

波形勾配・砕波の影響を考慮した消波ブロック安定数算定式の 提案および耐波安定性の確率評価

安田誠宏・間瀬 肇・高橋真弘*・松下紘資**・徳永誠之**

* 関西電力株式会社

** 日建工学株式会社

要 旨

本研究では、消波ブロックの耐波安定性に及ぼす波形勾配と砕波の影響を水理模型実験により調べ、それらの影響を考慮した形での安定数算定式を提案した。さらに、提案した安定数算定式から性能関数を規定し、信頼性解析による消波ブロックの耐波安定性評価法を提案した。消波ブロックの安定性に対して、砕波する条件においては、砕波形態に関連する沖波波形勾配の影響があるが、砕波が生じない場合には影響がないことがわかった。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安定数算定式を用い、信頼性解析により消波ブロックの年被災確率あるいは50年被災確率を算定した。許容被災度が大きいほど、ブロック代表径が大きいほど、年被災確率が減少することがわかった。

キーワード：消波ブロック安定数、波形勾配、砕波形態、信頼性解析、性能関数、被災確率

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、まず、安田ら(2008)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。通常的设计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。

次に、間瀬ら(2007)に習い、信頼性解析による消波ブロックの耐波安定性評価法を提案し、被災確率に及ぼす不確定外力や安定重量算定式の不確定性の影響を検討する。被災確率算定図からはブロックの代表径を決定することができる。性能関数(以下では被災率評価関数と称する)を規定するにあたっては、水理実験より定式化した、ある特定の消波ブロックに対して得られた安定数算定公式を用いる。

2. 従来の消波ブロック安定数算定式

高橋ら(1998)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。

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

ここで、 C_H は碎波状態を表す係数で、非碎波の場合 $C_H=1.0$ 、碎波の場合 $C_H=1.4(H_{1/20}/H_{1/3})$ 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、 $a=2.32$ 、 $b=1.33$ 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 (1987) 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碎波するため、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、碎波すると高波高の波がなくなるので、碎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。Fig.1 はこの状況を示したものであるが、碎波していない波浪条件の場合と、碎波が生じている波浪条件では、高波高領域の分布形が Fig.1 のように異なり、碎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、碎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碎波直後の波は非碎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 (1984) には、捨石の K_D 値に対して、碎波条件ではその値を 1.2、および非碎波条件では 2.4 と定めている。これは、同じ波高でも碎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 (2007) 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碎波となる場合には、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、碎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、Fig.1 で示した $H_{1/3}$ の値を持つ波を考えた場合、同じ $H_{1/3}$ の値でも碎波している $H_{1/3}$ の波高の波の方が、碎波せずに $H_{1/3}$ 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(1998) 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、安田ら(2008) は碎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碎波形態が異なるため、碎波の影響と密接に関連していると推測した。

このことを検証するため、実験条件を Fig.2 のように、速水(1955) の碎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、崩れ波碎波 (Spilling Breaker) の領域であったが、沖波波形勾配が小さい条件では、巻き波碎波 (Plunging Breaker) の領域であった。安田ら(2008) は、ブロックの安定性には碎波の有無よりも、碎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。

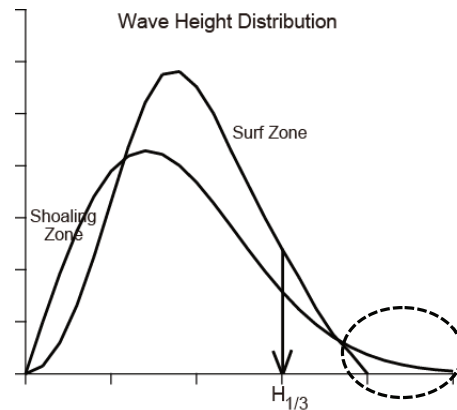


Fig. 1 Wave height distribution with and without wave breaking

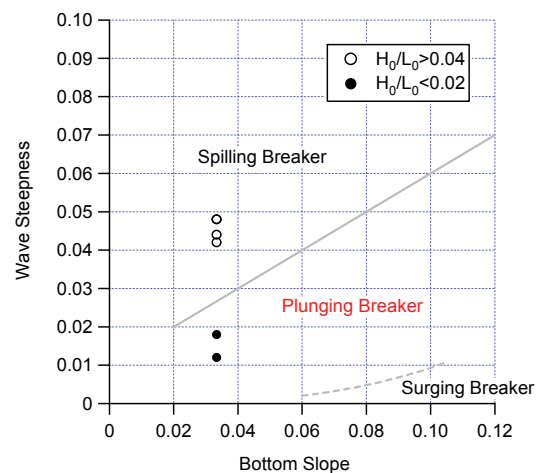


Fig. 2 Classification diagram for wave breaking pattern by Hayami(1955) and experimental condition of Yasuda et al.(2008)

