

海域施設の温暖化適応策に向けた新しい性能評価指標の提案

A New Index for Performance Assessment of Coastal Facilities for Adaptation to the Global Warming

関本恒浩¹・安野浩一郎²・中嶋さやか³・磯部雅彦⁴

Tsunehiro SEKIMOTO, Kouichiro ANNO, Sayaka NAKAJIMA and Masahiko ISOBE

“Critical wave height for performance” is proposed as a new concept for performance assessment of coastal facilities in order to plan the strategy of adaptation to the global warming. The new concept represents the performance degradation of coastal facilities due to sea level rise or intensifying typhoon caused by the global climate change. Some indexes for the decision-making on the strategy of adaptation by using the new concept are also proposed. The proposed indexes are quite beneficial for the planning on the adaptation strategy to the global warming.

1. はじめに

地球温暖化は観測的な事実から現実的なものとして認識されており、温暖化に伴う海面の上昇や台風等の外力の増大の可能性が指摘されている。

護岸や防波堤などの海域構造物は、このような地球温暖化に伴う外力の作用条件の変化によって、安全性や越波防止機能などの保有性能の低下をきたすものと考えられる。このため、温暖化による諸現象に伴う構造物の性能低下に対応するための適応策に関する議論が始められている。しかしながら、適応策の実施時期や実施順序などの意思決定を行うための情報についての議論は十分ではないのが現状である。

そこで本研究は、海域施設の多くは波高によって性能が規定される場合が多いことに着目し、適応策実施に向けた新しい意思決定のための指標を提案するとともに、この新しい指標が有する応用面での有効性について考究するものである。

なお、ここでは構造物自体の性能は変わらずに外力の変化により性能が損なわれるものを性能低下、構造物自体の変状や変形などによって性能が損なわれるものを性能劣化と呼ぶことにする。

2. 新しい性能評価指標の提案

(1) 性能限界波高

海域構造物は波高で性能が規定される場合が多いことに着目して、波高を尺度とする保有性能の評価のための概念を考える。海面上昇などによる外力等の条件の変化によって、構造物に要求される性能を満足させる最大の

波高が低下する。すなわち、護岸の越波を例にとると図-1に示すように海面の上昇によって相対的に護岸天端高が低くなるため越波量は増大し、この性能の低下に伴って性能を規定する波高も低下する。このことに着目し、構造物の性能を表現するものとして波高を用い、性能限界波高という概念を導入する。

性能限界波高および性能限界沖波波高を次のように定義する。すなわち、設計条件が変化したとき、「ある構造物の要求性能を満足させるための最大の波高値」を性能限界波高、この条件に対応する最大の沖波波高値を性能限界沖波波高とする。したがって、性能の劣化や低下がない場合は、設計の際に天端の余裕高のような設計裕度が考慮されていなければ、性能限界波高は設計波高に、性能限界沖波波高は設計沖波波高に一致する。

なお、ここで提案する概念は、護岸の沈下や堤体の強度の低下など性能を波高で規定できるものであれば、通常の性能劣化に対しても適用可能であり、今後の維持管理の検討の際にも応用が可能な非常に広いものである。

(2) 意思決定のための指標の提案

沖波の出現確率と性能限界沖波波高の関係を模式的に示したものが図-2である。海面上昇の影響による性能限

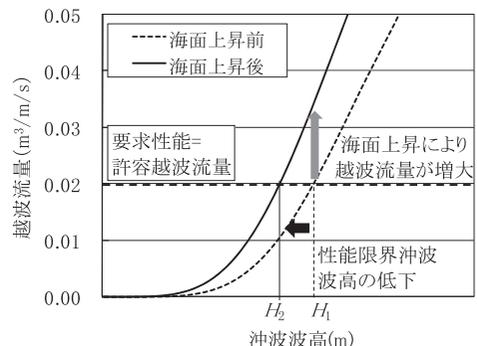


図-1 性能限界波高の概念

1 フェロー 博(工) 五洋建設(株) 技術研究所
2 正会員 五洋建設(株) 技術研究所
3 正会員 修(農) 五洋建設(株) 技術研究所
4 フェロー 工博 東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

