

港 湾 技 研 資 料

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

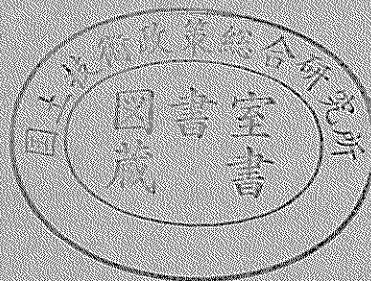
No. 693

Dec.1990

ケーソン式構造物の基本設計の最適化
—拾石マウンドの支持力の新しい計算法の導入と最適化の検討—

中	道	正	人
口	田		登
森	田	博	史
松	井		創

運輸省港湾技術研究所



Optimum Design of Caisson Type Structures

— Application of A New Method for Calculating the Bearing Capacity of Rubble Mounds and Examination of Optimum Design Method —

Masato NAKAMICHI*
Noboru KUCHIDA**
Hirohumi MORITA***
Hajime MATSUI****

Synopsis

The new examining method of bearing capacity for eccentric and inclined loads, which is introduced into "Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan" (Bureau of Ports and Harbours, Ministry of Transport, Oct. 1988), is applied to the optimum design method for composite breakwater which was developed previously. Furthermore, the optimum design method for caisson gravity type quaywall is developed. The following matters are studied.

- (1) Penalty Function in Sequential Unconstrained Minimization Technique which is the optimizing technique introduced into the optimum design method is determined.
- (2) The safety factor of bearing capacity for eccentric and inclined loads is approximated with Spline Function.
- (3) The rate, at which Penalty Parameter used to optimize the cross sections decreases, is determined. Furthermore, we studied about the method how to take the initial values of Penalty Parameter and variables used to calculate the safety factor on circular failure.
- (4) Two examining methods of bearing capacity for eccentric and inclined loads, which are Bishop method and the method that we often combine Load Distribution method and Katayama & Uchida method, are compared.

Key Words: Caisson, Breakwater, Quaywall, Basic Design, Optimum Design, Eccentric and Inclined Loads, Bishop Method

* Member of Design and Construction Technology Laboratory, Planning and Design Standard Division
** Chief of Design and Construction Technology Laboratory, Planning and Design Standard Division
*** Member of Design and Construction Technology Laboratory, Planning and Design Standard Division
**** Ex-Senior Research Engineer, Planning and Design Standard Division

ケーソン式構造物の基本設計の最適化 —— 捨石マウンドの支持力の 新しい計算法の導入と最適化の検討 ——

中 道 正 人^{*}
口 田 登^{**}
森 田 博 史^{***}
松 井 創^{****}

要 旨

港湾構造物の設計においては、安全性が確保されておりかつ経済性が高い断面を短時間で効率的に決定することを目的として、構造物の安定条件等の制約条件を満足しかつ工費が最小となる断面を数学的手法により決定する最適設計が検討されており、既に混成式防波堤等を対象として行われた。

一方、昭和63年10月に改訂された「港湾の施設の技術上の基準」(運輸省港湾局)の中で偏心傾斜荷重に対する検討方法が改正された。

このようなことから、既存の混成式防波堤の最適設計手法に対し、この新しい計算法を導入するとともに、ケーソン式係船岸の基本設計の最適化を図ることを目的として本研究を行った。具体的には、

- (1) 本最適設計の最適化手法である無制約最小化反復法の適用にあたって、その中で導入される罰金関数の設定を行った。
- (2) 最適化の過程で逐次変化する全ての断面における偏心傾斜荷重に対する安全率の算出は、主要な断面で行った円形すべり計算の結果をSpline関数で近似する手法を用いて行えば、その計算時間を短縮できることを確認した。
- (3) 最適化に係わる各種変数の検討は、
 - ① 最適値の効率的な算定のために、最適化のためのパラメータである罰金係数について、減少率の設定を行うとともに初期値の設定方法を示した。
 - ② 偏心傾斜荷重に対する安全率の関数近似の中で円形すべり計算が適切に行われるようにするため、安全率を最小とする円弧を求めるために導入した格子の中心座標及び刻み幅の設定方法を示した。
- (4) ビジョープ法及び荷重分散法と片山・内田法の組み合わせの2つの偏心傾斜荷重に対する検討法の比較を、水深が-10m、-20m、-30m、基礎地盤が良質な砂質土である等の設計条件のもとで行った。

キーワード：ケーソン、防波堤、係船岸、基本設計、最適設計、偏心傾斜荷重、ビジョープ法

1. まえがき

港湾構造物の設計時間の短縮、設計精度の向上等を目的に昭和45年以来、設計の自動化が行われており、とくに基本設計では、構造物の安定条件等を満足する断面諸

元が得られるシステムが主に開発されてきた。実際の設計に際しては、従来、安全性が確保されかつ経済性の高い断面を決定する場合、例えば、ケーソン式構造物ではマウンド厚等を数ケース仮定し、このシステムにより求めた各断面における工費を比較して、最小の工費を与え

* 計画設計基準部 設計技術研究室
** 計画設計基準部 設計技術研究室長
*** 計画設計基準部 設計技術研究室
**** 前計画設計基準部 主任研究官(最適設計担当)

るものを選定する方法が一般的にとられてきた。しかし、これらの作業には非常に膨大な時間と労力を要する一方で、これらにより得られた断面が最も経済的であるという確証もない。このため、構造物の安定条件、施工条件等の制約条件を満足しかつ工費が最小となる断面を数学的手法により決定する最適設計が検討された。既に混成式防波堤及び地盤改良断面の最適設計が適用した非線形計画手法の有効性及び問題点について検討されている。1)~4)

一方、昭和63年10月に改訂された「港湾の施設の技術上の基準」（運輸省港湾局）（以下「技術基準」という）の中で、偏心傾斜荷重に対する検討方法は、「荷重分散法と片山・内田法の組み合わせ」等に基づいて行うこととしていたものから、「ビショップ法に対する円形すべり解析法」（以下「ビショップ法」という）に基づくことを標準とすることに改正された。⁵⁾

このような背景から、既存の混成式防波堤の最適設計手法に対し、この新しい計算法を導入するとともに、ケーソン式係船岸の基本設計の最適化を図ることを目的として本研究を行った。

具体的には、本最適設計の最適化手法として無制約最小化反復法を適用するため、罰金関数の設定について検討を行った。また、本最適設計では最適化の過程で逐次変化する全ての断面の偏心傾斜荷重に対する安全率を算定することとしているが、初めに主要な断面についてのみ円形すべり計算を行い、この結果を用いて安全率を関数近似して算定するという手法の導入について検討した。この上で、効率的に最適値を算定できるようにするため、最適化のためのパラメーターである罰金係数の減少率（プログラム内部での固定値）の設定及び初期値（入力値）の設定方法を検討するとともに、偏心傾斜荷重に対する安全率を関数近似する際に円形すべり計算が適切に行われるようにするため、入力値で、安全率を最小とする円弧を求めるために導入した格子の中心座標及び刻み幅の設定方法を検討した。このほか、「ビショップ法」及び「荷重分散法と片山・内田法の組み合わせ」の2つの偏心傾斜荷重に対する検討法の比較を行った。

なお、本最適設計は、波高、水深、天端高等の設計条件及びケーソン製作、基礎捨石等の単価を入力することにより、構造物の種々の安定条件等制約条件を満足しかつ経済的に最適となる、即ち、工費（本最適設計ではケーソンと捨石マウンドに関係する工費）が最小となるケーソン式防波堤及び係船岸の断面諸元（マウンド厚、ケーソンの堤体幅、マウンド肩幅、フーチング長、ケーソンの法線方向長）を決定するものである。ただし、本最適

設計における工費は、基本設計において検討する場合の概算のものである。

2. 最適設計への定式化

2.1 設計変数

ケーソン式防波堤及び係船岸は極めて多くの断面諸元で構成されている。本最適設計では、計算時間、計算の複雑性、工費に与える影響等の観点より、マウンド厚 x_1 、ケーソンの堤体幅 x_2 、マウンド肩幅（防波堤は港内側、係船岸は海側とする） x_3 、フーチング長 x_4 、ケーソンの法線方向長 x_5 を設計変数とすることができるようにし、他の諸元は定数として取り扱うこととした（図-1）。ただし、設計変数とした諸元も定数として扱う場合が生じるものと考えられるので、本最適設計ではそれを可能としている。

