

運輸省港湾技術研究所

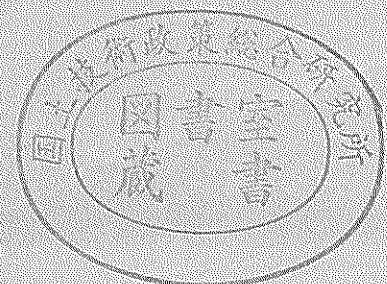
港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

MINISTRY OF TRANSPORT

VOL.38 NO.2 June 1999

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第38巻 第2号 (Vol.38, No.2), 1999年6月 (June 1999)

目次 (CONTENTS)

1. 潮位変動および密度の非一様性を考慮した砂浜海岸地下水の非定常過程に関する数値解析
.....内山雄介..... 3
(Numerical Analysis on Groundwater Flow in Sandy Beaches Considering Tidal Fluctuation and Density Distribution
.....Yusuke UCHIYAMA)
2. 久里浜湾の流れ特性と生態系に関する研究
.....日比野忠史・豊田政史・西守男雄・細川恭史・鶴谷広一..... 29
(Current Field Characteristics and Ecosystem Investigations in Kurihama Bay
...Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Dan-o NISHIMORI, Yasushi HOSOKAWA and Hiroichi TSURUYA)
3. 海水交換型防波堤の透過量評価手法の提案
.....西守男雄・日比野忠史・豊田政史・細川恭史・石原弘一・森下正志・鶴谷広一..... 63
(Estimation of Water Mass Exchanged through Water Exchangeable Breakwater
.....Dan-o NISHIMORI, Tadashi HIBINO, Masashi TOYOTA, Yasushi HOSOKAWA,
Hirokazu ISHIHARA, Masashi MORISHITA and Hiroichi TSURUYA)
4. 粘性土のセメンテーションによる強度発現メカニズム
.....土田 孝・湯 怡新..... 99
(Strength Mobilization due to Cementation of Clay
..... Takashi TSUCHIDA and Yi Xin Tang)
5. 港湾空港事業における軽量混合処理土工法の開発と適用事例
.....土田 孝..... 131
(Development and Use of Foamed Treated Soil in Port and Airport Project
..... Takashi TSUCHIDA)
6. 海洋環境 (酒田港20年) に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響
.....横田 弘・秋山哲治・濱田秀則・三上 晃・福手 勤..... 169
(Effect of Degradation of Concrete on Mechanical Properties of Reinforced Concrete Beams
Exposed to Marine Environment (for 20 years in Sakata)
.....Hiroshi YOKOTA, Tetsuji AKIYAMA, Hidenori HAMADA, Akira MIKAMI and Tsutomu FUKUTE)
7. 鋼直杭式棧橋の地震時保有耐力に関する実験および解析
.....横田 弘・川崎 進・菅原 亮・Hazem El-Bakry・川端規之..... 223
(Ultimate Structural Performance of Steel-Pile Supported Wharves
... Hiroshi YOKOTA, Susumu KAWASAKI, Ryo SUGAWARA, Hazem El-Bakry and Noriyuki KAWABATA)
8. 防波堤ケーソンの自動設置システムの開発 (第二報) - アンカーワイヤ方式の水力模型実験による検討 -
.....米山治男・白石 悟・名里健吾・高橋英俊..... 257
(Development of Automatic Installation System of Breakwater Caisson (2nd Report)
- Evaluation of Anchor Wire System by Hydraulic Model Experiments -
..... Haruo YONEYAMA, Satoru SHIRAIISHI, Kengo NAZATO and Hidetoshi TAKAHASHI)
9. RC港湾構造物の塩害に係わる環境要因の定量的評価に関する研究
.....濱田秀則..... 299
(Quantitative Evaluation of Environmental Factors Related to Chloride Attack of RC Harbor Structures
.....Hidenori HAMADA)

10. 破壊確率を考慮した防波堤のライフサイクルコストと許容破壊確率
.....長尾 毅・松渕 知..... 395
(Studies on Life-Cycle Cost and Allowable Failure Probability of Breakwaters
..... Takashi NAGAO and Satoru MATSUBUCHI)
11. 係留施設のライフサイクルコスト発生と維持管理意志決定支援システムの構築に関する基礎的研究
.....松渕 知・横田 弘..... 423
(Life-Cycle Cost Analysis of Berthing Facilities and Development of A Decision Support System
during their Maintenance Work
..... Satoru MATSUBUCHI and Hiroshi YOKOTA)
12. 大規模地震時におけるコンテナクレーンの脚の浮き上がりに関する模型実験
.....江頭隆喜・山本俊介・田邊俊郎・中島 晋・菅野高弘・宮田正史・柏崎昭宏・金山維史..... 475
(Experiment on Uplifting of Legs of Container Cranes under Strong Earthquakes
..... Takaki ETOU, Shunsuke YAMAMOTO, Toshiro TANABE, Susumu NAKASHIMA・
Takahiro SUGANO, Masafumi MIYATA, Akihiro KASHIWAZAKI and Tadafumi KANAYAMA)

破壊確率を考慮した防波堤の ライフサイクルコストと許容破壊確率

長尾 毅*・松 淵 知**

要 旨

本報告は、防波堤の破壊確率を考慮したライフサイクルコストの検討を行ったものである。ライフサイクルコストとしては、初期建設費用に加えて、期待被災回数と被災時復旧費用を考慮し、間接的被害費用は対象外としている。期待被災回数は、破壊確率に影響を及ぼす高波の発生がポアソン過程であると仮定して算定し、破壊確率は信頼性理論を用いて滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードを考慮した値とした。復旧費用の算出にあたっては、被災の程度を大規模なものから軽微なものまで3種類考慮した。さらに、復旧費用と初期建設費を同時点で評価するために、社会的割引率を考慮している。

ライフサイクルコストの検討は、ある1断面の防波堤を対象に、耐用期間および荷重再現期間を10、20～100年の10種類設定した。各耐用期間ごとにライフサイクルコストが最小となる断面の許容破壊確率を算出するとともに、現行設計法によるライフサイクルコストとの比較などを行った。

本研究による主要な結論は次の通りである。

- ①防波堤の破壊確率を考慮したライフサイクルコストの算出方法をレベル2信頼性設計法を用いて定式化した。
- ②耐用期間および荷重再現期間の変化に伴うライフサイクルコスト、最適な許容破壊確率の変化について考察した。
- ③ライフサイクルコスト最小化の観点から適切な防波堤の破壊確率は、検討対象とした断面に関しては、耐用年数にかかわらず、耐用年数に等しい再現期間の波に対して 10^{-2} のオーダーであった。
- ④現行設計法による安全性水準は、ライフサイクルコストに関しても概ね妥当であることを確認した。しかしながら、信頼性理論を適用したライフサイクルコスト最小化をはかることにより、建設コストを現行設計法による値よりも減じることができることを示した。

キーワード：信頼性設計、ライフサイクルコスト、許容破壊確率、防波堤

* 計画設計基準部 主任研究官

(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 PHONE/FAX : 0468-44-5037 E-mail : nagao@cc.phri.go.jp)

** 計画設計基準部 設計技術研究室 研究官

Studies on Life-Cycle Cost and Allowable Failure Probability of Breakwaters

Takashi NAGAO*

Satoru MATSUBUCHI**

Synopsis

This present report concerns the life-cycle cost of breakwaters in view of failure probability. Life-cycle cost of breakwaters is defined as the sum of initial construction cost and restoration cost multiplied by expected times of failure.

Failure probability of a breakwater has been calculated considering the failure probability against sliding, overturning, and foundation failure. By modeling the occurrence of high wave events with the Poisson process, expected times of failure have been estimated. Restoration cost has been estimated considering 3 damage levels. Life-cycle cost of a breakwater with 10~100 years of lifetime has been calculated.

The major results drawn from the study are as follows:

- ① The way of calculating the life-cycle cost of breakwaters in terms of the level 2 reliability based design method has been generated.
- ② The life-cycle costs and allowable failure probabilities of a breakwater with various lifetimes and return periods of waves have been discussed.
- ③ Allowable failure probability of a breakwater is found to be of the order of 10^{-2} from the viewpoint of minimizing the life-cycle cost.
- ④ Safety level by the present design method is comparatively appropriate in view of life-cycle cost. However, construction cost can be reduced by applying the reliability based design method and minimizing the life-cycle cost.

Key Words : Reliability Based design, Life-Cycle Cost, Allowable Failure Probability, Breakwater

* Senior Research Engineer, Planning and Design Standard Division

(3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 PHONE/FAX : 0468-44-5037 E-mail : nagao@cc.phri.go.jp)

** Research Engineer, Design and Construction Technology Laboratory, Planning and Design Standard Division

目 次

要 旨	395
1. まえがき	399
2. 信頼性設計法とライフサイクルコスト	399
2.1 破壊確率と安全性指標	399
2.2 目標安全性指標	400
2.3 ライフサイクルコスト	401
3. ライフサイクルコストと許容破壊確率の検討	403
3.1 検討条件	403
3.2 破壊パターンの設定	405
3.3 検討手法	409
3.4 ライフサイクルコストと許容破壊確率	413
4. まとめ	421
5. あとがき	421
参考文献	421
主要記号一覧	422

1. はじめに

構造物の設計においては、安全性の確保が最重要課題であったことは議論の余地がないところである。しかしながら、一般に安全性を高めることは建設コストを増加させることになるため、港湾構造物のように公共性が高い構造物の建設コストとして社会的に容認される値には自ずと上限があると考えられる。特に近年の社会経済情勢のもと、構造物の建設コストを合理的な範囲で縮減することが強く求められており、安全性と経済性の追求という、いわば二律背反的な性格を持つ要素を同時に確保することが、土木技術者に課せられた新たな課題であるといえる。

最適な安全性がいくらかという問いに対して簡単に答を提示することは非常に困難である。現状では、現在用いられている設計法が長年の実績を有する場合、その設計法が担保してきた安全性の平均値が最も適切な安全性水準であり、設計法を合理化することによって安全性を定量的にコントロールし、各施設の安全性を均一なレベルに保つことが最適であると考えられる方法が有力である。そのような設計法の合理性は、過大もしくは危険な設計の割合が減少するという点で説明される。

筆者らはこれまで、防波堤の全体系安全性を対象としてこうした設計思想の適用に関する研究を行ってきた。設計の具体的ツールとしてはレベル1およびレベル2の信頼性設計法を用い、安全性の定量的制御方法を提案してきたものである^{1, 2, 3)}。安全性の平均値を現行設計法と信頼性設計法で一致させる場合、経済性は発揮されず建設コストは平均的に従来と同程度となる。このため筆者らは安全性の下限値を下回る割合を現行設計法と信頼性設計法で同程度に設定する手法についても検討を行っている。その場合、防波堤の提体重量は従来より3%程度減少させることが可能になる。それら一連の研究において対象としてきたのは、従来設計で考慮されてきた、再現期間が50年の波高を持つ波が1回作用することによる破壊可能性である。

一方、構造物の初期建設コストと、破壊の期待回数と期待復旧費を乗じたコストの和を耐用期間中の期待総費用と定義し、期待総費用が最小となる破壊確率が最適値であるという設計法もよく知られている。高山ら⁴⁾はこの手法を適用してレベル3信頼性設計法による検討を行っているが、支持力破壊については対象外としており、破壊形態を1つの形態に限定しているほか、被災復旧費を現在価格に変換するための社会的割引率などの概念は導入していない。

一般に、施設設計において、一定期間（ライフサイクル）にわたって関連するすべての経済効果を考慮し、それに基づいて評価を行う方法をライフサイクルコスト法と呼ぶ。ライフサイクルコスト（LCC）の算出にあたっては、資本金利などの影響も加味して供用期間中の総費用を算出する必要がある。

本報告は、ケーソン式防波堤を対象に、初期建設費、破壊確率と被災回数1回あたりの復旧費用を考慮した総復旧費用、資本金利の影響などを総合的に考慮したライフサイクルコストの検討をレベル2信頼性設計法を用いて行ったものである。対象とする波は耐用期間中に相当する再現期間の波に限定していない。またライフサイクルとしては、通常防波堤の耐用期間として想定される50年に限定せず、ライフサイクルの変化のライフコストへの影響についても検討を行った。

2. 信頼性設計法とライフサイクルコスト

2.1 破壊確率と安全性指標

本研究では、ライフサイクルコストと許容破壊確率を信頼性設計法を用いて検討する。このためここではまず、信頼性設計法について簡単な説明を行う。

信頼性設計法は確率論を援用した設計法で、構造物の破壊する確率を許容値以下におさめようとする設計法である。破壊確率の定量的な制御が可能であるという点で従来型の設計法よりも合理的であるといわれ、設計への適用が各方面において強く求められている。

信頼性設計法においては確率計算の精度に応じて3つのレベルがあるが、本研究で扱うのはレベル1およびレベル2の方法である。

ある破壊モードに対する耐力を R 、荷重を S とし、性能関数 Z を

$$Z = R - S \quad (1)$$

と定義する。 R と S は正の領域（ ≥ 0 ）をとり、それぞれ $N(\mu_R, \sigma_R^2)$ 、 $N(\mu_S, \sigma_S^2)$ の正規分布に従うとする。 R と S が互いに独立ならば、性能関数 Z は式(2)の正規分布に従うため、 Z の破壊確率 P_f は式(3)で与えられる。

$$N(Z_m, \sigma_Z^2) = N(\mu_R - \mu_S, \sigma_R^2 + \sigma_S^2) \quad (2)$$

$$P_f = \int_{-\infty}^0 f(Z) dZ = \int_{-\infty}^{-Z_m/\sigma_Z} \phi(z) dz = \Phi(-Z_m/\sigma_Z) \quad (3)$$

ここに,

- z : Z の規準化変数で, $z = (Z - Z_m) / \sigma_z$
- $\phi(z)$: 変数 z の確率密度で, 標準正規確率密度関数
- Φ : 標準正規確率分布関数 (累積確率を表す)

式(3)は, Z_m / σ_z によって破壊確率を規定できることを意味している. この値が安全性指標である. すなわち, 安全性指標 β は式(4)によって与えられる.

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (4)$$

図-1に示すように, 安全性指標 β は破壊をもたらす破壊点 ($Z=0$) から平均値 Z_m がどの程度離れているのかを表す尺度である. 破壊確率が小さくなるほど, 安全性指標 β は大きな値となる. 図-2に, 破壊確率 P_f と安全性指標 β の関係を示す.

