

消波ブロック積み傾斜堤を対象としたマウンド 被覆ブロックの耐波安定性について

WAVE FORCE AND STABILITY OF MOUND ARMOR BLOCK FOR SLOPING BREAKWATERS

木村 克俊¹・佐藤 岳志²・本間 剛³
Katsutoshi KIMURA, Takeshi SATO and Tsuyoshi HONMA

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正会員 工修 北海道電力株式会社 土木部電源開発グループ (〒060-8677 札幌市中央区大通東1丁目2番地)
(元室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻)

³正会員 北海道機械開発株式会社 工務部工事課 (〒065-0043 札幌市東区苗穂町10丁目1-15)
(元室蘭工業大学 建設システム工学科)

Armor block stability for the mound of sloping breakwaters was examined by 2-D model tests. Damage patterns of armor blocks at the mound berm were reproduced by wave force tests. By the action of breaking wave, armor blocks at the offshore side of mound were uplifted by the vertical wave force, and overturned by the wave induced flow. Based on the stability test results, the stability number of armor blocks was formulated as the function of relative depth, relative mound height and sea bottom slope. Furthermore, the relationship between the damage level and the number of wave action was shown for storm wave conditions exceeding the design wave height.

Key Word : mound armor block, sloping breakwater, stability, model test

1. まえがき

消波ブロック積み傾斜堤では、本体工の沈下を防止するため、厚さ1~2m程度の捨石マウンドを設置することが一般的である。設計波高が大きい場合には、図-1に示すようにマウンド部を平型のコンクリートブロックで被覆することが多い。一方、マウンド部においては、光や流れといった環境条件が揃えば良好な藻場が形成されることが知られており、とくにマウンドを比較的高くすることの有効性は、谷野ら¹⁾によってすでに確認されている。また佐藤ら²⁾の研究により、マウンドを高くすることで反射・伝達率を低減できることが明らかとなっており、マウンド厚の影響を考慮した伝達率の定式化も行われている。

消波ブロック積み傾斜堤の消波ブロックの耐波安定性については、木村ら³⁾によって必要質量の算定

法が提案されている。しかしながら、マウンド被覆ブロックの必要質量については十分な知見が得られておらず、これまでの経験に基づいて設計されているのが現状である。

本研究では、消波ブロック積み傾斜堤を対象として、マウンド形状を変化させた系統的な水理模型実験を行い、マウンド被覆ブロックの作用波力と安定性について検討し、マウンド厚、周期および海底勾配の影響を考慮した安定数の算定法を提案する。

2. 波力実験

(1) 実験方法

水理模型実験は長さ24.0m、幅0.6m、高さ1.0mの2次元造波水路を使用し、海底勾配 $\tan\theta=1/30$ に対応する水路床を設置した。図-2に示すように波力測定用の被覆ブロック(エクスブロック:200g)を分力計の先端に固定し、水平および鉛直の2方向波力を測定した。測定用ブロックが隣接するブロックに接触することを防ぐために、写真-1に示すように周囲を4個のダミーブロックで保護した。測定用ブロックの近傍には、波高計および流速計を設置して、水位および水平流速を測定した。分力計、波高計および流速計のサンプリング周期は100Hzとした。

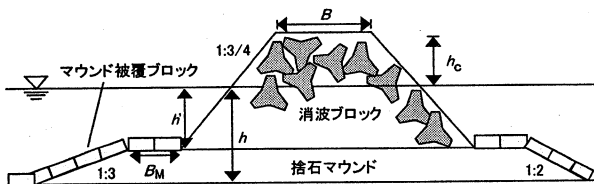


図-1 消波ブロック積み傾斜堤の断面形状

堤体設置水深 h は11cmで一定とし、マウンド上水深 h' を2.2~8.8cmの間で変化させた。消波ブロックにはテトラポッド(230g)を使用し、天端3個並び

