

ライフタイムコスト最小設計法

——補修を考慮した防波堤の設計——

鹿島遼一*・島田真行*・山本正明**

奥津一夫***・今泉正次****

1. はじめに

一般に、土木構造物は、道路舗装、盛土等の一部の構造物を除いて、耐用期間中に被災により補修が必要となる可能性がほとんどないように設計される。ところが、海岸構造物は建設される環境の厳しさのために損傷を受ける例が多い。これは海岸構造物特有の外力である波力を考えると、ある波浪条件を設定して構造物を設計しても、構造物がそれを越える大波に遭遇しないという保証はなく設計波浪以上の波により損傷を受けるためである。構造物の建設位置が大水深化する最近の傾向にあっては、100年に一度、200年に一度あるいはそれ以上の波浪に対して損傷を受けないように設計すると建設費用が非常に高いものになる可能性がある。そこで、構造物が必要機能を満足していれば一時的にはある程度の損傷を許容する考え方も成立する。

本論文では構造物の耐用期間中に生じる総費用を低減することを目的として、従来の損傷を許さない設計法に対して、復旧可能程度の損傷と補修を前提とするライフタイムコスト最小設計法を提案すると共に、この設計法が実際の問題に適用し得ることを示した。

2. 基本的考え方

提案する設計法は、設計段階から耐用期間中に起こりうる構造物の被災とその復旧を考慮するものである。すなわち、構造物の耐用期間を明確に定義した上で、耐用期間中に起こりうる作用外力を確率論的にとらえ、それに伴い生じる損傷量を評価し、復旧・補修を前提とすることにより構造物の総費用（初期建設費、補修費用、構造物の機能低下に伴う損失費の総合計）の低減を図るものである。図-1に設計法の概念を示す。構造物が耐用期間中に遭遇する異常な作用外力により損傷を受けても、構造物の必要最小限の機能レベルは確保される範囲で総費用（CT）が最小となる設計を最適設計と考える。耐用期間中に必要となる費用には期待費用（Expected

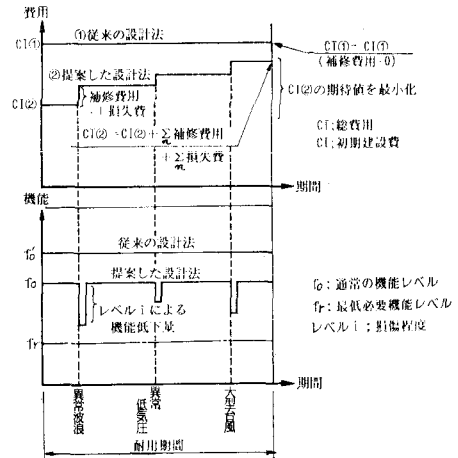


図-1 提案した設計法の概念

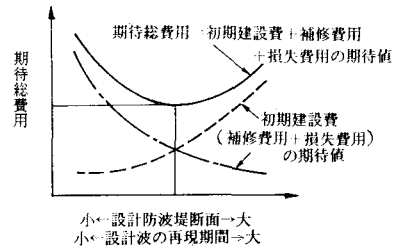


図-2 期待総費用最小化基準

Cost) の概念を導入し、最適化には期待総費用最小化規準 (Expected Total Cost Criterion) を用いる。図-2に期待総費用最小化規準の概念を示す。

期待総費用は次式で定義する。

$$ECT = CI + ERC + EDC \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、ECT: 期待総費用

CI: 初期建設費

ERC: 補修費用の期待値

EDC: 構造物の機能低下に伴う損失費の期待値

$$ERC = \sum_{\text{レベル}} \sum_{\text{回}} n \cdot CM(i) \cdot p(i, n) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$EDC = \sum_{\text{レベル}} \sum_{\text{回}} n \cdot CD(i) \cdot p(i, n) \quad \dots\dots\dots (3)$$