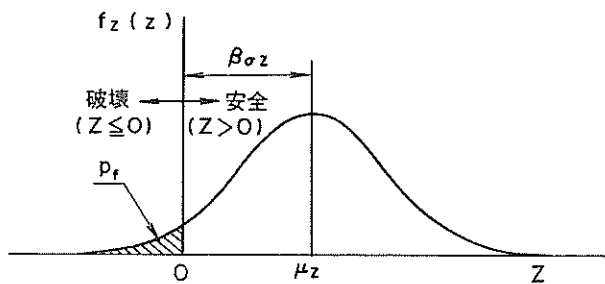


図-1 安全性指標⁵⁾

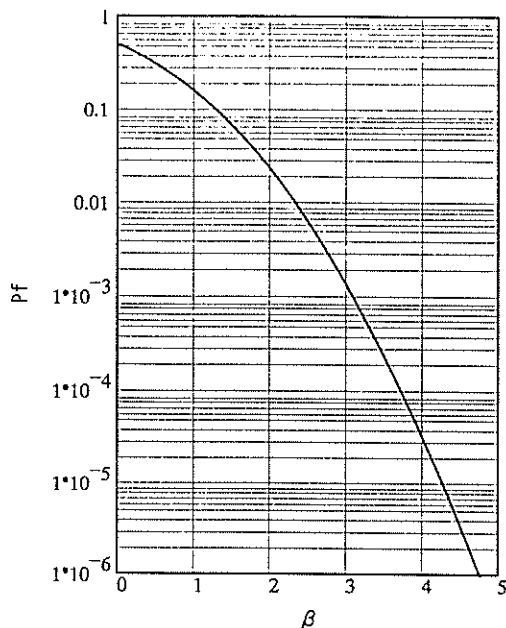


図-2 破壊確率と安全性指標の関係

2.2 目標安全性指標

信頼性設計法では安全性指標の目標値を定め, 実際の施設の安全性指標がその値を上回るように設定する. この目標値を目標安全性指標と呼ぶが, その定め方には以下のようなものがある⁵⁾.

①事故統計に基づく方法

事故・損傷が1年間に発生する確率を参考にして目標安全性を決定する方法.

②現行設計示方書へのキャリブレーションに基づく方法

現行の設計示方書により設計された構造物の安全性に基づき目標安全性を定める方法.

③他の災害危険性との比較による方法

構造物の破壊に伴う1人当りの死亡危険性を自然災害等による危険性以下に設定する方法.

④人的損失の危険性回避に要する投資効果による方法

構造物の破壊に伴う1人当りの死亡率を低減させるのに要する費用の大きさを評価の基準とする方法.

⑤期待総費用最小化に基づく方法

式(5)により定義される期待総費用 C_T を最小にする破壊確率を最適値とする方法.

$$C_T = C_i + P_f C_F \quad (5)$$

ここに,

C_T : 期待総費用

C_i : 初期建設費

P_f : 供用期間中の破壊確率

C_F : 破壊時損失費

これらのうち, 最もよく使用されるのが②の方法であり, 筆者らもこの方法によって防波堤の全体系安全性の照査方法を提案してきた¹²⁾. その理由は, 現在用いられている設計法はいくたびかの変遷を経て現在の手法が採用されているが, 基本的な安全性水準は変化しておらず, 長年の実績を有しており, かつ現在の設計法によって設計される構造物の安全性水準は妥当であると社会的にも容認されていると考えられるためである.

しかしながら, 近年の激しい社会経済情勢のもとで, 構造物の建設費用を可能な範囲で縮減しようとする試みが各方面でなされている. 設計面で費用を縮減しようとする場合, 安全性水準はこれまでよりも低下するため, 新しい安全性水準の妥当性についての合理的な説明が必要になる. その場合, 上記⑤に準じた方法, 供用年間のライフサイクルコストが最小となる安全性が最適な安全性であるという考え方が近年注目を集めており, 各方面

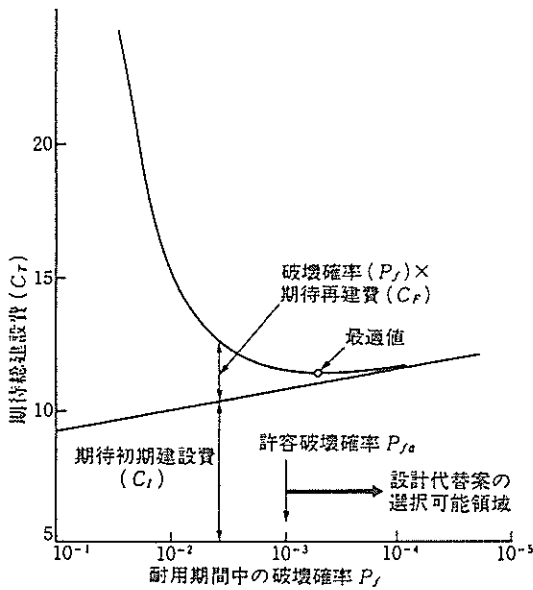


図-3 期待総費用⁶⁾

で盛んに研究がなされてきている。このため、本研究においても、⑤の手法をベースにした経済的尺度を基準とした目標安全性指標の検討を行う。したがって、現行の設計法による安全性水準にはかならずしもこだわらない。

2.3 ライフサイクルコスト

ライフサイクルコストとは生涯費用と訳されるもので、一般に建築物においては、企画設計費、建設費、運用管理費、および廃棄処分にかかる建築物の生涯に必要なすべてのコストを指す⁹⁾。建築物においては運用管理費が占める割合が高く、建設費の数倍になることもある。

港湾構造物のうち防波堤については、いったん建設してしまえば、被災しない限り基本的にメンテナンスフリーであることから、運用管理費は必要ない。また、耐用期間を過ぎれば撤去されるものでもないため、廃棄費用も考慮する必要はない。このため、建設費と被災時の費用がライフサイクルコストを構成する主要な因子であると考えてよい。

被災時の費用は、直接被害費用（物理的な復旧に要する費用）に加えて、社会経済面における間接被害費用が存在する。間接被害費用は、防波堤の被災に起因する構内静穏度の劣化により、荷役稼働率が低下することによる様々な被害費用である。こうした間接被害費用は、対象となる防波堤の機能、形状および設置位置、被災の程度、被災の時期、構内の岸壁の利用状況、背後圏の社会経済への防波堤の破壊の影響度合いなどにより複雑に変化する。このように間接被害費用について汎用的なモデ

ルを構築することは困難であるため、ここではこうした間接被害費用は試算の対象としないが、実際の施設でライフサイクルコストを算定する際には間接被害費用を適切に算定することが必要である。

ライフサイクルコストの算出にあたっては、式(5)に表現される考え方に加えて、次の2つの要素を考慮する必要があると考えられる。

第一の要素は、初期建設費用と将来発生する復旧費用を同一の尺度で評価する必要があるという点である。経済分析においては、異時点の費用を同一時点での価値に換算して評価を行う必要がある。一般的には、将来の費用を現在価値に換算して、現在価値を尺度として評価を行う。その際に必要となるのが社会的割引率である。

一般に割引率とは、現在手に入る財と、同じ財だが将来手に入ることになっている財との交換比率である。財がお金である場合には、この割引率は利子率となる。社会的割引率とは、お金よりも広い意味での価値尺度である費用や便益の異時点間の交換比率の総称である⁷⁾。いま社会的割引率を i とし、現在の財が x であるとする、現在の財 x と等価な j 年後の財 $x(j)$ は式(6)で与えられる。

$$x(j) = \frac{x}{(1+i)^j} \quad (6)$$

土木事業に関する社会的割引率は、一般に4%とされることが多いことから⁸⁾、本報告においても社会的割引率は4%とする。

また、インフレは経済評価においては考慮しないのが原則である¹⁰⁾ため、本報告でも考慮しない。

ライフサイクルコスト算出において考慮すべき第2の要素は、複数の荷重作用を考慮する必要があること、したがって複数回の被災がありえるという点である。

供用期間中の破壊確率は、式(7)により求められる。

$$P_{n=L} = P(F/E) P(E) \quad (7)$$

ここに、

$P_{n=L}$: 供用年数 L 年間の対象波による破壊確率

$P(F/E)$: 対象波の作用による破壊確率

$P(E)$: L 年間に対象とする波が作用する確率

ここでは、破壊確率の算出において問題となるような高波浪の発生は、ポアソン過程に従うと仮定する。ポアソン過程は、時間に無規則に発生する独立事象からなるもので、区間 $(t, t + \Delta t)$ において事象が発生する確率は、単位時間あたりの事象の発生確率を λ とすると、

t に無関係に $\lambda \Delta t$ となる¹¹⁾。

再現期間 r 年の波高を持つ波の発生確率は、式(8)で表される。

$$P(n) = \frac{(\nu t)^n}{n!} \exp(-\nu t) \quad (8)$$

ここに、

$P(n)$: 時間 t の間に対象波が n 回発生する確率

n : 対象とする波の発生回数

ν : 対象とする波の年平均発生率 ($= 1/r$)

t : 期間 (年)

この関係を用いて、通常構造物の耐用期間として考えられている50年間に再現期間 r 年の波が1回～3回作用する確率を示したものが図-4である。 $r=50$ の場合を考えると、1回作用する確率は0.368、2回作用する確率は0.184、3回作用する確率は0.061などとなる。

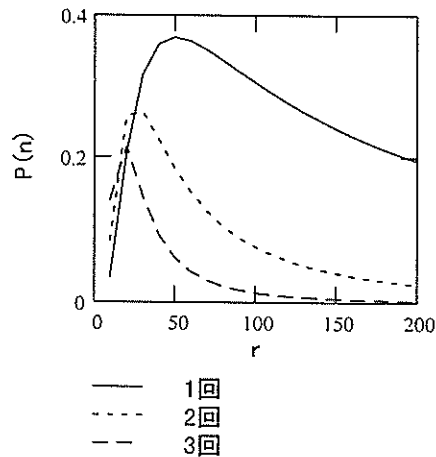


図-4 荷重作用回数

式(7)の計算法については、次に示す2通りの方法がある⁵⁾。

①完全独立を仮定する方法

耐用年数中に同じ波高を持つ波が複数回作用する場合、防波堤が破壊する事象は各荷重作用時で独立であると仮定する方法。防波堤が破壊してもすぐに破壊前の状態に修復され、耐用年数中は常に供用可能な状態にあることを前提にする。

②完全相関を仮定する方法

耐用年数中に同じ波高を持つ波が複数回作用する場合、防波堤が破壊する事象は各荷重作用時で完全相関である

と仮定する方法。ある波高の波の作用により防波堤が破壊した場合は、以降は同じ波高を持つ波が作用すれば防波堤は必ず破壊し、逆にある波高の波が作用して防波堤が破壊しなかった場合は、以降は同じ波高の波の作用で防波堤は破壊しないとす。

以上2つの方法による破壊確率は、それぞれ式(9)および式(10)で表される。

①完全独立

$$P(F/E) P(E) = 1 - \exp(-t \sum_{i=1}^m \nu_i P_i) \quad (9)$$

②完全相関

$$P(F/E) P(E) = \sum_{i=1}^m P_i \{1 - \exp(-t \nu_i)\} \quad (10)$$

これらの式の意味について検討すると次のようである。完全独立の場合、対象とする荷重の作用により破壊が生じない確率をすべての荷重に関して乗じることにより、すべての荷重作用により破壊が生じない確率が計算され、これを1から減じることによって破壊確率が算出される。一方、完全相関の場合は、破壊確率は耐用年数中に対象とする波が少なくとも1回以上作用する確率と、その波の作用により防波堤が破壊する確率の積で表される。破壊確率のみを評価の対象とする場合、完全独立を仮定するか完全相関を仮定するかによって破壊確率がかなり異なるケースがあるので注意が必要である。

式(9)および式(10)はいずれも破壊の可能性のみを問題にしたものであるが、ライフサイクルコストの算出においては、破壊が生じる回数により期待復旧費は変化する。いま、荷重の再現期間を r 年、構造物の耐用年数を t 年とする。

完全独立を仮定すると、被災回数の期待値は式(11)で表される。

$$E_f(n) = \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{(\nu t p)^n}{n!} \exp(-\nu t p) \quad (11)$$

ここに、

$E_f(n)$: 対象波による期待被災回数

n : 対象とする波の発生回数

ν : 対象とする波の年平均発生率 ($= 1/r$)

t : 期間 (年)

p_f : 対象とする波の作用による破壊確率

t : 期間 (年)

p_f : 再現期間 j 年の波の作用による破壊確率

C_f : 破壊時損失費

i : 社会的割引率

一方, 完全相関を仮定すると, 被災回数の期待値は式(12)で表される.

$$E_f(n) = p_f \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{(\nu t)^n}{n!} \exp(-\nu t) \quad (12)$$

ここに, 記号は式(11)によるものと同じである.

式(11)と式(12)による値は一致する. 例えば, 対象とする波をただ一つとるならば, 期待被災回数はいずれの条件においても, 式(13)のようになる.

$$E_f(n) = p_f \nu t \quad (13)$$

以上より, 構造物のライフサイクルコストは, 式(14)により得られる.

$$LCC = C_i + \sum_{j=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} n \frac{(\nu t p_j)^n}{n!} \exp(-\nu t p_j) \frac{C_f}{(1+i)^j} \quad (14)$$

ここに,

LCC : ライフサイクルコスト

C_i : 初期建設費

n : 対象とする波の発生回数

j : 対象とする波の再現期間

ν : 対象とする波の年平均発生率 ($=1/r$)

ここで, 右辺第2項の社会的割引率を考慮する部分については, 被災の期待発生時期が問題となる. 荷重の再現期間が j 年であるとき, それ以上の荷重が平均して j 年に1回は作用する. このためここでは, ある波高の波による期待被災発生時期は, その波の荷重再現期間に一致させた.

ライフサイクルコストの算出にあたり対象とする荷重の組み合わせについては, 次章で具体的な事例に基づいて検討する.

3. ライフサイクルコストと許容破壊確率の検討

3.1 検討条件

実際の防波堤1断面を対象に, ライフサイクルコストの検討を行う. 検討対象は, A港の防波堤X区間である. 防波堤の前面水深は-20.5mであり, 砕波帯域に設置されている.

図-5に, 検討に用いたケーソン式混成堤の基本断面を示す. ケーソン寸法は, 26.0m (L) × 22.0m (B) × 18.5m (H) である. 以下の検討においては, 対象とするケーソン幅を, 実際の断面幅26.0mを中心に, 20m~40m程度の範囲としている.

