波形勾配および砕波の影響を考慮した消波ブロック安定数算定式の提案

ARMOR BLOCK STABILITY FORMULAE CONSIDERING EFFECTS OF WAVE STEEPNESS AND WAVE BREAKING

安田誠宏[1]・間瀬　肇[2]・高橋真弘[3]・松下紘資[4]・徳永誠之[4]
Tomohiro YASUDA, Hajime MASE, Masahiro TAKAHASHI,
Hiroshi MATSUSHITA and Seishi TOKUNAGA

[1]正会員　博(工)　京都大学助教　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
[2]正会員　工博　京都大学教授　防災研究所（〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄）
[3]修(工)　関西電力株式会社（〒530-8270 大阪市北区中之島3-6-16）
[4]日建工学株式会社　総合技術研究所　西日本支所（〒564-0051 大阪府吹田市豊津町1-31 由武ビル3F）

This study investigates stability of wave dissipating blocks by carrying out a set of hydraulic experiments especially for examining the effects of wave steepness and wave breaking. It was found that offshore wave steepness influences the stability of blocks when wave breaking occurs but doesn't affect in cases without wave breaking. By arranging all the experimental data, new formulae of estimating stability numbers, including parameters of wave steepness, breaker type and sea bottom slope, were proposed.

Key Words : *wave dissipating block, stability number, required block weight, offshore wave steepness, breaker type*

1．緒　論

これからの海岸構造物の設計に際しては，地球温暖化に伴って生じる異常波浪に対する防波堤本体，および，被覆ブロック，消波ブロック，根固ブロックの被災メカニズムの解明や，適応策としての耐波設計法の確立が重要である．特に，近年の沿岸災害では，消波ブロックの重量不足による飛散・沈下が，背後地への越波やケーソン式防波堤の滑動を助長した被災ケースが多くみられ，消波ブロック安定性の正しい評価が重要である．また，近年の防波堤の大水深化や設計波の見直しに伴った高波高化により，一般的に用いられる放射型の既存ブロックでは非常に大きな所要重量が必要となってくる．ブロック所要重量が大きくなればなるほど経済的ではなくなるので，所要重量はできる限り小さい方が良い．したがって，消波ブロックにおける耐波安定性をより正確に評価することが重要といえる．

本研究では，著者ら[1]の実験で用いられた異形ブロック（かみ合わせの強化を目指した放射形状の消波ブロック）について，さらに水理模型実験を行い，耐波安定性の検討と安定数の算定を行う．

通常の設計波浪の沖波波形勾配は0.02～0.04程度であり，この範囲では安定数には波形勾配の影響はあまりないとされているが，消波ブロックの安定数算定式を提案するにあたり，沖波波形勾配および砕波の効果が本当に皆無であるかを，本実験結果および以前の実験結果をもとに考察する．さらに，その影響を考慮した形での消波ブロックの安定数算定式を提案する．

2．従来の消波ブロック安定数算定式

高橋ら[2]は直立壁が全断面にわたって乱積みの消波ブロックで覆われている消波ブロック被覆堤に関して，次式を提案した．

$$N_S = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = C_H \left\{ a(N_{od} / N^{0.5})^c + b \right\} \quad (1)$$

ここで，C_H は砕波状態を表す係数で，非砕波の場合 $C_H = 1.0$，砕波の場合 $C_H = 1.4(H_{1/20}/H_{1/3})$ である．a，b はブロックの形状や斜面勾配によって決まる係数であるが，$K_D = 8.3$ の異形ブロックで $\cot\alpha = 4/3$ に対しては，$a = 2.32$，$b = 1.33$ が求められている．c はブロックや斜面勾配によらず0.2で一定としている．

高橋らは，van der Meer[3] と同様に，水深が浅い場合には波群中の波高の大きな波が砕波するため，設計波高に有義波高を用いるとやや過大な重量を算定することになると考え，その効果をC_Hで与えている．

これは，同じ有義波高を持つ場合であっても，砕波すると高波高の波がなくなるので，砕波していない場合に比べてブロックの重量は軽くできるとするものである．図-1はこの状況を示したものであるが，砕波していない波浪条件の場合と，砕波が生じている波浪条件では，高波高領域の分布形が図-1のように異なり，砕波が生じている場合には，波高分布の裾が大きな波高の方へ広がっておらず大きな波高がないので，砕波していない条件に比べて安定数が大きくなる（安定が良くなる）と考えるものである．

