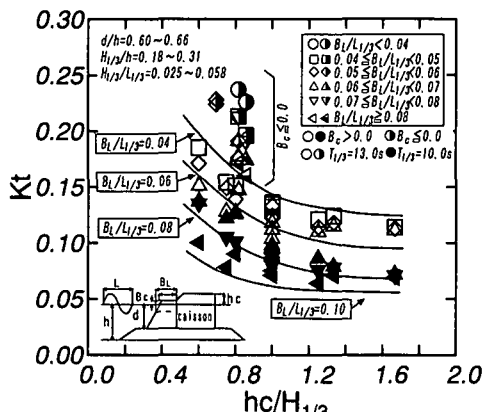


図-1 実験断面

* 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所長
.. 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所 調査課長
... 運輸省航空局飛行場部 計画課専門官(前 運輸省第二
... 港湾建設局横浜調査設計事務所 第一設計室長)
.... 運輸省第二港湾建設局 企画課第一調査係長(前 運輸
... 省第二港湾建設局横浜調査設計事務所 調査課水工係
... 長)
..... 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所 第一設計
... 室設計係長
..... 株式会社エコー 環境水理部 横浜分室長
..... 正会員 株式会社エコー 環境水理部 横浜分室



(a) 上部斜面堤の波高伝達率



(b) 消波ブロック被覆式上部斜面堤の波高伝達率

図-2 波高伝達率の実験結果

れにより、消波ブロックの被覆断面が大きいほど、波高伝達率が減少する効果を表すことができる。消波ブロックの被覆高さが静水面よりも高ければ、斜面下端高が変化しても波高伝達率に大きな差異はないため、半没水型の上部斜面堤の方が、消波ブロックで被覆することによる波高伝達率の低減効果が相対的に高くなる。また、消波ブロックによる波浪制御効果は波形勾配の大きい波に対して効果が高いため、周期の短い波浪の方が波高伝達率の減少率が大きい。

3.2 所要天端高の検討

上部斜面堤の波高伝達率は、斜面の下端高によって大きく変化する。高橋 (1997) は、こうした斜面部の影響を次式で表している。

$$K_t = [0.25(1 - \sin[h_c/H_{1/3} + \beta + \beta_s]) (\pi/4.4)]^2 + 0.01(1 - d/h)^{1/2} \quad (1)$$

$$\beta + \beta_s - 2.2 < h_c/H_{1/3} < 2.2 - (\beta + \beta_s) \quad (2)$$

$$K_t = 0.1(1 - d/h); h_c/H_{1/3} > 2.2 - (\beta + \beta_s) \quad (3)$$

$$\beta_s = -0.3\{(h_c - 2d_s)/(H_{1/3} \tan \theta)\}^{1/2} \quad (4)$$

ここに、 β はマウンド形状による影響パラメータであり、

マウンド水深 d と堤体設置水深 h の関係 (d/h) から求められる値である。式 (1), (2) は Goda (1969) が示している直立混成堤の波高伝達率の推定式に式 (3) の β_s を用いて、斜面部の効果を表したものである。高橋の式から推定される波高伝達率 $K_{t(\text{Cal.})}$ と上部斜面堤の実験結果 $K_{t(\text{Exp.})}$ との比率を図-3 に示す。一般的に設計される防波堤の天端高 $h_c/H_{1/3} = 0.6 \sim 1.0$ の範囲では、推定値がほぼ妥当な値を与えており、実験結果の上限を示すことから式 (1)~(3) の適用性および斜面形状の影響は β_s で説明できることが確認された。入射波高がケーソン天端高に対して小さく $h_c/H_{1/3} > 1.2$ となると、実験結果の方が推定値よりも大きくなっている。これはケーソン天端高の嵩上げによる波浪制御効果が直立混成堤と上部斜面堤で異なるため、斜面を有することにより最大波高 H_{max} 相当の大きな波の越波はケーソン天端高を高くしてもなかなか防止できないためと考えられる。なお図-3 には直立混成堤の波高伝達率の測定結果も示しており、上部斜面堤と同じ傾向になることを確認した。

図-4 に実験結果から求めた、消波ブロックの有無による波高伝達率の比較 (上部斜面堤の波高伝達率 K_{ts} と消波ブロック被覆式上部斜面堤の波高伝達率 K_{tbs} の比率) 結果を示す。入射波高が大きく、波形勾配が大きいほど、消波ブロックで被覆した断面の波高伝達率が小さ

