

一層被覆型消波ブロックを用いた護岸の水理特性について

HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF BLOCK MOUND SEAWALL WITH SINGLE ARMOR LAYER

木村克俊¹・清水雄平²・五明美智男³・笠原康祐⁴・佐野朝昭⁵

Katsutoshi KIMURA, Yuhei SHIMIZU, Michio GOMYO,
Kosuke KASAHARA, and Tomoaki SANO

¹正会員 博(工) 室蘭工業大学 建設システム工学科 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

²学生員 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

³正会員 博(工) 東亜建設工業(株) 技術研究所 (〒230-0035 横浜市鶴見区安善町 1丁目 3)

⁴正会員 東亜土木(株) ブロック事業部 (〒102-8451 東京都千代田区 4番町 5)

⁵正会員 (株) アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区発寒 9条 14丁目 516-336)

The hydraulic characteristics of block mound seawall with single armor layer are investigated by 2-D model tests. The differences in thickness of armor layer are discussed on wave reflection, wave overtopping and wave force on crown wall. Based on the test results, the necessary height and width of the crown wall can be obtained for the design conditions. The stability of HAMA-BITE, newly developed block for single armor layer, is examined by wave force and stability tests. For the practical design of block mound seawall with single armor layer, the stability number of HAMA-BITE is formulated as the function of the relative damage level and the number of wave action.

Key Words : block mound seawall, single armor layer, hydraulic characteristics

1. はじめに

消波ブロック積み傾斜堤は比較的浅海域に建設される防波堤や護岸の一般的な構造形式の一つである。現行設計法では、沖側の捨石マウンド部を消波ブロック二層積みによって被覆する工法が標準的であり現地において数多くの施工事例がある。しかしながら近年、公共事業に対する建設コスト縮減の要請が高まる中で、被覆層を一層のみとする工法が注目を集めており、各種の一層被覆型消波ブロックが開発されている。

一層被覆型傾斜堤を対象とした既往の研究としては、川俣ら¹⁾が上部工に作用する波力特性について検討を行っており、前面波力および揚圧力を明らかにしている。また、崎田ら²⁾は規則波実験を実施し、反射特性と消波ブロックの耐波安定性について報告している。さらに、清水ら³⁾は消波ブロックに作用する波力に及ぼす波浪条件の影響を明らかにしている。本研究では、写真-1に示す六脚構造の一層被覆型消波ブロック「ハマバイト」を用いた傾斜堤式



写真-1 ハマバイト模型

護岸を対象として水理模型実験を実施し、越波流量、反射率および上部工前面に働く波力等の水理特性について被覆層厚の影響を調べる。また、同ブロックの作用波力および安定性について検討し、設計で用いる安定数を提案する。

2. 越波および反射特性

(1) 実験条件および方法

水理模型実験は二次元造波水路（長さ 24m，幅 0.6m，高さ 1.0m）に，海底勾配 1/30 の水路床を設置して実施した．ここでは図-1 (a) に示す一層被覆型傾斜堤と，図-1 (b) に示す二層被覆型傾斜堤について，越波および反射特性を比較した．実験水深 h は 15.7, 21.0 および 31.0cm の 3 種類に変化させた．使用したハマバイト模型の質量は 123g，テトラポッド模型は 184g である．なお，模型縮尺は 1/30 程度を想定している．

実験波はブレッグシュナイダー・光易型スペクトルを有する不規則波とし，150 波程度作用させた．実験波の周期 $T_{1/3}$ は 1.58, 1.97 および 2.28s の 3 種類とし，波高 $H_{1/3}$ は 4~12cm の範囲で変化させた．

越波実験では，上部工天端に導水桶を設置し，越波水を堤体背後の取水容器に集め，その総量を測定した．反射実験では，沖側に常設した 2 本の波高計を用いて，入反射分離法より反射率を求めた．

(2) 越波特性

図-2 は無次元越波流量 $q/(gH_{1/3}^3)^{1/2}$ と無次元天端高さ $h_c/(H_{1/3}^2 L_{1/3})^{1/3}$ の関係を示している．ここで， q は単位時間・単位幅当りの越波流量， g は重力加速度， h_c は上部工天端高さ， $L_{1/3}$ は波長である．天端が低いほど，また波長が長いほど越波流量は増加する傾向がある．一層被覆の越波流量は最大で二層被覆の 3 倍程度となった．両者の無次元越波流量を以下のように定式化した．