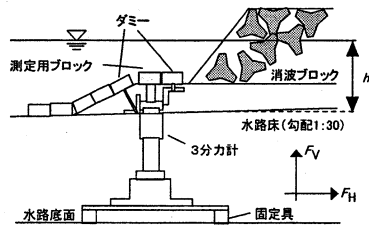


図-2 波力計の設置状況

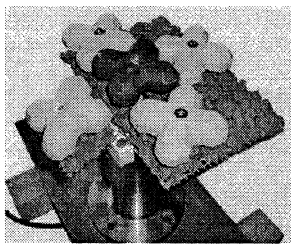


写真-1 測定用ブロック(中央)とダミーブロック

とした。マウンド前肩幅 B_M は被覆ブロック2個並びに相当する10cmで一定とした。

波力実験はすべて規則波で行い、波高 H は5~12cm, 周期 T は1.57~2.21sの間で変化させた。波高が安定した5波程度を解析対象とし、水平波力 F_H は波の進行方向を、鉛直波力 F_V は鉛直上向きをそれぞれ正と定義した。

(2) 波力の時間変化

図-3は、水位 η , マウンド近傍流速 U , 水平波力 F_H および鉛直波力 F_V の時間変化を示したものである。鉛直波力にはマウンド条件による差がみられないのに対し、水平波力はマウンドが高いほどその値が大きくなる。これはマウンドが高い場合に、マウンド近傍流速が大きくなるためと考えられる。一方、周期の影響に着目すると、周期が長い $T=2.21s$ のほうが1.58sの場合に比べて、鉛直上向きの波力がやや大きくなることが認められる。

図-4は、 $H=7.3cm$, $T=1.58s$ として、マウンド上水深 h' を2種類に変化させた場合の波力の時間変化を示している。マウンドが高い $h'/h=0.5$ の場合、①は波が作用する直前の状態であり、被覆ブロックに波力は生じていない。②の状態は、波が被覆ブロッ