界沖波波高の低下に加えて台風の巨大化等により性能限界沖波波高の出現確率が增大する。このことを踏まえ意思決定のための指標を以下に提案する。

a) 性能限界波高あるいは性能限界沖波波高

まず、上位概念である性能限界波高あるいは性能限界沖波波高の低下を直接性能の低下・劣化の指標とする。この方法のメリットは、構造物が保有する性能と直接結びつけられるので、ある構造物に着目して議論する場合において理解が容易な点である。デメリットは、同じ性能限界波高でも構造物の構造形式や設置場所によって、性能が変化するなど普遍的でないため、相互比較をしにくくやや汎用性に欠けることである。

b) 再現期間

性能限界沖波波高に対応する再現期間の変化を性能の低下・劣化の指標とする方法である。この方法は直接時間の概念と結びつけられ、補修時期などを考えるときに理解が容易な点がメリットである。一方、再現期間の持つ意味合いがやや曖昧で、再現期間がどの程度短くなった時点で補修が必要かという判断に別途基準が必要となる点がデメリットである。

c) 被災遭遇確率

性能限界沖波波高に対応する被災遭遇確率の変化を性能の低下・劣化の指標とするものである。メリットは、設計供用期間に対する当初の被災遭遇確率は決まっているので、これと同じ被災遭遇確率となる供用開始からの期間を目安として、維持更新などの時期の判断ができることである。また、被災遭遇確率に被災を受ける地域の資産額をかけることによって、平均想定被害額が算出でき評価の際に直観的に理解しやすい。一方、被災遭遇確率の概念が難しいため確率だけの議論では、理解が進まないことがデメリットと考えられる。

(3) 意思決定のための指標の理論的考察

ここでは前項で提案した意思決定のための指標に関する理論を新たに構築し、その特性について詳細に検討を行う。

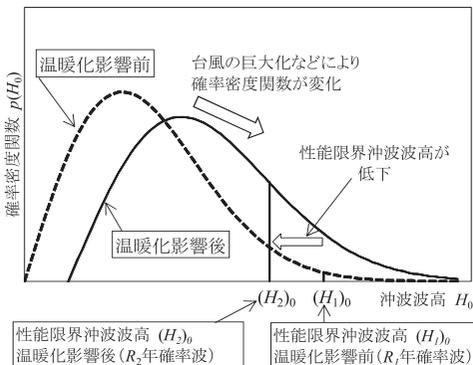


図-2 沖波の出現頻度と性能限界沖波波高

まず、性能限界沖波波高 H_{p0} を供用開始からの経過時間 t の関数と考える。すなわち、

$$H_{p0} = H_{p0}(t) \dots\dots\dots (1)$$

前述のように、経過時間 $t = 0$ における性能限界沖波波高 $H_{p0}(0)$ は、構造物の設計の際に裕度をみなければ当初の設計沖波波高に一致する。沖波の確率分布を P とすると、 P は性能限界波高 $H_{p0}(t)$ と経過時間 t の関数となる。したがって、確率 P の時間変化は次式のように表せる。

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dt} &= \frac{\partial P}{\partial H_{p0}} \frac{dH_{p0}}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \dots\dots\dots (2) \\ &= p \frac{dH_{p0}}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \end{aligned}$$

ここで、 p は沖波の確率密度関数である。また、上式で右辺第一項は波高が変化する効果、第二項は確率分布が変化する効果をそれぞれ表わす。つぎに再現期間 R の時間変化について検討する。まず、再現期間 R は沖波の確率分布 P を用いて次式で定義される。

$$R = \frac{1}{1-P} \dots\dots\dots (3)$$

したがって、再現期間の時間変化を性能限界沖波波高と沖波の確率分布関数で表わすと次式のようになる。

$$\frac{dR}{dt} = \frac{1}{(1-P)^2} \left\{ p \frac{dH_{p0}}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

