

# 港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 540 Dec. 1985

信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用

外 山 進 一

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. ま え が き .....	3
2. 安全性の評価方法 .....	4
3. 安全性指標の算定理論 .....	9
4. 防波堤の滑動安定性への適用 .....	12
4.1 概 説 .....	12
4.2 計算手順 .....	12
4.3 計算条件 .....	13
4.4 安全率レベルの安全性指標 .....	14
4.5 破壊レベルの安全性指標 .....	32
5. 安全性指標再考 .....	38
6. あ と が き .....	40
参 考 文 献 .....	40
記号一覧表 .....	41
付録1：安全性指標の計算式 .....	42
付録2：安全性理論に関する欧文文献集 .....	46

# The Application of the Reliability Theory to the Breakwater

Shinichi TOYAMA\*

## Synopsis

The safety factor is the conventional measure of the safety. The designer always relies on the safety factor which doesn't reveal the secrets of the safety. The reliability theory is in vogue in the world, even numbers of country have the codes based on it. The reliability theory is taking account of the distribution of the related factor which comes into the safety relation. The point is that the reliability theory is based on the probability theory which takes good account of the randomness of the related factors. The load and the resistance are random variables which are hard to identify. The reliability index comes from 'First order - second moment method' which is the simplified form of the reliability. The reliability index only deals with the mean and the standard deviation, so this procedure is practical.

The reliability theory is applied to the sliding stability of the breakwater which is the main cause of the damage. The sensitivity analysis shows the performances of the reliability index and the safety factor, therefore it may help understanding the safety to compare the both. The calculations are carried out at the safety level as the serviceability limit state and the destruction level as the ultimate limit state.

---

\*Chief of the Automatic Design Laboratory, Design Standard Division.

# 信頼性理論の防波堤滑動安定性への適用

外山進一\*

## 要 旨

信頼性理論の起原は既に第二次世界大戦前より見られるが、今、欧米を中心としたここ20年余の精力的な研究成果を踏まえ、世界に流布しつつある信頼性理論を導入し防波堤滑動安定性の評価を試みる。設計上で構造物の安全性は基本的な問題であり、かねてより説明が望まれているところであるが、現在のところ構造物の安全性は不明な点を残している。

信頼性理論は確率の考えを入れて、設計計算に含まれる各設計変数のランダム性を考慮して構造物全体の信頼性を評価しようとし、設計変数の確率分布を用いる点が安全率との差異である。従来より用いられている安全率に相当する安全性指標を用いてモデル防波堤の滑動について感度分析を行い、特性を調べている。安全性指標を計算する場合に安全性の程度を規定する段階を示している限界状態としては、使用限界状態として安全率1.2に相当する場合、終局限界状態として安全率1.0に相当する場合の二つを対象としている。安全率と同様に、外力が大きくなると安全性指標は小さくなるが、設計変数の分布との関係で安全性指標は複雑な動きとなる。安全性指標のとり数値が示している基本的な意味は、確率的に発生頻度の多い状態は安全性指標が小さく、確率的に発生頻度の少ない状態は安全性指標が大きくなるということである。安全性指標は計算対象になっている限界状態の生起確率に応じて、安全性の程度を示しているが、安全率は力の釣合う状態での抵抗が有する外力に対する倍率である。

## 1. まえがき

設計実務では港湾の施設の技術上の基準等により、疑うことなく所定の安全率を用いて設計し、安全率が満足される場合は当該構造物は破壊しないと考え、安全率に対する信頼はまさに信仰に近いものがある。確かに安全率によりある程度の安全性を有する施設が築造され、現在まで公共の福祉の向上に貢献してきているし、今後も安全率で設計し構造物を築造することは継続することと思われる。安全性について理解を深めるために、安全性の一つの指標である安全率を批判すると、安全性の課題として以下の事項が挙げられる。

1. 特定構造型式の所定の安全率は、条件にかかわらず構造物に同一の安全性を保障しているか。
2. 異構造型式間の安全率は、安全率の値が同じ場合に構造物に同一の安全性を保障しているか。
3. 安全率の数値と安全性の程度の相関関係はいかほどか。
4. 安全率1とはいかなる状態を表現するのか。
5. 安全率は相対値か絶対値か。
6. 構造系の安全率と部材の安全率は釣合いのとれた

安全性を保障しているか。

これらは、どの一つをとっても答に苦しむ事項である。

本文では、安全性の属性に少しでも光を当てるべく信頼性理論を用いて、モデル防波堤の滑動安定性の計算をし検討することにより、あわせて信頼性理論を紹介し、感度分析を通して安全性指標の挙動を調べることとする。信頼性理論は電気回路のランダムな負荷に対する容量の安定性評価から地震時の構造物の安定解析、原子力発電所の安全性評価に至るまで現在では各所に利用されている。港湾関係では北海等の石油掘削リグの設計に際して良く用いられている。各国の構造物の設計、特にコンクリート構造物の設計基準<sup>1)</sup>にも採用されているのが見受けられる。

信頼性理論<sup>2)</sup>は、外力や抵抗力等の設計関係変数のランダム性を安全性の評価に反映しようとする方法であり、分布の代表値である平均値と標準偏差を用いる手法によるとしてもそれらの値を得がたいことが少なくない。このため、理論としては安全性指標を用い、簡便に安全性を示すくふうをしている。安全性指標の値が意味するところは日本の港湾技術者にとって実務で利用した経験が無い場合直観的理解が困難であるが、破壊確率と分布

\* 設計基準部 自動設計研究室長

関数を通じて関係づけられることが知られている。実際の問題では確率分布が得がたいことから、確率分布形状を簡素化して反映する程度により三段階に分けられる。本文では第二段階の First Order-Second Moment Method<sup>3)</sup>を用いている。

信頼性理論自体も完全なものではなく安全率と同様に多くの課題をかかえているので、信頼性理論を構造物設計に適用するには常にその妥当性が問いかねられなければならない。信頼性理論に疑念を抱く論者は、安全率が安全性指標というより訳の分らない数値に置き換えられ混迷を増すだけだと批判するが、その言うことにも一理がある。現時点において、信頼性理論はすべてを説明しきれない段階に至っていない。しかし、信頼性理論はすくなくとも安全性の一面を表現していると考えられるし、安全率の本質を解明するには安全率と異なる他の手段を用いるべきであるから、信頼性理論も一つの有力な道具を提供する。さらに信頼性理論に親しむことにより新たに見いだされる情報も期待されるし、少なくとも世界的に評価されている理論に対し批判の目を得ることができる。

## 2. 安全性の評価方法

設計実務では、安全率は所与の条件として扱われているが、安全性とは何かと問いただすと本質は明らかではない。設計の手順には、次の四つがある。

- ① 荷重の特定
- ② 材料の特定
- ③ 構造物の応答計算
- ④ 安全性の評価

設計の可否を最終的に決定するのが、安全性の評価である。従来、工学の分野では応答計算についての研究が進み、複雑な計算が可能となり、精度の向上が見られる。これに比べて荷重の特定は発展段階にある。安全性の評価は、あまり進歩が見られない。全体として設計の合理性を追求するには、各手順の精度が約合っていることが望まれ、一部の精度を高めても他が遅れていればその部分が足を引張って、全体には効果が少ないことになる。例えば荷重ケースを十分に吟味していない場合、いかに応答計算を細かく実施したところで、そうした計算結果を検討することは総合的にはあまり意味がなく、抜けた荷重ケースの安全性の評価はできない。

安全性に影響する要因を以下に列挙する。

- ① 荷重の大きさ、特性 → 静的、動的
- ② 材料定数(土、構造等) → 弾性、塑性、履歴特性
- ③ 構造のモデル → 変位、応力

④ 施工 → 精度

⑤ 構造物の設計から完成に至るまでの作業に参与する人間の錯誤→計算、図、施工、管理他にも多くあると思われるがここでは代表的なものを挙げている。どの要因が安全性と関係があると仮定するかにより各種の設計概念がある。例を挙げると次のとおりである。

- ① 許容応力度法：材料を弾性範囲内で利用するよう限界値を用いる。
- ② 安全率による方法：終局状態に対する安全性の余裕を規定する割合を用いる方法である。
- ③ 極限設計法：構造系の終局耐力を反映して設計する。
- ④ 限界状態設計法：各種の状態を設定することによりそれぞれの状態に応じて安全性を評価する。
- ⑤ 信頼性理論による方法：設計に関連する変数の確率分布を考慮する。
- ⑥ Fuzzy 理論による方法：信頼性に属するが、人間の錯誤等の数学的に表現困難な問題を含めて取り扱う試みをしている近似的な確率の手法である。

上記の内から代表的な許容応力度法、安全率による方法に加えて、限界状態設計法、信頼性理論による方法について解説を加える。

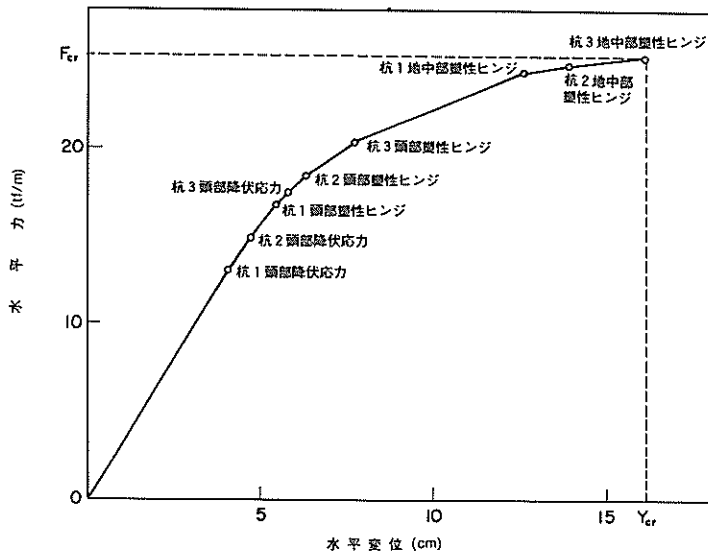
### (1) 許容応力度法

許容応力度  $\sigma_a$  は、材料の降伏応力  $\sigma_y$  を材料の安全率  $r_m$  で割って得られる。

$$\sigma_a = \frac{\sigma_y}{r_m} \quad (1)$$

許容応力度は弾性域内で設定され、この応力度以下での使用であれば構造物に何ら有害な影響が発生しないとされる。外力の繰り返し作用については、異論の多いところであるが、疲労が問題となる回数例えば  $10^6$  回に比べ無視できる程度であれば破壊するおそれはあるまい。この考えの対象は構造物に使用される材料であるから、材料ごとに許容応力度、材料の安全率は異なることになる。それは材料により応力-ひずみ曲線が異なった挙動を示すためである。また、例えば端し圧の様に経験的に決められていることもある。これはマウンドの実物実験が困難なためである。試験片を使って室内実験が可能な材料については、実験により精度の高い値が得られている。

許容応力度法を用いる場合、部材は常に許容応力度で設計される。構造物の場合は、許容応力度の範囲内であれば安全であるとする基準で判断すると、構造物の一部が許容応力度を超すと不安全になり、全体と部材の安全性評価は異なると考えられる。例えば、栈橋を考えると、一つの杭頭が塑性化まで至ったとしても、まだ、構造物



図一 1 栈橋の崩壊過程

としては機能するし、すべての杭頭が塑性化し更に杭中間部が塑性化して崩壊機構を形成するには余裕がある<sup>4)</sup>。しかし、これは判断基準の問題であるから、すべての杭が同時に許容応力度に達するように設計すれば、一部の部材だけが許容応力度を超えるという場合よりは経済的合理性に近づくと考えられる。言い換えると部材の安全率と全体としての系の安全率は異なるし、構造物の部材構成や構造様式が異なれば安全率も異なってくる。これは、許容応力度が材料強度に基づき、構造物の部分に注目して発展した概念だから、全体としての系を想定した安全性の概念と合わないこともある。しかし、扱いの簡便さ及び考え方が明確なこともあり、長い歴史を持った方法論である。察するに、構造物が破壊しないように、諸種の不確定要素をすべて含んだ形で経験的に確立されてきた方法であろう。許容応力度法によれば、構造体のどの一部も許容応力度を越すことは無いから、最高の安全率が確保される。

(2) 安全率による方法

一般に安全率と称しているのは、前記の材料の安全率に対応させれば、構造形の安全率と呼ばれるべきであろう。全体としての系の安全性を示し、例えばケーソンの滑動の安全率  $F_s = 1.2$  と称する類である。この場合、部材については前記の許容応力度により設計する。ケーソンの滑動安全率は次のように定義される。

$$F_s = \frac{\mu W}{P} \geq 1.2 \quad (2)$$

ここに、 $\mu$ ：摩擦係数

$W$ ：ケーソン水中重量

$P$ ：波力

この式を整理し直すと次のように書ける。

$$\mu W = F_s \times P \quad (3)$$

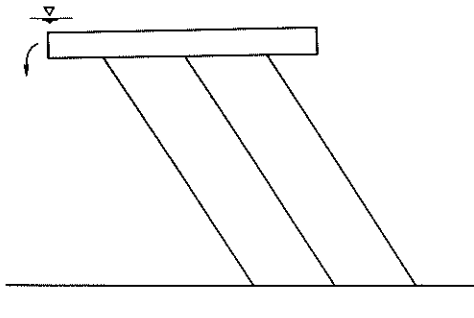
上式の左辺は構造体の抵抗を表し、右辺は作用荷重を示している。安全率  $F_s$  は一方で荷重係数と呼ばれる値であることが分かる。こう書くと理解が直観的にでき、設計荷重の  $F_s$  倍まで構造物が耐えることを示している。しかし上式で  $F_s$  を左辺に移すと

$$\frac{1}{F_s} \mu W = P \quad (4)$$

構造物の抵抗値を下げる抵抗係数とも解釈ができる。実体としては、荷重や構造物の抵抗力の大きさの不確かさを補うべく経験により定められてきた安全率ということになる。この安全率が1を切った時にどうなるかについては不明である。滑動するものと予想されるが、どの程度の被害に成るかについては不明である。

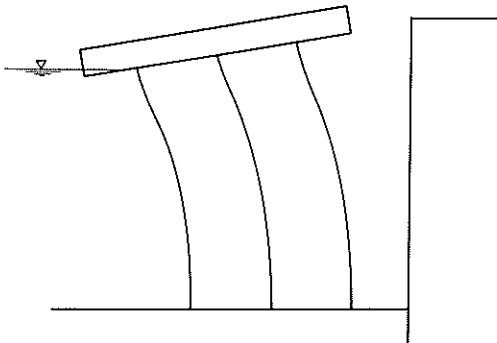
(3) 限界状態設計法

限界状態の概念は、やや新しい。旧来の安全性の指標は実務の積み上げにより有効性は確立されているが、安全性の規準に明確を欠く点がある。限界状態<sup>5)</sup>は以下の三つに大別される。



図—2 終局限界状態

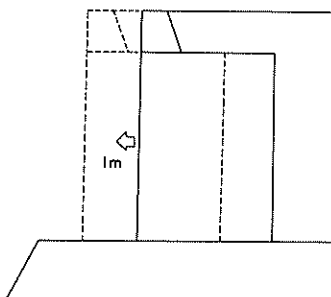
- ① 終局限界状態：構造物または部材が破壊したり安定を失う状態



図—3 使用限界状態

- ② 使用限界状態：構造物または部材が過度のひびわれ、変位、振動等を起こし、正常な使用ができなくなったり耐久性を損なったりする状態
- ③ 疲労限界状態：構造物または部材が、変動荷重用により疲労破壊する状態

限界状態設計法は、このように基準となる限界状態を明らかにして各限界状態の安全性に具体的な意味を持たせている。構造物が機能を果たしていることと破壊とは直接には結びつかない。機能を論じる場合は変形の程度問



図—4 ケーソン移動

題なのである。例えば、法線が20cm程度だ行しても岸壁の使用に支障はなからう。しかし1mになれば不可能であるが、構造物としては破壊しない場合も有る。例えば幅10mの重力式ケーソン岸壁でマウンドに乗っていても破壊という観点からは安定上の問題はない。また使用ができれば修理をすれば使えるのか、それとも再築造を要するのか検討を要するし、安全上の問題からも使用不可になってすぐ破壊するの否かという使用限界状態から終局限界状態までの余裕と挙動に関する情報は価値がある。また、実際施設に要求されることは、機能であるから、使用限界状態がますます大切になる。終局限界状態は安全の担保としての役割を果たす。限界状態設計法は理論的整合性はあるものの港湾関係で現実に実務に耐える数値を決定していくことは、困難を伴うと予想される。こうした考えに基づき、コンクリート欧州委員会とプレストレス国際連合委員会合同で「コンクリート構造物設計施工国際指針」<sup>6)</sup>を発表している。

#### (4) 信頼性理論による方法

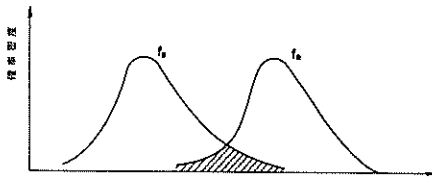
信頼性理論の普及に貢献したのは元コロンビア大学教授 A. M. Freudenthal を挙げることができる。この理論は、確率に基づいて構造物の安全性を議論する方法である。上記の許容応力度法、安全による方法は各施設ごとに安全性の含みが異なり、より合理的な評価が求められるところであるものに対し、信頼性理論による方法は破壊確率に基づいて構造物を設計しようとするから安全性の評価が統一され、また基準も明確であるから、経済的合理性に近づくことと推定される。現在、構造物の安全性を検証する水準は、三つに分けられる。<sup>7)</sup>

- ① 水準Ⅰ：不確定量の特性値および部分安全係数を用いて、構造物の安全性を準確率論的に検証する。例えば、現行のソ連の限界状態設計法および CEB/FIP の限界状態設計法（荷重強度係数設計法）は、水準Ⅰにある。
- ② 水準Ⅱ：不確定量の2次までのモーメント、すなわち、不確定量の期待値および分散を用いて安全性を検証する。期待値および分散は、不確定量の確率分布形が不明でも実験あるいは測定データから計算されるから実用的である。この方法では、構造物の安全性は、破壊確率ではなく、安全性指標を用いて表される。
- ③ 水準Ⅲ：不確定量の確率分布関数を用いて厳密な確率計算を行い、破壊確率を計算し安全性を検証する。この方法は、不確定量の確率分布形が既知でなければならぬこと等により、実用化されていない。

a) 理論の概要

港湾関係では、信頼性理論は設計に用いられることがなかったから、簡単に紹介しておく。安全性の評価として、破壊していない場合は安全であるという一面がある。逆に破壊現象をとらえることは安全性の評価を可能とする。では、構造物の破壊が生じるのはどのような場合かといえば、構造物の抵抗  $R$  より荷重  $S$  が大きい時である。すなわち、

$$R < S \quad (5)$$



図一五 抵抗と荷重の確率密度関数

今、抵抗と荷重の確率分布形状が得られた場合に、構造物の破壊確率を求めてみよう。荷重の大きさが  $S$  と  $S+dS$  の間の値を取る生起確率は  $f_S(S)dS$  である。式(5)より  $S$  より小さな抵抗  $R$  の生起確率は、次のとおりである。

$$\int_0^S f_R(R) dR \quad (6)$$

荷重と抵抗が独立事象だと仮定すると、荷重が  $S \sim S+dS$  の時に破壊する確率は次のとおりである。

$$f_S(S) dS \int_0^S f_R(R) dR \quad (7)$$

荷重  $S$  のすべての場合を尽くすと次のとおり破壊確率が求まる。

$$\begin{aligned} P_f &= P[R < S] = \int_0^\infty f_S(S) \left( \int_0^S f_R(R) dR \right) dS \\ &= \int_0^\infty f_S(S) F_R(S) dS \end{aligned} \quad (8)$$

$f_R$  : 抵抗の確率密度関数

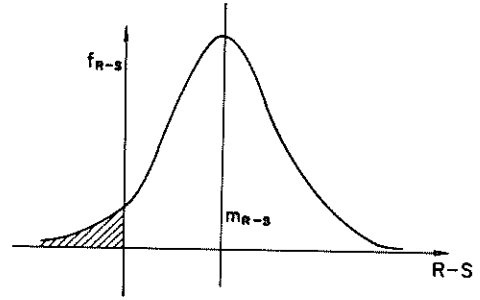
$f_S$  : 荷重の確率密度関数

$P_f$  : 破壊確率

$F_R$  : 抵抗の確率分布関数

直観的には図一五で確率密度関数  $f_R, f_S$  の重なった部分相当が破壊確率の対象となる。

破壊確率を求める他の方法は、安全性の余裕  $Z$  を用いて破壊確率を表すものである。抵抗が荷重より大きければ安全だから、安全性の余裕を次のように定義する。



図一六 抵抗-荷重の確率密度関数

$$Z = R - S \quad (9)$$

式(5)より  $Z < 0$  の場合破壊が生じる。

$$P_f = P[Z < 0] = \int_{-\infty}^0 f_Z(Z) dZ \quad (10)$$

破壊確率は一つの安全性の指標である。確率分布形状が得られない場合にも、平均値と標準偏差を用いて簡便に安全性を評価する方法として、安全性指標  $\beta$  を次のように定義する。

$$\beta = \frac{m_Z}{\sigma_Z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{1}{V_Z} \quad (11)$$

$Z, R, S$  : 式(9)に同じ

$m_Z, m_R, m_S$  : 平均値

$\sigma_Z, \sigma_R, \sigma_S$  : 標準偏差

$V_Z$  : 変動係数

図一六を用いて解説すると、式(11)は  $m_Z = m_R - m_S$  が破壊面  $Z = 0$  から  $\sigma_Z$  の  $\beta$  倍の位置にあることを示している。言わば、 $\beta$  は構造物の安全性の余裕の平均値が破壊面からどの程度離れがあるかを示しているから、一つの安全性の指標となる。

$R, S$  が正規分布するものと仮定すると、 $Z$  も正規分布であり、図一六の  $Z < 0$  の部分の面積に相当する破壊確率は次のように表せる。

$$P_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (12)$$

$\Phi$  : 標準正規分布関数

信頼性理論による場合には、式(12)を満足する  $m_R$  が得られるように断面諸元を設計する。

設計に当たっては、 $\beta$  が指定されてる場合は、式(11)を整理した次の関係を用いる。

$$m_R \geq m_S + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \quad (13)$$

この場合は、実用的には  $R$  と  $S$  の確率分布形状が不明でも平均値と標準偏差が得られれば良い。また、破壊確率



が与えられて設計する場合は、確率分布形状が必要である。ここでは上記同様に正規分布を仮定すれば、 $\beta$ は次のとおり得られ、この $\beta$ を用いて設計する。

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_F) \quad (14)$$

米国での既存施設を各種の荷重の組合せ、各種の限界状態に対し現行の設計基準で $\beta$ を計算し検討した結果では $\beta = 2.5 \sim 3.5$ 程度である。

### b) 部分安全係数の導入

部分安全係数は、耳慣れない言葉である。通常、港湾関係では一つの安全率を使って安定計算をしている。しかし、コンクリート構造物の設計においては、鉄筋とコンクリートに対しそれぞれ異なった許容応力度を使用している。この考え方は、部分安全係数と結びつく。

荷重が $n$ 個作用する場合は、設計の規準式として前記理論から、次の関係式が得られる。

$$m_R \geq (m_{S1} + m_{S2} + \dots + m_{Sn}) + \beta \sqrt{\sigma_R^2 + (\sigma_{S1}^2 + \sigma_{S2}^2 + \sigma_{Sn}^2)} \quad (15)$$

ここで根号部分に線形近似を行う。

$$m_R \geq (m_{S1} + \dots + m_{Sn}) + \alpha\beta\{\sigma_R + \alpha'(\sigma_{S1} + \dots + \sigma_{Sn})\} \quad (16)$$

$\alpha, \alpha'$ : 線形化係数

また、 $\sigma_R = m_R V_R$ ,  $\sigma_{Si} = m_{Si} V_{Si}$  の関係を用いて整理する。

$$(1 - \alpha\beta V_R)m_R \geq (1 + \alpha\alpha'\beta V_{S1})m_{S1} + \dots + (1 + \alpha\alpha'\beta V_{Sn})m_{Sn} \quad (17)$$

ここで、次の係数を定める。

$$\phi = (1 - \alpha\beta V_R) \frac{m_R}{R_n} \quad (18)$$

$$r_i = (1 + \alpha\alpha'\beta V_{Si}) \frac{m_{Si}}{S_{ni}} \quad (19)$$

$\phi$ は抵抗係数、 $r_i$ は荷重係数と呼ばれる部分安全係数である。以上の係数を用いると、式(17)は次のように書き改められる。

$$\phi R_n \geq \sum_{i=1}^n r_i S_{ni} \quad (20)$$

$R_n$ : 抵抗の特性値

$S_n$ : 荷重の特性値

式(20)は式(13)の一般式であり、設計に際しては式(20)を満足する $R_n$ を求める。抵抗の特性値は、この値を下回る確率が5%、荷重の特性値は、この値を上回る確率が5%の値が取られることが多い。その理由は、実験あるいは観測、計測等の規模からの信頼性の限界により定まっており、5%が適切であるという議論ではない。<sup>9)</sup>

基本的には、抵抗、荷重の生起確率に基づいて部分安全係数を定める方法であり、また、各原因ごとに部分安全係数を分担する。例えば、自重は波力等の外力に比べて格段に変化が小さい、つまり不確実性が少ない。こうした場合に、自重と波力に同じ安全係数を分担させるよりは、不確実性の大小に応じて、自重には小さな部分安全率を、波力には大きな部分安全率を分担させることは

