

1. はじめに

消波ブロック被覆堤の維持管理では、経年的に進行する消波ブロックの天端の沈下が波力の増大を招き、大規模被災の発生に繋がることから、本来、ブロックの積み増し等の補修時期を適切に定め、ある一定の施設の管理水準を確保するように継続的に維持管理を行っていく必要がある。特に、予算制約が厳しい中、補修の優先度が高い施設・区間を定量的に評価・抽出し、計画的に補修を行うことが必要とされる。しかしながら、現地における消波ブロックの補修については、災害発生時における消波ブロック（防波堤等の港湾施設の場合）の採択基準（補充する異形ブロックの部分が最小限1個（高さ1/3～2/3程度）以上の被災）を踏まえ、大きな災害が発生した際に、ブロックの沈下等の経年的に発生した変状を含めて補修している事例が多いと考えられる。また、一般的には、防波堤は再現期間50年を想定した設計波高に対して断面が決定されるため、日常的に求められる防波堤の機能としての港内の静穏性は十分に確保されていることなどの理由により、ブロックの沈下等の軽微な防波堤の補修への対応は積極的には為されていないのが現状である。

以上の背景のもと、本研究では、まず初めに、消波ブロック被覆堤の建設後におけるブロック変状調査の事例を示し、現況を把握する。その上で、消波ブロック被覆堤の維持管理における消波ブロック天端の沈下に対する補修基準（ある補修基準としての沈下量に達したら消波ブロックを嵩上げて原断面に戻す）に着目し、供用期間中のブロック補充費と災害発生時の復旧費の累積補修費について算出することにより、適切な維持管理上の消波ブロックの補修基準について検討することができる手法の基本的な考え方を提案する。

2. 消波ブロック被覆堤の変状事例

消波ブロック被覆堤の変状調査結果の事例を図-2.1に示す。本防波堤は、約40年前に混成堤として当初建設されたものであるが、防波堤の前面地盤の洗掘等が激しかったため、約20年前にケーソン前面に消波ブロックを追加した経緯を有する断面である。図中には、消波ブロックの外形線として消波ブロックを設置した当時の設計断面、および近年実施したナローマルチビームと3Dレーザーミラースキャナーによる測量結果を示している。なお、測量結果については、防波堤断面方向に2m間隔のデータとしてケーソン1函分のデータを表示している。本図より、消波ブロック部の断面が大きく欠損し、水面上の消波ブ

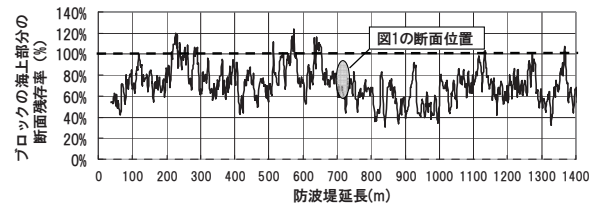


図-2.2 海上部分の消波ブロックの断面残存率分布 (A港)

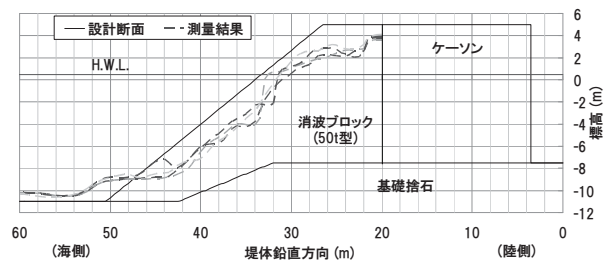


図-2.1 消波ブロック被覆堤の詳細測量結果の事例 (A港)

ロックが2～4m程度沈下していることが分かる。

本研究では、このような消波ブロックの経年的な変状のうち、波浪作用による消波ブロック天端の沈下を主たる維持補修の対象とする。これは消波ブロック被覆堤において消波ブロックの天端が下がると、波がケーソンに直接作用することにより波力の増加を招き、さらに部分被覆状態になるため衝撃砕波力が発生する可能性が高くなることから、防波堤の安定性の低下に大きな影響を及ぼすと考えられるためである。また、消波ブロックが沈下した状態を放置した場合、増大した波力がケーソンに作用することから、設計波相当以上の大きな波が作用した際にケーソンの被災程度（変形量）は、ブロックが沈下していない状態と比較して、より大きくなると考えられる。

以上の観点から、先述した2mピッチの詳細測量データを用いて、図-2.2に消波ブロックの海上部分における断面残存率を法線方向の分布として示す。ここで、海上部分の断面残存率は試行的な指標として、HWLより上方の海上部分で消波ブロックが残存している断面積を海上部分の消波工の原断面積で除することにより算出している。この図より、本防波堤では、海上部分における消波ブロックの断面残存率が60%を下回る区間が約200m程度続いている（延長800m～1,000m付近）ことが分かるなど、防波堤延長の中で相対的に耐波安定性が低下している区間が即座に特定できる。現状、消波ブロック被覆堤の維持管理では、スタッフ測量や目視点検の結果に基づき、個々の点検員等が定性的な施設の劣化状況の評価

を行っているが(表-1.1), 今後は詳細測量データ等を用いた断面情報を用いて, 施設の耐波安定性の低下程度を定量化し, 経年変化を予測した上で, 具体的な補修等の時期や補修内容を検討できる手法の構築が必要であると考えられる。

表-1.1 消波工の移動・散乱・沈下に対する判定基準例
(「港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き」より)