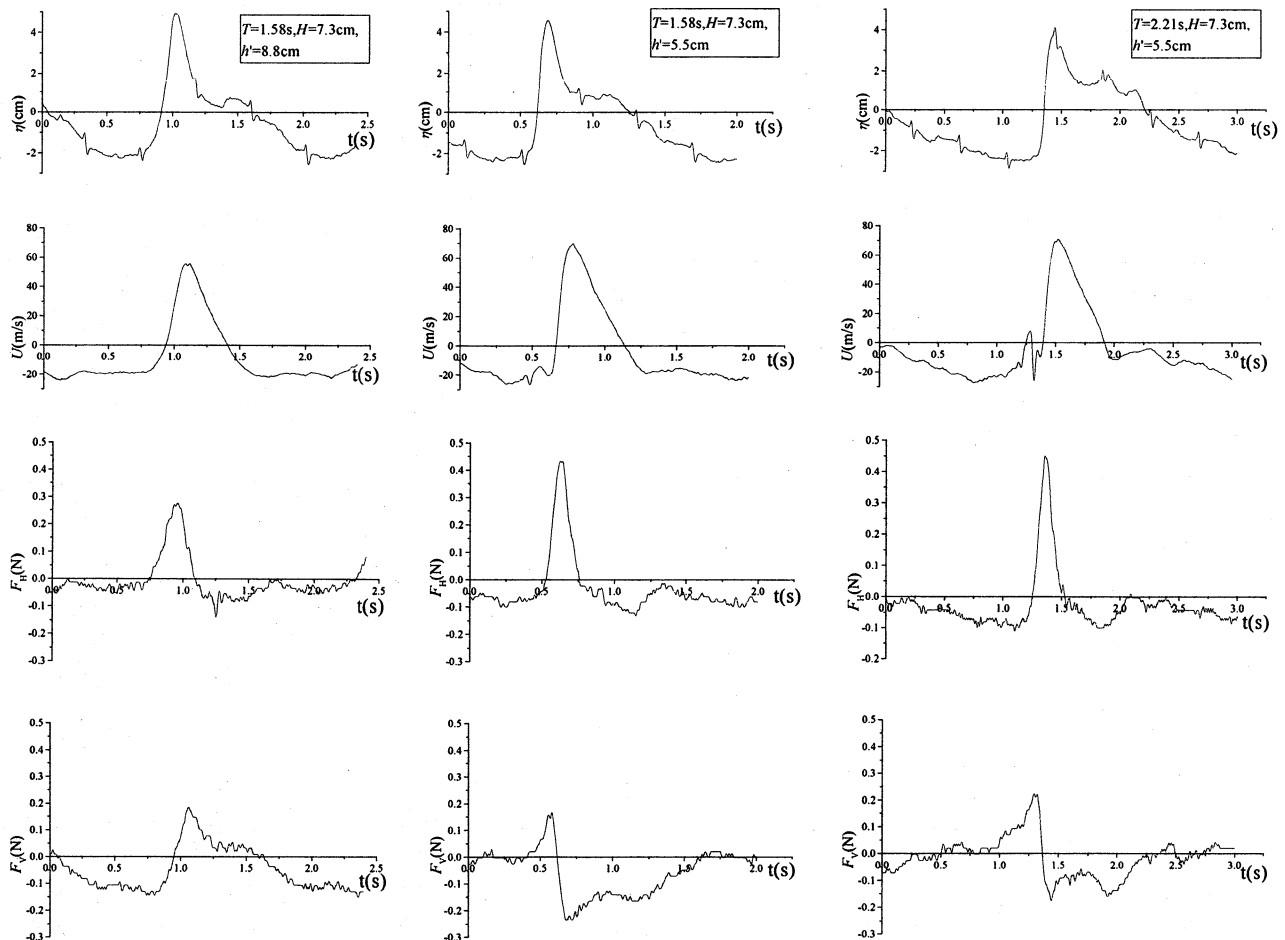


図-3 時系列データ

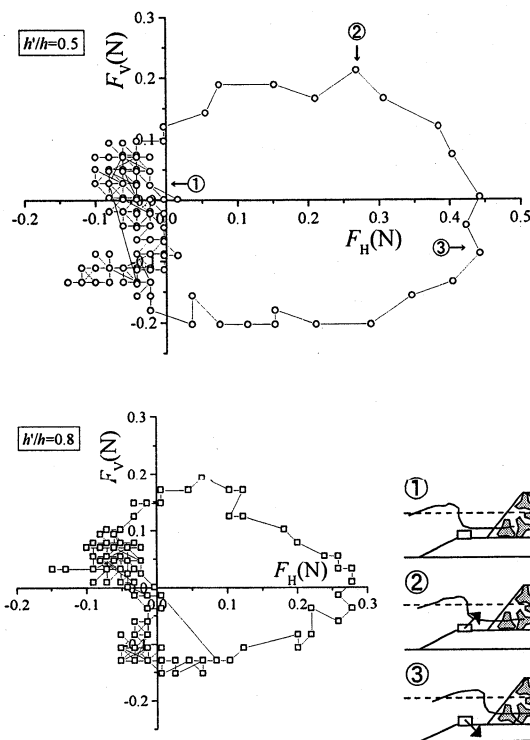


図-4 波力の時間変化

クに作用した直後であり、急に水面が上昇することにより斜め上向きの波力が発生する。このとき被覆ブロックが動揺しやすくなり、波による流れによって水平方向に移動させるような力が発生する。③は波の峰が通過した後の状態であり、鉛直下向きの波力が発生し始めることで被覆ブロックは再び安定となる。一方マウンドが低い $h'/h=0.8$ の場合には、鉛直および水平方向の波力のピーク値に時間差が生じることや、水平方向波力の絶対値が小さいために、被覆ブロックを動揺させるような力が生じにくいことがわかった。

(3) 波力の変化特性

波力の時系列データを用いて合成波力のピーク値を求めた。図-5は $h/L=0.055$ での波高水深比 H/h と無次元波力 F/W の関係を示したものである。ここで W はブロックの水中重量である。波高水深比とともに無次元波力は増大し、マウンド上水深比 h'/h が小さいマウンド厚が大きい条件ほど、波力増大が顕著となる。