つぎに、被災遭遇確率は

$$f = 1 - P^t \dots\dots\dots (5)$$

で定義される。したがって、経過時間 t における被災遭遇確率 f の時間変化は式 (6) で示される。

$$\frac{df}{dt} = -tP^{t-1} \left(p \frac{dH_{p0}}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \right) - P^t \ln(P) \dots\dots\dots (6)$$

以上より、性能限界沖波波高と沖波の確率分布の関数として再現期間や被災遭遇確率の時間変化が表現される。つまり性能限界波高や沖波の確率分布関数の経時変化特性がわかれば、式 (4) および式 (6) を初期時刻 $t = 0$ から適当な経過時間 t まで積分することによって、経過時間 t における再現期間や被災遭遇確率の特性を計算することができる。

まず、再現期間は次式となる。

$$R(t) = \int_0^t \frac{1}{(1-P)^2} \left\{ p \frac{dH_{p0}}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \right\} dt + R_0 \dots\dots\dots (7)$$

ここで、再現期間の初期値 R_0 は、当初の設計沖波の超過確率の逆数として表わされる。つぎに被災遭遇確率は、式 (6) を積分して次のようになる。

$$f(t) = \int_0^t \left[tP^{t-1} \left(p \frac{dH_{p0}}{dt} + \frac{\partial P}{\partial t} \right) - P^t \ln(P) \right] dt + f_0 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、被災遭遇確率の初期値は $f_0 = 0$ である。式 (8) で表わされる被災遭遇確率は、積分形式で表わされることから、ある時点以降の被災遭遇確率を考えると、その時点における被災遭遇確率には依存するものの、その

時点よりも過去の被災遭遇確率の履歴，言い換えれば外力の履歴には依存しないことがわかる．式 (7) の再現期間についても同様のことが言える．なお，式 (8) で求められた $f(t)$ を用いて式 (9) から再現期間を求めることができる．

$$R(t) = \frac{1}{1 - (1 - f(t))^{1/\alpha}} \dots\dots\dots (9)$$

式 (9) で求めた再現期間は理論的には式 (7) で求められる再現期間に一致する．

再現期間の初期値 R_0 を当初の設計沖波の超過確率の逆数とする限り，式 (7) で表わされる再現期間は，経過時間 t において $t = 0$ を基準とした再現期間を表わす．したがって，ある経過時間 t における残存再現期間は次式で表わされる．

$$R_R(t) = R(t) - t \dots\dots\dots (10)$$

式 (8) で求められる被災遭遇確率が設計供用期間に対する当初の被災遭遇確率に一致する時点において，式 (10) によって定義される残存再現期間は0となる．

3. ケーススタディによる指標の活用方法

(1) 検討条件

a) 対象とする構造物

高橋ら (2000) を参考に計算の対象とする重力式護岸の仮想断面を決定した．図-3に検討に用いたモデル構造物を示す．なお初期潮位は+5.5mとし，設置水深は事前検討において海面上昇による設計波高の増加が顕著であった-2.5mとした．

b) 海面上昇

温暖化シナリオとして潮位が100年間に50cmの一定割合で上昇するものとした．この海面上昇量は，IPCCの4次報告書 (IPCC, 2007) におけるA2シナリオと概ね対応する．

c) 沖波波高の出現確率の時間変化

沖波の分布としてWeibull分布を仮定し，尺度母数 A のみが時間とともに線形に変化するものとする．すなわち，

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{H_{P0} - B}{A}\right)^k\right] \dots\dots\dots (11)$$

$$A = A_0(1 + \alpha t) \dots\dots\dots (12)$$

ただし， A_0 は経過時間 $t = 0$ における初期尺度母数， α は

尺度母数の増加率を表す．したがって，このときの沖波の確率の時間変化量は，

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{k}{A} \left(\frac{H_{P0} - B}{A}\right)^k \exp\left[-\left(\frac{H_{P0} - B}{A}\right)^k\right] A_0 \alpha \dots\dots\dots (13)$$