* 正会員 工 修 (財)電力中央研究所 我孫子研究所

** 正会員 Ph.D. 鹿島建設(株) 土木設計本部

*** 正会員 工 修 鹿島建設(株) 土木設計本部

**** 正会員 工 修 五洋建設(株) 土木設計部

ここに, レベル i : 損傷程度

$CM(i)$: レベル i の損傷を受けた時の補修費用

$CD(i)$: レベル i の損傷を受けた時の機能低下に伴う損失費

n : レベル i の損傷を受ける回数

$p(i, n)$: レベル i の損傷を n 回受ける確率

3. 提案した設計法の手順と特徴

海岸構造物の従来の設計思想の基本的流れを 図-3 に, 提案した設計法の基本的流れを 図-4 に示す. 従来の設計においては, 対象海域の波浪観測データ (無い場合は波浪推算結果) を統計処理することにより, ある再現期間を有する沖波波浪 (N 年期待値の波) を設計用波浪条件として設定する. 波の変形を考慮して計画地点の設計波浪を決定し, この波浪に対して構造物を設計する.

一般に, 波の再現期間 N 年は構造物の耐用年数 (L) の 2~3 倍にする場合が多いが, このように設計波浪を設定してもその波浪を越える波浪が来襲しないことが保障されるわけではない. すなわち, 耐用年数 L 年の構造物が再現期間 N 年の波浪以上の波に遭遇する確率 (p) は統計理論より

$$p = 1 - \exp\left[-\frac{L}{N}\right] \quad \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる. 例えば, 耐用年数 20 年, 再現期間 50 年

とすると, $L=20$ 年, $N=50$ 年であるから (4) 式より $p=0.33$ となり, 構造物が設計波浪と決めた波以上の高波に遭遇する確率は 33% になる. 現状の設計では, この設計波浪を越える高波に対する備えとして安全性照査に用いる各種の安全率 (限界状態設計法では荷重係数) が考えられるが, 耐用年数・再現期間・安全率の三者に明確な関係がない. そのため, 波浪条件を設定する場合, 再現期間が短かすぎると耐用期間中に期待される来襲波浪に対して安全性が著しく低下し, 長すぎると安全性は高くなるが建設費が膨大となる可能性がある. 従って, 耐用期間中の必要な安全性を確保した上で, 経済的に構造物を設計する設計法が必要であると考えられる.

図-4 に示すように, 提案した設計法では, 従来の設計において一つの確定値として与えられる波浪条件を確率変数として取り扱う. 確率変数として与えられた波浪に対してそれぞれ構造断面を設定し, それらの断面の中から期待総費用最小化標準ならびに高波による損傷に伴う機能低下量から最適断面を決定する. そのため, 従来の設計法と比して次の特徴がある.

- (1) 最適化規準として期待総費用最小化規準を用いるので, 耐用期間中に発生するであろう費用 (初期建設費, 補修費用, 構造物の機能低下による損失費の総合計) を考えると最も経済的な設計となる.
- (2) 再現期間が短い波浪から長い波浪まで幅広い波浪に対して構造物の損傷量を検討するので, 耐用期間中

に遭遇する可能性があるすべての波浪に対して構造物の安全性あるいは損傷程度を把握することが出来る.

- (3) 耐用期間中に遭遇する可能性がある最大波浪により損傷した場合にも対象構造物が本来有すべき最低機能を確保することが出来る.

4. 事例研究

提案した設計法の実構造物への適用性を調べるために防波堤を対象とした事例研究を行った.