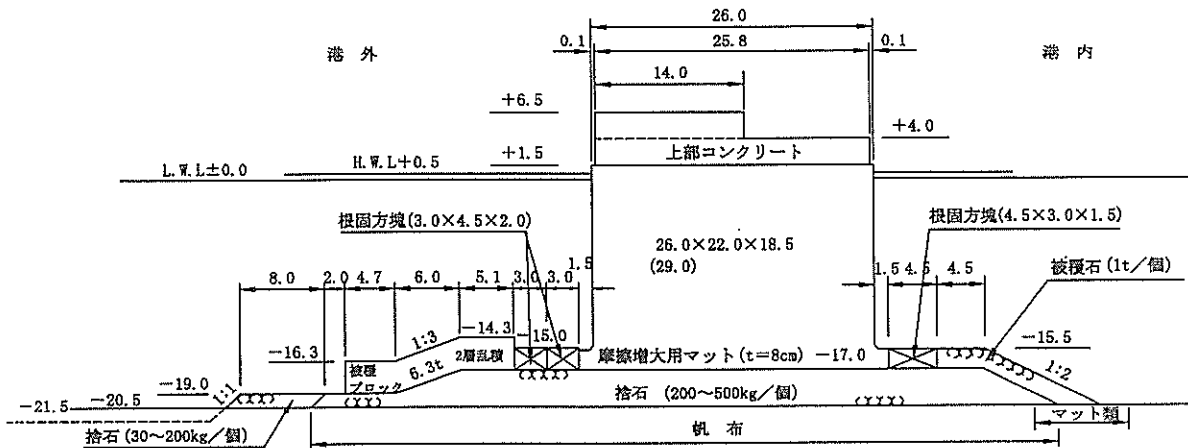


図-5 検討対象断面

検討対象断面の設計波高の設定の詳細は次の通りであった。まず、推算波浪は、1941年～1980年の天気図から波高が高くなると想定される43ケースの気象条件を選定し、有義波法（ウイルソン法）により求めている。実測波浪は1972年～1987年の観測データを統計処理し、50年確率波高を求めている。

設計に用いられた設計波高は、設計対象位置における推算波浪と実測波浪を比較し、波高が高くなる実測波を採用している。さらに、波向きを考慮し、堤体に作用する波圧が最大となる波向きの波高、周期を設計波としている。

以上より求められた原設計波高および設計波周期は次の通りである。

- ・設計波高 : $H_{1/3} = 9.4 \text{ m}$
- ・最高波高 : $H_{max} = 16.676 \text{ m}$
- ・設計波周期 : $T_{1/3} = 14.0 \text{ sec}$
- ・最高波周期 : $T_{max} = 14.0 \text{ sec}$

ライフサイクルコストの検討にあたっては、再現期間10～100年の波高を考慮する。各再現期間の最高波高は、対象断面の設計波高の決定方法に合わせ実測波高から求めるが、ここでは、現在入手できる1975年～1996年の波高4.5m以上（134個）のデータをもとに求めた。極大波高と正規化変数の近似式は、式(15)に示すとおりである。

$$H_{1/3} = 1.114rv + 4.482 \quad (15)$$

ここに、 rv : 正規化変数

10年刻みに再現期間10年～100年の波高($H_{1/3}$)を求め、求めた値全てに再現期間50年の波高が16.676mになるように数値を乗じることで各再現期間における最高波高を求めた。周期については、A港の50年確率波高算出の際の波浪データをもとに統計解析を行い、波高と周期の相関を直線回帰関係を用いて示した式(16)により、各再現周期ごとに有義波周期を求め、有義波周期と最高波周期が等しいものとして最高波周期を設定した。

$$T_{1/3} = 0.877 H_{1/3} + 5.118 \quad (16)$$

表-1に、再現期間ごとに求めた H_{max} 、 T_{max} および計算に用いた再現期間ごとの正規化変数 rv を示す。図-6に波高と再現期間の関係を示す。

表-1 再現期間ごとの検討波

再現期間	H_{max}	T_{max}	正規化変数
10年	14.380	13.69	3.864260
20年	15.377	13.83	4.411006
30年	15.954	13.93	4.727659
40年	16.361	13.95	4.951039
50年	16.676	14.00	5.123613
60年	16.932	14.02	5.263828
70年	17.150	14.02	5.383804
80年	17.340	14.03	5.487731
90年	17.507	14.04	5.579402
100年	17.647	14.05	5.656078

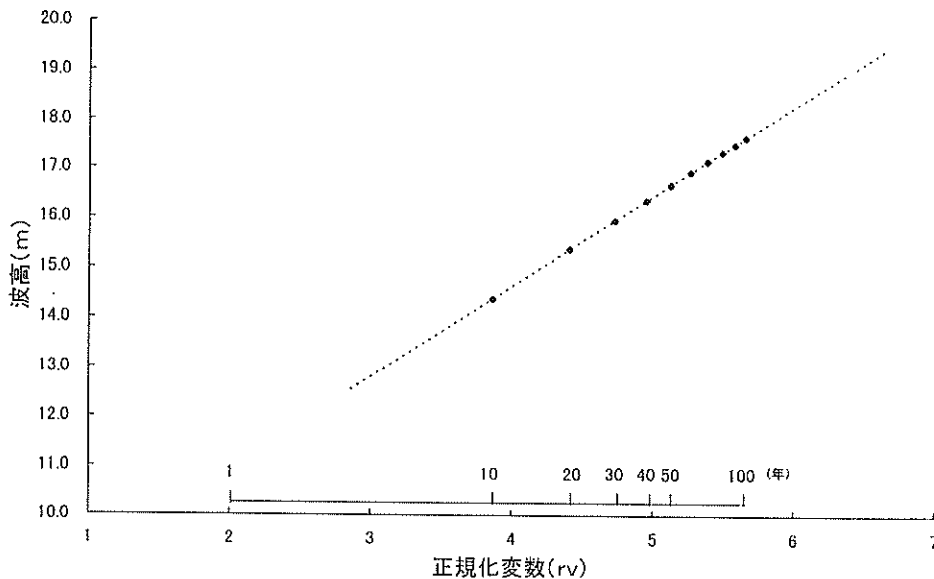


図-6 波高と再現期間の関係

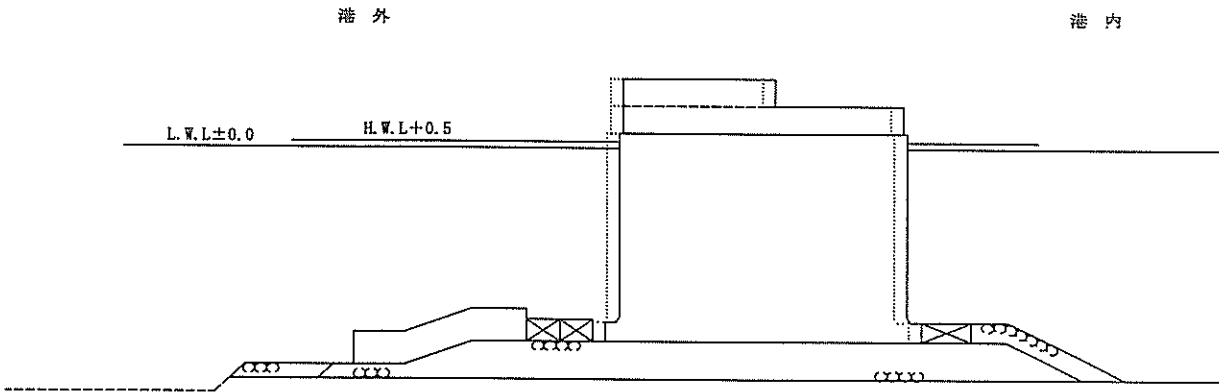


図-7 小規模な被災

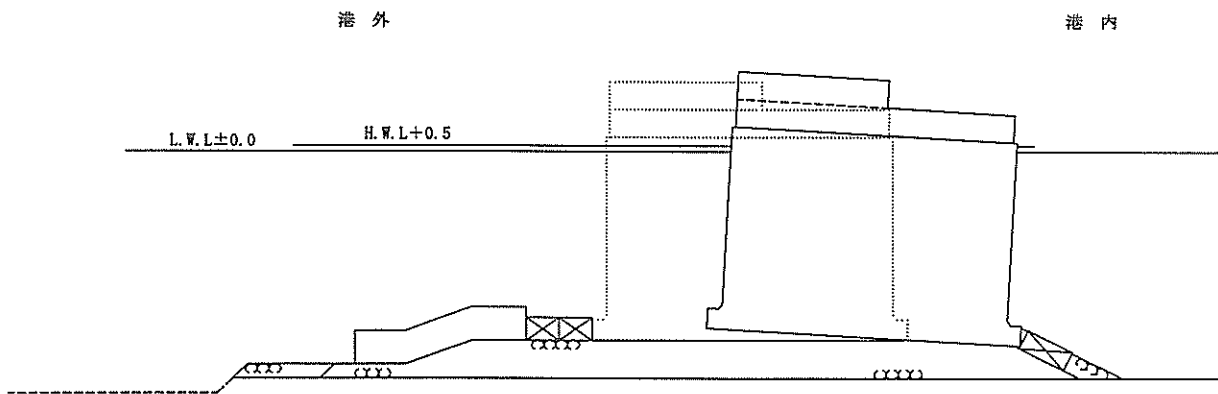


図-8 中規模な被災

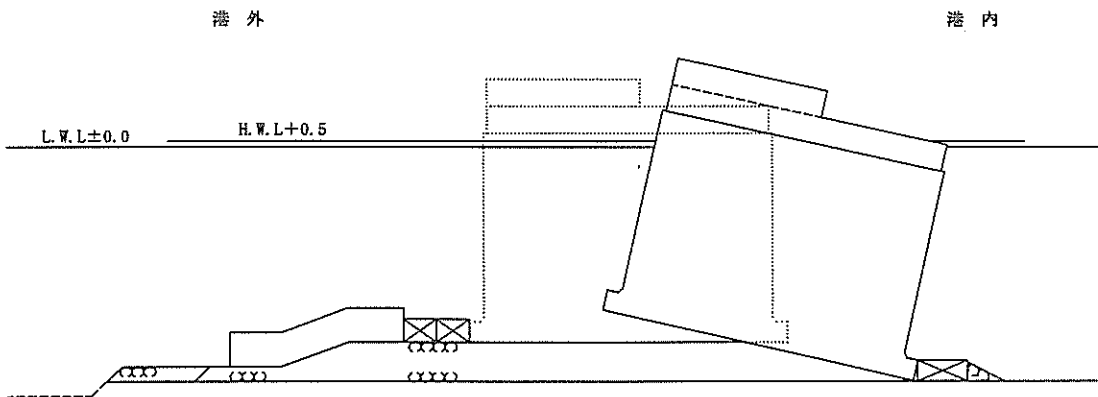


図-9 大規模な被災

3.2 破壊パターンの設定

ライフサイクルコストの検討にあたり、防波堤の被災形態として想定される標準的なパターンを被災程度別に3種類設定した。防波堤の被災形態として側壁などの部材の被災も考えられるが、全体系としての破壊に比較して部材破壊の可能性は低いことから、部材の破壊は対象外とする。

3種類の被災の程度は次の通りである。図-7～図-

9に各被災規模イメージを示す。

- a) 小規模な被災 (図-7)
法線直角方向へ1～2 m程度の滑動
- b) 中規模な被災 (図-8)
マウンドからの滑落、マウンド上での傾斜
- c) 大規模な被災 (図-9)
マウンドからの転落、ケーソン上部の水没

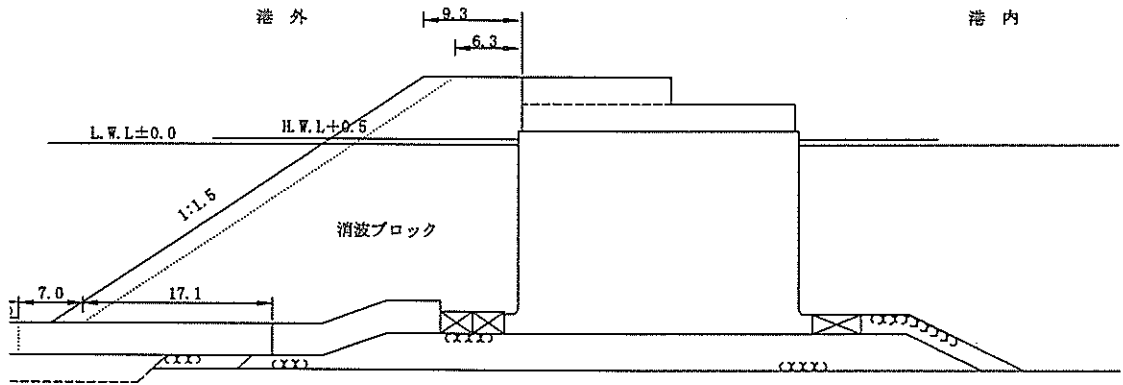


図-10 復旧断面 (小規模被災)

被災程度別の復旧対策は次の通りとする。

小規模な被災の場合、防波堤の機能は基本的に維持されている。しかしながら、法線の不整合による波圧の増大などが予想されるため、復旧は必要である。復旧は原形復旧が基本であるが、この場合ケーソンを再浮揚して再据付を行うと工費が大きくなるため、消波工の巻き立てによる復旧を想定する。図-10に小規模な被災の場合の復旧断面を示す。

中規模および大規模な被災は原形復旧とする。まず中規模な被災の場合は、上部工、中詰砂を撤去したうえでケーソンを浮揚し、マウンド再構築後再設置を行い、中詰め工、上部工を施工する。大規模な被災の場合は、上部工および中詰砂を撤去（水中作業）し、水没しているケーソンを大型起重機船を用いて浮揚する。さらに、マウンド再構築後ケーソンを再設置し、中詰め工および上部工を施工する。

各被災パターンの復旧工種は次の通りとする。

a) 小規模な被災

- ・消波ブロック製作・据え付け

復旧断面に設置する消波ブロックは設計波高によって必要質量が異なり、選択対象となるブロックの種類も多い。本検討では再現期間50年の設計波高で選定対象となる、テトラポット80t型、ドロス40t型の2つを工費算定用に選定する。

b) 中規模な被災

- ・上部工、蓋コンのはつり、撤去、運搬、陸上仮置（同時に根固め方塊も撤去、仮置）
- ・中詰砂の撤去（4m³グラブによる掘り出し）、運搬、陸上仮置
- ・ケーソン浮揚、曳航、仮置
- ・マウンド欠損部（マウンド法肩部等36m³/m）の補

充、ケーソン据付け底面部の再均し（100%）

- ・ケーソン浮揚、曳航、据え付け
- ・中詰砂の運搬、投入、蓋コン打設
- ・上部工打設
- ・消波ブロック製作・据え付け

c) 大規模な被災

- ・上部工、蓋コンのはつり、撤去（ここまで水中作業）、運搬、陸上仮置（同時に根固め方塊も撤去、仮置）
- ・水中での中詰砂の撤去（4m³グラブによる掘り出し）、運搬、陸上仮置
- ・大型起重機船によるケーソンのサルベージ、水を抜いたあと浮揚、曳航、仮置
- ・マウンド欠損部（マウンド法肩部 86m³/m）の補充、マウンドおよびケーソン据付け底面部の均し（100%）
- ・ケーソン浮揚、曳航、据え付け
- ・中詰砂の運搬、投入、蓋コン打設
- ・上部工打設