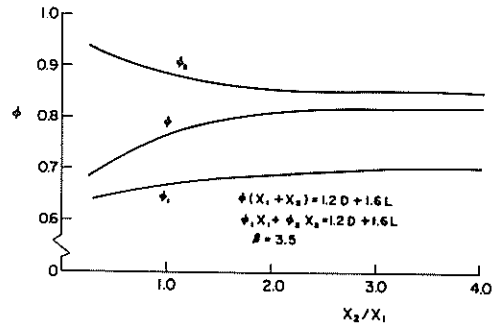


図-7 (a) 抵抗係数

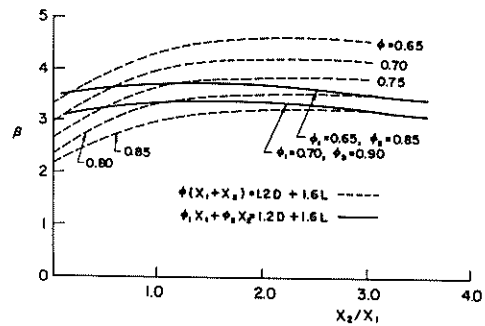


図-7 (b) 信頼性指標

合理的である。また、部分安全係数を用いた方が、一つの安全率を用いるより設計関連変数の変化に対する安全性指標 $\beta$ の変化が小さいことが報告されている<sup>10)</sup>これは、設計関連変数の変化に対し構造物の破壊確率の変化が少ないことを示している。

部分安全係数を用いた基準は既に、北海の石油掘削リグ等の設計に実用化されている。前記の既存の限界状態設計法も部分安全係数によっている。

### c) 安全性の評価

構造物の安全性を破壊確率に基づき評価し、確率の考えを入れて設計を実施することは合理的と判断される。しかし、理論としては良いが、実務上困難な問題を提起する。すなわち諸係数 $\beta, \phi, r_i$ 等の具体的数値をどのように設定すべきかである。理論どおりに確率分布形状、確率密度関数が求められれば良いが、現実にはデータがない。そこで平均値、変動係数等を持ち出しているが、これらの算定さえも容易ではない。構造物の安全性の比

較であれば、正規分布を仮定することにより相対比較の用に供せるが、絶対値の追求には多大の労力を要する。工学的には安全性指標に意味があり、破壊確率は目安を与えると現在段階では考えて良いと思われる。実際に  $\beta$  を決めるに際しては、既存の経過が良好な構造物を調べて参考にし、既存の設計法から得られる断面諸元と信頼性理論から求められる断面諸元があまり離れないようにしている。これは、設計に用いる  $\beta$  を独立に  $\beta = 3$  と設定することが良いか悪いかは論じられなくて、具体事例に結びつけて言わば例証する必要があるからである。信頼性理論による設計の結果は、現行設計法に準ずる成果であるなら手間が多いだけになるが、考え方としては整理されるし、現行設計法における不均衡の是正の方向で進むと思われる。将来、十分な資料が蓄積されて設計関連変数の確率が明らかになってくれば、理論どおりの扱いが可能である。しかしながら、既存の構造型式については、長い経験により定められてきた設計法によって構築されてきており、かつ、実際の構造物の挙動についても特段の過大であるとか、すぐ破壊することもなく経過しているから、将来に設計法の変化が生じても経済性の大幅な向上は望めないが、10%程度の範囲内では可能性があると推量される。

### 3. 安全性指標の算定理論

具体的に安全性指標を計算する方法は以下のとおりである。

前章では、安全性指標を破壊状態に対して検討している。ここでも理解を進めるため、限界状態の一つである終局限界状態に当たる破壊状態について論を進める。ただし、これを他の限界状態と読み換えれば、同様の手続で対象の限界状態に対応する安全性指標が計算できる。

定式化に当たり、解析的に検討を進めるため、まず、各種の設計関連変数  $x_i$  のそれぞれを変数とする  $n$  次元空間（設計変数空間と呼ぶことにする）を定める。ある設計変数の組合せにより構造物が破壊した場合、これら変数の組の集合を破壊面とする。

破壊面  $g$  が変数  $x_i$  の関数で表されるものとする。

$$g(\mathbb{X}) = g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad (21)$$

変数  $x_i$  の  $n$  次元空間において、構造物の非破壊領域を次式で定義する。

$$g(\mathbb{X}) \geq 0 \quad (22)$$

破壊確率  $P_f$  は、破壊領域に変数  $\mathbb{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  が存在する確率である。

$$P_f = P\{g(\mathbb{X}) < 0\} \quad (23)$$

上記の基本的な考え方に基づき、安全性指標の計算法は大別して二方法である。

#### (1) 原変数を用いる方法

一般には破壊面  $g$  は非線形であるから、計算を実行可能にするため、破壊面  $g$  を展開点  $\mathbb{X}_L$  に関して Taylor 展開して線形化し、超平面に置き換える。

$$g(\mathbb{X}) = g(\mathbb{X}_L) + \sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L} (x_i - x_i^L) \quad (24)$$

$$\mathbb{X}_L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_n^L) \quad (25)$$

ここでは 2 次以上の高次の項は無視している。多次元空間であるため直観的理解が困難であるが、三次元で考えれば点  $\mathbb{X}_L$  での接平面を  $g$  は表しており、破壊面を接平面で近似したことになり、点  $\mathbb{X}_L$  に近いほど近似精度は高い。関数  $g$  の平均値  $m_g$  は、 $x_i$  の平均値を  $\bar{x}_i$  で表すと次のとおりである。

$$\begin{aligned} m_g &= E\{g(\mathbb{X})\} \\ &= g(\mathbb{X}_L) + \sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L} (E\{x_i\} - x_i^L) \\ &= g(\mathbb{X}_L) + \sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L} (\bar{x}_i - x_i^L) \end{aligned} \quad (26)$$

関数  $g$  の分散  $V_g$  は各  $x_i$  が互に独立である場合には次のとおりである。

$$\begin{aligned} V_g &= V\{g(\mathbb{X})\} \\ &= \sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L}^2 V\{x_i\} \\ &= \sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L}^2 \sigma_{x_i}^2 \end{aligned} \quad (27)$$

ここに、

$$\sigma_{x_i} = S\{x_i\} \quad (28)$$

関数  $g$  の標準偏差  $\sigma_g$  は次のとおりである。

$$\sigma_g = S\{g(\mathbb{X})\} = \sqrt{\sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L}^2 \sigma_{x_i}^2} \quad (29)$$

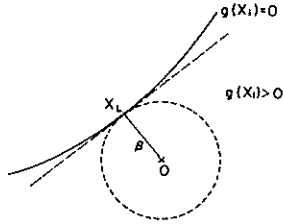
以上の破壊面関数  $g(\mathbb{X})$  を使うと安全性指標  $\beta$  はその定義から次のように表示される。

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{m_g}{\sigma_g} \\ &= \frac{g(\mathbb{X}_L) + \sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L} (\bar{x}_i - x_i^L)}{\sqrt{\sum_1^n \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{\mathbb{X}_L}^2 \sigma_{x_i}^2}} \end{aligned} \quad (30)$$

表記から明らかなように、 $\beta$ の値は線形化の展開点 $X_L$ の座標の値に影響される。 $X_L$ は次の拘束条件付の最小化問題

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta = \min \{ \beta(X_L) \} \end{array} \right. \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} g(X_L) = 0 \end{array} \right. \quad (32)$$



図一八  $\beta$ の最小値

を解くことはより求められるべきものである。すなわち、安全性指標 $\beta$ が最小とは、破壊確率が最大、すなわち構造物にとって最も危険な場合を表示するからである。このように $\beta$ の最小値を求めることにより構造物の安全性の評価ができる。上記を数式で表現すると、破壊確率 $P_f$ が $\beta$ の関数であれば、次のとおりである。

$$P_f = \max \{ P_f(\beta) \} = P_f(\beta \min) \quad (33)$$

$g(X)$ の分布関数 $\psi$ が明らかな場合は、 $\beta$ から破壊確率 $P_f$ が求まる。

$$P_f = \psi(-\beta) \quad (34)$$

## (2) 正規化変数を用いる方法

安全性指標を計算する第二の方法は以下のとおりである。

変数 $x_i$ を正規化した変数 $U_i$ に置き換えると破壊面は $g(X)$ から $G(\Psi)$ に変換される。ここに、

$$U_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\sigma_{xi}} \quad (35)$$

$$G(\Psi) = 0 \quad (36)$$

安全性指標は同様に次のように定義される。

$$\beta = \frac{G(\Psi_L) + \sum_1^n \left[ \frac{\partial G}{\partial U_i} \right]_{\Psi_L} (\bar{U}_i - U_i^L)}{\sqrt{\sum_1^n \left[ \frac{\partial G}{\partial U_i} \right]_{\Psi_L}^2 \sigma_{ui}^2}} \quad (37)$$

正規化変数 $U_i$ の性質から、平均値0、標準偏差1である。すなわち、

$$\left. \begin{array}{l} \bar{U}_i = 0 \\ \sigma_{ui} = 1 \end{array} \right\} \quad (38)$$

式(38)を $\beta$ の関係式(37)に代入する。

$$\beta = \frac{G(\Psi_L) - \sum_1^n \left[ \frac{\partial G}{\partial U_i} \right]_{\Psi_L} U_i^L}{\sqrt{\sum_1^n \left[ \frac{\partial G}{\partial U_i} \right]_{\Psi_L}^2}} \quad (39)$$

ここで以下の置換をする。

$$n_i = \frac{\left[ \frac{\partial G}{\partial U_i} \right]_{\Psi_L}}{\sqrt{\sum_1^n \left[ \frac{\partial G}{\partial U_i} \right]_{\Psi_L}^2}} \quad (40)$$

$$U_i^L = -\beta n_i \quad (41)$$

式(41)は一つの仮定であるから、その妥当性を検討するため、式(40)、(41)を式(39)の右辺に代入すると式(42)の関係が得られる。ただし、 $\Psi_L$ は破壊曲面上にある、すなわち $G(\Psi_L) = 0$ とする。

$$\text{式(39)の右辺} : \sum \beta n_i^2 = \beta \sum n_i^2 \quad (42)$$

式(40)の $n_i$ の定義より次の関係が得られる。

$$\sum_1^n n_i^2 = 1 \quad (43)$$

したがって、

$$\beta \sum n_i^2 = \beta \quad (44)$$

すなわち、式(41)を仮定しても、式(39)の左辺と右辺の等号性は損なわれず、式(41)の $u_i^L$ の置換が妥当であることが証明される。そこで、式(41)の両辺を自乗し、 $i$ についての和を取るにより次の結果が得られる。

$$\sum_1^n (U_i^L)^2 = \sum_1^n \beta^2 n_i^2 = \beta^2 \sum_1^n n_i^2 = \beta^2 \quad (45)$$

$$\therefore \beta = \sqrt{\sum_1^n (U_i^L)^2} \quad (46)$$

これは、Lind-HasoferのMinimum Distance Methodと呼ばれる方法である。この方法では、正規化した座標軸上の破壊面上の点 $\Psi_L$ と座標軸原点との距離が安全性指標を与える。 $n_i$ は点 $\Psi_L$ の方向余弦であり、 $U_i^L$ は座標軸上への射影距離であるので、図形的理解が容易である。第一の方法では、破壊面が線形化展開する点 $X_L$ において微分可能でなければならないが、これは一般に保証される条件ではない。第二の方法では、微分の拘束がないから、より一般的である。

この第二の方法による安全性指標の求め方も、次のような拘束条件付の最小化問題となる。

$$\begin{cases} \beta = \min \left\{ \sqrt{\sum_1^n (U_i)^2} \right\} \\ G(\psi) = 0 \end{cases} \quad (47)$$

(3) その他、ベクトルによる表示<sup>12)</sup>

安全性指標の別な表現を試み理解を助けることとする。2)の場合と同様の条件設定とし、座標変換式(35)により正規化された空間を考える。式(40)の $n_i$ を用い、接平面に垂直な方向余弦ベクトルは次のようになる。

$$m = \{-n_i\}, \quad \|m\| = \sqrt{\sum_1^n n_i^2} = 1 \quad (48)$$

座標軸原点から接平面の展開点へのベクトルを次のとおりとする。

$$\psi_L = \{U_i^L\} \quad (49)$$

式(39)をベクトル表示に直すと次のようになる。

$$\begin{aligned} \beta &= m \cdot \psi_L = \|m\| \times \|\psi_L\| \cos \theta_L \\ &= \|\psi_L\| \cos \theta_L \end{aligned} \quad (50)$$

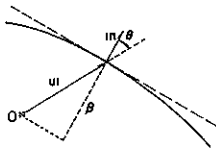


図-9 ベクトル表示

$\beta$ が $m$ と $\psi_L$ の内積で表され、幾何的理解が容易となる。 $\|\psi_L\|$ は正規化した座標系において、破壊面を超平面に転開し近似する転開点である接点から座標軸原点までの距離である。 $\beta$ は座標軸原点から超平面までの距離を表し一般には $\|\psi_L\|$ と一致しないが、 $\psi$ が超平面に垂直、すなわち $\psi \parallel m$ の場合に $\beta$ が最小となり $\beta = \|\psi\|$ となる。

#### (4) 安全性指標の最小化法

いずれの方法を用いるにしても、構造物の最も危険な状態を求めるためには最小化問題、すなわち一つの最適化問題を解かなければならない。この場合は、最適化問題に常に付随する困難が計算上発生する。一般に、破壊面は複雑な形状であるため最小値が局地的な極値となる可能性が高く、全体における極値を求めるのはかなり困難である。しかしながら、安全性指標の最小化問題に対しては、各種の最適化問題の解法が適用できる。一例を挙げれば、制約のある最小化問題を制約のない最小化問

題に変換して解くことにより、元の制約条件付最適化問題の答を得るという無制約最小化反復法(SUMT)<sup>13)</sup>がある。

$$Q(X, \Gamma_K) = q(X) - \Gamma_K \sum_1^n \frac{1}{h_i(X)} \quad (51)$$

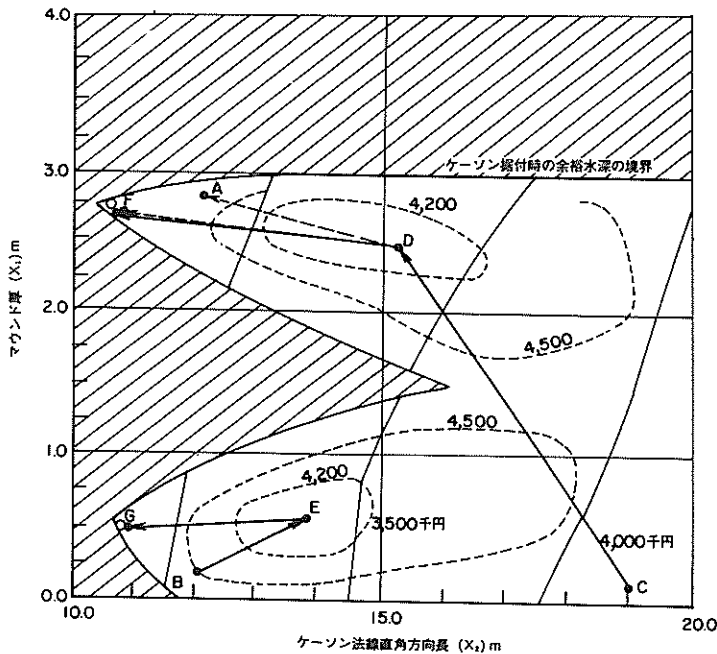
$Q(X, \Gamma_K)$  : 新しい目的関数  
 $q(X)$  : 目的関数  
 $\Gamma_K$  : ペナルティ係数  
 $h_i(X)$  : 制約条件

この方法をケーソンの設計例で以下に説明する。ここに示すのは、安全性指標では無いけれども手順は同様である。式(51)では、最小化する目的関数に制約条件を逆数にして加えた新しい目的関数を作成する。新しい関数は制約条件の部分も含んでいるが、形としては制約条件を持たない。この新しい関数は設計変数空間で定義され、制約条件を満足する点の近傍では0に近い値をとる制約条件の逆数を含むため、大きな値をとる。すなわち壁ができることになり、制約条件を超えることなく目的関数の最小化が図れることになる。制約条件は、例えば滑動に対する安定条件ならば次のとおりである。

$$h_i(X) = 1.2 - F_s(X) \leq 0 \quad (52)$$

$F_s(X)$ : 滑動に対する安全率

目的関数の最小値は、ペナルティ係数を減少させ、新しい目的関数 $Q(X, \Gamma_K)$ の最小値を $q(X)$ の最小値に近づけることにより求める。新しい目的関数 $Q(X, \Gamma_K)$ は、複雑な曲面を形成するから、局地的な最小値を得やすい、それを避けて全体的な最小値を得るべく、ペナルティ係数 $\Gamma_K$ の大きな値から始めて、曲面の凹凸を少なくして全体の傾向を捕え、順次ペナルティ係数を小さくする手段を用いるが、初期値の設定によっては局地的な最小値に収束することがある。最小値は、制約条件の曲面上で得られ、この方法は、制約条件を満足する、すなわち、少なくとも安全な設計諸元を提供する空間から制約条件の曲面に近づくから、SUMTの内点法<sup>14)</sup>と称される。



図一10 初期値の設定と解の収束状況

図一10は、ケーソン工費を目的関数とし、設計変数を変えることにより、最小化を図っている例である。図では二次元に表現できるよう2変数に対して表示されている。この図では初期値のとり方により異なる局地的な最小値が得られることを示している。矢線は各ペナルティ係数の値による解の移動を示している。B→E→GとC→D→Fに見られるように、B、Cと異なる初期値はG、Fの異なる局地的な最小値に達する。全体的な最小値を得るには、いくつかの初期値を試行することが良い場合もある。変数の領域の目安が見つかる場合は、領域を規則的に分割し初期値を設定する方法等により、全体の最小値へ近づける方法を用いることができる。

#### 4. 防波堤の滑動安定性への適用

##### 4.1 概説

防波堤の場合、転倒より滑動が危険になることが多いので、滑動について信頼性理論を適用して、安全性指標の意味するところに光を当てて見ることにする。

計算は、前章の第一の方法による。現行の防波堤の滑動安全率式(2)を整理し破壊面  $g$  を次のように定める。

$$g = \mu W - F_s P = 0 \quad (53)$$

本文では、独立変数として摩擦係数  $\mu$ 、ケーソン水中重量  $W$ 、波高  $H$ 、潮位  $\zeta$  の4変数とし、以下ではこれらを設計変数と呼ぶことにする。周期  $T$  は波高と強い相関

性を持つとして独立変数から省いた。波高と周期の組は、設計上認められる範囲内で設定している。ここで変数は、ランダムな信頼性理論の対象となる変数であり、他の設計関連変数は定数変数として扱っているから、本文の主眼ではないので特に言及しない。

$$g = g(\mu, W, H, \zeta) = g(x_1, x_2, x_3, x_4) \quad (54)$$

破壊面は4変数の関数として定められる。安全性指標は前章により、次のとおりである。

$$\beta = \frac{g(X_L) + \sum_{i=1}^4 \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{x_L} (\bar{x}_i - x_i^L)}{\sqrt{\sum_{i=1}^4 \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{x_L}^2 \sigma_{x_i}^2}} \quad (55)$$

安全性指標の挙動は未知だから、モデル防波堤で設計関連変数を変化させた場合の感度分析を通して検討を試みる。

##### 4.2 計算手順

安全性指標のイメージをつかむために、慣用されてきている従来の安全率と対比して行くこととする。

波圧公式は、従来の広井式、サンフルー+部分砕波(以後黒田式と呼ぶ)、及び合田式を用い比較検討を行う。

モデルケーソンによる計算では、水深に応じて広井式あるいは黒田式を用いて安全率1.2を満足するようにケーソン断面を定め、決定断面に対し合田式を用いて安全率を計算し、その値で安全性を評価する。安全性指標の

検討においては、一つには、上記の方法で定めたケーソン断面を対象とする。これは、所定の安全率を持った状態に対する安全性指標の計算であり、一つの使用限界状態に対する安全性指標である。もう一つは、安全率が1になるような終局限界状態のケーソン断面を従来の波圧式および合田式でそれぞれ計算し、その断面を対象として安全性指標を計算する方法である。ただし、本文では、前記の従来式で安全率1.2を満足するように定めたケーソン断面を対象とし、この断面の安全率が1となる波高を、従来式と合田式で求めて、終局限界状態の安全性指標を計算する。

構造物の安全性指標を求める場合、安全性の尺度だから、最小値を用いることが望まれる。計算開始時に一つの設計変数を変えて安全性指標を計算した場合、最小化により得られる解の設計変数の組を構成する他の設計変数も一般には、変化すると考えられ、1設計変数の効果を計算結果からとり出すことは困難である。各設計変数が安全性指標に与える影響が明らかになるよう、以下のモデル計算では、設計変数は特定値とし安全性指標は最小化されていない。

計算式等の詳細は、付録1による。

### 4.3 計算条件

#### (1) 基本的条件

設計関連変数を含めた計算モデルの基本的条件は次のとおりである。<sup>15)</sup>

- ① 換算沖波波高： $H'_0 = 7\text{ m}$
- ② 周 期： $T = 11\text{ s}$
- ③ 波 向： $\theta = 0^\circ$
- ④ 波高の再現期間：50年
- ⑤ 波 圧 式：広井式，黒田式，合田式
- ⑥ 基準面の潮位： $L.W.L. \pm 0\text{ m}$
- ⑦ 潮 差：1.5 m
- ⑧ 基準面下の水深： $-4.5\text{ m} \sim -30.5\text{ m}$
- ⑨ 海 底 勾 配： $i = 1/100$
- ⑩ マウンド厚： $D = 3\text{ m}$

⑪ ケーソン諸元：図-11に示すとおりでケーソン幅  $B$  は安定計算によって定める。

⑫ 安全性評価：安全率，安全性指標

#### (2) 設計変数の平均値と標準偏差の設定

式(55)の計算では、 $X = (\mu, W, H, \zeta)$ の各設計変数の平均値  $\bar{x}_i$  と標準偏差  $\sigma_{xi}$  のデータを必要とする。したがってケーソン防波堤の設計事例を参照し、モデル防波堤の設計変数の平均値および標準偏差を次のように設定する。

##### ① 摩擦係数 $\mu$

防波堤が滑動するかしないか、あるいは10cm程度の許容できる滑動を対象とし、一般の設計値0.6より下げて次のようにする。

平均値 0.57

標準偏差 0.05

##### ② ケーソンの重量 $W$

ケーソン重量は確定値と考えられやすいが、実際には型枠の変形や中詰砂の単位体積重量変化などのためにある程度変動する。まず、ケーソン本体については、ケーソンの空中重量の割合で表現し、型枠の膨らみで体積が増し重量が増えるとする。

平均値  $1.05 \times \text{標準重量}$

標準偏差  $0.02 \times \text{標準重量}$

中詰砂 平均値  $1.8\text{ t/m}^3$

標準偏差  $0.1\text{ t/m}^3$

ケーソンと中詰砂の平均値と標準偏差から、ケーソンに中詰砂が入り一体となった平均値と標準偏差を求める。便宜的に、ケーソンは25%のコンクリートと75%の中詰砂からできているとする。したがって中詰後のケーソンは次の単位体積重量を持つことになる。

$$E[W] = 0.25 \times (2.45 \times 1.05) + 0.75 \times 1.8 = 1.996$$

計算上予定される単位体積重量は、次のとおりである。

$$E[W'] = 0.25 \times 2.45 + 0.75 \times 1.8 = 1.9625$$

$$W_f = E[W]/E[W'] = 1.02$$

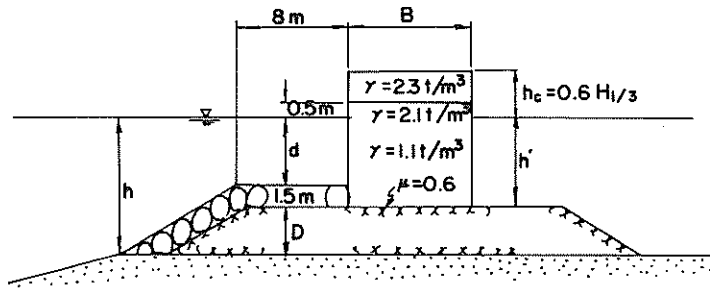


図-11 ケーソン式混成堤のモデル

標準偏差も同様にする。

$$V[W] = 0.25^2 \times (2.45 \times 0.02)^2 + 0.75^2 \times 0.1^2$$

$$= 0.076095^2$$

$$\sigma_r = \sqrt{V[W]}/E[W'] = 0.04$$

中詰を終了し据付しているケーソンは計算上の重量に対し次の割合の平均値および標準偏差を持っている。ケーソンの大きさによりコンクリートと中詰砂の割合は変化するが、計算の便宜上から平均値と標準偏差の各割合は一定とする。図-11は、上記の場合よりコンクリートの割合が少し多いけれども、比較検討であるから一定値とすれば目的にそっている。

平均値 1.02 × 標準重量  
標準偏差 0.04 標準重量

なお、標準重量は安全性指標の計算対象とする諸条件に応じ、式(53)を満足させる値として定められるものである。

### ③ 潮位

高潮による偏差は考慮せず、常時の潮位変動を対象とし、簡単に正弦関数で近似をする。

片振幅に対する割合で表現する。

潮 差 2 × 片振幅  
平均値 1 × 片振幅  
標準偏差  $1/\sqrt{2}$  × 片振幅

### ④ 波高 H

波は、50年確率波高等の長年にわたる確率分布が対象となるため極値分布を用いる必要がある。一般に Extreme type I 型分布<sup>16)</sup>と呼ばれ、また、ガンベル分布としてよく確率波高計算に用いられる分布形状を採用する。

$$\text{分布関数 } F_H(H) = \exp\{-\exp\{-\lambda(H-\nu)\}\} \quad (56)$$

$$\text{確率密度関数 } f_H(H) = \lambda \exp\{-\lambda(H-\nu) - \exp\{-\lambda(H-\nu)\}\} \quad (57)$$

$$\text{平均値 } m_H \approx \nu + 0.577/\lambda \quad (58)$$

$$\text{標準偏差 } \sigma_H = \pi/(\sqrt{6}\lambda) \approx 1.2825/\lambda \quad (59)$$

$$\text{モード B } f_H(\nu) = \max\{f_H(H)\} \quad (60)$$

この分布を用いる場合、定数  $\lambda, \nu$  は分布形に適合するように定める。

波については、次のように考える。

通常の防波堤設置水深を包含すると考えられる -30 m 程度まで水深を変化させているため、堤前波は水深ごと

に変化するから、水深に左右されない換算沖波を波高の指標とし設計関連変数としている。ケーソンの堤体を計算する場合、換算沖波から浅水変形あるいは砕波変形により堤前波を求めている。広井式と黒田式に対しては有義波高、合田式に対しては最高波高を使用している。