(1) 対象構造物

防波堤の形式, 作用荷重, 損傷状態は様々である. 例えば,

形式	傾斜堤	荷重	波浪
	直立堤		地震
	混成堤		
	浮防波堤		
損傷状態	傾斜		
	滑動		
	散乱		
	洗掘		

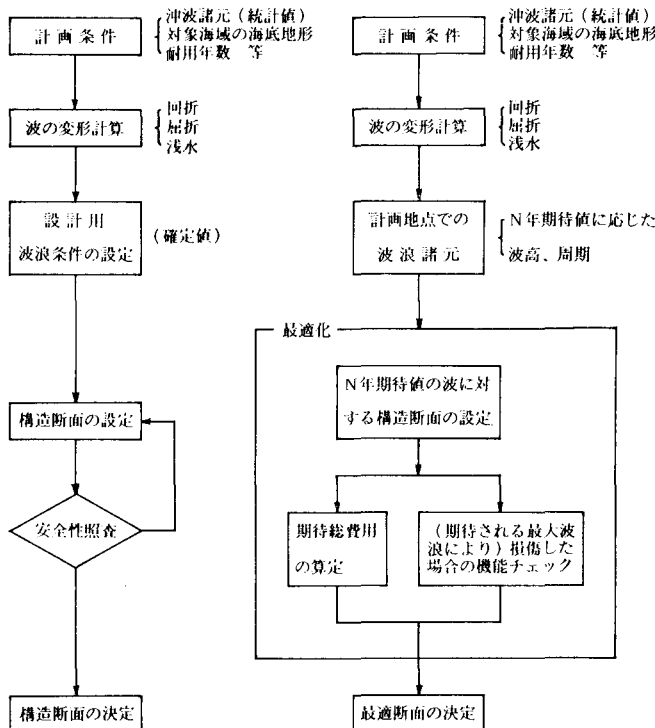


図-3 従来の設計フロー図

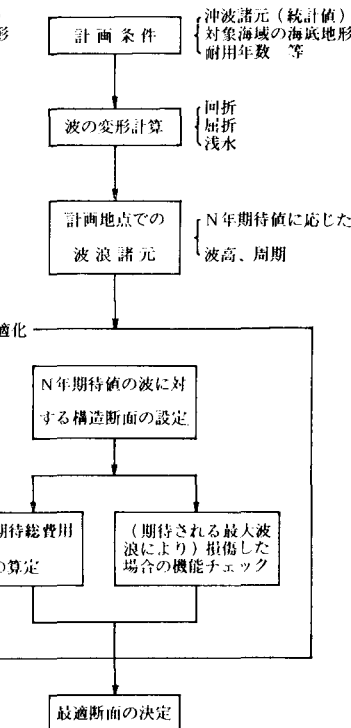


図-4 提案した設計法のフロー図

防波堤の被災事例を調べると、圧倒的に波浪による被災例が多く、中でも傾斜堤の被覆工や混成堤の消波工の散乱が数多くみられる。被覆工・消波工の設計法は実績の裏付けを有する確定的手法としてある程度確立されている上、被害率という確率的概念を導入し得るデータが不十分ながら揃っている。従って、事例研究は、消波ブロック積傾斜堤タイプを対象とし、損傷状態として波浪によるブロックの散乱を考える。ただし、防波堤は地震や波による洗掘に対して安定した支持地盤上に設置されることを前提とし、問題を単純化するために損傷の検討は断面のみで行い平面的な拡がりとは考慮しない。

(2) 検討条件

a) 波浪条件

検討は日本沿岸のモデル地点の波浪条件をもとに実施した。図-5 に波高と再現期間の関係を示す。図には計画地点の波高を浅水変形計算(周期 13 sec, 海底勾配 1/100)により求めた結果も合せ示す。

b) 水深

HWL 時で 15 m とする。

c) 耐用年数

20 年と 40 年の 2 ケースについて検討する。

(3) 断面決定方法

防波堤断面は消波ブロック 2 層被覆とし、消波ブロック重量は次式に示すハドソン式により求める。

$$W = \frac{r_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (5)$$

ここに、

- W: 消波ブロックの必要最小重量 (t)
- r_r : ブロックの空中単位体積重量 (t/m^3)
- S_r : ブロックの海水に対する比重
- α : 斜面が水平面となす角
- H: 設計計算に用いる有義波高 (m)

K_D : 被覆材及び被害率によって定まる定数

($K_D = 8.3$)