図-6は、 $h'/h=0.8$ での波高水深比と無次元波力の関係を示したものである。 h/L が小さい条件ほど、やや波力が大きくなる傾向がある。

3. 安定実験

(1) 実験方法

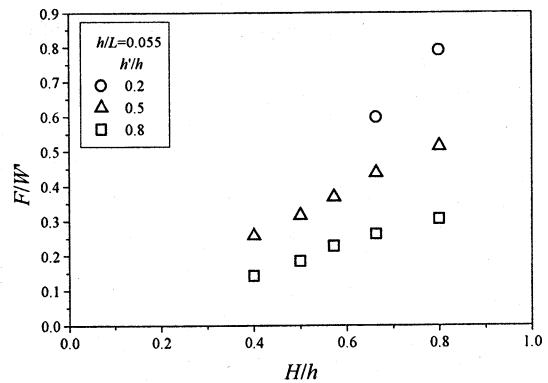


図-5 マウンド厚の影響

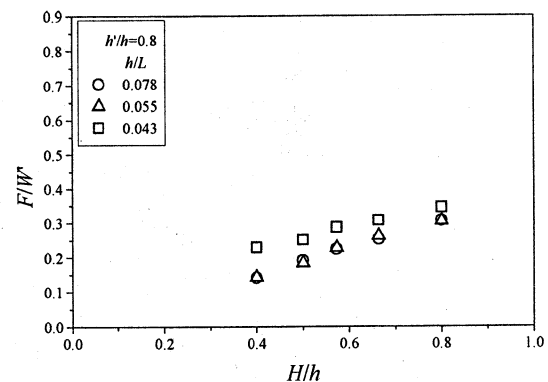


図-6 周期の影響

波力実験で使用した2次元造波水路内に、海底勾配 $\tan\theta=1/30, 1/20, 1/15$ および $1/10$ に対応する水路床を設置した。表-1に安定実験の条件を示す。堤体の設置水深 h を15.6cmで一定とし、マウンド上水深 h' を1～15.6cm、マウンド天端高さ h_c を5.3～10.2cmとした。実験波はすべて不規則波とし、有義波周期 $T_{1/3}$ は1.67s、2.33sおよび2.97sの3種類とし、有義波高 $H_{1/3}$ は6～17cmの範囲で変化させた。消波ブロックにはテトラポッド(180～590g)を使用し、天端3個並びとした。マウンド被覆ブロックはエックスブロック(22～200g)を使用した。なお、基準安定数 N_{s0} は、一般的 K_D 値から求め、エックスブロックの値としては3.30を用いた。

安定実験では1波群を500波とし、ブロックの並び替えを行わず波高を段階的に大きくする段階波実験と、同一波群を繰り返し作用させる連続波実験の2種類を行った。

(2) 被災パターン

図-7に代表的な被覆ブロックの被災パターンを示す。初期被災はマウンド法肩部で生じ、法先部の被覆ブロックが先に被災する現象は見られなかった。また被覆ブロックが岸側へ移動する被災が多く見ら

表-1 安定実験の条件

$\tan \theta$	水深 h (cm)	天端高さ h_c (cm)	マウンド上水深 h' (cm)	有義波高 $H_{1/3}$ (cm)	有義周期 $T_{1/3}$ (s)	被覆ブロック質量 M (g)	消波ブロック質量 (g)
1/30	15.6	5.3, 7.8	1, 4, 6, 8	6~10	1.67, 2.33, 2.97	22, 42, 91	180, 230
1/20		5.3, 7.8	1, 4, 8, 12	6~13.2	1.67, 2.33, 2.97	22, 42, 91	180, 230
1/15		5.3, 7.8	1, 5, 6, 7, 5, 12	6~15	2.97	22, 42, 91, 200	180, 230
1/10		5.3, 7.8, 8.4, 10.2	1, 4, 6, 8, 12, 14, 15.6	6~17	1.67, 2.33, 2.97	22, 42, 91, 200	180, 230, 370, 590

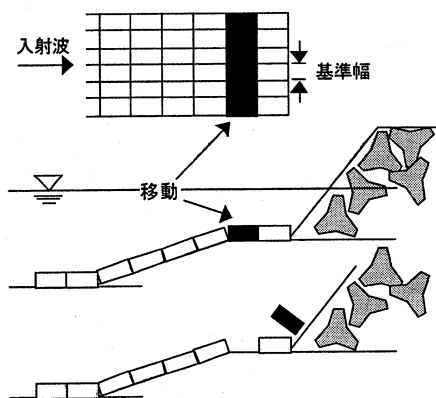


図-7 被災パターン

れ、沖側へ戻されるような被災はほとんど生じなかった。以下においては、被覆ブロックの基準幅分以上の移動が生じた場合を被災と定義し、被災度 N_0 は被災個数を堤体法線方向のブロック個数で除して求めた。

