

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

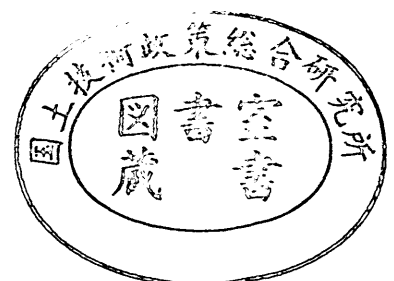
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 37

NO. 2

June 1998

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第37巻 第2号 (Vol. 37, No. 2), 1998年6月 (June 1998)

目 次 (CONTENTS)

着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動北詰昌樹・山本浩司	3
Stability of group column type DMM groundMasaki KITAZUME, Hiroshi YAMAMOTO	
ケーソンの安定性に及ぼす裏込めの効果菊池喜昭・新舎 博・江口信也	29
Effects of the back-filling to the stability of a caissonYoshiaki KIKUCHI, Hiroshi SHINSHA, Shin-ya EGUCHI	
大阪湾洪積粘土の三軸せん断特性と大型護岸構造物の安定性渡部要一・土田 孝・足立格一郎	59
Undrained Shear Strength of Osaka Pleistocene Clay And Stability of Large Scale Seawall StructureYoichi WATABE, Takashi TSUCHIDA, Kakuichiro ADACHI	
鋼管杭式棧橋の地震応答解析結果に基づく設計水平震度の考察横田 弘・竹鼻直人・南 兼一郎・高橋邦夫・川端規之	75
Consideration of Design Seismic Coefficients of An Open Type Wharf Based on Dynamic Response AnalysesHiroshi YOKOTA, Naoto TAKEHANA, Ken'ichiro MINAMI, Kunio TAKAHASHI, Noriyuki KAWABATA	
信頼性設計法による防波堤の全体系安全性 (第3報) ーレベル1, 2の設計法の適用性総括ー長尾 毅・大久保昇・川崎 進・林由木夫	131
Evaluation of Safety of Breakwaters by the Reliability Based Design Method (3rd Report: Concluding the Applicability of Reliability Based Design Method)Takashi NAGAO, Noboru OKUBO, Susumu KAWASAKI, Yukio HAYASHI	
棧橋上部工の荷役機械荷重を考慮した疲労限界状態設計長尾 毅・横田 弘・竹地晃一郎・川崎 進・大久保昇	177
Fatigue Limit State Design Method for Superstructures of Open Type Wharves in view of Cargo Handling Machine LoadsTakashi NAGAO, Hiroshi YOKOTA, Koichiro TAKECHI, Susumu KAWASAKI, Noboru OKUBO	

水中レーザー視認装置による画像化実験

……秋園純一・佐藤栄治・田中敏成・高橋義明・朝妻春和・小林 健・斎藤利貴 ……221

Imaging Experiments of Underwater Laser Viewing System

……………Jun'ichi AKIZONO, Eiji SATO, Toshinari TANAKA, Yoshiaki TAKAHASHI,
Harukazu ASATSUMA, Takeshi KOBAYASHI, Toshitaka SAITO

歩行式水中調査ロボットの開発

－（第4報）歩容及び軌道の実時間計画法－

……………田中敏成・秋園純一・高橋英俊・佐藤栄治・鈴木健治・米田 完・
金山 裕・Robert B. McGhee・竹内俱佳 ……259

Development of Aquatic walking Robot for Underwater Inspection

－（The 4th report）A Method of Real-time Gait, Trajectory and Path Planning－

……………Toshinari TANAKA, Jun'ich AKIZONO, Hidetoshi TAKAHASHI, Eiji SATO, Kenji SUZUKI,
Kan YONEDA, Yutaka KANAYAMA, Robert B. McGhee, Tomoyoshi TAKEUCHI

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 —

長尾 毅^{*}・大久保昇^{**}・川崎 進^{***}・林由木夫^{****}

要 旨

本報告は、防波堤の全体系安全性照査へのレベル1およびレベル2の信頼性設計法の適用性の評価に関する一連の研究を総括するものである。近年における全国の重力式防波堤の設計事例76例をもとにして、現行設計法による防波堤の滑動、転倒、支持力の各安全性を安全性指標により評価し、各破壊モードに対する安全性を相互比較するとともに、全ての破壊モードを考慮した総合的な破壊可能性について検討した。また、レベル1およびレベル2の信頼性設計法の、全ての破壊モードを考慮した総合破壊確率を基準にした適用性を検討した。

本研究により得られた主要な結論は以下のとおりである。

- ①レベル1およびレベル2の信頼性設計法によって防波堤の全体系安全性を照査する手法を提案した。提案は、現行設計法によって建造される施設と平均的に同程度の安全性を持つ設計法と、建造される施設の安全性の最低水準(5%下限値)を現行設計法と揃える設計法よりなるものである。前者の方法による場合、堤体の重量は総体的に現行設計法とほぼ等しく、後者の方法による場合、堤体重量は現行設計法によるよりも平均的に2~3%減少させることができる。
- ②現行設計法と平均的に同程度の安全性を持つ施設を設計する手法については、総合破壊確率に関してレベル1とレベル2で合理性に大きな違いはなく、設計の簡易なレベル1信頼性設計法によって十分に合理的な設計を行うことができる。
- ③現行設計法と最低水準を下回る割合を揃える手法に関しても、レベル1およびレベル2の方法いずれも高い適用性を持つ。しかしながら、この方法では現行設計法よりも平均的に安全性を下げることとなるため、より信頼性の高いレベル2の方法による方がより望ましいと判断される。
- ④レベル2信頼性設計法における目標安全性指標の設定は総合安全性指標に比較的敏感である。これに対して、レベル1の信頼性設計法における安全係数の設定は総合安全性指標に比較的鈍感である。

キーワード：信頼性設計法，安全性指標，安全係数，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 設計基準研究室研修生 (福岡市港湾局)
 - *** 計画設計基準部 設計基準研究室研修生 ((株)名村造船所)
 - **** 前計画設計基準部 設計基準研究室研修生 (福岡市港湾局)

Evaluation of Safety of Breakwaters by the Reliability Based Design Method (3rd Report: Concluding the Applicability of Reliability Based Design Method)

Takashi NAGAO *
Noboru OKUBO **
Susumu KAWASAKI ***
Yukio HAYASHI ****

Synopsis

This present report concludes the series of studies on application of reliability based design method to the design of breakwaters.

Safety indices against sliding, turnover, and foundation failure of breakwaters designed with the present design system have been calculated by the reliability based design method. Synthetic failure probability of breakwaters have been discussed.

Applicability of reliability based design method has been investigated in view of controlling the synthetic failure probability.

The main conclusions drawn from the study are as follows:

1) The design ways (levels 1 and 2) of breakwaters by the reliability based design method have been established. Safety factors for the level 1 method and target safety indices for the level 2 method have been proposed.

The design ways consist of two methods ; one in which the mean failure probability agrees with that by the present design method, and the other in which the rate of structures of whose failure probability falls below the lowest standard of failure probability agrees with that by the present design method.

2) Both level 1 method and level 2 method are applicable as to the design way in which the mean failure probability agrees with that by the present design method. Considering the easiness of the calculation process, level 1 method is preferable with the equal rationality to the level 2 method in view of controlling the synthetic failure probability.

3) Level 2 method is preferable as to the design way in which the rate of structures of whose failure probability falls below the lowest standard agrees with that by the present design method because of the accuracy in controlling the failure probability, for that method makes the mean value of failure probability smaller than that by the present design method.

Key Words : Reliability Based Design Method, Safety Index, 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)

** Trainee of Design Standard Laboratory, Planning and Design Standard Division (The City of Fukuoka Port and Harbor Bureau)

*** Trainee of Design Standard Laboratory, Planning and Design Standard Division (Namura Shipbuilding Co., Ltd.)

**** Ex-Trainee of Design Standard Laboratory, Planning and Design Standard Division (The City of Fukuoka Port and Harbor Bureau)

目 次

1. まえがき	135
2. 信頼性設計法	136
2. 1 信頼性設計法 の概念	136
2. 2 レベル1 の信頼性設計法	137
2. 3 レベル2 の信頼性設計法	137
2. 4 信頼性設計法 の目標安全性	138
2. 5 設計因子の従う確率分布の推定	139
2. 6 安全性の評価	141
3. 現行設計法による施設の安全性	141
3. 1 現行設計法	141
3. 2 安全性の評価方法	142
3. 3 検討対象施設	144
3. 4 滑動安全性	145
3. 5 転倒安全性	147
3. 6 支持力安全性	150
3. 7 各安全性の相互比較	151
3. 8 信頼性設計法による目標安全性指標	154
4. レベル2の信頼性設計法の適用	154
4. 1 適用の考え方	154
4. 2 適用結果	154
5. レベル1の信頼性設計法の適用	162
5. 1 適用の考え方	162
5. 2 安全係数の設定	162
5. 3 適用結果と安全係数のキャリブレーション	164
6. 各レベルの適用性	172
7. 結 論	173
8. あとがき	174
参考文献	174
主要記号一覧	175

1. まえがき

構造物の設計計算においては、安全率を用いて耐力と荷重のそれぞれの計算上の誤差を考慮する方法が長年にわたり採用されてきた。この方法は簡便であるものの、設計される構造物の安全性は定量的には明らかではなかった。設計基準類に採用されてきたこの設計法は仕様規定型設計法に分類することができる。

設計コードを仕様規定型設計法から、性能規定型設計法に変革しようとする動きが各方面で盛んである。性能規定型設計法では、設計計算式、設計計算に用いるパラメータの標準値などを細かく規定するのではなく、構造物が保持すべき性能のみが示される。防波堤の滑動問題を例にとると、従来の仕様規定型設計コードでは、滑動安全性照査式、許容安全率、荷重の計算式、抵抗力の計算式などが具体的に示されていた。これに対して性能規定型設計コードでは、例えば、「防波堤は滑動破壊に対して十分安全ように設計しなければならない」といった命題のみが与えられることになる。実際には「十分安全」の度合いが問題となり、より厳密には、例えば「防波堤は耐用期間中に滑動破壊を生じる可能性が $x\%$ 以下になるように設計しなければならない」という形式で課題が示される。こうした課題に対して、従来型の設計法で満足な回答を出すことは困難である。

性能規定型の設計コードに対応が可能で、かつ従来型の設計法よりも合理的な設計法として適用が期待されている手法が信頼性設計法である。信頼性設計法は、設計の過程に含まれるさまざまな不確実性を定量的に評価し、耐用期間中に構造物が破壊する可能性を許容値以下に収めるものである。

信頼性設計法には3つのレベルがある。最も簡易なレベル1の方法は世界的にも広く用いられてきている。鉄筋コンクリートの部材設計に用いられている限界状態設計法も形式的にはレベル1の信頼性設計法に相当するもので、港湾構造物への適用については、筆者のうち一人がその設計法を検討してきた^{1, 2)}。

本報告は防波堤の全体系安全性^{3, 4)}を対象としている。防波堤の全体系安全性のうち、滑動安全性に関しては、破壊のメカニズムとしては基本的に水平方向の力の釣り合いを議論すればよく、荷重などのパラメータの確率分布も比較的推定が容易であるため、これまで多くの研究者によって検討がなされてきた。外山⁵⁾および鈴木⁶⁾は信頼性設計法の適用のための予備的検討を行っている。また、高山^{7, 8)}はモデル断面を用いて滑動に関する破壊確率を試計算によって算出するとともに、初期建設コ

ストに被災後の復旧費を加算したトータルコストを最小にする設計手法について予備的な検討を行っている。筆者らは、本報告の第1報⁹⁾において、全国の防波堤の設計事例のうち、滑動が支配的と考えられる断面45例を抽出し、現行設計法による施設の安全性を定量的に評価するとともに、レベル1およびレベル2の信頼性設計法の適用性を検討した。その結果、滑動安全性に関してはレベル1およびレベル2のいずれの手法も適用性が高く、現行設計法と比較して合理的であることがわかった。

支持力問題に関しては、破壊のメカニズムの把握、土質強度などのパラメータの分布の推定などに困難な点があり、これまでの研究事例は滑動に比べて少ない。土田⁹⁾は、モンテカルロシミュレーションを適用して破壊確率を計算し、支持力不足による耐用期間中の期待沈下量を算出する試みを行っている。筆者らは、本報告の第2報⁹⁾において、防波堤の設計事例40例を対象に、現行設計法による施設の安全性を定量的に評価するとともに、レベル1およびレベル2の信頼性設計法の適用性を検討した。その結果、防波堤の支持力安全性をピシヨップ法で照査する場合、レベル1の信頼性設計法は特に高マウンド堤において適用性が低く、設計法の合理化の観点からはレベル2以上の信頼性設計法の適用が適切であることがわかった。また、支持力と滑動の安全性指標の相互比較、実際の被災の傾向との整合性から、波圧時における地盤の強度定数の平均値を静的な試験から求められた現行の設計値を20%増加させた値とすることが適切であること、現行設計法の支持力の許容安全率1.0には隠れた安全性の余裕度が見込まれていることなどがわかった。

このように滑動および支持力について、これまで単独に現行設計法による施設の安全性の評価及び信頼性設計法の適用性を検討してきたが、設計では滑動・転倒・支持力の3つの破壊モードすべてに対して安全性を確保するため、信頼性設計法の適用性の最終的な評価もすべての破壊モードに対する安全性に基づいて総合的に判定する必要がある。このような背景のもと、本報告は、防波堤の全体系安全性照査へのレベル1およびレベル2の信頼性設計法の適用性の評価に関する一連の研究を総括するものである。近年における全国の重力式防波堤の設計事例76例をもとにして、現行設計法による防波堤の滑動、支持力に加えて転倒の安全性を安全性指標により評価し、各破壊モードに対する安全性を相互比較するとともに、全ての破壊モードを考慮したシステムとしての総合的な破壊の可能性について検討した。また、レベル1およびレベル2の信頼性設計法の、すべての破壊モードを考慮した総合破壊確率を基準とした適用性を検討した。

2. 信頼性設計法

2.1 信頼性設計法 の概念

構造物の設計においては、耐力と荷重の値を何らかのモデルを用いて計算し、耐力が荷重を上回ることを確認する。防波堤の滑動安全性を例にとると、有効鉛直力に摩擦係数を乗じた値が耐力に、また水平波圧の値が荷重に相当する。従来の設計法では、計算過程上の不確定性を考慮して、耐力と荷重の比の値は通常1.0以上の値に保たれる。この比の値は安全率と呼ばれる。荷重にせよ耐力にせよ、実際はある確率分布に従う確率変数であるが、簡単のためすべての設計因子を確定値として取り扱い、設計用値から実際の値が危険側にずれる危険性を安全率で考慮していたのである。この手法は長年にわたり用いられてきたが、設計される構造物の破壊に対する安全性が定量的には明確ではないという大きな欠点を有している。このため、設計者は構造物の安全性を定量的にコントロールすることができない。

こうした従来型の設計法に替わるより合理的な方法として提案されているのが信頼性設計法である。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るものである。信頼性設計法には3つのレベルがある。レベル3は厳密な確率計算により構造物の破壊確率を計算し、その値を許容値以内に収める方法である。レベル2の方法においては各変数の確率分布を正規分布などの扱いやすい分布に仮定し、耐力および荷重の平均値と標準偏差から求められる安全性指標が目標値を上回ることを確認する。レベル1の方法では構造物が限界状態を越える確率が許容値以下になるように、各変数のばらつきを考慮した特性値と安全係数を定めて安全性を照査する。もっとも用いられる頻度の高いものがこのレベル1の方法である。これらの手法を用いることにより、構造物を合理的に設計することが可能になる。換言すれば、極端な安全性もしくは危険性を持つ構造物を設計してしまうリスクを減少させることが可能になる。

3つのレベルのうち、最も精緻で複雑なものは厳密な確率計算を行うレベル3の方法であるが、設計に用いるすべてのパラメータの従う確率分布が明確になっている必要があり、現時点では設計実務への適用には困難な点が多いといえる。これに対してレベル1およびレベル2の方法においては、比較的容易に設計計算を行うことができる。特にレベル1の方法では、荷重や自重などの特性値に対して従来設計に用いてきた値を基本的にそのまま用いることも可能であり、設計実務者が比較的容易に使いこなすことが期待できる。鉄筋コンクリート部材の

設計で用いられる限界状態設計法は、手法としてはレベル1の方法に相当する。本研究においては、レベル1およびレベル2の方法を取り扱う。

レベル1およびレベル2の方法で重要な意味を持つのが安全性指標と呼ばれるパラメータである。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。 Z は破壊関数と呼ばれることもある。 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、

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

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。通常の土木構造物の持つ安全性指標の値は、おおむね1.5~4.0の範囲にあるとい

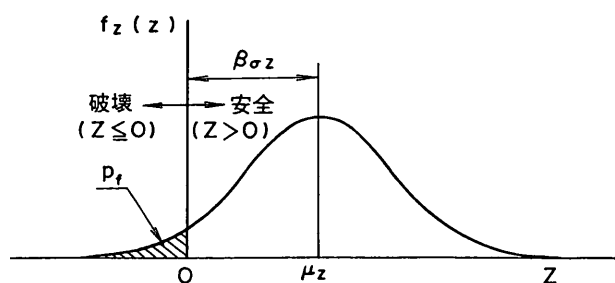


図-1 安全性指標¹⁰⁾

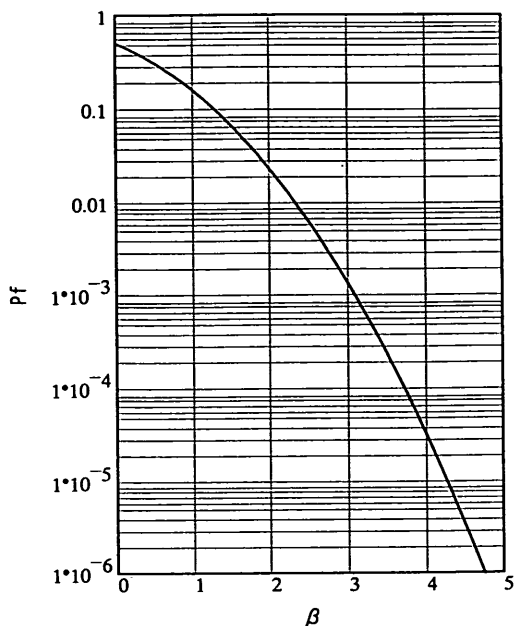


図-2 破壊確率と安全性指標の関係

える。

2.2 レベル1の信頼性設計法

レベル1の信頼性設計法は、もっとも簡便な形の信頼性設計法である。安全性照査には式(5)が用いられる。

$$\gamma_R R_K \geq \gamma_S S_K \quad (5)$$

ここに、

γ_R : 耐力に関する安全係数

γ_S : 荷重に関する安全係数

R_K : 耐力の特性値

S_K : 荷重の特性値

式から明らかなように、レベル1の方法の安全性判定基準式は従来型の設計法と同形式である。特性値に安全係数を乗じた値を設計用値と呼ぶ。従来の設計法では安全係数を個別に考慮しないため、特性値と設計用値は等しいことになる。

レベル1の信頼性設計法では、安全係数をいかに定めるかが問題となる。安全係数の設定は、目標とする安全性を設定することと同義であるためである。

式(4)に分離係数 α を導入して式(6)の線形化近似関係を利用することにより、安全係数は式(7)~式(8)によって得られる。図-3に、分離係数 α と σ_R/σ_S の関係を示すが、分離係数 α は、0.70~0.75程度としておけばよいことがわかる。

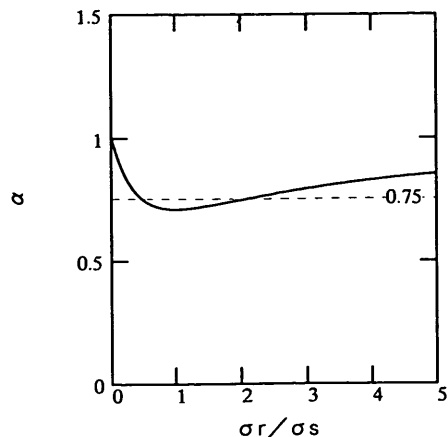


図-3 分離係数 α と σ_R/σ_S の関係

$$(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2} \cong \alpha (\sigma_R + \sigma_S) \quad (6)$$

$$\gamma_R = (1 - \alpha \beta_\tau V_R) \frac{\mu_R}{R_K} \quad (7)$$

$$\gamma_S = (1 + \alpha \beta_\tau V_S) \frac{\mu_S}{S_K} \quad (8)$$

ここに、 V_R 、 V_S はそれぞれ耐力および荷重の変動係数、 β_τ は目標安全性指標である。このように、レベル1の信頼性設計法では、構造物の破壊確率が許容値以下になるように安全係数が設定される。式(7)、(8)の安全係数を用いることにより、安全性照査式(5)は式(4)と等価となる。ただし、性能関数が線形でない場合はこのような形で安全係数を定めることに困難な場合がある。

2.3 レベル2の信頼性設計法

レベル2の信頼性設計法は、安全性指標の値そのものを判定基準とするものである。すなわち、設計される構造物の安全性指標を算出し、これが目標値を上回ることを確認する。数式で表現すると式(9)のようになる。

$$\beta \geq \beta_\tau \quad (9)$$

レベル1の方法では安全係数と特性値を用いて安全性の判定が行われるため、構造物の安全性指標が目標値以上であるかどうかを直接的には確認することなしに設計計算が行われる。これに対してレベル2の方法では、安全性指標は目標値を必ず上回ることが保証されている。ただし、安全性指標の計算という、従来はなかったプロセスが設計計算の中で必要になる。

このほかの信頼性設計法で用いられるパラメータとしては、中央安全率があげられる。耐力と荷重のそれぞれの平均値の比の値であり、式(10)で表される。

$$\theta = \mu_R / \mu_S \quad (10)$$

2. 4 信頼性設計法の目標安全性

信頼性設計法では構造物の安全性の目標値 β_T は別途定める必要がある。この方法には以下のようなものがある¹⁰⁾。

①事故統計に基づく方法

事故や損傷に関する統計資料に基づいて事故・損傷が1年間に発生する確率を計算し、これを参考に目標安全性を決定する方法である。

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を求めて、その資料に基づき目標安全性を定める方法である。最もよく用いられる方法で、特に現行設計法がある程度の実績を有している場合には有利である。

③他の災害危険性との比較による方法

構造物の破壊に伴って予測される1人当りの死亡危険性を自然災害あるいは他の人為災害による危険性と比べて、ある水準以下に設定する方法である。

④人的損失に対する危険性回避に要する投資効果による方法

構造物の破壊に伴って予測される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である。

⑤期待総費用最小化に基づく方法

式(11)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である。

$$C_T = C_i + P_i C_F \quad (11)$$

ここに、

C_T : 期待総費用

C_i : 初期建設費

P_i : 供用期間中の破壊確率

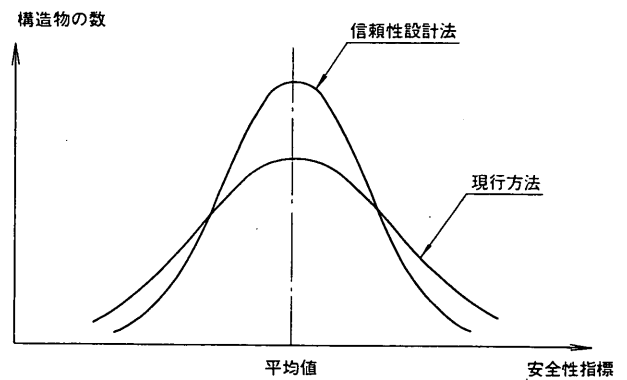
C_F : 破壊時損失費

港湾構造物の場合、施設の破壊と人命の損失を関連付けて論じることは不適切である。また費用面については、港湾構造物は公共構造物であるために直接の被害額のみならず、社会的被害額（港内の静穏度の低下により流通機構の被る損失、それに付随する生産機構などの効率の低下、交通手段が途絶した場合の人流の損失など）を適切に見積もる必要があるほか、特に防波堤の場合、被害の形態によって復旧費用は大きく異なることから、説明

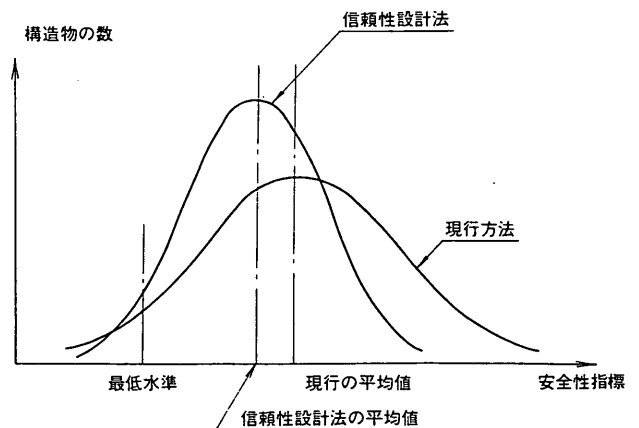
的なモデルを構築する際に困難な点が多いと判断される。

このように港湾構造物では目標安全性を研究の積み重ねによって明らかにすることは難しく、多分に行政的な判断を必要とするが、現時点では上記②の方法が最適であると考えられる。諸外国の規準なども、多くは②の方法により策定されている。鉄筋コンクリート港湾構造物の部材設計へ適用が予定されている限界状態設計法も基本的に②の方法を採用している¹¹⁾。以上の理由により、本研究ではこの方法を採用する。

キャリブレーションの方法としては、安全性の平均値が同程度になるようにする方法と、ある安全水準を設定してその水準を下回る割合を同程度にする方法の二つが考えられる（図-4）。前者の方法によれば、総体的な建設コストは従来のレベルに保ったうえで、安全性が極端に高いか、または低い構造物の割合が少なくなり、後者の方法によれば平均的な安全水準は従来の設計法に比べて低くなるが、経済性が発揮され、かつ過大な設計が少なくなる¹¹⁾。



(a) 平均値を同じにする



(b) 最低水準以下のものの割合を同じにする

図-4 キャリブレーションの方法¹¹⁾

2.5 設計因子の従う確率分布の推定

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、本研究では表-1に示す分布を想定する。表に示したパラメータ α は式(12)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。

$$\alpha = X_{0.05} / X_e \quad (12)$$

ここに、

α : 設計因子の真値の平均値のかたより

$X_{0.05}$: 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-1に掲げた以外の不確定要因、例えば波向きのおぼらつき、海水の単位体積重量のおぼらつき、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。

以下では各因子の従う確率分布について簡単に述べるが、分布の推定の詳細については、第1報³⁾および第2報⁴⁾を参照されたい。

表-1 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	
	?		
	2.5		
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

①波力関連因子の推定精度

波力の推定精度には、沖波算定、波浪変形計算、波力算定公式などの精度が関係する。推定精度は構造形式、海底勾配によって異なる。ここでは高山らの検討例^{7, 8)}を参考に、表-1で表される精度を考慮する。沖波の推定精度は、構造物の耐用期間に相当する再現期間の沖波の推定精度である。波力算定公式の精度に関する値は基本的に水平波圧の精度であるが、揚圧力についても便宜的に同じ精度と考える。表よりわかるように、構造形式、海底勾配の違いによる精度の違いは大きい。例えば、ケーソン式混成堤では平均的に7~8%程度消波ブロック被覆堤よりも大きめに波力を算定していることになる。海底勾配の緩急の区別については、既往の実験データなどを参考に、海底勾配が1/30以下の場合を緩勾配、1/30をこえる場合を急勾配として扱う。

②潮位

潮位変動は正弦波などの簡単な関数形で近似することには問題があり、確率分布を正規分布などの簡単な分布にあてはめることは難しい。本研究においては、気象潮が発達し異常潮位が発生する状況においては異常波浪が同時に生起する可能性が高いことから、構造物にとって最も危険な状態として満潮時に異常潮位偏差が発生すると仮定して安全性の検討を行う。式(13)に示すように、過去の既往最大偏差をH.W.L.に加えた既往最高潮位(H.H.W.L.)と設計潮位の比の値を、地域性を有する潮位パラメータ γ_i として定義する。

$$\gamma_i = h' / h \quad (13)$$

ここに、

h' : 既往最高潮位 (H.H.W.L.)

h : さく望平均満潮位 (H.W.L.)