図-6 に再現期間と必要消波ブロック重量の関係を示す。

(4) 損傷量の算定

提案した設計法では断面を決定した波浪を越える波に対して損傷量を算定する必要がある。消波ブロックの損傷量は図-7 に示す被害率と K_D 値の関係より推定する。すなわち、(5) 式を変形して K_D を波高の関数として表わす。

$$K_D = \frac{r_r H^3}{W (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (6)$$

この式より K_D が求まれば図-7 を利用して被害率(損傷率)が求まる。図-8 に損傷率と設計確率年の関係を示す。例えば、設計確率年を 30 年として設計すれば、50 年期待値の波、100 年期待値の波、200 年期待値の波が来襲した場合、それぞれ、1.4%、3.6%、5.4% の損傷を受ける。

(5) 期待総費用の算定

耐用期間中の期待総費用は(1)式より求める。消波ブロック積傾斜堤の場合、消波ブロックが多少散乱しても消波性能はほとんど低下しないので今回の検討では EDC については考慮しない。

a) 初期建設費

図-9 に初期建設費と設計確率年の関係を示す。防波堤断面は消波ブロック積傾斜堤の標準的なものを考えることとし、天端高は次式で定義した。

$$\text{天端高} = H.W.L. + 0.6 \times (H_{1/3}) \quad (7)$$

ここに、 $H_{1/3}$: 防波堤前面での有義波高

b) 補修費用の期待値

補修費用の期待値 (ERC) は式 (2) を変形して、

$$ERC = \sum_k C(k+1) \{f_N(k) - f_N(k+1)\}$$

ここに、

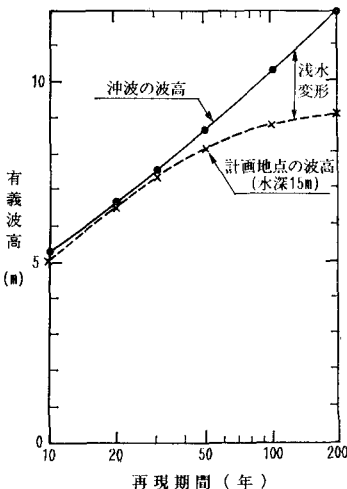


図-5 波浪条件

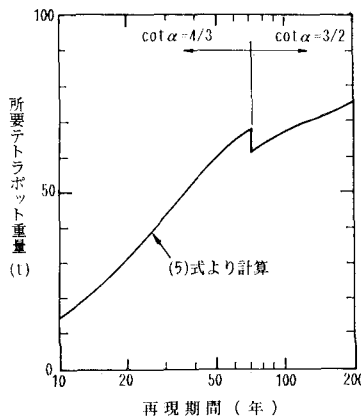
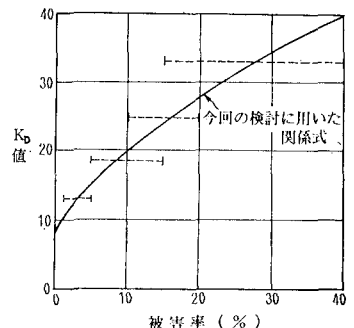