復旧工費を算定する上での前提条件は次の通りである。

- ・積算単価は平成9年度時点でのA港における単価を使用する。
- ・被災時に、ケーソン本体（ケーソン底面のアスファルトマット等も含む）に損傷が無いものとする。
- ・上部工の撤去は、工法によって工費が大きく異なるため、撤去の市場単価をもとにして海上作業、水中作業に必要な機械、運搬船、作業船、及び潜水士船等の単価を上乘せしたものとする。
- ・撤去したコンクリートガラ等の港湾外への搬出、産廃処理は検討しない。
- ・使用船舶の回航、曳航費用は計上しない。
- ・施工手法の歩掛りは標準的な値を使用する。
- ・被災調査等の間接的な経費は検討対象としない。

- ・工種による直接工事費のみを算出し、間接費は一律50%と固定する。
- ・消費税相当額5%を乗じる。

検討対象施設の実断面（堤体幅26m）の初期建設費は表-2に示すとおりである。費用は単位奥行き（1m）あたりの額で、以降に示す費用はすべて単位奥行きあたりの値である。また、堤体幅を21m~31mまで変化させた場合の堤体幅ごとの初期建設費は表-3に示すとおりである。

表-2 初期建設費（堤体幅26m）

初期建設費(堤体幅26m)		単位奥行き(千円/m)			
		単位	数量	単価	工費
ケーソン製作工	FD製作	m3	53	74.1	3927
	海上打継	m3	53.5	17	910
基礎工	基礎捨石	m3	212.8	4.71	1002
	荒均し	m2	72.6	10.6	770
	本均し	m2	41.5	18.9	784
	洗掘防止、帆布等	m2	70	4.47	313
掘付け工	ケーソン掘付	函	1/22	2272.6	103
中詰工	中詰砂投入	m3	366.3	2.08	762
	蓋コン打設	m3	12.8	25.6	328
上部工	上部工打設	m3	99.5	32.2	3204
根固め	根固めブロック製作	個	0.78	710.2	554
	根固めブロック掘付け	個	0.78	152.3	119
	被覆ブロック製作	個	8.5	79.2	673
	被覆ブロック掘付け	個	8.5	41.7	354
	被覆石	m3	20.2	4.79	97
	被覆石均し	m2	15.7	14.1	221
直接工事費					14121
間接費					7060
消費税相当額					1059
合計					22240

表-3 初期建設費

堤体幅(m)	単位奥行き(千円/m)
21	19386
22	19898
23	20410
24	21389
25	21751
26	22241
27	22775
28	23287
29	23799
30	24311
31	24823

被災復旧費用について、小規模な被災の場合の復旧費を表-4に示す。基礎マウンドにほとんど被災が無いと仮定し、消波ブロックの種類により2種類の復旧費を求めている。小規模な被災の場合、堤体前面に消波工を設置するため、堤体幅の変化による工費変化は生じない。

中規模な被災の場合の単位奥行き当たりの復旧費を表-5に示す。また、堤体幅の変化による工費変化について、堤体幅を21m~31mまで変化させた場合の費用を表

表-4 小規模被災時の復旧費

単位奥行き(千円/m)					
80tテトラ		単位	単価	数量	工費
製作工	消波ブロック製作	個	689.6	7.7	8363
	被覆ブロック製作	個	73.9	10.2	1187
基礎工	基礎石投入	m3	4.71	51	378
	捨石均し	m2	8.44	17.1	227
掘付け工	消波ブロック掘付	個	128.4	7.7	1557
	被覆ブロック掘付	個	30.9	10.2	496
合計 間接費、消費税相当額含む					12210
40tドロス		単位	単価	数量	工費
製作工	消波ブロック製作	個	738.1	11.2	13020
	被覆ブロック製作	個	73.9	10.8	1257
基礎工	基礎石投入	m3	4.71	55.3	410
	捨石均し	m2	8.44	20.1	267
掘付け工	消波ブロック掘付	個	107	11.2	1887
	被覆ブロック掘付	個	30.9	10.8	526
合計 間接費、消費税相当額含む					17368

表-5 中規模被災時の復旧費（堤体幅26m）

堤体幅(26m)		単位奥行き(千円/m)			
工種		単位	単価	数量	工費
撤去工	上部工はつり	m3	31.6	99.5	3144
	蓋コンはつり	m3	31.6	12.8	404
	撤去仮置き	m3	31.6	112.3	3549
	根固め方塊撤去	個	117.8	0.78	92
	中詰め砂撤去	m3	2.59	366.3	949
	ケーソン浮揚・仮置	函	3403	1/22	155
基礎工	捨石(200~500kg/個)	m3	4.71	15.6	73
	荒均し	m2	10.6	40.4	428
	本均し	m2	18.9	41.5	784
掘付け工	ケーソン掘付	函	3403	1/22	155
中詰工	中詰砂投入	m3	2.08	366.3	762
	蓋コン打設	m3	25.6	12.8	328
上部工	上部工打設	m3	25.6	99.5	2547
根固め	根固め方塊掘付け	個	117.8	0.78	92
	被覆石(1t/個)	m3	4.79	19.5	93
	被覆石均し	m2	10.6	15.7	166
小計					13722
間接費					6861
消費税相当額					1029
合計					21612

表-6 中規模被災時の復旧費

堤体幅(m)	単位奥行き(千円/m)
21	18632
22	19228
23	19824
24	20420
25	21016
26	21612
27	22208
28	22804
29	23277
30	23996
31	24592

ー6に示す。

大規模な被災については、回航費等間接費としては、対象港A港から近傍のO港より大型起重機船を回航した場合、ケーソン吊り金具等を含めた回航費・据付準備等の間接費で約375000千円の金額が必要となる。しかしながら、回航費には地理的条件が影響すること、被災数量により復旧費に掛かる単位幅当たり回航費が異なること

表ー7 大規模被災時の復旧費（堤体幅26m）

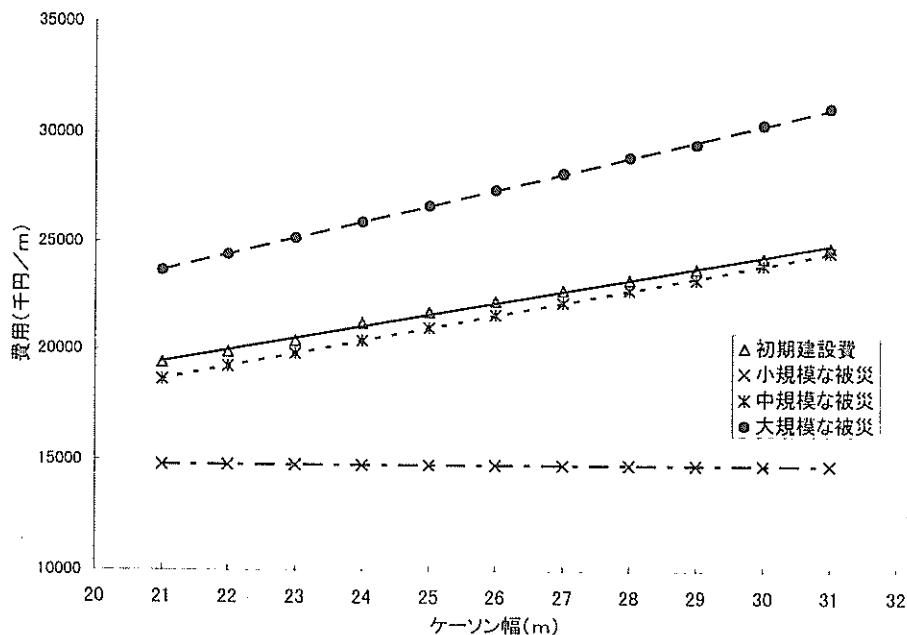
堤体幅(26m)		単位奥行当たり(千円/m)			
工種	単位	直工単価	数量	工費	
撤去工 (水中作業)	上部工はつり	m3	59.5	99.5	5920
	蓋コンはつり	m3	59.5	12.8	762
	撤去仮置き	m3	31.6	112.3	3549
	根固め方塊撤去	個	117.8	0.78	92
	中詰め砂撤去	m3	2.59	366.3	949
基礎工	ケーソン浮揚・仮置	函	10659	1/22	484
	捨石(200~500kg.個)	m3	4.71	66.325	312
	荒均し	m2	10.6	40.4	428
据付工	本均し	m2	18.9	41.5	784
	ケーソン据付	函	3403	1/22	155
中詰め工	中詰め砂投入	m3	2.08	366.3	762
	蓋コン打設	m3	25.6	12.8	328
上部工	上部工打設	m3	25.6	99.5	2547
	根固め	根固め方塊据付け	個	117.8	0.78
被覆石(1t/個)		m3	4.79	19.5	93
被覆石均し		m2	10.6	15.7	166
小計				17424	
間接費				8712	
消費税相当額				1307	
合計				27442	

表ー8 大規模被災時の復旧費

堤体幅(m)	単位奥行当たり(千円/m)
21	23688
22	24439
23	25190
24	25941
25	26692
26	27442
27	28193
28	28944
29	29533
30	30446
31	31197

から、ここでは計上しない。単位奥行きあたりの復旧費用は表ー7に示すとおりであり、堤体幅の変化による工費変化として、堤体幅を21m~31mまで変化させた場合の復旧費用は表ー8に示すとおりである。

以上をまとめて、図ー11に堤体幅と初期建設費、復旧費の相関を示す。小規模な被災については、テトラポット80 t型、ドロス40 t型の2ケースの平均値を示している。小規模な被災の場合の費用は初期建設費の70%程度であり、中規模な被災の場合には復旧費用は初期建設費にほぼ等しい。また、大規模な被災の場合、復旧費用は初期建設費の125%程度となることがわかる。



図ー11 初期建設費と復旧費の関係

3.3 検討手法

ライフサイクルコスト算出にあたり、防波堤の全体系の破壊確率を算出する必要があるが、その方法は以下による³⁾。

防波堤の全体系安全性照査に関係する設計因子の従う確率分布として、表-9に示す分布を想定する。分布推定の詳細については、文献1)~3)を参照されたい。表に示したパラメータ α は式(17)で定義される設計因子の真値の平均値と推定値（設計用値）の比であり、 V は設計因子の真値の変動係数である。

$$\alpha = X_{o,m} / X_e \tag{17}$$

ここに、

α : 設計因子の真値の平均値のかたより

$X_{o,m}$: 設計因子 X の真値の平均値

X_e : 設計因子 X の推定値（設計用値）

表-9に掲げた以外の不確定要因、例えば波向きのばらつき、海水の単位体積重量のばらつき、堤内外の静水面の差、ケーソン製作時の寸法誤差などについては有効なデータが不足していることもあり、本研究では検討対象としない。

表-9 設計因子の分布

	α	V	備 考
波力			
沖波波高推定精度	1.0	0.1	
波浪変形計算精度	0.97	0.04	水深変化緩
	1.06	0.08	水深変化急
砕波変形推定精度	0.87	0.10	
波力算定式推定精度	0.91	0.19	ケーソン式混成堤
	0.84	0.12	消波ブロック被覆堤
設計潮位			
H.H.W.L.	1.0	0	
H.W.L.	1.5	0	
	2		
	2.5		
摩擦係数	1.06	0.15	
ケーソン材料密度			
鉄筋コンクリート	0.98	0.02	
無筋コンクリート	1.02	0.02	
中詰砂	1.02	0.04	
基礎地盤密度	1.00	0.03	
基礎地盤強度	1.20	0.10	
サーチャージ	1.04	0.05	

α : 真値の平均値の偏り（真値の平均値／設計用値）

V : 真値の変動係数

防波堤の全体系の破壊モードとしては滑動・転倒・支持力破壊の3つを想定する。滑動，転倒，支持力破壊に対する安全性照査式は，それぞれ式(18)～式(20)の通りである。

$$F = \frac{fW}{P} \quad (18)$$

ここに，

- W : 壁体に作用する全鉛直合力 (kN/m)
- P : 壁体に作用する全水平力 (kN/m)
- f : 壁体底面と基礎との摩擦係数
- F : 安全率で，波圧時1.2以上を標準とする。

$$F = \frac{Wt}{Ph} \quad (19)$$

ここに，

- W : 壁体に作用する全鉛直合力 (kN/m)
- P : 壁体に作用する全水平力 (kN/m)
- t : 壁体に作用する全鉛直力の合力の作用線から壁体前しままでの距離 (m)
- h : 壁体に作用する全水平力の合力の作用線から壁体底面までの高さ (m)
- F : 安全率で，波圧時1.2以上を標準とする。

$$F = \frac{\sum [c'b + \tan \phi' (W+q)] \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi')/F}}{\sum (W+q) \sin \alpha + \frac{1}{r} \sum Ha} \quad (20)$$

ここに，

- c' : 有効応力に基づく見かけの粘着力 (kN/m²)
- b : 分割細片の幅 (m)
- ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角 (°)

支持力安全性

$$\begin{aligned} \mu_R &= \sum \left[\left\{ \mu_c b + \mu_{\tan \phi'} (\mu_w + \mu_q) \right\} \frac{\sec \alpha}{1 + \tan \alpha \mu_{\tan \phi'} / F} \right] \\ \frac{\sigma_R^2}{\sec^2 \alpha} &= \sum \left\{ \frac{1}{\left(\frac{1 + \tan \alpha \mu_{\tan \phi'}}{\mu_F} \right)^4} \left[\left\{ \sigma_c^2 b^2 + (\sigma_w^2 + \sigma_q^2) \mu_{\tan \phi'}^2 \left(1 + \frac{\tan \alpha \mu_{\tan \phi'}}{\mu_F} \right)^2 \right\} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \sigma_{\tan \phi'}^2 \left\{ \left(\frac{\mu_c b \tan \alpha}{\mu_F} \right)^2 + (\mu_w + \mu_q)^2 \right\} + \left(\frac{\sigma_F \mu_{\tan \phi'} \tan \alpha}{\mu_F^2} \right)^2 \left\{ \mu_c^2 b^2 + \mu_{\tan \phi'}^2 (\mu_w + \mu_q)^2 \right\} \right] \right\} \\ \mu_S &= \sum \left\{ (\mu_w + \mu_q) \sin \alpha + \mu_H a / r \right\} \\ \sigma_S^2 &= \sum \left\{ (\sigma_w^2 + \sigma_q^2) \sin^2 \alpha + \sigma_H^2 a^2 / r^2 \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

- W : 分割細片の重量 (kN/m)
- q : 分割細片に作用するサーチャージ (kN/m)
- α : 分割細片の底面となす角 (°)
- H : 水平荷重 (kN/m)
- a : 水平荷重のアーム長 (m)
- r : すべり円弧の半径 (m)
- F : 安全率で，波圧時1.0以上を標準とする。