全国の沿岸域における既往最大偏差を過去50年間の統計データ¹²⁾から設定し、 γ_i の値を計算した結果を地域的にまとめたものが図-5である。潮位の分布としては平均値の設計値に対する比 α として γ_i の値を用い、標準偏差は0とする。また、設計潮位として、高波に基づくH.H.W.L.を用いている場合は γ_i の値は1.0とする。津波に基づくH.H.W.L.が設計潮位として用いられている場合は題意に適さないため、さく望平均満潮位を用いて計算を行う。第1報³⁾で検討したように、潮位分布の仮定が安全性指標に及ぼす影響は比較的小さい。

③摩擦係数

コンクリートとマウンド用捨石に対する摩擦係数（設計用値0.6）については、例えば、運輸省第一港湾建設

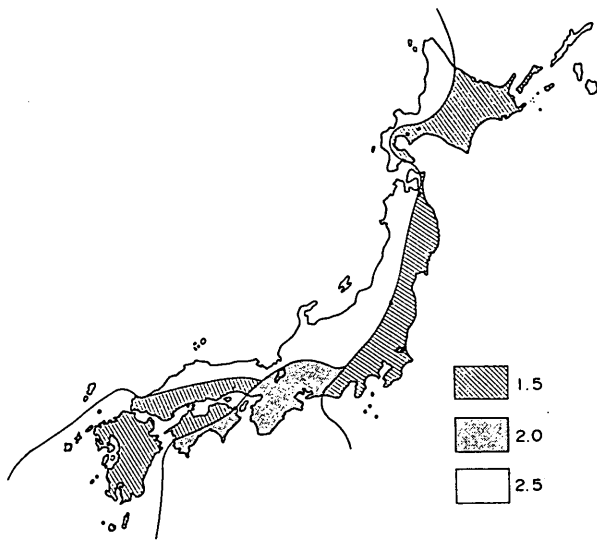


図-5 γ の分布³⁾

局がケーソン式混成堤をモデルにコンクリートと捨石の摩擦係数を求める実験を行っている^{13, 14)}。各種の実験結果を見ると摩擦係数については個々の実験どうしでのばらつきも大きい。摩擦係数の分布は滑動の安全性指標に対して非常に敏感である¹⁵⁾ため、分布の推定には注意を要する。表-1に示した値は、高山ら^{7, 8)}がそれら既往の実験結果をふまえて設定したものである。この値は、既往の実験結果のうち α を小さく、 V を大きく見積もったもので、もっとも安全側の設定といえる。なお、経済的な理由などから、堤体底面に摩擦増大マットを敷設する場合がある。本研究では、摩擦増大マットを用いる場合（設計用値0.7程度）についても、通常の場合と同じ α 、 V の値を仮定する。

④堤体重量に関する単位体積重量

重力式防波堤の構成材料の単位体積重量は、ケーソンを構成する鉄筋コンクリート（設計用値24.0kN/m³）、ふたコンクリートと上部工の無筋コンクリート（設計用値22.6kN/m³）、および中詰材（砂の場合、設計用値18~20kN/m³程度）である。表-1に示した値は、南ら¹⁶⁾によって整理された値である。中詰砂の分布は、単位体積重量が18, 19, 20kN/m³の3種類のデータから求められたものである。

⑤基礎地盤の密度

基礎地盤密度の設計用値としては、捨石マウンドや砂質土地盤の場合、試験を行うことなく20kN/m³程度の値が、また粘性土地盤の場合は不攪乱試料の密度試験結果（沖積粘性土では14~18kN/m³程度）の値が用いられることが多い。松尾¹⁷⁾による各地の飽和粘土の密度分布

の例を見ると密度の変動係数は0.02~0.04の範囲にあり、平均的には0.03程度である。砂地盤や捨石マウンドについてのデータは比較的少ないが、ほぼ粘性土地盤と同様に取り扱ってよいものと考えられる。

⑥基礎地盤強度

ビショップ法によって偏心傾斜荷重に対する支持力安全性を照査する場合、捨石マウンドの強度定数としては $c=20\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=35^\circ$ が、また砂質土地盤の強度定数には N 値が10以下の場合 $\phi=40^\circ$ 、 N 値が10以上の場合 $\phi=45^\circ$ が用いられる。これらの値は、有効上載圧の影響を考慮して定められたものである。

基礎地盤強度の分布を推定するための検討としては、碎石に関してこれまでに荘司¹⁹⁾および水上ら²⁰⁾の研究があり、また粘性土地盤については松尾¹⁷⁾ら、砂質土地盤については筆者ら⁴⁾の検討がある。ここで必要となる強度の分布は、偏心傾斜荷重が作用した際の支持力安全性をビショップ法で評価する際の分布であることに注意が必要である。石の強度には時間依存性が大きく、波圧のような短期的な荷重に対しては比較的強度が高く取れる²⁰⁾ことを考慮し、筆者ら⁴⁾は、滑動の安全性や実被災事例との比較検討を通じて、波圧時における地盤強度の平均値は静的な試験から求められた現行設計法による値よりも20%程度以上大きいと推定した。また、強度の変動係数については、0.1程度が適当であると考えられる。地盤強度についてはこのほかに、空間的な自己相関特性を考慮する必要がある。すべり面が大きくなると強度の分散は相対的に小さくなり、逆にすべり面が小さいと強度の分散は相対的に大きくなる。本研究では、土田ら⁹⁾と同様に、深度方向に2~2.5m程度を単位として確率的に独立な土層が堆積していると考え、すべり円が2~2.5m程度を単位とする n 個の土層を切るとき、各層の変動係数は0.1を n の平方根で割った値になる。水平方向については、海成粘土の C_c, m_v などについて調査した結果、自己相関性が深度方向と比較して非常に強く、円形すべり計算で考慮する50m程度以内範囲ではほぼ均一と見なしてよい²¹⁾ことから、均質な一つの層と見なす。

⑦サーチャージ

支持力の検討を行う際、現行設計法では堤体重量は荷重の偏心傾斜率を考慮した等分布荷重に換算する。この荷重をサーチャージと呼ぶ。サーチャージの分布は、全国の防波堤の設計事例40例をもとにして、式(14)で与えられるサーチャージの値をテラー展開することにより求めている⁴⁾。なおその際、サーチャージの載荷幅については確定的に扱う。

$$q = W^2 / \{2(M_w - M_h)\} \quad (14)$$

ここに、

q : サーチャージ (kN/m²)

W : 有効鉛直荷重 (kN/m)

M_w : 鉛直荷重による壁体前し回りの抵抗モーメント (kN・m/m)

M_h : 水平荷重による壁体前し回りの転倒モーメント (kN・m/m)

2. 6 安全性の評価

本研究においては、破壊の判定を荷重が抵抗力を上回るか否かで行う。厳密には荷重が抵抗力を超えた場合に物理的に必ずしも破壊現象が生じるわけではないが、便宜上、本研究では荷重が抵抗力を上回った状態を破壊と定義し、その確率を破壊確率と呼ぶ。

本研究で評価を行う防波堤の安全性は、設計計算で用いられる波高を持つ波の作用に対する安全性である。通常は構造物の耐用期間と波の再現期間を一致させることが多い。設計沖波としては再現期間50年程度の値が用いられることが多く、再現期間を T 年とすると、 L 年間に再現期間 T 年以上の波高の波が襲来する確率 $p_{i(u, T)}$ は式(15)で表される。

$$p_{i(u, T)} = 1 - (1 - 1/T)^L \quad (15)$$

これより、耐用期間 L 年間に再現期間 T 年の波の作用によって破壊が生じる確率 $p_{f(u, T)}$ は、再現期間 T 年の波に対する破壊確率を p_T とすると式(16)で表される。

$$p_{f(u, T)} = p_{i(u, T)} p_T \quad (16)$$

50年間に作用する波高と作用回数を文献1)の方法によって一例を示すと図-6のようになる。構造物の耐用期間中の破壊確率 P は、近似的には作用が想定されるすべての波に対する破壊確率 $p_{f(u, T)}$ の総和によって表される。数式で表現すると式(17)のようになる。

$$P \approx \sum p_{f(u, T)} \quad (17)$$

式(17)によって計算される総合破壊確率より得られる安全性指標は、条件にもよるが、目安としては再現期間 T 年の波の作用に対する安全性指標に近い値を取ることが多いと考えられる。

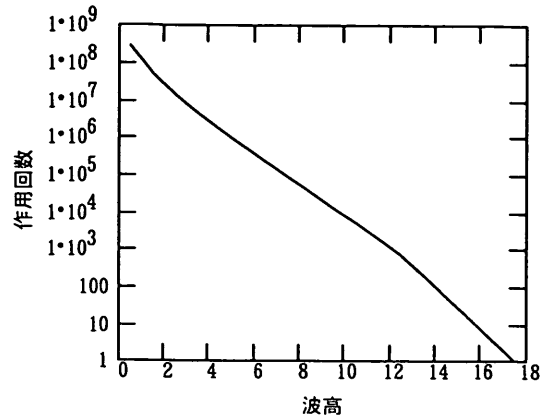


図-6 耐用期間中の作用波高と回数例

3. 現行設計法による施設の安全性

3. 1 現行設計法^{2,2)}

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。滑動については波圧作用時、転倒と支持力破壊については波圧作用時および地震時の安全性を証査する。

滑動安全性の証査には式(18)が用いられる。

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

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。

転倒に対しては式(19)が用いられる。

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

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。

支持力の安定については、対象とする防波堤が捨石マ

ウンド上に構築されている2層系構造の場合、波圧作用状態下で堤体に作用する合力が偏心し、かつ傾斜していることを考慮して、ビショップ法による円弧すべり計算を行う。この際、すべり面の始点は荷重の着力点に対して近い方の基礎の端と対称の点と考える。捨石マウンドに作用する偏心傾斜荷重は、壁体底面前しとすべり面の始点の間に作用する鉛直の等分布荷重（サーチャージ）に換算する。水平波圧は壁体底面に作用させる。安全性照査式は式(20)に示すとおりである。

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

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 (°)
- 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)

ビショップ法の安全率 F は、基本的には土が発揮しうる最大のせん断強度と実際に発揮しているせん断強度の比の値を示しており、設計計算では式(20)の左辺と右辺の安全率 F を等置して収束計算を行う。波圧作用下の支

持力の検討における許容安全率は、1.0が用いられる。

3. 2 安全性の評価方法

(1) 安全性指標の算出

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。

滑動および転倒破壊モードについては、耐力と荷重は1断面につきただひとつ与えられるが、支持力については円弧すべり計算を行うため、複数のすべり円弧に対応した耐力と荷重（安全性指標）が計算される。支持力の安全性指標については、このうちの最小値を用いる。偏心傾斜荷重作用時の支持力問題では深い土層を切るすべり円弧が問題になることは少なく、多くは捨石マウンド内または海底面以下第一層の土層を切るすべり円弧が問題になることから、あるひとつのすべり円弧を対象とした安全性指標を支持力の安全性指標とする。すべり円弧の始点は現行設計法と同様の考え方により設定し、ばらつきを見込まない。このため、分割細片に作用するサーチャージの載荷幅を確定的に扱うことになる。これはレベル1の設計を行う際の計算の簡略化のために行う措置であり、実際のサーチャージ載荷幅の平均的な値と現行設計法による値との違いが安全性指標に及ぼす影響については別途検討する。

(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)

$$\begin{aligned} \mu_R &= a_W \mu_W - a_{Pb} \mu_{Pb} - a_{Pu} \mu_{Pu} \\ \sigma_R^2 &= a_W^2 \sigma_W^2 + a_{Pb}^2 \sigma_{Pb}^2 + a_{Pu}^2 \sigma_{Pu}^2 \\ \mu_S &= a_{Ph} \mu_{Ph} \\ \sigma_S^2 &= a_{Ph}^2 \sigma_{Ph}^2 \end{aligned} \quad (22)$$

(支持力安全性)

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

(2) 総合破壊確率の算出

施設の安全性評価では、これまでは個々の破壊モードに対する安全性のみを検証対象としてきたが、実際には全ての破壊モードを考慮した総合的な破壊可能性が問題となる。

一般の構造系は、概念的には直列系または並列系のシステムとして表現できる¹⁰⁾。直列系とは、複数ある破壊モードのうち、どの破壊モードが生起しても構造系として破壊に至る場合であり、並列系とは、すべての破壊モードが同時に生起する場合に構造系として破壊に至る場合である。前者の破壊は破壊モードの和として、後者の破壊は破壊モードの積として表現される。港湾の防波堤の全体系安全性は、このうち直列系システムに相当する。

直列システムについては、複数の破壊モードが互いに独立であると仮定すると、システムの破壊確率は式(24)で表現され¹⁰⁾、本研究においてはこの式を用いる。なお、各々の破壊確率が小さい場合は、式(25)によっても十分な精度の近似解が得られる。

一般に複数の破壊モードを対象にする場合、各々の破壊モードの相関が問題となり、AngによるPNET法¹⁰⁾などが知られているが、本研究で扱う防波堤の全体系安全性の場合、後述するように滑動の破壊モードが支配的であるため、式(24)による評価で十分な精度の総合破壊確率が算定されるものと考えられる。

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

$$P_f = P_{fs} + P_{fi} + P_{fi} \tag{25}$$

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

(3) 現行設計法による設計

本研究で収集した防波堤断面は、後述するように近年の設計事例をもとにしているが、設計法が一部現行の技術基準²²⁾によるものとは異なる場合があるほか、衝撃波力の影響は必ずしも十分に考慮されているとはいえないため、収集した断面について現行設計法によって安定計算を再度行い、許容安全率をすべて満足する最小の断面を設計した。その際、ケーソン式混成堤については、高橋ら²³⁾の提案による衝撃波力係数を考慮する。再設計の条件は次のとおりである。

- ①マウンド形状、ケーソンの基本的形状は収集断面のとおりとする。
- ②隔室長やフーチング長さの変更ピッチは0.05mとする。
- ③原断面をもとに、安全率が許容値を下回るかあるいは過大である場合は、まずフーチング長を最大2.0mから最小0mまでの範囲で変化させる。フーチング長さの変更後もなお安全率が不足するかまたは過大である場合は、隔室長を変化させる。

フーチング長の最大値2.0mという設定は、第2報⁴⁾と同じ扱いである。フーチング長が長くなるとフーチング部に発生する断面力が非常に大きくなり、部材設計上不利となることから、既往の設計事例のほぼ限界の長さとして定めたものである。

3. 3 検討対象施設

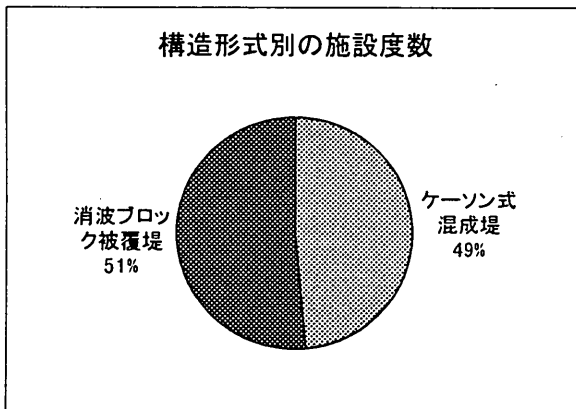
現行設計法により設計された実際の施設の安全性判定は、前報^{3, 4)}と同様に実際の防波堤設計事例を収集・解析することにより行った。収集の条件は以下に示すとおりである。

- ①地域的及び設計条件的に偏りが生じないように、全国広範囲から事例を収集した。
- ②構造形式としては最も一般的なケーソン式混成堤および消波ブロック被覆堤とし、防波堤の前面は直立部のみにより構成されているものとした。このため、例えば上部斜面堤などは対象外とした。
- ③防波堤の基礎部分は、基礎地盤の上に捨石マウンドを築造した2層系構造のものに限定した。

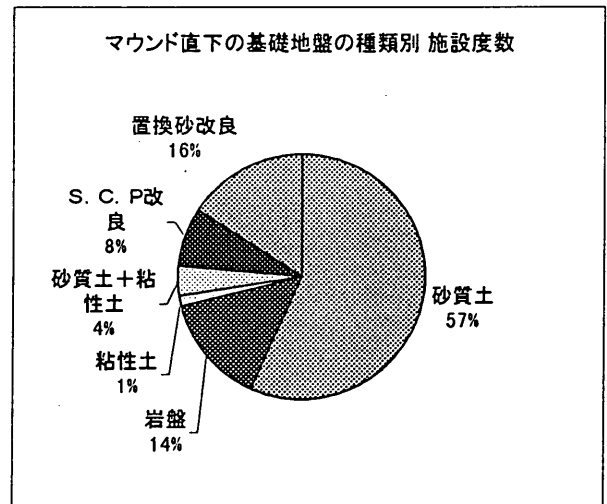
上記の条件を満足するものとして76例を収集した。防波堤の場合、支持力が支配的となるケースは滑動と比べ

て少ないため、支持力の安全率が許容値1.0に近いもの ($1.0 \leq F_s \leq 1.1$) はそのうち18例であった。

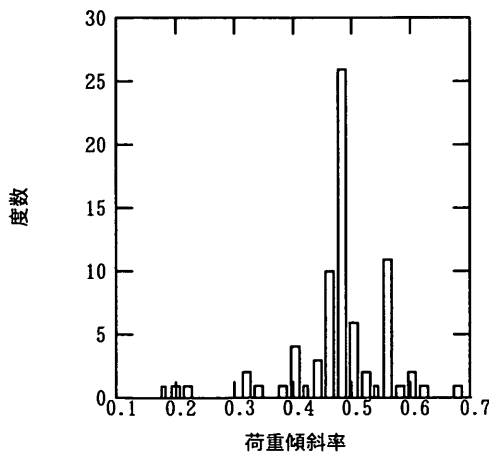
今回検討対象とした施設の特徴を図-7に示す。(a)は構造形式別の施設の割合を示している。検討対象とした76例のうち、ケーソン式混成堤は37例、消波ブロック被覆堤は39例で、母集団としてはほぼ同数収集されている。(b)は捨石マウンド直下の基礎地盤の種類別の割合を示している。砂質土層の例が多く、全体の57%を占めている。対照的に、地盤改良された事例も含め、粘性土地盤の例は全体の約29%と少ない。その他は、岩盤が14%である。(c)は荷重傾斜率についてまとめたものである。港湾の施設の技術上の基準・解説²²⁾においては、偏心傾斜荷重の定義として荷重傾斜率が0.1以上のものとしている。収集事例の荷重傾斜率は0.19~0.68の範囲にあり、そのうち0.45~0.50の範囲にある事例が最も多かった。平均値は0.49であった。(d)は水深別の施設度数で、水深5.3~27.5mの範囲にばらついており、水深12~20mのものが最も多い。(e)はケーソン設置水深と水深の比の施設度数で、対象施設の値は0.47~0.85の範囲



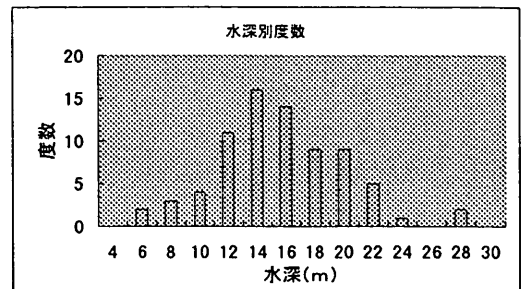
(a)



(b)

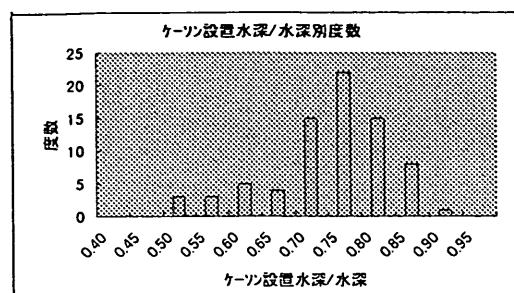


(c)

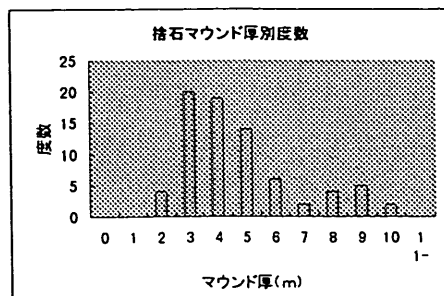


(d)

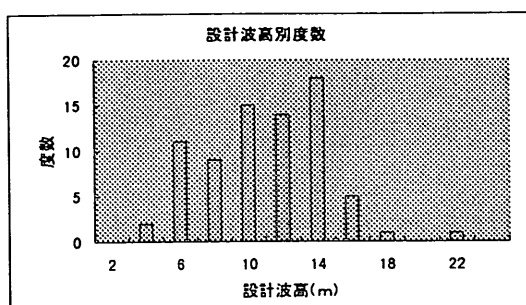
図-7 検討対象事例



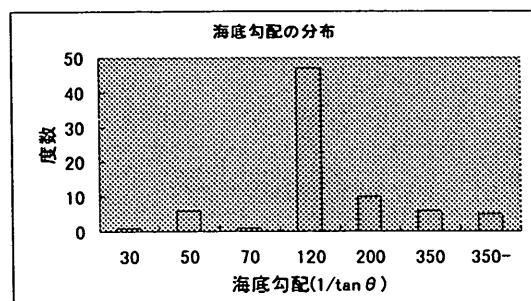
(e)



(f)



(g)



(h)