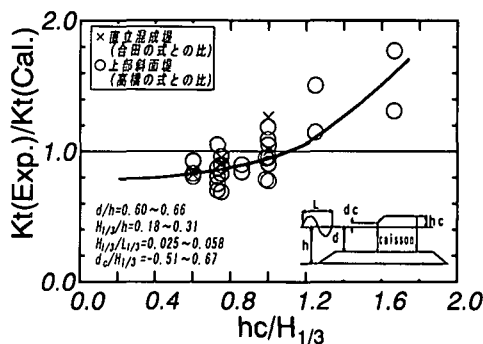


図-3 波高伝達率の推定値 (高橋式) と実験結果の比較

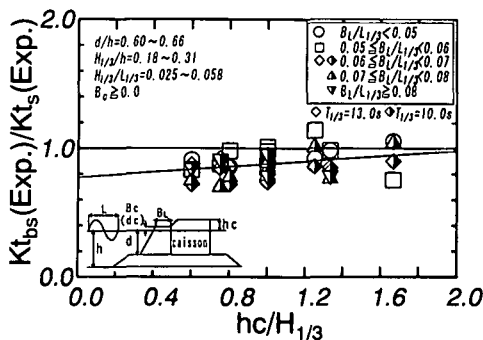


図-4 消波ブロックの有無による波高伝達率の比

くなる。消波ブロックの被覆長の違いによりパラツキはあるものの、 $h_c/H_{1/3}=1.0$ でおおむね 0.8 倍の波高伝達率となり、ケーソン天端高を低くすることも可能であることを示している。実際にはケーソンを設置した後、消波ブロックで被覆するまでに数年が経過するような場合には、消波ブロックの効果をケーソン天端高に反映させることは難しい。しかしながら、より経済的な防波堤断面を適用できる可能性を示すものであると考えられる。

実験結果から、同じ波高伝達率を与える直立混成堤の天端高 h_{cv} と上部斜面堤の天端高 h_{cs} の比を求めると図-5 のとおりとなった。斜面下端高が低いほど上部斜面堤の所要天端高が大きくなる傾向を示しており、Goda と高橋の式の関係から求められる比率と一致する。斜面下端高が静水面付近にあれば、所要天端高比は 1.7 倍程度で上限を与えることから、現行設計法 ($h_c=1.0H_{1/3}$) がほぼ妥当であることを示している。同様に、図-6 は上部斜面堤の天端高 h_{cs} と消波ブロック被覆式上部斜面堤の所要天端高 h_{cbs} の比を求めた結果であり、消波ブロックを $B_c=1.5$ m まで被覆した場合の換算値である。斜面下端高 d_{cs} が静水面にあると、天端高比は 0.8 倍で上限を与える。斜面下端高が低いと波高伝達率が大きくなるから、所要天端高比はより小さくなる。対象とする波浪と斜面部の形状により波高伝達率が大きく変化することを

考えれば、これらの結果を活用することで、コスト縮減に寄与する検討が可能であると考えられる。

4. 波力に与える消波ブロックの被覆効果

4.1 波力特性

消波ブロックによる波力低減効果については、高橋ら (1990) が合田式 (1990) に対する波力低減係数 λ を式 (4) ~ (6) に示すように提案している。

$$\lambda=1.0 \quad ; \quad (H/h < 0.3) \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\lambda=1.2-2/3(H/h) \quad ; \quad (0.3 \leq H/h \leq 0.6) \quad \cdots \cdots (5)$$

$$\lambda=0.8 \quad ; \quad (0.6 < H/h) \quad \cdots \cdots (6)$$

ほとんどの防波堤は $\lambda=0.8$ となり、現行設計法における波力低減係数の標準値となっている。また、上部斜面堤に作用する波力は、式 (7) ~ (10) に示す細山田ら (1994) の式の適用性が高いことが示されている。

$$F_{SH}=\lambda_{SL}' F_1 \sin^2 \theta \quad \cdots \cdots (7)$$

$$F_v=\lambda_v F_2 \quad \cdots \cdots (8)$$

$$\lambda_{SL}'=\min[\max\{1.0, -23H/L \tan^{-2} \theta + 0.46 \tan^{-2} \theta + \sin^{-2} \theta\}, \sin^{-2} \theta] \quad \cdots \cdots (9)$$

$$\lambda_v=\min[1.0, \max\{1.1, 1.1+11d_c/L\}-5.0H/L] \quad \cdots \cdots (10)$$