安全性の評価は安全性指標によって行う。安全性指標の算出方法には複数の手法があるが，ここでは過去の筆者らの検討^{1,2,3)}と評価尺度を揃えるため，これまでと同様に平均値まわりのテーラー展開による1次近似2次モーメント法 (FOSM法) を用いて耐力 R および荷重 S の平均値および標準偏差を算出し，安全性指標を算出する。式(18)～式(20)をもとにして，滑動・転倒・支持力のそれぞれに対する耐力 R と荷重 S の平均値および標準偏差を示すと式(21)～式(23)のようになる。ここに，記号 μ および σ は，その後に添えられる記号に関する平均値，標準偏差である。

滑動安全性

$$\begin{aligned} \mu_R &= \mu_f (\mu_w - \mu_{pb} - \mu_{pu}) \\ \sigma_R^2 &= \sigma_f^2 (\mu_w - \mu_{pb} - \mu_{pu})^2 + \mu_f^2 (\sigma_w^2 + \sigma_{pb}^2 + \sigma_{pu}^2) \\ \mu_S &= \mu_{ph} \\ \sigma_S^2 &= \sigma_{ph}^2 \end{aligned} \quad (21)$$

転倒安全性

$$\begin{aligned} \mu_R &= a_w \mu_w - a_{pb} \mu_{pb} - a_{pu} \mu_{pu} \\ \sigma_R^2 &= a_w^2 \sigma_w^2 + a_{pb}^2 \sigma_{pb}^2 + a_{pu}^2 \sigma_{pu}^2 \\ \mu_S &= a_{ph} \mu_{ph} \\ \sigma_S^2 &= a_{ph}^2 \sigma_{ph}^2 \end{aligned} \quad (22)$$

滑動・転倒・支持力破壊の3つの破壊モードが互いに独立であると仮定すると、システムとしての総合破壊確率は式(24)で求められる。

$$P_f = 1 - (1 - P_{fs})(1 - P_{fi})(1 - P_{fi}) \quad (24)$$

ここに、

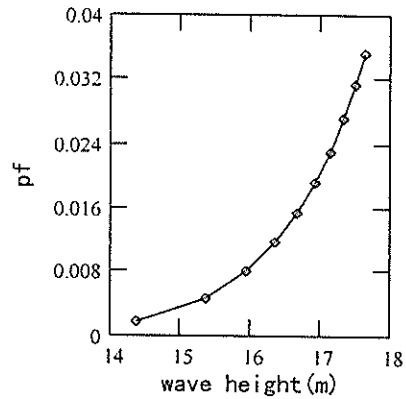
- P_f : 総合破壊確率
- P_{fs} : 滑動破壊確率
- P_{fi} : 転倒破壊確率
- P_{fi} : 支持力破壊確率

耐用年数を通常の防波堤の50年として、現行設計法によって施設の設計を行い、総合破壊確率を算出すると、0.0155となる。この値は、全国の施設の平均値0.0102と比較すると若干大きな破壊確率である³⁾。なお、総合破壊確率およびライフサイクルコストの算出は、防波堤の堤体幅を5cmピッチで変化させて行った。

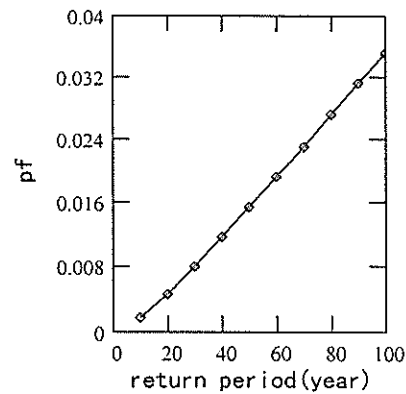
次に、式(14)によってライフサイクルコストの算出を行う際に対象とする荷重について検討する。防波堤に作用する波の波高は地震の震度のように離散的なものではないため、どのように荷重を分類するかが問題となる。方法としては、大別すると、波高ランクによって分類する方法と、再現期間によって分類する方法が考えられる。

いま、耐用年数を50年として現行設計法によって設計した断面について、荷重再現期間を10~100年まで変化させた際の総合破壊確率の変化を図-12に示す。(a)は波高と総合破壊確率、(b)は荷重再現期間と総合破壊確率の関係を示している。図より分かるように、波高と総合破壊確率が2次以上の関数関係にあるのに対して、荷重再現期間と総合破壊確率はほぼ1次関数の関係にあるといえる。いま破壊確率について偏りない荷重の組み合わせを考慮する場合、荷重再現期間をパラメータとすることが適切であると考えられる。このため以下では、荷重再現期間をパラメータとして荷重の組み合わせを考慮する。具体的には、対象とする波の再現期間のピッチを10年とする。

次に、被災の程度の違いによるライフサイクルコストの差について検討する。図-13に、再現期間50年の波の作用のみを想定して、軽微な破壊、中程度の破壊、大規模な破壊のそれぞれについて破壊確率とライフサイクルコストの関係を示した。これ以降のライフサイクルコストはすべて法線方向単位奥行きあたりの数値であり、破壊確率は、とくに断らない限り、耐用年数に相当する再現期間を持つ波の作用による破壊確率を示す。なお図-13においては、被災の回数、社会的割引率は無視してい



(a)



(b)

図-12 荷重再現期間と総合破壊確率

る。図中の1点鎖線は初期建設費を示しており、破壊確率の増加に従って初期建設費は単調に減少する。破壊確率が 10^3 オーダー以下の領域では破壊の影響が低いいため初期建設費とライフサイクルコストはほぼ一致する。破壊確率が0.01を上回るあたりでライフサイクルコストと初期建設費の乖離が見られ、破壊確率が1に近づくにつれてライフサイクルコストは指数関数的に増加し、最終的にはライフサイクルコストは初期建設費の2倍程度近くに達する。図より分かるように、被災の程度が異なっても破壊確率の変化に伴うライフサイクルコストの変化の傾向は一致している。このため、以下では復旧費として3つの被害程度に対する復旧費の平均値を考慮する。

次に、耐用期間と荷重再現期間の関係について検討する。施設の耐用期間中には耐用年数を超える再現期間を持つ荷重の来襲する可能性がある。荷重再現期間を長く取ると、構造物の破壊確率は増加するが、対象とする荷重の遭遇確率は減少し、加えて期待被災発生時期は長くなるため社会的割引率を考慮すると復旧費は相対的に減

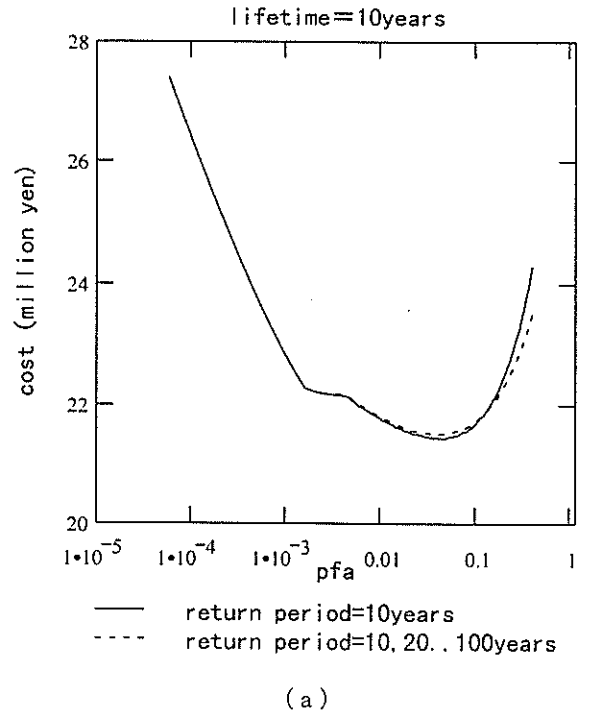
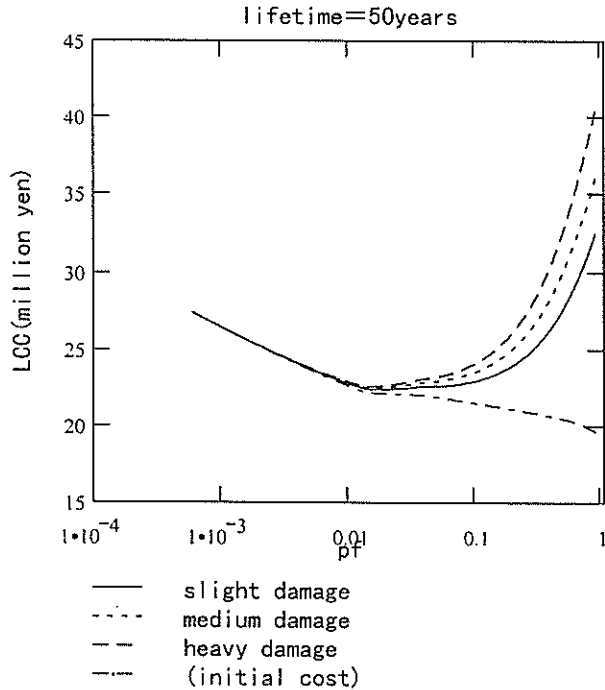


図-13 被災程度の違いによる
ライフサイクルコストの差

少する。そこで、耐用年数を10年および50年とし、荷重再現期間を次の(a), (b)の2種類設定してライフサイクルコストの違いを比較した。すなわち、

- (a) 10年以上、耐用年数以下の荷重再現期間とした場合
- (b) 耐用年数にかかわらず荷重再現期間を10年から100年とした場合

である。(a), (b)のライフサイクルコストの違いを破壊確率との関係で示したものが図-14である。実線が(a)耐用期間以下に相当する再現期間の荷重を考慮したケースであり、点線は(b)100年再現期間の荷重までを考慮したケースである。図より明らかなように、耐用年数が10年、50年のいずれのケースにおいても、(a), (b)2種類の条件下におけるライフサイクルコストはほぼ等しい。このため以下では、(a)耐用年数以下の再現期間の荷重のみを考慮してライフサイクルコストの検討を行う。

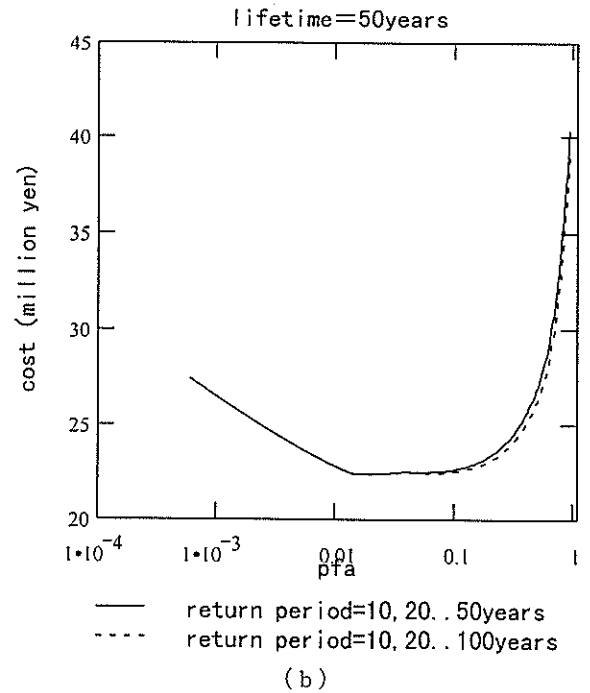


図-14 ライフサイクルコストに及ぼす
荷重再現期間の影響

3.4 ライフサイクルコストと許容破壊確率

図-15に、耐用年数10年、50年、100年の3つのケースについて、堤体重量とライフサイクルコストの関係を示した。水平軸は、現行設計法によって再現期間50年の波に対して設計を行ったときの堤体重量を1とした場合の堤体重量比であり、鉛直軸はライフサイクルコストを示している。堤体重量比が1.0を超えるとライフサイクルコストは各耐用期間でほぼ同じ値となる。これは、破壊確率が低く抑えられることが理由である。逆に堤体重量比を1.0よりも減少させると、破壊確率が增大するため、耐用期間が長い方がライフサイクルコストが大きくなる。図中に×印などを付したポイントはそれぞれの耐用年数でライフサイクルコストが最小になるときの値を示しており、耐用年数が50年の場合と100年の場合で大きな違いはない。

各耐用年数ごとのライフサイクルコストと破壊確率の関係を図-16に示す。図中には、ライフサイクルコストが最小となるケースと、現行設計法によって設計されるケースのそれぞれについて記号を付してある。耐用年数が10年の場合は、ライフサイクルコストが最小となる破

壊確率は 4.11×10^{-2} であるが、現行設計法による破壊確率は 4.69×10^{-3} となり、1オーダーの差が生じている。ライフサイクルコストは現行設計法による値が 2.21×10^7 円に対して、最小のライフサイクルコストは 2.14×10^7 円であり、3%程度の違いが生じる。初期建設費では現行設計法による場合 2.20×10^7 円に対して、ライフサイクルコスト最小の場合は 2.09×10^7 円であり、5%以上の違いがある。

現行設計法とライフサイクルコスト最小化を図った場合のライフサイクルコストの比および初期コストの比は、耐用年数を長くするにつれて減少し、耐用年数が50年程度では両者のライフサイクルコストおよび初期コストはほとんど一致する。ライフサイクルコストは両者ともに 2.24×10^7 円である。破壊確率は、現行設計法による場合が 1.55×10^{-2} であり、ライフサイクルコスト最小化を図る場合は 1.73×10^{-2} である。ただし、この結果は検討対象断面において偶然にそのような結果が得られたと判断すべきであり、一般的にこのことが当てはまるとは必ずしもいえないことに注意が必要である。