しかし，波高だけの観点からみると，高波高の出現が無いのでブロックは安定といえるが，同じ波高であっても砕波直後の波は非砕波の波より激しい流体運動をしており，その結果，流体力は大きいと考えられる．Shore Protection Manual[4] には，捨石のK_D値に対して，砕波条件ではその値を 1.2，および非砕波条件では 2.4 と定めている．これは，同じ波高でも砕波している方が安定性に欠けるということを意味している．ただし，これは実験で確かめられたものではない．

港湾の施設の技術上の基準・同解説[5] の「被覆石及びブロック」説明箇所には，『海底勾配が急で巻き波状の砕波となる場合には，ブロックの形状によっては強い波力が作用することを考慮すること』，『マウンド被覆材上の水深が浅い場合には，砕波によってブロックが不安定になることが多い』と記されている．例えば，図-1で示した$H_{1/3}$の値を持つ波を考えた場合，同じ$H_{1/3}$の値でも砕波している$H_{1/3}$の波高の波の方が，砕波せずに$H_{1/3}$の値を持つ波より，ブロックに作用する波力が大きいと考えられる．

高橋らは実験データを検証した結果，波形勾配の値が 0.02～0.04 の範囲では，波形勾配の値が安定数に及ぼす影響を無視できるとして，波形勾配や surf similarity parameter を安定数算定式に入れていない．ただし，実験結果のばらつきは大きいことに注意を要する．

一方，著者ら[1] は砕波および波形勾配が安定数に及ぼす影響を検証するため，水理模型実験を行い，波形勾配が約 0.02 と 0.04 の値を持つ不規則波における消波ブロック安定実験を行った．その結果，沖波波形勾配を 0.04 以上と 0.02 以下に分けて安定数を比較した結果，波形勾配の影響があることが確かめられ，波形勾配が小さい方が，安定数も小さくなることが明らかになった．この波形勾配の影響は，沖波波形勾配によって砕波形態が異なるため，砕波の影響と密接に関連していると推測した．

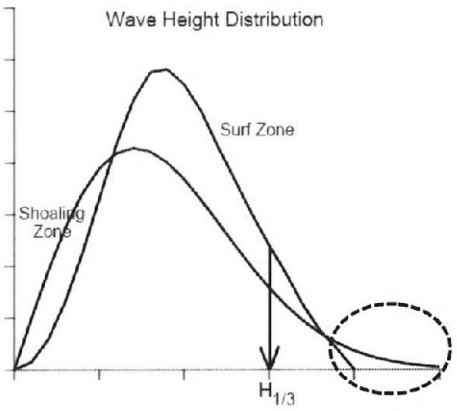

図-1　非砕波領域および砕波帯における波高分布の模式図

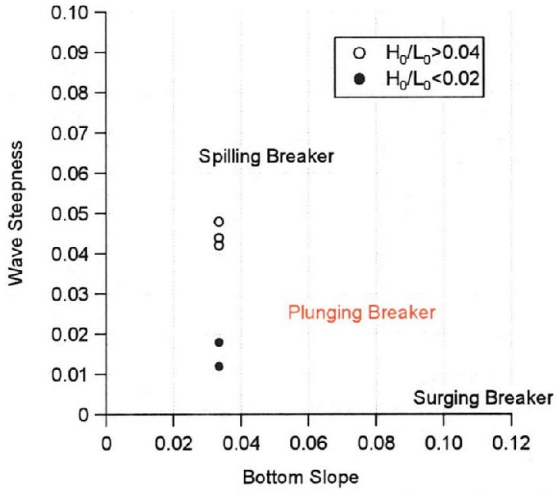

図-2　砕波形態分類表[6]および著者ら[1]の実験条件

このことを検証するため，実験条件を図-2のように，速水[6] の砕波形態区分に照らし合わせたところ，沖波波形勾配が大きい条件は，崩れ波砕波 (Spilling Breaker) の領域であったが，沖波波形勾配が小さい条件では，巻き波砕波 (Plunging Breaker) の領域であった．著者ら[1] は，ブロックの安定性には砕波の有無よりも，砕波形態が重要と考えられ，それを決める要素として波形勾配の影響があると推察した．