点検方法	判定基準	
潜水調査、 水準測量、 ・法面、法肩、法 尻等の変形 ・ブロックの移 動や散乱状況	a	・ケーソン1函分に亘り、消波工断面が ブロック1層分以上、減少している。
	b	・ケーソン1函分に亘り、消波工断面が 減少している。(ブロック1層未満)
	c	・消波ブロックの一部が移動(散乱・沈 下)している。
	d	・変状なし。

3. モンテカルロ法による累積補修費の評価手法

3.1 関連する既往研究事例

これまで混成堤を対象とした滑動量算定法として, 下迫・高橋(1998)によってモンテカルロ法を用いた期待滑動量を指標とする信頼性設計法が提案されている。期待滑動量は, 供用期間中における混成堤ケーソンの総滑動量の平均値であるが, それ以外の指標としても提案があり, 例えば下迫・多田(2003)はある滑動量を超過する確率を許容値とする指標による照査を提案している。

上述の設計手法は混成堤を対象としていたが, 下迫ら(2006)は消波ブロック被覆堤に作用する波力効果を考慮することにより, 消波ブロック被覆堤にも適用できるように改良している。また, 高山ら(2007)は, 供用期間中に発生する消波ブロックの被災に伴うブロック変状をブロックの沈下量に換算し, それに伴う堤体への波力増大効果を考慮して, 消波ブロック被覆堤の期待滑動量を考慮できる手法へと拡張している。

さらに, 高山ら(2009)は消波ブロックや被覆石・コンクリートブロックなどの被覆材を対象として, 初期建設費と設計供用期間中の被覆材の補修費を合わせたライフサイクルコストが最小となる被覆材を決定する最適設計法を提案している。また, 辻尾・安田(2009)は消波ブロック被覆堤を対象として, 初期建設費と消波ブロックの維持補修費が最小となる堤体幅とブロック質量の最適な組合せを決定する最適設計法を提案している。

3.2 モンテカルロ法による累積補修費の評価手法

(1)提案手法の位置づけ

本検討では, 消波ブロック被覆堤の堤体(ケーソン)の滑動変形量をモンテカルロ法により確率的に評価する手法を用いた。既往の研究との関係においては, 上述した消波ブロック被覆堤を対象とした高山ら(2007)の提案手法, すなわち供用期間中のブロック変状による波力増大の効果を考慮できるモンテカルロ法による滑動量算定手法を適用するものである。

また, ライフサイクルコストの観点からは, 既往の提案モデルは防波堤の新規整備に対するライフサイクルコストを評価するものであり, 大規模な被災を受けないような構造物を対象としていた。そのため, 被災した消波ブロックの沈下に伴う波力の増大を考慮しているものの, 補修費については補修基準を超えた場合のブロック補充費のみを考慮するものであった。既存の防波堤を対象とした維持補修計画の検討に当たっては, 日常的なブロックの補充に加えて, 消波ブロックの天端高さ管理の状況によって異なると考えられる大規模被災の程度と復旧費を考慮する必要がある。

以上のことから, 今回提案する手法では, 既存構造物(消波ブロック被覆堤)を対象とした補修費を評価するものであり, 供用期間中の補修費として, 維持管理で定期的に発生するブロックの補充費と大規模被災が発生した場合の災害復旧費の両者を加算・累積した費用(累積補修費)を考慮した。さらに, モンテカルロ法を用いて, 消波ブロックの補修基準を変化させた場合における累積補修費について, 期待値(平均値)や標準偏差などの指標を用いて確率的に評価し, 最適な補修基準を検討するものである。

以下, 災害復旧費の算出方法, ブロック補充費の算出方法について述べるとともに, モンテカルロ法による累積補修費の評価手法の詳細について述べる。

(2)災害復旧費の算出方法

本検討では, 災害復旧費は被災時の堤体滑動量の関数としてモデル化した(図-3.1)。以下, このモデル化の詳細について述べる。

災害復旧費をモデル化するためには, 消波ブロック被覆堤における被害パターンと被害程度, 復旧工費の関係を整理・分析する必要がある。近年15年間における消波ブロック被覆堤の大規模被災時のケーソン(全93函)について, 滑動量と復旧方法の関係を調査した結果を図-3.2に示す。なお, 図中においてケーソンの滑動量は, ケーソン滑動量を港内側のマウンド肩幅で基準化した相対滑動量として表現している。本図より, 相対滑動量が

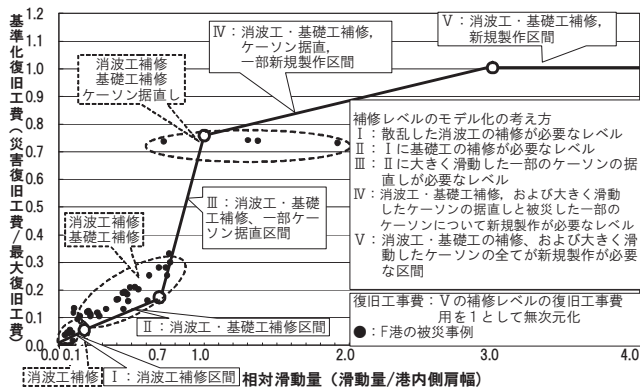


図-3.1 ケーソン滑動量に対応した復旧工費モデル

0.7程度まではケーソンの据直しは実施されないが、相対滑動量が0.7程度を超えるとケーソンの据直しが必要になる事例が急増することがわかる。一般に、ケーソンの据え直しが発生する場合、上部工の撤去、蓋コンクリートの撤去、中詰砂の撤去、ケーソンの浮遊・曳航・仮置き、ケーソン修復およびケーソン再曳航・再据え付けなどの復旧作業が必要となるため、復旧費は著しく増加する人が多い。なお、復旧工費モデルの構築において、ケーソンの据直しの有無が復旧工費に大きな影響を及ぼすが、ケーソン据直しの有無とケーソンの絶対滑動量との関係は、被災事例において明確ではなかった。被災状況により異なるが、ケーソンの据直しの判断は、ケーソンが滑動した際にマウンド肩幅に対してどの程度余裕があるかによって為されている傾向にあったため、本研究ではケーソンの相対滑動量を指標として復旧工費モデルを構築した。

