

消波ブロックの安定性評価式に関する研究

半 沢 稔* ・ 佐 藤 弘 和** ・ 高 山 知 司***
高 橋 重 雄**** ・ 谷 本 勝 利*****

1. ま え が き

消波ブロックの所要重量の算定には従来よりハドソン式 (Hudson, 1959) が用いられてきている。ハドソン式中の K_b 値は被害率に対応して設定されているものの、被害率の定義が統一されていないことなどから、その値は研究例毎に大きくばらついており、設計上苦慮すること多い。また、ハドソン式には波の継続時間が考慮されていない等多数の問題点も指摘されているところである。

近年、ヨーロッパにおいてはファン・デル・メーア (1987, 1988) が捨石堤に対して断面変形を考慮した新しい安定性評価式を提案しており、消波ブロックに対してもテトラポッドを例にとり新たな安定性評価式を提案するなど新しい動きがみられている。しかし、ハドソン式やファン・デル・メーア式は本来、傾斜堤の2層被覆を前提として提案されたものであり、我が国で施工例の多い直立壁前面の全断面被覆消波ブロックに対してはその安定性の傾向が異なるため独自の安定性評価式が必要と考えられる。

鹿島ら (1993) は既にこうした動きに対応した実験的研究を行っており、新しい安定性評価式を提案している。鹿島らの提案式は信頼性の高い式であるが、ファン・デル・メーアの傾斜堤の被覆石に対する式を基本にしたものであるため、被害をゼロとした場合に消波ブロックの必要諸元が定義できない式形となっている。

我が国においては過去に消波ブロック被覆堤に関する多くの実験が行われており、多くの有用なデータが蓄積されている。本研究はこれらの実験データを有効活用することによって、①直立壁前面の全断面被覆を対象とした我が国独自の、②不規則波を前提とし、③被害率・波数をも考慮できる新しい消波ブロックの安定性評価式を得ることを目的としている。

2. 模型実験例

本研究においては表-1に示される模型実験例のデータを基にして検討を行った。

過去にはここで取り上げた以外にも非常に多くの模型実験が行われており、対象ブロックも様々である。ここでは使用実績の多いテトラポッドを扱った実験例をとりあげた。消波ブロックの安定性はブロックの形状に左右されることは言うまでもないが、消波ブロックの安定性評価にあたっての考え方の整理をするという点からテトラポッドを例として選定したものである。

ここでとりあげた実験例では、堤体構造は全断面消波ブロック被覆堤である。模型縮尺は1/40～1/80である。水深は25～50 cm (現地相当14～20 m)、海底勾配は1/15～1/100、使用したテトラポッド模型の重量は90～700 gf (現地相当32～80 tf) である。実験に使用した波浪は全て不規則波であり、設計波高は現地換算で6.5～12 m、周期は11～17 sec である。なお、実験は設計波前後の波浪でも行われており、波形勾配の範囲は0.013～0.040 である。よってこれら実験例は断面形状、波浪条件ともに特殊なものではなく、他の施工例と比較しても標準的なものと考えられる。

表-1 模型実験例

No.	対象港	水 深 (cm)	海底 勾配	周期 (sec)	波 高 (cm)	波形勾配	ブロック 重量 (gf)
1	一般 谷本ら (1979)	39.0 ～48.0	1/100	2.5	16.2 ～25.9	0.017 ～0.027	743.3
2	一般 谷本ら (1985)	39.7	1/50	2.46	12.0 ～23.0	0.013 ～0.024	296.0, 596.4
3	S 港	25.0 ～31.3	1/15	1.95	8.0 ～15.0	0.013 ～0.025	91.7, 128.6
4	Mu 港	29.3	1/50	1.95	11.4 ～17.1	0.019 ～0.029	171.7
5	K 港	24.3	1/50	1.91	12.9 ～18.6	0.023 ～0.033	235.0
6	A 港	37.5 ～42.0	1/100	1.74 ～2.37	13.0 ～20.0	0.015 ～0.040	449.2
7	Mi 港	27.2	1/50	1.94	16.8	0.029	297.4