図-7 検討対象事例

にあり、そのうち0.70~0.85の間のもが最も多かった。(f)は捨石マウンド厚別の施設度数で、捨石マウンド厚は1.6~10.0mの範囲にあり、3.0~5.0mの範囲のもが最も多い。(g)は設計波高別の施設度数で、3.0~20.0mの範囲にばらついており、6~14mのもが最も多かった。(h)は海底勾配別の施設度数である。海底勾配は2.で述べたように波浪変形計算の精度に関連し、勾配が1/30を境界に緩勾配と急勾配に類別される。今回収集した事例は全て緩勾配であり、急勾配の事例はなかった。勾配の値としては1/120のもが最も多かった。これらいずれの諸元の分布も堀川ら²⁴⁾などによる全国の防波堤の諸元の分布の傾向と一致しており、ここで対象とした施設の条件には特に偏りはないものと考えられる。

3.4 滑動安全性

収集した断面について3.2で述べた方法により再設計を行った結果、滑動が支配的な断面は76例中50例と最も多く、ついで支持力が16例、転倒が10例となった。滑動安全率の分布は図-8に示すとおりである。安全率は1.20~2.10の範囲にあるが、滑動が支配的な断面が多いことから、平均値は1.25となる。

滑動安全性指標の分布は図-9に示すとおりである。図-9(a)を見ると、解析対象とした構造物の滑動安全性指標の範囲は1.63~3.66であり、平均値は2.43、標準偏差は0.35であった。この安全性指標を破壊確率に換算すると、 10^{-2} から 10^{-4} のオーダーとなる。

図-9(b)は構造形式別に安全性指標を整理したものである。ケーソン式混成堤と消波ブロック被覆堤は母集

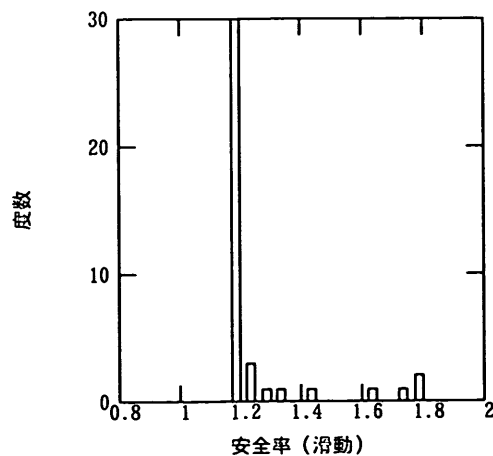
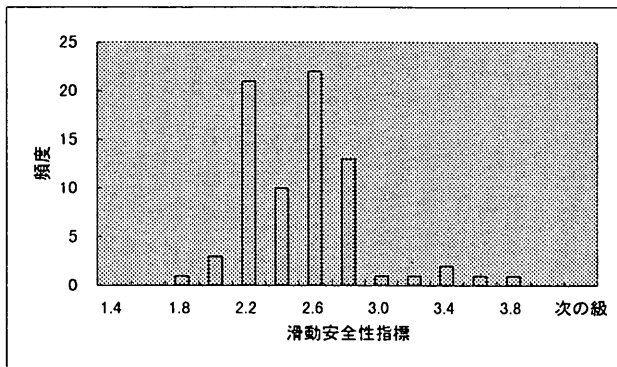


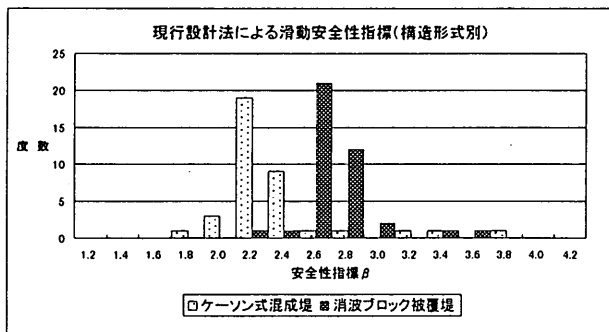
図-8 滑動安全率の分布

団としてはほぼ同程度であるが、安全性指標の値には差が生じている。すなわち、前者の安全性指標は1.63～3.66の範囲に分布しており、平均値は2.27であるのに対して、消波ブロック被覆堤では安全性指標は1.98～3.42の範囲で、平均値は2.58となる。これは、表-1に示した設計因子の分布のうち、波力算定式の精度が構造形式によって差があることが原因である。波力算定式の推定精度は、式(4)の μ_s 、 σ_s の値に直接関係するため、安全性指標の値に及ぼす影響は大きい。

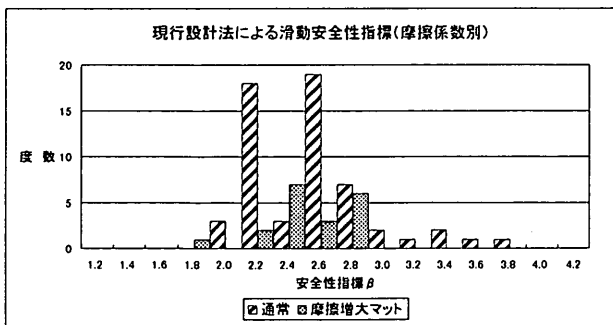
図-9(c)は現行設計法による安全性指標を摩擦係数



(a)



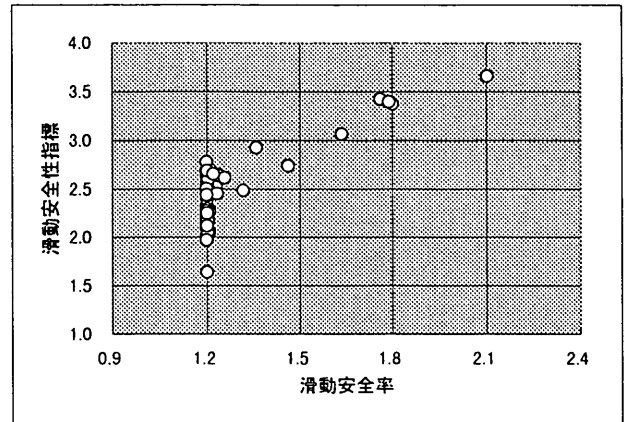
(b)



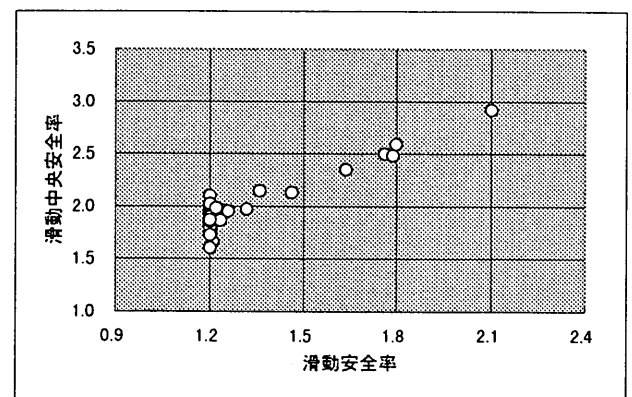
(c)

図-9 滑動安全性指標の分布

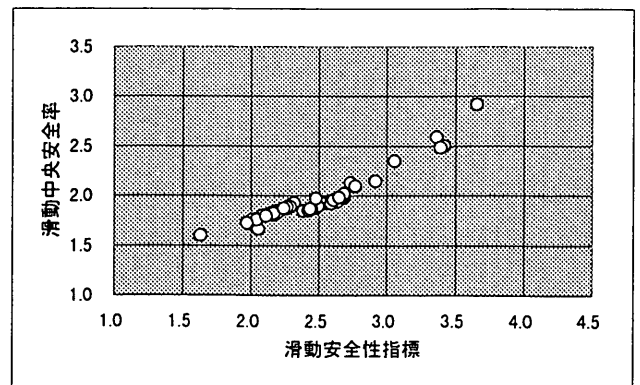
別に示したものである。検討対象とした施設数は、摩擦増大マットを用いた施設 ($\mu = 0.7$) が19例、用いない施設 ($\mu = 0.6$) が57例と差はあるが、摩擦係数の分布を同じとしたため、安全性指標の分布に顕著な差は認められない。安全性指標の値は摩擦増大マットを用いた施設で、1.97～3.66、平均値が2.44、標準偏差が0.38、用



(a)



(b)



(c)

図-10 安全率・安全性指標・中央安全率の関係(滑動)

いない施設で2.65~2.77, 平均値が2.40, 標準偏差が0.28となっている。

図-10は安全率・安全性指標・中央安全率の関係を示している。図-10(a)より安全率と安全性指標は正の相関関係にあるように思われるが, 設計上問題となる安全率1.2付近では, 安全性指標の値が1.6~2.8程度の広範囲にばらついている。このことは, 現行設計法による安全率の値から構造物の安全性指標を精度良く推定することが困難なことを示しており, 現行設計法のフォーマットを用いて設計を合理化することが難しいことがわかる。図-10(b)は滑動安全率と滑動中央安全率の関係を示している。この関係についても(a)と同様のことがいえる。図-10(c)は安全性指標と中央安全率の関係を示している。図より安全性指標と中央安全率は, 比較的強い正の相関関係にあることがわかる。

次に, 安全性指標の分布を以下に示すパラメータによって整理した。

- ①マウンド天端の水深と設計有義波高の比 ($d/H_{1/3}$)
- ②設計有義波高と設計水深の比 ($H_{1/3}/h$)
- ③マウンド天端の水深と設計水深の比 (d/h)
- ④設計水深と波長の比 (h/L)
- ⑤設計波高とケーソン高さの比 ($H_{max}/\text{ケーソン高さ}$)
- ⑥荷重傾斜率
- ⑦マウンド前肩幅と波長の比 (B_M/L)
- ⑧設計波高とマウンド天端の水深の比 (H_{max}/d)
- ⑨設計波高と設計水深の比 (H_{max}/h)

$d/H_{1/3}$ は, $d/H_{1/3} \geq 1$ で重複波領域, $d/H_{1/3} < 1$ で砕波領域にほぼ相当することから, 砕波の影響を表すパラメータとして用いた。同様に $H_{1/3}/h$, d/h についても, 砕波の影響を表すパラメータとして用いている。

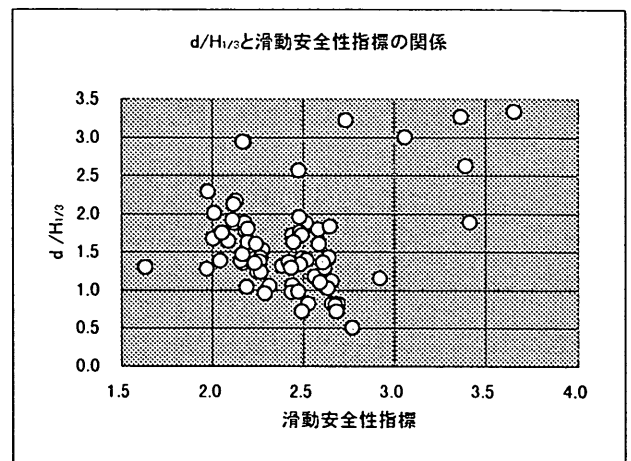
h/L は合田式に用いられるパラメータであり, 波長の影響を見るパラメータとして用いた。 B_M/L は, 衝撃波力の程度を表す指標として用いた。

結果を図-11に示す。いずれの指標についても, ごく弱い相関以上の相関性は認められず, 設計上用いられるこれらのパラメータを用いて安全性指標を推定することも困難であることがわかる。

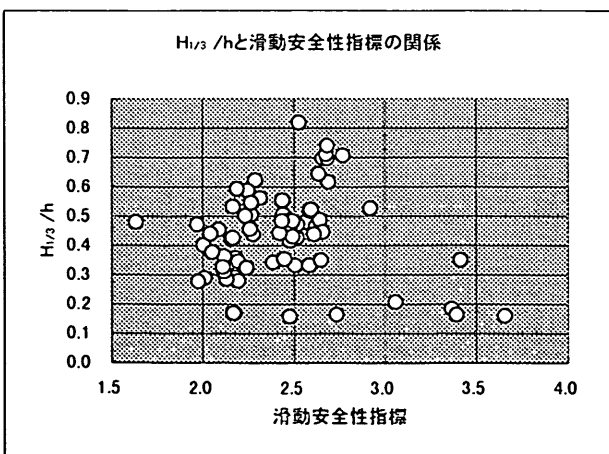
3.5 転倒安全性

現行設計法による転倒に関する安全率の分布を図-12に示す。図を見ると, 構造物全体の転倒安全率は1.20~2.88の範囲にあり, 平均値は1.76となる。

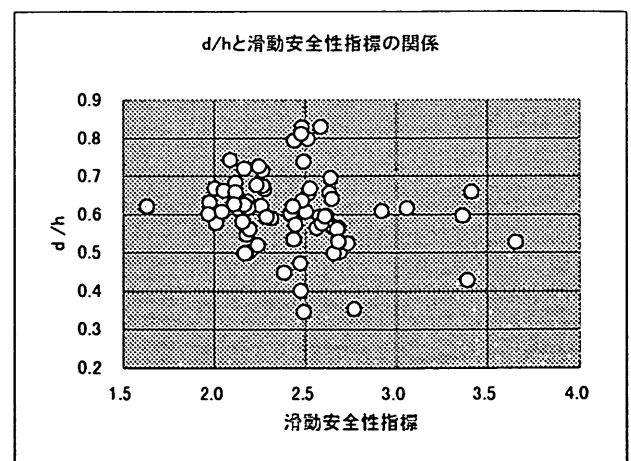
次に, 現行設計法による転倒に関する安全性指標の分布を図-13に示す。図-13(a)を見ると, 解析対象とした構造物全体の転倒安全性指標は, 2.01~9.70の範囲にばらついており, 平均値は5.66, 標準偏差は1.68となり,



(a)

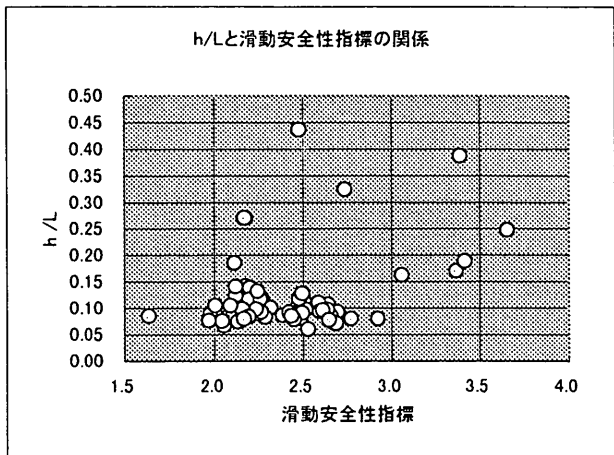


(b)

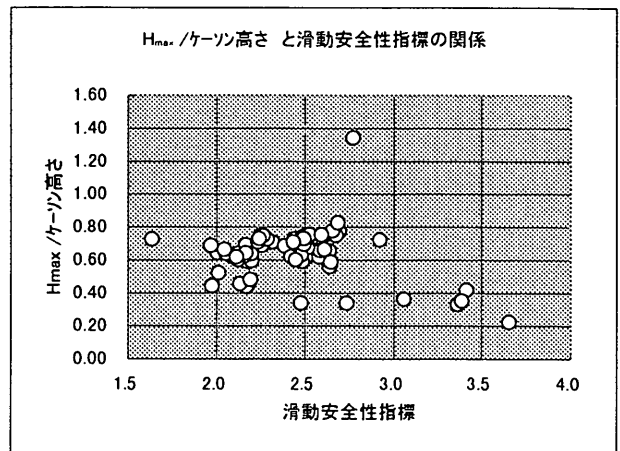


(c)

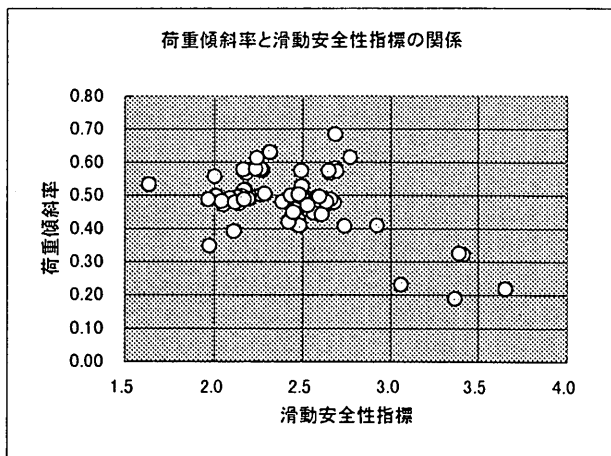
図-11 滑動安全性指標と設計パラメータの相関



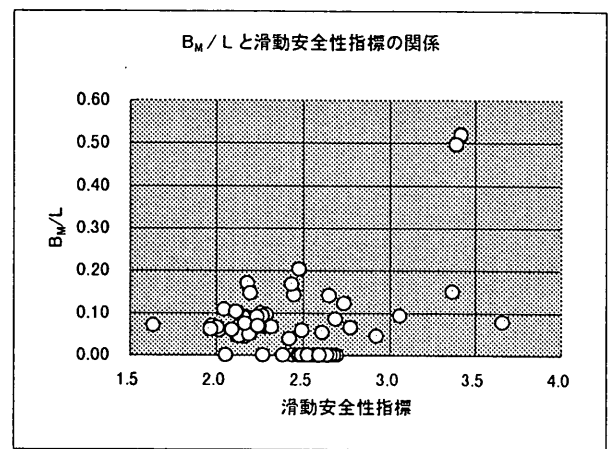
(d)



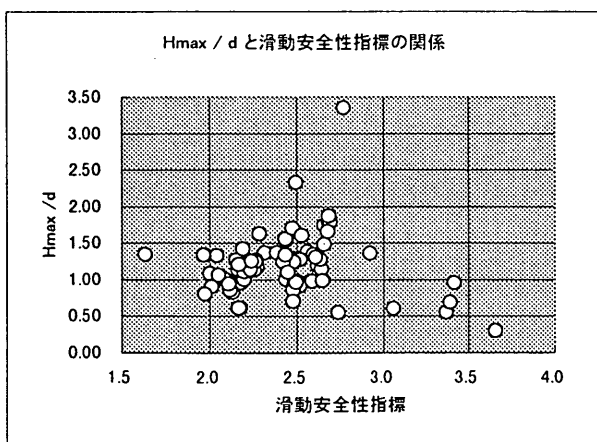
(e)



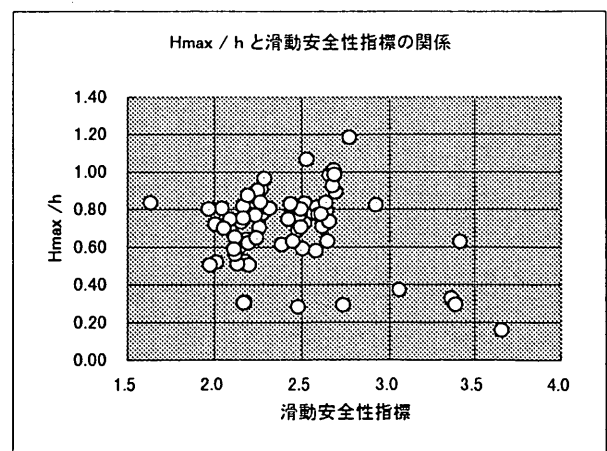
(f)



(g)



(h)



(i)

図-11 滑动安全性指標と設計パラメータの相関

ばらつきが非常に大きいことがわかる。この安全性指標の範囲を破壊確率に換算すると、 $10^{-2} \sim 10^{-21}$ のオーダーとなる。

図-13(b)は構造形式別に安全性指標を整理したものである。ケーソン式混成堤の安全性指標は2.01~8.41の範囲に分布しており、平均値は5.29となる。消波ブロック

ク被覆堤の場合、安全性指標は2.05~9.70の範囲で、平均値は6.01であった。

図-14は安全率・安全性指標・中央安全率の関係を示している。図よりばらつきはあるものの、安全率・安全性指標・中央安全率はそれぞれが正の相関関係にあることがわかる。

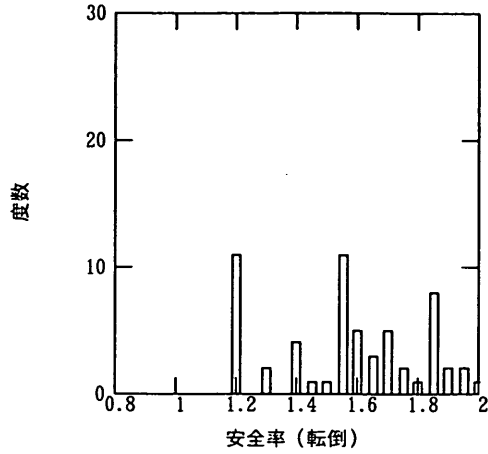
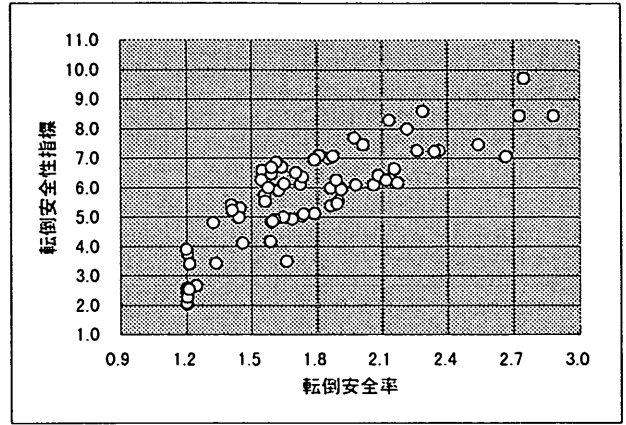
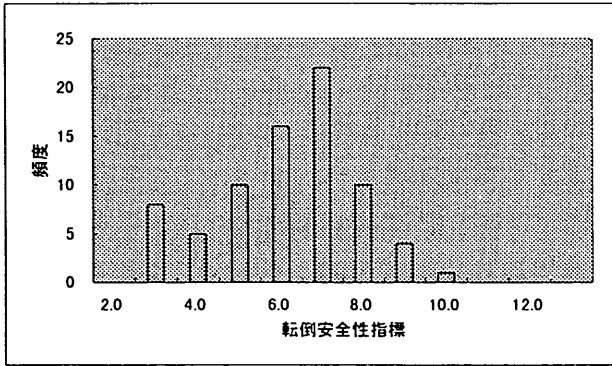


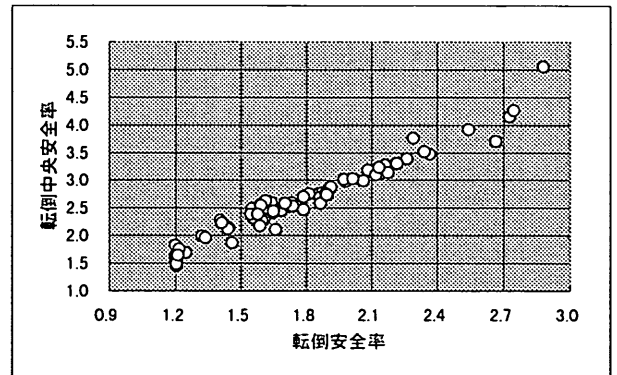
図-12 転倒安全率の分布



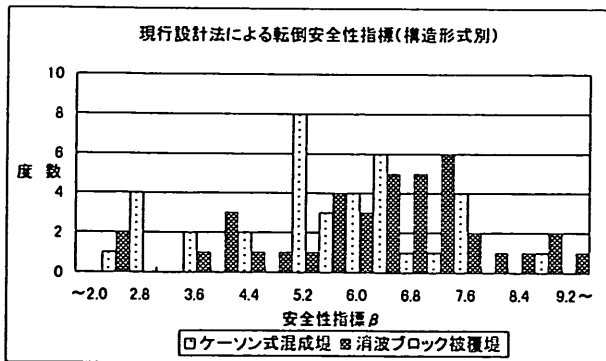
(a)



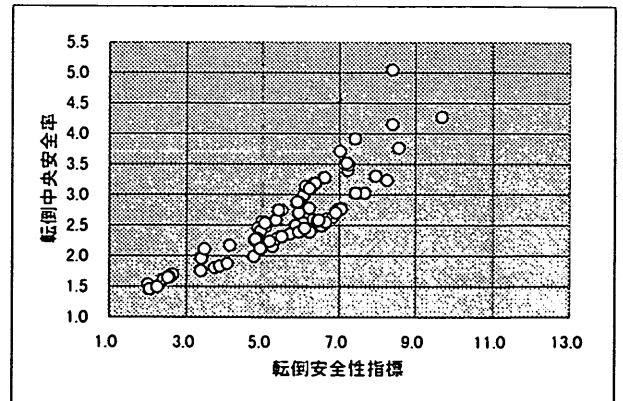
(a)



(b)



(b)



(c)

図-13 転倒安全性指標の分布

図-14 安全率・安全性指標・中央安全率の関係(転倒)

3. 6 支持力安全性

現行設計法による支持力に関する安全率の分布を図-15に示す。構造物全体の支持力安全率は1.00~1.68の範囲にあり、平均値は1.15である。

次に、現行設計法による支持力に関する安全性指標の分布を図-16に示す。図-16(a)を見ると、解析対象とした構造物全体の支持力安全性指標は2.34~7.53の範囲にばらついており、平均値は3.90、標準偏差は0.98となり、ばらつきが非常に大きいことがわかる。この安全性指標の範囲を破壊確率に換算すると、 10^{-3} ~ $10^{-1.3}$ のオーダーである。

