

消波ブロック被覆堤の変状による波力増大を考慮した 期待滑動量算定法の検討

Estimation of Expected Sliding Distance of a Caisson Affected by Damage of Armor Concrete Blocks

高山知司¹・辻尾大樹²・安田誠宏³

Tomotsuka TAKAYAMA, Daiki TSUJIO and Tomohiro YASUDA

The damage of the concrete blocks causes their own settlement together with the sliding of the caisson. The settlement increases wave forces acting on the caisson. The bigger wave forces enlarge the sliding of the caisson. Thus the damage of the concrete blocks is closely related to the sliding of the caisson. The present paper proposes the estimation procedures of expected sliding distance of a caisson affected by the damage of the armored concrete blocks. It concludes that the insufficient weight of the armor blocks causes the damage of the blocks which affects the sliding of the caisson itself and that the necessary width of the caisson which satisfies the selected allowable value of the expected sliding distance becomes larger under the consideration of the armor block damage than under no consideration of the damage.

1. はじめに

2007 年に改訂された「港湾の施設に関する技術上の基準・同解説」では、耐用年数間にその構造物が保持しなければならない性能を規定して、それを満足するように設計する性能設計が採用される。このような性能設計においては、単にコストを削減するだけでなく、設計条件を上回る異常波浪が来襲した際の構造物の被災の程度や、その構造物の被災による人や資産への影響など、総合的に性能を照査することが重要となる。

変形量を考慮した防波堤の設計法については、下迫・高橋 (1998) が、直立部の滑動安定性に対して、数値計算によって算出した供用期間中の期待滑動量を指標とする設計法を提案している。防波堤設計の指標となる変形量には、総滑動量の平均値である期待滑動量の他にも提案されている。例えば、高橋ら (2000a) は、50 年や 500 年確率波に対する滑動量の平均値を指標とする方法を提案し、下迫・多田 (2003) は、複数の滑動量に対する許容値を設定し、構造物の重要度に応じて許容値を変える方法を提案している。

また、下迫ら (2006) は、水理実験の結果によって、消波ブロック被覆堤に作用する波力の時系列波形を求め、消波ブロック被覆堤に対して、滑動量を考慮した設計法を拡張させている。しかし、下迫らは、防波堤の供用期間中に消波ブロックが被災しないものとして、滑動量を算出しているため、異常波浪によって被覆材が被災した時に生じる波力の増大を考慮していない。本研究は、供

用期間中の消波ブロックの被災についても高橋ら (1998) の実験式から算定し、被災した消波ブロックの変状によって生じる波力の増大を考慮して、消波ブロック被覆堤の期待滑動量を算定する手法を検討したものである。

2. 期待滑動量算定法の概要

(1) 消波ブロックの被災規模の算定

異常波浪によって消波ブロックが変状し、堤体に作用する波力が増大することを考慮するために、消波ブロックの波浪に対する被災の程度を算定する必要がある。消波ブロックの被災度を算定するために、高橋ら (1998) が提案している消波ブロックの安定数算定式を用い、各異常波浪に対する被災規模を設定し、耐用年数中の期待被災度を算出した。なお、高橋らの提案式は以下の通りである。

$$N_s = \frac{H_{1/3}}{(S_r - 1)D_n} = C_H \cdot \{a(N_0/N^{0.5})^c + b\} \cdots (1)$$

ここに、 N_s : 安定数、 $H_{1/3}$: 有義波高、 D_n : ブロックの代表径、 N_0 : 幅 D_n の断面内におけるブロックの移動個数、 S_r : ブロックの海水に対する比重、 N : 波数、 $C_H = 1.4 / (H_{1/20} / H_{1/3})$ 、碎波の効果を表す係数、 a , b , c : 消波ブロックの形状や斜面勾配ごとに決まる定数であり、本研究では、例としてテトラポッドを対象としているため、 $a=2.32$, $b=1.33$, $c=0.2$ を用いている。ブロックの代表径については、体積の 3 乗根とし、 $D_n = \sqrt[3]{W/\rho}$ (W : ブロックの重量、 ρ : ブロックの密度) で表すことができる。

年 1 回の異常波浪に対する被災度 N_0 は、式 (1) において異常波浪時の間に来襲した波浪の有義波高 $H_{1/3}$ 、波数 N 、対象ブロックの代表径 D_n から算出することが

1 フェロー 工博 京都大学名誉教授 (財)沿岸技術研究センター 沿岸防災技術研究所長
2 正会員 修(工) パシフィックコンサルタンツ株式会社
3 正会員 博(工) 京都大学助教 防災研究所