* 正会員 工修 日本テトラポッド(株)
** 正会員 日本テトラポッド(株)
*** 正会員 工博 京都大学教授防災研究所
(前運輸省港湾技術研究所水工部長)
**** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所耐波研究室長
***** 正会員 工博 埼玉大学教授工学部建設工学科

3. 既往の評価式

(1) ハドソン式

ハドソン (1959) は傾斜堤 2 層被覆, 非越波を対象とした規則波による実験から次式で示される安定重量算定式を得た。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

ここに, W は消波ブロックの所要重量, H は波高, S_r は γ_r/γ_w (γ_r はブロックの単位体積重量, γ_w は水の単位体積重量), α は斜面勾配, K_D は安定係数である。ハドソン式は式形が単純であることなどから, 日本においても従来から, 混成堤式防波堤の堤幹部等の消波ブロックの安定重量算定の標準的な公式として用いられてきている。

ハドソン式中の K_D 値は被害率に対応して定義できる。図-1 は先の表-1 で示した谷本ら (1979, 1985) 他の混成堤の全断面被覆形式のテトラポッドに対する実験結果を, 横軸に被害率をとって K_D 値を示したものである。ここで, 波高は従来の設計法に準じて有義波高 $H_{1/3}$ を用いている。図-1 からわかるとおり, データはかなりばらついている。このデータのばらつきの原因としては安定実験自体のもつデータのばらつき以外にも, 被害率の算定に堤体の大きさの影響が入ること, 波当ての時間が考慮されていないことなどがあげられる。

(2) ファン・デル・メーア式

ファン・デル・メーア (1988) は傾斜堤 2 層被覆 (斜面勾配 1:1.5) のテトラポッドに対して以下の式を提案している。

$$\frac{H_{1/3}}{\Delta D_n} = (3.75 N_0^{0.5} / N^{0.25} + 0.85) S_z^{-0.2} \quad (2)$$

ここに, $H_{1/3}$ は有義波高, Δ は $S_r - 1$, D_n はブロックの代表長 (体積の 3 乗根), N_0 は D_n の幅の断面内におけるブロックの移動個数 (相対被災度), N は波数, S_z は波形勾配 ($2\pi H_{1/3}/g T_s^2$), T_s は平均周期である。

ファン・デル・メーア式の特徴の第 1 点は, 被害の程度を表す指標として N_0 を導入した点にある。ハドソン式の場合には被害率の算定における分母として全断面をとるか, 2 層分をとるか, また, 法長が大きい場合にどこまでを対象とするかでその被害率が異なってくる。一方ファン・デル・メーアの定義した N_0 ではその点のあいまさが解消されており, ブロックの被災の表現としては合理的と考えられる。特徴の第 2 点は, 波の継続時間が波数 N で考慮されている点にある。第 3 点は周期の効果が波形勾配として考慮されている点にある。式 (2) に従うと同一波高に対して波形勾配が大きい (短周期) ほどう不安定 (ブロックの必要な大きさが大きく) になる傾向となる。

図-2 は式 (2) の適合性を図-1 と同じデータについてみたものである。横軸は式 (2) の右辺, 縦軸は左辺を示している。

実験データについて計算値と実験値の関係をみると傾きが 0.76 の直線のまわりに分布していることがわかる。ファン・デル・メーア式が斜面勾配 1:1.5 に対するものであり実験データは 1:4/3 であるので, もし勾配の効果がハドソン式から導かれるように $\cot \alpha$ の 3 乗根で効くとした場合にはその傾きは 0.96 となるはずであり, 斜面勾配の違いからこの差を説明することはできない。むしろ, 堤体形状の違いが影響しているものと考えられる。よって, ファン・デル・メーア式をそのまま混成堤の全断面被覆形式の消波ブロックに適用するのは難しいものと判断される。