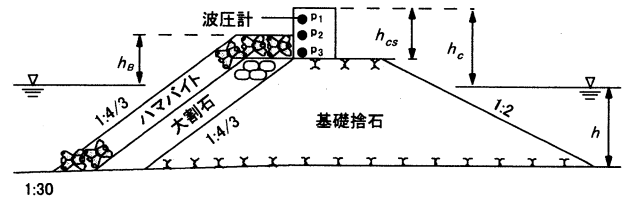
$$\frac{q}{\sqrt{gH_{1/3}^3}} = Q_0 \cdot \exp\left[-b \cdot \frac{h_c}{(H_{1/3}^2 L_{1/3})^{1/3}}\right] \quad (1)$$

実験値の平均的な傾向に着目すると，一層被覆の場合は $Q_0=1.1$ および $b=15$ ，二層被覆の場合は $Q_0=7.4$ および $b=20$ となる．ただし，これらの係数の適用範囲は $0.4 \leq h_c/(H_{1/3}^2 L_{1/3})^{1/3} \leq 0.7$ とする．

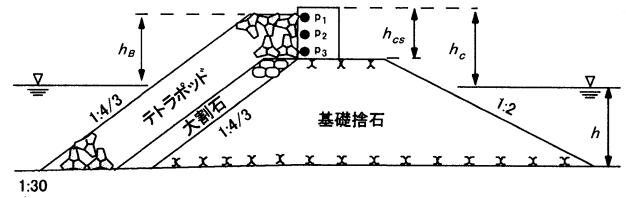
現地換算した越波流量 q が 0.02 (m³/m/s) となる条件に対して，二層被覆の上部工天端高さ h_{cII} と一層被覆の天端高さ h_{cI} の比を求めた．図-3 は波高水深比 $H_{1/3}/h$ をパラメータとして，換算天端高さ h_{cI}/h_{cII} と水深波長比 $h/L_{1/3}$ の関係を示したものである． h_{cI}/h_{cII} に対する $H_{1/3}/h$ および $h/L_{1/3}$ の影響は小さく，一層被覆の上部工天端高さを 10~13% 程度割増しすることで二層被覆と同程度の越波流量とすることが可能である．

(3) 反射特性

図-4 は水深波長比 $h/L_{1/3}=0.08$ における反射率 K_R と波形勾配 $H_{1/3}/L_{1/3}$ の関係を示したもので， $H_{1/3}/L_{1/3}$ が小さいほど K_R は大きくなる傾向がある．一層被覆の K_R は二層被覆より 0.03~0.06 程度高く