図-8は、海底勾配 $\tan \theta=1/30$ 、周期 $T_{1/3}=2.33s$ 、質量42gの被覆ブロックについて、波高と被災度の関係を示したものである。マウンド厚が大きいくほど被災度が大きくなることがわかる。これはマウンド厚が大きい場合にマウンド法肩付近で碎波が生じやすく、被覆ブロックに直接波力が作用しやすいことが理由と考えられる。

図-9は、海底勾配 $\tan \theta=1/30$ 、マウンド上水深比 $h'/h=0.25$ 、質量42gの被覆ブロックについて、波高と被災度の関係を示したものである。周期が長くなるほど被災度が大きくなることがわかる。

図-10は、 $h/L_{1/3}=0.055$ 、 $h'/h=0.5$ 、質量42gの被覆ブロックにおける波高と被災度の関係を示したものである。海底勾配が1/10では、1/30に比べて同一波高に対する被災度が非常に大きくなる。海底勾配が急な場合には、巻き波の発生頻度が高く、マウンド法肩部のみでなく法先部まで被災することも多く見られた。

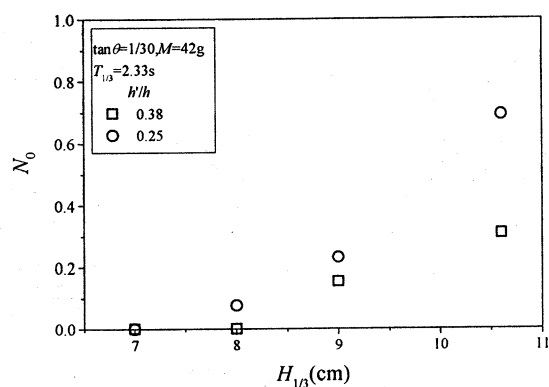


図-8 マウンド厚の影響

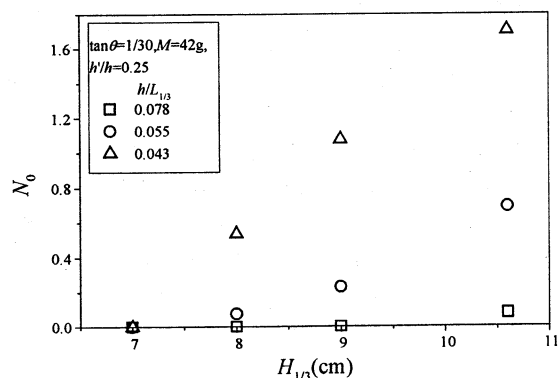


図-9 周期の影響

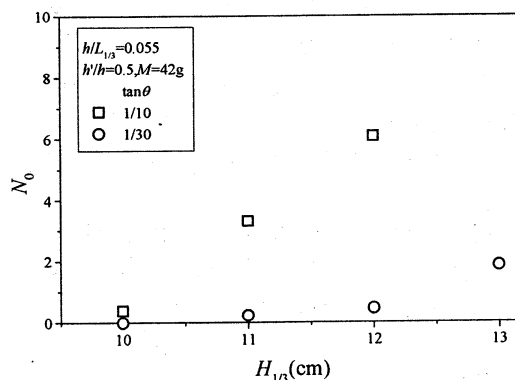
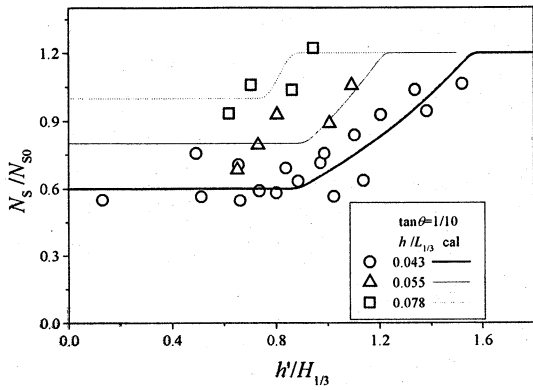
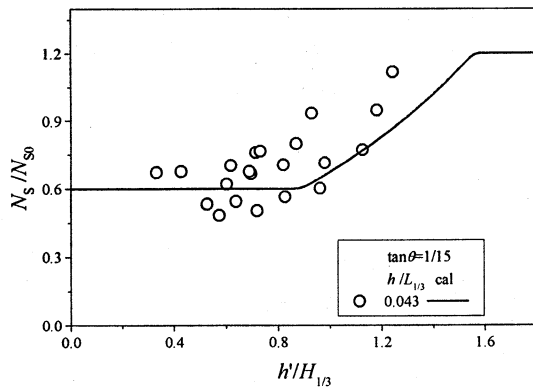