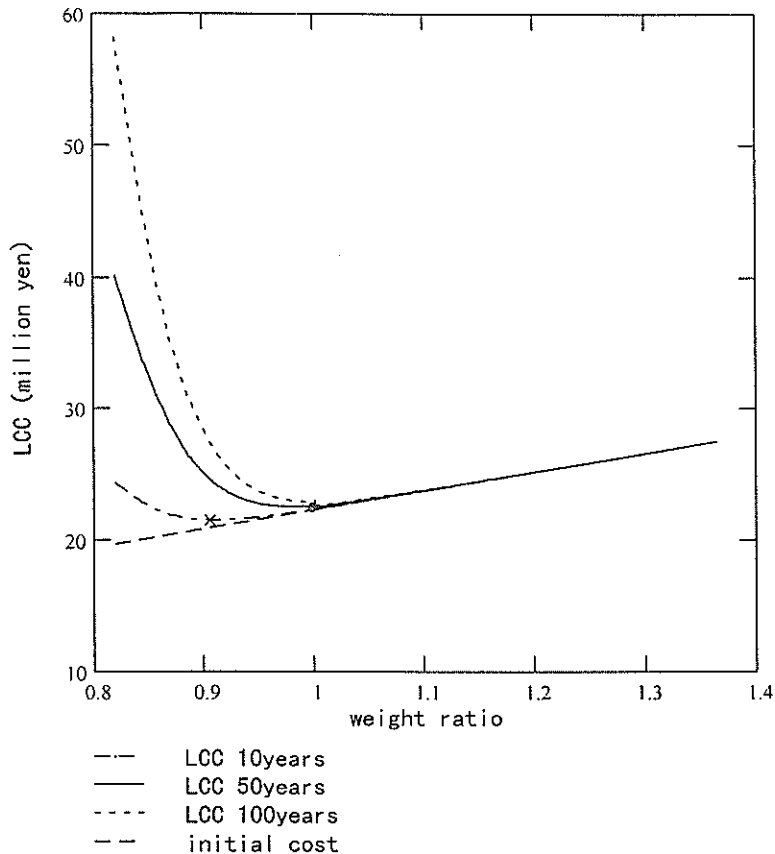


図-15 堤体重量とライフサイクルコスト

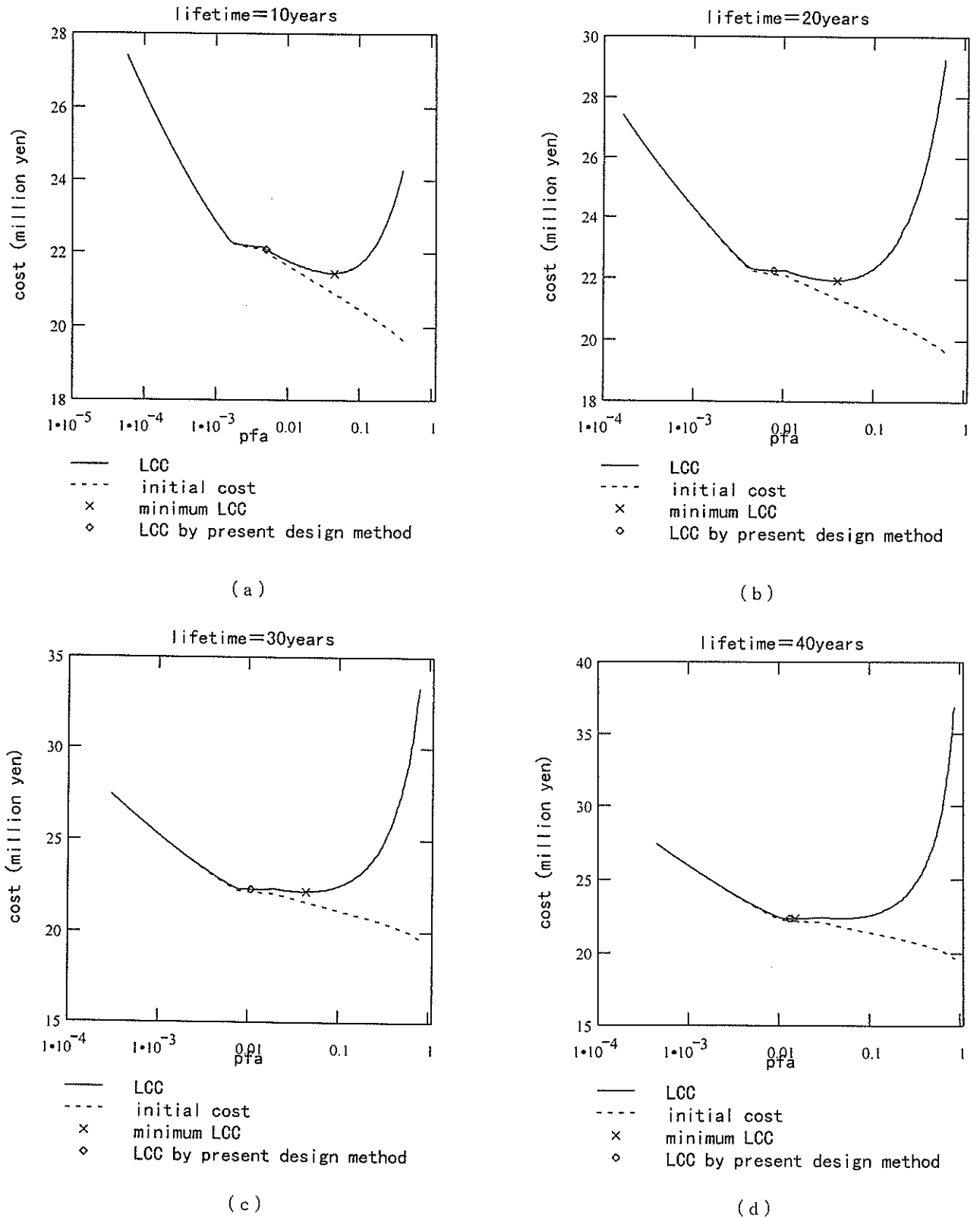
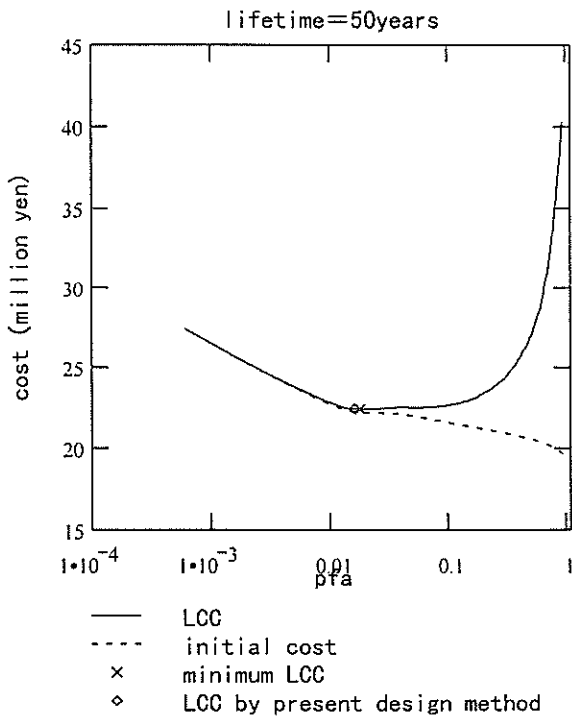
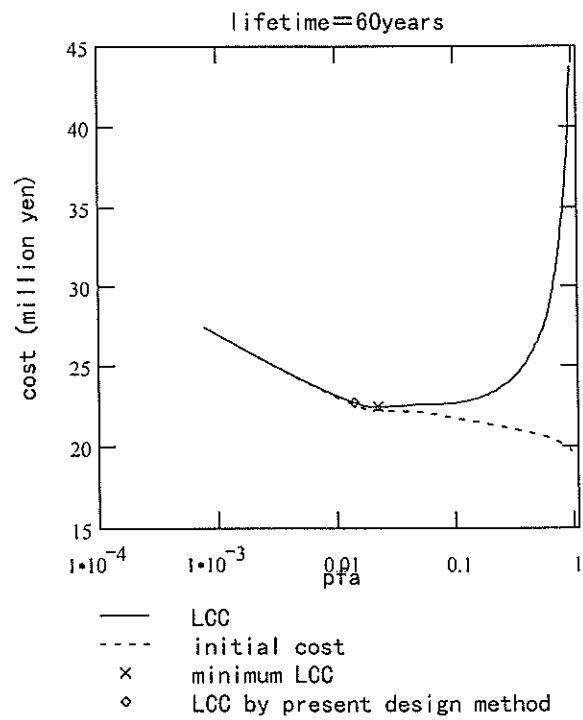


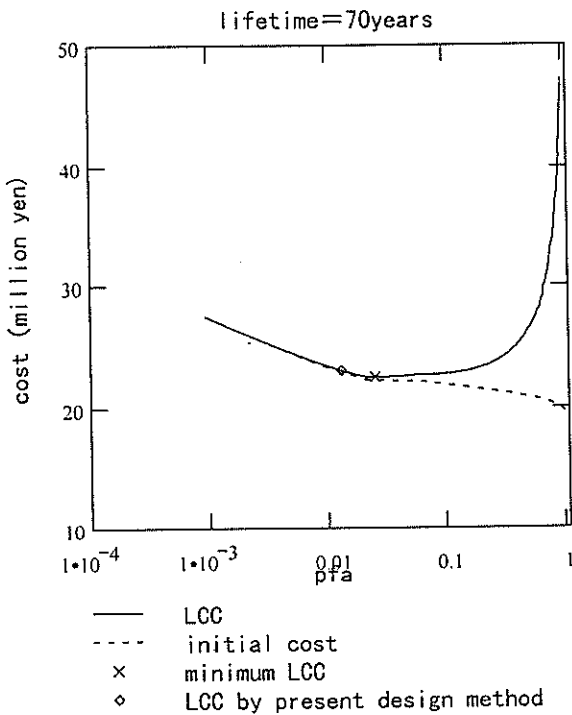
図-16 総合破壊確率とライフサイクルコスト (1/3)



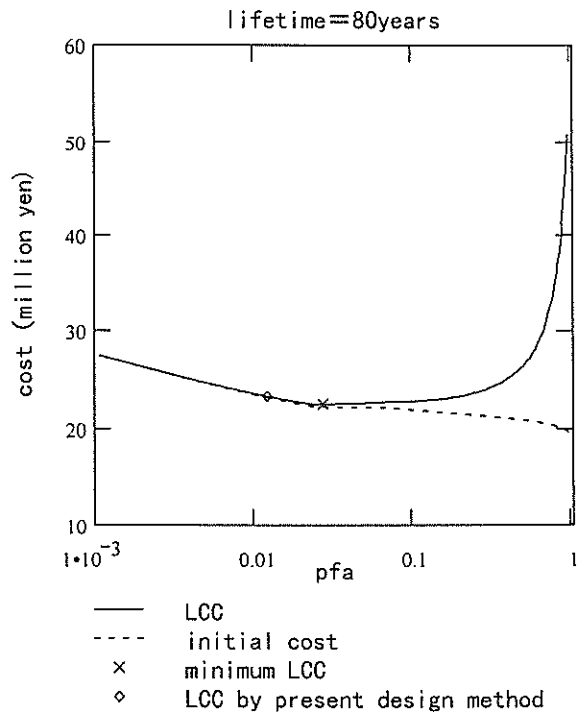
(e)



(f)



(g)



(h)

図-16 総合破壊確率とライフサイクルコスト (2/3)

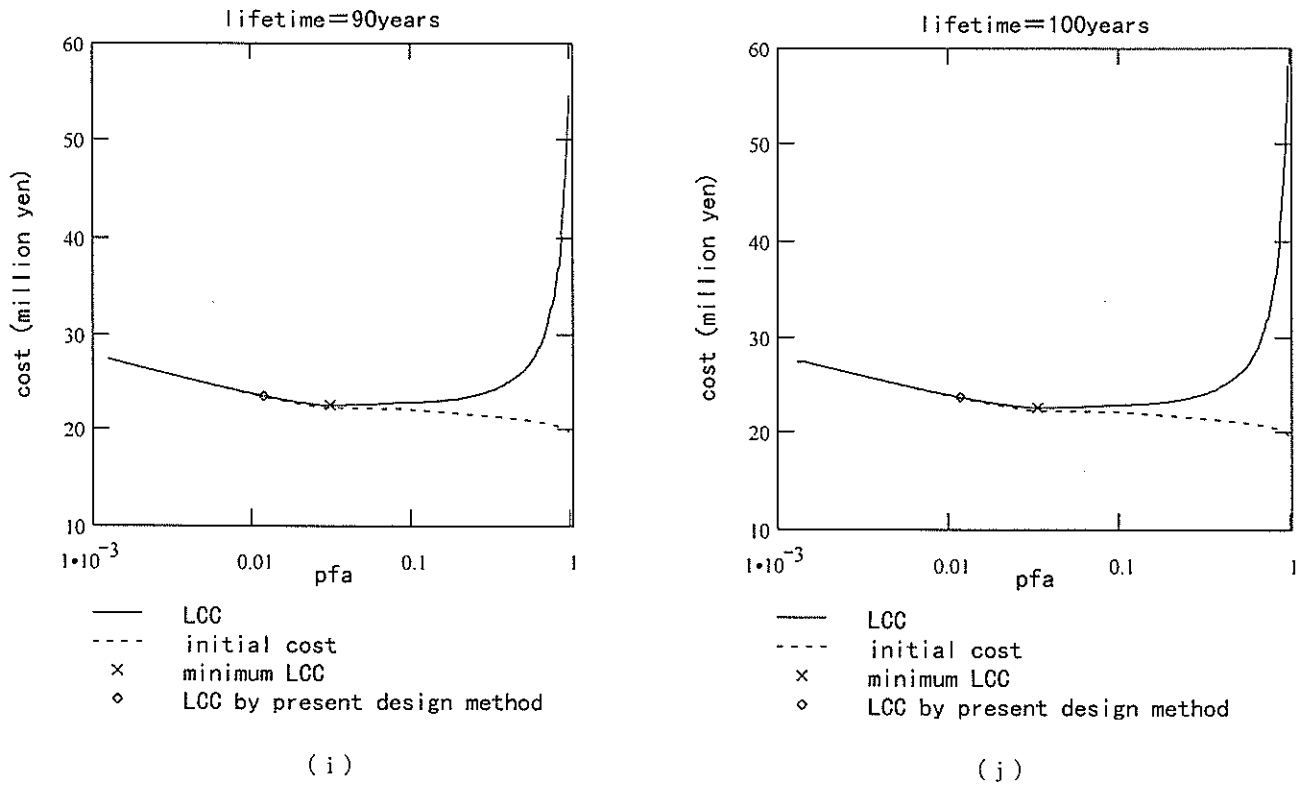


図-16 総合破壊確率とライフサイクルコスト (3 / 3)

耐用年数をさらに長く取った場合は、現行設計法とライフサイクルコスト最小化のポイントには再びずれが生じることが図より読みとれる。耐用年数が100年の場合は、ライフサイクルコストが最小となる破壊確率は 3.32×10^{-2} であるが、現行設計法による破壊確率は 1.18×10^{-2} となり、3倍程度の差がある。ライフサイクルコストは現行設計法による値が 2.36×10^7 円に対して、最小のライフサイクルコストは 2.22×10^7 円であり、6%程度の違いが生じる。初期建設費はライフサイクルコストとほぼ同じである。これは、破壊確率としては 10^2 のオーダーであるものの、支配的な荷重である再現期間100年の波の平均的な作用時期と初期建設との期間がより長くなるために、発生する被災復旧費を初期建設時の貨幣価値に換算すると非常に小さな額となるためである。

図-17には、耐用年数を水平軸に、ライフサイクルコスト最小化を図った場合および現行設計法による場合のそれぞれのライフサイクルコストと初期建設費の変化を示した。現行設計法による断面は、ライフサイクルコスト最小化の断面に比べて基本的に破壊確率が小さいため、ライフサイクルコストに占める初期コストの割合が高いことが特徴である。すなわち、ライフサイクルコストと