以上の点を鑑み，本研究では，消波ブロック耐波安定性における沖波波形勾配のみの影響を検証するため，砕波が生じない条件の数種類の沖波波形勾配の不規則波を用いて水理模型実験を行い，一連の実験結果を比較することで，安定数にもたらす砕波および沖波波形勾配の影響を検討する．そして，波形勾配および砕波の影響を考慮した新しい安定数算定式を提案する．

3．実験方法および実験条件

実験水路は長さ 50m，幅 1.0m，深さ 1.5m であり，

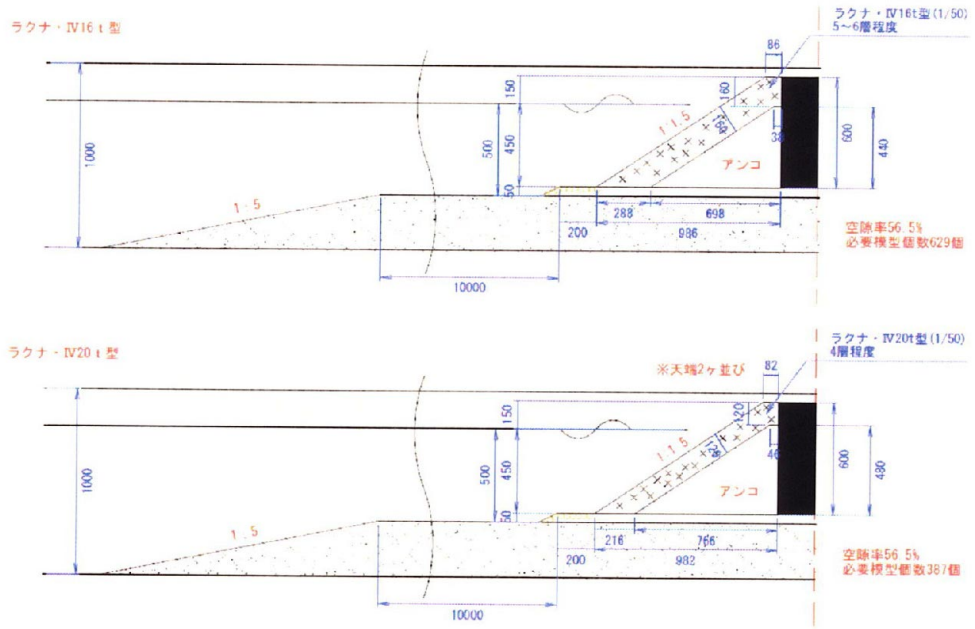

図-3　実験模型断面図

表-1　本実験における波浪緒元

CaseID	波形勾配	沖波波高(m)	沖波周期(s)	堤前波高(m)	反射率
	H_0/L_0	$(H_{1/3})_0$	$(T_{1/3})_0$	$H_{1/3}$	K_r
CaseH10HL4	0.039	0.1029	1.3	0.0869	0.23
CaseH10HL2	0.016	0.1011	2.0	0.0896	0.51
CaseH15HL4	0.035	0.1562	1.7	0.1314	0.30
CaseH15HL3	0.021	0.1306	2.0	0.1260	0.50
CaseH15HL2	0.011	0.1388	2.9	0.1309	0.44
CaseH20HL4	0.037	0.2283	2.0	0.1763	0.55

写真-1　対象とした放射形状の消波ブロック模型

一端には反射波吸収型不規則造波装置が設置されている．模型縮尺は 1/50，法面勾配は 1:1.5 とし，海底勾配をブロック前面で一様として，実験断面は砕波が生じないよう，**図-3**のように堤前で一様水深とした．マウンドの法先水深は 50cm，ブロック被覆の法先水深は 45cm とした．実験模型には放射形状の消波ブロックを用いた．その形状は，**写真-1**に示すように，表面にくぼみを有し，噛みあわせを良くすることを目的としたものである．プロトタイプの重量は 20t と 16t の2種類である．

本実験で用いた作用波浪は，**表-1**に示す，沖波波形勾配が 0.010~0.039 となる6種類の不規則波である．スペクトル形は，Bretschneider-光易型スペクトルを有する．被災度 N_{od} を求めるにあたって，波数 N が2000波になるまで実験を行い，500波，1000波および2000波造波後にブロックの移動個数を調べた．