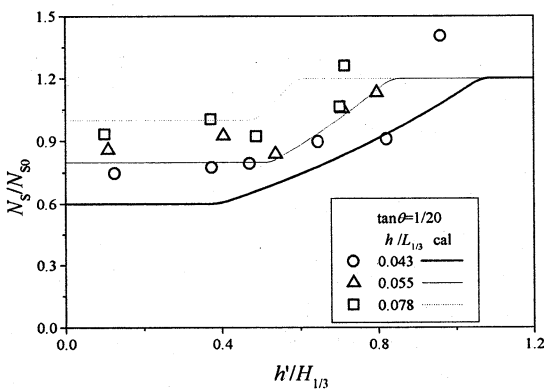
図-10 海底勾配の影響



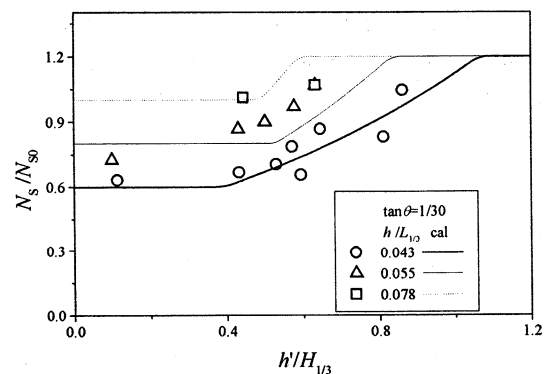
(a) 海底勾配1/10



(b) 海底勾配1/15



(c) 海底勾配1/20



(d) 海底勾配1/30

図-11 海底勾配ごとの安定数比

(3) 安定数の定式化

消波ブロック積み傾斜堤に用いるマウンド被覆ブロックの必要質量 M は、次に示すハドソン式から求められる。

$$M = \frac{\rho H_{1/3}^3}{N_s (S_r - 1)^3} \quad (1)$$

ここで、 ρ はコンクリートの密度、 $H_{1/3}$ は有義波高、 S_r はコンクリートの海水に対する比重である。基準安定数 N_{s0} はブロック固有の値であり、一般のブロックについては以下の関係式から算定できる。

$$N_{s0} = (K_D \cot \theta)^{1/3} \quad (2)$$

ここで、 θ はブロック法面と水平面がなす角度、 K_D はブロックのかみ合わせなどによる固有の定数である。

図-11は、波数 $N_w=500$ 、被災度 $N_0=0.3$ の条件に着目し、マウンド上水深と波高の比 $h'/H_{1/3}$ と安定数比 N_s/N_{s0} との関係を示したものである。谷本ら⁴⁾および藤池ら⁵⁾の式を準用し、マウンド上水深、周期および海底勾配の影響を考慮した安定数を以下のように定式化した。

$$N_s / N_{s0} = \max \left\{ \alpha, 0.4 \times \beta \times \exp \left[24 \times \frac{h'}{H_{1/3}} \times \frac{h}{L_{1/3}} \right] \right\} \quad (3)$$

$$\alpha = 0.68 \times \ln (h / L_{1/3}) + 2.75 \quad (0.043 < h / L_{1/3} < 0.078) \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1.0 & (\tan \theta < 0.05) \\ -24 \times \tan \theta + 2.2 & (0.05 < \tan \theta < 0.067) \\ 0.6 & (0.067 < \tan \theta) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 α は周期の影響、 β は海底勾配の影響を示す係数である。 α および β の値は各海底勾配での相関を考慮し決定した。