実被災における復旧費と滑動量の関係を把握するため、F港の被災事例(全53函)をもとに、各函の相対滑動量と各函の被災程度に対応して按分した復旧工事費(単位長さあたり)の関係を図-3.3に示す。相対滑動量が0.1程度以下までの区間では堤体の滑動は小さいため、基礎工の被害は発生せず、消波ブロックの散乱に伴う復旧のみとなることから、復旧費は小さい結果となっている。相対滑動量が0.1~0.7程度までの区間では、消波ブロックに加えて基礎工も被害を受けている区間であり、相対滑動量の増加に対応して基礎工および消波ブロックの復旧に係る施工数量が大きくなるため、復旧工費も増加する結果となっている。相対滑動量が0.7程度を超えるとケーソンの据直しが行われており(4函)、復旧工費が急増していることが分かる。

さらに復旧工費の上限(最大値)を確認するために、構造形式は異なるが、近年15年間におけるケーソン式混成堤における大規模被災時のケーソン(全303函)につ

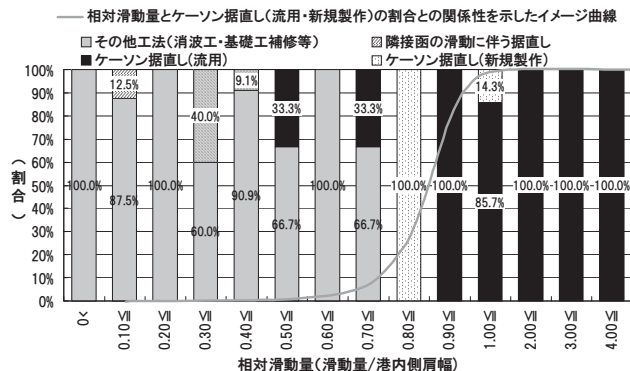


図-3.2 相対滑動量と復旧工法の関係(消波ブロック被覆堤)

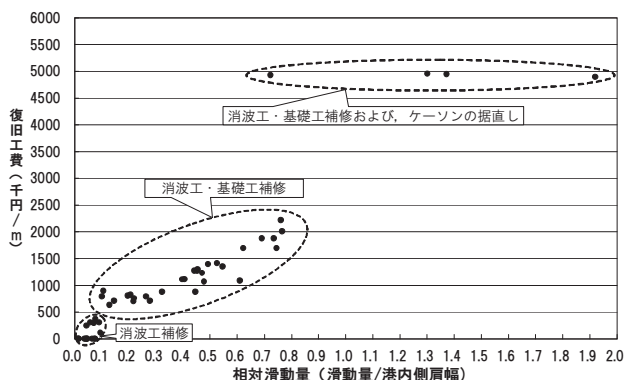


図-3.3 相対滑動量と復旧工費の関係

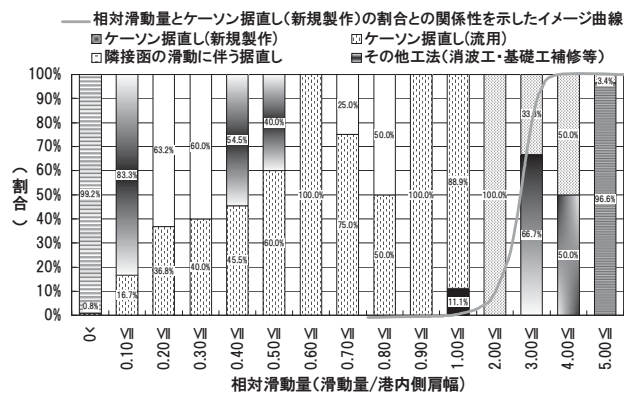


図-3.4 相対滑動量と復旧工法の関係(ケーソン式混成堤)

いて、相対滑動量と復旧方法の関係を整理したものを図-3.4に示す。本図より、相対滑動量が3.0程度を超える場合には、ほとんどケーソンは新規製作となっていることが分かる。このため、消波ブロック被覆堤における復旧工費の上限は、ケーソンの相対滑動量が3程度を超えると発生するとし、考慮すべき復旧工費としては被災したケーソンの解体・処分費用、ケーソンの新規製作・据え付け費用、消波工・基礎工の補修費用を評価した。