2.2 制約条件

与えられた条件の中で工費が最小となる断面を決定する本最適設計は、構造物の安定条件等以下の制約条件を満足させて行うものとする。

(1) ケーソンの滑り出しに対する検討

$$F_s \geq F_{sa} \quad (2.1)$$

ここに F_s : 滑動に対する安全率

F_{sa} : 滑動に対する安定上必要な安全率

(2) ケーソンの転倒に対する検討

$$F_t \geq F_{ta} \quad (2.2)$$

ここに F_t : 転倒に対する安全率

F_{ta} : 転倒に対する安定上必要な安全率

(3) 基礎の支持力に対する検討

偏心傾斜荷重に対する支持力により検討する。具体的には、ビショップ法による円形すべり解析法に基づいて算定する。なお、ビショップ法では、一般に用いられる通常の捨石の強度定数として $c = 2 \text{ tf/m}^2$ 、 $\phi = 35^\circ$ の値を用いることを標準としている。

$$F_o \geq F_{req} \quad (2.3)$$

ここに F_o : 偏心傾斜荷重に対する安全率

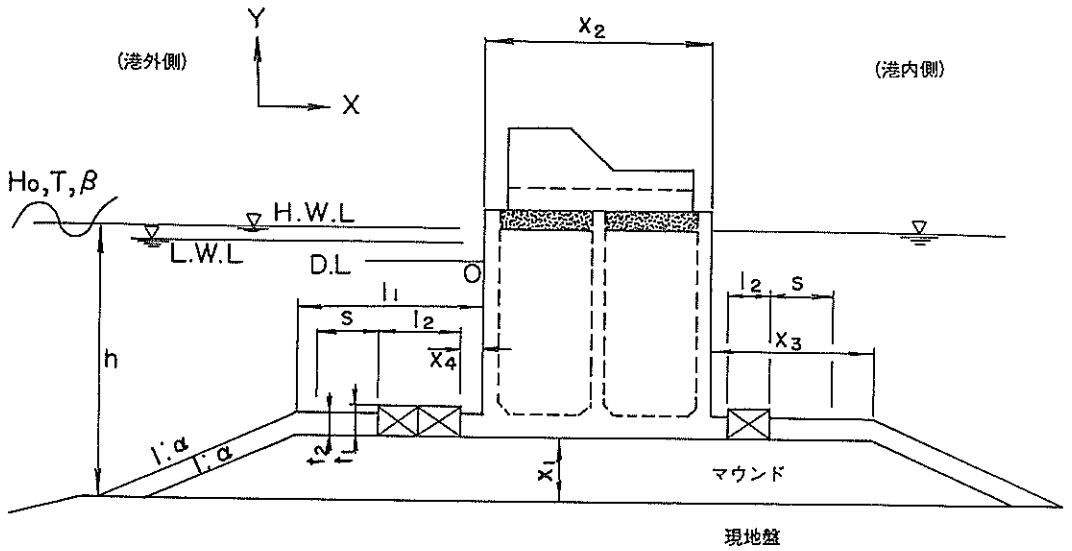
F_{req} : 偏心傾斜荷重に対する安定上必要な安全率

(4) ケーソン空中重量に対する検討

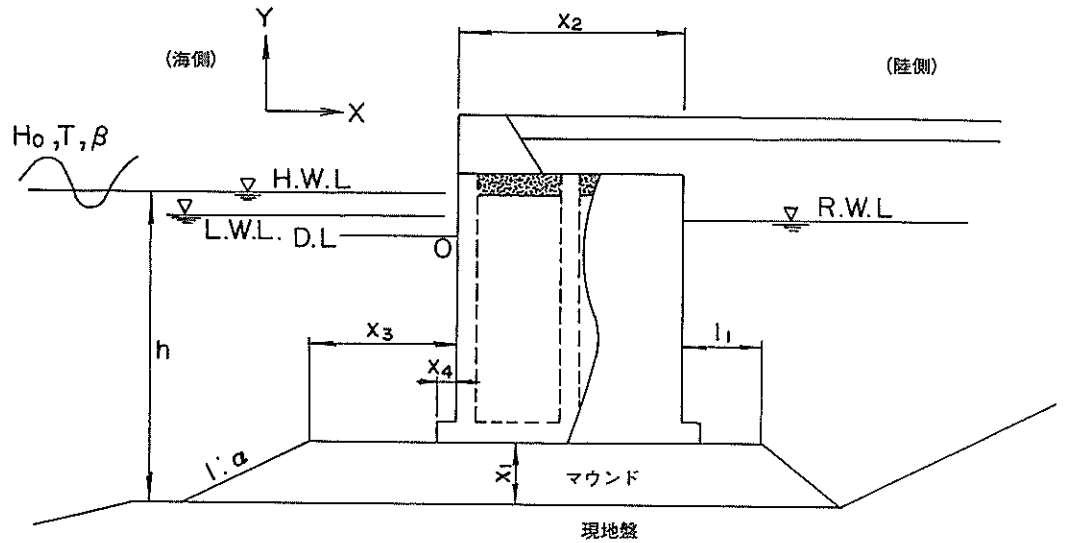
ケーソン製作等施工において制限がある場合があるので、ケーソン1面あたりの空中重量に制限を設けるものとする。

$$W_c \leq W_{cmax} \quad (2.4)$$

防波堤



係船岸



- ここに、 x_1 : マウンド厚 (m)
 x_2 : 堤体幅 (m)
 x_3 : マウンド肩幅 (防波堤は港内側、係船岸は海側) (m)
 x_4 : フーチング長 (m)
 x_5 : ケーソン法線方向長 (m)

図-1 設計変数

ここに W_c : ケーソン空中重量 (tf)
 W_{cmax} : 施工可能なケーソンの空中重量の最大値 (tf)

斜しないように浮遊時の安定を検討するものとする。

$$\overline{GM} \geq 0.05D \quad (2.5)$$

(5) 浮遊時の安定条件

ここに D : 喫水 (m)

自力で浮遊するケーソンについては、転覆あるいは傾

\overline{GM} : 重心と傾心の距離 (m)

なお、上式の条件が満足されない場合はカウンターバラストに水を用いて安定性を検討する。

(6) ケーソンすえ付け時の制限条件

ケーソンすえ付け時の余裕水深を確保するために、次の条件を設定する。

$$h \geq D + Y + x_1 \quad (2.6)$$

- ここに x_1 : マウンド厚 (m)
- h : 前面水深 (m)
- D : 噴水 (m)
- Y : 余裕水深 (m)

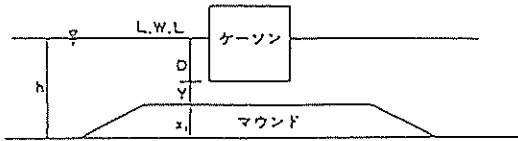


図-2 余裕水深

なお、本最適設計では検討水位をL.W.L.としている。

(7) 各設計変数の最大値及び最小値に関する制限

各設計変数は施工等の上から制限される場合があるので以下の制約条件を設けるものとする。

$$x_{min} \leq x_i \leq x_{max} \quad (i=1 \sim 5) \quad (2.7)$$

ここに、 x_{min} 、 x_{max} は各々設計変数 x_i の最小値及び最大値である。

(8) ケーソン隔室の区間割

本最適設計では隔室のうちのが最大長(入力値)を越えない範囲で隔室数を決定し、また、細部設計、施工を考慮して、各隔室の長さは、法線直角方向及び法線方向についてケーソンの中心線に対して対称でかつその長さなるべく均等になるように考慮した。

上記の制約条件は防波堤及び係船岸で同一であるが、式(2.1)、式(2.2)、式(2.3)の F_{sa} 、 F_{ia} 、 F_{sa} の値は表-1に基づいて設定する必要がある。また、防波堤において、波圧は、入力された換算沖波高、

表-1 構造物の安定上必要な安全率
(技術基準における値)

	滑 動	転 倒	偏心傾斜荷重
防波堤(波圧時)	1.2	1.2	1.0
“(地震時)	検討不要	1.1	1.0
“(施工時)	記述なし	記述なし	記述なし
係船岸(常時)	1.2	1.2	1.2
“(地震時)	1.0	1.1	1.0

周期等に対して簡略式による碎波変形を計算したのち合田式によって算定することとしている。

2.3 目的関数

本最適設計は、2.2の制約条件を満足させつつ、経済的に最適な、即ち、工費が最小となる断面を算定するものである。ここで、最適な断面を算定するにあたっては、制約条件を満足している無数の断面を比較する必要があるが、この比較のために一般的に最適設計で導入される目的関数を設定することとした。本最適設計では、ケーソンと捨石マウンドに関する工費の和として表されるケーソン式構造物の建設の1mあたりの概算工費を目的関数としており、各材料の単価及び体積等により式(2.8)のように表した。なお、ここで示されている各諸元は、その位置を図-1に示した。

$$\begin{aligned} \text{COST} &= f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \\ &= C_1 X_1 + C_2 X_2 + C_3 X_3 + C_4 X_4 \\ &\quad + C_5 X_5 + C_6 X_6 + C_7 X_7 + C_8 X_8 \\ &\quad + C_9 X_9 + C_{10}/X_{10} + C_{11} X_{11} \\ &\quad + n C_{12} \quad (\text{千円/m}) \quad (2.8) \end{aligned}$$