となる．ここでは100年確率波を想定して $H_0 = 3.91\text{m}$ ，Weibull分布の形状母数 $k = 2.0$ ，尺度母数 $A_0 = 1.88\text{m}$ ，位置母数 $B = 0.0\text{m}$ とした．また，尺度母数については森ら (2009) を参照し，100年間で波高が15%増大するとして $\alpha = 0.0015\text{yr}^{-1}$ とした．また，このとき水深-2.5m，潮位+5.5mにおける構造物の設計波高 H_D は6.48mとなった．

(2) 検討方法

まず，図-3に示す断面に対し，表-1に示す照査項目および設計条件で設計を行い堤体の諸元を決定した．護岸天端高は，高山 (1982) による算定式により越波流量を評価し，許容越波流量を満足する天端高とした．またパラベット部の安定性は，コンクリート同士の摩擦は無視して差し筋のせん断破壊に対する検討を行った．このとき，沖波から堤体位置における波の変形は合田 (1975) の碎波変形モデル，パラベットに作用する波力は合田 (1973) の波圧公式により評価した．鉄筋のせん断強度は， $\tau_c = 80\text{N/mm}^2$ として，許容応力度法により安全性の照査を行った．ここでは，設計の際に護岸天端の余裕高や安全率の余裕などの設計裕度は考慮せず，護岸天端高は越波流量が許容越波流量に一致する高さとし，鉄筋量は鉄筋の呼び径に合わせるのではなく，安全率が1となるように必要鉄筋量を決定した．

このようにして決定した堤体に対して上記の温暖化シナリオにしたがって潮位および沖波の出現確率を変化させて，越波およびパラベットの安定性に対する性能限界沖波波高を求め検討を行った．

越波に関する性能限界沖波波高は平均海面の上昇に伴う水深の増加と天端高の減少を考慮して，所定の許容越波流量 (ここでは， $0.02\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) となるように高山ら (1982) の方法を用いて繰り返し計算によって沖波波高を逆算することとした．しかしながら，高山らの方法は，平均越波流量算定図 (例えば，合田, 2008) をモデル化したものであるため，天端のわずかな変化に対する微妙な越波流量の変化までは表現できず，このようにして求めた性能限界波高はやや階段状となる．そこで，2年

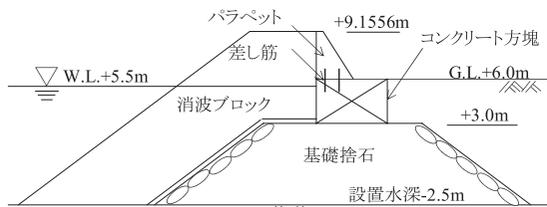


図-3 沖波の出現頻度と性能限界沖波波高

表-1 照査項目および設計条件

モデル	照査項目	被災判定の基準	初期の設計換算沖波波高 (m)	周期 (s)
消波ブロック被覆護岸	越波流量の評価	越波流量 $0.02\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ 以上	3.91m	8.0s
	パラベットの耐波安定性	差し筋の許容応力度法による安全率1.0以下		

ッチで100年分の性能限界波高を上記のようにして求めた後、B-Splineを用いて平滑化するとともに補間し、0.2年ピッチで100年分の性能限界波高を算出した。

パラベットの安定性に対する性能限界沖波波高については、合田 (1975) の碎波変形モデルと合田 (1973) による設計波力公式を用い平均海面の上昇に伴う水深の増加と天端高の減少を考慮して、鉄筋のせん断破壊に対する安全率が1となるように繰り返し計算により逆算した。パラベットの安定性に関する性能限界沖波波高は、比較的なめらかな性状を示したが、越波流量と同じレベルでの検討を行うため、越波と同様にB-Splineによる補間を行い、0.2年ピッチで100年分の性能限界波高を算出した。