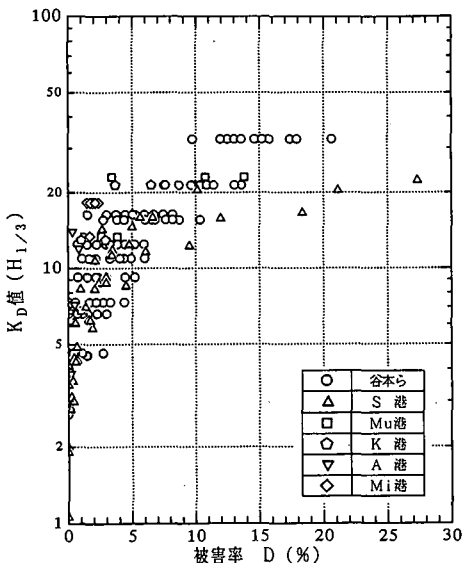


図-1 被害率と K_D 値の関係

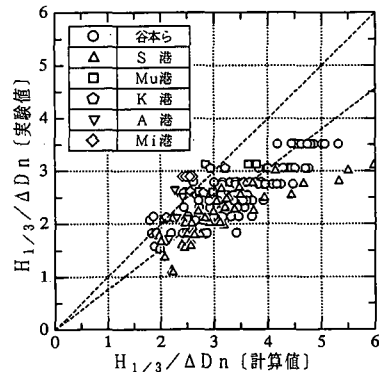


図-2 ファン・デル・メーア式の適合性

(3) 鹿島らの式

鹿島ら (1993) は沖合人工島護岸を想定した直立壁前面の全断面被覆消波工を対象として以下の式を提案し、実験データにより検証している。

$$\frac{H_{1/3}}{\Delta D_n} = 8.5(S/N^{0.5})^{0.16} \xi^{-0.5} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 S はファン・デル・メーアが捨石堤に対して導入した変形パラメータであり、 $S=A/D_n^2$ (A は侵食面積) で定義される。また、 ξ はサーフシミュラティティーパラメータ ($=\tan \alpha / (H_{1/3}/L_0)^{0.5}$, L_0 は沖波波長) である。鹿島らによれば表層2層分を対象として考えた場合の被害率 D (%) と S の関係は平均的には、

$$S = 0.6D \dots\dots\dots (4)$$

としている。

図-3 は鹿島らの式について先の実験データとの関係をみたものである。図中の実線は式 (3) を表している。なお、谷本ら他の実験データでは直接には S が求まらないため、式 (4) を前提として表層2層分に対する被害率から S を求めた。図-3 からは式 (3) が必ずしも高い適合性を示していないが、これは被害率から S を推定したためと考えられる。つまり、鹿島らの実験では現地想定設置水深が一22.5 m と深く、また、静水面上の天端高はブロックの安定限界波高相当の波高の2倍程度と高く、消波工断面としては表-1 で対象としたものよりも大きいため、結果的に被害率から S を推定する際に消波工の規模の影響等が入ったためと考えられる。

鹿島らの式では式 (3) からわかるとおり、被害がゼロ ($S=0$) に対して消波ブロックの諸元が求まらない式形となっている。これは、もともと鹿島らが目的としているのが安定重量を求めるということもさることながら、例えば設計条件を超えるような波浪が来襲した場合の消波工の変形量を推定することにあるためと考えられる。

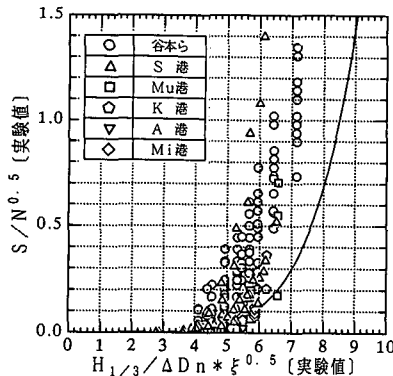


図-3 鹿島らの式との比較

4. 新しい安定性評価式の考え方

以上既往の消波ブロック安定性評価式について検討してきたが、それらを踏まえ、まがきでも触れたとおり直立壁前面に全断面で被覆した場合の消波ブロックの安定性評価式を考えるにあたり、以下の事項を考慮することにした。