- ここに C_1 : ケーソン制作単価 (千円/m³)
- C_2 : 中詰砂単価 (")
- C_3 : ふたコンクリート単価 (")
- C_4 : 上部コンクリート単価 (")
- C_5 : 捨石単価 (")
- C_6 : 被覆石単価 (")
- C_7 : 捨石荒均し単価 (千円/m²)
- C_8 : 捨石本均し単価 (")
- C_9 : 被覆石均し単価 (")
- C_{10} : 進水、えい航、据付等のケーソン一函あたりにかかる費用 (千円/函)
- C_{11} : 根固め方塊製作単価 (千円/m³)
- C_{12} : 根固め方塊据付費 (千円/個)
- X_1 : ケーソン本体の体積 (m³/m)
- X_2 : 中詰砂の体積 (")
- X_3 : ふたコンクリート体積 (")
- X_4 : 上部コンクリート体積 (")
- X_5 : 捨石体積

$$X_5 = (l_1 + x_2 + x_3 + \alpha x_1) x_1$$

l_1 はマウンド肩幅(防波堤は港外側、係船岸は陸側) (m)

α はマウンド勾配

X_6 : 被覆石体積

$$X_6 = 2 t_2 \sqrt{1 + \alpha^2} (t_2 + x_1)$$

$$+ t_2 + (l_1 + x_3 - 2x_4 - l_2 - t_2 \alpha)$$

t_2 は被覆石の厚さ (m)

l_2 は根固め方塊の全設置幅 (m)

X_7 : 捨石の荒均し面積 (m²/m)

$$X_7 = 2x_1 \sqrt{1 + \alpha^2} + l_1 + x_3 - 2x_4 + l_2 - 2s$$

s は本均しの余裕幅 (m)

X_8 : 捨石の本均し面積 (m²/m)

$$X_8 = x_2 + 2x_4 + l_2 + 2s$$

X_9 : 被覆石均し面積 (m²/m)

$$X_9 = 2(t_2 + x_1) \sqrt{1 + \alpha^2} + 2t_2 \sqrt{1 + \alpha^2} + (l_1 + x_3 - 2x_4) - 2t_2 \alpha - l_2$$

X_{10} : ケーソンの法線方向長

$$X_{10} = x_5 \quad (\text{m})$$

X_{11} : 根固め方塊全体積 (m³/m)

$$X_{11} = t_1 l_1$$

t_1 は根固め方塊の高さ (m)

n : 根固め方塊の防波堤1mあたりの概算設置個数 (個/m)

上記の単価は水深等の設計条件、ケーソンの大きさ等によって変化するものであるため、これらの設定は実際に本最適設計を適用しようとする設計条件に近い事例を参考にして行う必要があるものと考えられる。

3. 最適化計算

3.1 無制約最小化反復法の適用

本最適設計の問題は次のように表される。

$$g_i(X) \leq 0 \quad (i=1, m) \quad (3.1)$$

$$h_j(X) = 0 \quad (j=1, l)$$

$$F(X) \rightarrow \min$$

ここに $\left. \begin{array}{l} g_i(X) \\ h_j(X) \end{array} \right\}$: 2.2で示した制約条件式(例えば、滑動の安定条件では、 $g_i(X) = 1.2 - f_s(X) \leq 0$ ただし、 $f_s(X)$ は滑動に対する安全率、また、 $h_j(X)$ は制約条件が等号で示される場

合の式である)

$F(X)$: 2.3で示した目的関数(工費)

$X = (x_1$ (マウンド厚), x_2 (堤体幅), x_3 (マウンド肩幅), x_4 (フーチング長), x_5 (法線方向長))

$g_i(X)$, $h_j(X)$, $F(X)$ は X に関して非線形であるため、非線形計画法の問題となる。

この問題を解く最適化手法として、ここでは混成式防波堤及び地盤改良断面の最適設計で実績のある無制約最小化反復法(以下「SUMT」という)を用いている。本手法は、式(3.2)に示すように目的関数 $F(X)$ と制約条件式 $g_i(X)$, $h_j(X)$ を組み合わせた新しい関数(以下「罰金関数」という) $P(X, r_k)$ を用いて、「制約条件を有する非線形計画問題」を「制約条件のない問題」に変換し、この変換された問題を解くことにより、もとの制約付き最適化問題の解を得る方法である。^{6), 7)}

$$P(X, r_k) = F(X) - r_k \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(X)} + \frac{1}{\sqrt{r_k}} \sum_{j=1}^l h_j^2(X) \quad (3.2)$$

ここに $P(X, r_k)$: 罰金関数

r_k : 罰金係数

具体的には、 $F(X)$ と式(3.2)第2項(以下「罰金項」という)の重みづけを行う係数(以下「罰金係数」という) r_k を段階的に減少させて各段階毎に制約条件を満足する領域内にある X に関する $P(X, r_k)$ の最小値を、繰り返し求め、 $P(X, r_k)$ の最小値をその領域内の内側から $F(X)$ の最小値に近づけて $F(X)$ の最小値を得るものである。罰金項は、最適点を求めるための探索点が制約条件の境界 $g_i(X) = 0$ に近づくとき $P(X, r_k)$ の値が r_k の有限の値に対して無限大に漸近するため、その探索点が境界を超えることはないという性質もっている。なお、右辺の第3項は制約条件式の中に等式条件が含まれる場合に付加される項である。

上式の最小値を求める具体的な方法としてはPowellのDirect Search法とDavidon-Fletcher-Powell法を用いている。なお、本資料における検討はすべて前者で行っている。

上式により目的関数の最小値を求める具体的な計算手順は「混成式防波堤の最適設計」⁸⁾を参照されたい。

3.2 罰金関数の設定

3.1でSUMTの一般的な式を式(3.2)として示したが、2.2における構造物の安定条件等の制約条

件が全て不等号で与えられる場合には、式(3.2)の右辺第3項を除いた以下の罰金関数式が用いられる。^{9)~11)}

$$P(X, r_k) = F(X) - r_k \sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(X)} \quad (3.3)$$

一方、ケーソン式防波堤及び係船岸の基本設計において、偏心傾斜荷重の検討をピシヨップ法に基づいて行う場合、工費が最小となる断面のほとんどはその偏心傾斜荷重に対する安全率が安定上必要な値である1.0(常時)にほぼ等しくなるのではないかと考えられる。しかし、式(3.3)では、この安全率が1.0に「近い」断面を求めることはできるが、最適化計算の過程で安全率が1.0の「より近傍」になる、即ち、最適値を求めるために動く探索点が偏心傾斜荷重に対する安定条件の境界により近づくとも罰金項が極めて大きくなり、これにともない左辺が大きくなるため、安全率がほぼ1.0となるような断面を求めることはできない。従って、求める断面の精度を高める観点から、最適設計で算出する断面の安全率が必ず安定上最小限必要な値となるようにするため、工費に加えてこれも最適化の目的の一つとし、当該条件を等号の制約とみなせば、以下のような式を用いて最適設計を行うことも考えられる。

$$P(X, r_k) = F(X) - r_k \left(\sum_{i=1}^m \frac{1}{g_i(X)} + \mu (f_{min} - f_k) \right) \quad (3.4)$$

ここに μ : 制約条件式間に重みを付けるパラメータであり、本問題の場合、偏心傾斜荷重に対する安全率が最小工費の断面の決定の一つの要因となるものと考えられるので、第3項に重みを付けるものとする。

f_{min} : 偏心傾斜荷重に対する安定上必要な安全率

f_k : 偏心傾斜荷重に対する安全率

このようなことから、以下に上記2式の比較検討を行い、本最適設計に適した罰金関数を選定することとした。

検討は、下記の検討条件で2式を用いて各々最適設計を行い、その過程を比較して行った。

検討条件は、

- ①構造は混成式防波堤としている。
- ②設計条件は水深-20mで通常設定されるような値を用いている。¹²⁾
- ③設計変数は堤体幅及びマウンド肩幅としている。

その他の断面諸元は②の設計条件における平均的な値を用いている。

④罰金係数 r_k はその初期値 r_0 を1,000、減少率 ε_r を0.4としている。また、 μ は5.0としている。

2式により最適化計算を行った結果を図-3に示した。

本図は、 r_0, r_1, r_2, \dots と適切な割合で減少させる罰金係数 r_k の各段階で得られた罰金関数 $P(X, r_k)$ の収束点で、最適点を求めらようとする過程を示したものである。