(a) 一層被覆型



(b) 二層被覆型

図-1 堤体の断面形状

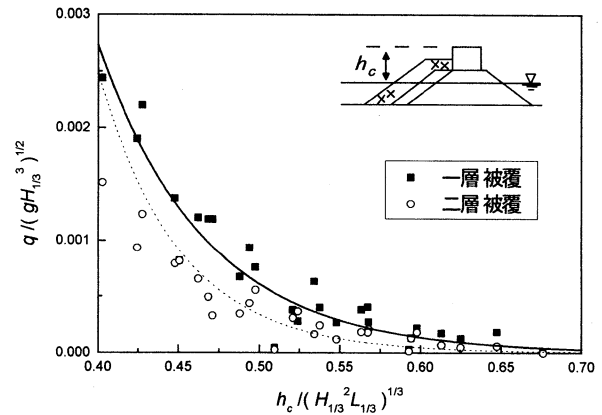


図-2 越波流量

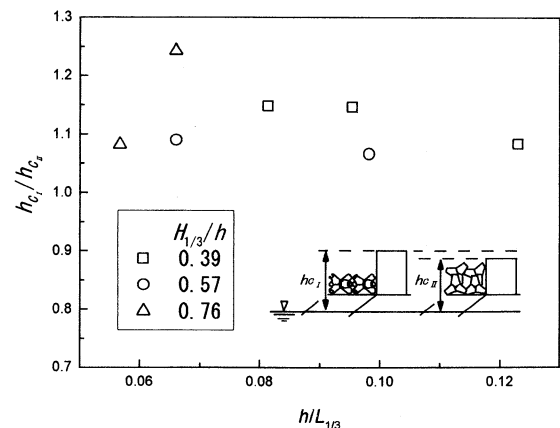


図-3 換算天端高さ

なった．これは一層被覆のほうが静水面での消波ブロック被覆幅が狭いためと考えられる．

3. 上部工の安定性

(1) 実験条件および方法

上部工に関しては、不規則波により波圧特性および滑動安定性を検討した。実験波の周期 $T_{1/3}$ は 2.28s で一定として、波高 $H_{1/3}$ を 4~12cm の 5 種類とした。なお、以下に示す波圧の実験値は、波群特性の異なる 3 種類の波列を作用させた平均値とした。

波圧実験は、前出図-1 に示すように上部工に波圧計を 3 点 ($p_1 \sim p_3$) 取り付け、サンプリング周波数 100Hz でデータを取得した。滑動実験は、上部工質量を段階的に軽くしていき、波作用後に滑動量を測定した。なお、上部工高さ h_{cs} は、越波実験の結果より現地換算した越波流量 q を 0.02 (m³/m/s) 以下に抑えられるように決定した。

(2) 上部工に作用する波力特性

一層被覆型断面は、消波工天端が静水面より上にあり、かつ上部工が十分に被覆されていない不完全消波状況である。このような断面形状の上部工に、消波工上で碎波した波が直接衝突すると衝撃的な波力が発生する可能性がある。

図-5 は $H_{max} = 16.6\text{cm}$ の波が作用したときの波圧分布を示したものである。一層被覆の場合、消波ブロックに被覆されていない p_2 において $p = 0.95 w_0 H_{max}$ 、被覆されている p_3 においても $1.05 w_0 H_{max}$ となっている。二層被覆の場合でも、被覆されている p_1 で $0.57 w_0 H_{max}$ とやや大きめの波力が作用しており、消波工天端からある程度の深さまでは衝撃波力の影響があることがわかる。

一般に、静水面における直立壁に働く波圧は以下の式により求められる。

$$p_1 = (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^*) w_0 H_{max} \quad (2)$$

ここに、 λ_1 および λ_2 は、それぞれ重複波成分および衝撃碎波力成分に対する補正係数である。図-6 は上部工に働く波力の平均値 \bar{p} に着目して、高橋ら⁴⁾による計算値 \bar{p}_{cal} と実験値 \bar{p}_{exp} を比較したものである。消波ブロックの天端高さ h_B と H_{max} の比 h_B/H_{max} が 1.1 以下の範囲では $\bar{p}_{exp}/\bar{p}_{cal} > 1$ となり、計算値は衝撃的な波力を十分に表していない。これは計算値が規則波実験に基づいているためと考えられる。このような波力増大を考慮して、 λ_2 を以下のように修正する。

$$\lambda_2 = \begin{cases} 1.58 - 1.43(h_B/H_{max}) & (0.5 \leq h_B/H_{max} \leq 1.1) \\ 0.0 & (1.1 < h_B/H_{max}) \end{cases} \quad (3)$$

(3) 上部工の滑動安定性

実験波を $H_{1/3} = 12\text{cm}$, $T_{1/3} = 2.28\text{s}$ に限定して、滑動量が 10mm (現地換算 30cm) となるときの上