性能限界波高の評価結果の例として、海面上昇と外力の増大が同時に進んだ場合の越波に対する性能限界沖波波高を図-4に示す。

なお性能限界波高を指標とする方法は、汎用性に課題があるため、ここでは検討の対象から除外した。

(3) 指標の活用法とその評価

図-5は、護岸の越波を対象とした被災遭遇確率の経時変化であり、温暖化影響がない場合の被災遭遇確率の経時変化も併せて示した。設計供用期間 (100年) に対する被災遭遇確率 (ここでは0.63) と同等以下になることを補修・補強の実施の基準とすれば、海面のみ変化させた場合で50年後、沖波の確率分布も変化させた場合37年後までには補修・補強が必要と判断できる。意思決定を明確にするために被災遭遇確率に被害が想定される範囲の資産額を乗ずることによって、被害の平均想定額として評価することも可能である。これによって補修・補強時期の判断を行うことも可能となる。なお、経過時間 t における平均想定被災額 \bar{C} は

$$\bar{C} = f(t)C \dots\dots\dots (14)$$

と表すことができる。

図-5と同じ条件のもと式 (10) で定義される残存再現期間を示したのが図-6である。前述のように、性能限界沖波波高から算出される被災遭遇確率が設計供用期間に対する当初の被災遭遇確率に一致するときに残存再現期間が0年となる。残存再現期間が0年となることで構造物の保有性能が完全に失われるわけではないが、この図

により残存再現期間が0年となる前に構造物の補修・補強を実施するべきであることが強調できる。

沖波の確率分布の時間変化がある条件で、初期余裕高の効果を示したものが図-7である。当然ではあるが、初期における天端の余裕高が高いほど、被災遭遇確率が設計供用期間における当初の被災遭遇確率に到達するまでの期間は長くなる。なお、台風の巨大化による沖波波高の増大を考慮しなくても、海面上昇によって構造物設置位置における水深が深くなるため、余裕高を0.5m設けた場合の被災遭遇確率は供用年数における被災遭遇確率よりも高くなることに注意が必要である。

補修補強時期の違いによる被災遭遇確率の相違について評価したものが図-8である。この図は、20年後あるいは40年後に天端を0.2m嵩上げしたときの被災遭遇確率を示したものである。式 (8) において説明したように、被災遭遇確率は過去の外力の履歴には依存しないため、

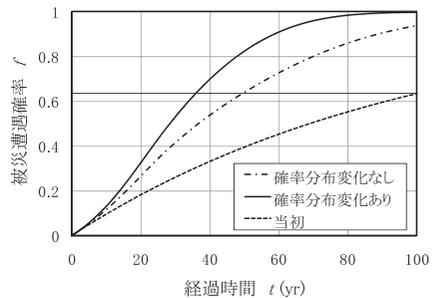


図-5 温暖化に伴う被災遭遇確率の変化

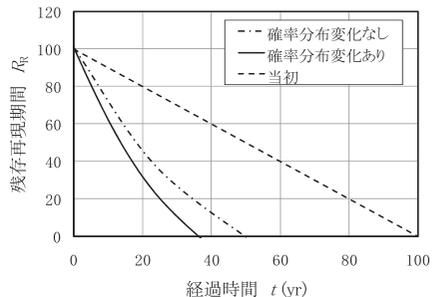


図-6 温暖化に伴う残存再現期間の経時変化

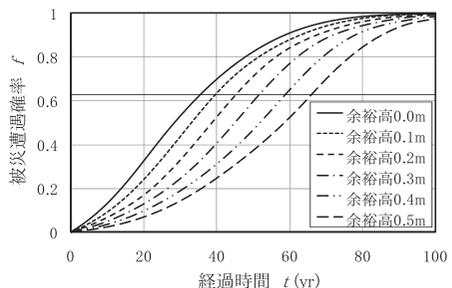


図-7 被災遭遇確率に及ぼすパラベット天端の余裕高の効果 (確率分布の変化がある場合)