式(3.3)によるものについては、 r_k の各段階で得られた $P(X, r_k)$ の収束点全てがその最小値を与える点になっているため、最適点が求められているが、式(3.4)によるものについては、 r_k が64の時の収束点が当該式の右辺第3項の影響を受けて偏心傾斜荷重に対する安定条件の境界付近に位置しており、さらに r_k が小さくなると各 r_k の収束点は最適点から逆に離れていく傾向が見られる。これは、図-4のように各 r_k における $P(X, r_k)$ の等高線が、その最小値を求めるために動く探索点のステップ幅に比べて、偏心傾斜荷重に対する安定条件の境界に沿って薄皮のように極端に歪んでいるので、 $P(X, r_k)$ の最小値を与える点の方向の探索ができず、各 r_k における $P(X, r_k)$ の収束点はその最小値を与える点にならなくなってしまうものと考えられるためである。¹³⁾

このようなことから、本最適設計における罰金関数として式(3.3)のものをプログラム内に設定することとした。

3.3 偏心傾斜荷重に対する安全率の関数近似

本最適設計において偏心傾斜荷重に対する検討にピシヨップ法を導入するにあたっては、最適化の過程で逐次変化する全ての断面の偏心傾斜荷重に対する安全率を求めるためにその都度円形すべり計算を行う必要があるが、特に設計変数が多数になると円形すべり計算及びSUMTによる計算量が膨大になり、多大な計算時間を要することとなることから、円形すべり計算の実行回数をできるだけ少なくする必要がある。このため、主要な断面についてのみ円形すべり計算を行い、この結果を用いてSpline関数により安全率を近似する方法を本最適設計において導入することとした。この方法は既に地盤改良断面の最適設計において円形すべりの安全率の算定で実績がある。¹⁴⁾

具体的には、SUMTの初期で仮定した断面またはSUMTの各段階で得られている断面の安全率 $f(X_0)$ を基準にして、それぞれの設計変数を単独に変化させた

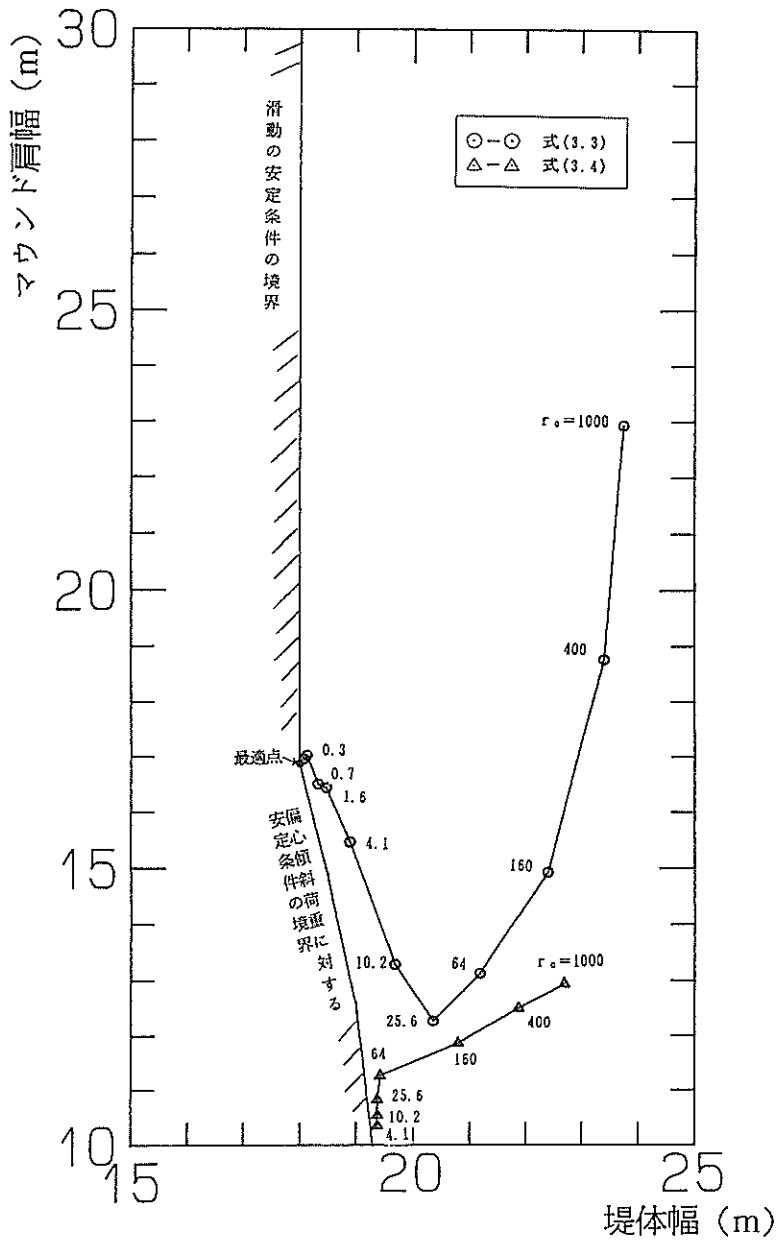


図-3 罰金関数の検討

場合の安全率の増加分(減少分)を計算する。それを関数近似した式を $\Delta f(x_i)$ とすると、すべての変数の変化に対応する安全率の値は $\Delta f(x_i)$ の線形和として次式で与えられるものとする。

$$f(x_i) = \sum \Delta f(x_i) + f(X_0) \quad (3.5)$$

$\Delta f(x_i)$ の関数を定めるには、 X_0 周辺の自分自身を含めた5点の関数値(安全率)を計算し、それらの点を通るSpline関数を求める(たとえば、 x_2 について

$\Delta f(x_2)$ を求める場合には、 x_1, x_3, x_4, x_5 を固定し、 x_2 のまわりの自分自身を含めた5点 $x_2 - 2 \cdot \Delta x_2, x_2 - \Delta x_2, x_2, x_2 + \Delta x_2, x_2 + 2 \cdot \Delta x_2$ について円形すべりの計算を実施することになる)。したがってSUMTの各段階で実施する円形すべり計算は、 $4n+1$ (n は変数の数)回でよいこととなる。なお、本プログラムでは図-5に示すように、近似の範囲を示すパラメータ Rg ($0 < Rg < 1$)を数値計算例の結果から0.8に定めている。