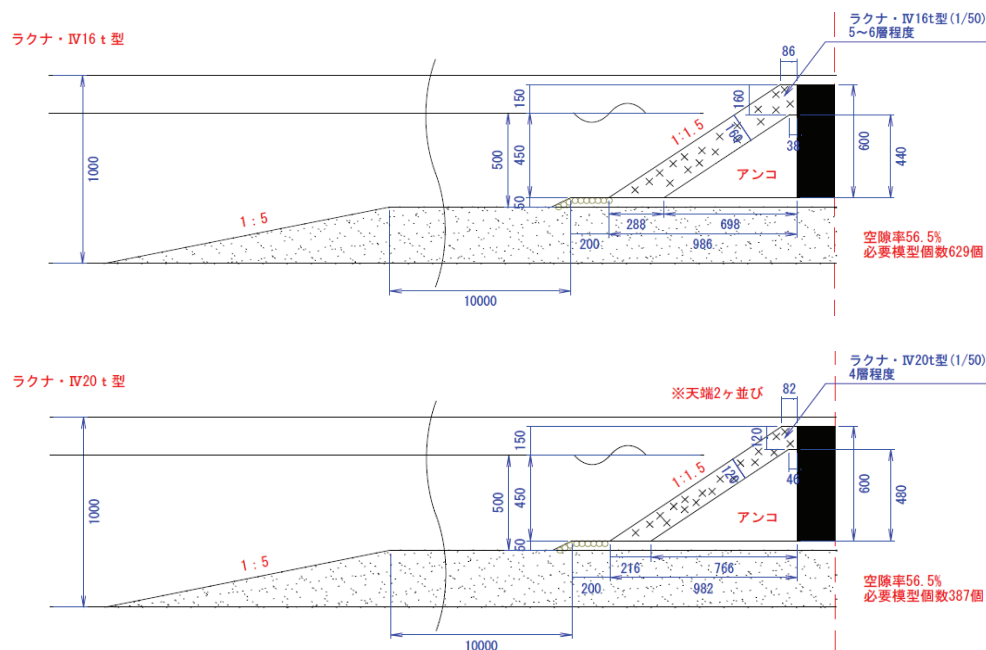


Fig. 3 Cross section of model experiment

Table 1 Experimental condition

CaseID	Wave Steepness	Offshore Wave Height (m)	Wave Period (s)	Sig. Wave Height (m)	Wave Reflection Ratio
	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

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、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、Fig.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



Photo 1 Wave absorbing block model

ブロックを用いた。その形状は、Photo 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、Table 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Fig.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。

Fig.4より、安田ら(2008)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、安田ら(2008)の推察が正しいことが確認された。

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、Fig.4と同じ形式でFig.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、Fig.6およびFig.7に示した。べき乗関数型近似式を用いた場合がFig.6、指数関数型近似式を用いた場合がFig.7である。

Fig.6およびFig.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Fig.6では0.90、指数関数型近似式を用いたFig.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つての使い分けが重要に