4．ブロック安定性実験結果

一連の実験結果を**図-4**に示す．縦軸は安定数 N_S，横軸は被災度 N_{od} を波数 N の0.5乗で除したものとした．被災度 N_{od} はブロックの代表径幅の断面内におけるブロックの移動個数として定義される．すなわち，被災度は（検査域内の移動個数）÷（検査域内のブロック列数）として求めた．なお，移動個数を数える際に，ブロックの大きさの 1/2 以上動いたものおよび 45° 以上回転したものを被災ブロックと判定した．安定性は，安定数 $N_S = H_{1/3}/\{(S_r-1)D_n\}$ を $N_S = a\,(N_{od}/N^{0.5})^c + b$ のべき乗関数の形で評価した．

波高が小さい条件では，造波開始直後に噛み合わせのよくないブロックがはずれるが，500波ぐらいまでの間に安定し，その後は波数が増えてもほとんど移動しなくなる．一方，波高が大きい条件だと，

大きな波が来るたびにブロックが飛散され，法先に滑落することで，法面勾配が緩くなる．さらに，ブロックの天端が沈下し，越波を助長していた．

図-4より，著者ら[1]による1:30の海底勾配での実験結果では波は砕波しており，波形勾配の違いにより傾向の異なる結果が得られたが，今回の一様水深地形における非砕波状態では，波形勾配による影響はみられなかった．この相違は，単に波形勾配だけの影響ではなく，砕波形態が重要であることを示しており，著者ら[1]の推察が正しいことがわかった．

安定数算定式を導くにあたり，a, b, cの値のうち，cは0.2として一般的な値を採用し，aおよびbについて最小二乗法を用いて，非砕波，巻き波砕波および崩れ波砕波の条件に対する値を決定した．同様に，指数関数型の安定数算定式も提案しており，**図-4**と同じ形式で**図-5**に示す．

これらの近似式による算定値と実験値との比較を行った．安定数の算定値を横軸に，実験値を縦軸にとって，**図-6**および**図-7**に示した．べき乗関数型近似式を用いた場合が**図-6**，指数関数型近似式を用いた場合が**図-7**である．

図-6および**図-7**について，算定値と実験値との相関係数を求めたところ，べき乗関数型近似式を用いた**図-6**では0.90，指数関数型近似式を用いた**図-7**では0.95となり，今回の実験条件については指数関数型近似式の方が，整合性がより高いことがわかった．しかし，べき乗関数型近似式についても非常に大きな相関係数が得られ，整合性は十分に高い．したがって，両者の算定式とも今回の実験結果においては実現象に対する適合度の高い安定数算定式である．ただし，非常に小さい$N_{od}/N_{0.5}$を対象とするのか，全体の変化を注目するかによっての使い分けが重要になると考えられる．

また，これらの式を最終的な安定式として提案すると，べき乗関数型，指数関数型いずれの場合においても，砕波が生じているかどうか，そして砕波が生じている場合には砕波形態がいずれに分類されるかということを判定したうえで，場合分けをして3種類の安定数算定式を選択する必要があり，合理的とはいえない．そこで砕波が生じない条件については安定数算定式が独立して存在するとし，砕波が生じる場合については，砕波の影響を安定数算定式に組み込む事を試みた．砕波の影響を考慮するにあたっては，砕波形態の分類が海底勾配および沖波波形勾配によって概ね決定されることから，砕波条件での安定数算定式には，海底勾配および沖波波形勾配を変数として導入することで安定数算定式を拡張できると考える．