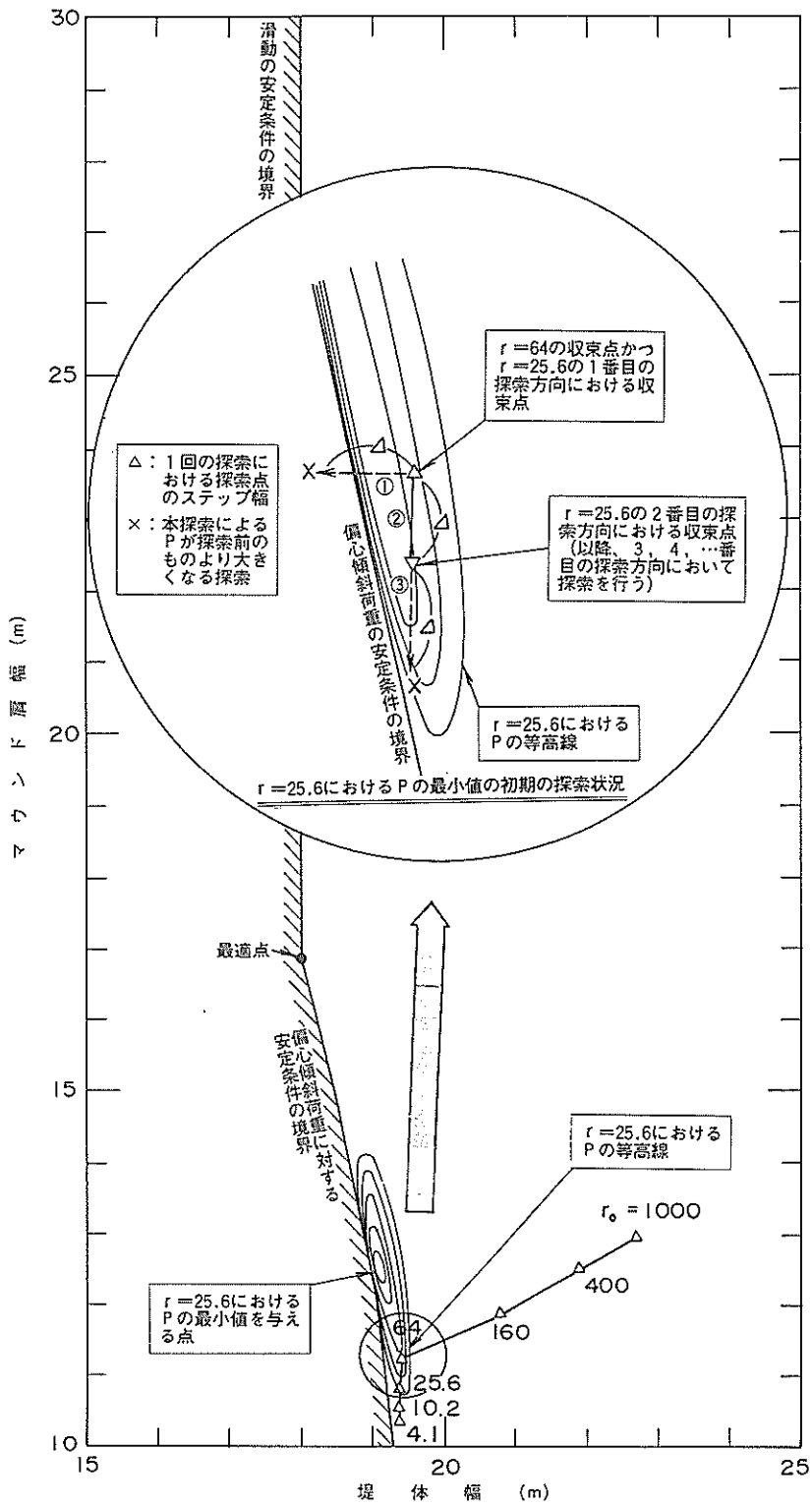


図-4 罰金関数の検討(式(3.4))の $r = 25.6$ における P の等高線の歪みと収束状況)

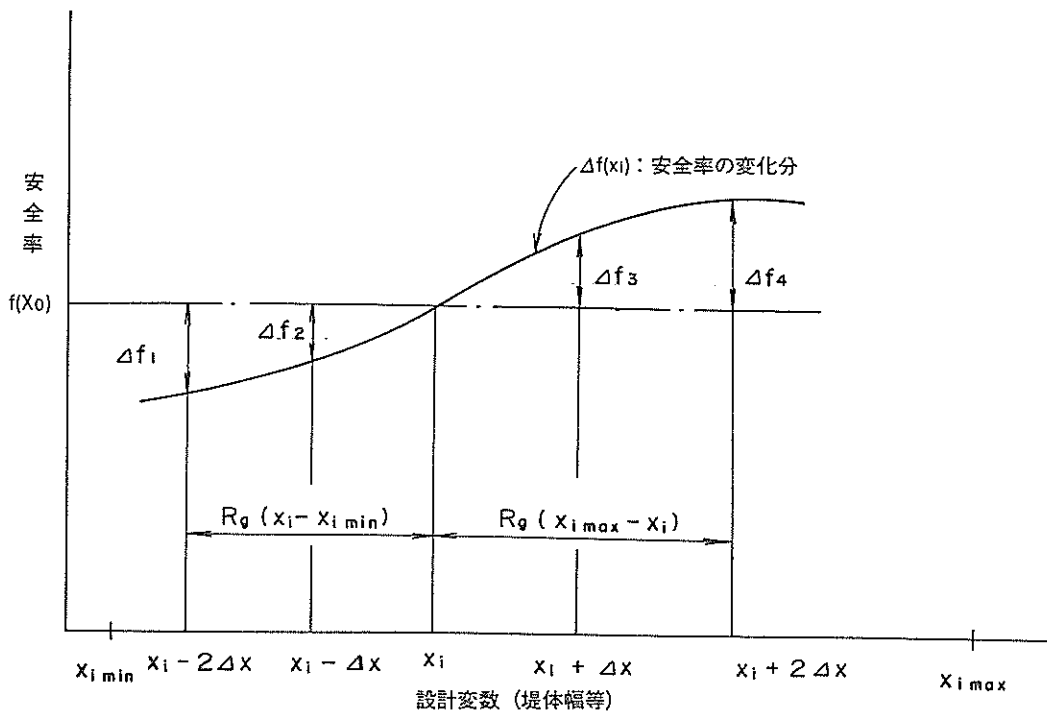


図-5 関数近似の範囲

図-6 に具体的な計算の流れを示した。

3.4 計算の流れ

3.1~3の結果を踏まえてケーソン式防波堤及び係船岸の最適設計の計算の流れを図-7, 8に示した。

なお、防波堤の場合は波圧時(主条件)と地震時・施工時(従条件)、係船岸の場合は地震時(主条件)と常時(従条件)の複数条件を同時に満足する断面を求めることとしている。しかし、複数条件の同時最適化は難しいため、主条件での最適断面を前記の従条件の順で確認し、不安定となる場合は主条件のマウンド厚を固定して再度最適化を行うこととしている。

4. 最適化に係わる各種変数の検討

4.1 罰金係数

効率的に最適値を算定できるようにするため、3.2で設定した罰金関数 $P(X, r_k)$ における罰金係数 r_k の初期値 r_0 (入力値)の設定の目安及び減少率 ε_r ($\varepsilon_r = r_k / r_{k-1}$; プログラム内で設定)の設定について検討を行うこととした。

検討条件は、罰金係数の条件を除いて3.2で設定したものと同一とした。

検討方法は、まず、以下の r_0 と ε_r の数値を組み合わせたもので各々最適設計を行い、3.2と同様、 ε_r の割合で減少する r_k の各段階で得られた $P(X, r_k)$ の収束点で最適点を求めようとする過程を示したもので

比較することとした。

$$\begin{cases} r_0 = 6,250, 2,500, 1,000 \\ \varepsilon_r = 0.633, 0.4, 0.16, 0.0256 \end{cases}$$

なお、ここで、 r_0 を1,000以上とした理由は、 r_0 を目的関数 $F(X)$ (この場合は7,000程度)の0.1倍程度以上の値にとっておくと、罰金項が $F(X)$ に比べて十分大きくなり、 $P(X, r_k)$ が $F(X)$ の値に関係なく罰金項によって決定されるので、ローカルな極値が求まる可能性が低くなるものと考えられるからである。^{15), 16)}

図-9~13が、 r_0 と ε_r の組み合わせによる最適設計の結果を比較しているものである。これらの図から、表-2のことが明らかである。⁹⁾ なお、 r_0 及び ε_r の最適の度合を図-14, 15に示した。