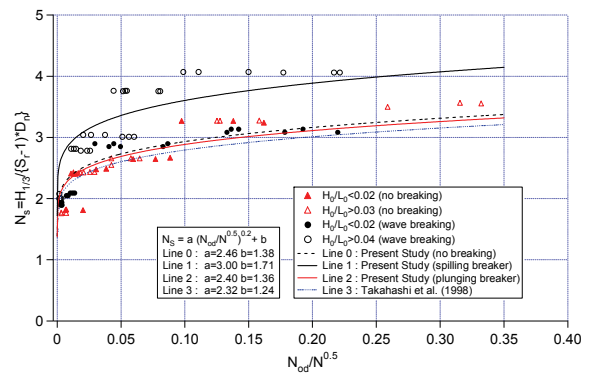


Fig.4 Experimental results and fitted curve by power function

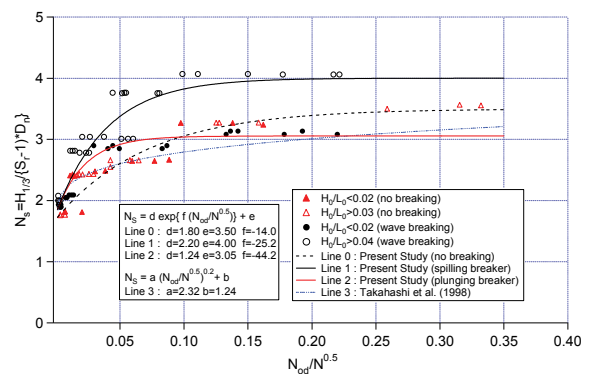


Fig.5 Experimental results and fitted curve by exponential function

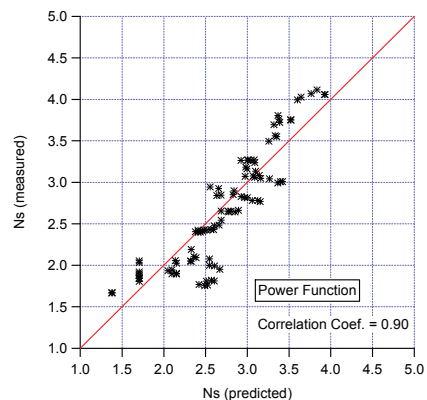


Fig.6 Consistency of predicted results by power function

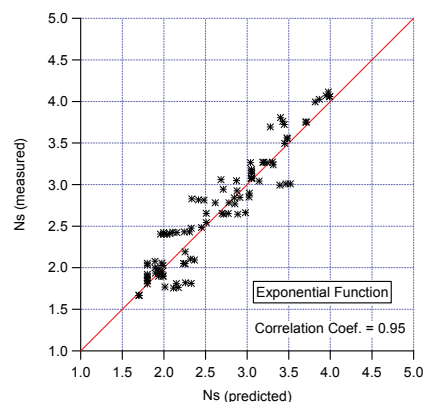


Fig.7 Consistency of predicted results by exponential function

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る、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(1955)の砕波形態分類図を参考にし、その図中に安田ら(2008)の実験条件をプロットしたものが Fig.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、Fig.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。

Fig.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、安田ら(2008)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

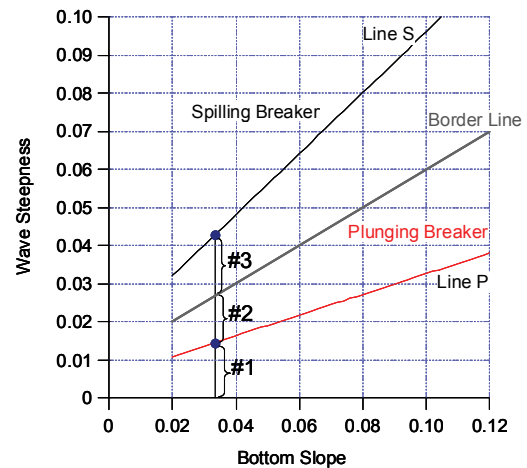


Fig.8 Relationship between sea-bottom slope, wave steepness and wave breaker type

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(3)で示される。

$$H_0 / L_0 = 0.8 \tan \beta + 0.0161 \quad (2)$$

$$H_0 / L_0 = 0.27 \tan \beta + 0.0056 \quad (3)$$

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Fig.4およびFig.5に示したLine 1であるとし、Line P上ではFig.4およびFig.5に示したLine 2で表されたと考えた。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。

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

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、

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

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、Fig.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。

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

この計算結果を式(5)に代入することで、次式が得られる。

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

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。

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

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

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

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

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：

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

べき乗関数，砕波条件 $1.5 < h/H_0 < 2.5$ ：

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

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

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

指数関数，非砕波条件：

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

指数関数，砕波条件 $1.5 < h/H_0 < 2.5$ ：

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

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

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

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

これらの算定式は、安田ら(2008)の実験条件である海底勾配が1/30のときには、Fig.4およびFig.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. 信頼性設計