5．砕波形態を考慮した安定数算定式の提案

消波ブロック安定数における砕波形態の影響を考

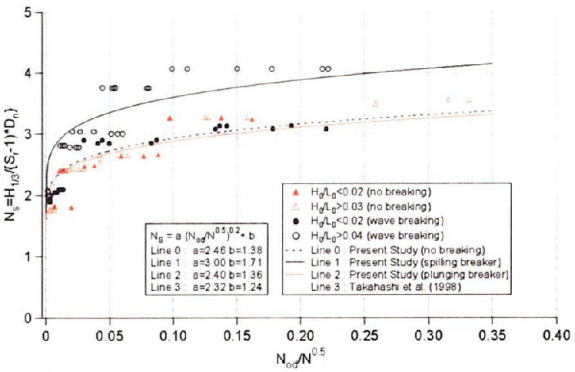

図-4　実験結果およびべき乗関数による近似曲線

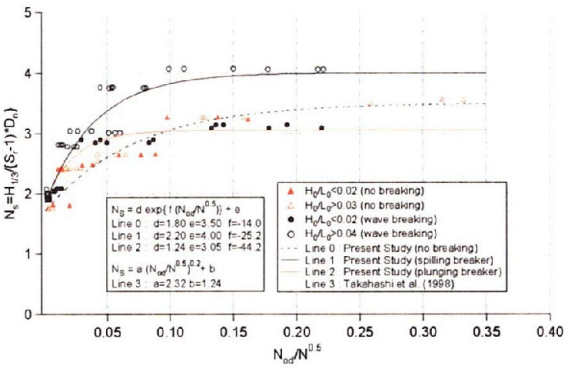

図-5　実験結果および指数関数による近似曲線

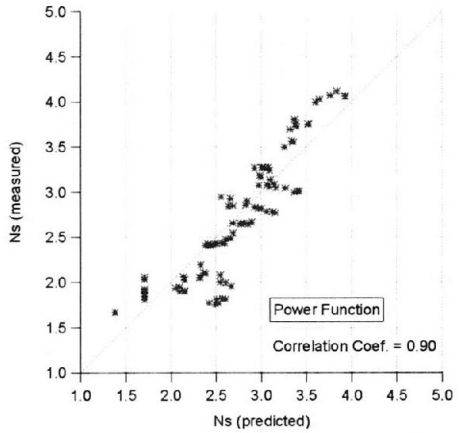

図-6　べき乗関数を用いた算定結果の整合性

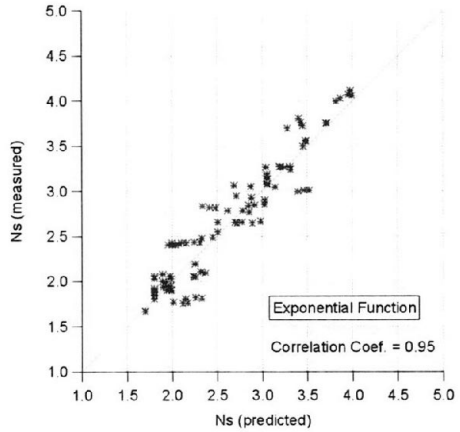

図-7　指数関数を用いた算定結果の整合性

慮するにあたり，波形勾配と海底勾配を考慮する形へ安定数算定式の拡張を試みた．

まず，海底勾配と波形勾配による砕波形態の関係を利用する．速水[6]の砕波形態分類図を参考にし，その図中に著者ら[1]の実験条件をプロットしたものが**図-2**であるが，その中で崩れ波砕波および巻き波砕波に分類されている実験をそれぞれ平均し，崩れ波砕波実験条件の波形勾配の代表値および巻き波砕波実験条件における代表値とする．

次に，砕波形態によって安定数が突然変わるのではなく，波形勾配によって線形的にその値が変化すると仮定する．すなわち，**図-2**の●印の点と○印の点で得られた安定数は線形的に変化するとする．さらに今回の実験結果から，砕波形態が安定数算定式の係数に大きく影響しているという考えを発展させ，他の海底勾配に対しても砕波形態が同じである直線を考え，その直線上では今回の海底勾配である1/30の結果と同じ安定数であると仮定する．

以上より，崩れ波砕波の代表波形勾配と巻き波砕波の代表波形勾配，および，崩れ波砕波と巻き波砕波の境界を表す分類線の位置関係に注目し，安定数算定式を以下のように拡張する．