これらの結果から ε_r は0.4程度を用いることが適しているものと考えられ、また、 r_0 と ε_r とのあいだには密接な関係があり、

$$600 \leq r_0 \cdot \varepsilon_r \leq 800 \quad (4.1)$$

となっているため、本例の場合($F(X)$ が7,000程度)、 r_0 は、

$$1,500 \leq r_0 \leq 2,000 \quad (4.2)$$

となる。従って、 $F(X)$ と罰金項とは密接な関係が

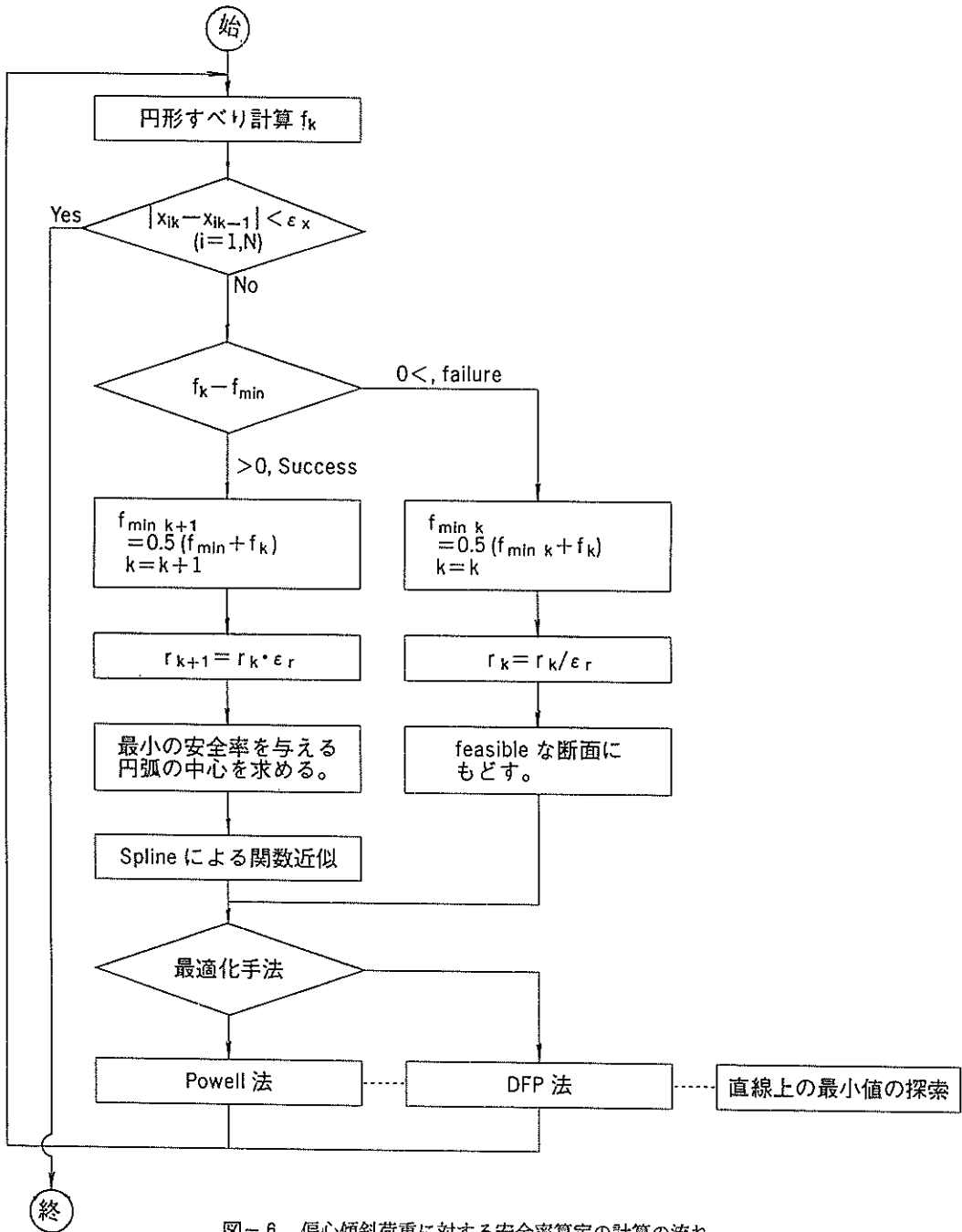


図-6 偏心傾斜荷重に対する安全率算定の計算の流れ

あるため、 r_0 は $F(X)$ の0.2から0.3倍程度が適当であるものと考えられる。実際に設定するにあたっては、経験的に見積もられた単位mあたりの工費の0.2から0.3程度に r_0 を設定し、計算の結果得られた工費が当初のものとは大幅に相違することがないことを確認することで合理的なものとする。なお、単位mあたりの工費が大幅に相違する場合は、再度確認の意味で r_0 を計算の結果得られた工費の0.2から0.3程度にして最適設計を行う

ことが望ましい。

4. 2 偏心傾斜荷重に対する検討での円形すべり計算における格子データ

本最適設計における偏心傾斜荷重に対する検討では、3. 3で示したように罰金係数 r_k の各段階において $4n+1$ (n は設計変数の数) 回行う円形すべり計算の結果をもとに、Spline関数を用いた近似により最適化の過程で逐次変化する全ての断面における安全率を求め