信頼性設計では構造物の各破壊モードを抽出し、それぞれのモードに関する破壊確率を算出する。各破壊モードについての破壊確率の計算にあたっては、被災率評価関数によって、抵抗力と作用力の差、あるいは、比率として表す。信頼性設計には設計水準レベルⅢ、ⅡおよびⅠの3つのレベルの設計法がある。

レベルⅢは、破壊モードに対する破壊確率を正しく求めようとするもので、不確定要因の統計的特性やパラメータがすべて既知であるとした上で、モンテカルロ法によって生起確率を直接計算する。レベルⅡでは、被災率評価関数の平均値 μ と標準偏差 σ から求められる安全性指標 $\beta_s = \mu/\sigma$ を用いて信頼度を評価する。レベルⅠでは、被災率評価関数に含まれる種々の確率変数に対して、公称値に対する部分安全係数を定めて、破壊モードに対する信頼度を評価する。

設計水準レベル α における、破壊モードの生起確率を算定するための方法の1つとして1次ガウス近似法がある。不確定要因のうち、正規確率分布以外のものに対しては、破壊点において確率密度と累積確率値が等しくなる正規確率密度関数で近似する。互いに相関をもつ確率変数については、共分散マトリクスを考え、固有値問題を解くことによって各共分散値が0になる確率変数に変換しておく。

破壊モード i の被災率評価関数を $Z_i = g_i(x_1, \dots, x_n)$ 、破壊点を $x^* = (x_1^*, \dots, x_n^*)$ とする。ここで、 x_j は外力要素である。 x^* は、以下の連立方程式を解くことで

得られる。

$$g_i(x_1^*, x_2^*, x_3^*, \dots, x_n^*) = 0 \quad (21)$$

$$x_j^* = \mu_{X_j} - \alpha_j \left(\frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \right) \sigma_{X_j} : j = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

$$\alpha_j = \frac{\left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) \sigma_{X_j}}{\left\{ \sum_{j=1}^n \left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right)^2 \sigma_{X_j}^2 \right\}^{1/2}} : j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

ここで、 μ_{Zi} , σ_{Zi} , μ_{Xi} , σ_{Xi} はそれぞれ性能関数 Z_i の平均値と分散、および外力確率変数 X_j の平均値と分散である。破壊確率 P_f は次式で求められる。

$$P_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \int_{-\infty}^0 e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-\mu_z}{\sigma_z}\right)^2} dz = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\mu_z}{\sigma_z}} e^{-\frac{1}{2}y^2} dy$$

$$= \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = 1 - \Phi(\beta) \quad (24)$$

F は平均値0、標準偏差1の標準正規分布である。

式(23)は以下のように変形される。

$$\sum_{j=1}^n \left\{ \frac{\left(\frac{\partial g_i}{\partial x_j} \Big|_{x^*} \right) \sigma_{X_j}}{\sigma_Z} \right\}^2 = \sum_{j=1}^n \alpha_j^2 = 1 \quad (25)$$

これは、 α_j^2 が σ_{Zi} に対する外力確率変数 X_j の分散 σ_{Xj} への寄与率を表している。

7. 耐波安定性の信頼性解析

7.1 性能関数と外力変数

ここでは、安定数算定式として、主として指数関数を用いた結果を載せるが、べき乗関数を用いた結果との相違も適宜述べる。

被災率評価関数は、許容被災度と代表径 D_n のブロックの被災度との差と定義した。指数関数を用いた場合は、式(17)より、以下のように表わされる。

$$Z = N_{od} - \frac{N^{0.5}}{f} \log \left\{ \frac{H_s}{Err(S_r - 1)D_n d} - \frac{e}{d} \right\} \quad (26)$$