本文での波高に関する計算手順は以下のとおりである。

- i) 防波堤の耐用年数を50年とし、再現期間50年の波高を設計波高とする。
- ii) 再現期間50年の換算沖波波高が浅水変形、砕波変形を経て各水深で生じる最高波と有義波を再現期間50年の波高とする。
- iii) ii) の各水深の波高に対し、観測値等を参考にし、再現期間1年の波高を仮に設定する。
- iv) ii) と iii) の波高を式(56)に代入すると、連立方程式から  $\lambda, \nu$  が求まる。
- v) iv) の  $\lambda, \nu$  を式(58)、式(59)に代入し、平均値と標準偏差を求める。
- vi) 上記より定まる分布は全時系列に対応しており、これにより求まる安全性指標は、いわば耐用年数間の安全性を示すと考えられる。再現期間50年の波高の不確実性のみに注目した分布ではない。全波高の生起確率を含んでいる。
- vii) 具体的数字を表-1に示している。

表-1 波高分布系数表

$$H_0 = 7\text{m} \quad T = 11\text{s}$$

h	$H_{1/3}$				$H_{\max}$			
	50年	1年	$\nu$	$\lambda$	50年	1年	$\nu$	$\lambda$
m	m	m			m	m		
- 24.5	6.42	3.13	4.056	1.652	11.55	6.83	8.154	1.149
- 16.5	6.44	3.14	4.070	1.646	11.55	6.83	8.154	1.149
- 8.5	5.31	2.62	3.377	2.019	7.04	3.45	4.457	1.514

### 4.4 安全率レベルの安全性指標

構造物に対し各種の限界状態が設定でき、それぞれに対応して設計変数空間において限界状態面が定まり、限界状態面上では、限界状態を規定する拘束条件が満足される。ここではケーソン防波堤の滑動安全率が1.2であるという一つの使用限界状態を規定する。そうするとこの状態に相応して設計変数空間に定まる限界状態面が、前章での安全性指標の計算手順の中で終局限界状態における破壊面に相当する。この安全率1.2の限界状態面に対する安全性指標を称して、本文では安全率レベルの安全性指標としている。以下本節においては各設計変数を変化させて、安全性指標の特性を調べる。

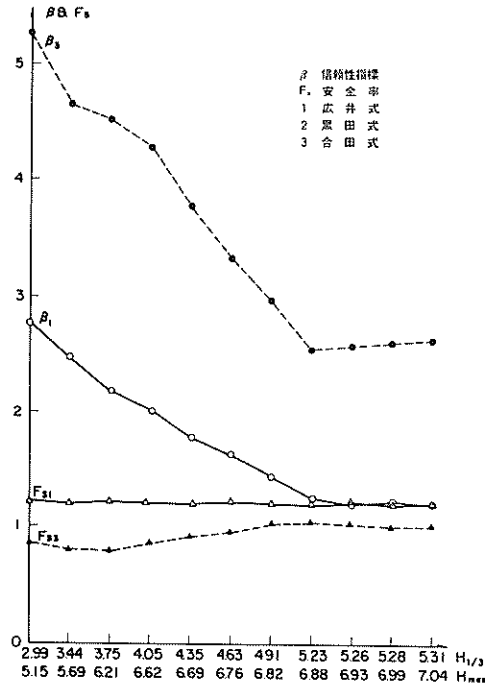
(1) 波高

主設計変数である波高が安全性指標に与える効果を調べる。

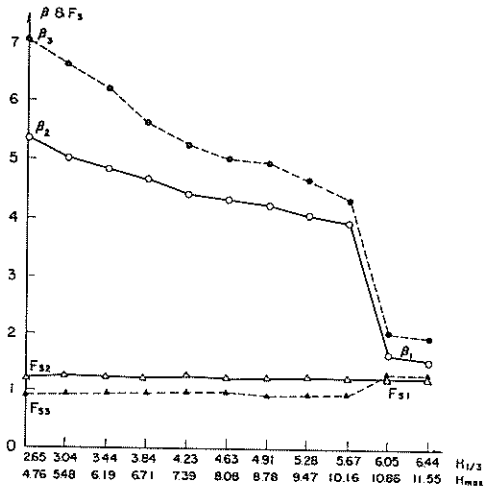
a) 一定水深における波高展開点変化の効果(図-12) 図中の記号を解説する。

$\beta_i$  安全性指標

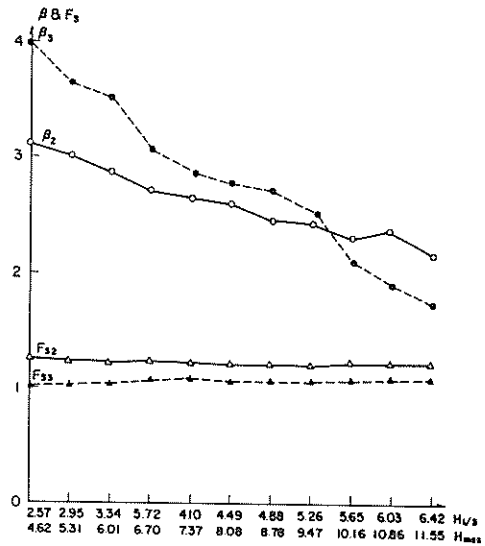
$F_{si}$  安全率



(a)  $h = -8.5$  m



(b)  $h = -16.5$  m



(c)  $h = -24.5$  m

図-12  $H_L \rightarrow W_L$  波とケーソン重量の展開点の変化

ただし、添字<sub>i</sub>は波圧計算式を示し、1~3はそれぞれ広井式、黒田式、および合田式に対応する。

なお、安全性指標はその値が大きいほど安全の度合いが高いことを表すけれども、前述のように今のところ、数値としてどこまでが安全の許容限界であるか等については定まっていない。

① 計算の目的

i) 他の条件はすべて固定して、波高の展開点の変化が安全率と安全性指標に与える効果を調べている。この作業は、当初の設計波高以外の波高のときに安全性指標の最小値が出現しないか否かを確かめる目的を持っている。安全性指標の最小化過程では全設計変数の平均値と標準偏差を固定し、展開点を変化させることになるが、ここでは波高とケーソン重量をとり出して示している。

ii) 安全率と安全性指標は内容が異なるが、安全性の評価法の一つとして慣れ親しんでいる安全率を併記し、安全性指標の参考にしている。

② 計算の前提

i) 計算条件は 4.3 (1) 基本的条件、(2) 平均値と標準偏差、を用いる。波高とケーソン重量の平均値と標準偏差を各水深ごとにあらかじめ固定する。

ii) 波高については、換算沖波  $H_0 = 7$  m に対する  $-4.5 \sim -30.5$  m の間の各水深の最大波高と有義波を求め、それぞれに対して、4.3 (2) ④ を用いて平均値  $m_H$  と標準偏差  $\sigma_H$  を定める。この値は波高の展開点を変えても一定とする。



iii) ケーソン重量については、 $H'_0=7\text{m}$  に対応する各水深の有義波に対し、広井式あるいは黒田式（以後従来式と呼ぶ）により安全率 1.2 を用いて式(5)を満足するように求め、その値を計算上の標準重量とし 4.3 (2) を用いて平均値  $m_w$  および標準偏差  $\sigma_w$  を定める。これらの値も一定値とし扱っている。

iv) 式(5)中の展開点  $X_L$  の値が安全性指標に与える効果を調べるために、換算沖波波高を変化させる。すなわち  $H'_0=7\text{m}$  からその 4 割までを 10 等分して得られた換算沖波波高を用い、各水深の最大波高と有義波高を計算し、それを波高の展開点の値  $H_L$  とし、他の計算条件は 4.3 の値を用いて式(5)を満足するケーソン重量を計算し、それをケーソン重量の展開点  $W_L$  としている。

v) 摩擦係数の展開点は  $\mu_L = 0.6$  を用いる。  
潮位の展開点は  $\zeta_L = 0$  を用いる。

vi) 安全率は iv) の波高とケーソン重量の展開点の値を用いて計算している。波圧式に合田式を用いた安全率は、従来式により安全率 1.2 で定めたケーソン重量に対して計算している。

### ③ 計算の結果

i) 図-12 (a), (b), (c) は水深別に、換算沖波波高が変化した場合、各最高波高と有義波高の展開点を横軸にとり、縦軸に安全率と安全性指標の値をとっている。水深としては、 $-4.5 \sim -30.5$  の中から  $-8.5\text{m}$ ,  $-16.5\text{m}$ , および  $-24.5\text{m}$  の場合を示している。

ii) 波圧式の相違により安全率が異なると同様に、安全性指標も波圧式により異なった値をとる。

iii) 傾向として波高の展開点  $H_L$  が大きくなるに従って安全性指標  $\beta$  は小さくなる。

iv) 従来式的安全率がわずかに変動しているのは、安全率 1.2 の堤体を計算し、堤体幅を 10cm 単位で丸めているためである。

v) 従来式的安全率 1.2 を満足する断面を対象としているため、合田式的安全率は必ずしも 1.2 ではない。その変動している安全率の値を用いて安全率レベルの限界状態面に対し安全性指標を計算している。そのため、従来式的安全性指標はそれぞれほぼ同一の基準値の安全率レベルの限界状態面で比較されているが、合田式的安全性指標の値に安全率の相違の効果も含まれている。

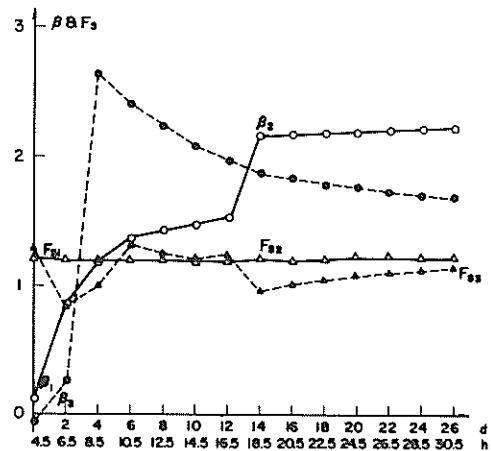
vi) 砕波領域では合田式の波圧が大きいいため安全率は、従来式より小さいが、しかし波圧が水深増に対して減少する範囲に  $-8.5\text{m}$  はあるため、安全性指標が

大きくなっている。

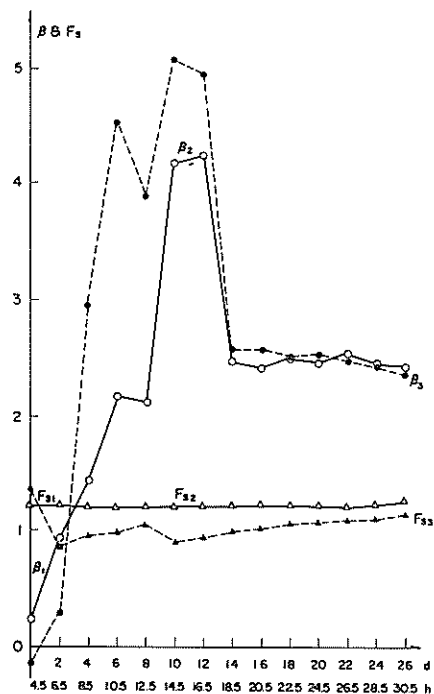
b) 一定波高展開点における水深変化の効果(図-13)

#### ① 計算の目的

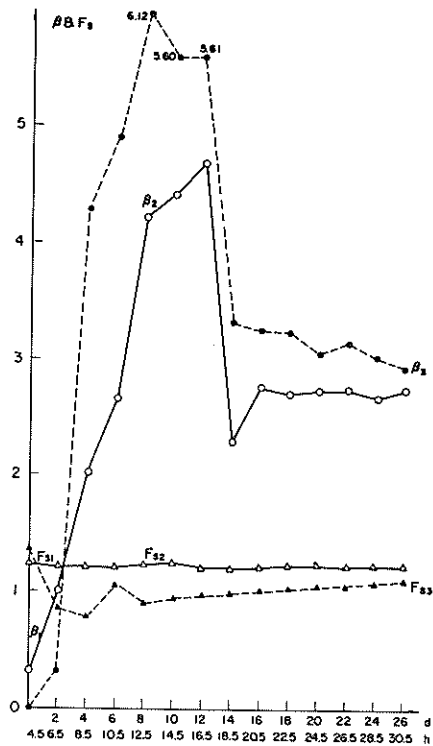
一定波高展開点における水深変化の安全性指標に与える効果を調べるため、図-12 で用いた計算結果を整理し直した。



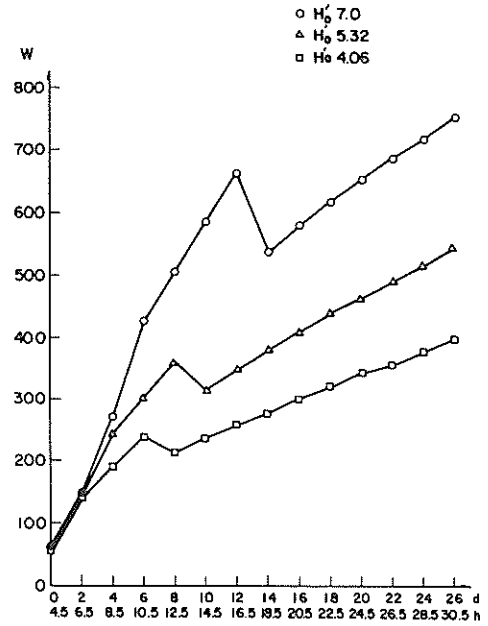
(a)  $H'_0 = 7\text{m}$



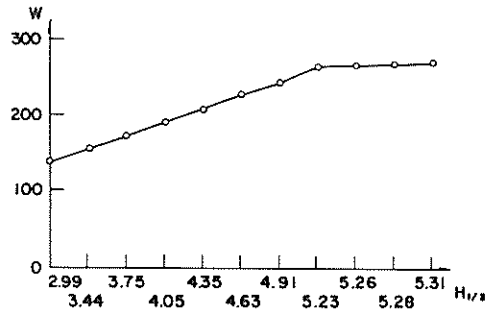
(b)  $H'_0 = 5.32\text{m}$



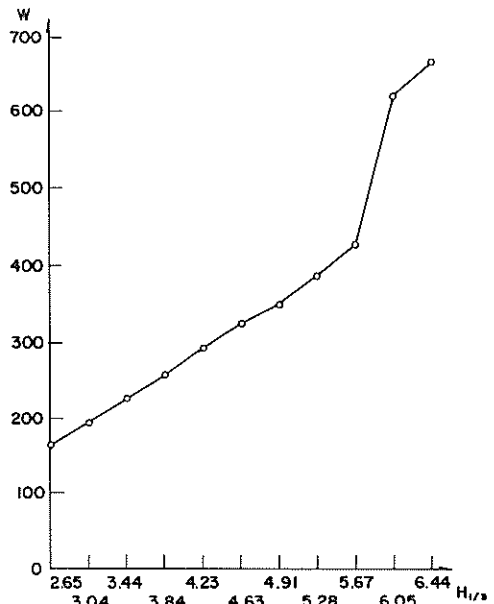
(c)  $H_0 = 4.06\text{m}$



(a) 水深方向の変化



(b)  $h = -8.5\text{m}$



(c)  $h = -16.5\text{m}$

図-13  $H_L \rightarrow W_L$  波とケーソン重量の展開点の変化

② 計算の前提

図-12と同一である。

③ 計算の結果

- i) 図-13には、波高展開点の代表値として  $(H_0)_L = 7\text{m}$ 、 $5.32\text{m}$ 、および  $4.06\text{m}$  の場合を示している。
- ii) 水深変化によって安全性指標が変化する。これは、重複波領域と砕波領域での波圧式の相違が原因である。
- iii) 重複波領域では、安全性指標は水深変化にあまり影響されず安定した値である。
- iv) 砕波領域では、浅海部において安全性指標は小さく水深と共に増大する。ごく浅い所では、広井式、合田式ともに堤体の安全性が低いことを示している。

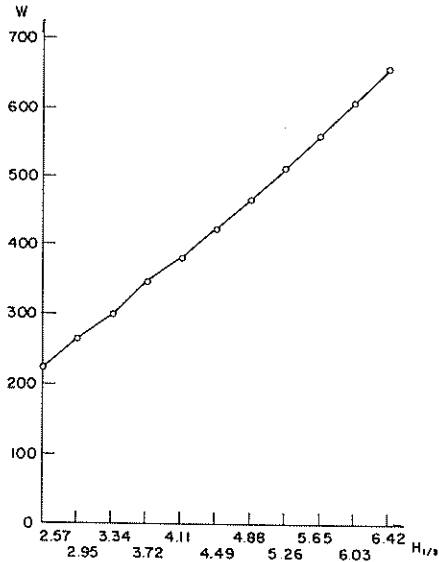
c) 一定波高、一定水深におけるケーソン重量の変化 (図-14)

① 計算の前提

図-12と同一である。

② 計算の目的

図-12の計算結果を用い、安全率、安全性指標計算の根拠であるケーソン重量展開点の値の変化を調べる。



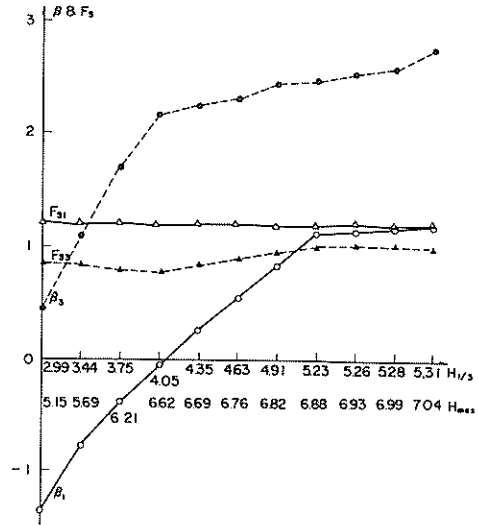
(d)  $h = -24.5 \text{ m}$

図-14  $H_L \rightarrow W_L$  ケーソン重量の変化

平均値と標準偏差の組み合わせを表すことにする。

① 計算の目的

波高分布を一定にし、ケーソン重量分布の変化が安全性指標に与える影響を調べる。



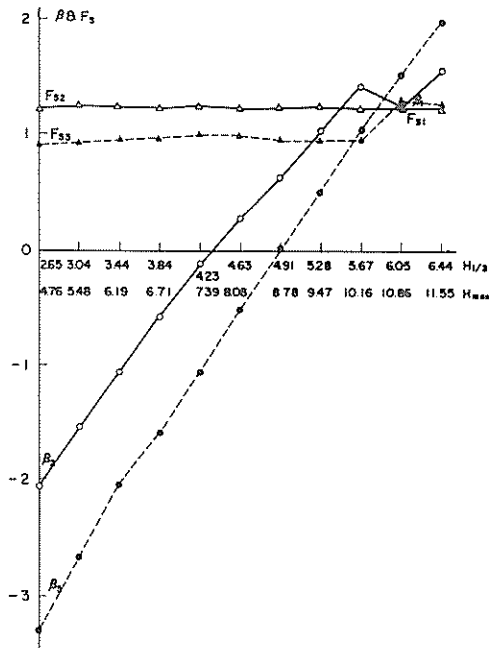
(a)  $h = -8.5 \text{ m}$

③ 計算の結果

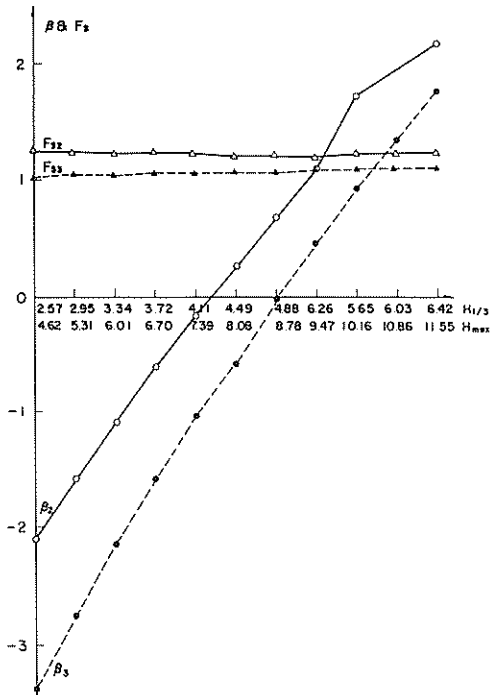
- i) 安全率, 安全性指標は波とケーソン重量等間の釣合関係を無次元表示しているため, 波あるいはケーソン重量等についての直観的理解は困難である。波力とケーソン重量が相関して釣合っているから, ケーソン重量の変化はほぼ波力の変化を示していると考えられるし, 絶対値の目安にもなる。例えば, 水深-8.5 m と水深-24.5 m で両方とも安全率 1.2 の堤体であっても, 個別のケーソン重量(t)には大差がある。
- ii) ケーソン重量は, 従来式により求められている。水深方向の変化では, 砕波領域から重複波領域への移行が節目に明らかである。一定水深においては, 波高増に応じてほぼ線形にケーソン重量が増加している。水深-8.5 m では砕波の限界波高で頭打ちとなり, 水深-16.5 m では波高 5.67 m と 6.05 m の間で重複波から砕波に変化したためケーソン重量が急増している。
- iii) 安全率, 安全性指標の一見不規則な変化に対し, ケーソン重量の変化は規則性が強い。

d) 一定水深におけるケーソン重量分布変化の効果 (図-15)

設計変数の確率分布は 4.3 (2) のように平均値と標準偏差で代表させている。簡単のために分布という言葉で



(b)  $h = -16.5 \text{ m}$



(c)  $h = -24.5 \text{ m}$

図—15  $H_L \rightarrow W_L, m_w, \sigma_w$

波の展開点とケーソン重量分布の変化

② 計算の前提

- i) 波高分布は、換算沖波波高  $H_0' = 7 \text{ m}$  に対応して各水深ごとに定める。
- ii) ケーソン重量分布は、波高展開点に対し、限界状態面式(5)を満足するケーソン重量展開点の値を求め、この重量展開点の値を標準重量として 4.3(2)②の方法によって分布を定める。
- iii) その他は、4.3(1)基本的条件による。
- iv) 波高、ケーソン重量の展開点の値は、図—12の計算に用いたものと同一である。
- v) 図—15の横軸は、波高の展開点の値である。これらは ii) により各ケーソン重量分布に対応している。

③ 計算の結果

- i) 波高展開点が小さくなれば、ほぼ線形に安全性指標は小さくなっている。
- ii) 水深 -8.5 m で安全性指標が横ばいになっているのは、砕破のために波高展開点の変化が小さいからである。
- iii) 波とケーソン重量展開点は安全率 1.2 の関係を保ちながら変化しているにもかかわらず、安全性指標

が i) の関係を示している。ここでは波高展開点の減小すなわちケーソン重量分布が小さな値へ移行すると波高分布が一定であるため、分布相互の関係として安全性の低下傾向があるから、その点を安全性指標が示している。

iv) iii) より、外力分布と抵抗分布の相互関係に安全性指標は支配され、展開点の影響は二次的と想定される。

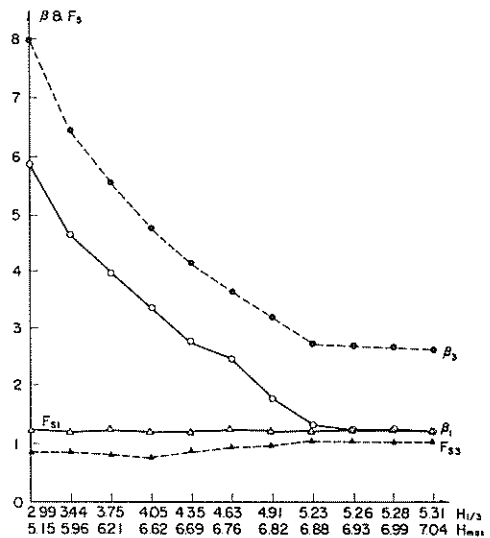
e) 一定水深における波高分布変化の効果 (図—16)

① 計算の目的

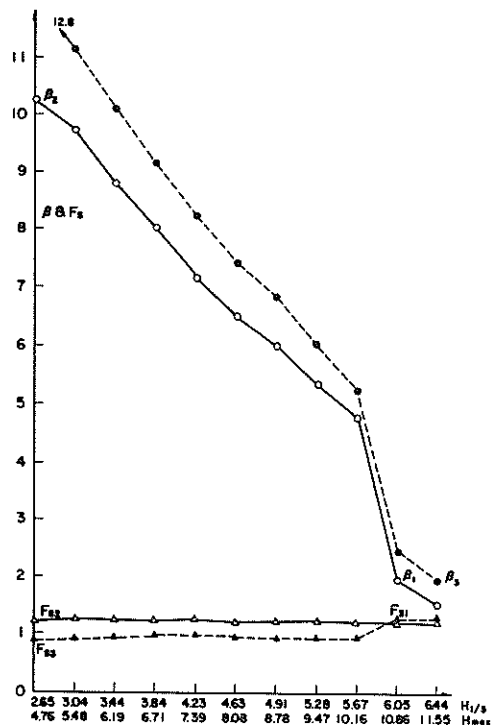
ケーソン重量分布を固定し、波高分布の変化が安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

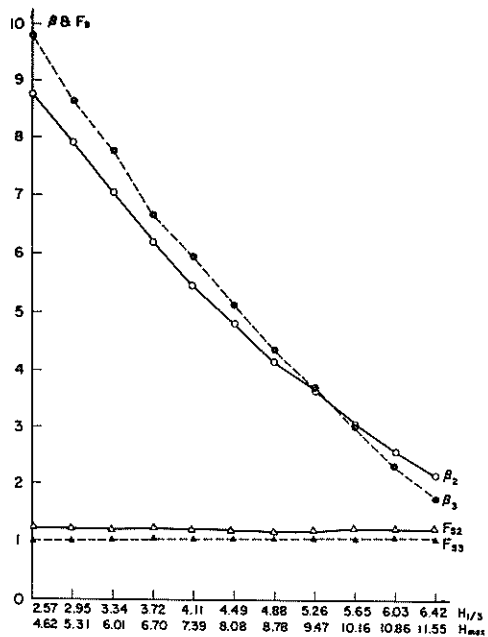
- i) 波高の展開点は、図—12と同一である。
- ii) 波高分布は波高展開点の各点に対して 4.3(2)④の方法によって定める。
- iii) ケーソン重量分布は、換算沖波波高  $H_0' = 7 \text{ m}$  に対応して定める。