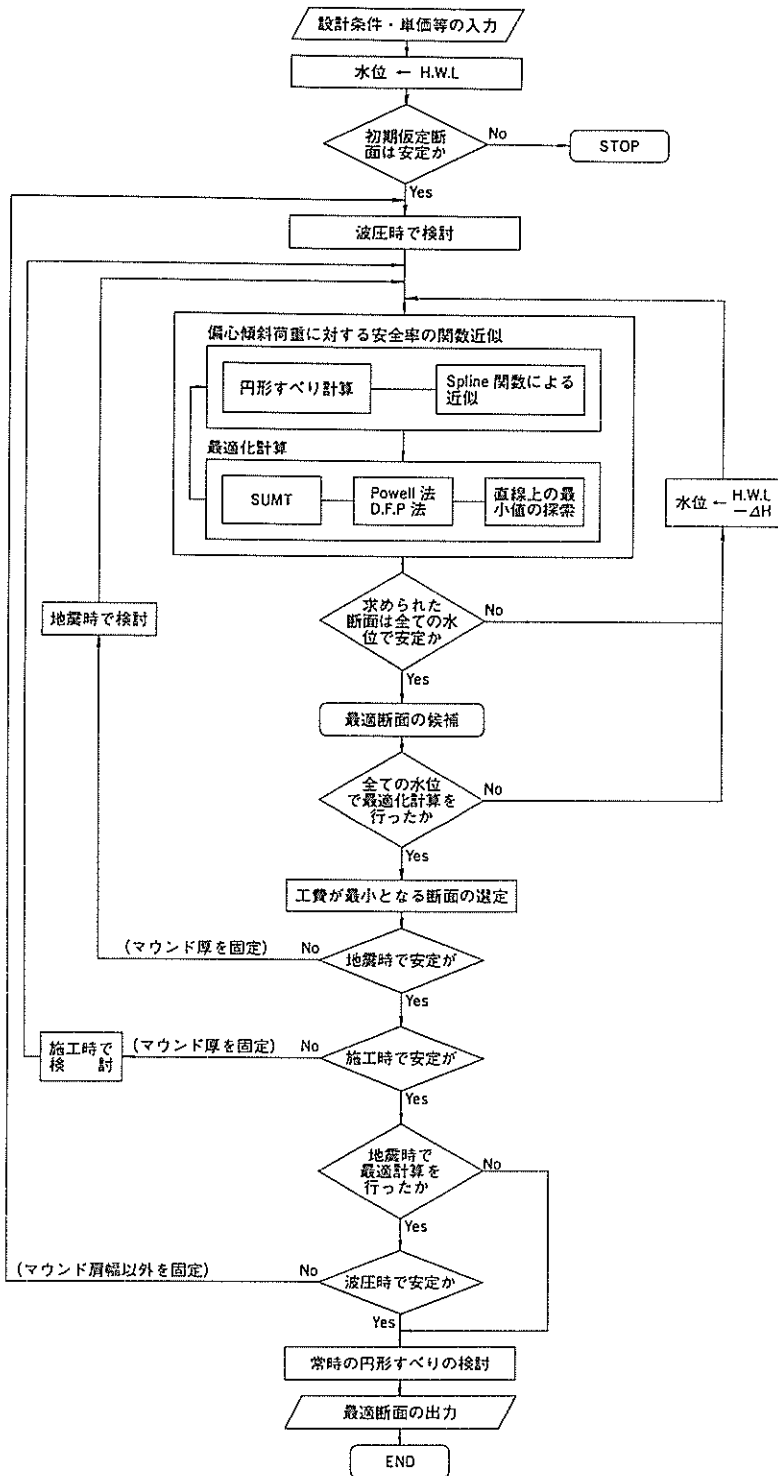


図-7 ケーソン式防波堤における最適設計の計算の流れ

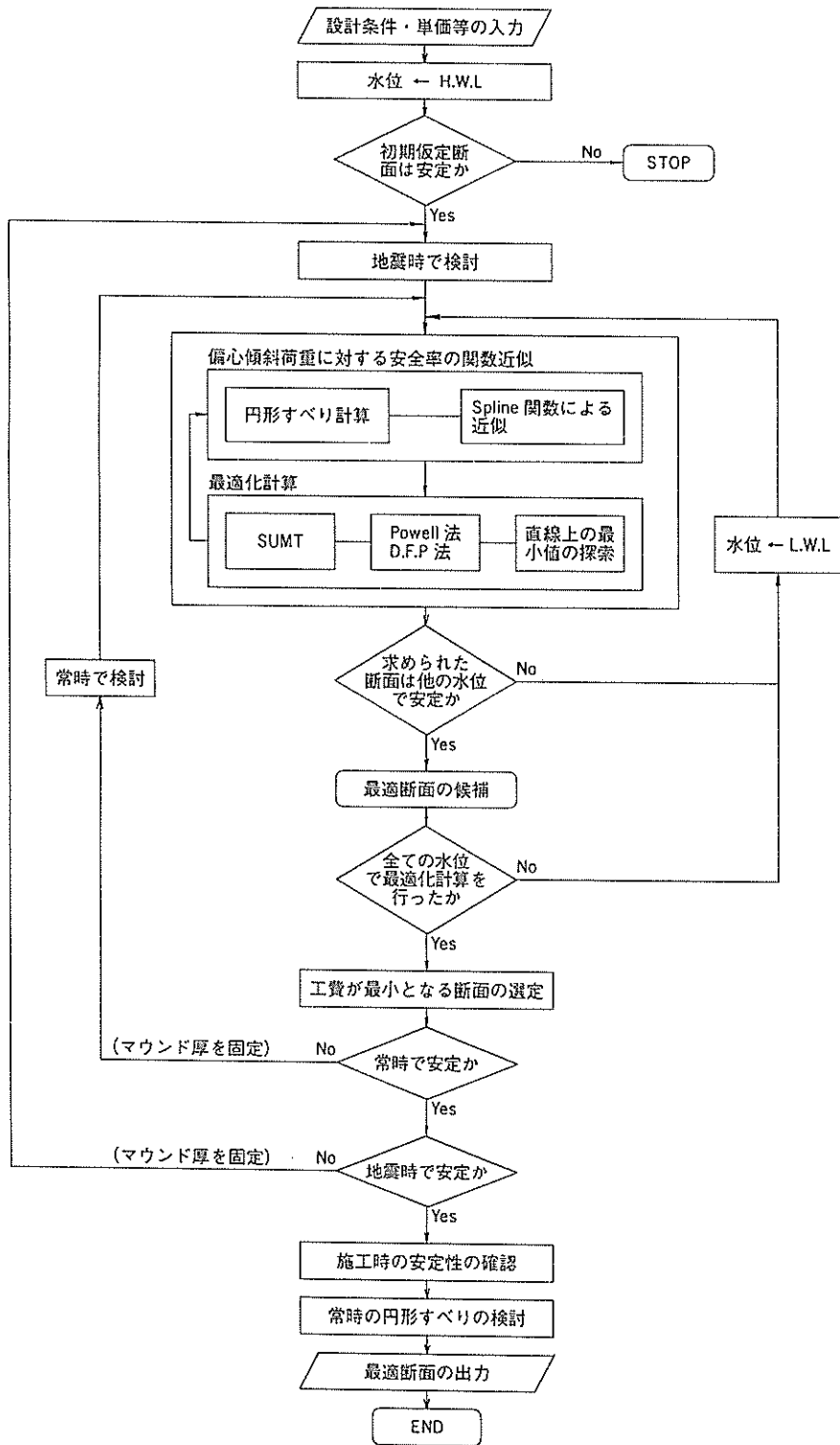


図-8 ケーソン式係船岸における最適設計の計算の流れ

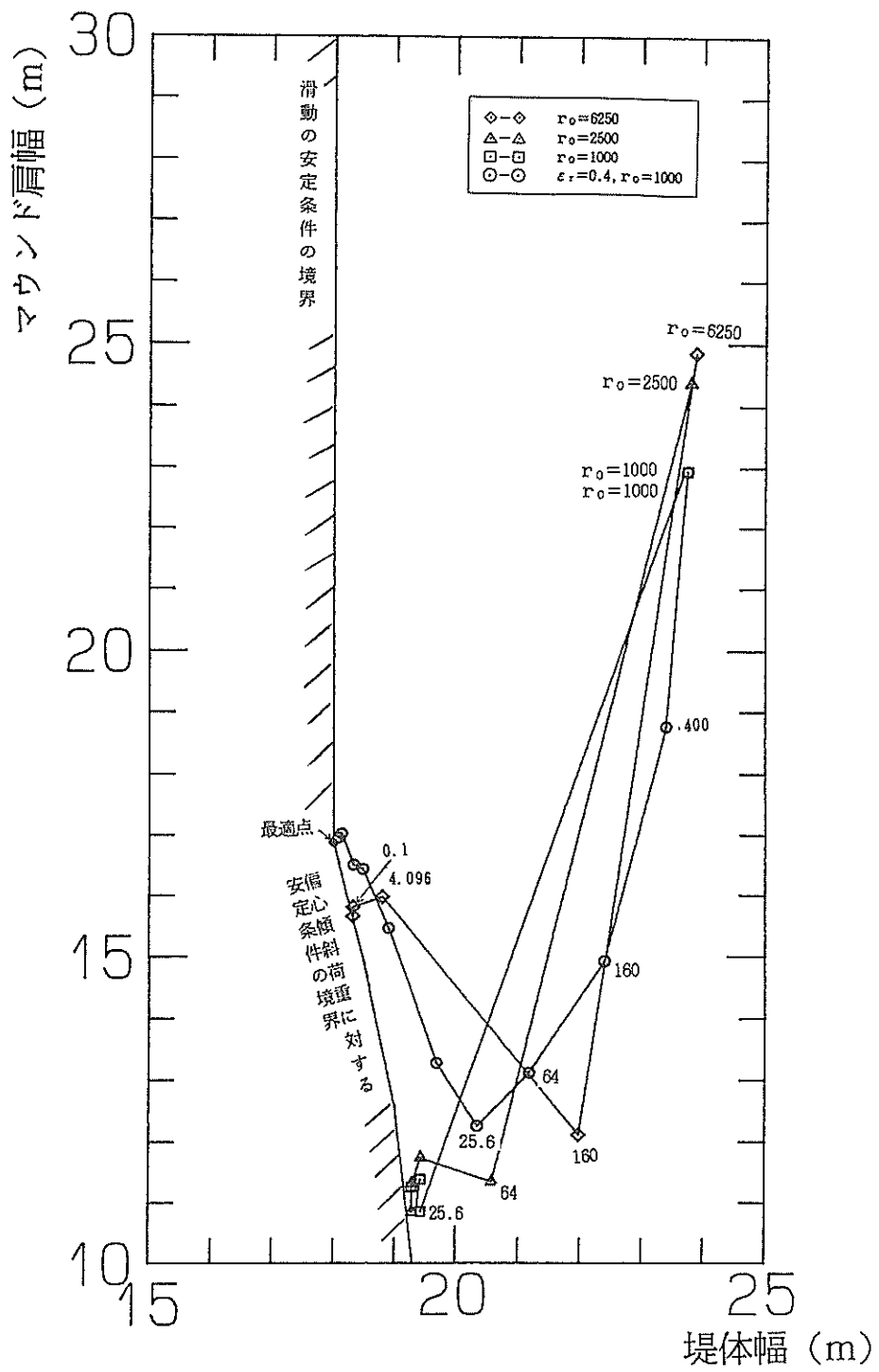


図-9 罰金係数の設定 ($\epsilon_r = 0.0256$)

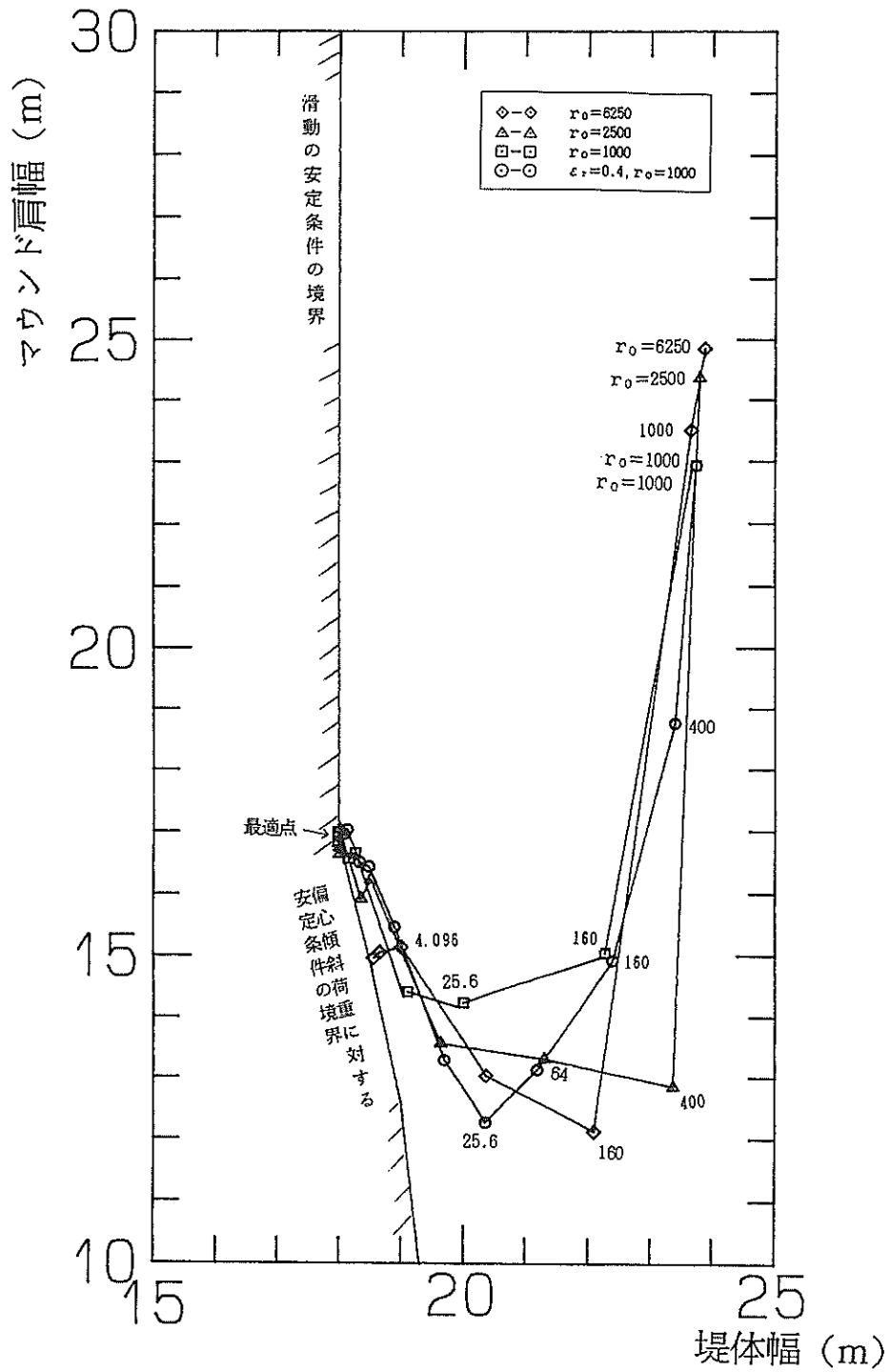


図-10 罰金係数の設定 ($\varepsilon_r = 0.16$)