図-16(b)は構造形式別に安全性指標を整理したものである。ケーソン式混成堤の安全性指標は2.34~7.53の範囲に分布しており、平均値は3.75となる。消波ブロック被覆堤の場合、安全性指標は3.03~6.59の範囲に分布しており、平均値は4.05となる。特に、支持力が支配的な断面に着目すると、ケーソン式混成堤の例がほとんどであり、構造形式別の安全性の差が表れている。

図-17は安全率・安全性指標・中央安全率の関係を示している。滑動、転倒に比べると非常にばらつきは大きい、安全率・安全性指標・中央安全率の間には弱い正の相関関係がみられた。

支持力の安全性指標は前章で述べたように土質強度の平均値を現行設計法による値よりも20%増加させて算出したものである。その理由として前報⁴⁾では動的荷重に対する土質強度の増加、現行設計法の許容安全率に含まれる隠れた余裕代などについて検討したが、ビショップ法固有の問題としてサーチャージの載荷幅の影響が考えられる。すなわち、水平波圧が平均的に現行設計法によって算出される値よりも少ないことから、荷重傾斜率の平均値は現行設計法による値よりも小さく、したがって

サーチャージの載荷幅は平均的には現行設計法による値よりも広い。この影響を考慮するため、サーチャージの載荷幅を平均値、土質強度の平均値を現行設計法どおりの値とする条件でビショップ法による安全率・安全性指標を算出し、土質強度平均値を20%増加させた値と比較した。結果を図-18に示す。図-18(a)は安全性指標の比較を行ったものであり、図-18(b)は安全率の比較を行ったものである。図よりわかるように、土質強度平均値増加による値とサーチャージ載荷幅平均値による値は、安全性指標、安全率ともによく一致していることがわかる。相関係数は安全性指標について0.93、安全率について0.90である。図中には線形回帰を仮定した場合の回帰直線をあわせて示した。この結果より、土質強度を20%増加させる仮定は、サーチャージの載荷幅が平均的に現行設計法による値よりも広いことに関する影響を取り込んだものであることがわかる。後述するレベル1の信頼性設計法では、設計の便宜上、サーチャージの載荷幅は現行設計法どおりの値とすることがより簡易な扱いとなるため、本研究では前報⁴⁾と同様に載荷幅は現行設計法どおりの値とし、土質強度を20%増加させて解析を行う。

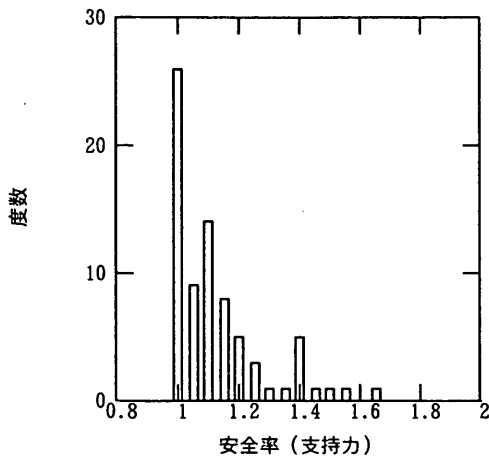
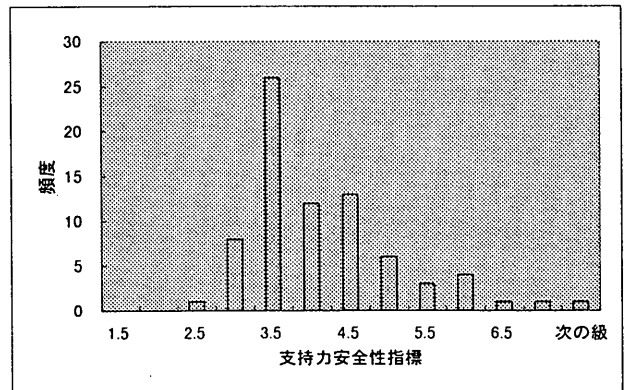
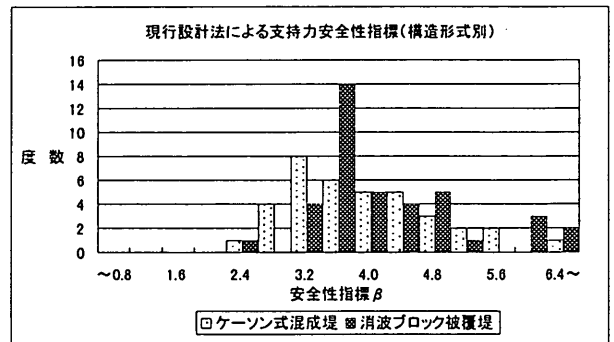


図-15 支持力安全率の分布



(a)

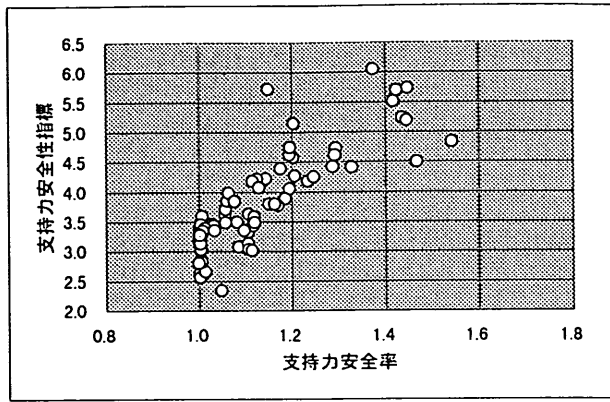


(b)

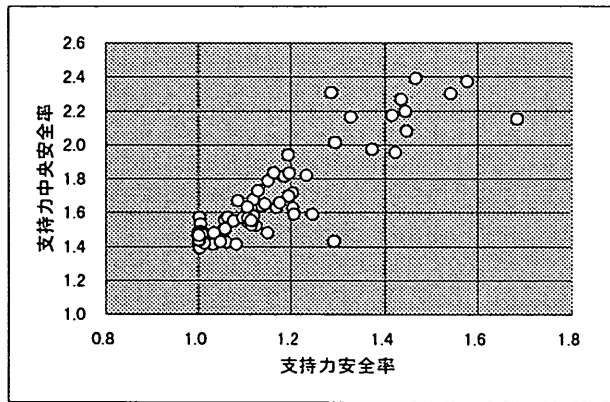
図-16 支持力安全性指標の分布

3.7 各安全性の相互比較

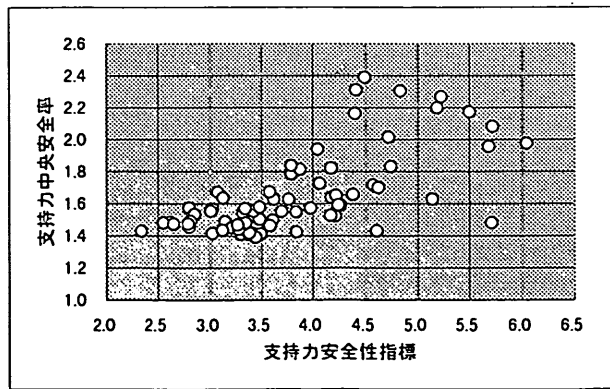
各破壊モードに対する安全性指標を相互比較したものが図-19である。滑動安全性指標が総体的に最も低く、現行設計法において滑動が支配的なモードとなっていることに対応している。支持力安全性指標が滑動安全性指標を下回る例はなく、また転倒安全性指標が滑動安全性指標を下回る例は6例のみである。



(a)

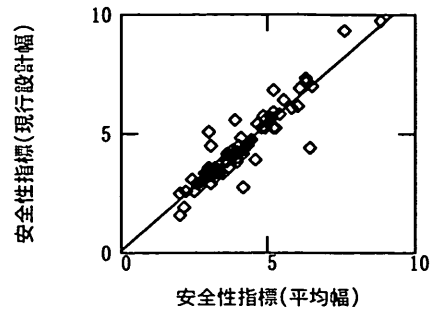


(b)

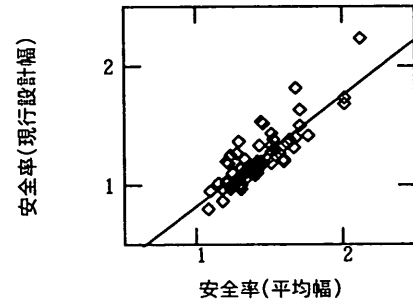


(c)

図-17 安全率・安全性指標・中央安全率の関係 (支持力)

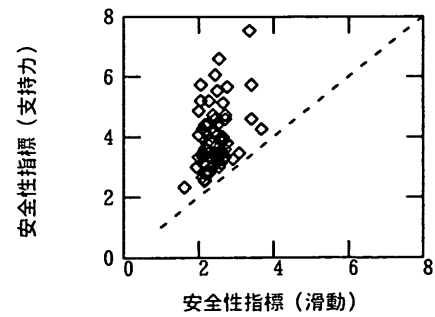


(a)

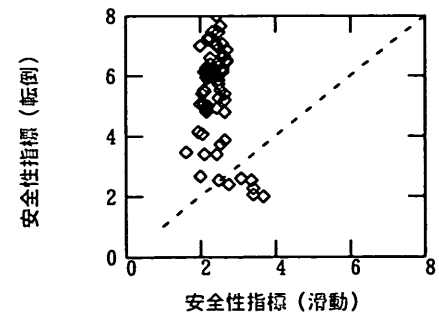


(b)

図-18 サーチージ載荷幅の影響



(a)



(b)

図-19 各安全性指標の比較

構造設計においては、滑動・転倒・支持力の3つの破壊モード全てに対して安全性を確保する必要があり、なおかつ総合的に安全性を判定する必要がある。そこで、3つの破壊モードを総合的に評価するためのパラメータとして、総合安全性指標を用い検討を行った。総合安全性指標は、式(24)により求められる総合破壊確率をもとに算出される安全性指標である。総合安全性指標の分布を図-20に示す。図より、総合安全性指標の分布は正規分布と見なすことができることがわかる。総合安全性指標は1.55~2.84の範囲に分布しており、平均値は2.32、標準偏差は0.24となった。この安全性指標の範囲を破壊確率に換算すると、 10^{-2} ~ 10^{-3} のオーダーである。

図-21は3.4で扱った各種のパラメータで総合安全性指標を整理したものであるが、滑動安全性と同様に、これらパラメータと総合安全性指標との間には強い相関は認められず、総合安全性指標についても信頼性理論を用いた計算によらずに推定することが困難であることがわかる。

図-22は、総合安全性指標と滑動・転倒・支持力の安全性指標の関係を示している。図より、総合安全性指標と滑動安全性指標は正の相関性があり、滑動安全性指標と総合安全性指標がほとんどのデータについてほぼ1:1の関係にあることがわかる。この理由は、滑動安全性が支配的な断面が多く、その場合、転倒あるいは支持力安全性指標は滑動に比べて大きな値となることが多いためである。これより、滑動が支配的な断面では滑動安全性指標を算出することによって総合安全性指標の概略値を推定できることがわかる。

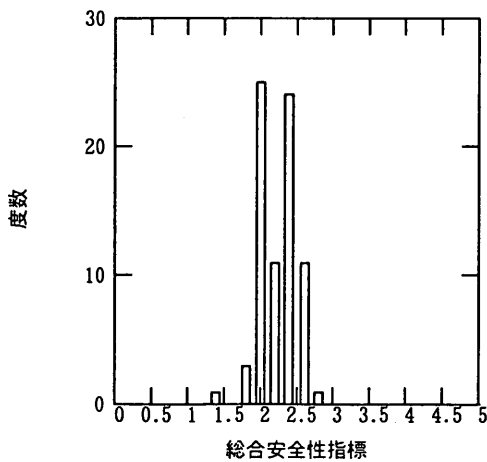
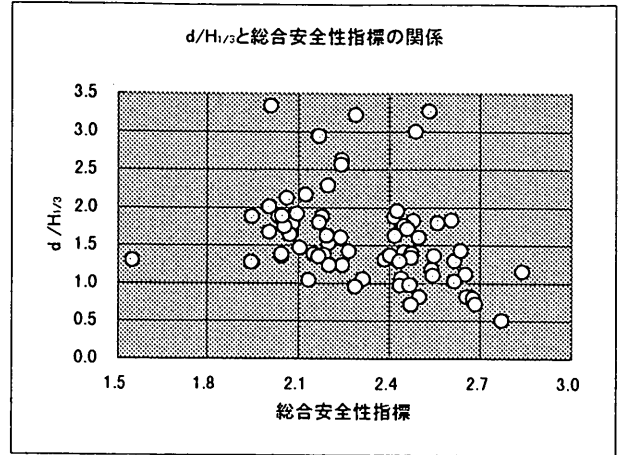
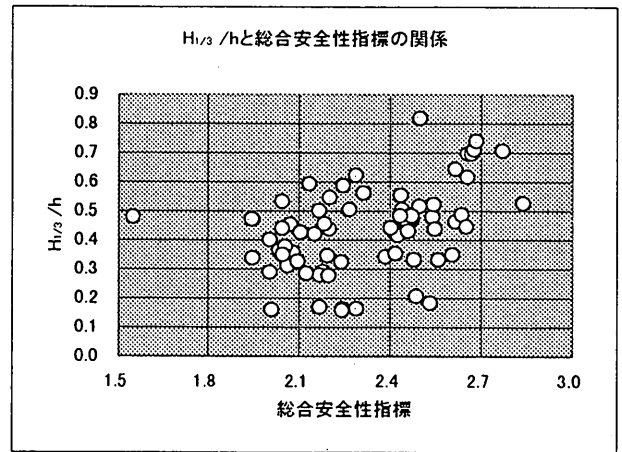


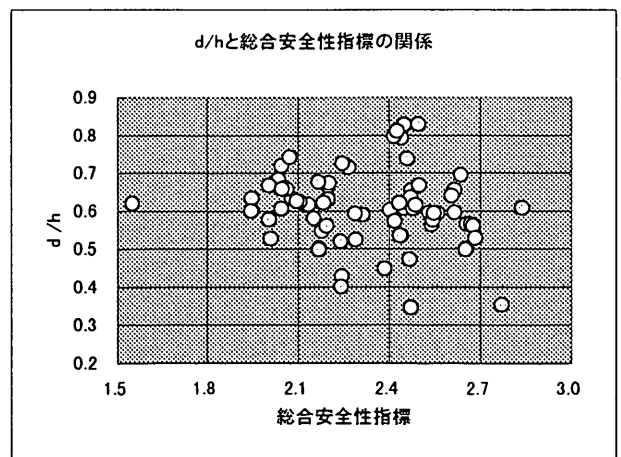
図-20 総合安全性指標の分布



(a)

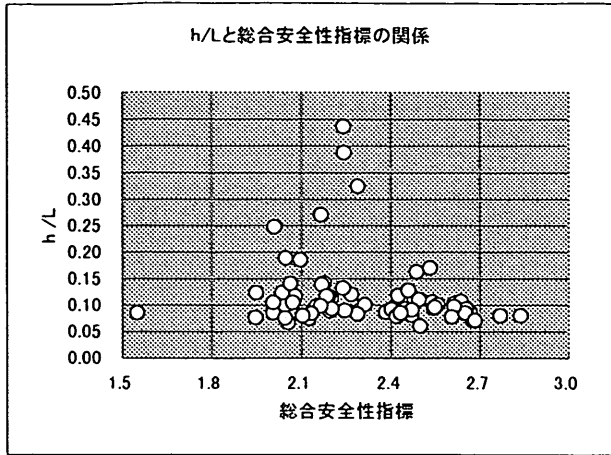


(b)

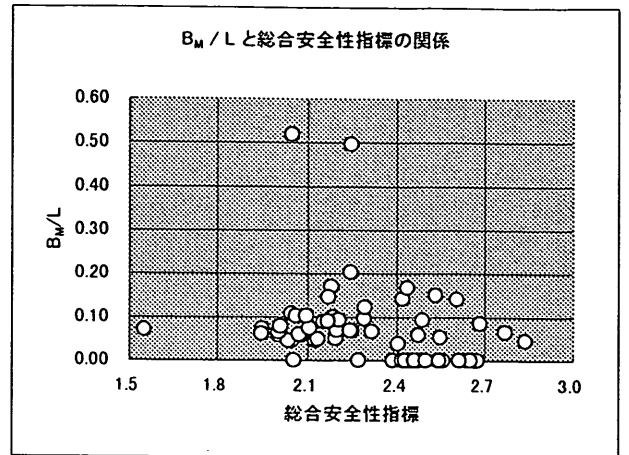


(c)

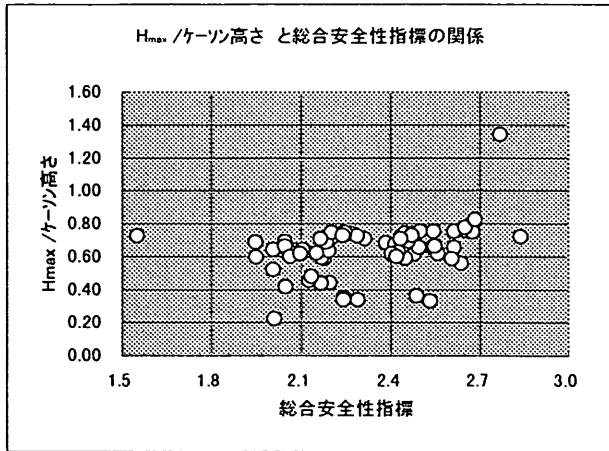
図-21 総合安全性指標と設計パラメータの相関



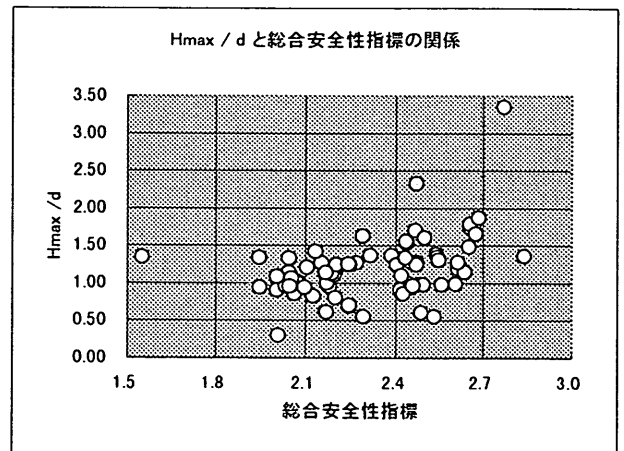
(d)



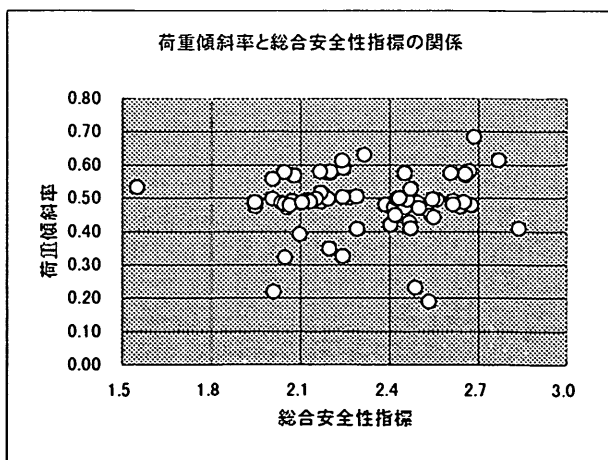
(g)



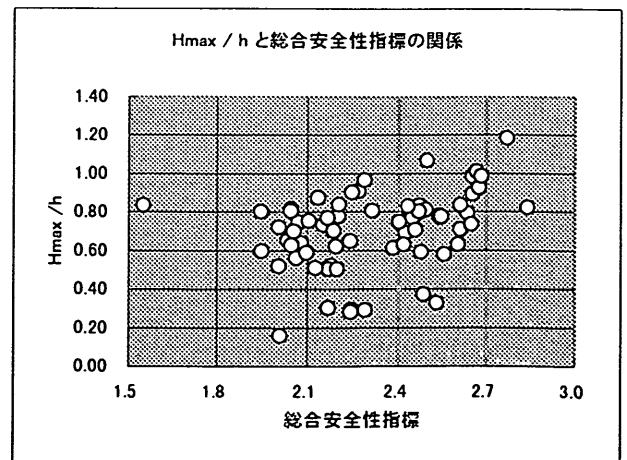
(e)



(h)

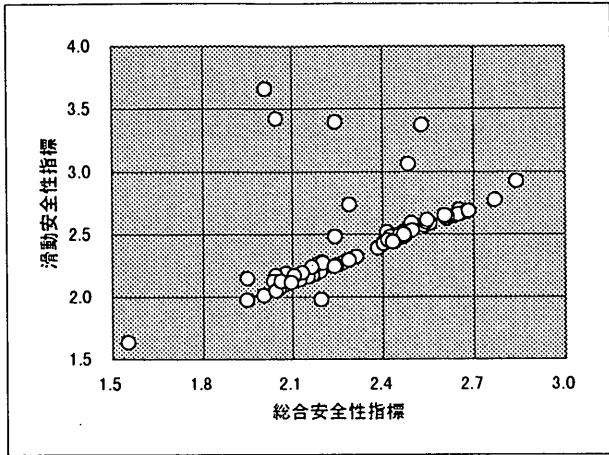


(f)

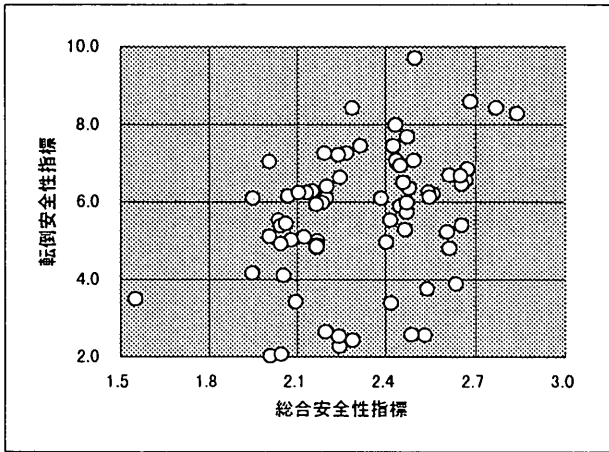


(i)

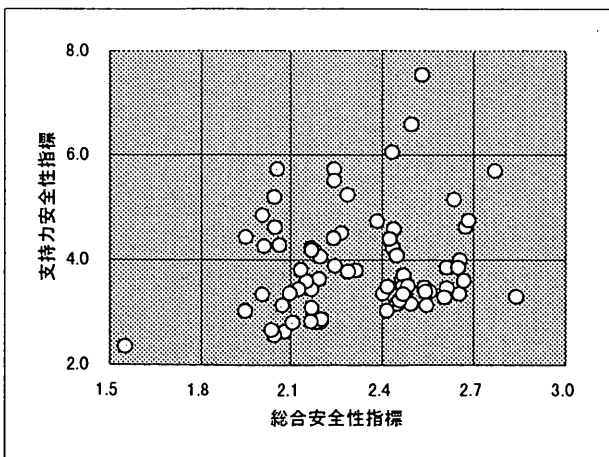
図-21 総合安全性指標と設計パラメータの相関



(a)



(b)



(c)

図一22 総合安全性指標と各安全性指標の関係

3. 8 信頼性設計法による目標安全性指標

現行設計法の総合安全性指標の値は、構造形式別で差があるが、設計法として防波堤の安全性指標を構造形式別などで変化させるのは適切ではない。

そこで本研究では、信頼性設計法で目標とする安全性指標としては、現行設計法による総合安全性指標の平均値である2.3程度を想定する。この値は破壊確率に換算すると約0.01程度である。

また、キャリブレーションのもう一つの方法として、2.4で述べたように、ある安全性の最低水準を設定して、その水準を下回る割合が現在と同程度とする方法について検討する。この最低水準の設定方法には種々のものが考えられるが、最も一般的に用いられる値として、最低水準を「全体の5%がそれを下回る値」とここでは定義する。その場合、最低水準の目標安全性指標としては1.95となる。この値を破壊確率に換算すると約0.026である。

4. レベル2 信頼性設計法の適用

4. 1 適用の考え方

レベル2の信頼性設計法では、安全性の判定は耐力と荷重の設計用値の比の値が1.0以上であることを確かめるのではなく、設計される断面の安全性指標を計算し、その値が目標値以上であることを確認することによってなされる。すなわち、安全性照査には式(9)が用いられる。断面の安全性指標の最小値が目標値を下回っているかまたは過大な場合、断面を変更することとなるが、ここでの断面変更の方法は、3.2で述べた現行設計法による設計方法と同一である。各破壊モードについてそれぞれ式(9)をベースにした安全性照査を行うため、目標安全性指標は各破壊モードについてそれぞれ定める必要がある。レベル2の信頼性設計法は、各々の破壊モードについては前報^{3, 4)}で検討したように目標値と設計される施設の安全性指標を一致させることが可能であるが、総合的な破壊確率として評価した際に、安全性をどの程度コントロール可能かが問題となる。