(a)  $h = -8.5 \text{ m}$



(b)  $h = -16.5 \text{ m}$



(c)  $h = -24.5 \text{ m}$

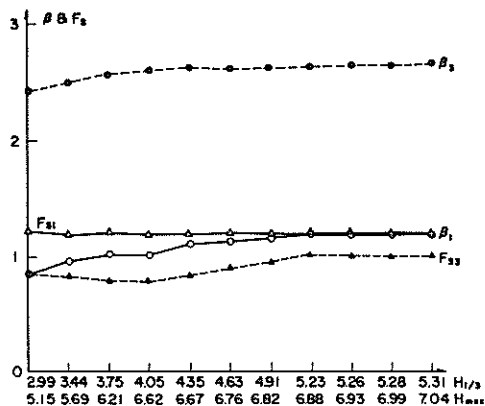
図-16  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L$

波の分布とケーソン重量展開点の変化

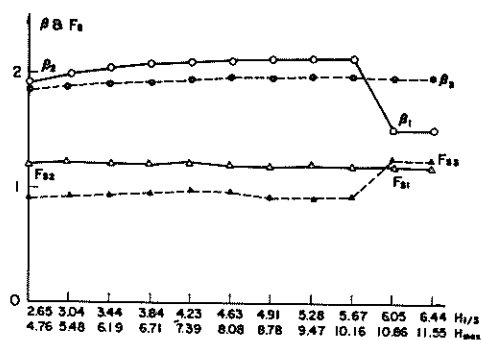
iv) その他は、4.3(1)基本的条件による。

③ 計算の結果

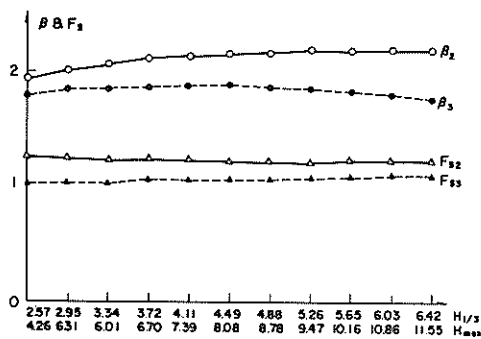
ケーソン重量分布は一定で、波高展開点とともに波高分布が小さな値に移行すると、分布相互の関係では安全性が高まり安全性指標は大きくなる。



(a)  $h = -8.5 \text{ m}$



(b)  $h = -16.5 \text{ m}$



(c)  $h = -24.5 \text{ m}$

図-17  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$

波とケーソン重量分布の変化

f) 一定水深における波高分布、ケーソン重量分布変化の効果 (図-17)

① 計算の目的

波高分布、ケーソン重量分布が安全率に相関して変化する場合に安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

i) 波高、ケーソン重量展開点は、図-12と同一である。

ii) 波高、ケーソン重量分布は、両展開点を用い 4.3 (2)②および④から定める。

iii) その他は、4.3 (1) 基本的条件による。

③ 計算の結果

波高、ケーソン重量展開点は、限界状態面式③上であり、従来式で安全率 1.2 を満足しているから、波高、ケーソン分布も分布を一塊と見れば、ほぼ一定の比率を保って展開点とともに変化しているため、安全性指標はほぼ一定の値である。

g) 一定水深における波高分布、安全率変化の効果 (図-18)

① 計算の目的

ケーソン重量分布を固定し、波高分布、安全率の変化が安全性指標に与える影響を調べる。

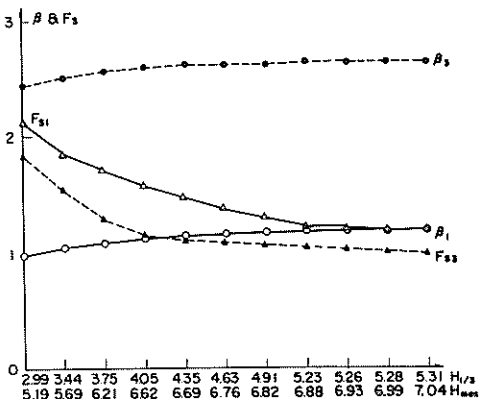
② 計算の前提

i) 波高展開点は、図-12と同一である。

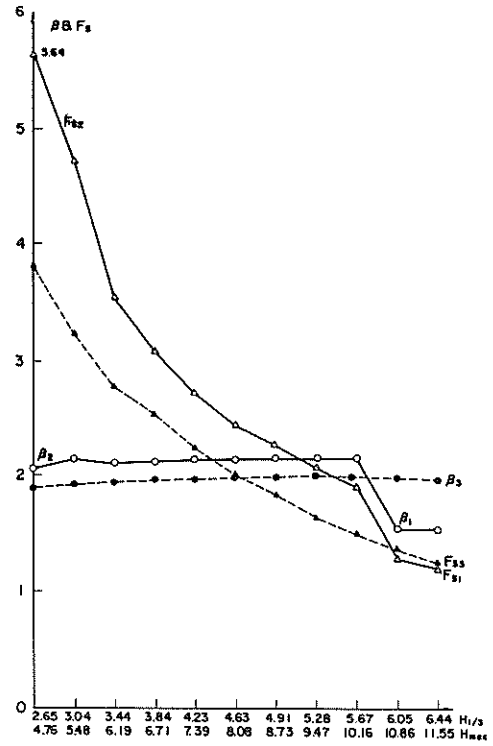
ii) 波高展開点の各値に対し 4.3 (2)④の方法によって波高分布を定める。

iii) ケーソン重量分布、展開点は、換算沖波波高  $H_0' = 7\text{m}$  に対応して定める。

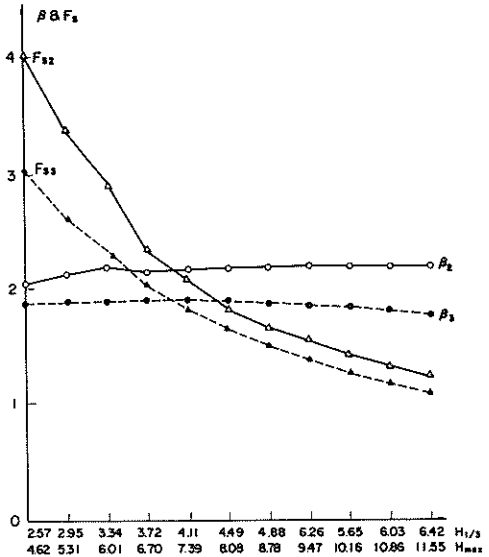
iv) 波高およびケーソン重量の各展開点の値に対して限界状態面式③によって安全率の値を求め、その値を安全性指標の計算に用いる。



(a)  $h = -8.5\text{ m}$



(b)  $h = -16.5\text{ m}$



(c)  $h = -24.5\text{ m}$

図-18  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow F_s$  波の分布と安全率の変化

v) その他は、4.3(1) 基本的条件による。

③ 計算の結果

波高展開点の値が小さくなり、それに応じて波高分布が変化すると、安全率は大きくなるが、安全性指標はほぼ一定値をとる。これは、安全率×波力=換算外力がほぼ一定であり、かつケーソン重量分布も一定であるためと想定される。

(2) 摩擦係数

摩擦係数  $\mu$  とケーソン重量  $W$  はほぼ逆比例する。

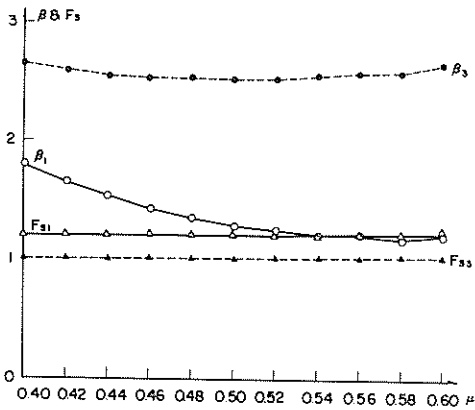
一定水深における摩擦係数展開点変化の効果(図-19)

① 計算の目的

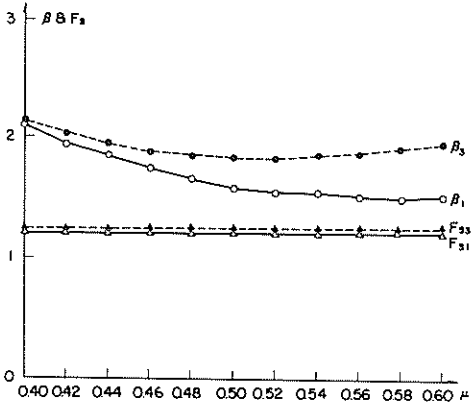
摩擦係数、ケーソン重量展開点変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

i) 摩擦係数展開点は  $\mu = 0.4 \sim 0.6$  を 10 等分した計 11 点である。



(a)  $h = -8.5 \text{ m}$



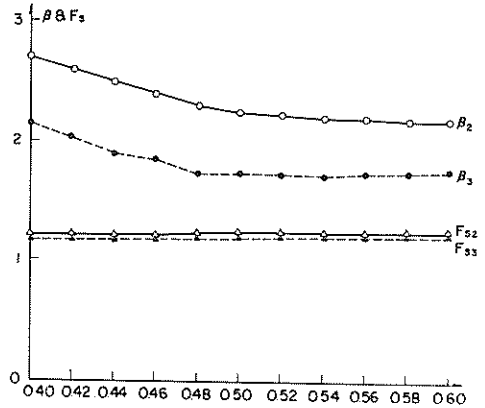
(b)  $h = -16.5 \text{ m}$

ii) ケーソン重量展開点は、摩擦係数展開点を用い限界状態面式(53)を満足するように定める。

iii) 摩擦係数分布は、4.3(2)①で固定する。

iv) ケーソン重量分布は、摩擦係数展開点  $\mu = 0.6$  に対応するケーソン重量展開点の値を標準重量として 4.3(2)②で定める。

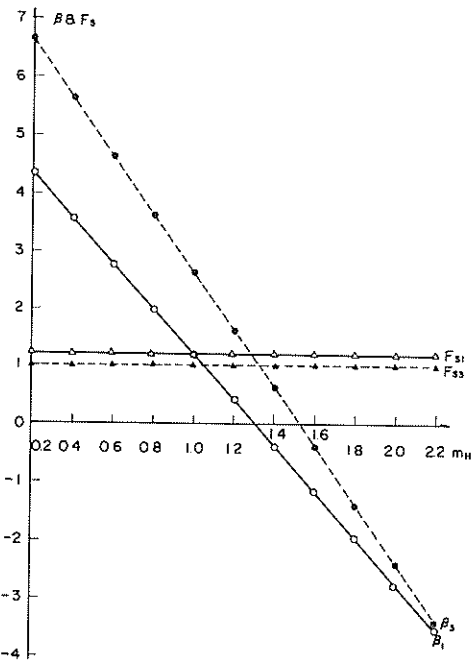
v) その他は、4.3(1) 基本的条件による。



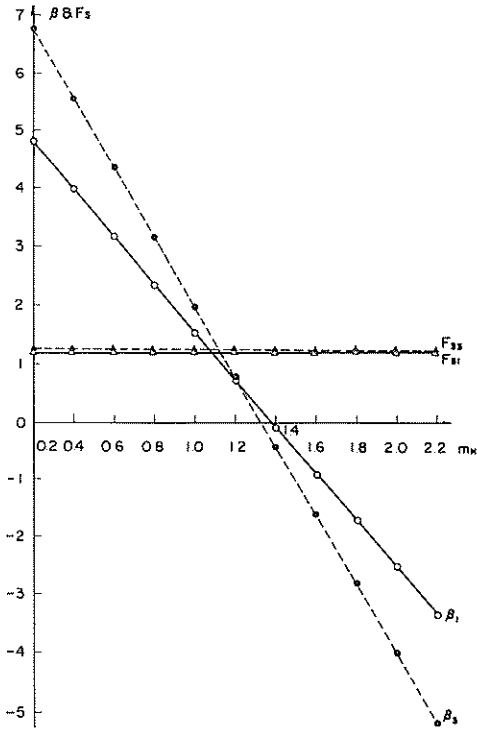
(c)  $h = -24.5 \text{ m}$

図-19  $\mu_L \rightarrow W_L$

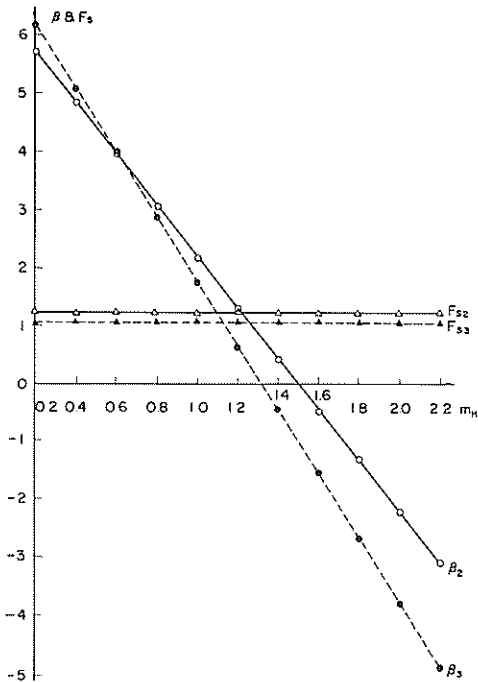
摩擦係数とケーソン重量の展開点の変化



(a)  $h = -8.5 \text{ m}$



(b)  $h = -16.5 \text{ m}$



(c)  $h = -24.5 \text{ m}$

③ 計算の結果

i) 摩擦係数の分布を固定し、展開点変化の効果を調べている。

ii) 摩擦係数展開点が  $\mu = 0.4$  から  $0.6$  へ変化すると、安全性指標はおだやかな低下傾向がある。

(3) 平均値, 標準偏差

a) 一定水深における波高平均値変化の効果(図-20)

① 計算の目的

波高標準偏差を固定し、平均値変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

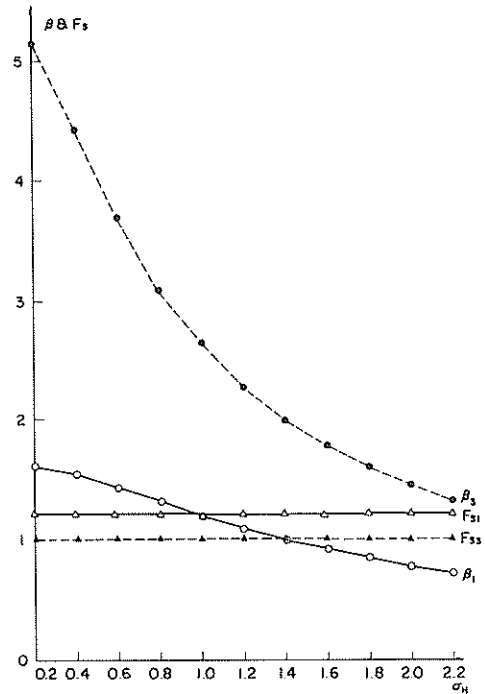
i) 4.3(2)④で定めた波高平均値を基準とし、 $0.2 \sim 2.2$  倍を用いる。

ii) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

i) 標準偏差が一定だから、分布形状は一定で、平均値変化に応じて分布が平行移動する。

ii) ケーソン重量分布は一定だから、波高分布が小さい方へ移行すれば、相対的に安全性が高まり安全性指標は大きくなり、逆に波高分布が大きい方へ移行すれば、安全性が低下し安全性指標は小さくなる。



(a)  $h = -8.5 \text{ m}$

図-20 0.2 ~ 2.2  $m_H$  波の平均の変化



b) 一定水深における波高標準偏差変化の効果 (図-21)

① 計算の目的

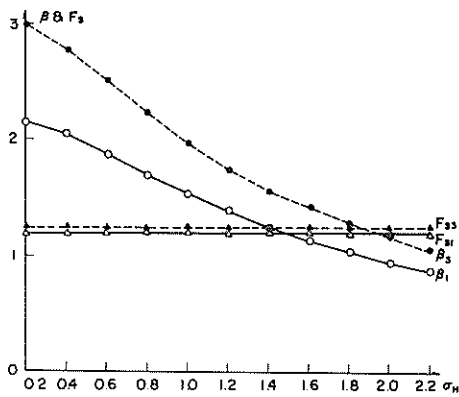
波高平均値を固定し、標準偏差変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

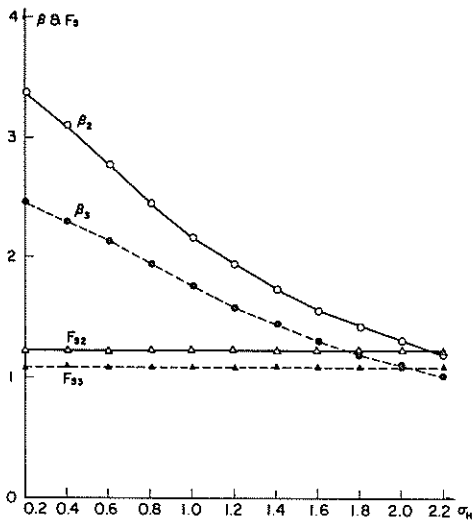
- i) 4.3(2)④で定めた波高標準偏差を基準とし、0.2~2.2倍を用いる。
- ii) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

- i) 平均値は一定だから分布は移動せず、標準偏差変化に応じて分布形状が変わる。

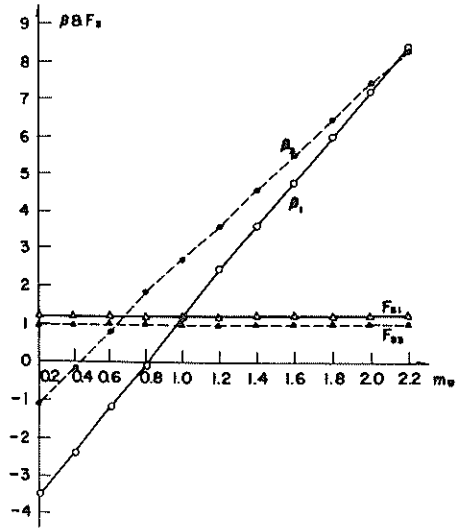


(b)  $h = -16.5$  m

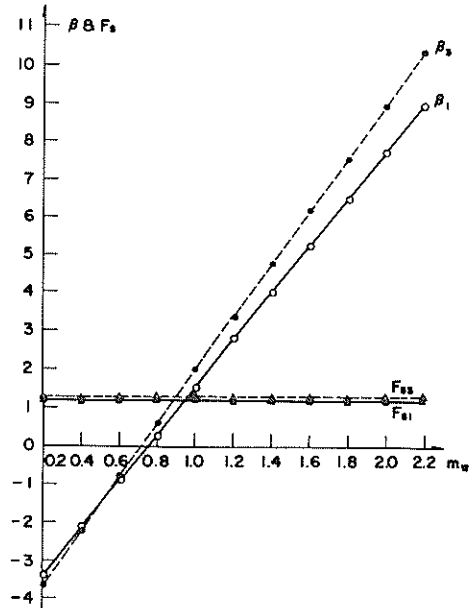


(c)  $h = -24.5$  m

ii) ケーソン重量分布は一定だから、標準偏差が小さいと平均値の近傍に分布が集中し、相対的には大きな波高分布量が減少し、安全性が高まり、安全性指標は大きくなる。標準偏差が大きくなると分布は平らになり、大きな波高分布量が増すため安全性が低下し、安全性指標は小さくなる。



(a)  $h = -8.5$  m



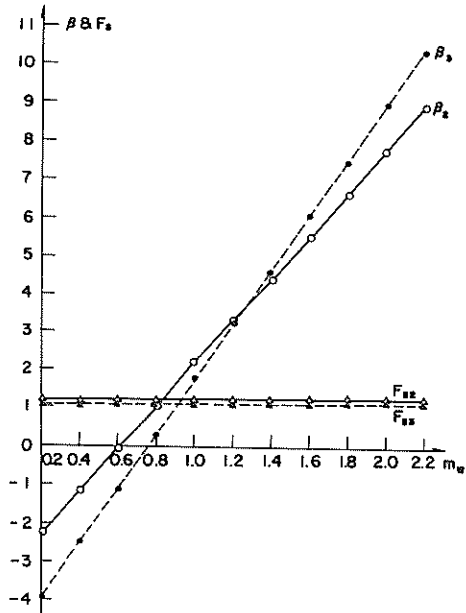
(b)  $h = -16.5$  m

図-21 0.2~2.2  $\sigma_H$  波の標準偏差の変化

c) 一定水深におけるケーソン重量平均値変化の効果  
 (図-22)

① 計算の目的

ケーソン重量標準偏差を固定し、平均値変化の安全性指標に与える影響を調べる。



(c)  $h = -24.5\text{m}$

図-22 0.2 ~ 2.2  $m_w$  ケーソン水中重量平均の変化

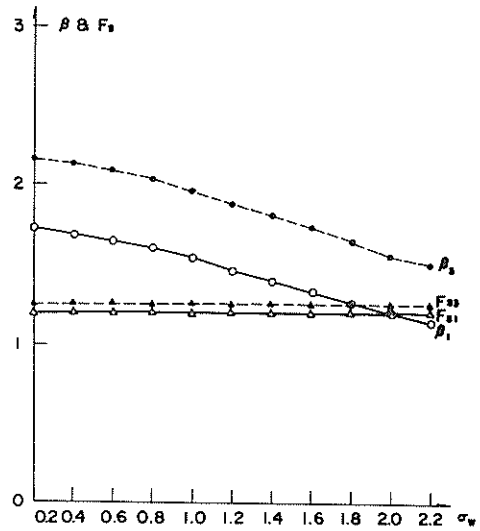
② 計算の前提

i) 4.3(2)②で定めたケーソン重量平均値を基準とし、0.2 ~ 2.2倍を用いる。

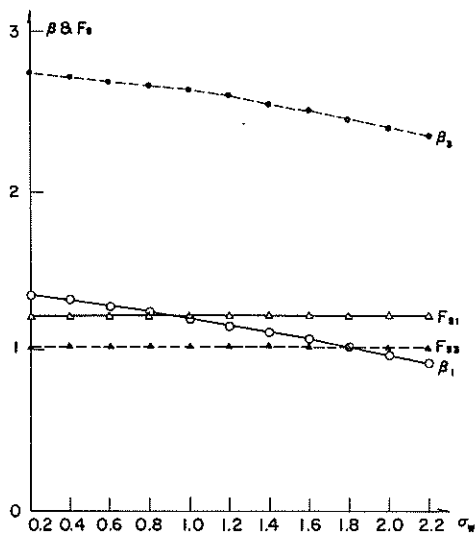
ii) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

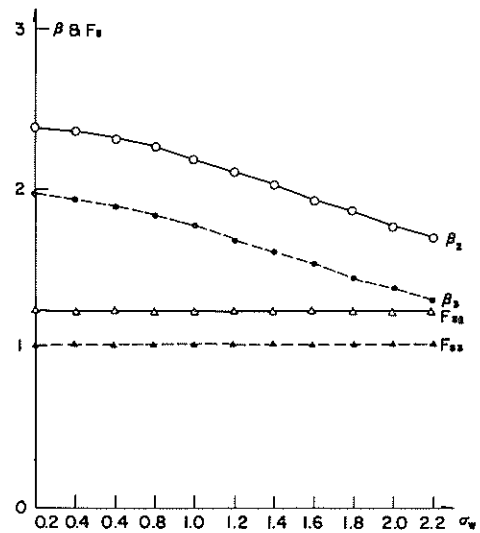
波高分布は一定で、ケーソン重量分布が大きい方へ移行すれば、相対的に安全性は高まるから、安全性指標は大きくなる。逆に、ケーソン重量分布が小さい方へ移行すると、安全性は低下し安全性指標は小さくなる。



(b)  $h = -16.5\text{m}$



(a)  $h = -8.5\text{m}$



(c)  $h = -24.5\text{m}$

図-23 0.2 ~ 2.2  $\sigma_w$  ケーソン重量の標準偏差の変化

d) 一定水深におけるケーソン重量標準偏差変化の効果 (図-23)

① 計算の目的

ケーソン重量平均値を固定し、標準偏差変化の安全性指標に与える影響を調べる。

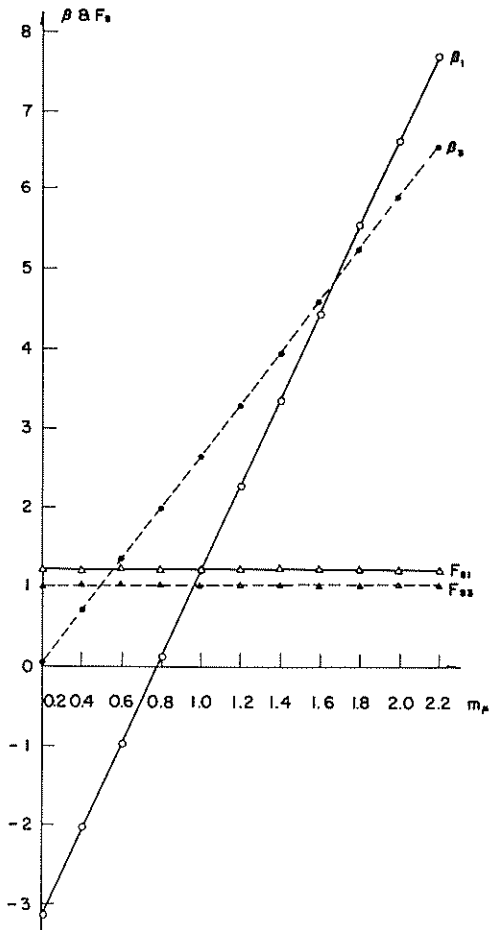
② 計算の前提

i) 4.3(2)②で定めたケーソン重量標準偏差を基準とし、0.2～2.2倍を用いる。

ii) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

波高分布は一定で、ケーソン重量標準偏差が小さくなると相対的に小さなケーソン重量分布量が少なくなり、安全性が高まり安全性指標は大きくなる。ケーソン重量標準偏差が大きくなると小さなケーソン重量分布量が多くなり、安全性が低下し安全性指標は小さくなる。