図-6 再現期間と消波ブロック重量



注)『港湾の施設の技術上の基準・同解説』を参考に換算した

図-7 K_D 値と被害率

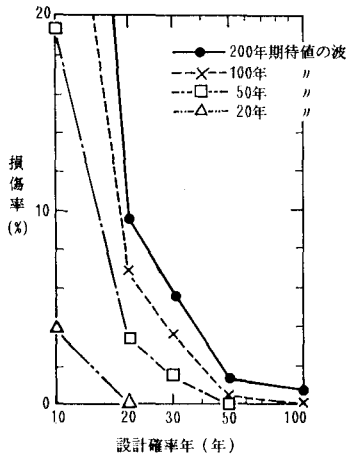


図-8 損傷率と設計確率年

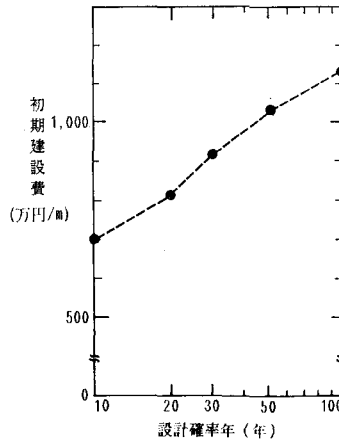


図-9 初期建設費と設計確率年

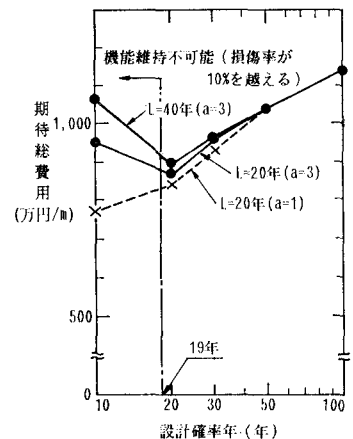


図-10 期待総費用と設計確率年

$C(k)$: $N(k)$ 年期期待値の波による損傷に対する補修費用単価 (円/ m^3)

$D(k)$: $N(k)$ 年期期待値の波に対する損傷量 (m^3)

$f_N(k)$: $N(k)$ 年期期待値以上の高波に遭遇する回数の期待値 (回)

で定義する。

i) 補修費用に関する仮定

補修費用は損傷程度・補修数量・施工稼働率・運搬船の回航条件等により著しく異なるものであるが、本検討では、 $C(k)$ は損傷の程度・規模によらず一定であり、消波ブロックの初期建設単価に比例するとした。

$$C(k) = a \times [\text{消波ブロックの建設単価}] \text{ (円/ m^3)}$$

ここに、 a : 補修する場合の消波ブロック単価の割増し

ii) 損傷量の評価法

図-8 から求める損傷率と断面の消波ブロック数量の積より求めた。

$$D(k) = [\text{損傷率}] \times [\text{消波ブロック数量}] \text{ (}$$

iii) N 年波を超える高波遭遇回数の期待値

波の発生確率がポアソン分布に従うとすると、耐用期間 L 年中に N 年期期待値の波以上の高波に x 回遭遇する確率は

$$p_N = \frac{(\nu L)^x}{x!} e^{-\nu L}$$

ここに、 $\nu = 1/N$

である。従って、耐用期間中に N 年期期待値の波以上の高波に遭遇する回数の期待値は

$$f_N = \sum_{x=1}^{\infty} x p_N = \sum_{x=1}^{\infty} x \cdot \frac{(\nu L)^x}{x!} \cdot e^{-\nu L} \\ = \nu L = L/N$$

である。

c) 期待総費用の算定

以上の手続により (1) 式を計算し求めた耐用期間中の期待総費用を図-10 に示す。図-10 には耐用期間 20 年、40 年の 2 ケースを示している。両ケースとも前述の補修単価割増し係数 (a)=3 としている。 $a=3$ とは被災する消波ブロック数は少ないことや、損傷個所の成形等補修作業が複雑多様になることを考慮して補修単価は建設時単価の 3 倍であるということである (図には参考として耐用年数 20 年、 $a=1$ の場合も示す)。

耐用年数 20 年、40 年の場合とも顕著な相異は見られず設計確率年 20 年で期待総費用は最小となる。すなわち、消波ブロック損傷時の補修単価が建設時単価の 3 倍程度であれば、設計確率年を 20 年前後に設定することが、たとえ、耐用期間中に損傷し、その補修費を考慮しても経済的には最適であると言える。