4. 2 適用結果

レベル2の信頼性設計法の適用性の検討のため、目標安全性指標によるパラメータ解析を行った。解析ケース数は12ケースであり、目標安全性指標を2.0から2.50まで0.05ピッチで変化させたケース(case0~case10)と、各破壊モードについて現行設計法の平均値に一致させたケース(case11)である。

解析結果を表-2に示す。まず、各目標安全性指標を各破壊モードの現行設計法による平均値に一致させたケース(case11)についてみると、滑動安全性指標が目標値2.43に対して設計平均値2.64、転倒の場合は目標値5.66に対して設計平均値7.09、支持力については目標値3.90に対して設計平均値4.95となり、いずれも目標値を設計結果が上回る結果となっている。これは、滑動安全性を例に取ると、滑動安全性指標が支配的な断面では安全性指標を目標値に一致させることが可能であるが、転倒や支持力が支配的な断面については堤体重量を滑動安全性が満足される値以上に増加させる必要があるため、その結果、滑動安全性指標は目標値を上回ることとなる。このため、レベル2の信頼性設計法では、目標安全性指標は各破壊モードの設計安全性指標の最低値と一致し、平均値は目標値を上回る。その結果、総合安全性指標を見ると、現行設計法の平均値2.33に対して信頼性設計法で2.64となり、破壊確率に換算した場合、現行設計法よりも平均的に1オーダー安全な施設を設計することになる。表中、堤体重量比と記したものは信頼性設計法による堤体重量と現行設計法による堤体重量との比の値を示しており、現行設計法によるよりも平均的に約7%程度堤体重量を増加させる必要があることがわかる。これらより、各破壊モードについて現行設計法と信頼性設計法の目標値を一致させる方法は適切ではないといえる。

次に、目標安全性指標を各破壊モードについてすべて同一とし、2.00から2.50まで0.05ピッチで変化させたケース(case0~case10)について考察する。目標安全性指標に比べて各破壊モードの安全性指標の平均値は大きいですが、総合安全性指標と比較すると、目標値と総合安全性指標の値はほぼ等しいことがわかる。したがって、おおまかには目標安全性指標の設定によって総合安全性指標をコントロールできるといえるが、詳細に検証すると、目標値と総合安全性指標の比の値は目標値が小さくなるにつれて大きくなり、目標値に比べて設計される施設の安全性が落ちる傾向にあることがわかる。

図-23に、目標安全性指標の変化による総合安全性指標の平均値、下位5%値、各ケースによる堤体重量比の変化を示した。目標安全性指標を減少させることにより総合安全性指標、下位5%安全性指標、堤体重量比がそれぞれ比例的に減少することがわかる。目標安全性指標の減少分と総合安全性指標の減少分はほぼ等しい。

解析ケースの中から最適な目標値について検討する。現行設計法による総合安全性指標の平均値である2.33と平均的に総合安全性指標が等しくなるのは、目標安全性指標を2.35としたcase7である。表-2を見ると、case7

では各破壊モードに対する安全性指標の平均値についても、滑動が2.45、転倒が5.97、支持力が4.08であり、現行設計法による値と大きな差はない。しかしながら、総合安全性指標の最低値、下位5%値が現行設計法と比べて大きく、目標値に近いので、危険な設計が少なくなるとともに、最大値についても現行設計法の2.84に比べて2.46となり、過大な設計に対する制御もなされることになる。

次に、信頼性設計法による目標安全性指標のキャリブレーションの方法として、式(26)による判定を行う。すなわち、目標総合破壊確率（現行設計法による総合破壊確率の平均値）と設計される施設の総合破壊確率の差の分散が最小となる目標安全性指標を最も適切なケースと判定する。

$$\Sigma (P_{i,r} - P_{i,r}^*)^2 \rightarrow \min \quad (26)$$

ここに、

$P_{i,r}^*$: 総合破壊確率の目標値

$P_{i,r}$: 信頼性設計法による総合破壊確率

式(26)によって得られる目標値に対する分散の変化を図-24に示した。総合安全性指標の平均値が目標値とほぼ一致するcase7が、式(26)による判定においても最も合理的であると判定されることがわかる。分散の値は現行設計法と比較して1オーダー低い。case7の総合安全性指標の分布は図-25に示すとおりである。総合安全性指標の分布の範囲は2.10~2.46であり、標準偏差は0.07である。現行設計法と比較してばらつきが少ないことがわかる。正規分布を仮定して現行設計法と信頼性設計法の比較を行ったものが図-26である。また、case7による堤体重量比の分布を、図-27に示す。堤体重量比の平均値はほぼ1.0であり、現行設計法と総体的に同じコストで、より合理的な設計が行えることを示している。

case7の各破壊モードに関する安全性指標の分布は図-28に示すとおりである。目標安全性指標に近い下限値にピークがある分布となることが特徴で、特に滑動安全性指標の分布にその傾向が強く表れている。図-29には各安全性指標の相互比較を示す。安全性指標についても滑動が支配的な断面が非常に多いことがわかるが、転倒や支持力が支配的な断面も幾つかあり、現行設計法とは傾向が異なっている。図-30には各安全性指標と総合安全性指標の関係を示した。総合安全性指標と滑動安全性指標は正の相関を有することが見てとれるが、他の破壊モードについてはばらつきが大きい。

なお、ここでは各破壊モードに対してそれぞれ目標安

表一2 レベル2解析結果

ケースNO	現行	case0	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8	case9	case10	case11
滑動 β_r	-	2.00	2.05	2.1	2.15	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	2.43
転倒 β_r	-	2.00	2.05	2.1	2.15	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	5.66
支持力 β_r	-	2.00	2.05	2.1	2.15	2.20	2.25	2.30	2.35	2.40	2.45	2.50	3.90
滑動 β													
(最大値)	3.659	3.659	3.680	3.680	3.702	3.702	3.723	3.723	3.723	3.744	3.744	3.764	4.186
(平均値)	2.429	2.207	2.238	2.270	2.303	2.336	2.373	2.412	2.453	2.493	2.536	2.578	2.638
(最小値)	1.634	2.000	2.050	2.100	2.150	2.200	2.250	2.301	2.350	2.400	2.450	2.500	2.430
(標準偏差)	0.349	0.351	0.339	0.328	0.315	0.303	0.292	0.280	0.268	0.256	0.245	0.235	0.374
(下位5%値)	1.976	2.001	2.051	2.101	2.150	2.200	2.250	2.301	2.350	2.400	2.451	2.501	2.430
(最大値)	9.697	7.771	8.005	8.157	8.380	8.525	8.736	8.874	9.074	9.268	9.465	10.110	9.407
(平均値)	5.662	4.421	4.594	4.805	4.993	5.250	5.533	5.766	5.970	6.166	6.373	6.587	7.094
(最小値)	2.013	2.013	2.055	2.124	2.151	2.207	2.255	2.322	2.357	2.418	2.463	2.506	5.661
(標準偏差)	1.673	1.287	1.298	1.342	1.408	1.537	1.669	1.736	1.793	1.844	1.881	1.921	1.044
(最大値)	7.533	5.614	5.725	5.932	6.031	6.220	6.324	6.539	7.502	7.502	7.533	7.533	8.487
(平均値)	3.902	2.893	3.032	3.198	3.334	3.542	3.752	3.914	4.083	4.220	4.367	4.514	4.950
(最小値)	2.339	2.001	2.051	2.102	2.151	2.200	2.259	2.302	2.354	2.405	2.461	2.505	3.902
(標準偏差)	0.974	0.996	1.007	1.061	1.092	1.137	1.163	1.169	1.238	1.253	1.257	1.237	1.218
現体重量比	1.000	0.942	0.950	0.958	0.967	0.976	0.986	0.997	1.008	1.020	1.033	1.046	1.066
総合安全性指標	2.840	2.227	2.227	2.256	2.256	2.256	2.353	2.462	2.462	2.467	2.581	2.665	4.186
(最大値)	2.325	1.910	1.969	2.029	2.081	2.136	2.196	2.258	2.313	2.366	2.425	2.483	2.636
(平均値)	1.551	1.681	1.766	1.766	1.847	1.922	1.983	2.026	2.102	2.163	2.241	2.294	2.430
(最小値)	1.949	1.715	1.788	1.856	1.903	1.947	1.993	2.088	2.142	2.195	2.261	2.327	2.430
(下位5%値)	4.533	13.999	10.446	7.521	5.279	3.426	1.873	0.987	0.431	0.494	1.071	2.171	17.963
目標値に対する分散(現行平均)	15.281	1.039	0.836	1.332	2.075	3.376	5.249	7.816	10.498	13.599	17.541	21.945	46.491
(下位5%値)	1.193	1.114	1.101	1.093	1.094	1.097	1.102	1.081	1.080	1.078	1.073	1.067	1.085
総合平均 β / 5% β	0.796	0.980	0.988	0.952	0.971	0.987	0.995	0.970	0.981	0.985	0.991	0.986	1.000
総合最小 β 値 / 5% β	1.045	1.155	1.137	1.119	1.107	1.094	1.081	1.068	1.061	1.054	1.046	1.038	1.001
滑動 β / 総合 β	1.014	1.167	1.147	1.132	1.130	1.130	1.129	1.102	1.097	1.093	1.084	1.075	1.000
(下位5%値)	6.10E-02	4.60E-02	3.90E-02	3.90E-02	3.20E-02	2.70E-02	2.40E-02	2.10E-02	1.80E-02	1.50E-02	1.30E-02	1.10E-02	7.55E-03
総合破壊確率	1.20E-02	2.90E-02	2.50E-02	2.20E-02	1.90E-02	1.70E-02	1.40E-02	1.20E-02	1.10E-02	9.13E-03	7.76E-03	6.60E-03	5.51E-03
(最大値)	2.26E-03	1.30E-02	1.30E-02	1.20E-02	1.20E-02	1.20E-02	9.32E-03	6.91E-03	6.91E-03	6.82E-03	4.93E-03	3.85E-03	1.42E-05
(平均値)	2.60E-02	4.30E-02	3.70E-02	3.20E-02	2.90E-02	2.60E-02	2.30E-02	1.80E-02	1.60E-02	1.40E-02	1.20E-02	1.00E-02	7.54E-03
(最小値)	5.53E-03	2.60E-02	1.60E-02	9.83E-03	5.78E-03	3.21E-03	1.42E-03	6.78E-04	5.58E-04	9.04E-04	1.54E-03	2.33E-03	3.64E-03
(下位5%値)	2.00E-02	4.76E-03	3.02E-03	3.80E-03	5.34E-03	7.97E-03	1.10E-02	1.50E-02	1.90E-02	2.20E-02	2.50E-02	2.90E-02	3.20E-02

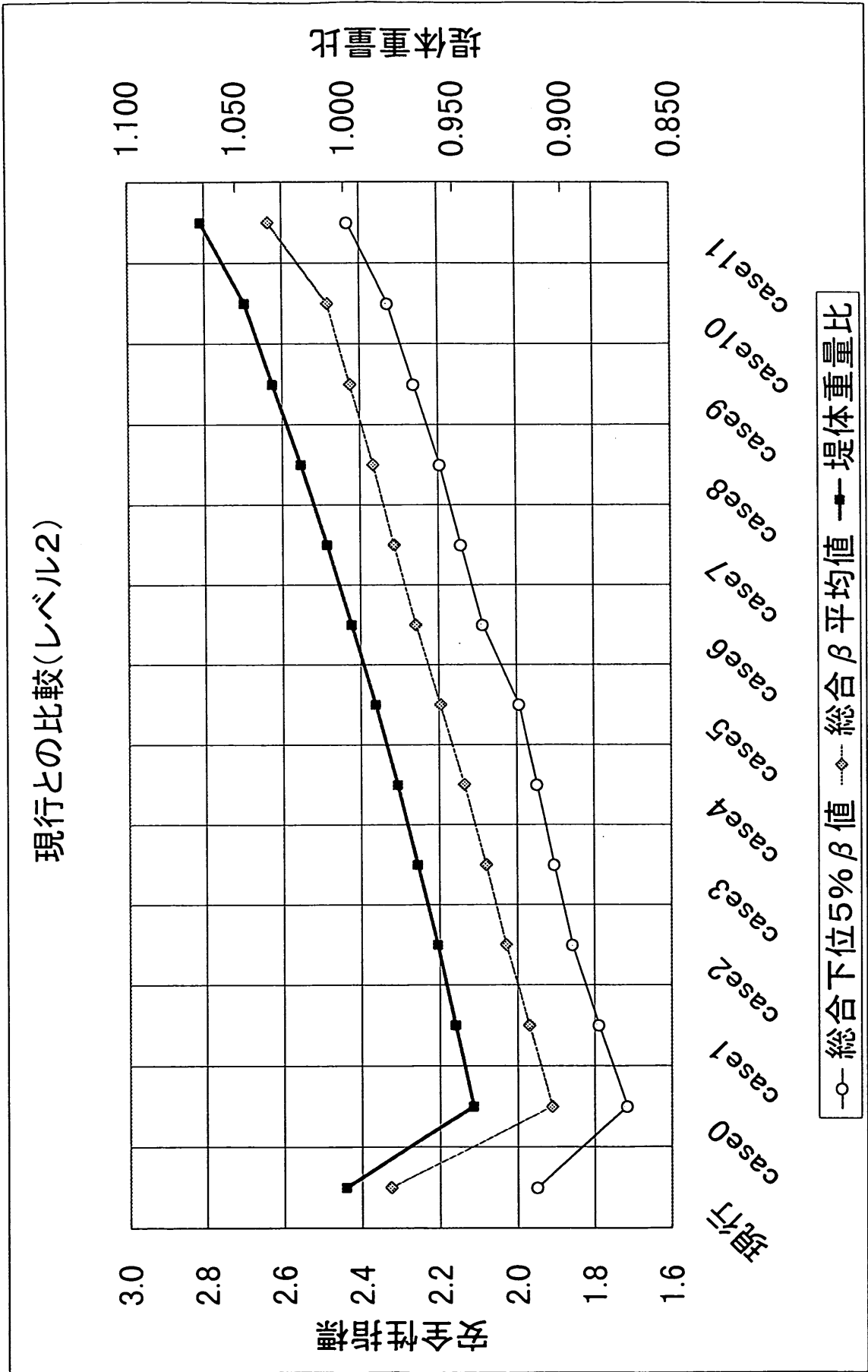


図-23 安全性指標などの変化 (レベル2)

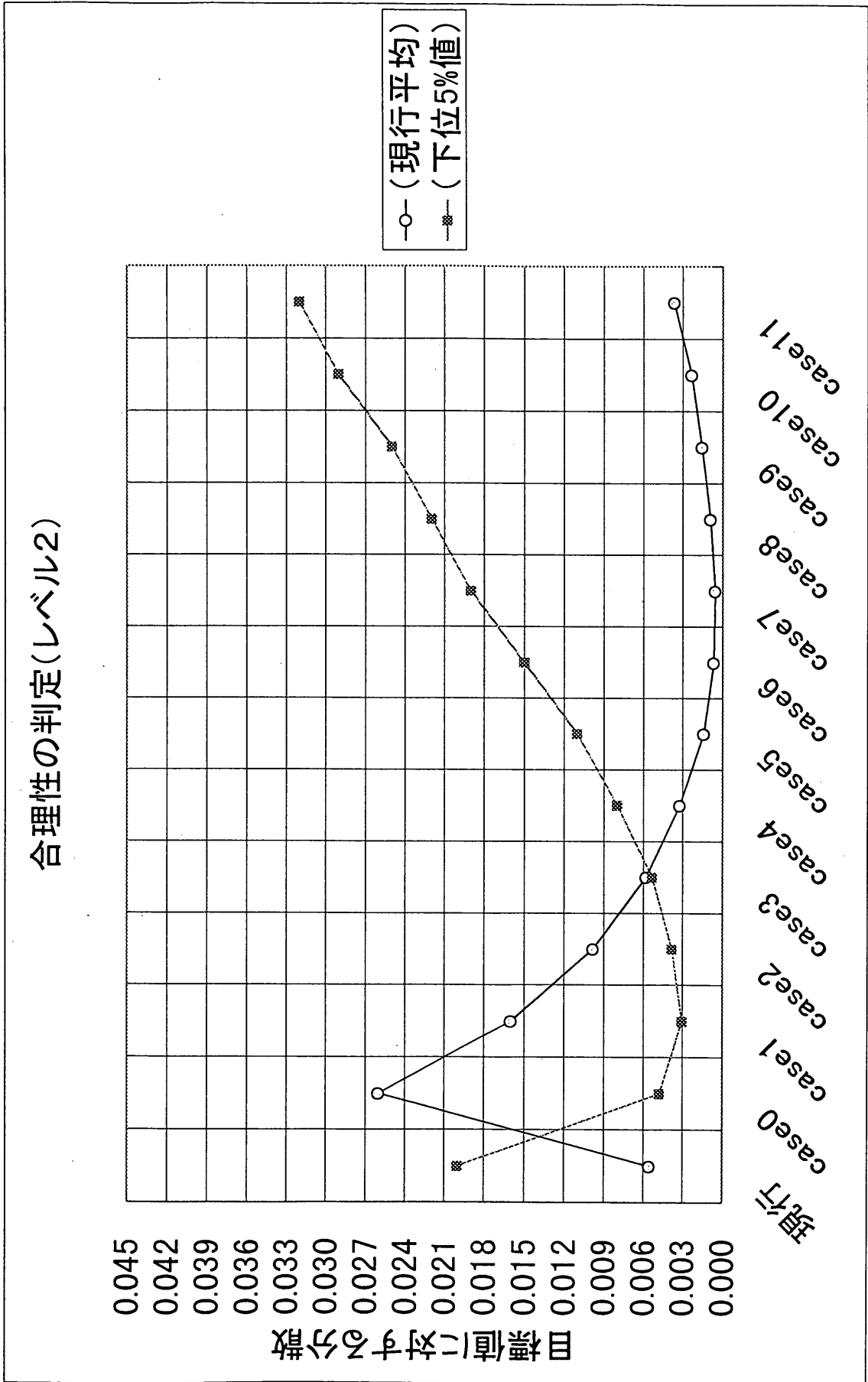


図-24 目標値に対する分散の変化

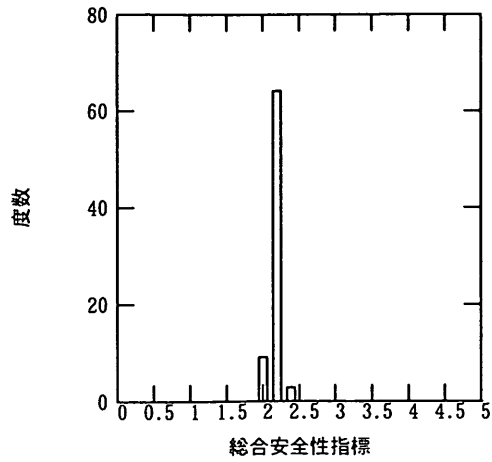


図-25 総合安全性指標の分布 (case7)

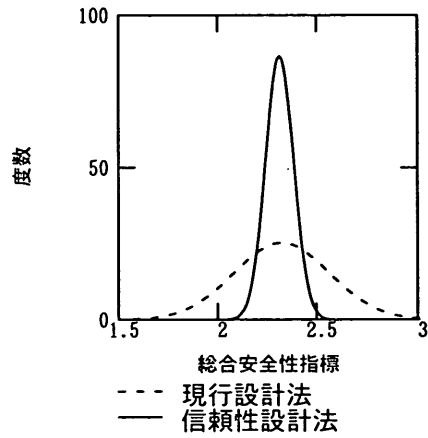


図-26 安全性指標の設計法による比較 (case7)

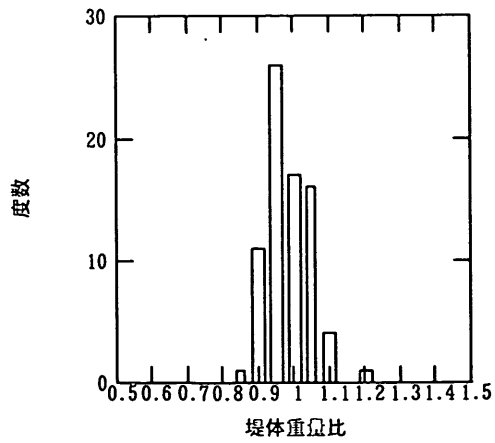
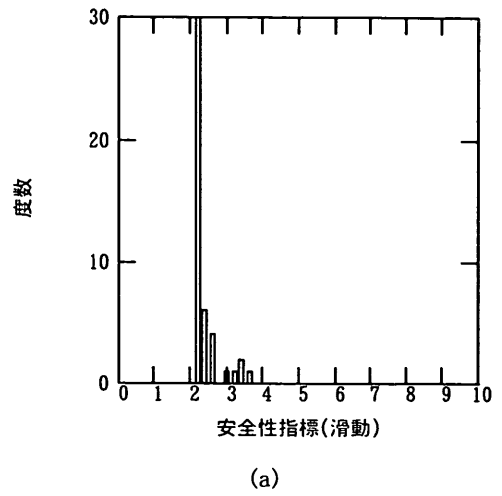
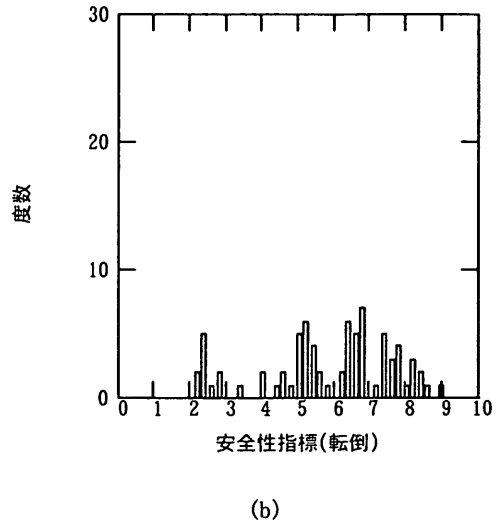


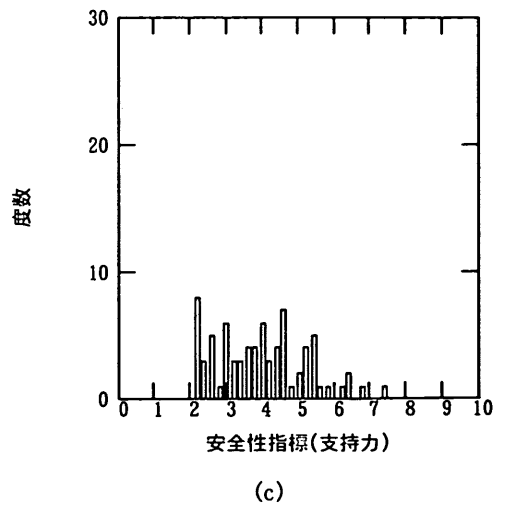
図-27 堤体重量比 (case7)



(a)



(b)



(c)

図-28 安全性指標の分布 (case7)

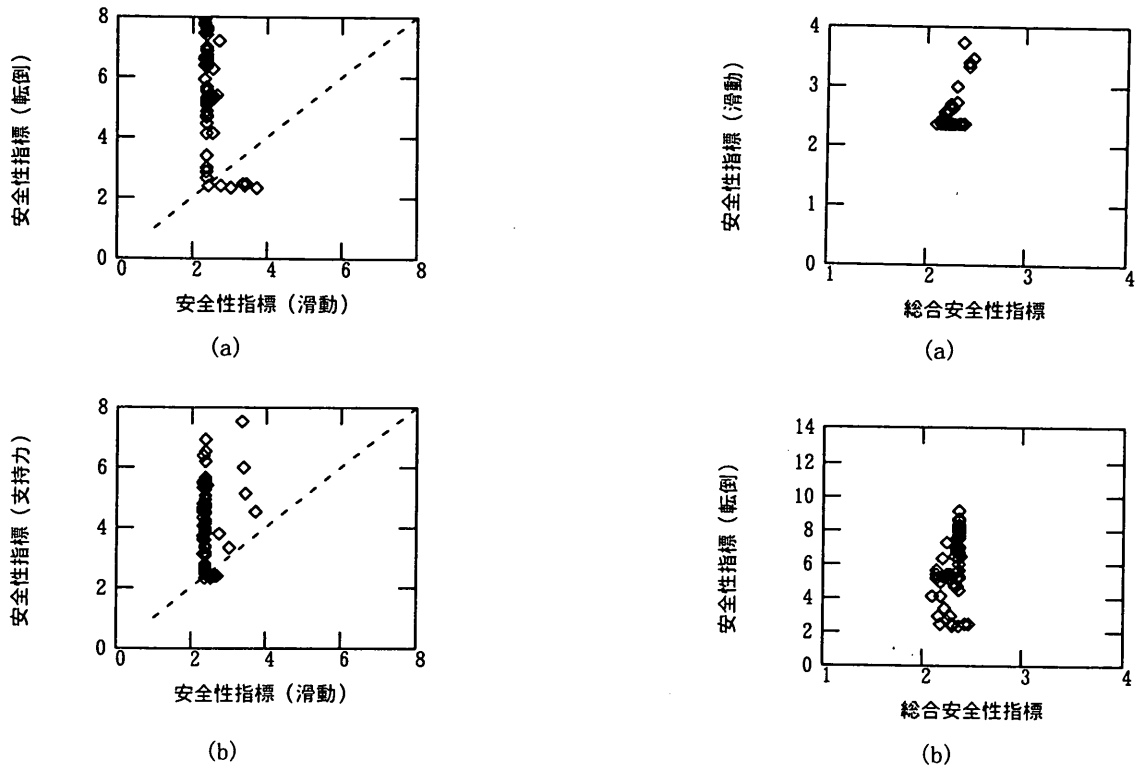


図-29 各安全性指標の相互比較

安全性指標による判定を行ったが、より精緻に破壊可能性を制御するためには、総合破壊確率を判定指標にして安全性照査を行うことも考えられる。この場合、設計の流れとしては、構造物がある諸元を持つときの各破壊モードに対する安全性指標を算出し、これを破壊確率に換算した上で式(24)によって総合破壊確率を算出し、目標値との比較によって断面を変更することとなる。かなりの量の繰り返し計算が必要となるため設計計算はより煩雑になるが、総合破壊確率に対する制御の割合は強くなる。しかしながら、この方法では各破壊モードに対する安全性照査は不問となり、総合破壊確率のみで照査が行われるため、各破壊モードの相関性についてより詳細に議論するなど、総合破壊確率の算出方法についてより精密な検証が必要となろう。