図-8は，横軸に海底勾配，縦軸に沖波波形勾配をとり，崩れ波砕波および巻き波砕波形態を分ける線をBorder Lineとし，著者ら[1]の実験による沖波波形勾配の代表値（平均値）2点を図中の●印とし，Border Line上の海底勾配1/30の時の沖波波形勾配の値に関する比を，図中の#1:#2:#3と定める．その比が任意の海底勾配の値についても一定に保たれるように引いた直線がそれぞれ図中のLine SおよびLine Pであり，それぞれ以下の式(2)および式(3)で示される．

$$H_0/L_0 = 0.8\tan\beta + 0.0161 \tag{2}$$

$$H_0/L_0 = 0.27\tan\beta + 0.0056 \tag{3}$$

ここで H_0/L_0 は沖波波形勾配，$\tan\beta$ は海底勾配を表す．Line SおよびLine P上では，消波ブロックの安定数が同じであるとする．すなわちLine S上では安定数算定式が**図-4**および**図-5**に示したLine 1であるとし，Line P上では**図-4**および**図-5**に示したLine 2で表されると考えた．そして，Line SとLine Pの間の領域では，縦方向（波形勾配）に対して安定数が線形に変化すると仮定した．

Line SとLine Pの間の領域の安定数が等しい直線は，安定数算定式の係数 a, b, d, e, f を用いて次式のように表せる．

$$H_0/L_0 = (k_z z + l_z)\tan\beta + (m_z z + n_z) \tag{4}$$

ここで，z は a, b, d, e, f を代表させた変数として使った．なお，係数 c は0.2の固定値とした．式(4)を変形すると，

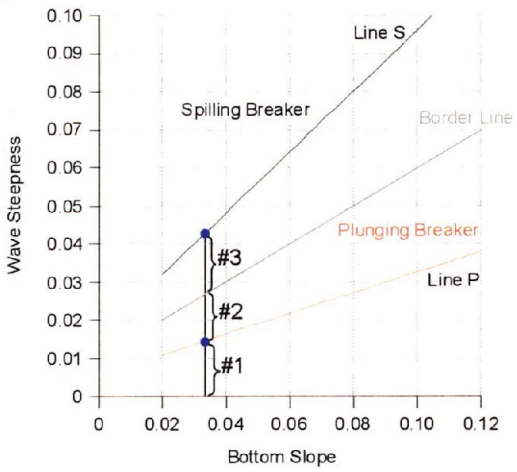

図-8 海底勾配，波形勾配および砕波形態の関係

$$z = \frac{H_0/L_0 - l_z\tan\beta - n_z}{k_z\tan\beta - m_z} \tag{5}$$

となるが，Line SおよびLine P上の安定数算定式の係数 a, b, d, e, f の値は既知であるので，それらの値を式(5)の z に代入し，式(2)および式(3)の傾きおよび切片の値と比較することで a, b, d, e, f それぞれに対応する k_z, l_z, m_z および n_z を求めることができる．

例えばべき乗関数型の安定数算定式中の係数 a については，**図-4**より，Line S上では a = 3.00，Line P上では a =2.40であるので，それらを式(4)に代入した時の傾きおよび切片の式と，式(2)および式(3)の傾きおよび切片の値を比較し，k_a, l_a, m_a および n_a は次の計算により求められる．

$$\begin{pmatrix} k_a & l_a \\ m_a & n_a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.27 \\ 0.0161 & 0.0056 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 3.00 & 2.40 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \tag{6}$$

この計算結果を式(5)に代入することで，次式が得られる．

$$a = \frac{H_0/L_0 + 1.85\tan\beta + 0.0364}{0.883\tan\beta + 0.0175} \tag{7}$$

b, d, e および f についても同様の方法で次の関係式が得られる．

$$b = \frac{H_0/L_0 + 1.79\tan\beta + 0.0352}{1.51\tan\beta + 0.0300} \tag{8}$$

$$d = \frac{H_0/L_0 + 0.415\tan\beta + 0.00796}{-0.552\tan\beta - 0.0109} \tag{9}$$

$$e = \frac{H_0/L_0 + 1.43\tan\beta + 0.0281}{0.558\tan\beta + 0.0111} \tag{10}$$

$$f=\frac{H_0/L_0-1.50\tan\beta-0.0303}{0.0279\tan\beta+0.000553} \tag{11}$$

以上より，放射形状の消波ブロックを対象とした一連の実験結果から，砕波が生じない条件，砕波が生じる条件で，それぞれ独立した安定数算定式を提案できた．

砕波が生じる実験条件についてブロック被覆直前の水深波高比 h/H_0 を求めたところ，$1.5<h/H_0<2.5$ であった．これより深いところでは，非砕波条件の式を用いる．また非常に浅いところでは段波状になって砕波による衝撃力は作用しないと考えられるので，ここでも非砕波条件の式を使えると考えた．