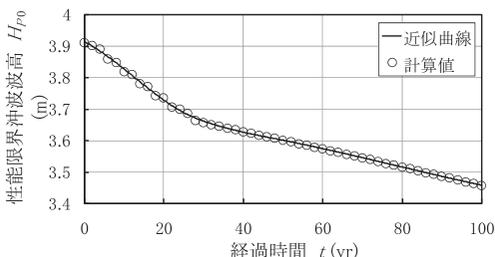


図-4 護岸の越波に対する性能限界沖波波高の評価例

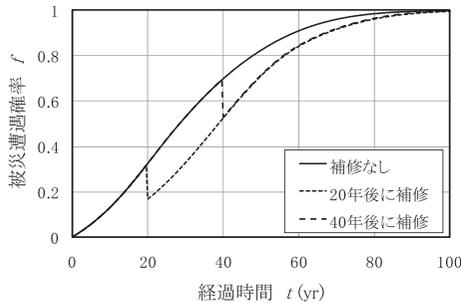


図-8 補修時期の違いによる被災遭遇確率の変化

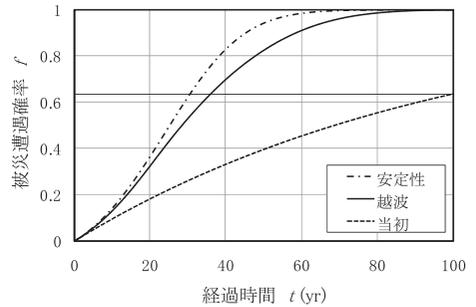


図-9 パラベットの安定性と越波流量の被災遭遇確率の比較

高上げ後は初期状態で0.2m高上げたときの被災遭遇確率の曲線に移行する。したがって、早めに補強することによって被災遭遇確率を早い時期から低くすることができるため、被災リスクの軽減が可能となる。一方で、補強が遅くなったとしても最終的な被災遭遇確率は変わらないので、観測データ等に基づき海面上昇や台風の巨大化による高波浪化の影響を見極めた上で対策することも戦略的には可能である。

また、図-9はパラベットの耐波安定性と越波について被災遭遇確率の変化を示したものである。この図より、本研究で提案した手法を用いることによって、パラベットの耐波安定性と越波など性能の異なるものについても横並びの評価が可能となる。このことは本手法の優位性を表わすものである。本条件の場合、パラベットの安定性の方が被災に遭遇する可能性が高いので、まず先にパラベットの安定性に対する補強を急ぐべきであることが容易にわかる。

4. おわりに

地球温暖化適応策の実施時期等の意思決定のため、海域施設における性能評価の概念として性能限界波高を新たに提案した。この概念を用いて地球温暖化適応策を考える際の評価指標として性能限界波高、被災遭遇確率および再現期間を用いることを提案するとともにケーススタディにより考究し、その有用性を明らかにした。

なお、護岸天端の沈下などの構造物の性能劣化を性能限界波高によって表現することで、外力の変化に伴う性能の低下のみならず構造物自身の性能の劣化についても評価できるなど本指標の応用範囲は非常に広いことを明

らかにした。

設計公式は、入力条件である波高を逆算するには設計されていないため、設計公式自体も性能限界波高の評価に適したものとする必要がある。

最後に、本研究は土木学会海岸工学委員会温暖化適応策検討小委員会の活動をとおして得られた成果であり、本研究を遂行するに当たり多くの方々のご助言をいただいた。特に、東京大学佐藤慎司教授、茨城大学三村信夫教授、同じく横木祐准教授、東京海洋大学岡安章夫教授、岐阜大学小林智尚教授、港湾空港技術研究所栗山善昭海洋水工部長、農村工学研究所丹治肇室長には有益なご意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

合田良実 (1973)：防波堤の設計波圧に関する研究，港湾技術研究所報告，第12巻，第3号，pp. 31-69。
 合田良実 (1975)：浅海における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp. 59-106。
 合田良実 (2008)：耐波工学－港湾・海岸構造物の耐波設計－，鹿島出版会，430p。
 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，港湾技研資料，No. 973，50p。
 高山知司・永井紀彦・西田一彦 (1982)：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告，第21巻 第2号，pp. 151-205。
 森 信人・岩嶋亮太・安田誠宏・間瀬 肇・T. H. Tom (2009)：地球温暖化予測に基づく全球の海上風・波浪の将来変化予測，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol. B2-65，No. 1，pp. 1271-1275。
 IPCC (2007)：Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapter 10, Cambridge Univ. Press, pp. 747-845.