ここに、 θ は斜面の角度、 F_{SH} 、 F_v は斜面部および直立部に作用する水平波力であり、 λ_{SL}' と λ_v はそれぞれの波力の低減係数で、斜面部と同じ高さの直立壁に働く水平波力 F_1 、直立部に働く波力 F_2 を合田式から算定し低減係数を乗じることで上部斜面堤の波力が求められる。上記の式から計算すると、上部斜面堤は直立混成堤の 70~90% 程度のケーソン重量で安定性が確保できる。更に、消波ブロックによる波力低減効果が期待できるならば、より経済的な防波堤断面とすることができる。

図-7 に消波ブロックの有無による波圧の経時変化の比較を示す。また、図-8 には滑動合成波力最大時の同時刻の波圧分布を示すとともに、合田式および上部斜面堤の波力算定式 (森平・国田, 1979, 細山田式) から得られる波圧分布も示した。消波ブロックで被覆されている部分では最大波圧が低減されている。しかしながら、消波ブロックで被覆していない斜面部にはブロック上で碎波した直後の波が作用するため、明確な立ち上がりを示す碎波圧波形となっている。斜面下端付近では細山田ら (1994) が指摘しているように、エッジ部で生じる渦により波圧が小さくなっていると推察される。消波ブロックで下端部を被覆すると、エッジ部での波圧の低減が小さくなっており、ブロック上の碎波による影響もあってブロックの無い断面よりも斜面部に作用する波力は大きくなる。なお、ここには示していないが、消波ブロックの無い断面では、斜面に波が作用する前の位相 (直立部に波が当たった位相) で滑動合成波力がピークとなるケース

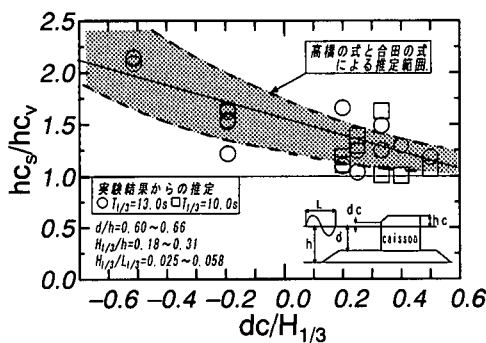


図-5 上部斜面堤の直立混成堤に対する所要天端高比

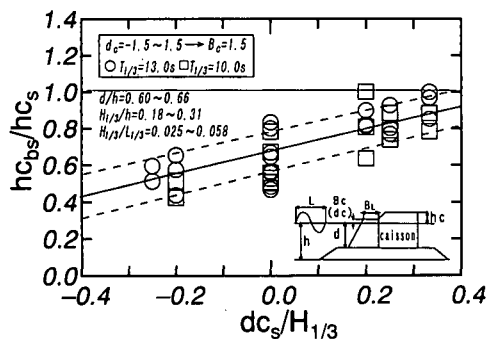


図-6 消波ブロックの被覆による所要天端高の変化

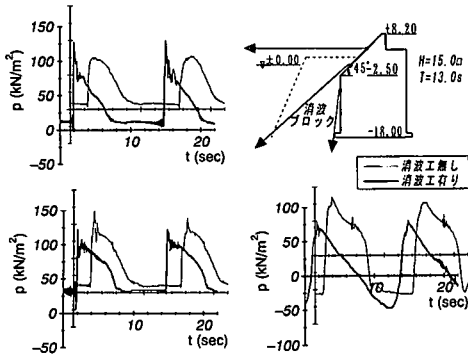


図-7 消波ブロックの有無による波圧の経時変化比較

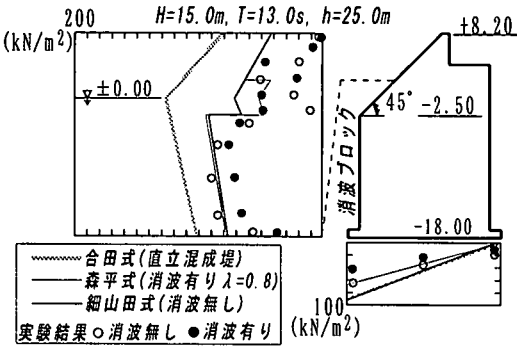


図-8 消波ブロックの有無による波圧分布の比較

があった。このことから、直立部の高さが高い場合には、斜面上の波の載荷重が考慮されない位相での安定性の確認も必要であると考えられる。

4.2 設計波力の算定法の検討

図-9に上部斜面堤の設計波力の算定式と実験結果の比較を示す。図は、直立混成堤に作用する波力を合田式から求め、滑動合成波力が最大となる時刻の実験結果を斜面部と直立部に分けてそれぞれの低減係数 λ_{SL} 、 λ_v を求めたものである。なお、斜面部の波力は森平式に従って水平方向の波力のみを考慮している。