以下では，本研究で提案する安定数算定式を整理することとする．

べき乗関数，非砕波条件：

$$N_S=\frac{H_{1/3}}{(S_r-1)D_n}=2.46(N_{od}/N^{0.5})^{0.2}+1.38 \tag{12}$$

べき乗関数，砕波条件 $1.5<h/H_0<2.5$：

$$N_S=\frac{H_{1/3}}{(S_r-1)D_n}=a(N_{od}/N^{0.5})^{0.2}+b \tag{13}$$

$$a=\frac{H_0/L_0+1.85\tan\beta+0.0364}{0.883\tan\beta+0.0175} \tag{14}$$

$$b=\frac{H_0/L_0+1.79\tan\beta+0.0352}{1.51\tan\beta+0.0300} \tag{15}$$

指数関数，非砕波条件：

$$N_S=\frac{H_{1/3}}{(S_r-1)D_n}=-1.80\exp\left\{-14.0(N_{od}/N^{0.5})\right\}+3.50 \tag{16}$$

指数関数，砕波条件 $1.5<h/H_0<2.5$：

$$N_S=\frac{H_{1/3}}{(S_r-1)D_n}=d\exp\left\{f(N_{od}/N^{0.5})\right\}+e \tag{17}$$

$$d=\frac{H_0/L_0+0.415\tan\beta+0.00796}{-0.552\tan\beta-0.0109} \tag{18}$$

$$e=\frac{H_0/L_0+1.43\tan\beta+0.0281}{0.558\tan\beta+0.0111} \tag{19}$$

$$f=\frac{H_0/L_0-1.50\tan\beta-0.0303}{0.0279\tan\beta+0.000553} \tag{20}$$

これらの算定式は，著者ら[1]の実験条件である海底勾配が 1/30 のときには，**図-4**および**図-5**の結果になる．しかし，他の海底勾配に対しては，仮定されたものであるため，海底勾配を変えた実験により，算定式の妥当性を調べる必要がある．

6．結　論

本研究では，水理模型実験により消波ブロックの耐波安定性を調べ，安定数算定式の提案を行った．以下に主要な結果をまとめ，結論とする．

1) 通常の設計波浪の沖波波形勾配 0.02～0.04 の範囲では，安定数には沖波波形勾配の影響はあまりないとされているが，砕波が生じない場合に影響がないことがわかった．
2) 砕波条件においては，沖波波形勾配の影響が表れるが，これは砕波形態に関連する沖波波形勾配の影響である．
3) 消波ブロックの安定数算定式を提案するにあたり，非砕波条件および砕波条件に分けて，また，従来型べき乗関数型および指数関数型の2種類の算定式を提案した．
4) 砕波条件での安定数算定式には，沖波波形勾配と海底勾配により定まる砕波形態の影響を取り込んだ．

一連の実験において，砕波条件での実験は，海底勾配が 1/30 の 1 種類のみであった．今後は海底勾配を変化させた水理模型実験をさらに行うことにより，今回提案した砕波形態と消波ブロック安定数との関係を検証する予定である．

謝　辞：本実験を実施するにあたり，京都大学防災研究所 沿岸災害研究分野の小西秀誉君をはじめとする学生諸君，関西大学都市環境工学部の加藤慎也君に多大なるご協力をいただいたことをここに付記して謝意を表します．また，安定数算定式の定式化に当たって貴重なご意見をいただいた京都大学防災研究所 森 信人准教授に深謝します．

参考文献

1) 安田誠宏・間瀬　肇・小西秀誉・松下紘資・徳永誠之：新しい消波ブロックの安定数算定実験および波形勾配と砕波の効果に関する一考察，海洋開発論文集，第 24 巻，pp.519-524，2008.
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－，港研報告，第 37 巻，第 1 号，pp.3-32，1998.
3) van der Meer, J.W.: Stability of breakwater armor layer design formulae, *Coastal Eng.*, Vol.11, pp.219-239, 1987.
4) Shore Protection Manual: Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, U.S., 1984.
5) 社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2007.
6) 速水頌一郎：砕波の機構(II)，第 2 回海岸工学講演会講演集，pp.13-15，1955.