できる。また、高橋らに従って被害の履歴を考慮できるように累積被災度を次のように算出している。

当該年における入射波高 $H_{1/3}(i)$ 、前年までの累積被災個数 $N_0(i-1)$ とし、当該年における波浪 $H_{1/3}(i)$ が来襲したときに前年度までの累積被災個数 $N_0(i-1)$ が生じる波数 N' を、式 (1) を変形した次式から求める。

$$N' = \left(\frac{H_{1/3}(i)/C_H(S_r-1)D_n-1.33}{2.32} \right)^{-10} N_0(i-1)^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

そして、当該年における波浪 $H_{1/3}(i)$ の発生波数 $N(i)$ に加えた $N=N'+N(i)$ と $H_{1/3}(i)$ を用いて、式 (1) を変形した次式で当該年までの累積被災個数 $N_0(i)$ を求める。

$$N_0(i) = \left(\frac{H_{1/3}(i)/C_H(S_r-1)D_n-1.33}{2.32} \right)^5 N^{0.5} (3)$$

この $N_0(i)$ を耐用年数間累積させて、供用期間における被災度を算出する。

(2) 不完全消波断面の波圧の算出

(1) によって消波ブロックが被災して不完全消波断面となった場合における堤体に作用する波力の増大を算定する。高橋ら (1990) によると、堤体天端まで消波ブロックで被覆した断面 (完全消波条件) では、砕波力や衝撃砕波力成分に対する補正係数 λ_2 を 0 とし、重複波成分に対する補正係数 λ_1 を次式のように、0.8～1.0 の間で変化させている。

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1.0 & \dots\dots\dots (H/h \leq 0.3) \\ 1.2 - 2(H/h)/3 & \dots\dots\dots (0.3 < H/h \leq 0.6) \\ 0.8 & \dots\dots\dots (H/h > 0.6) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 H : 波高、 h : 設置水深である。

本研究では、部分的に被覆された堤体に作用する波圧の算定には、高橋ら (2000b) が提案した不完全消波断面の波圧算定法を用いた。高橋らは、堤体にかかる波力を図-1 に示すように、3つの領域に分けて考えた。①領域1は消波工で被覆されていない部分、②領域2は消波工で被覆されているが、衝撃砕波力が作用する部分、③領域3は消波工で被覆されており、衝撃砕波力が作用しない部分である。なお、領域2は、消波工天端から次式で求まる d_p 下がった高さまでとしている。

$$d_p = \min[H_{1/3}/3, (h_c - h_B)] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 $H_{1/3}$ は有義波高、 h_c は水面からのケーソン天端の高さ、 h_B は水面からの消波ブロック天端の高さである。高橋らは、合田の波圧式の補正係数 λ_1 、 λ_2 を3つの領域ごとに以下のように設定し、部分被覆による波圧の増大を表した。

① 領域1: λ_1 を 1.0 とし、 λ_2 を次式のように、0～

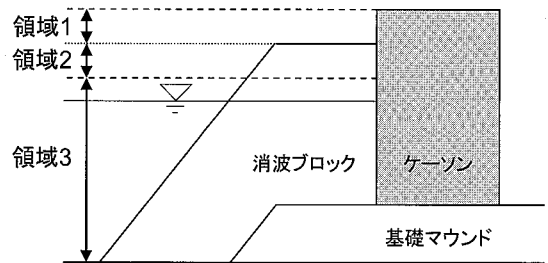


図-1 不完全消波時の波圧を区別する3つの領域

1.0 の間で変化させている。

$$\lambda_2 = \begin{cases} 1.0 & \dots\dots\dots (h_B/H < 0.0) \\ 1.0 - \frac{10}{7}(h_B/H) & \dots\dots\dots (0.0 \leq h_B/H \leq 0.7) \\ 0.0 & \dots\dots\dots (h_B/H > 0.7) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (6)$$

② 領域2: λ_1 を次式のように、 h_B/H が 0 よりも小さい場合は 1、0.35 よりも大きい場合は高橋ら (1990) の完全消波条件での λ_1 になるように設定し、 λ_2 は領域1の式 (6) と同様としている。

$$\lambda_1 = \lambda_{10} \cdot \lambda_{11} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\lambda_{11} = \begin{cases} 1.0/\lambda_{10} & \dots\dots\dots (h_B/H < 0.0) \\ 1.0 - \frac{1.0 - \lambda_{10}(h_B/H)}{0.35} & \dots\dots\dots (0.0 \leq h_B/H \leq 0.35) \\ 1.0 & \dots\dots\dots (h_B/H > 0.35) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 λ_{10} : 式 (4) での λ_1 である。