斜面部に作用する波力は、実験結果が細山田式よりも大きく、直立部に作用する波力は小さくなる傾向にある。波浪条件との関係は細山田式の適用性が高く、全体の水平波力としてほぼ妥当な値を与える。消波ブロックで被覆した場合、直立部で波力の低減効果が現れ、斜面部では細山田式を大きく上回る波力が作用する。波力の値に差異はあるものの、細山田式が消波ブロックの有無によらず、波浪諸元の影響をほぼ妥当に評価していることを考え、消波ブロックにより被覆されている部分に低減係数 $\lambda=0.8$ を考慮した波力と考慮しない波力を細山田式から算定し実験結果と比較した。図-10に斜面部・直立部に作用する波力、水平波力、滑動合成波力の低減率(それぞれ λ_{SL2} 、 λ_{v2} 、 λ_{H2} 、 λ_{Fs2})を示す。斜面部では細山田式

の2倍近い波力が作用し、逆に直立部では波力が低減されるため、水平波力は消波ブロックを考慮しない細山田式と同程度の値となる。斜面部には水平方向と同じ波力が鉛直下向きに作用するため、揚圧力が相殺されて鉛直方向の波力はほとんどの場合に0以下となる。そのため、滑動合成波力は $\lambda=0.8$ として消波ブロックの効果を考慮した値に近づいている。

ここでは、すべての波浪条件に対して、消波ブロックの波力低減係数を $\lambda=0.8$ としているため、全体的に波力が過小に評価されている。式(4)~(6)に示されている H/h の影響を考慮すれば、滑動合成波力はほぼ妥当な値が得られ、ケーソン全体の安定性は波力低減係数を $\lambda=0.8\sim 1.0$ として評価すればよいことになる。ただし、直立部の波力比 λ_{v2} が H/h と比例して大きくなることや水平波力比 λ_{H2} がほぼ一定値を示していることを考えると、消波ブロック被覆式上部斜面堤の波力低減係数は通常の消波ブロック被覆堤と異なる傾向にあると考えられる。そのため、 $H/h > 0.6$ となる条件では、波力低減係数を $\lambda=0.8$ よりも大きめに見積もる方がよく、特に直立部の断面が斜面部に比べて大きいときは低減係数の与え方に注意する必要がある。

図-11に滑動実験結果を示す。細山田式($\lambda=1.0$)から算定される波力に対して実験に用いたケーソンの滑動安全率S.F.を求め、規則波1波当たり、不規則波約500波作用後の滑動量 S_x との関係を整理した。滑動実験からも細山田式の適用性が高く、消波ブロックで被覆すると安定性が向上していることから、波力実験結果の妥当性も検証できた。

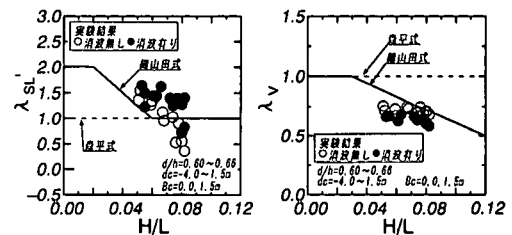


図-9 上部斜面堤の波力算定式と実験結果の比較

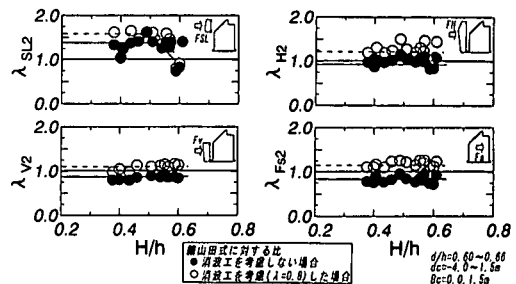


図-10 消波ブロック被覆式上部斜面堤の波力低減係数

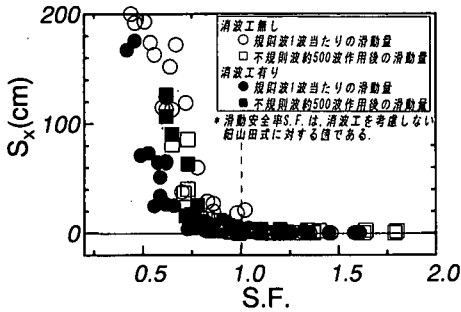


図-11 滑動実験結果

5. その他の水理的特性

5.1 ブロックの被覆形状と反射率

図-12は消波ブロックの被覆高 B_c と静水面における被覆長 B_L で反射率を整理したものである。消波ブロックが静水面下($B_c/H_{1/3} < 0.0$)にある場合、当然ではあるが消波効果は小さくなり、上部斜面堤と同程度の反射率となる。静水面上まで被覆すれば、通常の消波ブロック被覆堤と同程度の反射率 $K_r=0.3\sim0.5$ となる。