以上の調査結果より、災害復旧費は被災時の堤体滑動量の関数として定義し、ケーソンの滑動量に応じて5つ

の補修レベルを設定することによりモデル化を行った(図-3.1)。補修レベルⅠ(相対滑動量が0.1までの区間)は消波工の補修のみの区間として設定する。補修レベルⅡ(相対滑動量が0.1~0.7の区間)は消波工・基礎工の補修区間として設定する。補修レベルⅢ(相対滑動量が0.7~1.0の区間)は消波工・基礎工の補修に加え、一部のケーソンの据直しを行う区間として設定する。また、補修レベルⅣ(相対滑動量が1.0~3.0の区間)は消波工・基礎工の補修および滑動したケーソンの据直しと一部ケーソンの新規製作を行う区間として設定する。補修レベルⅤ(相対滑動量が3.0~の区間)は消波工・基礎工の補修および被災したケーソンの新規製作を行う区間として設定する。なお、各補修レベルの復旧費については、補修レベルⅤの最大復旧費で除することにより基準化した復旧費(基準化復旧費)として示している。

なお、本検討では、堤体が被災して累積した相対滑動量が0.1を上回った場合には災害復旧として考慮し、図-3.1に示した復旧工事費を用いて補修費を計上した。一方、相対滑動量が0.1未満の場合には、消波ブロックの補修基準(日常的なブロック天端の管理基準)を上回って沈下した場合に、日常的な維持管理としてブロック補充を行うとして、ブロックの沈下補充費を計上した。なお、本研究では、相対滑動量0.1を災害復旧と維持管理の閾値として設定しているが、この設定は便宜的なものであるため留意が必要である。図-3.5に本検討での補修費算出の考え方を示す。

(3)ブロック補充費の算出方法

ブロック補充費は、波浪による消波ブロックの沈下量及び堤体の滑動に伴うブロック沈下量より算出される累積沈下量が補修基準(日常的なブロック天端の管理基準)を上回る場合に、消波ブロックの新規製作・据付が発生するとして算出した。

波浪による消波ブロックの沈下量の算出には、高橋ら(1998)が提案する消波ブロックの安定数算定式(式(1))を用いて、消波ブロックの被災度(防波堤法線方向の長さ1m当たりの移動個数)を算出する。

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

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、 $C_H = 1.4(H_{1/20}/H_{1/3})$ 、砕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る。なお、本研究では、テトラポッドを対象としているため、 $a=2.32$ 、

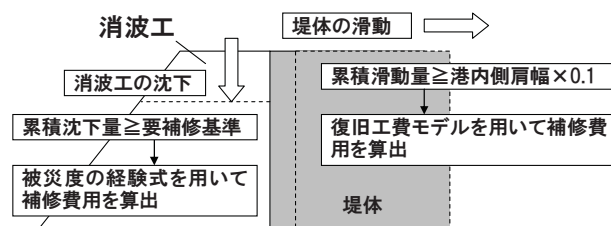


図-3.5 累積補修費の算出の考え方

$b=1.33$ 、 $c=0.2$ 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。

次に、高橋らに従って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($i-1$)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。

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

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

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

算出した消波ブロックの被災度から、移動した消波ブロックの体積(空隙も含む)に対応した量だけ消波ブロックの天端が沈下したとして、波浪による消波ブロックの沈下量を算出する。

また、堤体の滑動に伴うブロック沈下量は、堤体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が天端から取られることを仮定し、算出する。

波浪による沈下量と堤体の滑動に伴う沈下量を足しあわせて消波ブロックの沈下量を算出し、さらに前年までの沈下量を足しあわせて累積沈下量を算出し、累積沈下量が補修基準を超えた場合に消波ブロックの補充を行うものとする。

(4)モンテカルロ法による累積補修費の評価手法

本研究で用いた補修費算出モデルの計算フローを図-3.6に示す。まず、先述した下迫・高橋(1998)によるモンテカルロ法を用いた期待滑動量を指標とする信頼性設計法の提案内容に基づき、沖波確率分布から乱数を用いて年1回の異常波浪を抽出し、波浪変形計算によって構造物設置地点の波浪諸元(波高、周期)を求め、次に、レーリー分布から1波1波の波浪を抽出し、それぞれの波に対する堤体の滑動量を算出し、1回の異常波浪に対する滑動量を算出し、前年までの滑動量に加えて累積滑動量を算出する。滑動したケーソンと消波ブロックの間に生じた空隙によって、消波ブロックが変状すると仮定し、ケーソンの滑動による消波ブロックの沈下量を算出する。

次に、異常波浪期間中の有義波高と波の数から、高橋ら(1998)の式を用いて消波ブロックの被災度及び累積被災度を求め、沈下量を算出する。そして、ケーソンの滑動と消波ブロックの移動に伴う沈下量を加えて、消波ブロックの沈下量を算出し、前年までの沈下量に加えて累積沈下量を求める。

ここで、累積相対滑動量が 0.1 を超えた場合には前述のように図-3.1 の復旧工費モデルを用いて算出した災害復旧費を補修費として計上し、累積相対滑動量が 0.1 未満で累積沈下量が補修基準を上回る場合には、消波ブロックの新規製作・据付費を補修費として計上している。なお、累積相対滑動量が 0.1~0.7 に至った場合は、港内側の捨石マウンドの肩幅を延長する補修を行うため、累積滑動量を 0 に戻す。同様に、累積滑動量が 0.7 を超えた場合もケーソン据直しに伴い、累積滑動量を 0 に戻すことになる。

これを設計供用年数間(50年間)繰返し、さらに今回の解析では50000回の試行を繰返し、累積補修費の期待値および標準偏差を求めている。

なお、高山ら(2007)と同様、高橋ら(2000)が提案した不完全消波断面の波圧算定法を用いて、消波ブロックの沈下によっ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考慮している。高橋らは、堤体にかかる波力を図-3.7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。