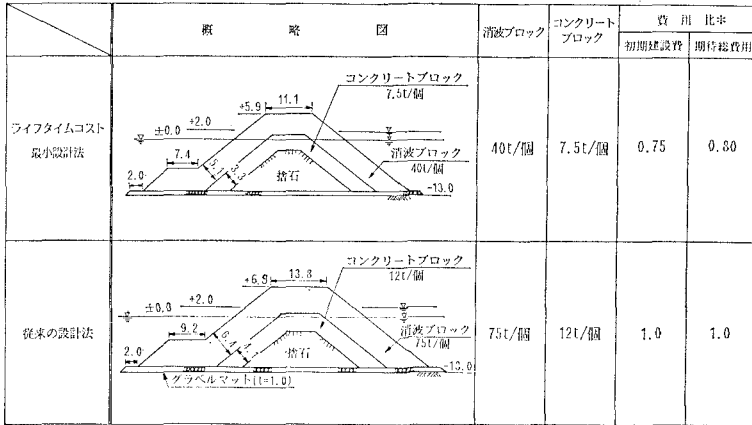
(6) 損傷した場合の機能チェック

(5) の検討により期待総費用が最小となる設計確率年は $a=3$ の場合 20 年であることが明らかになったが、更に、耐用期間中に期待される最大波浪に対して機能性の維持をチェックする必要がある。機能性維持検討用最大波は構造物の安全上あるいは経済上の重要度より決定されるべきものであるが、本検討では、200 年確率波を用いる。図-8 によれば、20 年確率波に対して設計した断面は 200 年期期待値の波に遭遇しても損傷率はせいぜい 10% 以下であり、防波堤の機能に重大な影響はないと考えられる。

なお、 $a=1$ の場合には設計確率年 10 年以下で期待総費用が最小となるが、この波に対して設計した断面が 200 年確率波に遭遇した場合損傷率は 50% を越えてしまい防波堤機能が著しく低下する恐れがある。

(7) 最適断面の決定

以上の検討より、 $a=3$ の場合は設計確率年を 20 年とした場合が最も経済的となり、200 年確率波に対しても十分機能維持可能であるので、20 年確率波に対した断



*耐用年数20年の場合

図-11 提案した設計法と従来の設計法の設計断面の比較

面が最適となる。

なお、参考として示した $a=1$ の場合には設計確率年を10年以下とした場合が最も経済的になるが、200年確率波に対しては機能を維持することが出来ないため、10年確率波に対して設計した断面は最適とはならない。この場合には経済性ではなく機能面から最適断面が規定される。例えば、損傷率が10%を超えれば機能が維持されないと考えると、図-10示すように設計確率年は19年としなければならない。

このように、期待総費用最小化規準をもとに最適断面を求めることを基本とするが、来襲する最大高波に対する損傷程度および機能維持性を考慮して最終的な構造断面を決定する必要がある。

最後に提案した考え方で設計した断面と従来の考え方で設計した断面を比較する。従来の考え方では一般に設計波浪の再現期間は耐用年数の2～3倍であるので、20年 $\times$ 2.5=50年とすると図-11に示すように、初期建設費で約25%、期待総費用で約20%のコストダウンが可能であることが分かる。

5. 結 言

耐用期間中にある程度の損傷とその補修を前提とした

ライフタイムコスト最小設計法を提案し、消波ブロック積傾斜堤を対象として作用外力を波力に限定した適用性の検討を行った。その結果、この設計法は実際の問題に適用可能であり、従来の設計法に比して経済的かつ十分な安全性を有する防波堤が設計可能との見通しを得た。今後、さらに検討する必要がある事項として、

- 1) 波浪条件と損傷量の関係の精度向上
- 2) 損傷量と機能低下の関係の定量的な評価法
- 3) 防波堤損傷時の背後の港湾機能の評価法
- 4) 防波堤の平面的な損傷量の評価法

等があげられる。又、ここで提案した設計法は従来の設計法の延長線上にあると考えられるので、実際の設計に適用する際には、予算年度内に要求される完工量などの制約条件も考慮して最適案を選定することが必要である。

なお、本報告は(財)電力中央研究所、五洋建設(株)、鹿島建設(株)の三者による「海岸構造物新設計法検討会」で実施した共同研究の成果である。

参 考 文 献

- 1) 鹿島遼一・今泉正次・戸田泰和：被災事例から見た防波堤・防波護岸の波浪被災特性，第33回海岸工学講演会講演集，1986。