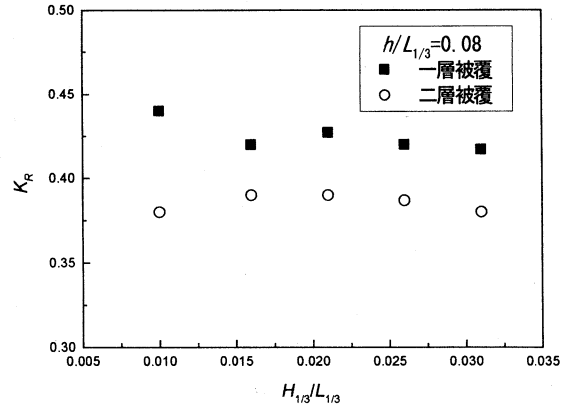
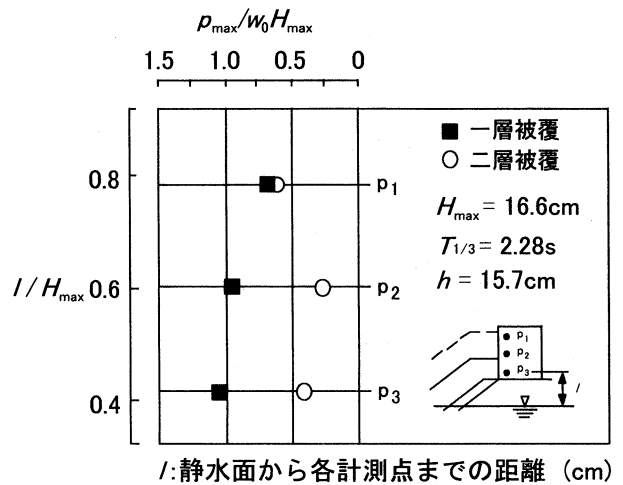


図-4 反射率



/: 静水面から各計測点までの距離 (cm)

図-5 波圧分布

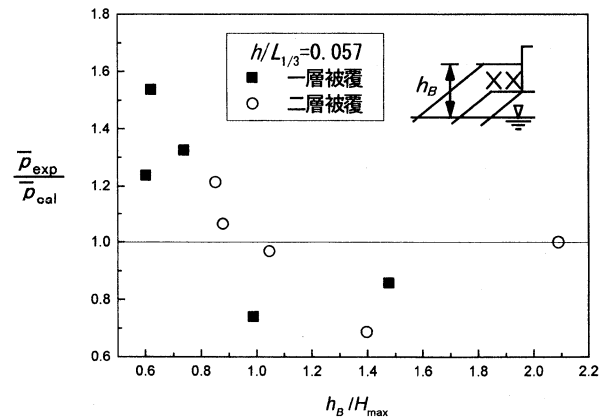


図-6 $\bar{p}_{exp}/\bar{p}_{cal}$ と h_B/H_{max} の関係

部工の必要質量 M_{cri} を求めた。なお、 M_{cri} は特性の異なる 3 種類の波群を作用させた平均値とした。図-7 は M_{cri} と波高水深比 $H_{1/3}/h$ の関係を示したものである。一層被覆、二層被覆ともに $H_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて、 M_{cri} は減少する傾向がある。これは、