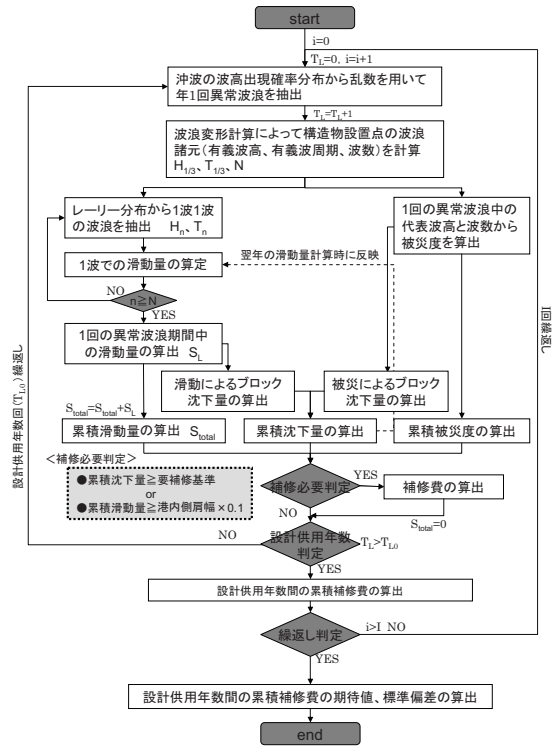


図-3.6 計算フロー

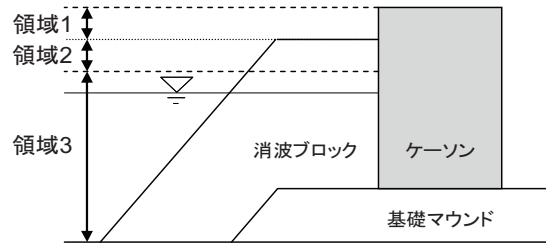


図-3.7 不完全消波断面時の3つの波圧領域

4. 解析結果および考察

4.1 対象断面および解析条件

解析対象はA港防波堤(図-2.1)およびS港防波堤(図-4.1)の2断面であり、表-4.1に各断面に対する解析ケース・解析条件を示す。

A港については、ワイブル分布に従う沖波確率分布として、裾長さパラメータ(50年確率波高/10年確率波高)が1.14である50年確率波、150年確率波および偶発波浪を設定した全3ケースと、裾長さパラメータが1.27である50年確率波を設定したケースを対象とした。

なお、偶発波浪とは平石ら(2008)に従い、50年確率波浪の周期を17sとなるように設定したケースである。これらのケースにより、確率波高の再現年数、偶発波浪による周期の増大および確率分布の裾野形状の相違が累積補修費に及ぼす影響を評価することができる。裾長さパラメータは、極値分布の分布特性を表す指標であり、合田(2002)によると、日本海側などの冬季風浪などにより設計波相当の高波が毎年来襲するような港では1.13程度であり、逆に台風来襲時に突発的に高波が発生するような太平洋側の港では1.21~1.24程度と言われている。

なお、計算に用いた沖波波高などの各設計変数の平均値の偏りと変動係数については高山ら(1994)と同じとした(表-4.2)。

S港については、ワイブル分布に従う沖波確率分布として、裾長さパラメータが1.27である50年確率波を用いて、消波ブロックの規格(重量)を16t、20tおよび25tと変化したケースを解析対象とした。これは、実務設計における消波ブロックの選定は、所要重量を最低限満たす規格に加えて、2規格上までの重量のブロックについて経済比較(施工費)を実施した上でブロック重量を決定しているため、必ずしも設計から要求される所要重量に対応するブロックが採用されないことを考慮している。ブロック重量が所要重量より大きい場合は、波浪作用による消波ブロックの被災が低減されるため、ブロック重量が累積補修費に及ぼす影響をこれらの解析結果ケースから評価する。

なお、本検討ではブロック天端の日常的な補修基準としてブロック天端の沈下量(0.5個・1個・1.5個・2個分)を指標として設定し、各補修基準を採用した場合の供用期間中に発生する累積補修費への影響を評価する。

4.2 解析結果及び考察

(1)A港防波堤

図-4.2にA港防波堤の結果として、供用期間中(50

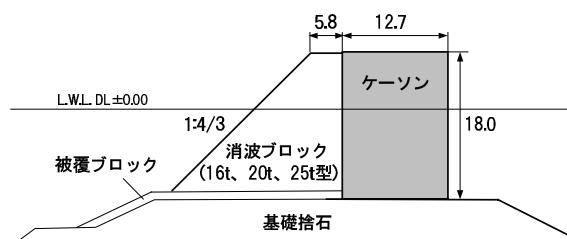


図-4.1 解析対象断面 (S港防波堤, 単位: m)

表-4.1 解析ケースおよび解析条件

	A港			S港
	50年確率波浪	偶発波浪	150年確率波浪	50年確率波浪
沖波確率分布	ワイブル分布	ワイブル分布	ワイブル分布	ワイブル分布
裾長さパラメータ	1.14	1.27	1.14	1.27
形状母数(k)	2.0	1.4	2.0	1.4
尺度母数(A)	3.211	3.106	3.211	3.211
位置母数(B)	5.852	3.972	5.852	4.127
波高(m)	12.2	12.2	13.0	13.4
波周期(s)	14.0	17.0	14.5	16.1
波形勾配	0.040	0.027	0.040	0.039
消波ブロック被覆堤時の安全率	1.67	1.55	1.50	1.20
天端高(m)	5.0			6.0
堤体幅(m)	12.5			12.7
法面勾配	1:4/3			1:4/3
消波ブロック種別	50t型(高さ4.155m)			25t型(高さ3.30m) 20t型(高さ3.06m) 16t型(高さ2.83m)
設計供用年数	50年			50年
継続時間	2.0時間			2.0時間
繰り返し回数	50,000回			50,000回