ただし、上式には安定数算定式による算定値に真値

Table 2 Probability characteristics of uncertain factors

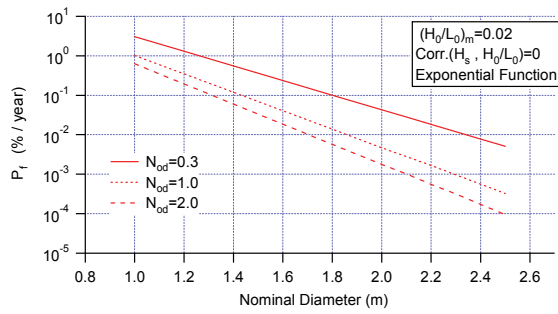
変 数	確率分布の種類	μ	σ	x_1, x_2
有義波高 ($H_{1/3}$)	Weibull 分布	1.2	0.7	$x_1 = 0.45$
	Gumbel 分布	7.45	1.0	
海底勾配 ($\tan \beta$)	Normal 分布	0.0333	ほぼ一定値とみなすため 0.0001	
沖波波形勾配 (H_0/L_0)	Normal 分布	0.02	0.00102	0.02 以下は 0.02 とみなす
		0.03	0.00153	
		0.04	0.00204	0.04 以上は 0.04 とみなす
波数 (N)	Beta 分布	800	100	$x_1 = 400$ $x_2 = 1600$
		1000	150	$x_1 = 400$ $x_2 = 3000$
算定式自体の不確実性 (E_π)	Beta 分布	1.0	0.1	$x_1 = 0.8$ $x_2 = 1.2$

との誤差があるとして、算定値に対する真値の比を Err として取り入れてある。実際の設計では、対象構造物固有の許容値を適切に設定することが必要である。本研究では、様々な状況での被災確率特性および不確定要因の影響を検討することが目的であるため、許容被災度として、高橋ら(1998)が推奨している0.3, Shore Protection Manual (1984)に記載されている2種類の基準値1.0および2.0の3種類を用いる。

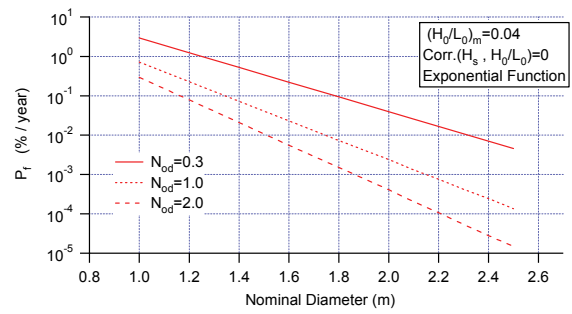
被災度に影響を及ぼす不確定要因としては、有義波高、沖波波形勾配、波数、海底勾配および安定数算定値そのものの不確実性の5種類を考慮した。Table 2 に、各不確定要因の確率分布、平均値、標準偏差、上限値、下限値を示す。ただし、海底勾配の誤差はわずかであるとした。ここでは、有義波高分布について、2ケースを想定した。1つは毎時間観測から得られる有義波高分布であり、Weibull分布を仮定した。もう1つは、設計波(例えば、50年再現確率波)の推定誤差分布である。間瀬ら(2000)は、資料年数、平均発生率、母集団の極値分布関数、再現期間を変化させた場合に、確率波高に関する真値と推定値の誤差分布特性がどの様になるかを検討し、推定波高と真値との誤差分布がかなり普遍的にGumbel分布で近似できることを示した。この結果を用いて、設計波高の誤差分布をGumbel分布とした。安定数算定式の算定誤差分布には、上限と下限を設定できるBeta分布を用いた。その他、入射有義波高と沖波波形勾配の間に相関がある場合も想定し、両者の相関係数を0.7とした条件についても解析を行った。また、解析には Reis (1998) のプログラムを利用した。

7.2 解析結果

ブロック代表径に対して年被災確率 P_f を算出し、Fig.9に示す。ただし、全ての変数が独立である場合の結果である。パラメータは、許容被災度が0.3, 1.0および2.0である。これらの図から、許容被災度 N_{od} が大きくなるほど、ブロック代表径が大きくなるほど P_f が減少すること、また同じ条件に対しては波形