(1) 式 形

安定性評価式の式形はファン・デル・メーアのそれにならない安定数 $N_s (=H_{1/3}/\Delta D_n)$ を求めるタイプとする。

(2) 被害程度のとりこみ

被害の大きさについてはファン・デル・メーアがテトラポッドに対して提案した被災度 N_0 で考慮することとする。典型的な全断面消波ブロック被覆混成堤を想定した場合の全断面に対する被害率 D (%) と N_0 との関係は、表-1 の実験例の範囲ではおよそ、

$$N_0 = 0.2 \sim 0.3D \dots\dots\dots (5)$$

である。

また、新しい評価式においては、被害を全く許さないという考え方を取った場合 (N_0 をゼロとした場合) にも消波ブロックの諸元が求められる形を考慮することとする。

(3) 波の作用時間

消波工の変形はファン・デル・メーアや鹿島らによれば、波当て直後に大きく、時間の経過とともに落ちつく傾向があるとされており、近似的には変形は波の継続時間の1/2乗に比例するとされている。従ってここでもそれにならない、安定性評価式の中へは $N_0/N^{0.5}$ で取り込むものとする。

(4) 波形勾配

ファン・デル・メーアは直接波形勾配として、また、鹿島らはサーフシミュラティティーパラメータを通してやはり波形勾配を考慮している。図-4 はそれぞれの式について波形勾配による N_0 の変化を例示したものである。計算条件としては、作用波数は $N=1000$ 、ファン・デル・メーア式での被災度は $N_0=0.2$ 、鹿島らの式では $S=1.2$ としている。また、図中にはハドソン式で K_0 値を8.3、斜面勾配を1:4/3とした場合の値も図示してある。ファン・デル・メーア式と鹿島らの式は波形勾配に対しては逆の傾向であり、特に波形勾配が小さい所での差が大きい。しかし、0.02~0.04 程度以上の範囲ではどちらも一定に近づく傾向であり、また、両者の差は小さい。そこで、本研究においては通常の設計波浪条件に多い波形勾配として0.02~0.04 程度の範囲を想定するものとし、波形勾配による影響は取り込まないものとする。この波形勾配の想定範囲は表-1 からわかるとおり既往の実験条件とも符合するものである。

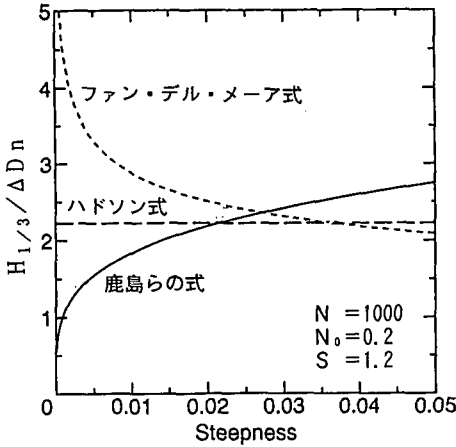
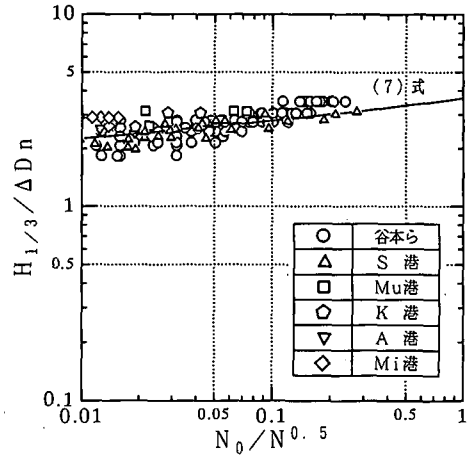