初期建設費の比の値は、現行設計法では1.003~1.008であり両者は1%未満の違いしかないのに比べて、ライフサイクルコスト最小化の断面の場合、比の値は、1.008~1.028である。

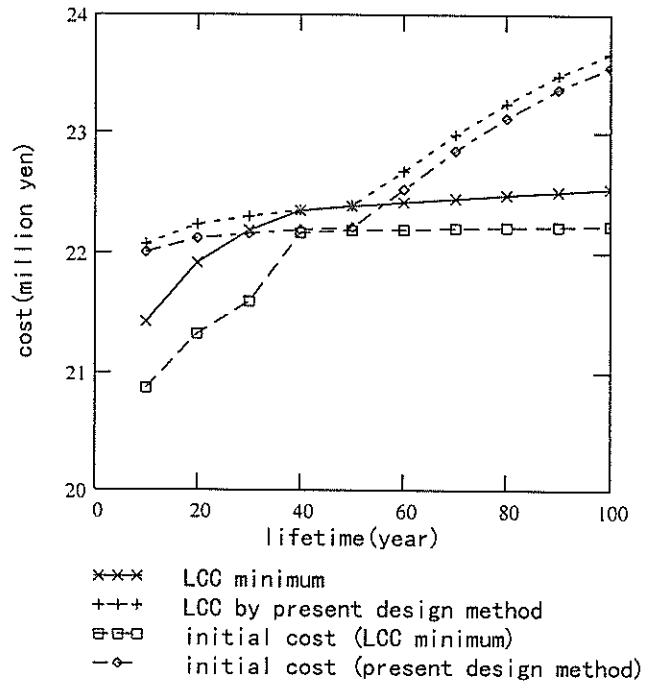


図-17 ライフサイクルコストと初期建設費の変化

ライフサイクルコスト最小化を図った断面について、現行設計法による安全率の判定を行った結果を図-18に示す。ここでの安全率は、破壊確率と同様に、耐用年数に相当する再現期間の波に対する値である。図の水平軸は耐用年数であり、鉛直軸は安全率を示している。転倒についてはすべてのケースで許容安全率を満足しているが、滑動については耐用年数が60年を超えると許容安全率1.2を下回り、耐用年数が100年の場合は安全率は1.10である。いっぽう、支持力については、すべての耐用年数について許容安全率1.0を下回っており、最小の安全率は耐用年数10年の場合の0.86である。

1999年発行の港湾の施設の技術上の基準・同解説¹²⁾においては、防波堤の全体系安全性照査について信頼性設計法の適用が一部認められ、滑動安全率が1.0を下回らない範囲において、信頼性設計法によって経済的な設計を行ってもよいこととしている。本研究のライフサイクルコスト最小化断面においては、滑動に関して安全率が1.0を下回るものはなく、技術基準を満足する範囲である。支持力については技術基準には明記されていないが、現行設計法による支持力の許容安全率1.0には隠れた安全性の余裕が含まれている³⁾ことを考慮すると、基本的には技術基準と矛盾しない範囲であるといえる。このため、ライフサイクルコスト最小化を図ることにより、技術基準の範囲内で経済的な設計が行えるといえる。

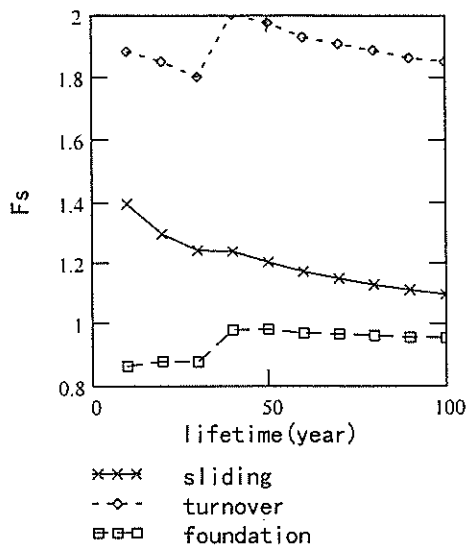


図-18 ライフサイクルコスト最小断面の安全率

ライフサイクルコスト最小化を図った断面と現行設計法による断面の初期建設費の比の値を、耐用年数との関係で図-19に示す。初期建設費の比の値の最小値は耐用年数が100年の場合の0.94であり、初期建設費の比の値

の最大値は耐用年数が40年および50年の場合の1.00である。防波堤の安全性水準を現行設計法とのキャリブレーションで設定する場合、経済性の追及の観点から、安全性の最低水準を現行設計法と信頼性設計法で一致させる方法が考えられる。いま最低安全性として5%下限値を想定すると、堤体重量は平均的に3%弱程度少なくなることが筆者らの検討³⁾でわかっている。本検討事例は1断面を対象としたものであるため厳密な比較はできないが、耐用年数が30年~70年の範囲では、ライフサイクルコスト最小化断面の初期建設費は現行設計法による値の0.97程度以上であるため、安全性水準として過度に危険な設定とはならないことが推察できる。

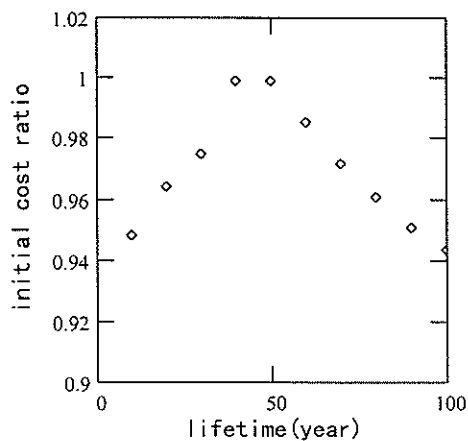
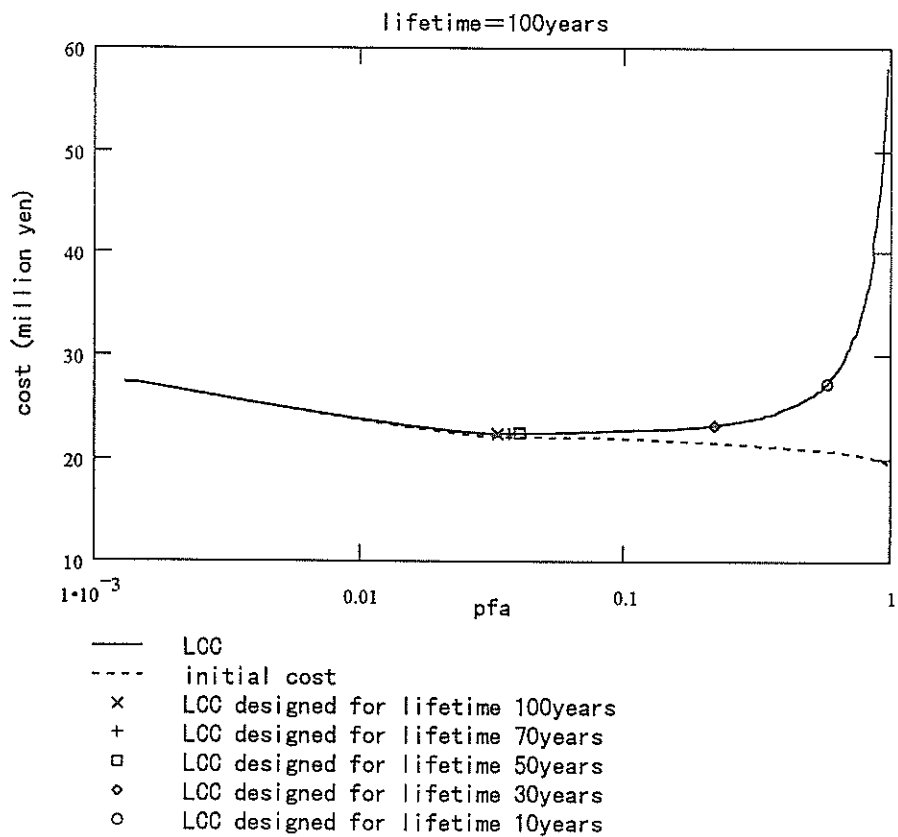


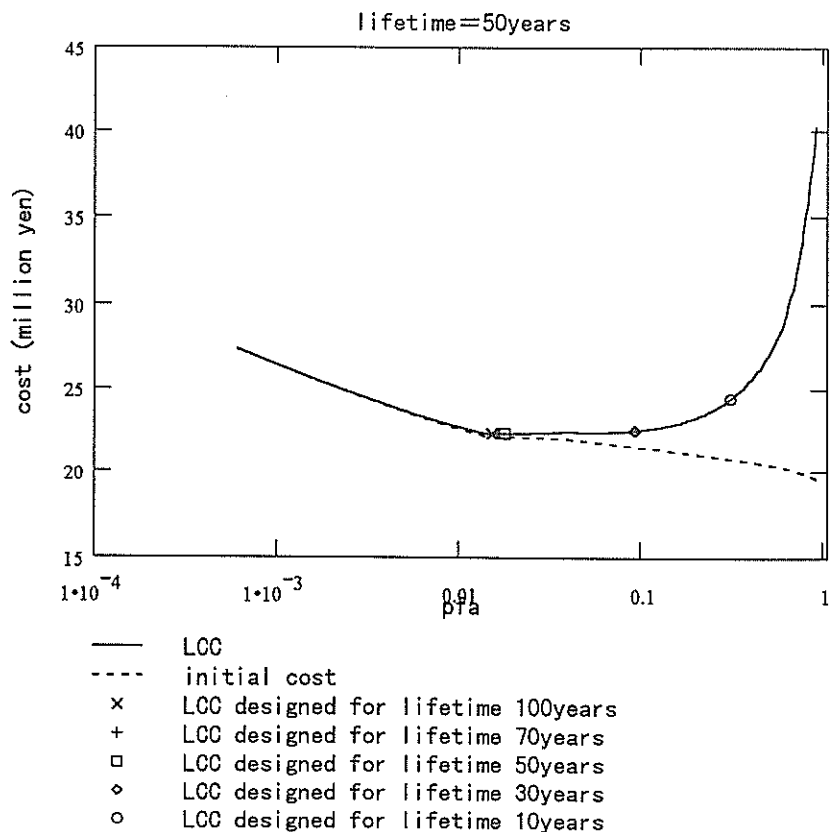
図-19 初期建設費の比の変化

次に、設計段階で想定していた耐用年数と実際の供用年数が異なる場合について検討する。これは、通常設計で考慮される50年を超えてなお防波堤が供用されている場合や、防波堤を建設してから比較的短い期間の後に港湾計画の変更などにより別の防波堤が沖に建設され、事実上当該防波堤が陳腐化した場合、あるいは、近い将来に別の防波堤が当該防波堤の沖に建設される予定であったために短い再現期間の波に対して当該防波堤の設計を行ったが、何らかの事情で新しい防波堤の建設が行われなかった場合などが相当する。

図-20に、ライフサイクルコスト最小化の観点で、耐用年数を10, 30, 50, 100年として設計した断面の、設計耐用年数と異なる供用期間におけるライフサイクルコストを示す。供用期間が100年の場合、耐用期間10年を想定してライフサイクルコスト最小設計を行うと、当初から100年の耐用年数を見込んで設計を行った場合と比べて初期建設費は94%であるが、ライフサイクルコストとしては23%の増となる。耐用年数を50年として設計を行った場合と100年を見込んで設計を行った場合のライ

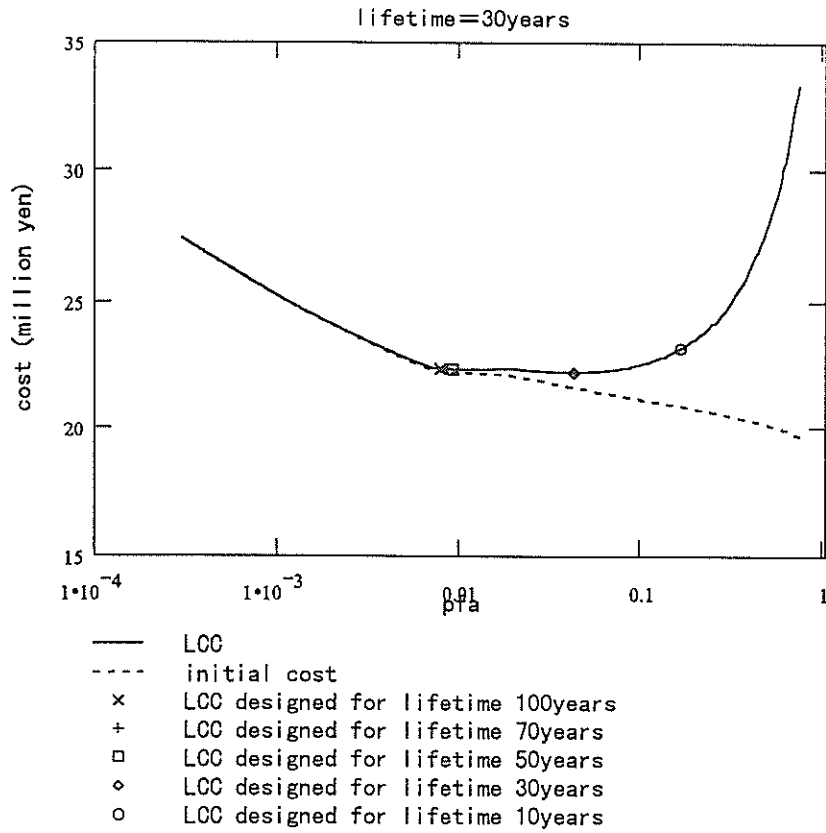


(a)

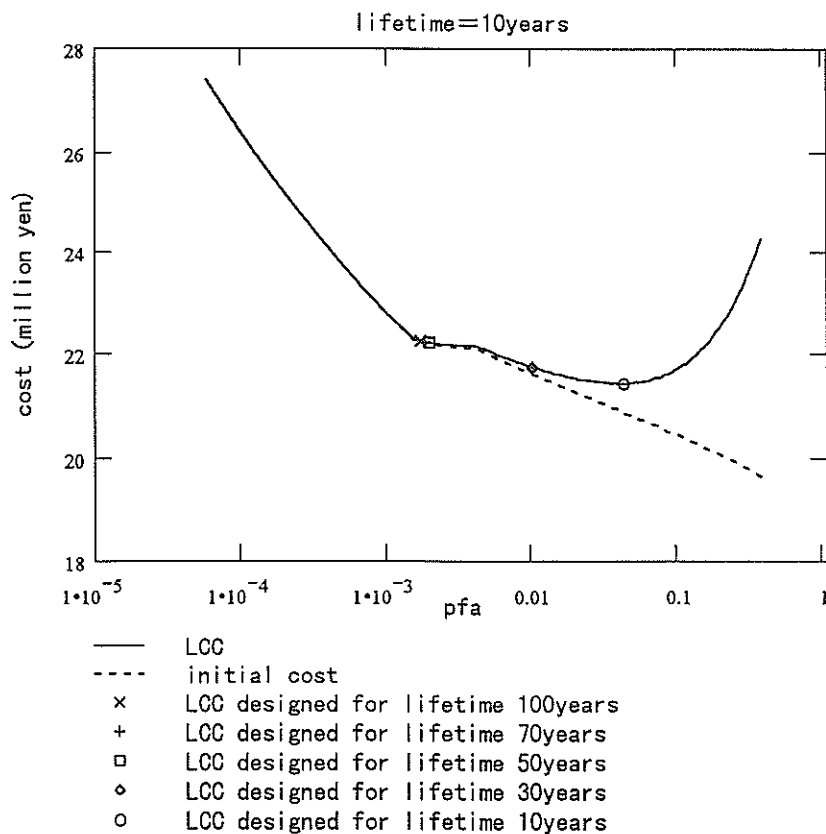


(b)