年間)の累積補修費の期待値(平均値)と補修基準との

表-4.2 計算に用いた平均値の偏りと変動係数

項目	平均値の偏り α	変動係数 γ
沖波	0.00	0.10
碎波変形	-0.13	0.09
波力	-0.16	0.10
摩擦係数	0.06	0.06
自重	0.00	0.10

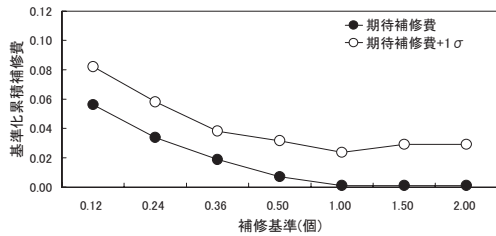
関係を示す。補修基準には、0.5個(2.06m)・1個(4.16m)・1.5個(6.23m)・2個(8.31m)に加えて、補修費の傾向を確認するために0.12個(0.5m)、0.24個(1.0m)および0.36個(1.5m)の場合も併せて示している。なお、累積補修費は、図-3.1における最大工費(消波工・基礎工の補修およびケーソンの撤去・新規製作)で基準化した補修費として定義している。以下、基準化累積補修費と呼ぶ。また、図-4.3には、基準化累積補修費の期待値の内訳(日常的なブロック補充、相対滑動量に応じた図-3.1に定義した被災レベルII~V)と補修基準との関係を示す。

この結果より、本防波堤では、どの解析条件においてもブロック0.5個~1個分程度で継続的に補修する場合に期待補修費が最小となることが分かる。補修基準を0.5個未満にして頻繁にブロックを補修しても、補修費用が増加するため、過度のブロック補修は合理的ではないことを示している。また、偶発波浪を考慮した場合の期待補修費の増加に及ぼす影響は非常に大きく、波浪周期の増加は著しい復旧工費の増大を招くことが分かる。次に、

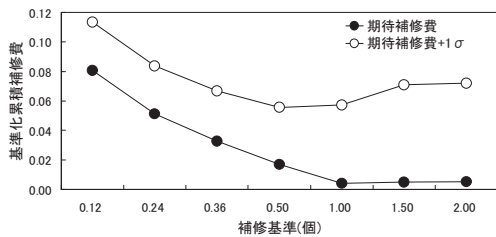
本研究では、消波ブロック天端の沈下に対して日常的に実施するこまめな補修が、大規模被災時のリスクをどの程度低減するかについて評価することを主眼としているため、期待補修費に累積補修費の標準偏差(σ)を加えて、累積補修費のばらつきを評価することとする(図-4.2)。この結果より、例えば150年確率波および偶発波浪の場合、ブロック0.5個~1個分より大きい補修基準を設定すると標準偏差は急増することが分かる。これは、補修基準の緩和にともない、波力が増大する状態を放置することになり、その結果として防波堤が大規模被災に至り、災害復旧費が著しく大きくなるケース(確率)が増加して、補修費が大きくなるためである。この結果は、

大規模被災のリスクを低減(コントロール)するためには、日常的な維持管理において、こまめに消波ブロックの補修を行うことの有効性を示唆するものである。

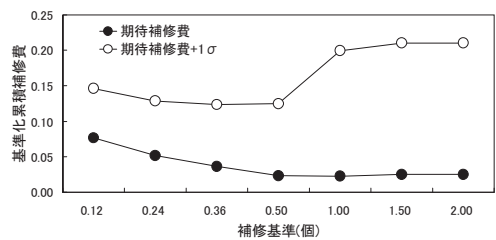
次に、裾長さパラメータの影響について検討する。図-4.2(a)と図-4.2(d)を比較すると、図-4.3(a)の裾長さパラメータ=1.14のケースにおける期待補修費が大きいことがわかる。また、図-4.3(a)と図-4.3(d)より、裾長さパラメータ=1.14のケースの方が補修レベルIV、Vの割合が多いことも確認できる。以上より、裾長さパラメータの小さい方が大規模被災の確率が高く、被災のリスクが大きくなることが分かる。これは、50年確率波で設計された消波ブロック被覆堤において、裾長さパラメータ



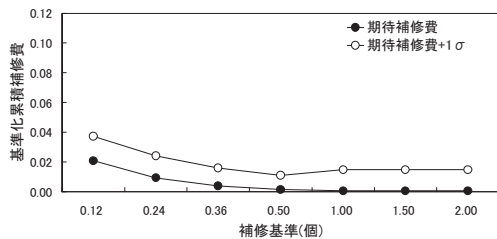
(a) 50年確率波 (裾長さパラメータ=1.14)



(b) 150年確率波 (裾長さパラメータ=1.14)

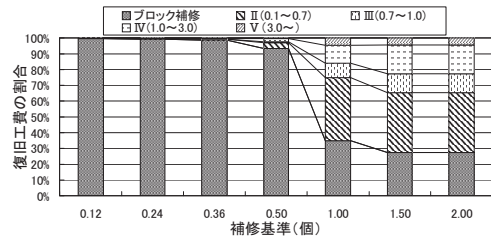


(c) 偶発波浪 (裾長さパラメータ=1.14)