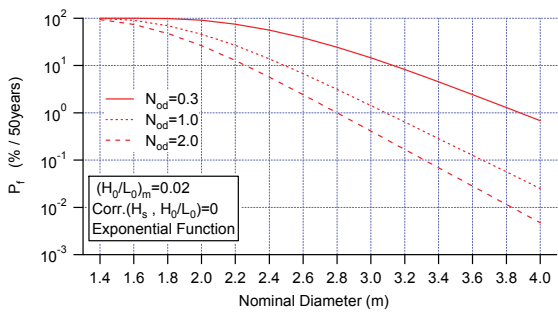


(a) $H_0/L_0=0.02$

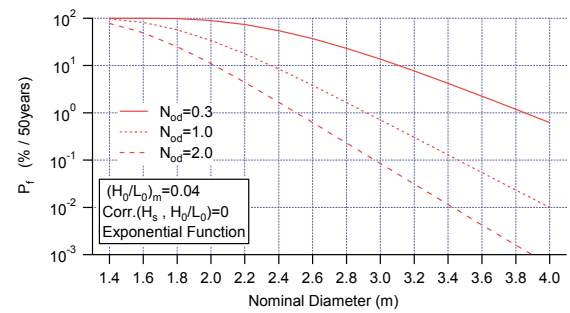


(b) $H_0/L_0=0.04$

Fig. 9 Damage probability per one year against block diameter



(a) $H_0/L_0=0.02$



(b) $H_0/L_0=0.04$

Fig. 10 Damage probability per 50 years against block diameter

勾配が大きいと P_f が小さくなることわかる。その他、沖波波形勾配と入射有義波高との相関を考慮した結果との差は非常に小さいこと、指数関数とべき乗関数を用いた時の差異は、特に N_{od} が小さい時に現れることがわかった。

Fig.10は、50年再現確率波高の推定誤差を考慮した時の50年被災確率の算定結果を示したものである。図の整理方法は、Fig.9のそれと同様である。沖波波形勾配が大きいほど、代表径が大きいほど、 P_f は小さくなる。また、許容被災度の値によって、指数関数型あるいはべき乗関数型安定数算定式を用いるかによって、被害率の値が異なる。Fig.11は、許容被災度が1.0の場合に異なる安定数算定式によって算定した被災率である。オーダー的にはあまり変わらないが、算定式によって差があるのがわかる。許容被災度を0.3とした場合では、どの沖波波形勾配についても指数関数型の算定式の方が、べき乗関数型の算定式に比べて被災確率を大きく算定した。これに対して、許容被災度を1.0とした場合については、どの沖波波形勾配についてもべき乗関数型の算定式の方が、指数関数型の算定式に比べて被災確率を大きく算定した。

7.3 不確定要因の影響度評価

被災確率に寄与する各不確定要因の影響度は、レ

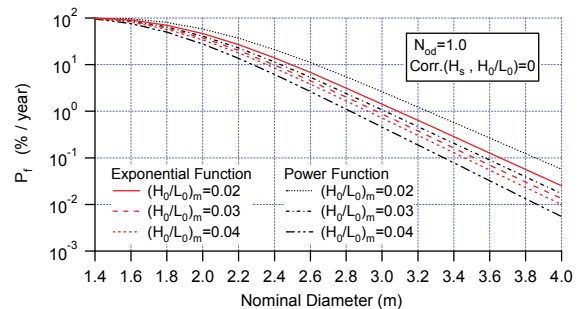


Fig. 11 Damage probability per 50 years by difference of stability number formula for allowance damage level of 1.0

ベルⅡ解析においては α^2 値で評価することができる。そこで、50年被災確率算出時に得られる各不確定要因の α^2 値を算出した。Fig.12より、50年被災確率に寄与する影響度は有義波高がいずれの場合においても高く、第2位に算定式自体の不確実性による影響が大きいという事がわかる。また図より、許容被災度が0.3の場合には、ブロック代表径が2.4mで算定式の誤差の影響が最も大きく、許容被災度が2.0と大きくなると、ブロック代表径が1.6mと小さい場合に算定誤差の影響が大きくなるといった変化がわかる。