5.2 消波ブロックおよび被覆材の安定性について

消波ブロックの安定性について、高橋ら(1998)が提案した評価式における被災度 N_0 値($N_0=0.2$ では被害率 $D\approx 1.0\%$ に相当する)を求め実験結果と比較した。図-13に波高 $H_{1/3}$ と被災度 N_0 の関係を示す。消波ブロックの被覆高が静水面付近にあると、斜面上を越波する波の速い流れによってブロックの挙動が多くなり、被災度は計算値を上回る。同様に、消波ブロックの無い断面では、流れによる揚圧力の増加により被覆材や根固方塊の安定性も悪くなる。そのため、消波ブロック被覆上部斜面堤に用いる消波ブロックや被覆材等の質量は、防波堤堤頭部と同じように3~5割程度割り増す必要がある。

6. おわりに

本研究において、上部斜面堤の天端高は $1.0H_{1/3}$ として設計することの妥当性を確認し、消波ブロックで被覆することにより天端高を低く、より経済的な防波堤断面とすることができる可能性を示した。また、波力の算定法として細山田式が波浪諸元の影響を適切に評価し、上部斜面堤でも消波ブロックによって全体的には波力が低減されることが分かった。ただし、上部斜面堤における消波ブロックの被覆効果は、低減係数 $\lambda=0.8$ よりも小さく、斜面部には細山田式を上回る波力が作用する。また、被覆材や消波ブロックは、一般的な混成堤に用いる質量よりも大きくする必要がある。今後は、信頼性設計法をも取り入れることにより更に安定性に優れ、しかも経済的な防波堤断面が適用できると考えられる。

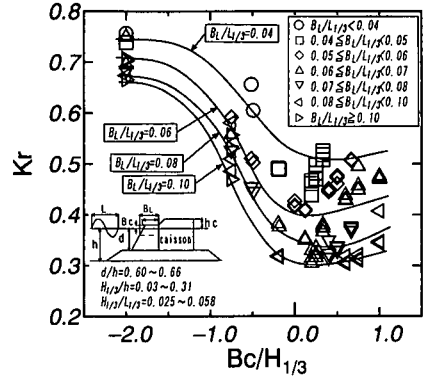


図-12 消波ブロックの被覆形状の違いによる反射率

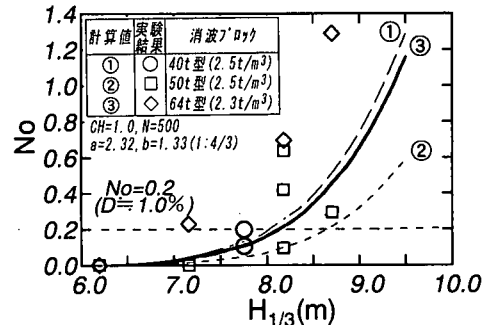


図-13 消波ブロックの被災度と波高の関係

参考文献

- 合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計—波浪工学への序説—, 鹿島出版会, pp. 85-109.
- 佐藤孝夫・山縣延文・古川正美・高橋重雄・細山田得三(1992): 消波ブロック被覆上部斜面堤の水理特性—那覇港大水深域における新構造防波堤の開発—, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 556-560.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎(1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第1号, 75 p.
- 高橋重雄(1997): 新構造防波堤とその設計, 1997年度(第33回)水工学に関する夏期研修会講義集, 水工学シリーズ 97-B-5, 20 p.
- 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(1998): 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第1号, 32 p.
- 中田邦夫・池田竜彦・岩崎三日子・北野雅三・藤田 隆(1983): 上部斜面堤の現地建設に伴う水理模型実験, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 313-316.
- 細山田得三・高橋重雄・谷本勝利(1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 706-710.
- 森平倫生・国田 治(1979): 斜面堤壁の水理特性に関する模型実験, 第26回海岸工学講演会論文集, pp. 295-298.
- Goda, Y. (1969): Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, pp. 3-18.