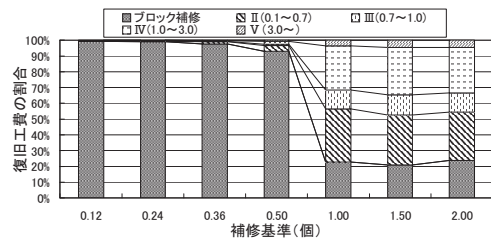


(d) 50年確率波 (裾長さパラメータ=1.27)

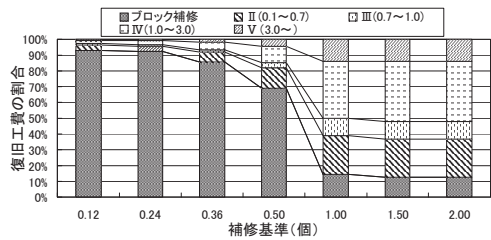
図-4.2 累積補修費と補修基準の関係



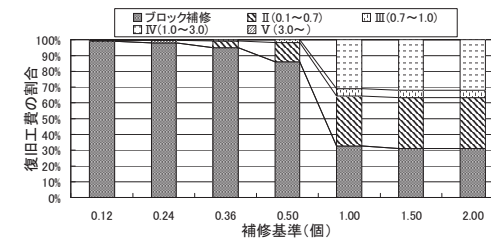
(a) 50年確率波 (裾長さパラメータ=1.14)



(b) 150年確率波 (裾長さパラメータ=1.14)



(c) 偶発波浪 (裾長さパラメータ=1.14)



(d) 50年確率波 (裾長さパラメータ=1.27)

図-4.3 累積補修費内訳と補修基準の関係

タが小さい場合は 50 年確率波と 10 年確率波の波高の相違程度は小さいため、裾長さパラメータが大きい場合と比較すると、設計波に近い波高が頻繁に来襲することになる（例えば、日本海側の冬季風浪）。一方、消波ブロック被覆堤では僅かなブロックの沈下によっても波力増大が発生するため、裾長さパラメータが小さい場合には、堤体に大きな滑動が発生し、大規模被災に遭遇する確率が高くなるためである。この結果は、防波堤の維持管理水準について大規模被災時のリスクを含めて評価する上で、沖波確率分布（極値分布）の分布特性の適切な評価が重要であることを示唆するものである。

最後に、以上に示した解析結果により算出された A 港防波堤における累積補修費の期待値（平均値）と標準偏差の関係を図-4.4(a)に示す。この図より、補修基準の選択や波浪条件（確率分布や確率年）の相違が、累積補修費の期待値とばらつきにどのように影響を及ぼすかについて容易に評価することができる。すなわち、この図において、右上にプロットが移行することは、被災時の累積補修費の期待値と標準偏差がともに増加することを意味するため、被災リスク低減の観点からは望ましくない方向へ施設の状態が移行することになる。反対に、左下にプロットが移行することは、被災リスク低減の観点からは望ましい方向に移行することになる。以上のような観点であらためて評価すると、本検討ケースでは、偶発波浪以外の波浪条件においては、補修基準を 1 個程度まで緩和しても、期待値は低減する傾向にあり、かつ大規模被災時の復旧工費の増大も抑制されているため、補修基準 1 個という選択は合理的であると判断される。しかしながら、偶発波浪を考慮した場合には、補修基準 0.5 個を越えると、復旧工費が増大する危険性が著しく大きくなるため、より厳しい補修基準（0.5 個程度）の選択に合理性があることになる。

(2) S 港防波堤

図-4.4(b)にS港における同様の図面を示す。この図より、本検討条件では、どの補修基準においても、ブロック重量の増加に伴い期待値および標準偏差は小さくなるのが分かる。これは、ブロック重量を増加させることにより、ブロックの被災が減少し、その結果として大規模被害が発生する確率が低下するためである。例えば、補修基準1個の場合、ブロック重量を16tから25tに変更することで、基準化累積工費の期待値を約0.06低減させることができる。さらに、本断面の場合、ブロック重量の規格を2段階上げることによって、初期工費を約1%程度（基準化累積補修費0.01に相当）低減させることができる。したがって、消波ブロックの規格として所要重量よ