③ 領域3: λ_1 を領域2と同様に 0.8～1.0 の間で変化させ、 λ_2 を 0 としている。

(3) 計算フロー

本手法は、波浪による消波ブロックの被災にともなう波力の増大を考慮して、消波ブロック被覆堤の期待滑動量を算定するものである。波浪に対する消波ブロックの移動個数は、(1) で記述した高橋ら (1998) の実験式を用いて算定した。消波ブロックの移動に伴う波力の増大は、移動した消波ブロック個数に対応する個数の消波ブロックが天端から取られて、天端が低下すると仮定して、前述の (2) で示した方法で算定した。また、波浪によってケーソンが滑動している場合には、ケーソンの滑動によって消波ブロックとの間に生じた空隙体積に対応する消波ブロックの個数 (個数の計算には、消波ブロックの空隙率も考慮している) がさらに天端から取られると仮定している。これによってケーソンの滑動に伴う波力増大も考慮できるようにしている。消波ブロック天端の沈下による波力の増大は、翌年の異常波浪来襲時から考慮することとした。本手法での期待滑動量の算出方法につ

表-2 ブロック別の期待値(堤体幅固定)

重量 (t)	堤体幅 (m)	期待滑動量 (m)	期待沈下量 (m)	期待被災度 (個/㎡)
被覆無	14.9	0.89	—	—
2 t	14.9	0.87	12.5	81.4
3.2 t	14.9	0.86	12.2	53.7
4 t	14.9	0.87	11.4	43.0
5 t	14.9	0.87	10.0	35.1
6.3 t	14.9	0.96	8.0	28.5
8 t	14.9	0.94	6.0	15.2
10 t	14.9	0.77	4.3	7.0
12.5 t	14.9	0.63	3.1	3.3
16 t	14.9	0.51	2.1	1.4
20 t	14.9	0.42	1.4	0.57
25 t	14.9	0.35	0.93	0.24
32 t	14.9	0.28	0.59	0.09
40 t	14.9	0.20	0.34	0.03
50 t	14.9	0.15	0.22	0.01
64 t	14.9	0.09	0.11	0.002
80 t	14.9	0.04	0.05	0.0004
被災無	14.9	0.00	—	—

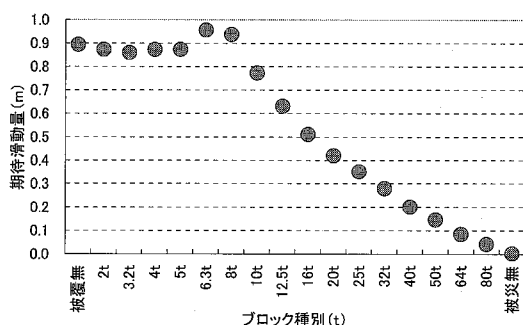


図-3 ブロック別の期待滑動量(堤体幅固定)

5t～8t程度のブロックでは、ブロックがある天端まで沈下した時に、堤体に大きな衝撃波力が作用し、期待滑動量が大きくなるためである。一方、2t～3t程度のブロックでは、1回の異常波浪によって、ほぼ全ブロックが被災するため、部分被覆による異常な波力の増大は生じない。本計算においては、1回の異常波浪中のブロック変状による波力の増大は考慮していないため、2t～3t程度のブロックでは、5t～8t程度のブロックを用いた場合よりも期待滑動量は小さくなる。また、被災度に関しては、1波1波の波力に関係なく、異常波浪期間中にまとまった大きな波浪によって消波ブロックが被災する。このため、高橋らの式では1回の異常波浪中の有義波高と波の数で被災度を求めており、ブロックが重くなるにつれて、期待被災度は小さくなる。