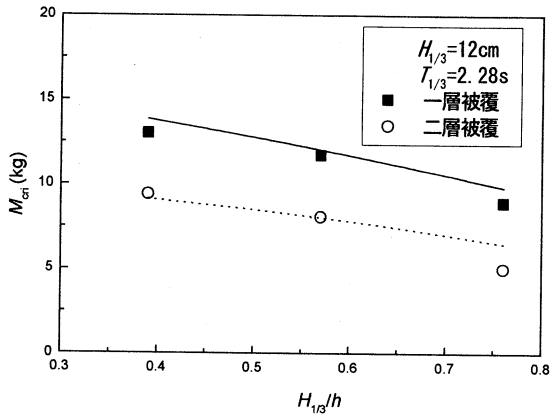


図-7 必要質量と波高水深比の関係

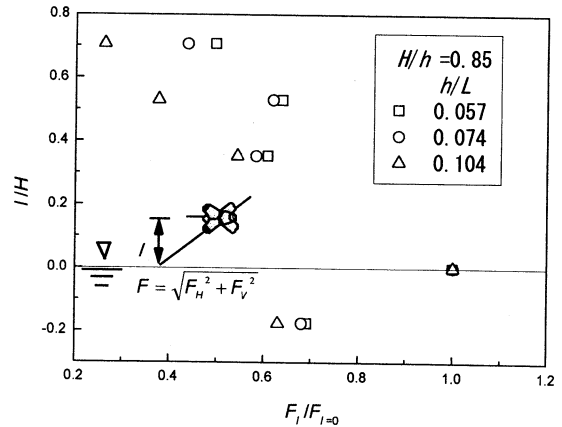


図-9 波力減衰率

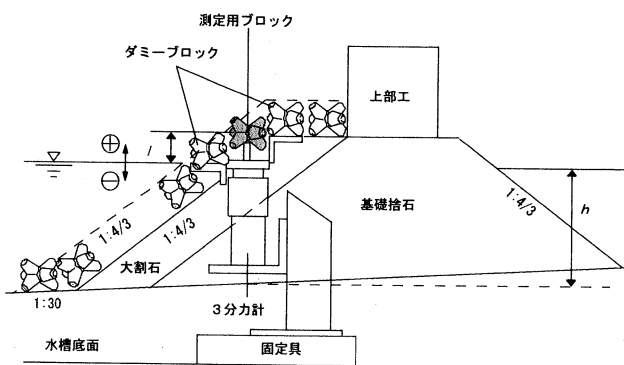


図-8 波力実験模型

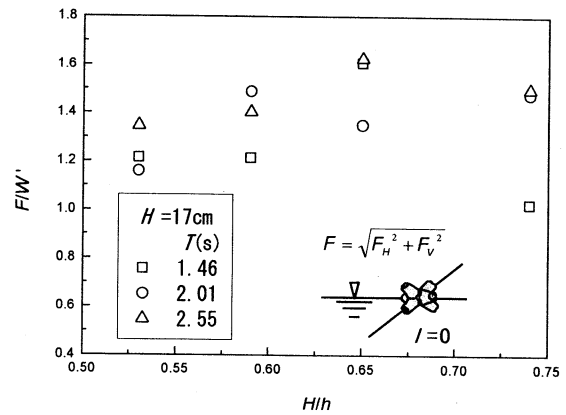


図-10 波力と波高水深比の関係

$H_{1/3}/h$ が増大するに伴い砕波が促進され、その結果 H_{max} の上限値が制限されることに起因している。実線および点線は、式 (2) および (3) を用いて求めた計算値を示しており、実験値と計算値はよく一致している。

4. 消波ブロックの安定性

(1) 実験条件および方法

一層被覆型消波ブロックであるハマバイトに働く波力と安定性について検討した。ハマバイトに作用する波力は図-8 に示すように、測定用ブロック (質量 123g) を分力計の先端に固定し、水平および鉛直方向波力を測定した。実験には規則波を用い、波高 H を 17cm で一定として、周期 T を 1.46~2.55s、水深 h を 20~32cm、計測位置 I を静水面を原点として -3~12cm (上向きを正) の範囲で変化させた。サンプリング周波数は 200Hz とし、5 波程度を解析の対象とした。

安定実験は不規則波で行い、1 波群を 1000 波とした。水深 h は 32cm で一定、波高 $H_{1/3}$ は 9.4~15.1cm、周期 $T_{1/3}$ は 1.63~2.86s とした。ブロック全高の 1/2

程度以上移動した場合を被害と定義し、その累積値を求めた。被害の程度は高橋ら⁵⁾と同様に被災度 M_0 で表した。ハマバイト模型の質量は 50.5g および 123g の 2 種類とし、空隙率 52% で乱積みとした。また、二層被覆についてはテトラポッド模型 (質量 115g) を用い、空隙率 50% で乱積みとした。

(2) 波力特性

ブロックに働く水平波力 F_H および鉛直波力 F_V の時系列データを用いて、その合力 $F = (F_H^2 + F_V^2)^{0.5}$ のピーク値を求めた。図-9 は $H/h = 0.85$ の条件に対して、 $I = 0$ の波力を基準としたときの、計測位置の違いによる波力の減衰率を示している。縦軸は計測位置と波高の比 I/H 、横軸は静水面位置での波力と各計測位置での波力の比であり、静水面位置の波力が最も大きいことがわかる。また、 h/L が大きいほど波力減衰率は大きくなる傾向がある。 $I/H = 0.7$ において、 $h/L = 0.104$ では波力比は 0.3 まで減少するが、 $h/L = 0.057$ では低減率は 0.5 程度となる。