次に、最低水準を下回る施設の割合を揃える基準で最適な目標安全性指標の検討を行う。現行設計法による総合安全性指標の最低水準として下位5%を想定すると、安全性指標の値は1.95である。下位5%の値が1.95程度になるケースを調べると、目標安全性指標を2.20とするcase4が適合する。case4の総合安全性指標の範囲は1.92~2.26で、平均値は2.14、標準偏差は0.10である。したがって目標安全性指標を2.20とした場合、平均的には現行設計法と比べて総合安全性指標で0.9倍程度、総合破壊確率では1.4倍程度危険側になる。しかしながら、破

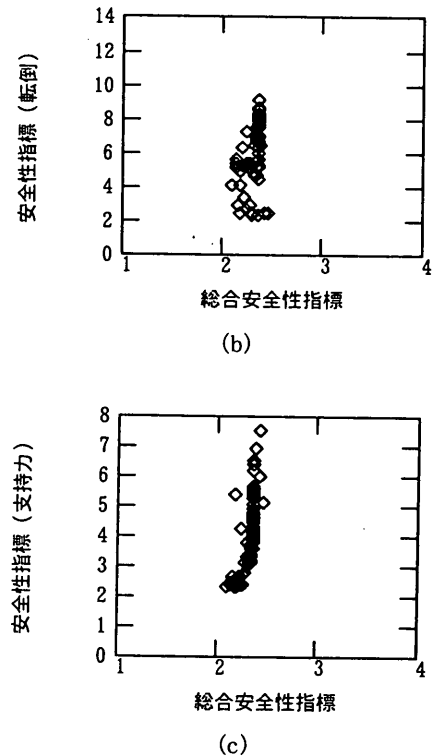


図-30 各安全性指標と総合安全性指標の比較

壊確率の最大値は現行設計法の 6.1×10^{-2} に比べて信頼性設計法では 2.7×10^{-2} と危険度は減少していることから、最も危険な施設の安全性は向上する。堤体重量比は平均的に約0.98となり、2%強の重量が削減される。参考までに、図-24には下位5%破壊確率に対する分散も示してある。下位5%目標値に対する分散はcase1で最も小さくなるが、この場合、設計結果の全てが最低水準に近い値を取り、総体的に非常に危険な設計となることを示している。

case4の総合安全性指標の分布を図-31に、各破壊モードに対する安全性指標の分布を図-32に示す。正規分布を仮定して現行設計法と信頼性設計法の比較を行ったものが図-33である。また、堤体重量比の分布を図-34に示す。各安全性指標の相互比較を図-35に、また各安

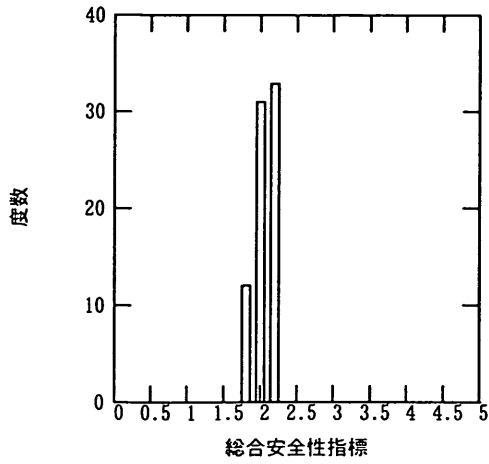
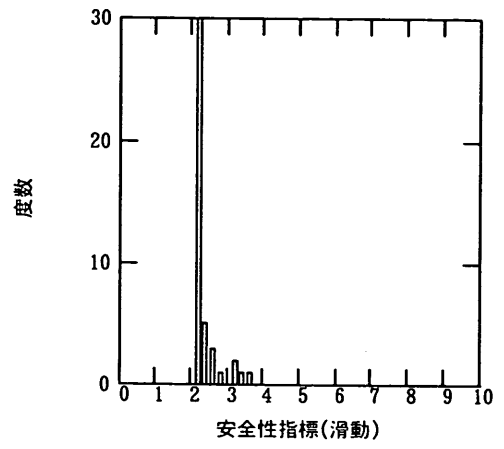


図-31 総合安全性指標の分布 (case4)



(a)

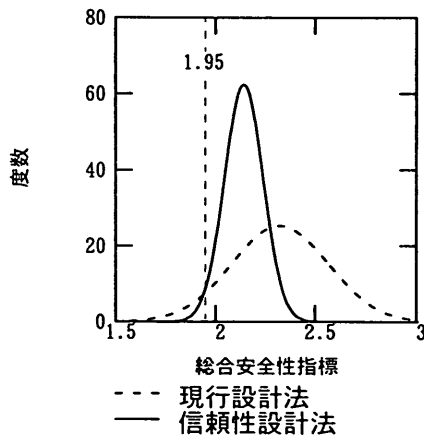
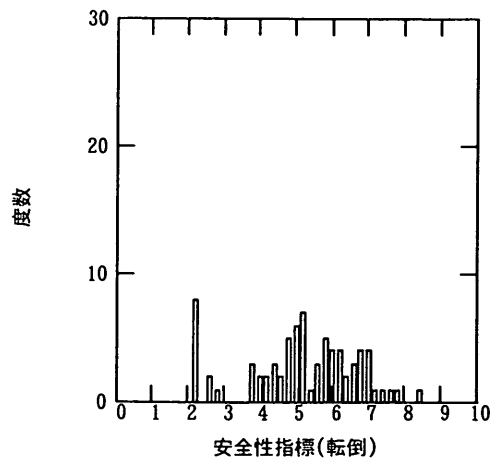


図-33 安全性指標の設計法による比較 (case4)



(b)

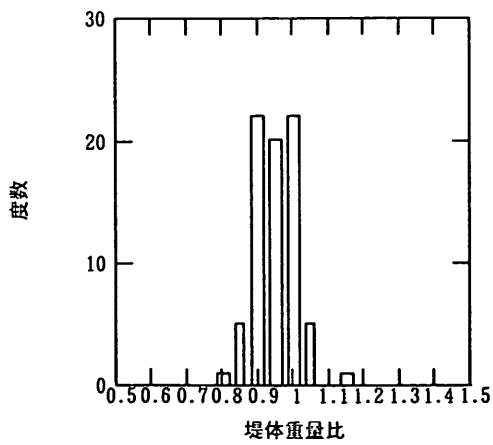
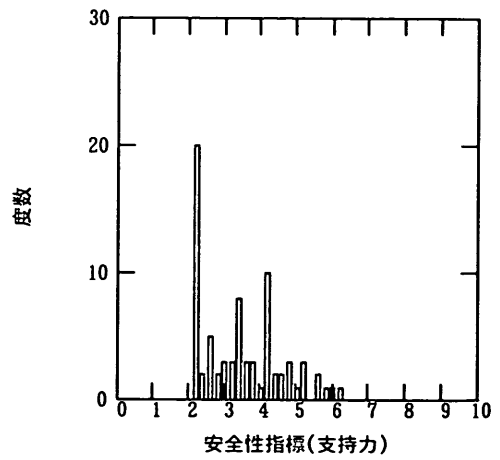


図-34 堤体重量比 (case4)



(c)

図-32 安全性指標の分布 (case4)

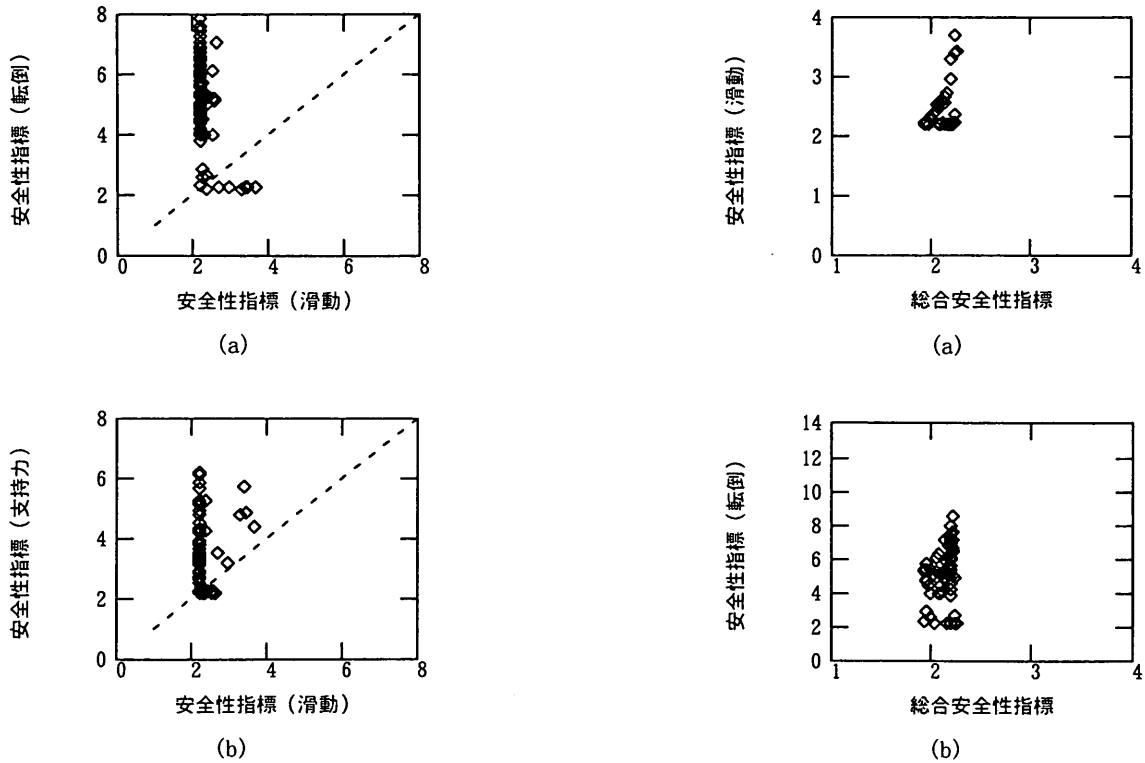


図-35 各安全性指標の相互比較

安全性指標と総合安全性指標の比較を図-36に示す。これらについては、ほぼcase7と同様のことがいえる。

5. レベル1信頼性設計法の適用

5.1 適用の考え方

レベル1の信頼性設計法では、安全性の判定は現行設計法と同形式のフォーマットで行われる。すなわち、耐力の設計用値が荷重の設計用値を上回るか否かが安全性判定基準となり、安全性照査式は式(5)が用いられる。耐力の設計用値が荷重の設計用値を下回っているかまたは過大な場合、断面を変更する必要があるが、ここでの断面変更の方法は、現行設計法およびレベル2の設計方法と同一とする。レベル1の方法では目標とする安全性は特性値および安全係数に反映されるが、特性値については基本的に従来より用いられてきた現行設計法による値と同じとする。これは、レベル1の方法の特徴である簡便性を考慮した場合、特性値については従来通りの値を取ることが新設計法に移行する際に設計者のなじみがよいと考えられるためである。このため目標安全性は安全係数に反映されるが、レベル1の方法の場合、目標安全性指標は近似式を介して安全係数に反映されるため、最適な設計法とするためにパラメータスタディが必要となる。特に性能関数が強い非線形性を持つ場合は、理論

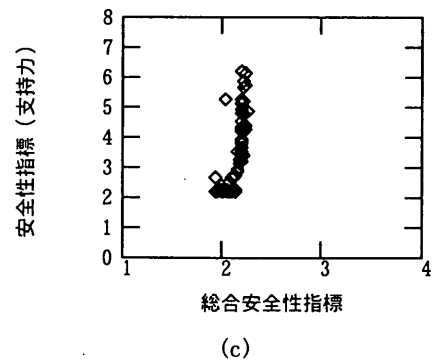


図-36 各安全性指標と総合安全性指標の比較

的に安全係数を求めることが困難な場合がある。支持力問題のみに着目した場合、第2報⁴⁾で検討したように、レベル1の方法の適用性はあまり高いとはいえないことがわかっている。

安全係数の設定にあたっては、これまで滑動、支持力についてそれぞれ単独に検討を行ってきたが、本研究では総合的な破壊モードを対象としているため、レベル2の方法で議論したように、目標安全性指標もこれまで扱った値とは異なることとなる。したがって、各破壊モードに対する安全係数は今回新たに検討する必要がある。

5.2 安全係数の設定

レベル1の信頼性設計法によって滑動、転倒、支持力の安全性照査式を表現すると、それぞれ式(27)~(29)の

ようになる。

(滑動安全性)

$$f_k \cdot \gamma_{mf} \cdot \left(\sum_i W_{0ki} \gamma_{iwo} - P_{uk} \gamma_{ipu} - P_{bk} \gamma_{ibf} \right) \geq P_{hk} \gamma_{iph} \gamma_i \gamma_o \quad (27)$$

ここに、

- P_{hk} : 水平波圧の特性値 (kN/m)
- γ_{iph} : 水平波圧に対する荷重係数
- P_{uk} : 揚圧力の特性値 (kN/m)
- γ_{ipu} : 揚圧力に対する荷重係数
- W_{0ki} : ケーソンを構成する材料 i (鉄筋コンクリート, 無筋コンクリート, 中詰砂) の重量の特性値 (kN/m)
- γ_{iwo} : ケーソンを構成する材料 i の重量に対する荷重係数
- P_{bk} : 浮力の特性値 (kN/m)
- γ_{ibf} : 浮力に対する荷重係数
- f_k : 摩擦係数の特性値
- γ_{mf} : 摩擦係数に対する材料係数
- γ_i : 構造物係数
- γ_o : 構造解析係数

(転倒安全性)

$$a_w \sum_i W_{0ki} \gamma_{iwo} - a_{pu} P_{uk} \gamma_{ipu} - a_{pb} P_{bk} \gamma_{ibf} \geq a_{ph} P_{hk} \gamma_{iph} \gamma_i \gamma_o \quad (28)$$

ここに、

- a_w : 堤体重量合力の作用線から壁体前しまでの距離 (m)
- a_{pu} : 揚圧力合力の作用線から壁体前しまでの距離 (m)
- a_{pb} : 浮力合力の作用線から壁体前しまでの距離 (m)
- a_{ph} : 水平波圧合力の作用線から壁体底面までの距離 (m)

(支持力安全性)

$$\frac{\sum \left[\left(c'_k \gamma_c b + \tan \phi'_k \gamma_{i,so} (W_k \gamma_{-} + q_k \gamma_{o,r}) \right) \frac{\sec \alpha}{1 + (\tan \alpha \tan \phi'_k \gamma_{i,so}) / F} \right]}{\left(\sum (W_k \gamma_{-} + q_k \gamma_{o,r}) \sin \alpha + \frac{1}{r} \sum H_k \gamma_H \right) \gamma_i \gamma_o} = F \geq 1.0 \quad (29)$$

ここに、

- c'_k : 有効応力に基づく見かけの粘着力の特性値 (kN/m²)

- b : 分割細片の幅 (m)
- $\tan \phi'_k$: 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角の正接の特性値
- W_k : 分割細片の重量の特性値 (kN/m)
- q_k : 分割細片に作用するサーチャージの特性値 (kN/m)
- α : 分割細片の底面となす角 (rad)
- H_k : 水平荷重の特性値 (kN/m)
- a : 水平荷重のアーム長 (m)
- r : すべり円弧の半径 (m)
- γ_c : 見かけの粘着力に関する材料係数
- $\gamma_{i,so}$: 見かけのせん断抵抗角の正接に関する材料係数
- γ_{ws} : 分割細片の重量の滑動側に関する荷重係数
- γ_{wr} : 分割細片の重量の抵抗側に関する荷重係数
- γ_{os} : サーチャージの滑動側に関する荷重係数
- γ_{or} : サーチャージの抵抗側に関する荷重係数
- γ_H : 水平荷重に関する荷重係数

安全係数のうち、構造解析係数 γ_o は構造解析の不確実性などを考慮して定めるものであり、構造物係数 γ_i は構造物の重要度、構造物が限界状態に達した時の社会的影響などを考慮して定められる係数である。これらの係数については、前報と同様にいずれも 1.0 とする。

転倒安全性照査における各荷重のアーム長、支持力安全性照査における分割細片の幅、分割細片が底面となす角、水平荷重のアーム長、すべり円弧の半径は確定値として扱うため、安全係数は適用しない。支持力安全性照査については、サーチャージと分割細片の重量を考慮するが、これらは耐力と荷重の双方に影響し、かつ影響の度合いが異なるため、荷重係数の値も異なることになる。また、堤体構成重量、揚圧力、浮力の荷重係数は、滑動と転倒とでそれぞれの特長値が性能関数に及ぼす影響が異なるため、荷重係数も異なった値となる。

各モードに対する安全係数は、安全性照査式(27)～式(29)を式(6)～式(8)で述べた線形化近似係数を導入することによって設定するが、性能関数の非線形性などのため、2.2で述べたような簡単な形で展開することはできない。このため、それぞれを展開する際に生じる高次の項を無視することによって、式(30)～(32)のように設定した。浮力については、平均値の偏りが無く、かつ変動係数を0と考えているため、安全係数は滑動、転倒ともに1.0となる。ただし、浮力、水平波圧および揚圧力の算出時には潮位のばらつきを考慮する必要があり、表-1に α として示した値を用いる。 α の分布は図-5に従う。

(滑動安全性)

$$\begin{aligned} \gamma_{mi} &= (1 - \alpha\alpha' \beta_{TVi}) \mu_i / f_K \\ \gamma_{iwoi} &= (1 - \alpha\alpha' \alpha'' \beta_{TVwoi}) \mu_{woi} / W_{oiK} \\ \gamma_{iPu} &= (1 + \alpha\alpha' \alpha'' \beta_{TPu}) \mu_{Pu} / P_{uK} \\ \gamma_{iPb} &= (1 + \alpha\alpha' \alpha'' \beta_{TPb}) \mu_{Pb} / P_{bK} \\ \gamma_{iPh} &= (1 + \alpha\beta_{TPh}) \mu_{Ph} / P_{hK} \end{aligned} \quad (30)$$

(転倒安全性)

$$\begin{aligned} \gamma_{iwoi} &= (1 - \alpha\alpha' \beta_{TVwoi}) \mu_{woi} / W_{oiK} \\ \gamma_{iPu} &= (1 + \alpha\alpha' \beta_{TPu}) \mu_{Pu} / P_{uK} \\ \gamma_{iPb} &= (1 + \alpha\alpha' \beta_{TPb}) \mu_{Pb} / P_{bK} \\ \gamma_{iPh} &= (1 + \alpha\beta_{TPh}) \mu_{Ph} / P_{hK} \end{aligned} \quad (31)$$

(支持力安全性)

$$\begin{aligned} \gamma_c &= (1 - \alpha\alpha' \beta_{TVc}) \mu_c / c_K \\ \gamma_{i\phi} &= (1 - \alpha\alpha' \alpha'' \beta_{TVi\phi}) \mu_{i\phi} / \tan\phi_K \\ \gamma_{wv} &= (1 - \alpha\alpha' \alpha'' \alpha''' \beta_{TVw}) \mu_w / W_K \\ \gamma_{qv} &= (1 - \alpha\alpha' \alpha'' \alpha''' \beta_{TVq}) \mu_q / q_K \\ \gamma_{ws} &= (1 + \alpha\alpha' \beta_{TVw}) \mu_w / W_K \\ \gamma_{qs} &= (1 + \alpha\alpha' \beta_{TVq}) \mu_q / q_K \\ \gamma_H &= (1 + \alpha\alpha' \beta_{TVH}) \mu_H / H_K \end{aligned} \quad (32)$$

線形化近似係数 α , α' , α'' , α''' はすべて 0.75 とした。変動係数や平均値の偏りは表-1 に示した値を用いた。目標安全性指標 β_{TK} については、レベル 2 の検討結果をもとに、2.0 から 2.4 までの間で変化させた。

5.3 適用結果と安全係数のキャリブレーション

レベル 1 の解析に用いた安全係数の一覧を表-3 に示す。case0 から case6 までは、目標安全性指標を式(30)~式(32) に代入して得られた値を用いており、case7 および case8 については、それぞれ目標安全性指標を 2.05 および 2.10 としたうえで、式(30)~式(32) より得られる値を安全側に 0.05 ピッチで丸めた安全係数を設定している。

解析結果を表-4 に示す。まず、現行設計法と総合安全性指標の平均値を一致させる観点でキャリブレーションを行う。表をみると、目標安全性指標に比べて各破壊モードの安全性指標の平均値は大きく、かつ総合安全性指標の平均値も目標値より 0.1~0.15 程度大きいことがわかる。これは前章で検討したレベル 2 の方法とは異なる傾向であり、安全係数設定の際の線形化近似に伴う誤差などの影響であると考えられる。

図-37 に、目標安全性指標の変化による総合安全性指標の平均値、下位 5% 値、各ケースによる堤体重量比の変化を示した。レベル 2 と同様に、目標安全性指標を減

小さくすることにより総合安全性指標、下位 5% 安全性指標、堤体重量比がそれぞれ比例的に減少することがわかる。目標安全性指標の減少分に比べて総合安全性指標の減少分は小さく、レベル 2 よりも目標安全性指標の設定に対して総合安全性指標は鈍感であるといえる。

case7, case8 は安全係数を 0.05 ピッチで丸めたものであるが、数値を丸めたことの影響は大きく、例えば case2 と case8 は同じ目標安全性指標としたにもかかわらず、総合安全性指標は case2 の 2.26 に対して case8 では 2.66 と大きく異なっており、安全性の制御が不十分であることを示している。

解析ケースの中から最も適切なケースを調べると、目標安全性指標を 2.15 とした case3 が適合する。case3 の総合安全性指標の平均値は、現行設計法の 2.33 に対して、2.30 であり、ほぼ一致している。各破壊モードに対する安全性指標の平均値は、滑動が 2.43、転倒が 5.87、支持力が 4.00 であり、現行設計法による値と大きな差はない。しかしながら、安全性指標の最低値については 0.37、下位 5% 値は 0.20 だけ現行設計法と比べて大きく、目標値に近い。危険な設計が少なくなることがわかる。安全性指標の最大値についても現行設計法よりも 0.25 減少しており、過大な設計も回避される。

図-38 に、破壊確率の目標値に対する分散の変化を示した。case3 の目標値に対する分散は現行設計法の現行設計法の 5.5×10^{-3} に比べて 9.3×10^{-4} と 1 オーダー低い値となっている。また、目標値に対する分散は、解析対象としたケースの中でもっとも小さく、その意味でも最適な安全係数といえる。

case3 の総合安全性指標の分布を図-39 に示す。総合安全性指標の分布の範囲は 1.92~2.60、標準偏差は 0.11 であり、現行設計法と比較してばらつきが少ない。正規分布を仮定して現行設計法と信頼性設計法の比較を行ったものが図-40 である。case3 による堤体重量比の分布を図-41 に示す。堤体重量比の平均値はほぼ 1.0 であり、現行設計法と総体的に同じコストで、より合理的な設計が行えることを示している。

case3 の各破壊モードに関する安全性指標の分布は図-42 に示すとおりである。レベル 2 と同様に、目標安全性指標に近い下限値にピークがある分布となることが特徴で、特に滑動安全性指標の分布にその傾向が強く表れている。図-43 は各安全性指標の相互比較を示している。やはりレベル 2 と同様のことがいえ、安全性指標についても滑動が支配的な断面が非常に多いことがわかるが、転倒や支持力が支配的な断面も幾つかあり、現行設計法とは傾向が異なっている。図-44 には各安全性指標と総