提案した安定数算定公式を利用して、また、外力はおおよそ観測結果を参考にして決めた条件のもとで被災確率を算定し、その値および外力の影響度を

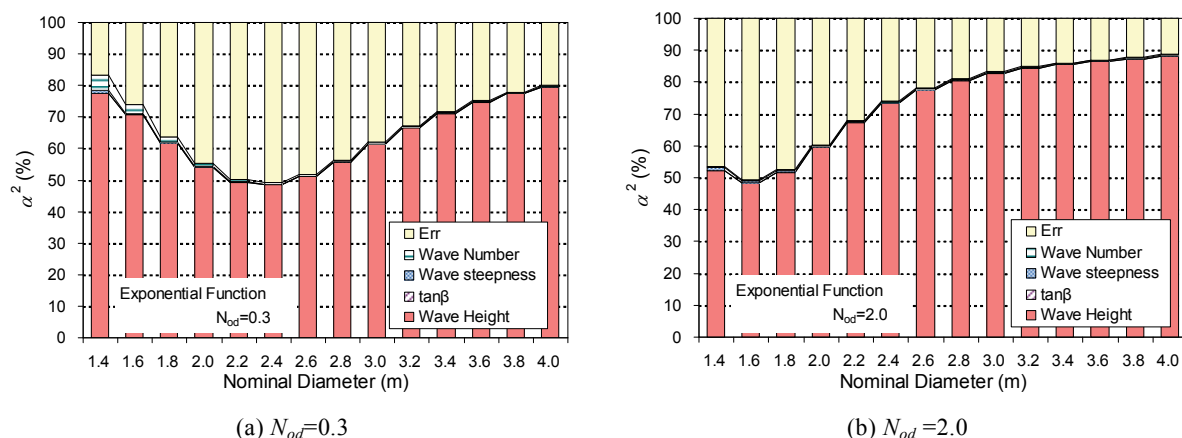


Fig. 12 Contribution rate of external forces to variance of damage probability function of 50 years

解析する手段を示した。このプロセスは新たな消波ブロックに対する算定式とその誤差を設定することにより、一般的に適用可能である。特に、外力要因の感度を分析することにより、どの要因の変動特性をきっちりと把握しなければならないかを明確にすることができる。

8. 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。また、信頼性解析による消波ブロックの耐波安定性評価法を提案した。本手法に基づけば、被災確率算定図からブロックの代表径を決定することができる。被災率評価関数は、許容被災度から所定のブロック代表径に対する被災度推定値を差し引いたものとして定義した。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) 砕波する条件においては、沖波波形勾配の影響が現れるが、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。
- 5) 年被災確率あるいは50年被災確率を算定する方法を示した。許容被災度が大きくなるほど、ブロック代表径が大きくなるほど年被災確率が減少す

ること、沖波波形勾配と入射有義波高との相関を考慮した結果との差は非常に小さいこと、指数関数とべき乗関数を用いた時の差異は許容被災度に依存して現れることがわかった。

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。

参考文献

- 社団法人日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設の技術上の基準・同解説。
- 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—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.
- 速水頌一郎 (1955) : 砕波の機構(II), 第2回海岸工学講演会講演集, pp.13-15.
- 間瀬 肇・北野利一・森岡智史 (2000) : 波浪極値統計解析における一般化パレート分布の適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.221-225.
- 間瀬 肇・高橋真弘・安田誠宏・Maria T. Reis・Terry S. Hedges (2007) : 信頼性解析による越波流量の許容値超過確率評価および護岸天端高の設定方法に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.891-895.
- 安田誠宏・間瀬 肇・小西秀誉・松下紘資・徳永誠之 (2008) : 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.
- Reis, M.T. (1998): Probabilistic assessment of the safety of coastal structures, PhD Thesis, Department of Civil

Engineering, University of Liverpool, UK, 603p.
Shore Protection Manual (1984): Coastal Engineering
Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, U.S.

van der Meer, J.W. (1987): Stability of breakwater armor
layer design formulae, Coastal Eng., Vol.11, pp.219-
239.

Armor Block Stability Formulae Considering Effects of Wave Steepness and Wave Breaking and Reliability Analysis of Failure Probability

Tomohiro YASUDA, Hajime MASE, Masahiro TAKAHASHI*, Hiroshi MATSUSHITA** and Seishi TOKUNAGA**

* The Kansai Electric Power Co., Inc., Japan

** Nikken Kougaku, Ltd., Japan

Synopsis

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, and the probability of failure due to armour layer instability was estimated using a reliability software package which employs the Level II First Order Reliability Method. 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. The proposed stability formulae were used in the reliability analysis of wave dissipating blocks. The sensitivity of the performance function to external random variables was examined in order to establish the relative importance of variables influencing the failure probabilities.

Keywords: wave dissipating block's stability number, offshore wave steepness, breaker type, reliability analysis, performance function, failure probability