図-10 は静水面位置 ($I = 0$) における作用波力を示している。縦軸は合成波力 F をブロックの水中重量 W' で除した無次元波力であり、横軸は波高水

深比 H/h である。周期が長いほど作用波力は大きい。また、 H/h の増大とともに F/W' も増大し、 $H/h=0.65$ において波力の最大値は水中重量の 1.6 倍程度となっている。

(3) 消波ブロックの安定性

写真-2 は 50.5g のハマバイトに $H_{1/3}=11.8\text{cm}$, $T_{1/3}=1.97\text{s}$ の波を 3000 波まで作用させたときの被災状況を示したものである。1000 波作用後に法肩付近で初期被害が発生している。これは、法肩付近では上下のブロックからの拘束力が弱く、不安定となるためと考えられる。その後、抜け出したブロックの周辺部から被害が拡大し、2000 波作用時には $N_0=0.5\sim 0.7$ となり、大割石が露出した。さらに 3000 波作用後には、ブロックの被害が急速に進行する傾向がある。

図-11 は、同一波高の波を 5000 波まで連続して作用させたときの被災度 N_0 と波数 N の関係を示している。二層被覆の場合、5000 波作用時において被害が収束しているが、一層被覆型消波ブロックは前述したように 1 個の抜け出しから被害が進行することがある。

消波ブロックの必要質量 M は、以下に示す安定数 N_s を用いたハドソン式により算出される。

$$M = \frac{\rho_r H_{1/3}^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3}, \quad N_s^3 = K_D \cot \alpha \quad (4)$$

ここに、 ρ_r は材料の密度、 $H_{1/3}$ は設計有義波高、 K_D は被覆材の形状などによって定まる定数、 S_r は海水に対する被覆材の比重、 α は斜面が水平面となす角度である。一般的な消波ブロックの安定数は $N=1000$, $N_0=0.3$ を基準値として求められている。しかしながら、一層被覆の場合には、ブロックの移動だけでなくロッキングも防止することが重要である。したがって、安定数の決定においてはより厳しい条件を設定する必要がある。本研究では $N=5000$, $N_0=0.1$ を基準値として設定した。

図-12 は縦軸に安定数 N_s 、横軸に被災度 N_0 を作用波数の 1/2 乗で除した $N_0/N^{0.5}$ をとり、水深波長比 $h/L_{1/3}$ をパラメータとして表したものである。現行設計法である高橋ら⁵⁾の安定数算定式にならい、実験値の平均的な傾向から一層被覆型消波ブロックの安定数を以下のように定式化した。