図-4 波形勾配の影響

図-5 $N_0/N^{0.5}$ と $H_{1/3}/\Delta D_n$ の関係

(5) 斜面勾配

消波工の斜面勾配の影響はハドソン式においては $\cot \alpha$ で考慮されており鹿島らの式ではサーフシミュラティパラメータの中で $\tan \alpha$ として考慮されていると考えることができる。一方、ファン・デル・メーア式は斜面勾配 1:1.5 に対して提案されている。本研究においては標準的な消波工断面を対象とするという観点から、テトラポッドに対する斜面勾配として採用例の多い 1:4/3 を対象として考えるものとした。他の斜面勾配については別途検討することとした。

(6) 碎波の影響

波高については従来から有義波高が用いられてきているが、Shore Protection Manual (1984) ではハドソン式の適用にあたって 1/10 最大波 ($H_{1/10}$) を用いることが示されており、ファン・デル・メーア (1991) は浅海域においては $H_{2\%}$ を用いることを提唱している。ファン・デル・メーアのいう $H_{2\%}$ は 1/20 最大波 ($H_{1/20}$) に相当している。これは、どちらも消波ブロックの安定性と相関の高い波高としてどれをとるか、また、水深、海底勾配等波浪の浅水変形の影響をいかに合理的に安定性評価式に取り込むかという議論と考えられる。ここでは、従来の設計法との関連も考慮し、 $H_{1/3}$ と $H_{1/20}$ の比率を取り込むものとし、碎波の影響の無い範囲では $H_{1/3}$ を用いた結果となるように $1.4(H_{1/3}/H_{1/20})$ を係数として乗じる形を想定する。

5. 新しい安定性評価式の提案

前項までの検討内容を踏まえ、消波ブロックの安定性評価式の一般形として以下の式形を仮定した。

$$\frac{H_{1/3}}{\Delta D_n} = f \cdot \{a(N_0/N^{0.5})^c + b\} \quad (6)$$

ここに、 a, b, c は消波ブロックの種類(形状)ごとに決ま

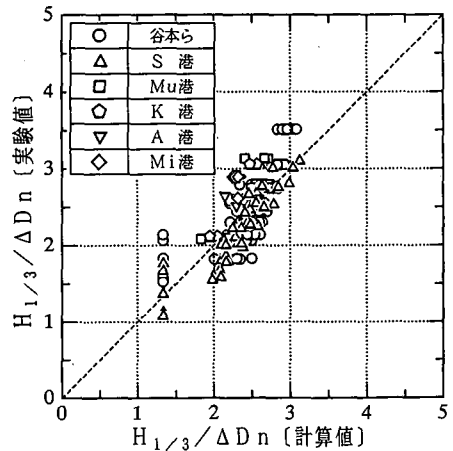


図-6 式 (7) の適合性

る定数であり、 f は碎波の影響および斜面勾配等の関数である。ただし、今回は斜面勾配は 1:4/3 を前提にしていることならびに、碎波の影響は大きくなかったため、結果的には f については定数として扱うこととした。図-5 は横軸として $N_0/N^{0.5}$ をとり実験データを再整理したものである。図中の実線は以下に示される式を表している。

$$\frac{H_{1/3}}{\Delta D_n} = 2.32(N_0/N^{0.5})^{0.2} + 1.33 \quad (7)$$

図-6 は図-2 と同様に式 (7) の右辺と左辺の相関をみたものである。図-2 と比較して式 (7) は実験結果を非常に良く説明できていることがわかる。なお、式 (7) は斜面勾配は 1:4/3、波形勾配は 0.02~0.04 を想定して得たものである点に留意すべきである。

従来、テトラポッドは標準的にはハドソン式を用い、 K_D 値は 8.3 として設計されてきている。この K_D 値は被

表-2 従来の設計との関連

作用波数 N	被災度 N_0	被害率 $D(\%)$
100	0.09	0.29~0.44
500	0.20	0.67~1.00
1000	0.28	0.93~1.40
2000	0.39	1.30~1.95
5000	0.62	2.07~3.10