表-3 レベル1 解析ケース一覧

ケースNO	目 標	case0	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8
滑動	水平波圧	2.00	2.05	2.10	2.15	2.20	2.30	2.40	2.05を基本	2.10を基本
	混成堤・水深変化緩	1.04	1.05	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.05	1.10
	混成堤・水深変化急	1.16	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.22	1.20	1.20
	消波ブロック堤・緩	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95
	消波ブロック堤・急	1.01	1.02	1.02	1.03	1.03	1.05	1.06	1.05	1.05
	摩擦係数	0.88	0.88	0.87	0.87	0.86	0.85	0.84	0.84	0.85
	揚圧力	0.92	0.93	0.93	0.93	0.94	0.94	0.95	0.95	0.95
	混成堤・水深変化緩	1.02	1.02	1.03	1.03	1.03	1.04	1.05	1.05	1.05
	混成堤・水深変化急	0.82	0.82	0.83	0.83	0.83	0.84	0.84	0.85	0.85
	消波ブロック堤・緩	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.93	0.95	0.95
消波ブロック堤・急	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
転倒	自重	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95
	鉄筋コンクリート	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	無筋コンクリート	0.99	0.99	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.95	0.95
	中詰砂	1.04	1.05	1.05	1.06	1.07	1.08	1.09	1.09	1.10
	水平波圧	1.16	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	1.22	1.22	1.20
	混成堤・水深変化緩	0.91	0.91	0.91	0.92	0.92	0.93	0.94	0.95	0.95
	混成堤・水深変化急	1.01	1.02	1.02	1.02	1.03	1.05	1.06	1.05	1.05
	消波ブロック堤・緩	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.00
	消波ブロック堤・急	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.11	1.12	1.12	1.10
	揚圧力	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89	0.89	0.90
支持力	自重	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00
	鉄筋コンクリート	0.96	0.96	0.96	0.96	0.96	0.95	0.95	0.95	0.95
	無筋コンクリート	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.99	0.95	0.95
	中詰砂	0.98	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.97	0.95	0.95
	水平波圧	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	1.01	1.00	1.00
	混成堤・水深変化緩	1.08	1.08	1.09	1.09	1.10	1.11	1.12	1.10	1.10
	混成堤・水深変化急	0.86	0.86	0.86	0.87	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90
	消波ブロック堤・緩	0.95	0.95	0.96	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00	1.00
	消波ブロック堤・急	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.11	1.11	1.10	1.15
	サージン	1.01	1.01	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
共通	滑動側	1.03	1.03	1.04	1.04	1.04	1.04	1.04	1.05	1.05
	自重	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.95	0.95
	抵抗側	1.10	1.10	1.09	1.09	1.09	1.08	1.08	1.05	1.05
	tanφ	1.07	1.06	1.06	1.05	1.05	1.04	1.04	1.05	1.05
c'	1.0 ~ 2.5 (H.H.W.L... 1.0, H.W.L... 1.5 ~ 2.5)									

*緩 / 急は水深変化の度合いを表す

表一4 レベル1解析結果

ケースNO	現行	case0	case1	case2	case3	case4	case5	case6	case7	case8
安全係数決定の目標安全性指標	-	2.00	2.05	2.10	2.15	2.20	2.30	2.40	2.05を基本	2.10を基本
滑動β										
(最大値)	3.659	3.659	3.702	3.702	3.702	3.723	3.723	3.744	3.764	3.804
(平均値)	2.429	2.331	2.348	2.401	2.430	2.471	2.532	2.589	2.630	2.699
(最小値)	1.634	2.055	2.055	2.100	2.143	2.186	2.277	2.350	2.420	2.420
(標準偏差)	0.349	0.314	0.313	0.292	0.284	0.271	0.255	0.242	0.235	0.233
下位5%のβ値	1.976	2.081	2.081	2.173	2.210	2.242	2.332	2.406	2.459	2.538
転倒β										
(最大値)	9.697	8.380	8.410	8.736	9.282	9.696	10.035	10.498	10.091	10.833
(平均値)	5.662	5.236	5.393	5.722	5.874	6.045	6.328	6.592	6.926	7.230
(最小値)	2.013	1.977	2.092	2.092	2.207	2.207	2.323	2.418	2.323	2.674
(標準偏差)	1.673	1.570	1.633	1.784	1.824	1.926	1.946	1.995	1.863	1.930
支持力β										
(最大値)	7.533	5.764	5.764	6.290	6.360	6.620	6.947	7.502	7.121	7.608
(平均値)	3.902	3.542	3.663	3.895	3.997	4.106	4.325	4.527	4.758	4.999
(最小値)	2.339	1.879	2.361	2.034	2.288	2.288	2.510	2.649	3.200	3.335
(標準偏差)	0.974	0.942	0.976	1.062	1.058	1.111	1.126	1.205	1.019	1.068
堤体重量比	1.000	0.974	0.979	0.994	1.002	1.015	1.033	1.050	1.061	1.085
総合安全性指標	2.840	2.500	2.500	2.532	2.595	2.595	2.678	2.705	3.218	3.232
総合β平均値	2.325	2.163	2.197	2.262	2.304	2.347	2.431	2.502	2.575	2.659
(最小値)	1.551	1.740	1.847	1.847	1.922	1.993	2.195	2.273	2.291	2.420
総合下位5%β値	1.949	1.980	2.055	2.079	2.148	2.152	2.277	2.340	2.425	2.528
(下位5%値)	4.533	3.288	2.208	1.392	0.947	1.090	1.626	3.101	6.002	9.807
目標値に対する分散	15.281	4.788	5.649	8.564	10.479	13.083	18.454	23.987	31.045	39.612
(下位5%値)	1.193	1.092	1.069	1.088	1.073	1.091	1.088	1.069	1.062	1.052
総合平均β / 5%β	0.796	0.879	0.899	0.888	0.895	0.926	0.964	0.971	0.945	0.957
総合最小β値 / 5%β	1.045	1.078	1.069	1.061	1.055	1.053	1.042	1.035	1.021	1.015
滑動β / 総合β	1.014	1.051	1.013	1.045	1.029	1.042	1.024	1.028	1.014	1.004
(下位5%値)	6.10E-02	4.10E-02	3.20E-02	3.20E-02	2.70E-02	2.30E-02	1.40E-02	1.20E-02	1.10E-02	7.76E-03
総合破壊確率	1.20E-02	1.60E-02	1.50E-02	1.20E-02	1.10E-02	9.90E-03	7.78E-03	6.38E-03	5.26E-03	4.15E-03
(最大値)	2.26E-03	6.21E-03	6.21E-03	5.67E-03	4.74E-03	4.74E-03	3.70E-03	3.42E-03	6.46E-04	6.14E-04
(平均値)	2.60E-02	2.40E-02	2.00E-02	1.90E-02	1.60E-02	1.60E-02	1.10E-02	9.65E-03	7.65E-03	5.73E-03
(最小値)	5.53E-03	3.59E-03	1.80E-03	1.49E-03	9.34E-04	1.18E-03	1.72E-03	2.65E-03	3.62E-03	4.79E-03
(下位5%値)	2.00E-02	1.00E-02	1.10E-02	1.60E-02	1.80E-02	2.10E-02	2.60E-02	3.00E-02	3.30E-02	3.60E-02

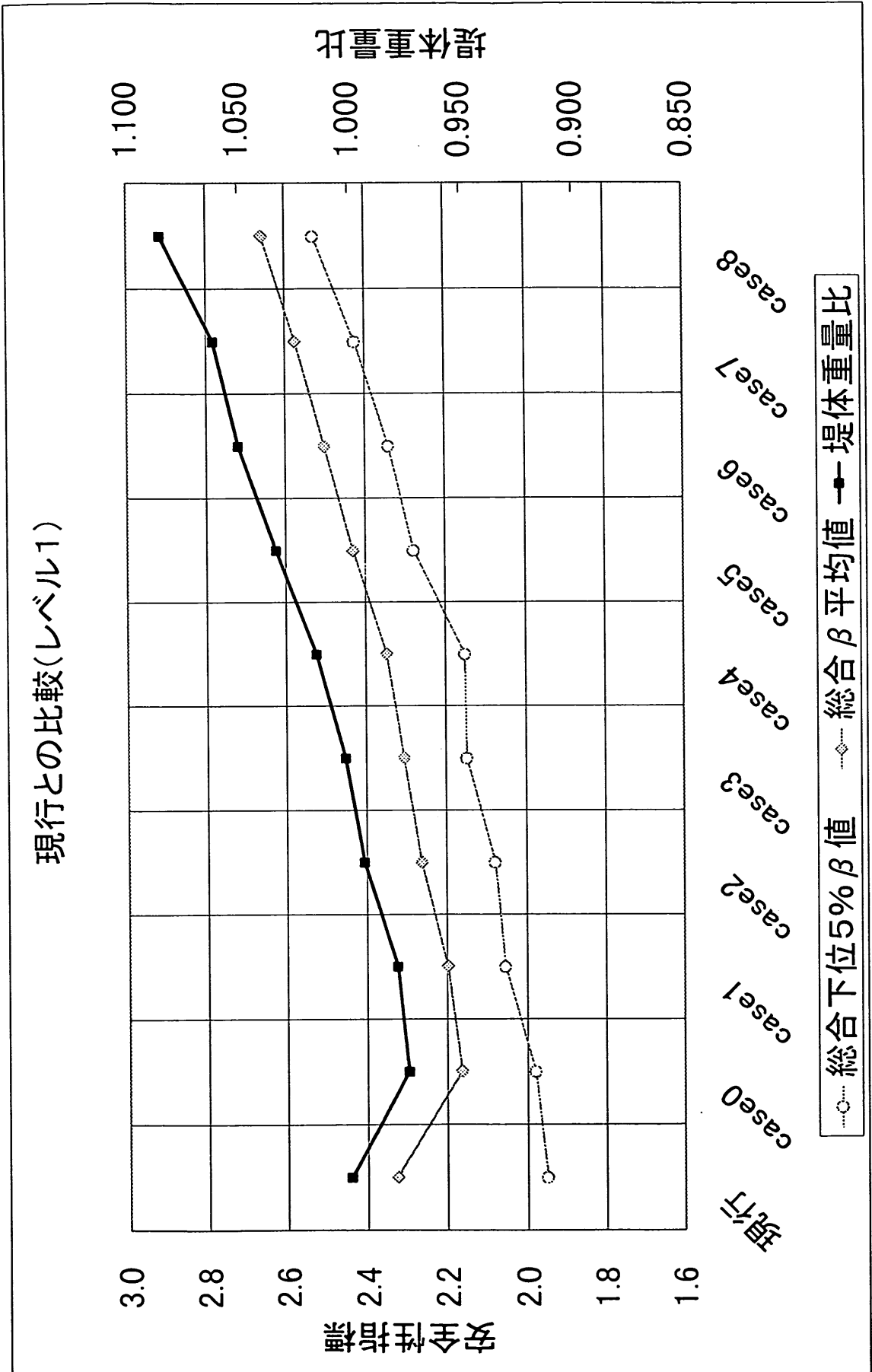
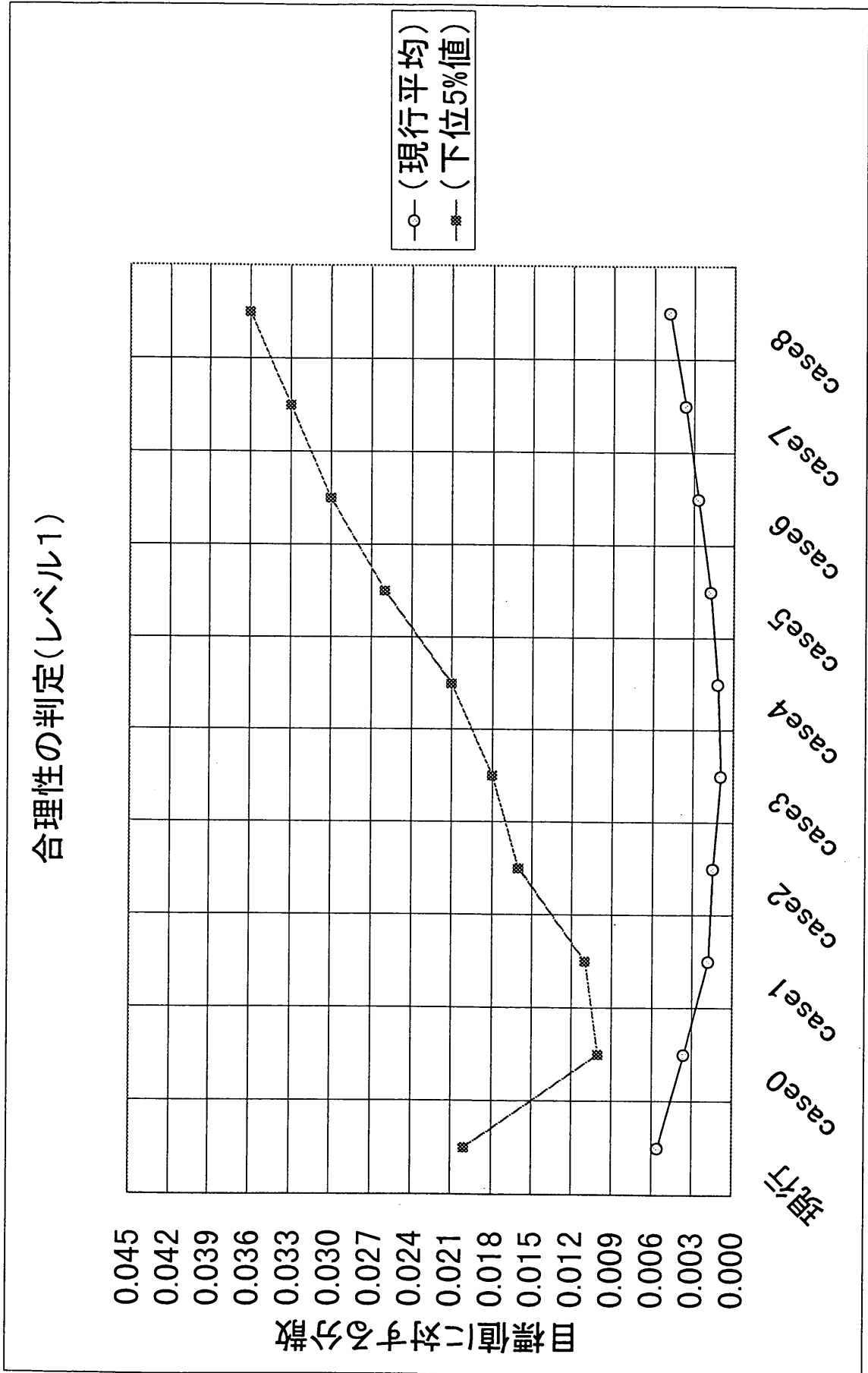


図-37 安全性指標などの変化 (レベル1)



図一38 目標値に対する分散の変化

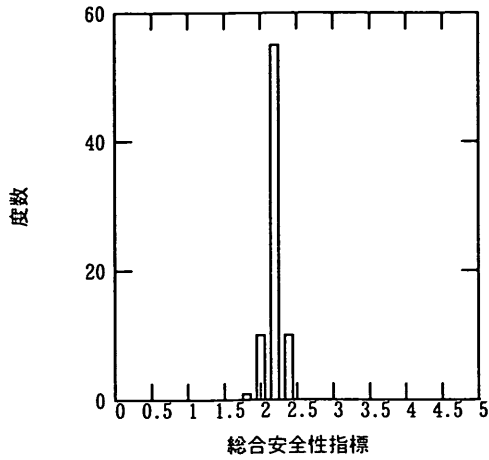
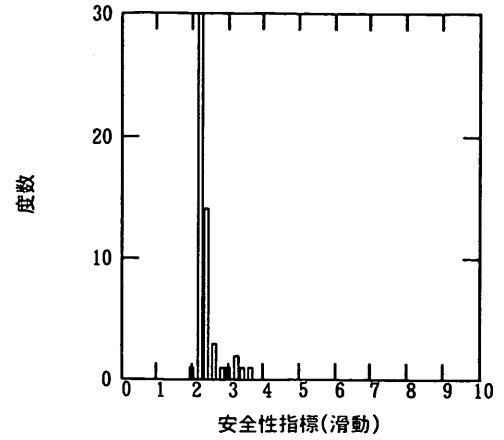


図-39 総合安全性指標の分布 (case3)



(a)

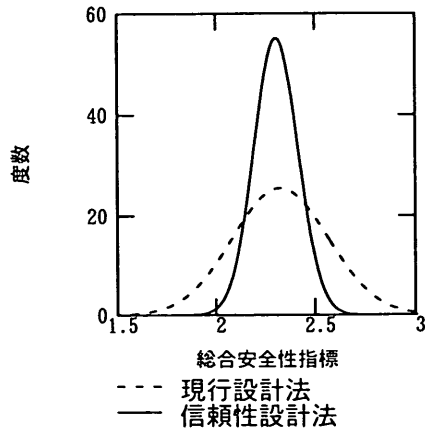
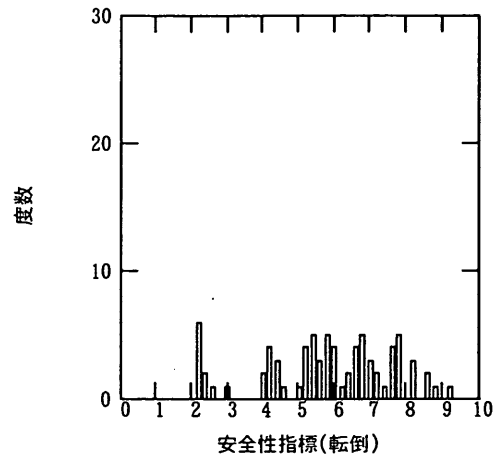


図-40 安全性指標の設計法による比較 (case3)



(b)

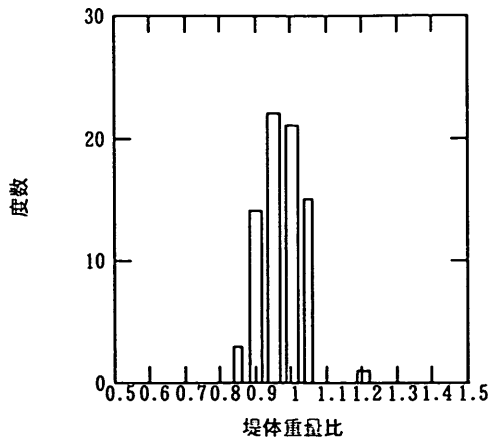
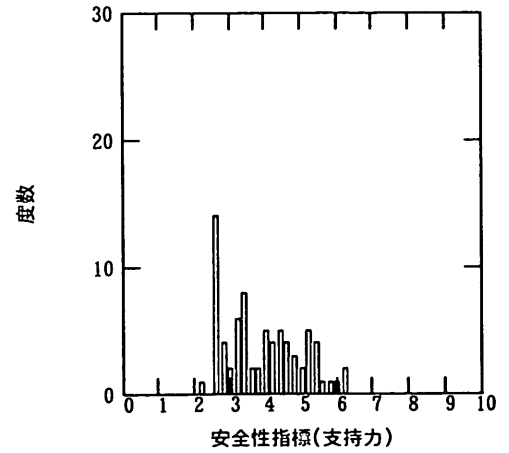


図-41 堤体重量比 (case3)



(c)

図-42 安全性指標の分布 (case3)

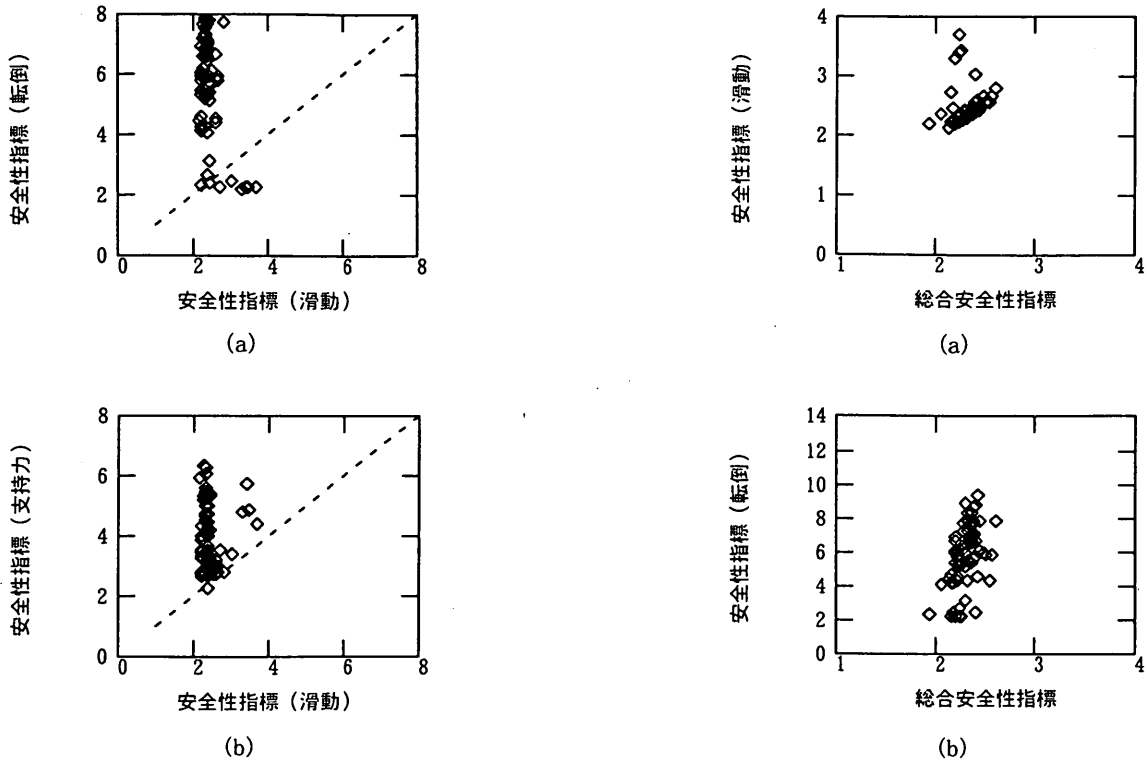


図-43 各安全性指標の相互比較

合安全性指標の関係を示した。これらはレベル2に比べるとややばらつきが大きい。

次に、最低水準を下回る割合を揃える方法での最適な安全係数の検討を行う。下位5%総合安全性指標が現行設計法の1.95とほぼ等しくなるのは、目標安全性指標を2.0として安全係数を設定したcase0である。すなわち、case0の総合安全性指標の範囲は1.74~2.50で、平均値は2.16、標準偏差は0.13である。平均的には現行設計法と比べて総合安全性指標で0.9倍程度、総合破壊確率では、1.3倍程度危険側になるが、破壊確率の最大値は、現行設計法の 6.1×10^{-2} に比べて信頼性設計法では 4.1×10^{-2} と減少しており、最も危険な施設の安全性は若干ではあるが向上する。堤体重量比は平均的に約0.97となり、3%弱の重量が削減される。

case0の総合安全性指標の分布を図-45に、各破壊モードに対する安全性指標の分布を図-46に示す。正規分布を仮定して現行設計法と信頼性設計法の比較を行ったものが図-47である。堤体重量比の分布は図-48に示すとおりである。各安全性指標の相互比較を図-49に、また各安全性指標と総合安全性指標の比較を図-50に示す。これらについては、ほぼcase3と同様のことがいえる。