$$N_s = 2.32 \left(\frac{N_0}{N^{0.5}} \right)^{0.2} + 1.89 \quad (5)$$

$N=5000$, $N_0=0.1$ の条件では $N_s=2.51$ ($K_D=12$) となる。

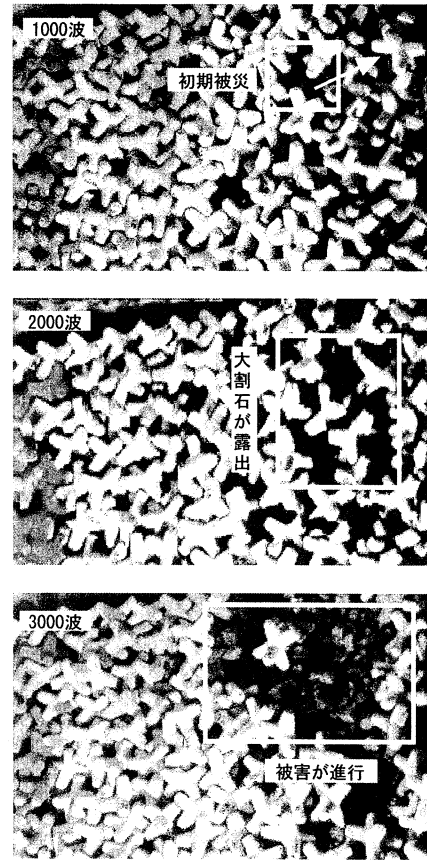


写真-2 被害の進行状況

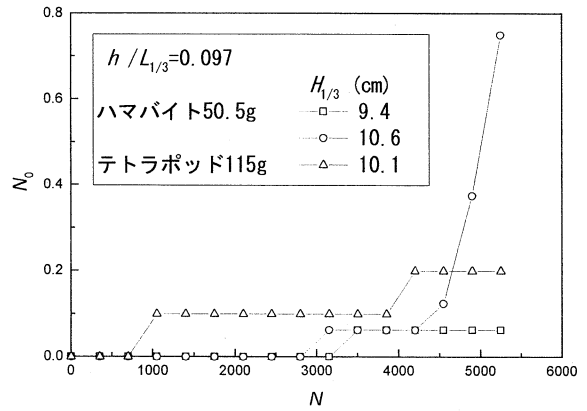


図-11 被災度と作用波数の関係

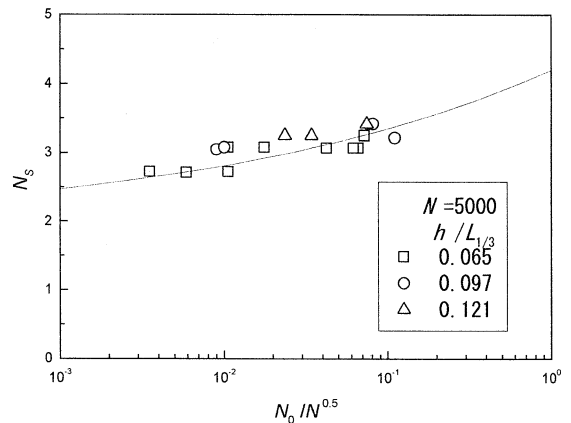


図-12 安定数と $N_0/N^{0.5}$ の関係

5. まとめ

一層被覆型消波ブロックを用いた傾斜堤式護岸の水理特性と耐波安定性について検討を行った。得られた結論は以下のとおりである。

- ①越波流量および反射率に及ぼす被覆層厚の影響を明らかにした。また、越波流量を定式化するとともに、二層被覆に対する一層被覆型護岸の天端高さの割増率を示した。
- ②上部工に作用する波力特性を明らかにした。高橋らの波圧算定方法を補正することにより、上部工の必要質量を算定できることを確認した。
- ③一層被覆型消波ブロックに働く波力に及ぼす構造および波浪条件の影響を明らかにした。さらに、被災度と作用波数をパラメータとして安定数を定式化した。

新たに提案した越波流量、上部工の必要質量および消波ブロックの安定数の算定法を用いることにより、所要の防波性能および耐波性能を有する一層被覆型護岸の設計が可能となった。しかしながら、現地への適用にあたっては、水理特性と同時にコスト面も考慮し、一層被覆に適した条件を明らかにする必要がある。また、今回の検討はすべて直角入射を想定したものであるため、今後は平面実験を行って、斜め入射波に対する設計法を確立する必要がある。

謝辞：本報告のとりまとめに際しては、(独法)北海道開発土木研究所港湾研究室山本泰司副室長のご助言を得た。また、実験の実施においては、東亜建設工業(株)田谷年樹氏(元室蘭工業大学大学院)の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)川俣 奨, 関本恒浩, 植木一浩, 渡辺敏幸, 阪内茂記: 消波ブロック1層被覆式傾斜堤のパラペット付き上部工に作用する波力特性について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.766-770, 1998.
- 2)崎田貴徳, 服部昌太郎, 矢内栄二, 笠原康祐: 単層整積み被覆ブロック堤の反射特性とブロックの水理的安定性, 土木学会第53回年次学術講演会, pp.346-347, 1998.
- 3)清水雄平, 木村克俊, 五明美智男, 田谷年樹, 笠原康祐: 一層被覆型消波ブロックの耐波安定性に関する水理模型実験, 土木学会第57回年次学術講演会, pp.125-126, 2002.
- 4)高橋重雄, 大木泰憲, 下迫健一郎, 諫山貞雄, 石貫国朗: 台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技術研究所資料, No.973, pp.1-50, 2000.
- 5)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, 港湾技術研究所報告, 第37巻第1号, pp.3-32, 1998.