害率 0~1% に対応した値とされている。ハドソン式では波の作用時間が考慮されていない。そこで、式 (7) と従来の設計法との比較を試みる。

式 (1) より、良く知られるように、

$$\frac{H_{1/3}}{\Delta D_n} = (K_D \cot \alpha)^{1/3} \dots\dots\dots (8)$$

ここで $K_D=8.3$, $\cot \alpha=4/3$ とすると式 (8) の値は 2.23 となる。表-2 は式 (7) の値が 2.23 となる N と N_0 、および式 (5) を前提とした場合の全断面に対する被害率 D との関係をみたのものである。

表-2 からわかるとおり、新方式でみた場合、作用波数 1000 波程度で $N_0=0.3$ 程度、被害率では 1% 前後となり従来の設計値との関連がとれる。1000 波という、設計周期を 14 sec とした場合作用時間は 4 時間程度、12 sec では 3 時間程度である。このように、新方式では従来の設計値との関連がとれ、更に作用波数と被災度との関係から設計を行うことが可能である。

従って、例えば設計波浪を引き起こす気象条件の継続時間の違いといった地域特性や、構造物の重要度に応じて被災度の許容値を変えて設計することも可能となり、ひいては信頼性設計へもつながるものと考えられる。

6. おわりに

直立壁前面の全断面で被覆した場合の消波ブロックの安定性評価式として式 (7) を提案した。その式形は、

- ① 安定数 $H_{1/3}/\Delta D_n$ を求める形とした
- ② 被害の大きさは被災度 N_0 で取り込む

③ 波の作用時間を $N_0/N^{0.5}$ で取り込む

④ 被害ゼロに対しても消波ブロック諸元が求められること

を前提としたものである。ただし、式 (7) は消波工の斜面勾配は 1:4/3 についてのみを対象としたものであり、斜面勾配の影響については更に検討を要する。また、波形勾配についても、通常の設計波浪条件の範囲を想定して 0.02~0.04 を適用範囲としている。

消波ブロックは堤頭部や消波工端部は堤幹部とは安定性が異なり、堤頭部では重量の割増しが行われることもあるが、今回の提案はいわゆる堤幹部（標準部）に対するものである。今後はこれらのパラメータの影響をも考慮した形でより一般的な式形を見い出していきたいと考えている。また、被災度 N_0 と断面変形の程度との関係についても検討を行い、許容できる被災の程度についても提案を行っていきたいと考えている。

最後に、本研究の実施にあたり、運輸省第三、第四、第五の各港湾建設局から水理模型実験データを提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 鹿島遼一・柳山 勉・清水琢三・関本恒浩・国栖広志・京谷 修 (1993): 不規則波に対する消波ブロック被覆工の変形量評価式について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp. 795-799.
- 谷本勝利・北谷高雄・大里睦男 (1979): 不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例, 港研資料, No. 321, 60 p.
- 谷本勝利・原中祐人・山崎一雄 (1985): 不規則波に対する消波ブロックの安定性に関する実験的考察, 港研報告, 24 巻, 2 号, pp. 85-121.
- Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual, U. S. Army Corps of Engrs. U. S. Govt. Printing Office, Vol. II, pp. 7-202-7-204.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory Investigation of rubble-mound breakwater, Proc. ASCE, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.
- van der Meer, J. W. (1987): Stability of breakwater armor layer design formulae, Coastal Engineering, Vol. 11, pp. 219-239.
- van der Meer, J. W. (1988): Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode, Proc. Conf. Breakwaters'88, pp. 71-80.
- van der Meer, J. W. et. al. (1991): Manual on the use of rock in coastal and shoreline engineering, CIRIA Special Publication 83, CUR Report 154, pp. 264-271.