(4) 作用波数と被災度の関係

図-12は、 $T_{1/3}=2.97s$ 、 $h'/h=0.26$ 、質量42gの被覆ブロックでの作用波数と被災度の関係を示したものである。設計に通常用いられている $N_w=500$ において被災度 N_0 が0.3となる場合でも、3000波まで作用させると被害の伸びは鈍化するものの最終的な被災度は大きくなる傾向がある。

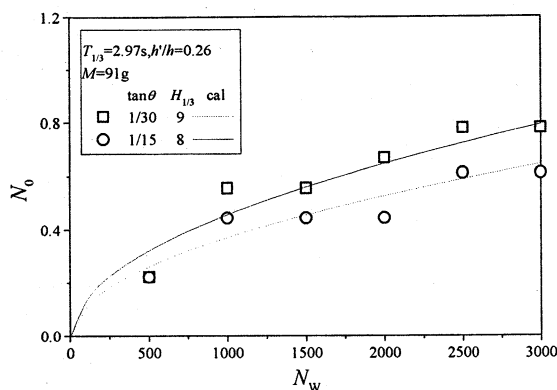


図-12 波数と被災度

ここで $N_w=500$, $N_0=0.3$ となる条件に対して，作用波数の増加による被災度の変化特性を予測するために，須藤ら⁶⁾の算定式を準用して，波数を考慮した安定数 N_s^* の関係を以下のように定式化した。

$$\frac{N_s^*}{N_s} = \left\{ 0.2 \times \exp \left(267 \times \beta \times \frac{N_0}{N_w^{0.5}} \right) \right\}^{0.2} \quad (6)$$

上式を用いることにより，現地構造物に対して供用期間中の被災度を評価することが可能となった。

4. まとめ

消波ブロック積み傾斜堤を対象としたマウンド被覆ブロックの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 マウンド被覆ブロックに作用する波力の時間変化を示し，ブロックを被災させる波力の発生メカニズムを明らかにした。
- ② マウンド被覆ブロックの安定性に及ぼすマウンド厚，周期，海底勾配の影響を明らかにした。さらに，これらをパラメーターとした安定数を定式化した。
- ③ マウンド被覆ブロックの安定性に及ぼす作用波数と被災度の関係を明らかにした。さらに，波数と被災度を考慮した安定数の定式化を行った。

新たに提案したマウンド被覆ブロックの安定数の算定法を用いることにより，種々の条件を考慮した必要質量の算定が可能となった。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，最適なマウンド高さを明らかにする必要がある。また，今回の検討は全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，斜め入射条件に対する安定性についても検討を行う必要がある。

本研究の実施に際しては，独立行政法人北海道開発土木研究所港湾研究室の窪内篤室長ならびに山本泰司副室長から，現地における施工事例に関する資料の提供を受けた。また実験で使用したブロック模型は，株式会社テトラ総合技術研究所よりご提供いただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷野賢二，桑原伸司：海域構造物に付加された人工藻場の評価と予測，海洋開発論文集，第19巻，pp. 19-24，2003。
- 2) 佐藤岳志，木村克俊：消波ブロック堤の水理特性に及ぼすマウンド厚の影響について，土木学会北海道支部年次技術研究発表会論文集，第60巻，pp. 434-435，2004。
- 3) 木村克俊，清水雄平，田谷年樹，山本泰司，土井善和，半沢稔：消波ブロック積み幅広潜堤の変形および伝達波特性に関する検討，海岸工学論文集，第49巻，pp. 816-820，2002。
- 4) 谷本勝利，柳生忠彦，村永 努，柴田鋼三，合田良実：不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，第21巻，第3号，pp. 3-42，1982。
- 5) 藤池貴史，木村克俊，林忠志，土井善和：消波ブロック被覆堤の前面マウンド被覆材の耐波安定性，海岸工学論文集，第46巻，pp. 881-885，1999。
- 6) 須藤賢哉，木村克俊，笹島隆彦，水野雄三，竹田英章：変形を許容した混成堤マウンド被覆材の必要重量算定法，海岸工学論文集，第42巻，pp. 896-900，1995。