図-20 設計耐用年数と供用年数が異なる場合のライフサイクルコスト (1/2)



(c)



(d)

図-20 設計耐用年数と供用年数が異なる場合のライフサイクルコスト (2/2)

フサイクルコストとの差は1%未満であり、この断面についてはほぼ両者は一致した。逆に実際の供用期間が短くなった場合は、当然ながら供用期間に等しい耐用年数で設計を行った断面に比べてライフサイクルコストは高くなる。実際の供用期間が10年の場合、耐用年数50年を見込んで設計した場合と耐用年数10年として設計した場合は、ライフサイクルコストで4%弱、初期コストで6%強の差が生じる。

次に、ライフサイクルコスト最小の観点で目標とすべき破壊確率を耐用年数との関係で図示したものが図-21である。図より分かるように、すべての場合について最適な破壊確率は 10^{-2} のオーダーである。破壊確率を 10^{-3} のオーダーとすると被災コストは極端に小さくなるものの、初期コストが増大し、逆に破壊確率を0.1よりも大きくすると初期コストは減少するものの、破壊時のコストが増大する。このため、通常の被災復旧方法を考慮する限りは、耐用期間に相当する再現期間の波の作用時の許容破壊確率を 10^{-2} のオーダーとすることが適切であるといえる。なお図より読みとれるように、耐用年数30年を超えると波高の増加につれて許容破壊確率は増加しているが、波高が16mを下回る領域では傾向が異なっている。この理由を示したものが図-22である。耐用年数が30年未満の場合に、破壊確率が 10^{-2} のオーダーの領域では破壊確率が増加すると初期建設費が単調に減少する。このような条件では、ある程度破壊確率を高く設定することによって初期建設費を減少させることがライフサイクルコストの減少につながる。しかしながら、耐用年数が30年を超えると、破壊確率が 10^{-2} のオーダーの領域では破壊確率が増加しても初期建設費がほとんど変化しない。これは支配的な破壊モードが異なるなどの影響であるが、このような場合は破壊確率を低く抑えても初期建設費はほとんど増加しないため、破壊確率をある程度低く保つことがライフサイクルコストの減少につながる。なお、この傾向は対象とする断面によって異なるものであり、一般化した議論を行うことは適切ではない。

なお、本報告では扱っていないが、被災時の間接的コストを考慮した場合、被災コストはこれまでの想定よりも増加する。また、小規模な被災の場合、消波ブロックによる被覆を法線維持の必要最小限に抑えることも考えられる。そこで、耐用年数が10年と50年の2ケースについて、復旧時に要するコストをこれまでの2倍とした場合と、逆にこれまでの50%とした場合について、ライフサイクルコストの検討を行った。結果を図-23に示す。

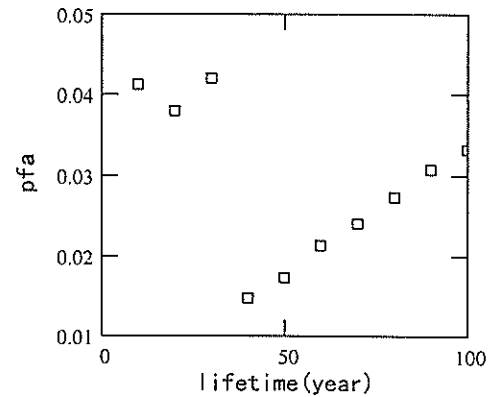


図-21 許容破壊確率とライフサイクルコスト

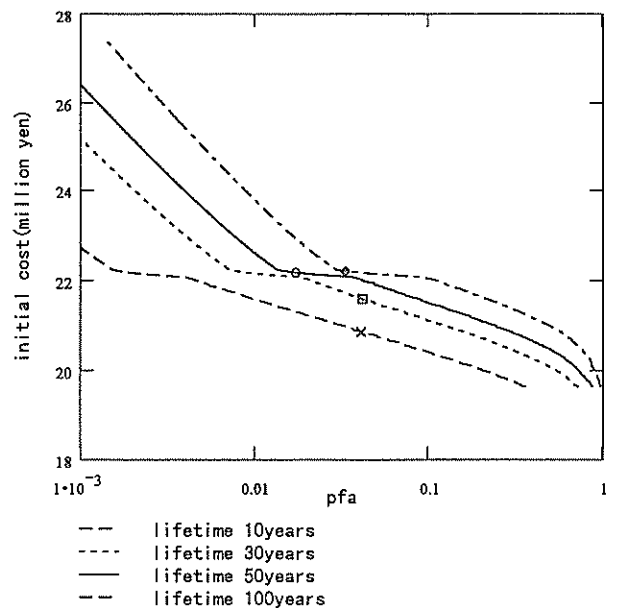


図-22 破壊確率と初期建設費

復旧費が通常の場合の許容破壊確率の最適値は、耐用年数10年の場合で 8.08×10^{-2} 、耐用年数50年の場合で 9.85×10^{-2} となり、いずれの場合も0.1に近い値となるが、0.1を上回ることはない。逆に復旧費が通常の場合の2倍の場合の許容破壊確率の最適値は、耐用年数10年の場合で 1.67×10^{-2} 、耐用年数50年の場合で 1.73×10^{-2} となり、0.01に近い値となる。以上により、本報告で対象とした断面においては、ライフサイクルコスト最小化の観点による許容破壊確率は 10^{-2} のオーダーとすることが適切であるといえる。なおライフサイクルコストとしては、耐用年数50年の場合、 2.21×10^7 円から 2.26×10^7 円の範囲にあり、その差は復旧費が大きく変化しても2%程度でしかない。

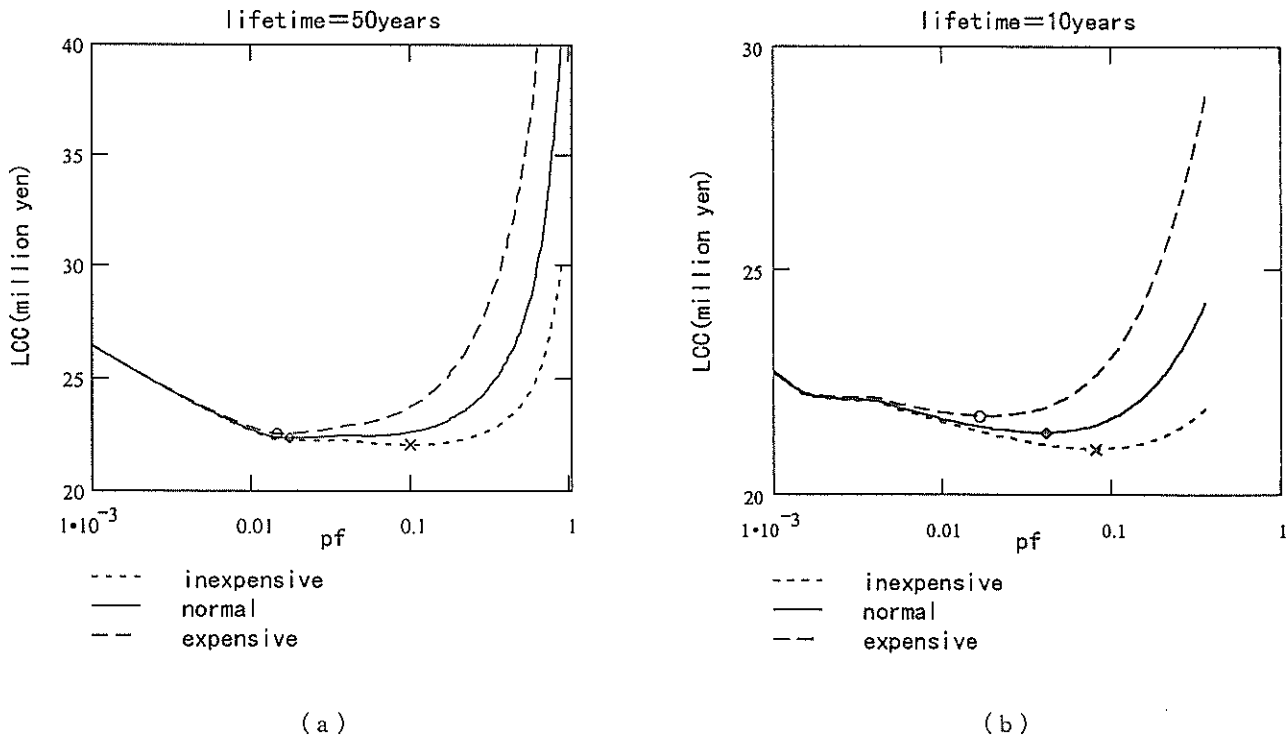


図-23 被害コストを変化させた場合のライフサイクルコスト

4. まとめ

本報告においては、ケーソン式防波堤を対象に、初期建設費、破壊確率と被災回数を考慮した復旧費用、資本金利の影響などを総合的に考慮したライフサイクルコストの検討を行った。本研究により得られた主要な結論は次の通りである。

- ①防波堤の破壊確率を考慮したライフサイクルコストの算出方法をレベル2信頼性設計法を用いて定式化した。
- ②耐用期間および荷重再現期間の変化に伴うライフサイクルコスト、最適な許容破壊確率の変化について考察した。
- ③ライフサイクルコスト最小化の観点から適切な防波堤の破壊確率は、検討対象とした断面に関しては、耐用年数にかかわらず、耐用年数に等しい再現期間の波に対して 10^2 のオーダーであった。
- ④現行設計法による安全性水準は、ライフサイクルコストに関しても概ね妥当であることを確認した。しかしながら、信頼性理論を適用したライフサイクルコスト最小化をはかることにより、建設コストを現行設計法による値よりも減じることができることを示した。

5. あとがき

本報告で扱った防波堤のライフサイクルコストは、建築の分野や橋梁などと異なり、メンテナンスに要する費用は被災が生じない限り基本的に発生しないことから、破壊の可能性と初期建設費のバランスにより最小化が図られる。ここで扱った手法を設計実務に適用するにあたっては、間接的な被害費用を現地の防波堤が果たす機能を勘案しながら適切に算定することが必要である。

研究のとりまとめに際しては、福手計画設計基準部長、山本設計基準研究室長から懇切な指導をいただいたほか、渡部主任研究官から社会的割引率について助言いただいた。ここにご協力いただいた関係者に厚く感謝します。

(1999年3月31日受付)

参考文献

- 1)長尾 毅, 門脇陽治, 寺内 潔: 信頼性設計法による防波堤の全体系安全性(第1報)～滑動安全性に関する検討～, 港湾技術研究所報告, Vol.34, No.1,1995, pp.69～113.
- 2)長尾 毅, 門脇陽治, 土田 孝, 寺内 潔: 信頼性

- 設計法による防波堤の全体系安全性（第2報）～支持力安全性に関する検討～，港湾技術研究所報告，Vol.36，No.1,1997，pp.25～57.
- 3)長尾 毅・大久保昇・川崎 進・林由木夫：信頼性設計法による防波堤の全体系安全性（第3報）～レベル1，2の設計法の適用性総括～，港湾技術研究所報告，Vol.37，No.2，1998，pp.131～176.
- 4)高山知司，鈴木康正，河合弘泰，藤咲秀可：防波堤の信頼性設計に向けて，港湾技研資料，No.785,1994.
- 5)星谷 勝，石井 清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 6)建設大臣官房官庁営繕部監修：建築物のライフサイクルコスト，（財）経済調査会，1993.
- 7)土木学会編：土木工学ハンドブックⅡ，技報堂出版，pp.2175～2176.
- 8)奥平 聖：事前評価はどこまで実施されているかー道路事業の場合ー，土木学会誌，Vol.84，feb. 1999，pp.28～30.
- 9)大釜達夫：事前評価はどこまで実施されているかー運輸関係公共事業の場合ー，土木学会誌，Vol.84，feb. 1999，pp.30～31.
- 10)土木学会編：海外交通プロジェクトの評価，鹿島出版会，1986.
- 11)L. マゼル著，佐藤平八訳：確率・統計・ランダム過程，森北出版株式会社，1980.
- 12)運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999.
- 主要記号一覧**
- a : 水平荷重のアーム長(m)
 b : 分割細片の幅
 C_i : 初期建設費
 C_F : 破壊時損失費
 C_T : 期待総費用
 c' : 有効応力に基づく見かけの粘着力
 $E_f(n)$: 対象波による期待被災回数
 F : 安全率
 f : 壁体底面と基礎との摩擦係数
 H : 水平荷重
 h : 壁体に作用する全水平力の合力の作用線から壁体底面までの高さ
 i : 社会的割引率
 j : 対象とする波の再現期間
 LCC : ライフサイクルコスト
- n : 対象とする波の発生回数
 P : 壁体に作用する全水平力
 P_f : 破壊確率，総合破壊確率
 P_{fs} : 滑动破壊確率
 P_{ft} : 支持力破壊確率
 P_{ft} : 転倒破壊確率
 $P_{f(L)}$: 供用年数 L 年間の破壊確率
 $P(F/E)$: 対象とする波による破壊確率
 $P(E)$: 対象波が作用する確率
 $P(n)$: 対象波が n 回発生する確率
 q : 分割細片に作用するサーチャージ
 R : 耐力関数
 r : すべり円弧の半径
 S : 荷重関数
 T : 再現期間
 t : 壁体に作用する全鉛直力の合力の作用線から壁体前しまでの距離，期間
 W : 壁体に作用する全鉛直合力
 W' : 分割細片の重量
 X_0 : 因子 X の推定値
 $X_{0,m}$: 因子 X の真値の平均値
 Z : 性能関数
 z : Z の規準化変数
 α : 平均値の偏り，分割細片の底面となす角
 β : 安全性指標
 μ : 平均値
 ν : 対象とする波の年平均発生率
 σ : 標準偏差
 σ_R : 耐力 R の標準偏差
 σ_S : 荷重 S の標準偏差
 ϕ' : 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角
 $\phi(z)$: 標準正規確率密度関数
 Φ : 標準正規確率分布関数