(a)  $h = -8.5^m$

e) 一定水深における摩擦係数平均値変化の効果 (図-24)

① 計算の目的

摩擦係数標準偏差を固定し、平均値変化の安全性指標に与える影響を調べる。

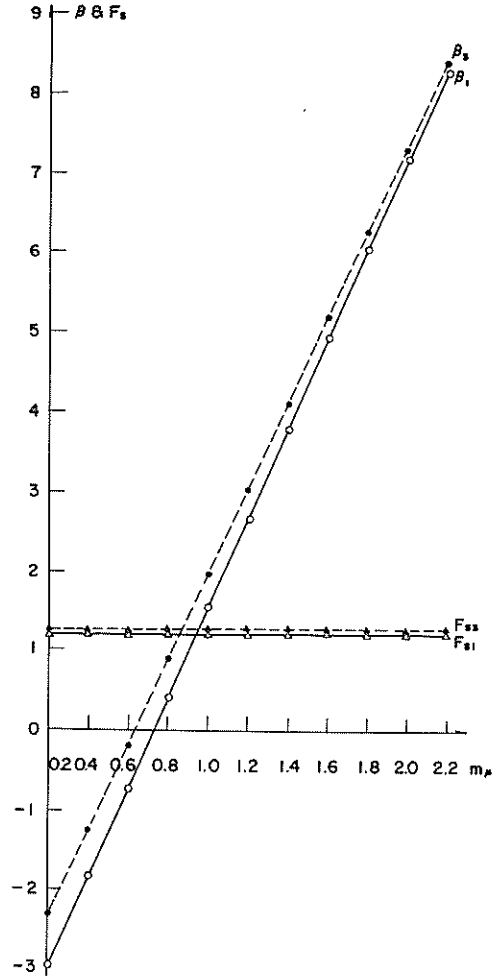
② 計算の前提

i) 4.3(2)①の摩擦係数平均値を基準とし、0.2～2.2倍を用いる。

ii) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

分布を一塊とすると、波高、ケーソン重量分布が一定で、摩擦係数分布が大きい方へ移行すると相対的に安全性が高まり安全性指標は大きくなる。摩擦係数分布が小さい方へ移行すると安全性が低下し安全性指標は小さくなる。



(b)  $h = -16.5^m$

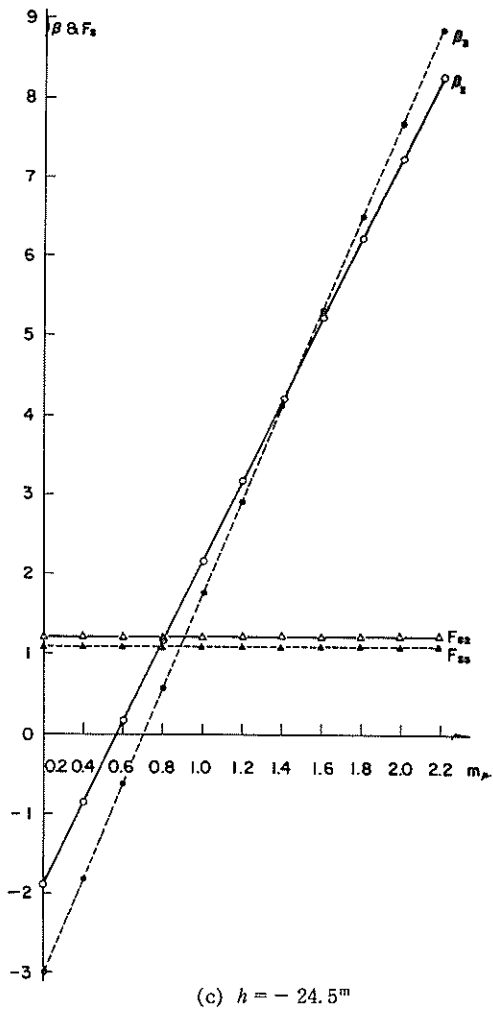
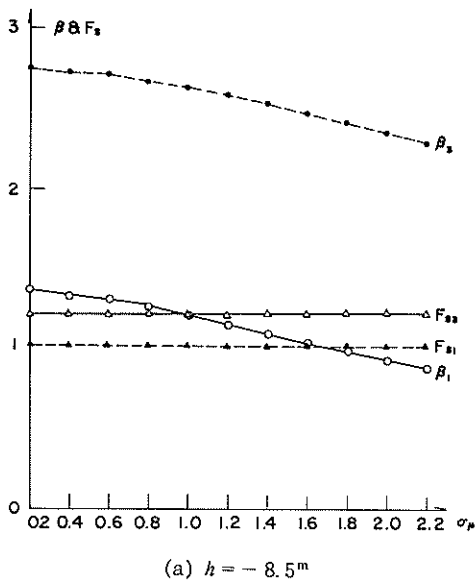
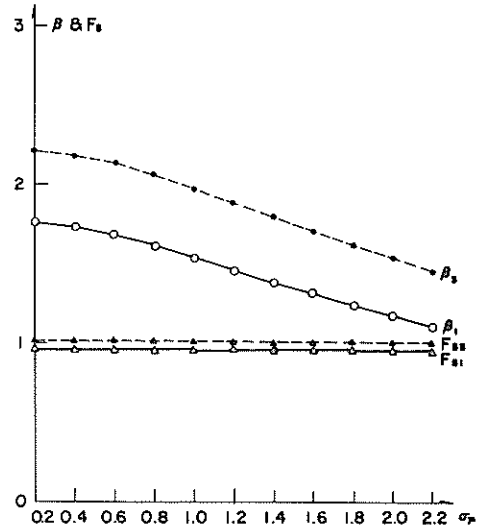


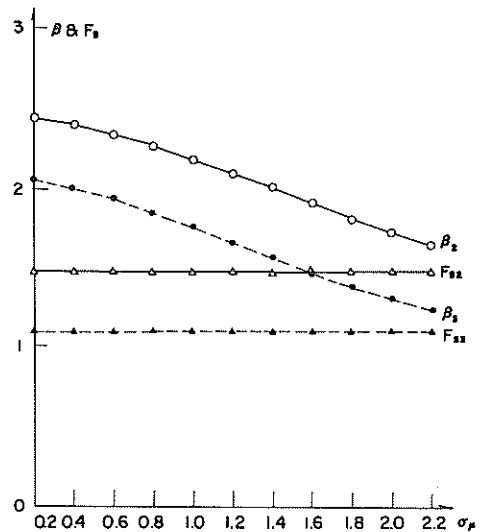
図-24 0.2 ~ 2.2  $m_{\mu}$  摩擦係数の平均の変化



(a)  $h = -8.5^m$



(b)  $h = -16.5^m$



(c)  $h = -24.5^m$

図-25 0.2 ~ 2.2  $\sigma_{\mu}$  摩擦係数の標準偏差の変化

f) 一定水深における摩擦係数標準偏差変化の效果 (図-25)

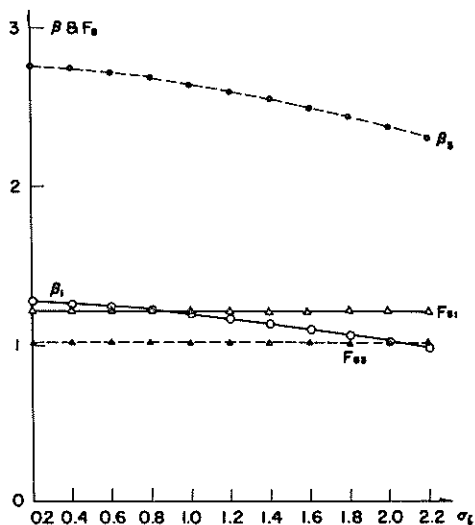
① 計算の目的

摩擦係数平均値を固定し、標準偏差変化の安全性指標に与える影響を調べる。

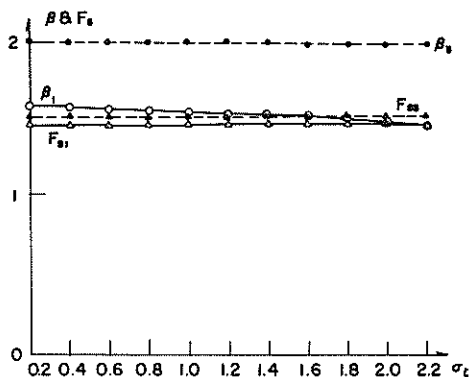
② 計算の前提

i) 4.3(2)①の摩擦係数標準偏差を基準とし、0.2 ~ 2.2倍を用いる。

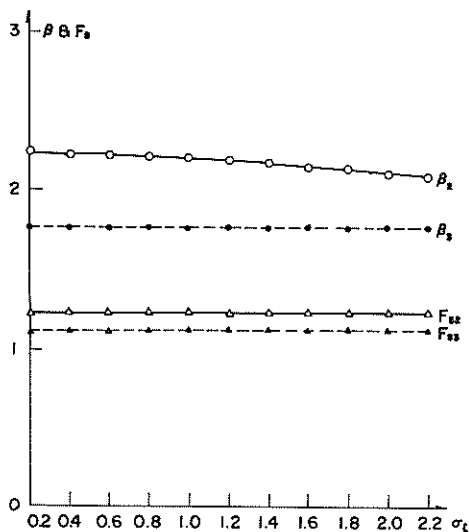
ii) その他は、4.3による。



(a)  $h = -8.5\text{m}$



(b)  $h = -16.5\text{m}$



(c)  $h = -24.5\text{m}$

図-26 0.2 ~ 2.2  $\sigma_c$  潮位の標準偏差の変化

#### ④ 計算の結果

摩擦係数平均値が一定で、標準偏差が小さくなると、小さな摩擦係数分布量が相対的に少なくなり、安全性が高まり安全性指標は大きくなる。摩擦係数標準偏差が大きくなると小さな摩擦係数分布量が多くなり、安全性が低下し安全性指標は小さくなる。

g) 一定水深における潮位標準偏差変化の効果(図-26)

##### ① 計算の目的

潮位平均値を固定し、標準偏差変化の安全性指標に与える影響を調べる。

##### ② 計算の前提

- i) 4.3 2) (3) で定まる潮位標準偏差を基準とし、0.2 ~ 2.2 倍を用いる。
- ii) その他は、4.3 による。

##### ③ 計算の結果

潮位標準偏差変化の安全性指標に与える影響は軽微である。

##### h) 平均値および標準偏差の及ぼす影響について

感度分析の結果に対し、現実的な変動域を考慮してみる。設計変数の平均値の変化の与える影響に関しては、波、ケーソン重量、摩擦係数は安全性指標を大きく変化させる。これらの変数のうち、波はランダム性が大きく変動幅も大きい。しかし、ケーソン重量は  $0.9 \sim 1.1 m_w$  程度、摩擦係数は  $\mu = 0.4 \sim 0.7$  ( $0.6 \sim 1.2 m_\mu$ ) 程度、潮位は  $0.3 \sim 4.5\text{m}$  ( $0.2 \sim 3 m_c$ ) 程度の変動幅である。したがって、実際上はケーソン重量、摩擦係数および潮位が安全性指標に及ぼす影響は同程度の大きさになる。標準偏差の変化の与える影響に関しては、波以外は影響が少ない。

以上のことから設計波の特定は慎重に行う必要があるけれども、他の要素は平均値に注意を払えばほぼ十分で、標準偏差はある程度の誤差が許容できる、と結論することができよう。

##### (4) 合田式的设计変数

合田式は前述の設計変数以外にも、その関数を構成する設計変数を有するから、各設計変数の変化が安全性指標に与える影響を調べる。

##### a) 一定水深における波高、周期変化の効果(図-27)

##### ① 計算の目的

波高と周期の組み合わせさせた変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

i) 計算に用いる換算沖波波高は、次のとおりである。

$$(H'_0, T) = (3\text{m}, 7\text{s}), (5\text{m}, 9\text{s}), (7\text{m}, 11\text{s}), (10\text{m}, 13\text{s})$$

ii) i) から堤前波を求め、波高展開点とし、それぞれが50年確率波として4.3(2)④で波高分布を定める。

iii) ケーソン重量分布は、換算沖波波高  $H'_0 = 7\text{m}$  に対し定め、ケーソン重量展開点は i) の各波高に応じて計算する。

iv) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

i) ケーソン重量分布が換算沖波波高  $H'_0 = 7\text{m}$  に対し固定されているから、小さな波高に対しては安全性が高まり安全性指標は大きくなり、大きな波高に対しては安全性が低下し安全性指標は小さくなる。

ii) 図-16は周期が固定されているが他の前提は図-27と同一であるから、両者を比較してみると、対応する堤前波での安全性指標はほぼ近い値である。周期より波高の効果が大きいことを推定させる。

iii) こうしたことより、安全性指標の最小化過程で波高に関しては、計算に用いる最大波高が安全性指標の最小値に対応する。

この最小値は一般の極小値、すなわち周囲の値より小さいという意味ではなく、一方向に単調に減少して行く過程での絶対的な最小値である。したがって、設計計算に用いる最大波高の設定が重要である。

b) 一定水深における波周期変化の効果 (図-28)

① 計算の目的

波高を固定し周期変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

i) ランダム性を考慮しないため分布を有せず、定数変数としての周期を次のとおり定める。

$$T = 9, 11, 13, 16\text{s}$$

ii) i) の各波に対し波高分布を定める。

iii) ケーソン重量展開点は、i) の各波に応じて計算する。

iv) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

i) ケーソン重量分布は周期  $T = 11\text{s}$  に対し固定されているから、これより短周期に対しては波エネルギーが減るので安全性が低下し安全性指標は大きくなり、長周期に対しては安全性が低下し安全性指標は小さくなる。

ii) 図-27と比べて、波高の方が周期より安全性指標に影響が大きい。

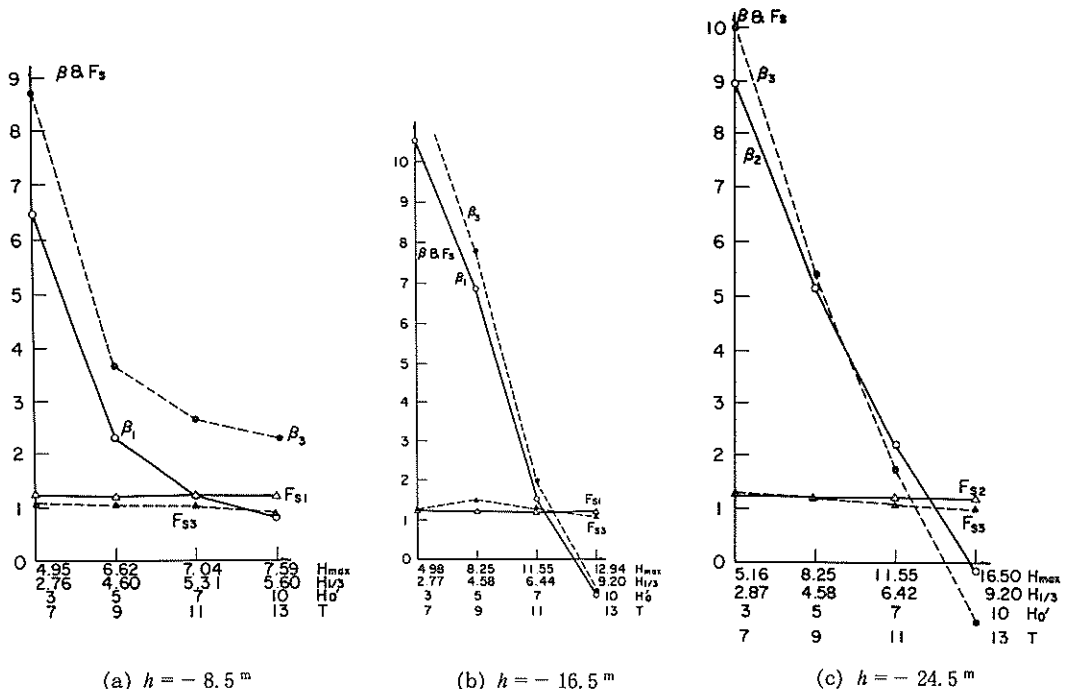


図-27  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L$  換算沖波 ( $H'_0, T$ ) の変化

c) 一定水深における波向変化の効果 (図-29)

① 計算の目的

波向変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

i) 定数変数, 堤体垂直方向から計る波向  $\theta$  を次のとおり定める。

$$\theta = 0, 30, 60, 90 \text{度}$$

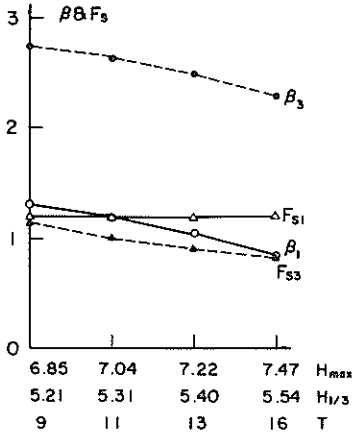
ii) ケーソン重量展開点は, i) の各波に対し計算する。

iii) その他は, 4.3による。

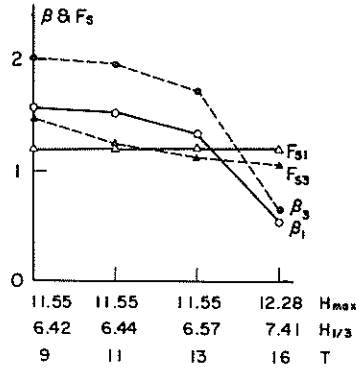
③ 計算の結果

i) ケーソン重量分布は波向  $\theta = 0$  度に対し固定されているため, 波向が堤体に平行になるに従い波圧が小さくなり, 安全性が高まることにより安全性指標は大きくなる。

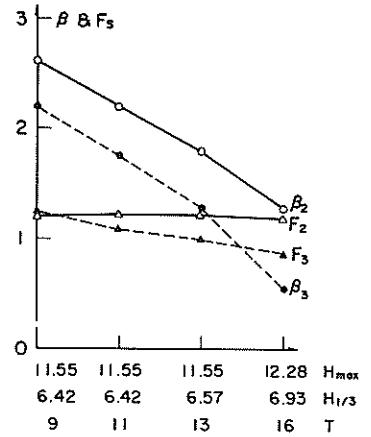
ii) 砕波領域では特に波向が30度より大きい場合, 安全性指標への影響が大きい, 重複波領域では波向の影響は小さい。



(a)  $h = -8.5\text{m}$

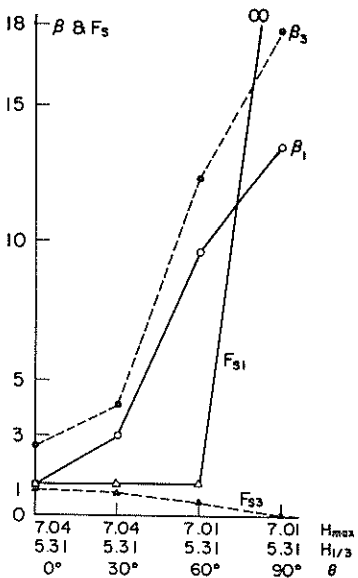


(b)  $h = -16.5\text{m}$

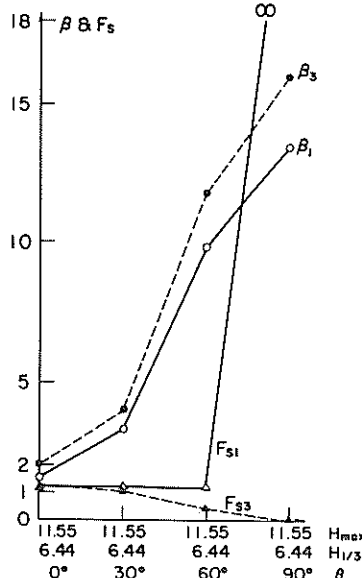


(c)  $h = -24.5\text{m}$

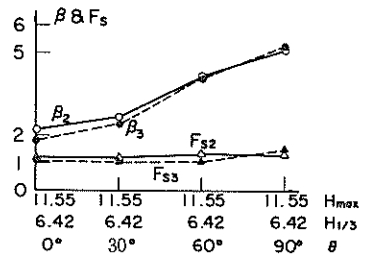
図-28  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L$  周期の変化



(a)  $h = -8.5\text{m}$



(b)  $h = -16.5\text{m}$



(c)  $h = -24.5\text{m}$

図-29  $\theta \rightarrow W_L$  波向の変化

iii) 碎波領域で合田式の安全率が1以下に下がっているのは、合田式は波向が90度に向っても静水圧的考慮から波圧が一定値より下がらぬが、広井式は0に向かうためである。

d) 一定水深における海底勾配変化の効果 (図-30)

① 計算の目的

海底勾配変化の安全性指標に与える影響を調べる。

② 計算の前提

i) 定数変数, 海底勾配  $i$  を次のとおり定める。

$$i = 1/100, 1/30, 1/15, 1/10$$

ii) i) の各海底勾配により浅水変形した波高に応じて、ケーソン重量展開点, 波高分布を定める。

iii) その他は, 4.3 による。

③ 計算の結果

ケーソン重量分布は, 海底勾配  $i = 1/100$  で固定されているため, 碎波領域の水深-8.5m では海底勾配が急になるほど波圧が増大し衝撃碎波的になり安全性が低下し, 安全性指標は小さく, 水深が深くなるに従って海底勾配の影響は消えて行く。

e) 一定水深におけるマウンド厚き変化の効果 (図-31)

① 計算の目的

水深に対する相対的マウンド厚き変化の安全性指標に与える影響を調べる。

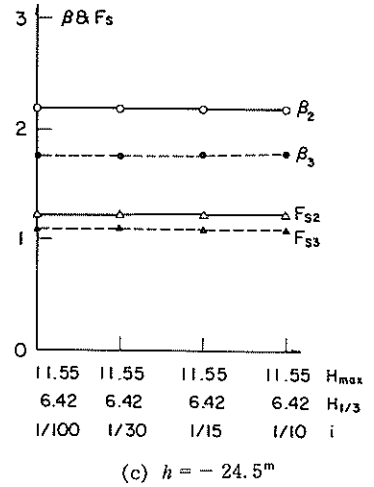
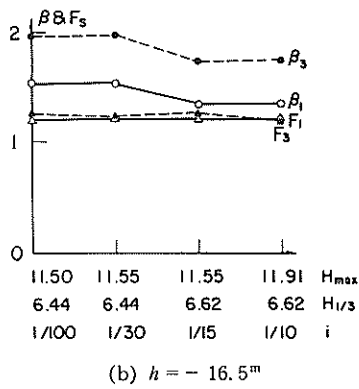
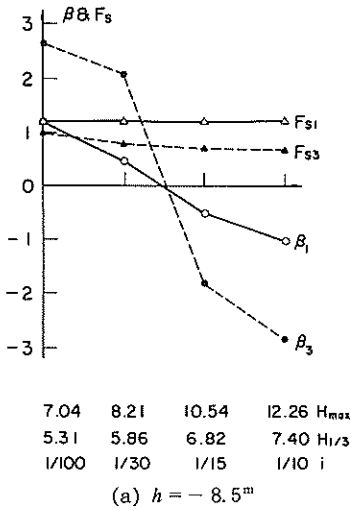


図-30  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L$  海底勾配の変化

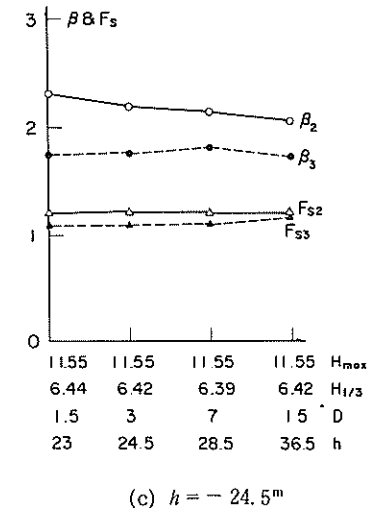
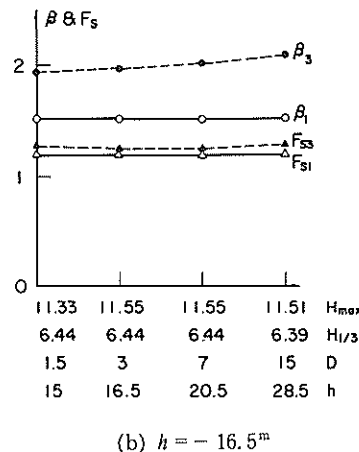
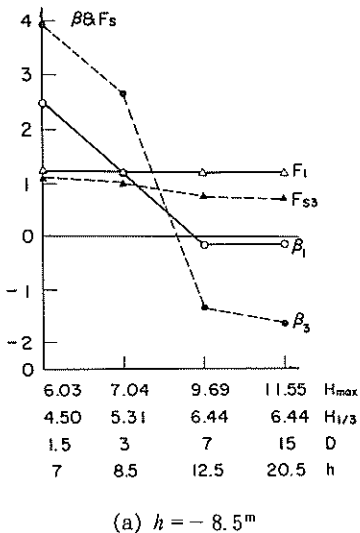


図-31  $D \rightarrow W_L$  マウンド厚きの変化



② 計算の前提

i) 定数変数マウンド厚さ  $D$  を次のとおり定める。

$$D = 1.5, 3, 7, 15\text{m}$$

ii) マウンド厚さ  $D = 3\text{m}$  を基本とし、マウンド上水深が同一になるよう他のマウンド厚さの場合の水深を定める。

iii) ii) の各水深に応じて定まる波高に対してケーソン重量展開点を定める。

iv) その他は、4.3による。

③ 計算の結果

i) 一定水深でマウンド厚さを変えると、波圧とケーソン重量がともに変化する。

こうしたことから、マウンド上水深を一定とし、ケーソン重量の変化をなるべく小さくし、ケーソン重量分布をマウンド厚さ  $D = 3\text{m}$  の場合に固定している。

ii) マウンド上水深が砕波領域では、マウンド厚さが大きくなるに従って安全性指標が小さくなっている。マウンド厚さとともに水深が大きくなり、そのため波高が大きくなることも原因と考えられ、マウンド厚さ変化の影響を分離することはできない。