期待沈下量に関して、算出した沈下量には、ケーソンの滑動による沈下とブロックの被災による沈下が含まれ

る。重いブロックを用いると、ブロック被災が小さいために、滑動にともなうブロック沈下量が沈下量全体に占める割合は大きくなる。

4. 必要堤体幅の計算結果

3.と同じ計算条件のもと、表-3に示した下迫・多田(2003)による許容超過確率を指標として、各重量のブロックごとにケーソンの必要堤体幅を算出した。本計算では、構造物の重要度を②普通とし、堤体幅を10cm単位で変えて表-3の超過確率を満たす最小の堤体幅を求めた。算出したケーソンの必要堤体幅を図-4に示す。図中の○は初期堤体幅(合田波圧の補正係数 λ_1 を0.8、 λ_2 を0、滑動安全率を1.2とした場合の堤体幅:14.9m)よりも必要堤体幅が小さくなった場合を示している。また、Hudson(1959)の必要重量算定式で求めた消波ブロックの必要重量32tに対応するケーソン幅は、*で示している。図から、概ね、ブロックの重量が大きくなると、ケーソンの必要堤体幅は小さくなるが、3.と同様の理由で、一部の軽いブロック(ここでは、5t～8t程度)では、2t～3t程度の軽いブロックを用いた場合よりも必要堤体幅は大きくなる。また、20t以下の軽い消波ブロックを設置した場合、ブロックで被覆しない場合(図中の▲:16.4m)よりもケーソンの必要堤体幅が大きくなる。現在、設計で行われているようにハドソン式で求まる必要重量のブロックを設置した場合においても、安全率を1.2とする従来法で求めた堤体幅よりも大きくする必要がある。また、耐用年数間の消波ブロックの被災を考慮しない場合の堤体幅は9.6m(図中の△)で、従来法で求めた堤体幅を5m程度小さくす

表-3 滑動量に対する超過確率の設定例

重要度		超過確率		
		1.0 m	0.3 m	0.1 m
①低い		10 %	20 %	50 %
②普通		5 %	10 %	30 %
③高い		2.5 %	5 %	15 %

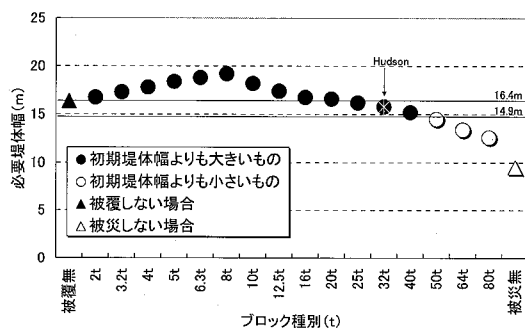


図-4 ブロック重量別の必要堤体幅

ることができるという結果になる。しかし、耐用年数間のブロック被災による波力増大を考慮すると、最も重い80t型ブロックを用いた場合であっても、従来法で求めた堤体幅を小さくできるのは2m程度であった。

5. おわりに

本研究によって得られた主要な知見を以下にまとめる。

- 1) 消波ブロックの変状によって生じる不完全被覆断面に作用する波圧の増大を考慮して、消波ブロック被覆堤の期待滑動量の算定法を提案した。
- 2) 堤体幅を固定した場合、重いブロックを用いると期待滑動量は小さくなるが、一部の軽いブロックを用いると、部分被覆による波力増大が生じるため、被覆しない場合よりもケーソンの期待滑動量が大きくなることもある。
- 3) ハドソン式から求めた必要重量のブロックを用いた場合であっても、必要堤体幅は従来の安全率で求めた堤体幅よりも大きくなる可能性がある。
- 4) ブロックの被災にともなう波力増大を考慮して、期待滑動量から必要堤体幅を算定すると、その堤体幅は、従来の安全率法で求めた堤体幅よりは小さくなるが、ブロックが被災しないとして期待滑動量から算定した堤体幅ほどには小さくならない。

今後は、本手法によって、滑動量を指標とした信頼性設計を行い、防波堤の堤体幅を決定し、その後、著者ら(2006)のように、被覆材のライフサイクルコストを考慮した最適設計を行う必要がある。

参考文献

- 合田良実(1990): 港湾構造物の耐波設計, 増補改訂版, 鹿島出版会, 333p.
- 下迫健一郎・高橋重雄(1998): 期待滑動量を用いた混成堤防波堤直立部の信頼性設計法, 港研報告, 第37巻, 第3号, pp. 3-30.
- 下迫健一郎・多田清富(2003): 混成堤の性能照査型設計法における滑動量の許容値設定に関する検討, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 766-770.
- 下迫健一郎・大寄葉々子・中野史丈(2006): 滑動量を要求性能に設定した混成堤の信頼性設計法, 港空研報告, No. 45, 第3号, pp. 1-20.
- 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎(1990): 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重, 港研報告, 第29巻, 第1号, pp. 54-75.
- 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, 港研報告, 第37巻, 第1号, pp. 3-32.
- 高橋重雄・下迫健一郎・半沢 稔・杉浦 淳(2000a): 防波堤の安定性能照査と性能設計—海域施設の新しい耐波設計—, 海洋開発論文集, 第16巻, pp. 415-420.
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗(2000b): 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, 港研資料, No. 973, 50p.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏(2006): ライフサイクルコストを考慮した護岸被覆材の最適設計, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 856-860.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, *Proc. ASCE*, Vol. 85, WW3, pp. 93-121.