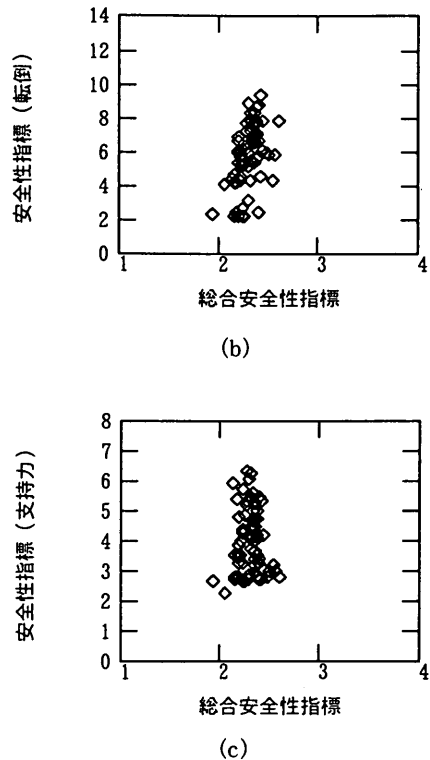


図-44 各安全性指標と総合安全性指標の比較

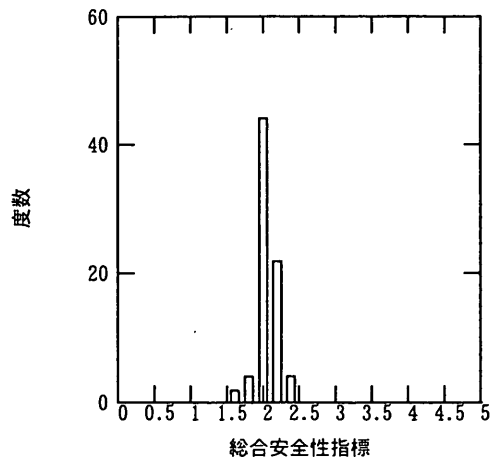
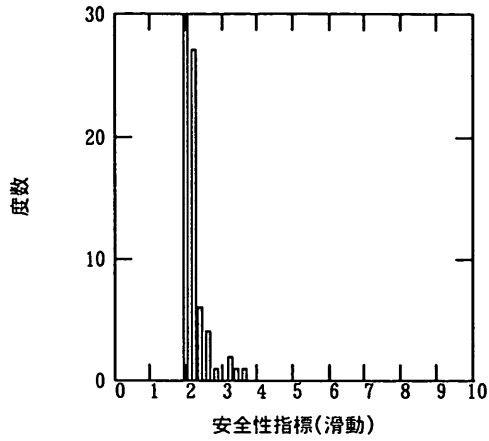
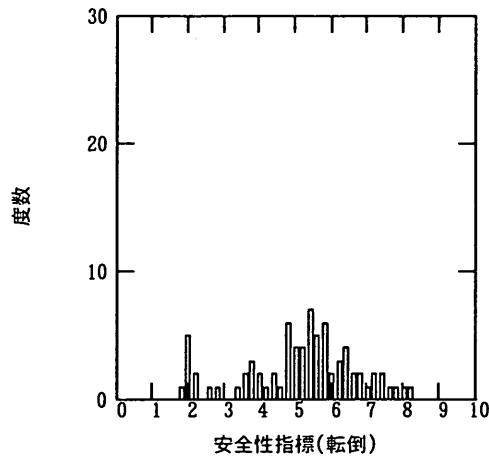


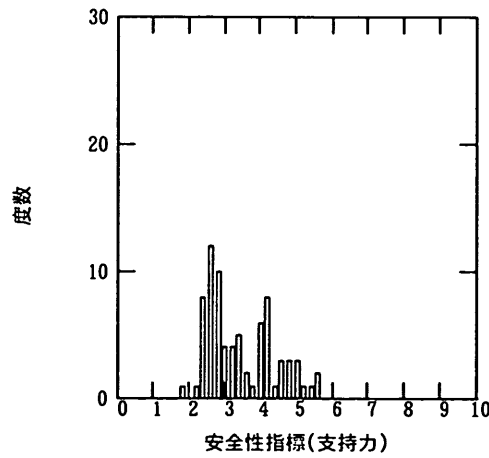
図-45 総合安全性指標の分布(case0)



(a)



(b)



(c)

図-46 安全性指標の分布(case0)

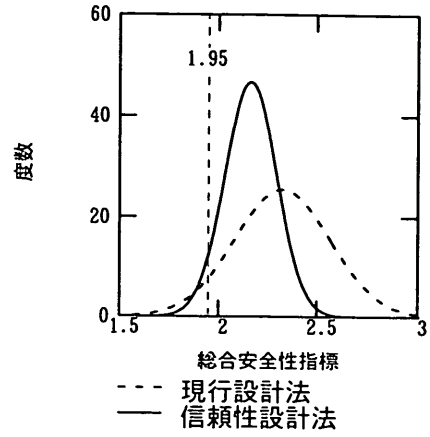


図-47 安全性指標の設計法による比較(case0)

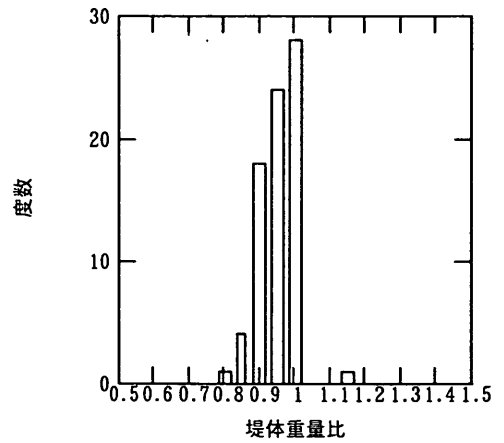
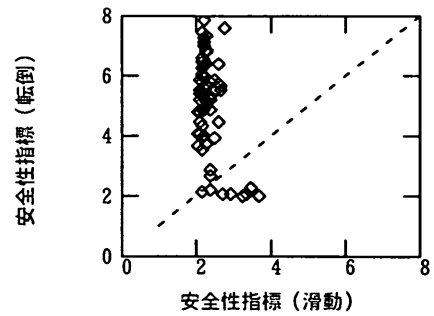
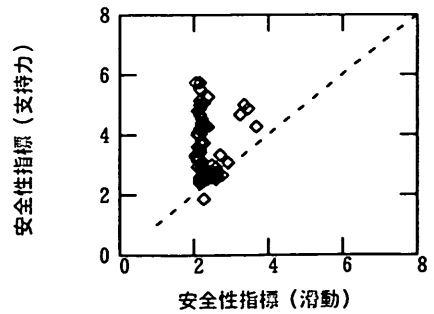


図-48 堤体重量比(case0)



(a)



(b)

図-49 各安全性指標の相互比較

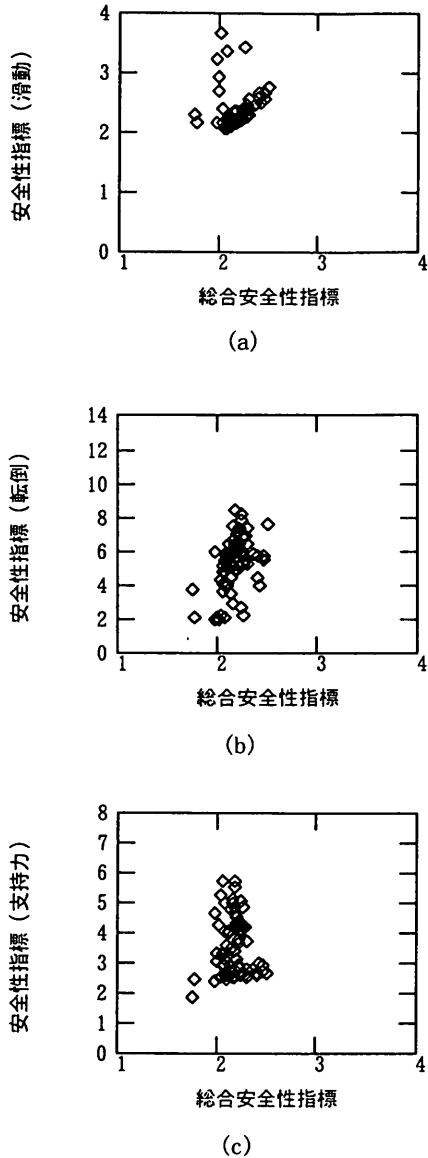


図-50 各安全性指標と総合安全性指標の比較

6. 各レベルの適用性

前章までにレベル1, レベル2のそれぞれの手法について現行設計法よりも合理的な手法を提案した。ここでは、各手法の適用性を相互比較する。すなわち、現行設計法と平均的に同程度の安全性を持つ設計法とする観点からはレベル1のcase3とレベル2のcase7を、最低水準を下回る割合を揃える観点ではレベル1のcase0とレベル2のcase4を比較の対象とする。

まず、平均程度の安全性を目標としたケースについて検討する。レベル1とレベル2の比較を現行設計法との対比で表-5に示す。総合安全性指標、総合破壊確率の比較は図-51に示す。総合破壊確率の平均値に対する分

表-5 レベル1とレベル2の比較

	現行設計法	レベル1	レベル2
①平均値による設定			
総合安全性指標			
最大値	2.840	2.595	2.462
平均値	2.325	2.304	2.313
下位5%値	1.949	2.148	2.142
最小値	1.551	1.922	2.102
標準偏差	0.244	0.110	0.074
平均値に対する分散	4.533	0.947	0.431
堤体重量比	1.000	1.002	1.008
②最低水準による設定			
総合安全性指標			
最大値	2.840	2.500	2.256
平均値	2.325	2.163	2.136
下位5%値	1.949	1.980	1.947
最小値	1.551	1.740	1.922
標準偏差	0.244	0.131	0.097
堤体重量比	1.000	0.974	0.976

散はレベル2で0.43, レベル1で0.95であり, レベル1とレベル2で倍以上の違いがあるが, 現行設計法の4.53と比較するとレベル1においても合理性は明らかであるといえる。危険側の安全性指標についても, 安全性指標の下限値は, レベル1で1.92, レベル2で2.10であり, 0.2程度の違いがあるが, 現行設計法と比較すると十分に大きく, 下位5%値は, レベル2の2.14に対してレベル1は2.15とほぼ同じ値が得られており, この点からもレベル1の適用性も十分に高いと判断される。設計手法としてはレベル1の方法の方が簡易であるため, 合理性に大きな差が認められないことから, レベル1の方法によって十分合理的な設計を行うことができると判断される。

次に, 最低水準を下回る割合を揃える方法について検証する。この場合, 堤体重量比はレベル1とレベル2とで現行設計法の0.975倍程度であり, ほとんど差はない。総合安全性指標の平均値はレベル1で2.16, レベル2で2.14とレベル1の方が僅かながら大きく, その意味ではレベル1の方法も遜色ないといえる。しかしながら, 総合安全性指標の下限値を見ると, レベル2の1.92に対し

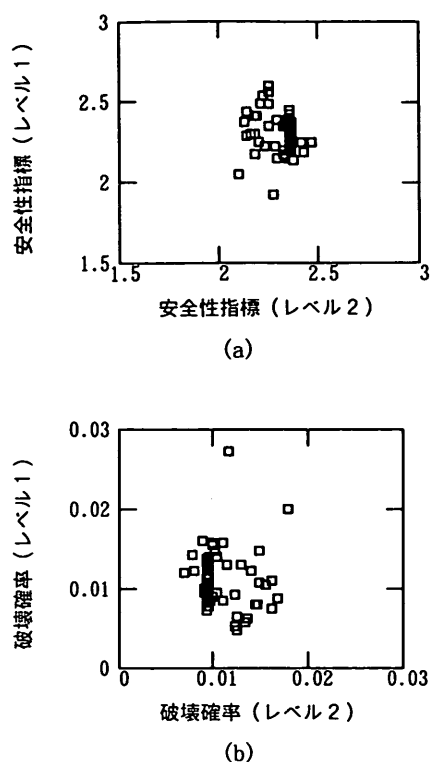


図-51 レベル1とレベル2の比較

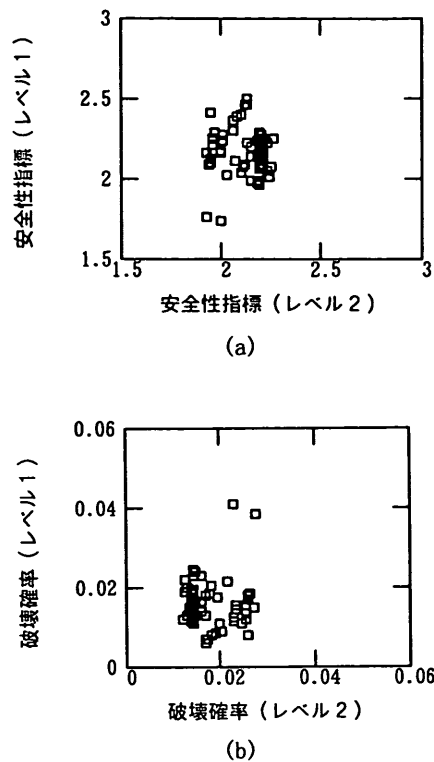


図-52 レベル1とレベル2の比較

てレベル1では1.74と小さく、現行設計法の下限值1.55に近い値となっていることに注意が必要である。図-52にレベル1とレベル2の総合安全性指標、総合破壊確率を比較する。レベル1、レベル2の方法のいずれも適用性は認められるが、最低水準を揃える方法は、施設の安全性を現状よりも平均的に下げる方法であるので、より厳密には、信頼性の高いレベル2の方法による方が、より望ましいと判断される。

レベル1の方法において総合破壊確率が0.04程度となる施設が2例あることがわかるが、これらのうち1例は支持力が、またもう1例は転倒が支配的な断面である。安全係数を変化させることでこれら2例の安全性を適正化することは可能であるが、その場合、他の断面も安全側に変化するため、全体的な安全性のバランスは崩れることになる。レベル1の方法の安全性のコントロールの限界を示すものといえる。

7. 結論

本研究は、筆者らが行ってきた防波堤の全体系安全性へのレベル1およびレベル2の信頼性設計法の適用性に関する研究を総括するものである。近年における全国の重力式防波堤の設計事例76例をもとにして、現行設計法

による防波堤の滑動、転倒、支持力の各安全性を安全性指標により評価し、各破壊モードに対する安全性を相互比較するとともに、全ての破壊モードを考慮した総合的な破壊可能性について検討した。また、レベル1およびレベル2の信頼性設計法、全ての破壊モードを考慮した総合破壊確率を基準とした適用性を検討した。

本研究より得られた主要な結論は以下の通りまとめることができる。

①レベル1およびレベル2の信頼性設計法によって防波堤の全体系安全性を照査する手法を提案した。提案は、現行設計法によって建造される施設と平均的に同程度の安全性を持つ設計法と、建造される施設の安全性の最低水準(5%下限値)を現行設計法と揃える設計法よりなるものである。前者の方法による場合、堤体の重量は総体的に現行設計法とほぼ等しく、後者の方法による場合、堤体重量は現行設計法によるよりも平均的に2~3%減少させることができる。

本研究の成果による設計法の提案は、表-6のようにまとめられる。

②現行設計法と平均的に同程度の安全性を持つ施設を設計する手法については、総合破壊確率に関してレベル1とレベル2で合理性に大きな違いはなく、設計の簡易な

表-6 信頼性設計法による設計法の提案

レベル1			平均値設定	最低水準設定
滑動	水平波圧	混成堤・緩	1.04	1.06
		混成堤・急	1.16	1.18
		消波ブロック堤・緩	0.91	0.92
		消波ブロック堤・急	1.01	1.03
		摩擦係数	0.88	0.87
	揚圧力	混成堤・緩	0.92	0.93
		混成堤・急	1.02	1.03
		消波ブロック堤・緩	0.82	0.83
		消波ブロック堤・急	0.91	0.92
	浮力		1.00	1.00
	自重	鉄筋コンクリート	0.96	0.96
		無筋コンクリート	1.00	1.00
中詰砂		0.99	0.98	
転倒	水平波圧	混成堤・緩	1.04	1.06
		混成堤・急	1.16	1.18
		消波ブロック堤・緩	0.91	0.92
		消波ブロック堤・急	1.01	1.03
		揚圧力	混成堤・緩	0.97
	混成堤・急	1.08	1.09	
	消波ブロック堤・緩	0.86	0.87	
	消波ブロック堤・急	0.95	0.96	
	自重	鉄筋コンクリート	0.96	0.96
		無筋コンクリート	1.00	1.00
		中詰砂	0.98	0.97
	支持力	水平波圧	混成堤・緩	0.97
混成堤・急			1.08	1.09
消波ブロック堤・緩			0.86	0.87
消波ブロック堤・急			0.95	0.96
サーチャージ		滑動側	1.10	1.10
		抵抗側	1.01	1.00
自重		滑動側	1.03	1.04
		抵抗側	0.98	0.98
tan φ			1.10	1.09
c'			1.07	1.05
共通	潮位	1.0~2.5	1.0~2.5	

* 緩 / 急は水深変化の度合いを表す
 * 潮位はH.H.W.L.の場合1.0、H.W.L.の場合地域別に1.5~2.5

レベル2

		平均値設定	最低水準設定
目標安全性指標 β_r	滑動	2.20	2.35
	転倒	2.20	2.35
	支持力	2.20	2.35

レベル1 信頼性設計法によって十分に合理的な設計を行うことができる。

③ 現行設計法と最低水準を下回る割合を揃える手法に関しても、レベル1およびレベル2の方法いずれも高い適用性を持つ。しかしながら、この方法では現行設計法よりも平均的に安全性を下げる事となるため、より信頼性の高いレベル2の方法による方がより望ましいと判断される。

④ レベル2 信頼性設計法における目標安全性指標の設定は総合安全性指標に比較的敏感である。これに対して、レベル1の信頼性設計法における安全係数の設定は総合安全性指標に比較的鈍感である。

8. あとがき

滑動、支持力のそれぞれについて行ってきた防波堤の全体系安全性照査へのレベル1、レベル2の設計法の適用性については本報告をもってひとつの結論が得られた。しかしながら、信頼性設計法の体系の完全な構築に向けては、その一步を踏み出したに過ぎないともいえる。すなわち、防波堤の波圧に対する動的な影響を考慮した信頼性設計法の構築が今後は求められるであろう。また、支持力問題については、土質強度特性に関する不確実性、破壊のメカニズムの確率論的把握に向けた努力が求められるほか、支持力安全性照査法として用いられるピシヨップ法の枠組みを超える、より合理的な照査方法も求められよう。構造物の耐用年数との関係からみた最適な目標安全性についても今後の研究課題の一つである。

本研究において得られた結論は、十分な設計データをもとに設計波が設定されたもの事例をもとに求められたものである。実際には全ての港湾が詳細なデータをもとに設計されているわけではない。波浪などの情報が乏しいまま、工学的判断をもとに安全度を設計波に見込んで設計を行わざるを得ない港湾の場合、形式的に信頼性設計法を適用しても、合理的な設計結果とならないことがあるので注意が必要である。また、防波堤の全体系安全性にはマウンドの安定性が大きく関与しているほか、消波ブロック被覆堤の場合は消波ブロックの安定性も大きく影響する。これらの安定性照査の合理化に向けた努力も、決して軽んじられてはならないと考える。

本研究は、港湾技術研究所で行っている防波堤の新設計法に関する検討会の作業の一環として行ったものである。研究の遂行にあたり、小島前水工部長、南水工部長をはじめとする検討会のメンバーの方々より貴重な意見を賜った。研究のとりまとめにあたっては、矢部計画設計基準部長から懇切なご指導をいただいたほか、山本設計基準研究室長からご助言をいただいた。これらの方々に深く感謝します。

(1998年3月31日受付)

参考文献

- 1) 長尾 毅：限界状態設計法の鉄筋コンクリート港湾構造物への適用に関する研究，港湾技術研究所報告，Vol. 33, No. 4, 1994.
- 2) 長尾 毅：ケーソン式岸壁底版の地震時安全係数に関する事例解析，港湾技研資料，No. 867, 1997.
- 3) 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.

4) 長尾 毅, 門脇陽治, 土田 孝, 寺内 深: 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.

5) 外山進一: 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用, 港湾技研資料, No. 540, 1985.

6) 鈴木慎也: 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用 (その2), 港湾技研資料, No. 582, 1987.

7) TAKAYAMA, T. and IKEDA, N.: Estimation of Sliding Failure Probability of Present Breakwaters for Probabilistic Design, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 31, No. 5, 1993, pp. 3~32.

8) 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.

9) 土田孝, 湯 怡新: 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 35, No. 1, 1996, pp. 117~146.

10) 星谷 勝, 石井 清: 構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1986.

11) 神田 順編: 限界状態設計法のすすめ, 建築技術, 1993.

12) 気象庁: 平成6年潮位表, 1994.

13) 森平倫生, 木原 力, 堀川 洋: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について, 第25回海岸工学講演会論文集, 1978, pp. 337~341.

14) 森平倫生, 足立一美: 混成防波堤捨石マウンドの摩擦係数について (第二報), 第26回海岸工学講演会論文集, 1979, pp. 446~450.

15) 長尾 毅: 防波堤の滑動および支持力の安全性指標の相互比較, 土木学会第51回年次学術講演会講演集, 1996.

16) 南兼一郎, 春日井康夫: 鉄筋コンクリート港湾構造物への限界状態設計法の適用, 港湾技研資料, No. 716, 1991.

17) 松尾稔: 地盤工学, 技報堂出版, 1984.

18) 荘司喜博: 大型三軸圧縮試験による捨石材のせん断特性に関する考察, 港湾技術研究所報告, Vol. 22, No. 4, 1983, pp. 59~120.

19) 水上純一, 小林正樹: マウンド用捨石材の大型三軸試験による強度特性, 港湾技研資料, No. 699, 1991.

20) 小林正樹, 寺師昌明, 高橋邦夫, 中島謙二郎, 小谷拓: 捨石マウンド支持力の新しい計算法, 港湾技術研究

所報告, Vol. 26, No. 2, 1987, pp. 371~411.

21) 奥村樹郎, 土田 孝: 土質定数のばらつきを考慮した不同沈下の推定, 港湾技術研究所報告, Vol. 20, No. 3, 1981, pp. 131~168.

22) 運輸省港湾局監修, 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1989.

23) 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎, 細山田得三: 混成堤のマウンド形状による衝撃波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, 1992, pp. 676~680.

24) 堀川 洋, 神田勝己, 堀家 正: ケーソン式混成防波堤構造諸元の統計的分析, 港湾技研資料, No. 644, 1989.

主要記号一覧

a : 水平荷重のアーム長

a_w : 堤体重量合力の作用線から壁体前しまでの距離

a_{pu} : 揚圧力合力の作用線から壁体前しまでの距離

a_{pb} : 浮力合力の作用線から壁体前しまでの距離

a_{pb} : 水平波圧合力の作用線から壁体底面までの距離

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

c'_{κ} : 有効応力に基づく見かけの粘着力の特性値

d : マウンド天端の水深

F : 安全率

f : 壁体底面と基礎との摩擦係数

f_s : 摩擦係数の特性値

H : 水平荷重

H_{κ} : 水平荷重の特性値

$H_{1/3}$: 設計有義波高

h' : 既往最高潮位 (H. H. W. L.)

h : さく望平均満潮位 (H. W. L.), 設計水深, 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

L : 波長, 耐用期間

M_w : 鉛直荷重による壁体前し回りの抵抗モーメント

M_b : 水平荷重による壁体前し回りの転倒モーメント

P : 壁体に作用する全水平力, 構造物の耐用期間

	中の破壊確率	W_{0ki}	: ケーソンを構成する材料 i の重量の特性値
P_{FD}	: 浮力の設計用値	X_0	: 因子 X の推定値
P_{Fk}	: 浮力の特性値	X_{0m}	: 因子 X の真値の平均値
P_{HD}	: 水平波圧の設計用値	Z	: 性能関数
P_{Hk}	: 水平波圧の特性値	z	: Z の規準化変数
P_{UD}	: 揚圧力の設計用値	α	: 分離係数, 平均値の偏り, 分割細片の底面となす角
P_{Uk}	: 揚圧力の特性値	β	: 安全性指標
P_{uk}	: 揚圧力の特性値 (kN/m)	β_T	: 目標安全性指標
P_f	: 破壊確率, 総合破壊確率	γ_0	: 構造解析係数
P_{fs}	: 滑動破壊確率	γ_c	: 見かけの粘着力に関する材料係数
P_{ft}	: 支持力破壊確率	γ_{FPb}	: 浮力に対する荷重係数
P_{fr}	: 信頼性設計法による総合破壊確率	γ_{FPb}	: 水平波圧に対する荷重係数
P_{ft}	: 総合破壊確率の目標値, 転倒破壊確率	γ_{FPu}	: 揚圧力に対する荷重係数
$D_{(L, T)}$: 再現期間 T 年以上の波高の波が L 年間に襲来する確率	γ_{FWi}	: ケーソンを構成する材料 i の重量に対する荷重係数
$D_{f(L, T)}$: 耐用期間 L 年の間に再現期間 T 年の波の作用による破壊確率	γ_H	: 水平荷重に関する荷重係数
D_T	: 再現期間 T 年の波による破壊確率	γ_i	: 構造物係数
q	: 分割細片に作用するサーチャージ	γ_{mf}	: 摩擦係数に対する材料係数
q_k	: 分割細片に作用するサーチャージの特性値	γ_{qr}	: サーチャージの抵抗側に関する荷重係数
R	: 耐力関数	γ_{qs}	: サーチャージの滑動側に関する荷重係数
R_m	: 耐力 R の平均値	γ_t	: 潮位のばらつきを考慮するためのパラメータ
r	: すべり円弧の半径	$\gamma_{tan\theta}$: 見かけのせん断抵抗角の正接に関する材料係数
S	: 荷重関数	γ_{wr}	: 分割細片の重量の抵抗側に関する荷重係数
S_m	: 荷重 S の平均値	γ_{ws}	: 分割細片の重量の滑動側に関する荷重係数
S	: 荷重	θ	: 中央安全率
S_k	: 荷重効果の設計上の特性値	μ	: 平均値
T	: 再現期間	σ	: 標準偏差
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	σ_R	: 耐力 R の標準偏差
V	: 変動係数	σ_S	: 荷重 S の標準偏差
W	: 有効鉛直荷重	ϕ'	: 有効応力に基づく見かけのせん断抵抗角
W'	: 分割細片の重量	$\phi(z)$: 標準正規確率密度関数
W'_k	: 分割細片の重量の特性値	Φ	: 標準正規確率分布関数