しかし、図-31(a)で従来式と合田式の安全率を比べるとマウンド厚さが大きい方が合田式の安全率

が小さいことから、マウンド厚さが大きくなると衝撃破波的に波圧が大きくなり安全性が低下することが想定される。

iii) マウンド上水深が深く波高変形が生じない重複波領域では、波高が同じになりマウンド厚さの影響は微小である。

4.5 破壊レベルの安全性指標

前記では限界状態面として安全率から定めたが、ここで終局限界状態に対応する破壊から定まる限界状態面に対する安全性指標について検討する。破壊の定義自体も困難な問題であり、明らかではないが、ここでは従来用いている安全率1の場合を破壊状態と見なすことにし、この場合を破壊レベルの安全性指標と称する。

安全性指標について、設計変数の感度分析は前記4.4で行っているから、限界状態面の相違による差は出ると思われるが、全体的な傾向は把握していると思われる。そこで本節は、安全率レベルと破壊レベルの相違による安全性指標の変化に焦点を合わせて調べることにする。

本節では、4.4の方法で設定されている断面に対し、広井式、黒田式、合田式で安全率1になる波高を求め、安全性指標を計算している。

波高分布は、安全率レベルで定め、破壊レベルも同一とする。

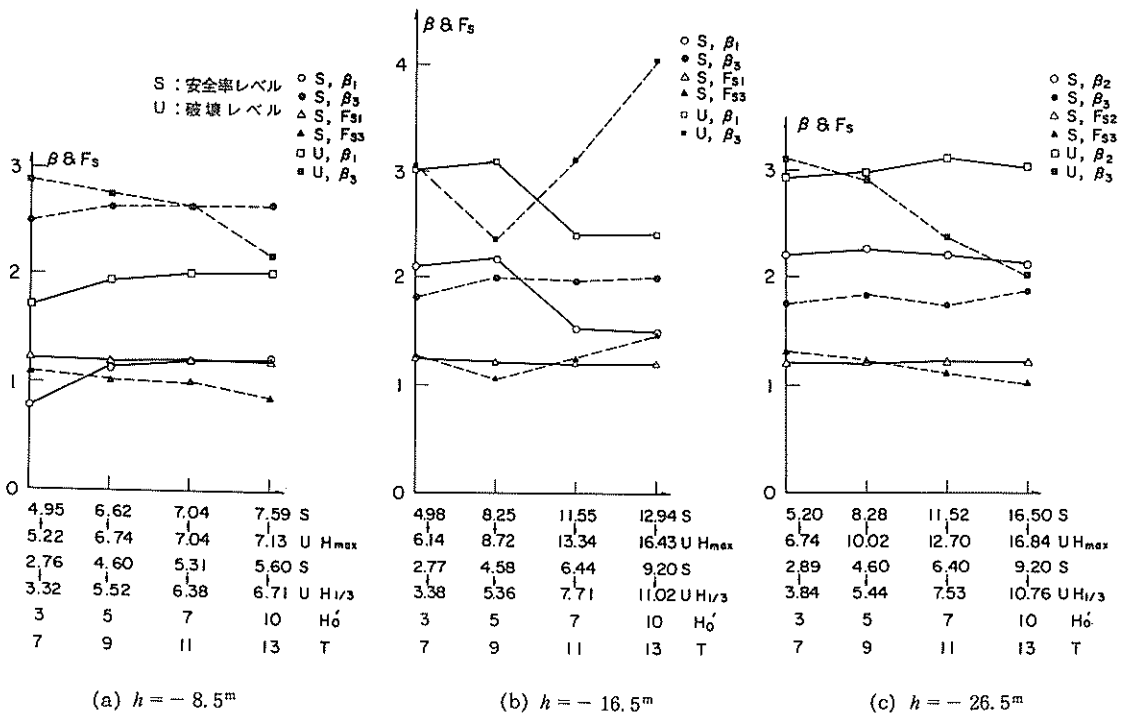


図-32  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  換算沖波 ( $H'_0, T$ ) の変化, 破壊レベル

ケーソン重量分布は、4.4では4.3(1)基本的条件で分布を固定するが、4.5では条件に応じ分布を定めている。

その他は、4.4(4)合田式的设计変数による。

a) 一定水深における波高、周期変化の効果(図-32)

i) 合田式の破壊レベルの安全性指標を除き他は波高、周期変化の影響は小さい。

ii) 図-32(b)の従来式の安全性指標に段がついているのは、小さい波での黒田式から大きい波の広井式に波圧式が変わるためである。

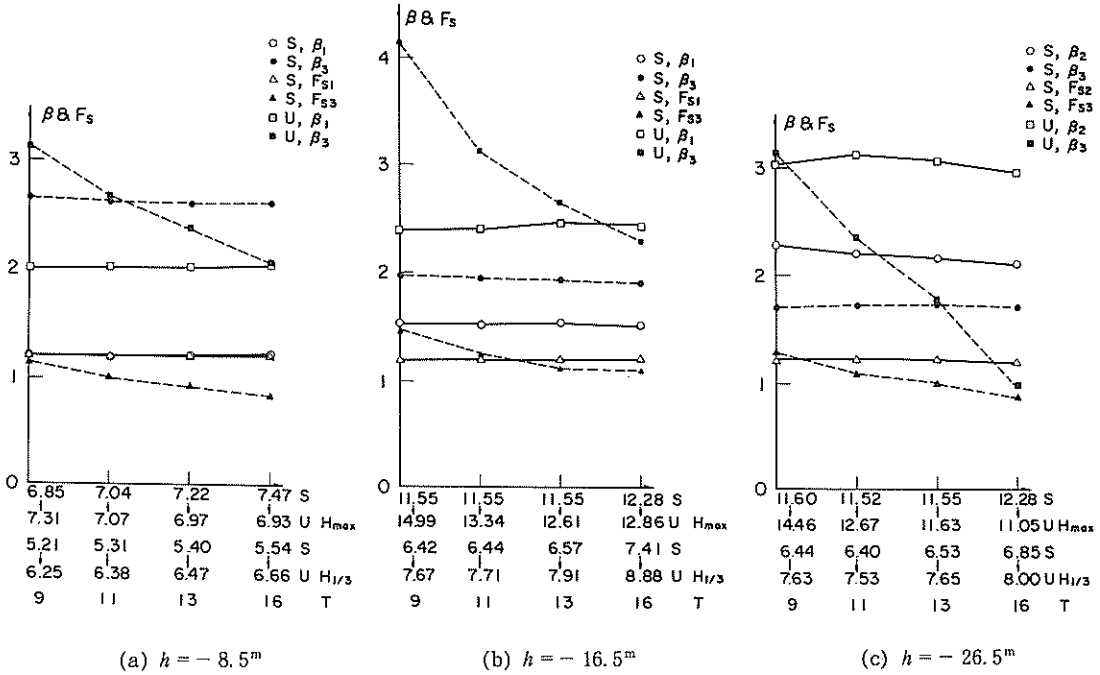


図-33  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  周期の変化, 破壊レベル

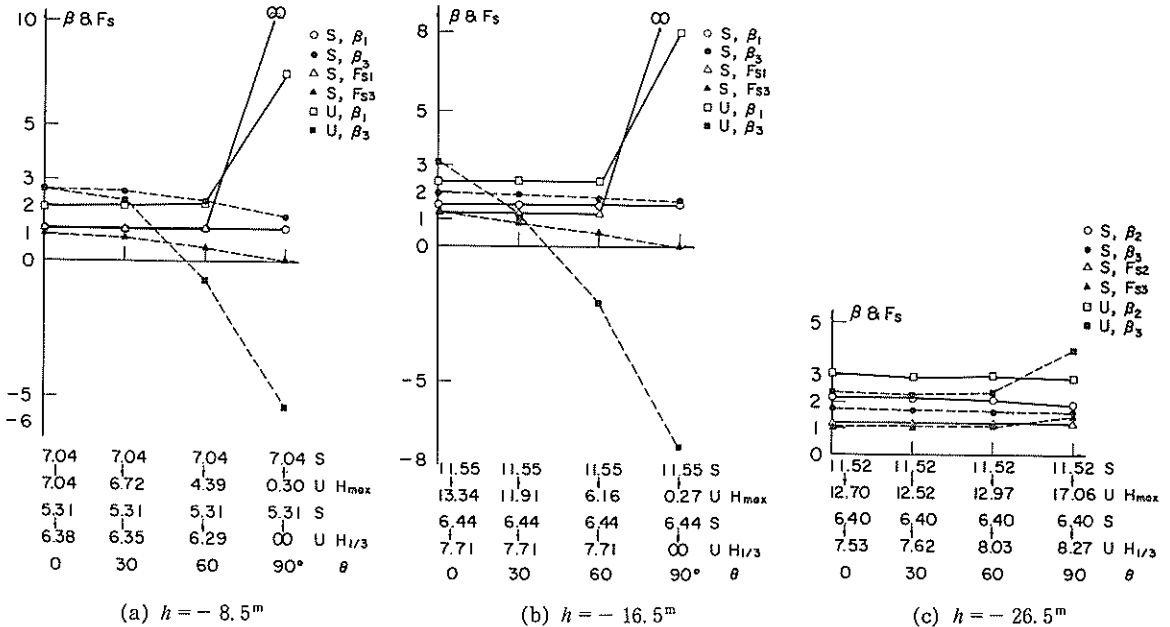


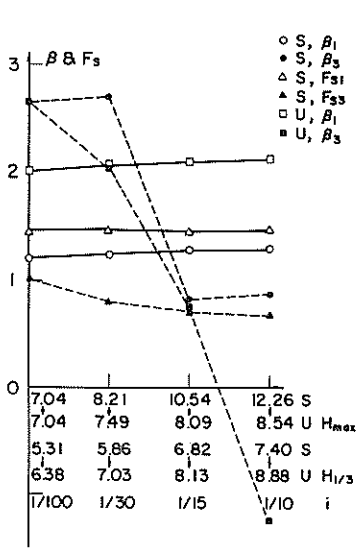
図-34  $\theta \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  波向の変化, 破壊レベル

iii) 合田式の破壊レベルと安全性レベルの安全性指標の間には相関性が見られない。合田式の破壊レベルの安全性指標は、合田式の安全率の変化率が拡大された形に近い。

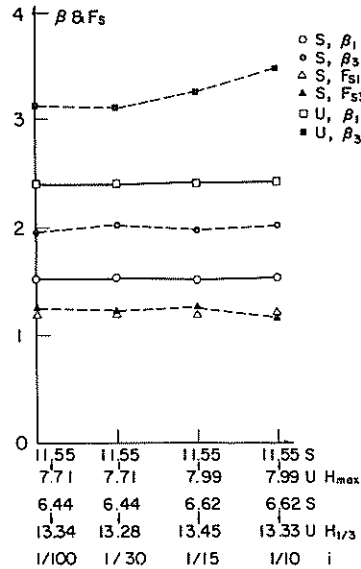
iv) 従来式の破壊レベルと安全性レベルの安全性指標はほぼ平行であり、破壊レベルが安全性レベルより

安全性指標の値は大きい。これは両レベルで安全率がどの点でも1,2と1の相違があるためである。

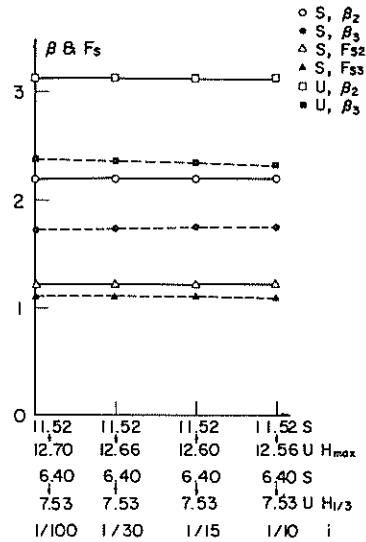
v) 合田式の破壊レベルと安全性レベルの安全性指標が交わっているのは、安全率が1の上下に連なっているためである。



(a)  $h = -8.5\text{m}$

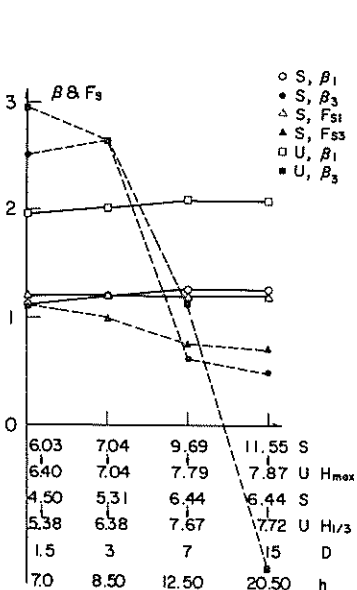


(b)  $h = -16.5\text{m}$

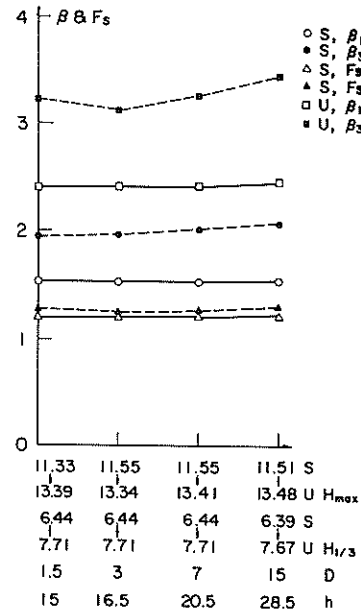


(c)  $h = -26.5\text{m}$

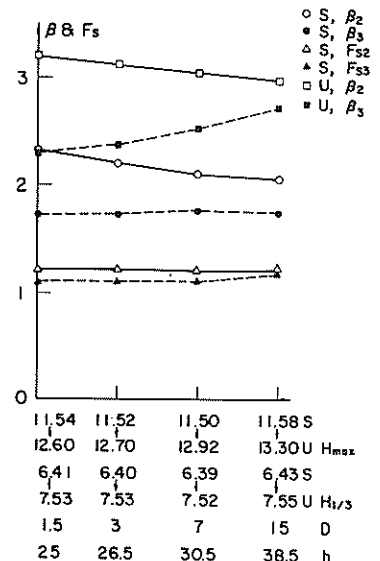
図-35  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  海底勾配の変化, 破壊レベル



(a)  $h = -8.5\text{m}$



(b)  $h = -16.5\text{m}$



(c)  $h = -26.5\text{m}$

図-36  $D \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  マウンド厚の変化, ケーソン設置一定水深, 破壊レベル

b) 一定水深における波周期変化の効果 (図-33)

1) 合田式の破壊レベルの安全性指標を除き、ほとんど波周期の影響はない。周期が大きいかほど安全性指標は小さくなる。

ii) a) iii), iv) に同一である。

c) 一定水深における波向変化の効果 (図-34)

1) 合田式の破壊レベルの安全性指標を除き、波向60度以下では、波向の影響はほとんどない。

ii) 波向60度以下では、a) iii), iv) に同一である。

iii) 波向90度で広井式は波圧が式の上から無くなるため特異点となっている。

d) 一定水深における海底勾配変化の効果 (図-35)

1) 砕波領域で海底勾配が急になるほど、合田式の安全性指標、安全率ともに小さくなる。

ii) その他では、海底勾配の影響は小さくほぼ平行になっている。

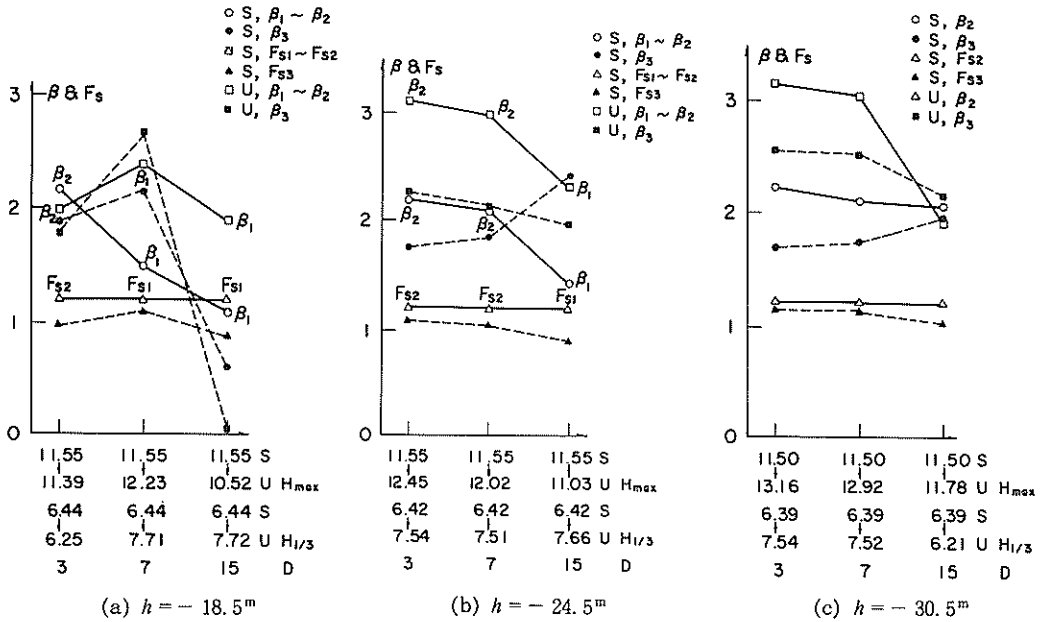


図-37  $D - W_L, m_w, \sigma_w$  マウンド厚の変化, 一定水深, 破壊レベル

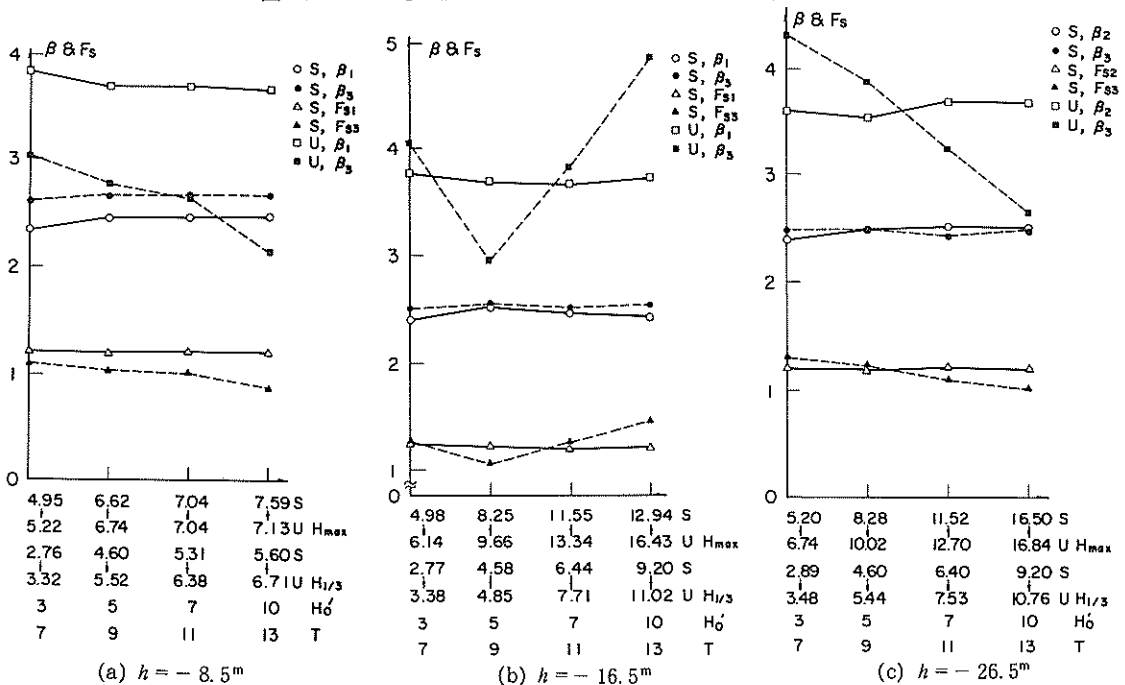


図-38  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  換算沖波 ( $H_0, T$ ) の変化,  $H$  と  $W$  の 2 要素

e) 一定水深におけるマウンド厚さ変化の効果

① 一定マウンド上水深での比較 (図-36)

i) マウンド上水深が碎波領域の場合、マウンド厚さが大きくなると合田式の安全性指標、安全率ともに小さくなる。

ii) その他では、マウンド厚さの影響は比較的小さい。

iii) 図-35, 36を比べると傾向が似ている。海底勾配とマウンド厚さは、合田式に対し同様な影響を有する。

② 一定水深での比較 (図-37)

i) マウンド厚さ  $D=15\text{m}$  まで用いているため、深い水深での比較となっている。

ii) 図-37(a)で安全性指標が中高になっているのを除き、マウンド厚さが大きくなるに従って安全性指標は小さくなる傾向がある。

f) 波高とケーソン重量を設計変数とした場合 (図-38)

i) 波高とケーソン重量だけをランダム変数とし、他は定数変数して扱っている。

ii) 一定水深において波高、周期変化の効果を調べる。

iii) 図-32は4項の設計変数を用いている。図-32と図-38を比べると傾向はほぼ同じであるが、安全性指標が大きくなる傾向があり、特に破壊レベルで目立っている。

g) 潮位変化の効果 (図-39, 40)

① 計算の目的

ここでは、基準面下の水深が一定、すなわち地点を固定した場合の通常の意味での潮位変化の効果調べる。

② 計算の前提

i) 潮位分布は固定し、展開点を变化させる。

ii) 安全性指標の計算に際し、従来式、合田式両方も安全率レベルでは安全率1.2を破壊レベルでは安全率1を固定した限界状態面を用いる。

iii) ケーソン天端は低潮位0mに対し、 $0.6H_3$ で定めており、ケーソン諸元は固定する。

iv) 潮位の上昇にともなう実水深増により波高分布は変化する。

v) その他は、4.3による。

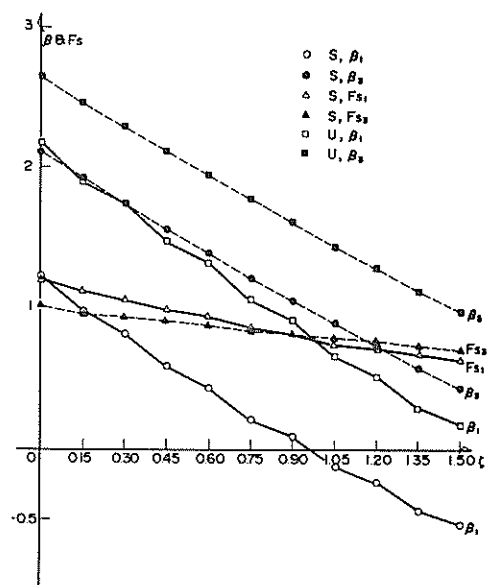
③ 計算の結果

低潮位でケーソン諸元を定め、潮位増にともなう水深増により波高が大きくなりかつケーソンに作用する浮力が増大するから、安全性の減少が推定される。ところが図-18より明らかなように、安全率の変化に応じて限界状態面を変化させると安全性指標に安全性変化の効果が見れない。そこで、一定の基準の限界状態面、すなわち安全性指標を計算するレベルの限界状態面としては、安

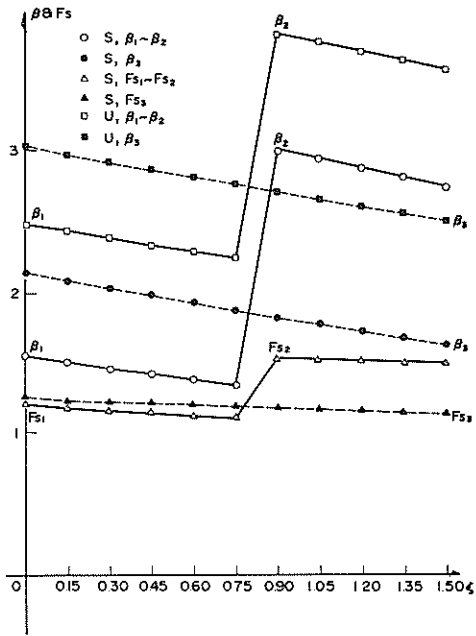
全率レベルでは安全率1.2とし、破壊レベルでは安全率1と固定している。安全率の計算は4.4に同じであるが安全性指標の計算に用いる安全率の値は固定しているため、安全率の計算結果は安全性指標の計算には反映されない。4.4では合田式の場合、安全率の変化に応じた安全率レベルの安全性指標であったが、ここでは安全性指標の計算に用いる安全率は一定値であり、かつ従来式により計算する安全率と同一である。

i) 一定水深における潮位変化の効果 (図-39)

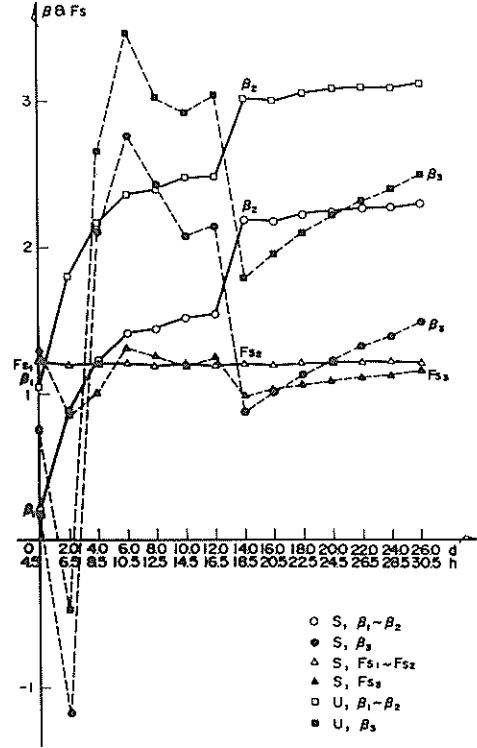
潮位の上昇にともなって安全率、安全性指標ともに小さくなっている。安全性指標は安全率よりも低下率が大きく、潮位変化に敏感である。水深が大きくなるにしたがって安全性指標の低下率が減少する。図-39(b)では、広井式から黒田式に変化のため、安全率、安全性指標ともに段差ができています。式ごとに、安全率レベルと破壊レベルの安全性指標はほぼ平行である。このことは、4.5で従来式については確認されていたが、合田式も同じであることが分かった。ということは4.5で合田式の安全率レベルでは安全率の変化に応じて安全性指標が計算されていたから、安全率の変化により平行にならなかったことになる。