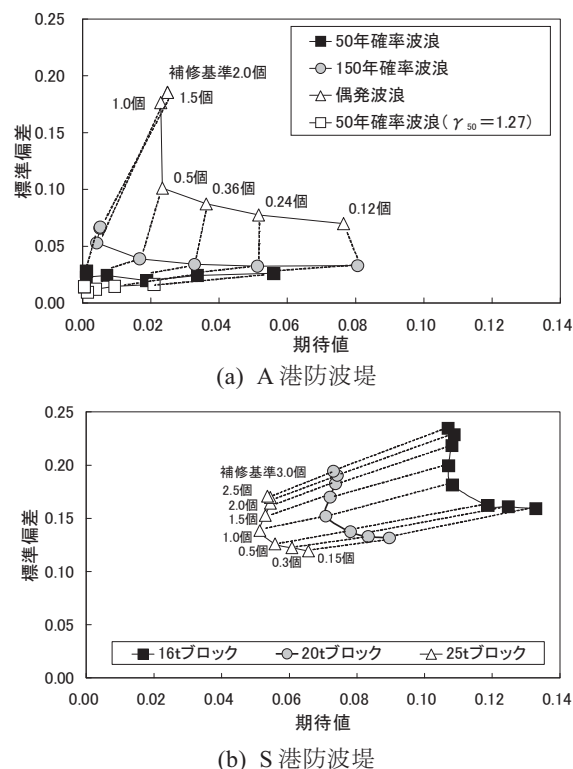


図-4.4 基準化累積補修費の期待値と標準偏差の関係

りも大きな規格を採用することは、被災リスクの低減および初期工費の低減の両者に寄与することから、非常に合理的な選択であることが分かる。

5. まとめ

本研究では、消波ブロック被覆堤を対象として、ブロック天端の沈下補修基準を変化させて、各基準に対して算出される供用期間中の累積補修費を算出することにより、大規模被災時の復旧工費増大のリスクも考慮した上での適切な維持管理上の補修基準を評価できる手法を提案した。

今回の検討事例の解析結果からは、維持管理において、こまめにブロックの沈下補修（ブロック半個～1個程度）を行うことが、期待補修費の最小化及び大規模被災時のリスク低減の観点から有効であることが分かった。また、設計段階の選択として、ブロックを設計上必要とされる最小重量ではなく、それより重い規格とすることが、同様の効果を発揮することが分かった。

なお、今回提案した手法は、既存の消波ブロック被覆堤を対象として、大規模被災時の復旧工費増大のリスクも考慮した上で適切な維持管理上のブロック沈下に対する補修基準を評価できる点において新規性はあるが、今後、さらなる検討が必要であると考えている。例えば、

今回の検討では、累積補修費の評価にあたり災害復旧費として防波堤の直接被害に伴う施設復旧費のみ考慮しているが、二次被害（背後の護岸施設等の連鎖的な被害や港湾内の静穏度の低下による荷役効率の低下など）を一切考慮していないため、これを考慮できる手法へと改良する必要がある。また、今回の検討では、復旧工費は相対滑動量の関数として非常に簡単なモデルとして与えているが、防波堤の断面諸元や復旧時の施工条件等により関数形状は異なると考えられる。このため、多数の被災事例を分析・評価を実施し、その結果に基づき復旧工費モデルの精度を向上させ、標準化していく必要がある。さらに、防波堤は施設延長が長い構造物であるため、同じ設計区間であっても、実際の被災程度はその延長上で大きく異なるため、大規模被災のリスク評価の精度を向上させる観点から、施設延長や港湾内における複数の防波堤の位置関係等を適切に反映できる手法とすることも重要である。

消波ブロックの沈下については、波浪が直接作用することによるブロックの移動以外にも原地盤（砂地盤）の吸いだし等によって沈下が発生するため、これらの影響を必要に応じて考慮できるモデル化が必要とされる。また、今回の検討では、消波ブロックの被災は年1回の異常波浪に伴い発生すると仮定したが、実際には、1年間に複数回の被災（ブロックの沈下）が発生する場合もあると考えられるため、この影響を今後検討する必要がある。さらに、実際に消波ブロックの補充工事を実施する際には、一般にブロックの個数がある程度の施工数量にならないと施工単価が著しく増加するため、2.に紹介したようなブロックの沈下変状等を広範囲にわたって詳細に把握した上で、可能な限り一度に施工するブロック個数が多くなるように計画する必要がある。効率的に補修工事ができる適切な施工規模の明確化も今後の検討課題である。

今後は、上記に示す観点から、今回提案した手法をさらに改良したものを適用することによって、我が国の港湾における防波堤を対象に、戦略的な維持管理をどのように行っていくべきかについて、さらに検討を進めたいと考えている。

(2009年8月31日受付)

謝辞

本研究の遂行にあたっては、下迫健一郎氏（横浜港湾空港技術調査事務所所長）より貴重なご意見を頂いた。また、解析手法の構築および解析の実施については、パ

シフィックコンサルタンツ株式会社の諸氏（熊谷健蔵氏、辻尾大樹氏および大久保陽介氏）にご担当頂いた。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 下迫健一郎・高橋重雄(2002)：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・多田(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・大寄菜々子・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，港研報告，第45巻，第3号，pp.1-20.
- 合田良実(2002)：設計波高に係わる極値統計分布の裾長度パラメータとその意義，海岸工学論文集，第49巻，pp.171-175.
- 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・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗(2000)：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・鈴木康正・河合弘泰・藤咲秀可(1994)：防波堤の信頼性設計に向けて，港湾技研資料，No.785，36p.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏(2007)：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，海岸工学論文集，第54巻，pp.756-760.
- 高山知司・辻尾大樹・安田誠宏・井上純一(2009)：ライフサイクルコストの最小化による沿岸構造物被覆材の最適設計，土木学会論文集 B, Vol.65, No.1, pp.15-30.
- 辻尾大樹・安田誠宏(2009)：ライフサイクルコストを考慮した消波ブロック被覆堤の最適設計に関する研究，海岸工学論文集，第56巻(印刷中).
- 平石哲也・平山克也・加島寛章・春尾和人・宮里一郎(2008)：偶発波浪荷重による被害例とその特性，海岸工学論文集，第55巻，pp.981-985.
- 国土交通省港湾局・国土交通省国土技術政策総合研究所・港湾空港建設技術サービスセンター（編著）：港湾の施設の維持管理計画書作成の手引き（増補改訂版），港湾空港建設技術サービスセンター，2008.