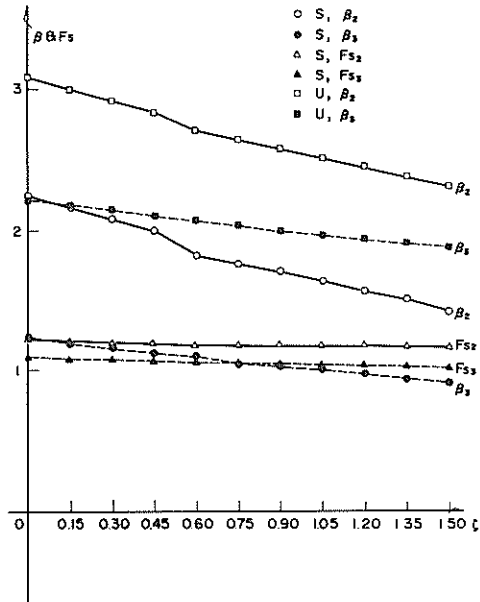
(a)  $h = -8.5\text{m}$



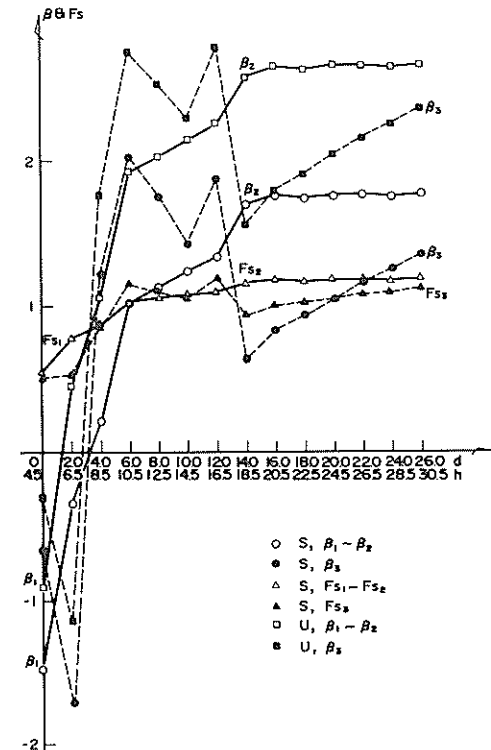
(b)  $h = -16.5^m$



(a)  $\zeta = 0^m$

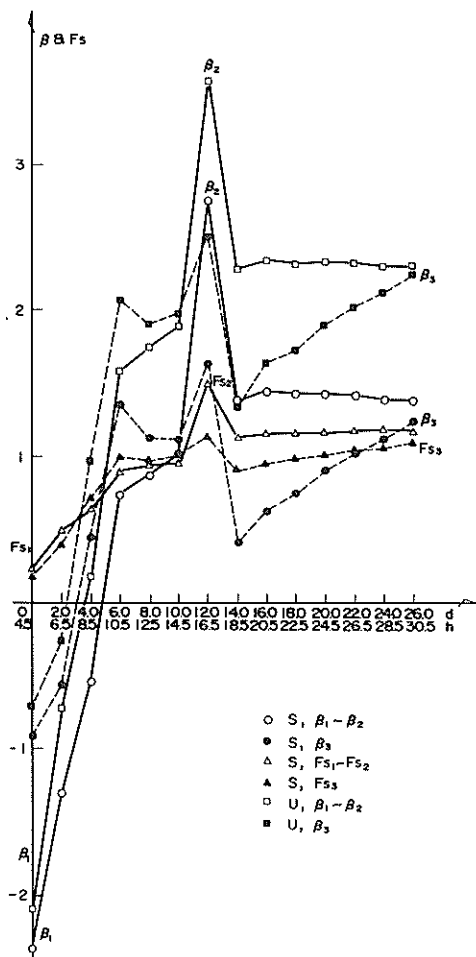


(c)  $h = -24.5^m$



(b)  $\zeta = 0.75^m$

图-39  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  潮位的变化



(c)  $\zeta = 1.5\text{m}$

図—40  $H_L, m_H, \sigma_H \rightarrow W_L, m_W, \sigma_W$  潮位の変化

ii) 一定潮位における水深変化の効果 (図—40)

図—40(a)と図—13(a)が対応するが、安全性指標を計算する安全率を図—40では固定しているため、合田式の安全性指標の変化が目立っている。

安全率レベルと破壊レベルの安全性指標はほぼ平行であり、安全率の変化を拡大したような感がある。浅海部では、元々水深が浅いため相対的に潮位増による水深変化が大きいため安全率、安全性指標ともに低下が著しい。潮位増にともない安全性指標のレベル化が認められる。図—40(c)潮位 1.5 m の場合、水深 16.5 m で安全率、安全性指標の大きなピークが生じている。これは横軸は低潮位の水深で変化させていないが、実際は水深 -18 m で、図—40(a)で見ると、-16.5 m は広井式で設計された堤体であり、-18 m では波圧が黒田式に変化して小さくなっ

ため安全性が向上したことにより、安全率、安全性指標が大きくなっている。

h) 破壊レベルの安全性指標への注意

i) 安全率レベルでは、ケーソン重量分布に対し、安全率×波高分布の作用に対する安全性を安全性指標は示している。破壊レベルでは、同一のケーソン重量分布に対し、同一の波高分布の作用の安全性を求めている。ここでは安全率 1 の場合を破壊状態としているから、相対的に安全率分だけ小さくなった波高分布が作用することになり、安全性は向上し、安全性指標としては大きくなる。

ii) 従来式は安全率 1.2 の安全率レベルであるから、外力が  $1/1.2$  になることにより、ほぼ平行に破壊レベルの安全性指標は大きくなっている。

## 5. 安全性指標再考

(1) 目的

安全性指標の特性を明らかにすべく、防波堤の滑動安定性に関して各種の計算を試み、一部については傾向が分かった。しかし、直観的な理解が容易でない場合も多く、かつ現実の設計とのかかわりが問われねばならない。そこで簡単なモデルで検討してみる。

(2) 計算

限界状態面  $g$  を次の線形方程式で定義する。

$$g = R - \eta S = 0 \quad (61)$$

ここに  $R$ ; 抵抗力

$S$ ; 外力

$\eta$ ; 係数

安全性指標  $\beta$  は次のようになる。

$$\beta = \frac{m_R - \eta m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \eta^2 \sigma_S^2}} \quad (62)$$

設計に用いる特性値を次のように定義する。

$$R = m_R - k_R \sigma_R \quad (63)$$

$$S = m_S + k_S \sigma_S \quad (64)$$

ここに  $k_R, k_S$ ; 抵抗、外力の特性値を定める係数

抵抗は小さ目に、外力は大き目に設計用の特性値を定めることが設計実務の常であるから、上記の設定は許される。これらを安全性指標の関係式(62)に代入する。

$$\beta = \frac{R + k_R \sigma_R - \eta(S - k_S \sigma_S)}{\sqrt{\sigma_R^2 + \eta^2 \sigma_S^2}} = \frac{k_R \sigma_R + \eta k_S \sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \eta^2 \sigma_S^2}} \quad (65)$$

$R, S$  は限界状態面上にあるから、式(61)を用いている。

安全率レベルの安全性指標  $\beta_s$  は、 $\eta$  に安全率  $F_s$  を代入する。

$$\beta_s = \frac{k_R \sigma_R + F_s k_S \sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + F_s^2 \sigma_S^2}} \quad (66)$$

破壊レベルの安全性指標  $\beta_U$  は、 $\eta$  に1を代入する。

$$\beta_U = \frac{k_R \sigma_R + k_{SU} \sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (67)$$

ここで、

$$g = R - F_s S = R - S_U = 0 \quad (68)$$

$$\bar{S} + k_{SU} \sigma_S = F_s (\bar{S} + k_S \sigma_S)$$

$$\therefore k_{SU} = F_s k_S + (F_s - 1) \bar{S} / \sigma_S \quad (69)$$

ここに、 $U$ ；破壊レベルを示す添字

### (3) 検討

i) 安全性指標を式の構成から見ると、特性値を定める係数を標準偏差で一種の荷重平均をしている。これは安全性指標の定義が、安全性の余裕の特性値を定める係数であるから理にかなっている。一方、安全性指標が、抵抗力と外力の特性値を定める係数の妥協点で定まることは直観になじむ。

ii) 設計用の特性値は安全率の計算の場合も定めるから標準偏差が安全性指標に固有のものとなる。抵抗も外力も絶対値が安全性指標の計算に不要なのは、安全性が差あるいは比といった相対的値で示されるためであろう。

iii) 安全率レベルの安全性指標が、安全率の変化をあまり反映しないのは、分子と分母の両方に入っているため効果が相殺されるためであろう。

iv) 破壊レベルの安全性指標は、分子のみに安全率を含むため安全率の変化と相関が強い。また分母には安全率が含まれないため安全率レベルの計算式の分母の値より小さくなり、分子が  $k_{SU}$  から分かるように、安全率に相関の強い項が安全率レベルの計算式の値より増えているため、破壊レベルの安全性指標は安全率の変化をやや強めた形で表している。

v) 確率的な考慮としては、設計用の特性値を定める段階で入ってくる。

vi) 抵抗力の変動が少なく定数として扱え、外力はランダムであるなら、安全性指標は外力の特性値を定める係数であるから、もはや安全性指標は不要で、外力の特性値を慎重に定めれば良い。

vii) 設計用の特性値は、設計変数の分布から生起確率を考慮して定めることができ、標準偏差も分布から定められる。したがって、設計変数の分布が定めれば安全性指標は計算できる。

### (4) 円形滑りの安全性指標の考察

#### 1) 目的

限界状態面が安全性指標に影響を及ぼすことが分かっ

たが、ここでは全く異なる系を考え、どの程度の安全性指標になるか調べ、対象の構造、力学系の相違による安全性指標変化の参考に供する。

#### ii) 計算

円形滑りが特に問題となるのは粘土地盤であるから、ここでは地層はすべて粘土地盤とする。単純に円形滑りの安全率を次のように定式化する。

$$F_s = \frac{rCl}{MA} \quad (70)$$

ここに、 $r$ ：半径

$l$ ：円弧全長

$C$ ：全円弧にわたり換算した粘土のせん断強度

$MA$ ：機動モーメント

安全率  $F = 1$  で破壊するとして、ランダム変数は粘土のせん断強度のみとし安全率を用いて安全性指標を次のとおり定義する。

$$\beta = \frac{m_F - 1}{\sigma_F} = \frac{1 - 1/m_F}{V_F} \quad (71)$$

$$V_F = \frac{\sigma_C}{m_C} = V_C$$

ここに、 $m_F$ ：安全率の平均値

$\sigma_F$ ：安全率の標準偏差

$V_F$ ：安全率の変動係数

$m_C$ ：粘土のせん断強度の平均値

$\sigma_C$ ：粘土のせん断強度の標準偏差

$V_C$ ：粘土のせん断強度の変動係数

式(71)によって安全性指標の値を計算した結果を次表と図-41に示している。

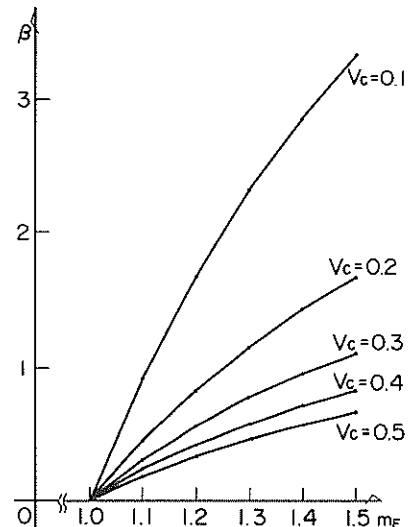


図-41 円形滑りの安全率と安全性指標の関係



表一2 円形滑りの安全性指標  $\beta$

$V_c$ \ $m_F$	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0.1	0	0.909	1.67	2.31	2.86	3.33
0.2	0	0.455	0.833	1.15	1.43	1.67
0.3	0	0.303	0.556	0.769	0.952	1.11
0.4	0	0.227	0.417	0.577	0.714	0.833
0.5	0	0.182	0.333	0.462	0.571	0.667

iii) 検 討

円形滑りの解析では、粘土のせん断強度の平均的な値を計算に用いることも多いから、安全率の平均値はほぼ通常見られる円形滑りの安全率とみなしてよい。設計時に粘土のせん断強度をやや弱い目に評価する場合は、粘土のせん断強度の平均値を少し小さくとることになる。

表一2で注目すべきことは、粘土のせん断強度の変動係数が一定のときは安全率が大きくなるにつれて、安全性指標も大きくなるのは当然であるが、変動係数の値が大きくなれば、安全率が大きくても安全性指標が小さくなることである。

防波堤の場合は、外力のランダム性が大きい、円形滑りの場合は、抵抗のランダム性が大きい事例であり、系は異なるが同様な方法で安全性指標が計算できる。

設計用の円形滑りの計算は、詳細な計算を要し、粘土のせん断強度の平均値、標準偏差を具体的に定める必要があるが、オーダーの議論としてはほぼ上記でとらえている。粘土地盤だけで検討したが、砂地盤が含まれる場合は、砂の内部摩擦角の変動係数は粘土のせん断強度の変動係数よりかなり小さいので、複合された変動係数としては粘土地盤だけより小さくなり、安全性指標が大きくなる方へ寄与する。防波堤の滑動安定性の場合に比べて、安全性指標の値は小さい。

(5) 破壊確立

限界状態面を表す式の値の分布関係が分かれば、安全性指標を用いて破壊確率が求められる。目安を得るため、ここでは正規分布を仮定し式(12)より破壊確率を求め、次表に整理する。

表一3 破壊確率

$\beta$	0	1	2	3	4	5
$P_F$	0.5	0.1587	0.0228	0.0013	$3.17 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-7}$

安全性指標が1変わると破壊確率の桁が変わるから、安全性指標の少しの変化が破壊確率に拡大して出ることになる。

表一3によれば、防波堤の安全性指標が2の近傍であると見れば、破壊確率は $10^{-6}$ のオーダーであり、円形滑り

は何割のオーダーであり1桁大きい。橋等は防波堤より1桁以上小さな破壊確率である。

表一3は破壊レベルの限界状態面による安全性指標に対し破壊確率が定まることを示しており、他の限界状態面については、同様にその限界状態が生ずる確率を安全性指標を用いて求められる。例えば安全率レベルの安全性指標からは、安全率レベルの限界状態が生ずる確率が得られる。

6. あとがき

信頼性理論を構造物の全体安定、ここでは防波堤の滑動安定性に適用している。安全性の評価方法として安全性指標を用い、それを理解するために各種の感度分析を行っている。モデル防波堤による計算結果から次の事項が明らかとなっている。

- 1) 安全性指標は安全率と異なる挙動をする。
- 2) 安全性の基本である外力と抵抗力の関係から安全性指標は定まり、抵抗力が大きければ大きな値を取る。従来の常識にはぼかっている。
- 3) 安全性指標は設計変数の平均値及び標準偏差の影響を受ける。感度は設計変数により異なり、波高、ケーソン重量が及ぼす影響は大である。
- 4) 安全性指標は限界状態を表す式を線形近似する場合の接点の影響を受ける。安全性指標の最小値を与える接点は一般に設計値として良い。限界状態面の非線形性、平均値と接点の大小関係、距離から直観的に理解困難な結果を得ることがある。
- 5) 安全性指標は、対象として考える限界状態の定義に応じて異なる値をとる。限界状態がサービスレベルか極限レベルかにより変わる。

また、安全性指標は限界状態であるか否かを判定する外力の算定式に影響され、広井式、黒田式、合田式により異なる値が得られる。

現段階では、安全性指標の絶対値の議論は困難であり、設計を相対的に比較判断する資料として価値がある。

(1985年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) CEB : Manuel "Sécurité des Structures", Bulletin D'Information No. 127~128, 1980, 658p.
- 2) E. Leporati : The assessment of structural safety, Series in Cement and Concrete Research, Research Studies Press, 1977, 133p.
- 3) 前掲1).
- 4) 福井正幸, 他: 鋼直杭式栈橋の極限状態を考慮した

- 解析の自動化, 港湾技研資料No.447, 1983年9月, 24p.
- 5) 土木学会: コンクリート構造の限界状態設計法試案, コンクリート・ライブラリー第48号, 1981年4月, 136p.
- 6) 日本コンクリート会議, プレストレストコンクリート技術協会: コンクリート構造物設計施工国際指針—CEB/FIP 1970年, 鹿島研究所出版会, 1971年4月.
- 7) 尾坂芳夫, 他: 土木構造設計法, 新体系土木工学12, 技報堂, 1981年6月, 165p.
- 8) B. Ellingwood: Safety checking formats for limit states design, *Journal of the Structural Division* Vol. 108 No. ST7, ASCE, July 1982, pp. 1481~1493.
- 9) F. V. Costa: 港湾技術研究所を訪問の際の口頭意見交換, 1983年5月16日.
- 10) 前掲8)
- 11) 前掲2)
- 12) C. E. Pearson (edited): *Handbook of Applied Mathematics*, Van Nostrand, 1983, 1307p.
- 13) 福井正幸, 他: 港湾構造物の最適設計について, 港湾技研資料 No. 406, 1982年3月, 48p.
- 14) 前掲7)
- 15) 本 浩司, 他: 防波堤の設計波力算定式についての比較検討, 港湾技研資料 No. 270, 1977年9月, 60p.
- 16) 前掲2)

### 記 号 一 覧 表

$B$	: ケーソン幅
$C$	: 全円弧にわたり換算した粘土のせん断強度
$D$	: マウンド厚さ
$E[ ]$	: 平均
$F_H( )$	: 波高の確率分布関数
$F_R( )$	: 抵抗の確率分布関数
$F_s$	: 安全率
$F_{s1}$	: 広井式による安全率
$F_{s2}$	: 黒田式     "
$F_{s3}$	: 合田式     "
$f_H( )$	: 波高の確率密度関数
$f_R( )$	: 抵抗の確率密度関数
$f_s( )$	: 荷重の確率密度関数
$f_z( )$	: 安全性の余裕の確率密度関数
$G( )$	: $x_i$ から $U_i$ に変換した関数 $g$
$g( )$	: 破壊面
$H$	: 波高
$H_L$	: 波高の展開点
$H'_0$	: 換算沖波

$h_i( )$	: 制約条件
$i$	: 海底勾配
$k_R$	: 抵抗の特性値を定める係数
$k_s$	: 荷重の特性値を定める係数
$k_{SV}$	: 破壊レベルの荷重の特性値を定める係数
$l$	: 円弧全長
$MA$	: 円形滑りの機動モーメント
$m_c$	: 粘土のせん断強度の平均値
$m_F$	: 安全率の平均値
$m_g$	: 関数 $g$ の平均値
$m_H$	: 波高の平均値
$m_R$	: 抵抗の平均値
$m_s$	: 荷重の平均値
$m_{S_i}$	: 荷重 $S_i$ の平均値
$m_w$	: ケーソン重量の平均値
$m_z$	: 安全性の余裕の平均値
$m_c$	: 潮位の平均値
$m_\mu$	: 摩擦係数の平均値
$\min( )$	: 最小値
$\max( )$	: 最大値
$\mathfrak{m}$	: 成分 $-n_i$ のベクトル
$n_i$	: 展開面に垂直な方向余弦
$P$	: 波力
$P[ ]$	: 条件確率
$P_F$	: 破壊確率
$Q( )$	: 無制約の新しい目的関数
$q( )$	: 目的関数
$R$	: 抵抗
$R_n$	: 抵抗特性値
$r$	: 円形滑りの半径
$S$	: 荷重
$S[ ]$	: 標準偏差
$S_{n_i}$	: 荷重 $S_i$ の特性値
$T$	: 周期
$\mathfrak{U}$	: 成分 $U_i$ のベクトル
$\mathfrak{U}_L$	: 成分 $U'_i$ のベクトル
$U_i$	: $x_i$ の正規化変数
$U'_i$	: $G$ の展開点
$V[ ]$	: 分散
$V_c$	: 粘土のせん断強度の変動係数
$V_F$	: 安全率の変動係数
$V_g$	: 関数 $g$ の分散
$V_{S_i}$	: 荷重 $S_i$ の変動係数
$V_R$	: 抵抗の変動係数
$V_z$	: 安全性の余裕の変動係数

$W$  : ケーソン重量  
 $W_L$  : ケーソン重量の展開点  
 $W_r$  : 中詰後のケーソン重量 / 標準重量  
 $\mathbb{X}$  : 設計関連変数のベクトル  
 $\mathbb{X}_L$  : 設計関連変数の展開点のベクトル  
 $[ ]_{x_L}$  : 展開点の値で評価  
 $x_i$  : 設計関連変数  
 $x_i^t$  : 設計関連変数の展開点  
 $Z$  : 安全性の余裕  
 $\| \|$  : ベクトルの絶対値  
 $\cdot$  : ベクトルの内積  
 $\alpha, \alpha'$  : 線形化係数  
 $\beta$  : 安全性指標  
 $\beta_1$  : 広井式による安全性指標  
 $\beta_2$  : 黒田式 " "  
 $\beta_3$  : 合田式 " "  
 $\beta_{\min}$  : 安全性指標の最小値  
 $\beta_u$  : 破壊レベルの安全性指標  
 $\Gamma_k$  : ペナルティ係数  
 $r_i$  : 荷重  $S_i$  に対する荷重係数  
 $r_m$  : 材料の安全率  
 $\zeta$  : 潮位  
 $\zeta_L$  : 潮位の展開点  
 $\eta$  : 係数  
 $\theta$  : 防波堤に垂直方向から計った波向の角度  
 $\theta_L$  :  $\theta$  と  $\theta_L$  のなす角度  
 $\lambda, \nu$  : 定数  
 $\mu$  : 摩擦係数  
 $\mu_L$  : 摩擦係数の展開点  
 $\sigma_a$  : 許容応力度  
 $\sigma_c$  : 粘土のせん断強度の標準偏差  
 $\sigma_F$  : 安全率の標準偏差  
 $\sigma_g$  : 関数  $g$  の標準偏差  
 $\sigma_H$  : 波高の標準偏差  
 $\sigma_R$  : 抵抗の標準偏差  
 $\sigma_r$  : 中詰後のケーソン重量の標準偏差 / 標準重量  
 $\sigma_S$  : 荷重の標準偏差  
 $\sigma_{S_i}$  : 荷重  $S_i$  の標準偏差  
 $\sigma_{u_i}$  :  $u_i$  の標準偏差  
 $\sigma_w$  : ケーソン重量の標準偏差  
 $\sigma_{x_i}$  : 設計関連変数  $x_i$  の標準偏差  
 $\sigma_y$  : 降伏応力度  
 $\sigma_z$  : 安全性の余裕の標準偏差  
 $\sigma_\zeta$  : 潮位の標準偏差

$\sigma_\mu$  : 摩擦係数の標準偏差  
 $\phi$  : 標準正規分布関数  
 $\phi$  : 抵抗係数  
 $\psi(\ )$  : 関数  $g$  の確率分布関数

## 付録 1 : 安全性指標の計算式

具体的に防波堤の滑動について安全性指標を計算する場合の計算式を整理する。

### 1. 一般

限界状態面は式(53)による。

$$g = \mu W - F_s p = \mu W - F_s p - \mu U \quad (A-1)$$

ケーソン水中重量をケーソン空中重量と揚圧力に分解している。各設計変数に関して偏微分をする。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial \mu} &= W - U \\ \frac{\partial g}{\partial W} &= \mu \\ \frac{\partial g}{\partial H} &= -F_s \frac{\partial p}{\partial H} - \mu \frac{\partial U}{\partial H} \\ \frac{\partial g}{\partial \zeta} &= -F_s \frac{\partial p}{\partial \zeta} - \mu \frac{\partial U}{\partial \zeta} \end{aligned} \right\} (A-2)$$

各設計変数の平均値  $\bar{\mathbb{X}}$ , 標準偏差  $\sigma_{x_i}$ , および展開点  $\mathbb{X}_L$  の値と式 (A-2) の結果を式(55)に代入すると, 安全性指標の値が得られる。安全性指標は式(55)による。

$$\beta = \frac{g(\bar{\mathbb{X}}_L) + \sum_1^k \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{x_L} (\bar{x}_i - x_i^t)}{\sqrt{\sum_1^k \left[ \frac{\partial g}{\partial x_i} \right]_{x_L}^2 \sigma_{x_i}^2}} \quad (A-3)$$

### 2. 広井式 $d < 2H_{1/3}$

式 (A-2) の初めの 2 式は微分を含まないから, 後の 2 式について波圧公式を用いて求めてみる。

#### (1) 波力

$$p = 1.5 w_0 H h^t \cos^2 \theta \quad (A-4)$$

$$h^t = h' + h_c \quad h_c < 1.25 H$$

$$h^t = h' + 1.25 H \quad h_c \geq 1.25 H$$

#### (2) 揚圧力

$$U = 1.25 w_0 HB/2 = 0.625 w_0 HB \quad (A-5)$$

#### (3) 偏微分係数

a) 波力

$$\frac{\partial p}{\partial H} = 1.5 w_0 h' \cos^2 \theta \quad (\text{A-6})$$

潮位については、実水深は基準面下水深+潮位である。

$$h = h' + \zeta \quad (\text{A-7})$$

基準面下水深を定数と考える。

$$\frac{\partial h}{\partial \zeta} = 1 \quad (\text{A-8})$$

$$\frac{\partial p}{\partial \zeta} = \frac{\partial p}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \zeta} = \frac{\partial p}{\partial h} = 1.5 w_0 H \cos^2 \theta \quad (\text{A-9})$$

b) 揚圧力

$$\frac{\partial U}{\partial H} = 0.625 w_0 B \quad (\text{A-10})$$

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} = 0 \quad (\text{A-11})$$

以上より式 (A-6), (A-9), (A-10), (A-11) を用いて安定性指標の計算ができる。

### 3. 黒田式 $d \geq 2H_{1/3}$

(1) 波力

式が長くなるため置き換えを用いる。

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= (p_2 + w_0 h) \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} \\ p_2 &= \frac{w_0 H}{\cosh(2\pi h/L)} \\ \delta_0 &= \frac{\pi H^2}{L} \coth \frac{2\pi h}{L} \end{aligned} \right\} (\text{A-12})$$

a)  $h_c > H + \delta_0$

$$\left. \begin{aligned} p_3 &= \left( \frac{H}{2} + \delta_0 \right) \frac{p_1}{H + \delta_0} \\ p_4 &= p_1 \left( 1 - \frac{H}{2h} \right) + p_2 \frac{H}{2h} \\ p_5 &= p_1 \left( 1 - \frac{h'}{h} \right) + p_2 \frac{h'}{h} \end{aligned} \right\} (\text{A-13})$$

偏微分係数を求め、潮位を分離し基準面下の深さを定数とする。

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_1}{\partial H} &= \frac{\partial p_2}{\partial H} \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} + \left( \frac{p_1}{H + \delta_0} - \frac{p_1}{h + H + \delta_0} \right) \\ &\quad \left( 1 + \frac{\partial \delta_0}{\partial H} \right) \\ \frac{\partial p_1}{\partial \zeta} &= \left( \frac{\partial p_2}{\partial \zeta} + w_0 \right) \frac{H + \delta_0}{h + H + \delta_0} - \frac{p_1}{h + H + \delta_0} \left( 1 + \frac{\partial \delta_0}{\partial \zeta} \right) \\ &\quad + \frac{p_1}{H + \delta_0} \frac{\partial \delta_0}{\partial \zeta} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial H} = \frac{w_0}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial \zeta} = \frac{2\pi w_0 H}{L} \frac{\tanh(2\pi h/L)}{\cosh(2\pi h/L)}$$

$$\frac{\partial p_3}{\partial H} = \left( \frac{1}{2} + \frac{\partial \delta_0}{\partial H} \right) \frac{p_1}{H + \delta_0} + \frac{p_2}{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial H} - \frac{p_2}{H + \delta_0} \left( 1 + \frac{\partial \delta_0}{\partial H} \right)$$

$$\frac{\partial p_3}{\partial \zeta} = \frac{p_1 - p_2}{H + \delta_0} \frac{\partial \delta_0}{\partial \zeta} + \frac{p_2}{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial \zeta}$$

$$\frac{\partial p_4}{\partial H} = \frac{\partial p_1}{\partial H} \left( 1 + \frac{H}{2h} \right) - \frac{p_1}{2h} + \frac{\partial p_2}{\partial H} \frac{H}{2h} + \frac{p_2}{2h}$$

$$\frac{\partial p_4}{\partial \zeta} = \frac{\partial p_1}{\partial \zeta} \left( 1 - \frac{H}{2h} \right) + p_1 \frac{H}{2h^2} + \frac{\partial p_2}{\partial \zeta} \frac{H}{2h} - p_2 \frac{H}{2h^2}$$

$$\frac{\partial p_5}{\partial H} = \frac{\partial p_1}{\partial H} \left( 1 - \frac{h'}{h} \right) + \frac{\partial p_2}{\partial H} \frac{h'}{h}$$

$p_5(h, h')$  について、潮位を分離して考える。

$$h = h_0 + \zeta, \quad h' = h'_0 + \zeta$$

$$\frac{\partial h}{\partial \zeta} = 1, \quad \frac{\partial h'}{\partial \zeta} = 1$$

基準面以下の水深を定数とする。

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_5}{\partial \zeta} &= \frac{\partial p_5}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \zeta} + \frac{\partial p_5}{\partial h'} \frac{\partial h'}{\partial \zeta} = \frac{\partial p_5}{\partial h} + \frac{\partial p_5}{\partial h'} \\ &= \frac{\partial p_1}{\partial \zeta} \left( 1 - \frac{h'}{h} \right) + \frac{\partial p_2}{\partial \zeta} \frac{h'}{h} - \frac{p_1 - p_2}{h} \left( 1 - \frac{h'}{h} \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \delta_0}{\partial H} = \frac{2\pi H}{L} \coth \frac{2\pi h}{L}$$

$$\frac{\partial \delta_0}{\partial \zeta} = - \frac{2\pi^2 H^2}{L^2 \sinh^2 \frac{2\pi h}{L}}$$

波力を4つの部分に分解する。

$$p = \sum_1^4 A_i \quad (\text{A-14})$$

$$A_1 = \frac{p_2}{2} \left( \frac{H}{2} + \delta_0 \right)$$

$$A_2 = 1.5 w_0 H^2 \cos^2 \theta$$

$$A_3 = \frac{h' - H/2}{2} p_4$$

$$A_4 = \frac{h' - H/2}{2} p_5$$

偏微分する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial H} &= \sum_1^4 \frac{\partial A_i}{\partial H} \\ \frac{\partial p}{\partial \zeta} &= \sum_1^4 \frac{\partial A_i}{\partial \zeta} \end{aligned} \right\} \text{(A-15)}$$

$$\frac{\partial A_1}{\partial H} = \frac{1}{2} \frac{\partial p_3}{\partial H} \left( \frac{H}{2} + \delta_0 \right) + \frac{p_3}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{\partial \delta_0}{\partial H} \right)$$

$$\frac{\partial A_1}{\partial \zeta} = \frac{1}{2} \frac{\partial p_3}{\partial \zeta} \left( \frac{H}{2} + \delta_0 \right) + \frac{p_3}{2} \frac{\partial \delta_0}{\partial \zeta}$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial H} = 3w_0 H \cos^2 \theta$$

$$\frac{\partial A_2}{\partial \zeta} = 0$$

$$\frac{\partial A_3}{\partial H} = -\frac{p_4}{4} + \frac{h' - H/2}{2} \frac{\partial p_4}{\partial H}$$

$$\frac{\partial A_3}{\partial \zeta} = \frac{h' - H/2}{2} \frac{\partial p_4}{\partial \zeta}$$

$$\frac{\partial A_4}{\partial H} = -\frac{p_5}{4} + \frac{h' - H/2}{2} \frac{\partial p_5}{\partial H}$$

$$\frac{\partial A_4}{\partial \zeta} = \frac{h' - H/2}{2} \frac{\partial p_5}{\partial \zeta}$$

b)  $H/2 < h_c \leq H + \delta_0$

$$p_6 = \frac{H + \delta_0 - h_c}{H + \delta_0} p_1$$

$$\frac{\partial p_6}{\partial H} = \frac{p_1 - p_6}{H + \delta_0} \left( 1 + \frac{\partial \delta_0}{\partial H} \right) + \frac{p_6}{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial H}$$

$$\frac{\partial p_6}{\partial \zeta} = \frac{p_1 - p_6}{H + \delta_0} \frac{\partial \delta_0}{\partial \zeta} + \frac{p_6}{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial \zeta}$$

波力を次のとおりとする。

$$p = B_1 + \sum_2^4 A_i \quad \text{(A-16)}$$

$$B_1 = \frac{p_6 + p_3}{2} \left( h_c - \frac{H}{2} \right)$$

偏微分する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial H} &= \frac{\partial B_1}{\partial H} + \sum_2^4 \frac{\partial A_i}{\partial H} \\ \frac{\partial p}{\partial \zeta} &= \frac{\partial B_1}{\partial \zeta} + \sum_2^4 \frac{\partial A_i}{\partial \zeta} \end{aligned} \right\} \text{(A-17)}$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial H} = \left( \frac{\partial p_6}{\partial H} + \frac{\partial p_3}{\partial H} \right) \frac{h_c - H/2}{2} - \frac{p_6 + p_3}{4}$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial \zeta} = \left( \frac{\partial p_6}{\partial \zeta} + \frac{\partial p_3}{\partial \zeta} \right) \frac{h_c - H/2}{2}$$

c)  $0 < h_c \leq H/2$

波力を次のとおりとする。

$$p = C_2 + \sum_3^4 A_i \quad \text{(A-18)}$$

偏微分する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial H} &= \frac{\partial C_2}{\partial H} + \sum_3^4 \frac{\partial A_i}{\partial H} \\ \frac{\partial p}{\partial \zeta} &= \frac{\partial C_2}{\partial \zeta} + \sum_3^4 \frac{\partial A_i}{\partial \zeta} \end{aligned} \right\} \text{(A-19)}$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial H} = 1.5w_0 (h_c + H) \cos^2 \theta$$

$$\frac{\partial C_2}{\partial \zeta} = 0$$

(2) 揚圧力

$$U = B p_5 / 2$$

$$\frac{\partial U}{\partial H} = \frac{B}{2} \frac{\partial p_5}{\partial H} \quad \text{(A-20)}$$

$$\frac{\partial U}{\partial \zeta} = \frac{B}{2} \frac{\partial p_5}{\partial \zeta}$$

#### 4. 合田式

式が長くなるため置き換えを用いる。

(1) 波力

$$\eta^* = 1.5H(1 + \cos \theta) / 2$$

$$= 0.75H(1 + \cos \theta)$$

$$p_1 = (\alpha_1 + \alpha_2) w_0 H (1 + \cos \theta) / 2$$

$$p_2 = \frac{p_1}{\cosh(2\pi h / L)}$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h / L}{\sinh(4\pi h / L)} \right\}^2 \quad \text{(A-21)}$$

$$\alpha_2 = \min \left[ \frac{h_b - d}{3h_b} \left( \frac{H}{d} \right)^2, \frac{2d}{H} \right] \cos^2 \theta$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h / L)} \right\}$$

$$p_4 = \alpha_4 p_1$$

$$\alpha_4 = 1 - \frac{h_c}{\eta^*}$$

a)  $\eta^* > h_c$

波力は次のとおりである。

$$p = p_1 \{ (h_c + h') + \alpha_1 h_c + \alpha_3 h' \} / 2 \quad (\text{A-22})$$

偏微分する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial H} &= \frac{1}{2} \frac{\partial p_1}{\partial H} \{ (h_c + h') + \alpha_1 h_c + \alpha_3 h' \} \\ &\quad + \frac{p_1 h_c}{2} \frac{\partial \alpha_1}{\partial H} \\ \frac{\partial p}{\partial \zeta} &= \frac{1}{2} \frac{\partial p_1}{\partial \zeta} \{ (h_c + h') + \alpha_1 h_c + \alpha_3 h' \} \\ &\quad + \frac{p_1}{2} \left( 1 + \frac{\partial \alpha_3}{\partial \zeta} h' + \alpha_3 \right) \end{aligned} \right\} (\text{A-23})$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial H} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta) w_0 \left\{ (\alpha_1 + \alpha_2) + H \frac{\partial \alpha_2}{\partial H} \right\}$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial \zeta} = \frac{1}{2} (1 + \cos \theta) w_0 H \left( \frac{\partial \alpha_1}{\partial \zeta} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \zeta} \right)$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial H} = \min \left[ \frac{2(h_b - d)H}{3h_b d^2}, \frac{2d}{H^2} \right] \cos^2 \theta$$

$\alpha_2$  の選択に合わせて項を定める。

潮位を分離し、基準面下の深さを定数とする。

$$d = d_0 + \zeta, \quad h_b = h_{b0} + \zeta$$

$$\frac{\partial d}{\partial \zeta} = 1, \quad \frac{\partial h_b}{\partial \zeta} = 1$$

$$\frac{\partial \alpha_2}{\partial \zeta} = \min \left[ -\frac{h_b - d}{3h_b^2} \left( \frac{H}{d} \right)^2 - \frac{2(h_b - d)H^2}{3h_b d^3}, \frac{2}{H} \right] \cos^2 \theta$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial H} = \frac{h_c}{0.75(1 + \cos \theta)H^2}$$

$$\frac{\partial \alpha_1}{\partial \zeta} = \frac{(4\pi/L)^2 h}{\sinh^2(4\pi h/L)} \left\{ 1 - \frac{4\pi h}{L} \coth h \left( \frac{4\pi h}{L} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial \alpha_3}{\partial \zeta} = -\frac{1}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\}$$

$$+ \frac{h'}{h^2} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\}$$

$$- \frac{2\pi}{L} \frac{h' \tanh(2\pi h/L)}{h \cosh(2\pi h/L)}$$

b)  $\eta^* \leq h_c$

波力は次のとおりである。

$$p = p_1 \{ \eta^* + (1 + \alpha_3)h' \} / 2 \quad (\text{A-24})$$

偏微分する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial H} &= \frac{p}{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial H} + \frac{p_1}{2} \frac{\partial \eta^*}{\partial H} \\ \frac{\partial p}{\partial \zeta} &= \frac{p}{p_1} \frac{\partial p_1}{\partial \zeta} + \frac{p_1}{2} \left( \frac{\partial \alpha_3}{\partial \zeta} h' + 1 + \alpha_3 \right) \end{aligned} \right\} (\text{A-25})$$

$$\frac{\partial \eta^*}{\partial H} = 0.75(1 + \cos \theta)$$

(2) 揚圧力

揚圧力は次のとおりである。

$$U = \alpha_1 \alpha_3 w_0 H (1 + \cos \theta) / 2 \quad (\text{A-26})$$

偏微分する。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial H} &= \frac{1}{2} (1 + \cos \theta) \alpha_1 \alpha_3 w_0 \\ \frac{\partial U}{\partial \zeta} &= \frac{1}{2} (1 + \cos \theta) \\ &\quad \left( \frac{\partial \alpha_1}{\partial \zeta} \alpha_3 + \alpha_1 \frac{\partial \alpha_3}{\partial \zeta} \right) w_0 H \end{aligned} \right\} (\text{A-27})$$

#### 記 号 一 覧

- $A_i$  : 波力の構成部分
- $B_i$  : 波力の構成部分
- $C_2$  : 波力の構成部分
- $d$  : 前面被覆工夫端水深
- $h$  : 実水深 = 基準面下水深 + 潮位
- $h_b$  : 直立壁前面から沖へ有義波高 5 倍の水深
- $h_c$  : ケーソン天端高さ
- $h'$  : 波を受ける高さ
- $h'$  : 基準面下のケーソン深さ
- $L$  : 波長
- $P_i$  : 波圧応力
- $U$  : 揚圧力
- $w_0$  : 海水の単位体積重量
- $\alpha_i$  : 合田式の波圧公式係数
- $\eta^*$  : 波圧の作用高

## 付録 2 : 安全性理論に関する欧文文献集

### A. General

- A-1) E. Leporati: The Assessment of Structural Safety, Series in Cement and Concrete Research, Research Studies Press, 1979, 133p.
- A-2) G. Augusti et al: Probabilistic Methods in Structural Engineering, Chapman and Hall, 1984, 556p.
- A-3) P. Thoft-Christensen and M. J. Baker: Structural Reliability Theory and Its Applications, Springer-Verlag, 1982, 267p.
- A-4) CEB: Manual "Sécurité des Structures", Bulletin D'Information No. 127-128, 1980, 658p.
- A-5) CEB-FIP: Regles Unifiees Communes aux Differents Types D'Ouvrages et de Materiaux, Code-Modele CEB-FIP pour les Structures en Beton, 3éédition, 1978, 101p. & 336p.
- A-6) CEB: Structural Safety, Bulletin D'Information No. 112, 1976, 288p.
- A-7) M. Shinozuka and J. T. P. Yao (edited): Probabilistic Methods in Structural Engineering, ASCE, 1981, 409p.
- A-8) D. I. Blockley: The Nature of Structural Design and Safety, Ellis Horwood Limited, 1980, 365p.
- A-9) G. C. Hart: Uncertainty Analysis, Loads, and Safety in Structural Engineering, Prentice-Hall, 1982, 224p.
- A-10) M. E. Harr: Mechanics of Particulate Media, McGraw-Hill, 1977, 543p.
- A-11) J.-P. Magnan et S. Bagherly: Statistiques et probabilités en mécanique des sols Etat des connaissances, Rapport de recherche LPC No. 109, LCPC, 1982, 192p.
- A-12) S. Bagherly et J.-P. Magnan: Analyse probabiliste de la stabilité et des tassements des remblais du site expérimental de Cubzac-les-Ponts, Rapport de recherche LPC No. 122, LCPC, 1983, 71p.

### B. Theory

- B-1) M. Shinozuka: Basic Analysis of Structural Safety, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109,

No. 3, ASCE March 1983, pp. 721~740.

- B-2) A. H.-S. Ang, and C. A. Cornell: Reliability Bases of Structural Safety and Design, *Journal of the Structural Division*, Vol. 100, No. ST9, ASCE, September 1974, pp. 1755~1769.
- B-3) B. Ellingwood: Safety Checking Formats for limit States Design, *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. ST7, ASCE, July 1982, pp. 1481~1493.
- B-4) E. Paloheimo and M. Hannus: Structural Design Based on Weighted Fractiles, *Journal of the Structural Division*, Vol. 100, No. ST7, ASCE, July, 1974, pp. 1367~1378.
- B-5) B. Fiessler, H.-J. Neumann, and R. Rackwitz: Quadratic Limit States in Structural Reliability, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 105, No. EM4, ASCE, August, 1979, pp. 661~676.
- B-6) ir. R. D'HAVE' et ir, P. SPEHL: Principes Generaux De Determination De La Securite Et De L'aptitude Au Service Des Structures, Annales Des Travaux Publics De Belgique, No. 1, 1984, pp. 47~66.
- B-7) A. M. Freudenthal, J. M. Garrelts, and M. Shinozuka: The Analysis of Structural Safety, *Journal of the Structural Division*, Vol. 92, No. ST1, ASCE, February, 1966, pp. 267~325.
- B-8) C. A. Cornell: Bounds on the Reliability of Structural Systems, *Journal of Structural Division*, Vol. 93, No. ST1, ASCE, February 1967, pp. 171~199.
- B-9) N. C. Lind: Consistent Partial Safety Factors, *Journal of the Structural Division*, Vol. 97, No. ST6 ASCE, June, 1971, pp. 1651~1669.
- B-10) A. M. Hasofer and N. C. Lind: Exact and Invariant Second-Moment Code Format, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 100, No. EM1, ASCE, February, 1974, pp. 111~121.
- B-11) N. C. Lind: Optional Reliability Analysis by Fast Convolution, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 105, No. EM3, ASCE, June, 1979, pp. 447~452.
- B-12) A. H.-S. Ang and M. Amin: Reliability of Structures and Structural Systems, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 94, No. EM2, ASCE, April, 1968, pp. 671~691.

### C. Fuzzy

C-1) C. B. Brown : The Merging of Fuzzy and Crisp Information, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 106, No. EM1, ASCE, February 1980, pp. 123~133.

C-2) J. T. P. Yao : Damage Assessment of Existing Structures, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 106, No. EM4, ASCE, August, 1980, pp. 785~799.

C-3) C. B. Brown and J. T. P. Yao : Fuzzy Sets and Structural Engineering, *Journal of Structural Division*, Vol. 109, No. 5, ASCE, May, 1983, pp. 1211~1225.

### D. System

D-1) F. Moses and J. D. Stevenson : Reliability-Based Structural Design, *Journal of the Structural Division*, Vol. 96, No. ST2, ASCE, February, 1970, pp. 221~244.

D-2) O. Ditlevsen : System Reliability Bounding by Conditioning, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 108, No. EM5, ASCE, October, 1982, pp. 708~718.

D-3) R. E. Melchers : Reliability of Parallel Structural Systems, *Journal of the Structural Engineering* Vol. 109, No. 11, ASCE, November, 1983, pp. 2651~2665.

D-4) M. Hohenbchler and R. Rackwitz : Reliability of Parallel Systems under imposed Uniform Strain, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 109, No. 3, ASCE, June, 1983, pp. 896~907.

D-5) M. Grigoriu : Reliability of Chain and Ductile-Parallel Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 109, No. 5, ASCE, October, 1983, pp. 1175~1185.

D-6) M. Grigoriu and N. C. Lind : Probabilistic Models for Prototype Testing, *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. ST7, ASCE, July, 1982, pp. 1511~1525.

D-7) P. H. Madser and N. C. Lind : Bayesian Approach to Prototype Testing, *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. ST4, ASCE, April, 1982, pp. 753~770.

### E. Other theory

E-1) D. Veneziano : New Index Reliability, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 105, No. EM2, ASCE, April, 1979, pp. 277~296.

E-2) C. B. Brown : Entropy Constructed Probabilities, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 106, No. EM4, ASCE, August, 1980, pp. 633~640.

### F. Load

F-1) T. V. Galambors, B. Ellingwood, J. G. MacGregor and C. A. Cornell : Probability Based Load Criteria : Assessment of Current Design Practice, *Journal of the Structure Division*, Vol. 108, No. ST5, ASCE, May, 1982, pp. 959~977.

F-2) B. Ellingwood, J. G. MacGregor, T. V. Galambors and C. A. Cornell : Probability Based Load Criteria : Load Factors and Load Combinations, *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. ST5, ASCE, May, 1982, pp. 978~997.

F-3) R. B. Coroties and W. Y. Tsay : Probabilistic Load Duration Model for Live Loads, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 4, ASCE, April, 1983, pp. 859~874.

F-4) B. Ellingwood et al : Probability of Failure from Abnormal Load, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 4, ASCE, April, 1983, pp. 875~890.

F-5) P. L. Chalk and R. B. Corotis : Probabilistic Model for Design Live Load, *Journal of the Structural Division*, Vol. 106, No. ST10, ASCE, October, 1980, pp. 2017~2033.

F-6) A. D. Kiureghian : Reliability Analysis under Stochastic Loads, *Journal of the Structural Division*, Vol. 106 No. ST2, ASCE, February, 1978, pp. 411~429.

F-7) M. Grigoriu and C. Turkstra : Structural Safety Indices for Repeated Loads, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 104, No. EM4, ASCE, August, 1978, pp. 829~844.

F-8) D. Veneziano : First-Crossing of Second-Moment Random Sequences, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 105 No. EM5,



ASCE, October, 1978, pp. 747~759.

F-9) M. K. Ravindra and T. V. Galambos : Load and Resistance Factor Design for Steel, *Journal of the Structural Division*, Vol. 104, No. 9, ASCE, September, 1978, pp. 1337~1353.

#### G. Application

G-1) B. Ellingwood : Reliability Based Criteria for Reinforced Concrete Design, *Journal of the Structural Division*, Vol. 105, No. ST4, ASCE, April, 1979, pp. 713~727.

G-2) B. R. Ellingwood and A. H.-S. Ang : Risk-Based Evaluation of Design Criteria, *Journal of the Structural Division*, Vol. 100, No. ST9, ASCE, September, 1974, pp. 1771~1788.

G-3) J. Chapon : Considerations sur la recherche de l'optimum économique pour le dimensionnement des ouvrages de protection contre la mer, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1 trim, 1981, pp. 21~38.

G-4) E. Vanmarcke and D. Angelides : Risk Assessment for Offshore Structures A Review, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 2, ASCE, February, 1983, pp. 555~571.

G-5) W. D. Anderson, M. N. Silbert, and J. R. Lloyd : Reliability Procedure for Fixed Offshore Platforms, *Journal of the Structural Division*, Vol. 108, No. ST11, ASCE, November, 1982, pp. 2517~2538.

G-6) T.-Y. Kam, R. B. Corotis and E. C. Rossow : Reliability of Nonlinear Framed Structures, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 7, ASCE, July, 1983, pp. 1585~1601.

G-7) M. Shinozuka and R. Y. Tan : Seismic Reliability of Demanded Concrete Beams, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 7, ASCE, July, 1983, pp. 1617~1634.

G-8) A. M. Nafday and H. Warg : Probabilistic Model of Wave Factors on Cylindrical Pile, *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 109, No. 2, ASCE, May, 1983, pp. 147~163.

G-9) J. R. Stedinger : Confidence Intervals for Design Events, *Journal of Hydraulic Engineering*,

Vol. 109, No. 1, ASCE, January, 1983, pp. 13~27.

G-10) S. Wang and B. Le Mehovte : Duration of Measurements and Long-Term Wave Statistics, *Journal of Waterway, Port Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 109, No. 2, ASCE, May, 1983, pp. 236~249.

G-11) E. Simiu : Aerodynamic Coefficients and Risk-Consistent Design, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 5, ASCE, May, 1983, pp. 1278~1289.

G-12) E. H. Vanmarcke : Reliability of Earth Slopes, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, No. GT11, ASCE, November, 1977, pp. 1247~1265.

G-13) R. A. D'Andrea and D. A. Sangrey : Safety Factors for Probabilistic Slope Design, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 108, No. GT9, ASCE, September, 1982, pp. 1101~1118.

G-14) E. H. Vanmarcke : Probabilistic Modeling of Soil Profiles, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 103, No. GT11, ASCE, November, 1977, pp. 1227~1246.

G-15) J.-L. Chameau and G. W. Clougr : Probabilistic Pore Pressure Analysis for Seismic Loading, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 4, ASCE, April, 1983, pp. 507~524.

G-16) T. S. Ingra and G. B. Baecher : Uncertainty in Bearing Capacity of Sands, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 7, ASCE, July, 1983, pp. 899~914.

G-17) J. M. Duncan and W. N. Houston : Estimating Failure Probabilities for California Levees, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 109, No. 2, ASCE, February, 1983, pp. 260~268.

G-18) R. V. Whitman : Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 110, No. 2, ASCE, February, 1984, pp. 145~188.

G-19) T. H. Wu : Uncertainty, Safety and Decision in Soil Engineering, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 100, No. GT3, ASCE, March, 1974, pp. 329~348.

G-20) F. V. Casta : The Spreading of Damage in Breakwater Armour, *The Dock and Harbour Authority*, March, 1983, pp. 350~351.

G-21) C. J. Turkstra : Choice of Failure Probabilities, *Journal of the Structural Division*, Vol. 93, No. ST6, ASCE, December, 1967, pp. 189 ~ 200.

G-22) M. K. Ravindra, N. C. Lind, and W. Siu : Illustrations of Reliability-Based Design, *Journal of the Structural Division*, Vol. 100, No. ST9, ASCE, September, 1974, pp. 1789~1811.

G-23) J. D. Mettam and J. G. Berry : Factors of Safety for Design of Breakwaters, *The Dock & Harbour Authority*, Feb, 1983, pp. 319~322.

G-24) E. Vanmarcke : Stochastic Finite Element Analysis of Simple Beams, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 109, No. 5, ASCE, October, 1983, pp. 1203~1214.

G-25) The Committee on Reliability of Offshore Structures of the Committee on Structural Safety and Reliability of the Structural Division : Application of Reliability Methods in Design and Analysis of Offshore Platforms, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 109, No. 10, ASCE, October, 1983, pp. 2265~2291.

港湾技研資料 No.540

1985. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社方文社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.