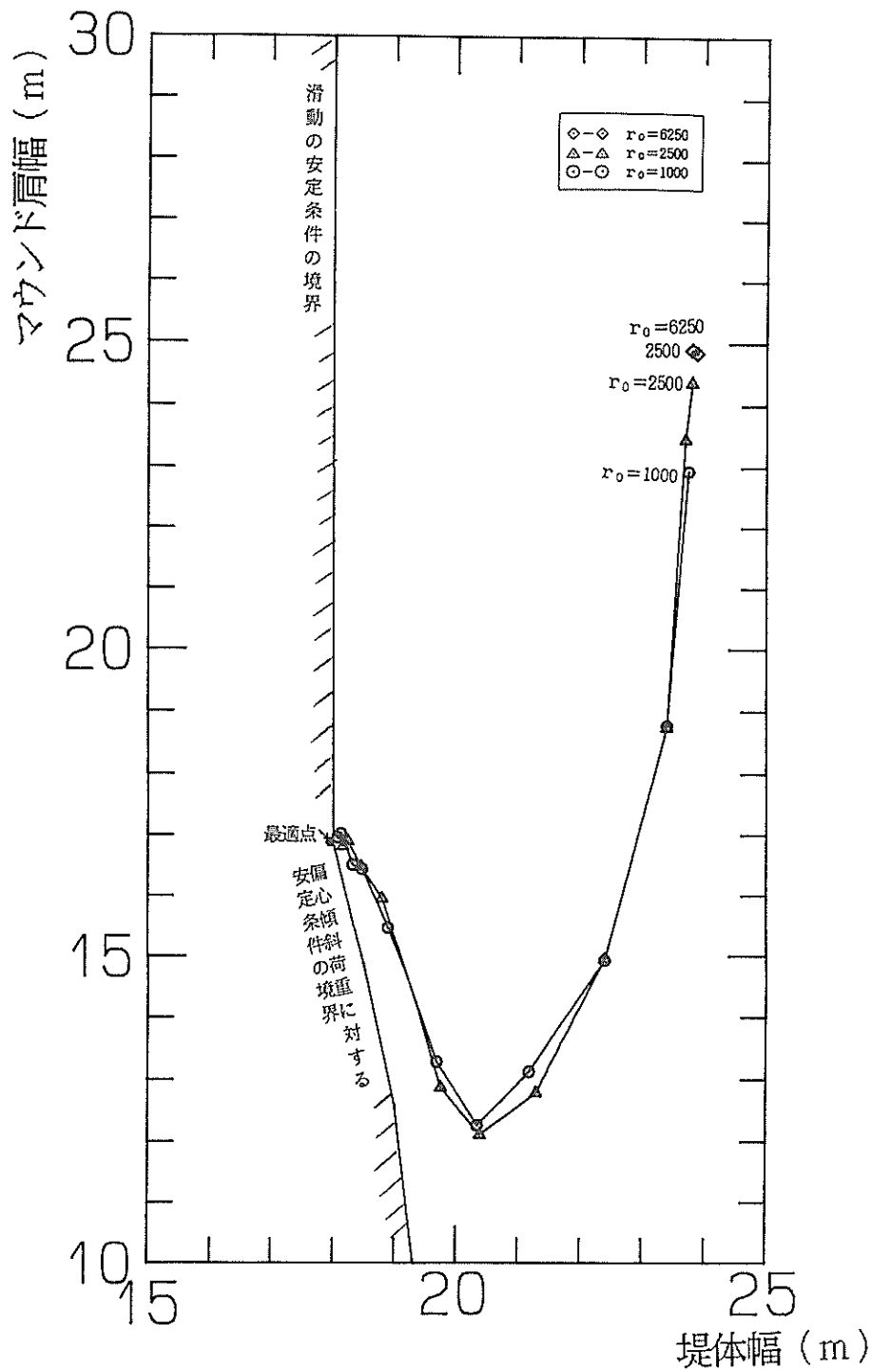


図-11 罰金係数の設定 ($\varepsilon_r = 0.4$)

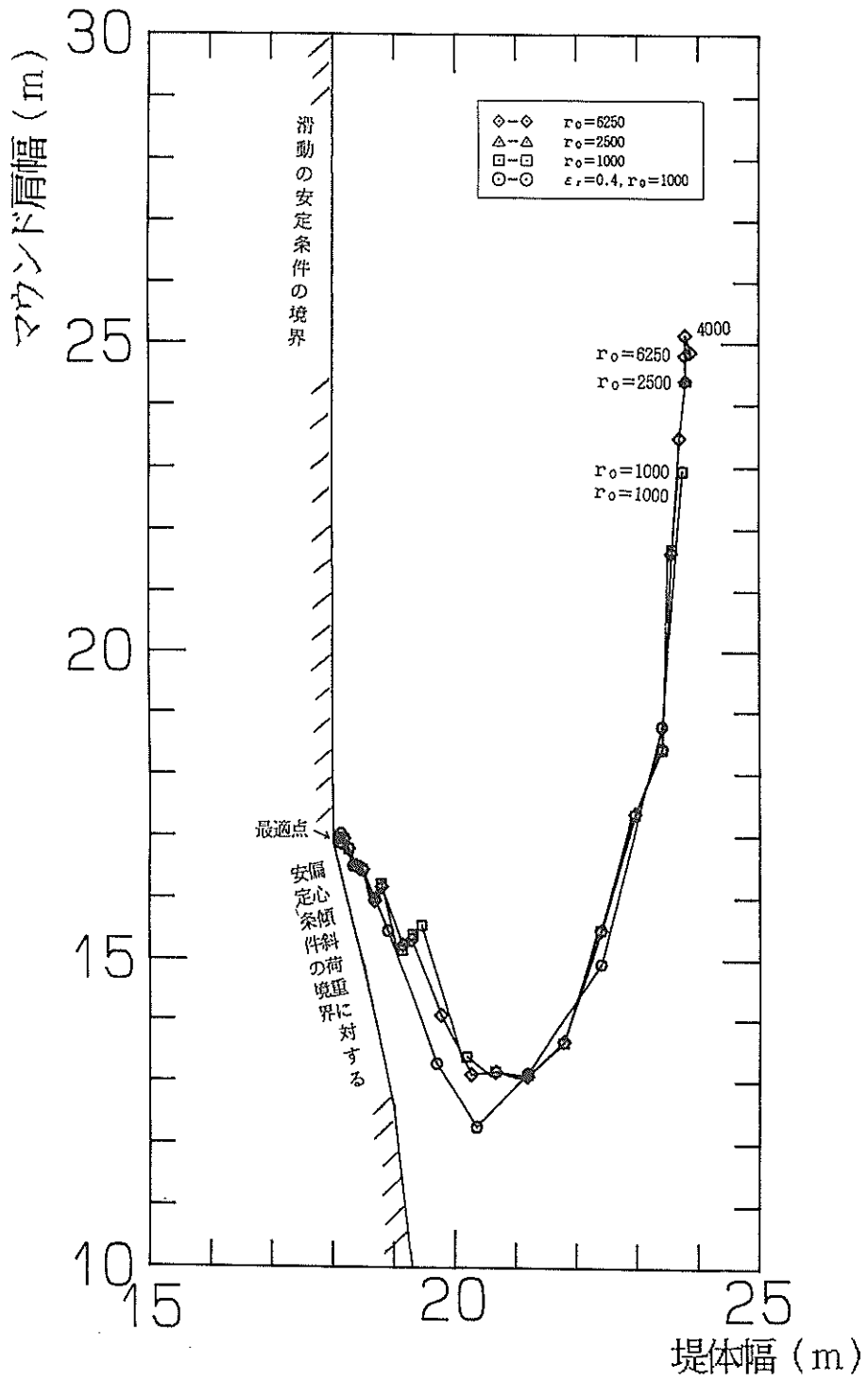


図-12 罰金係数の設定 ($\epsilon_r = 0.633$)

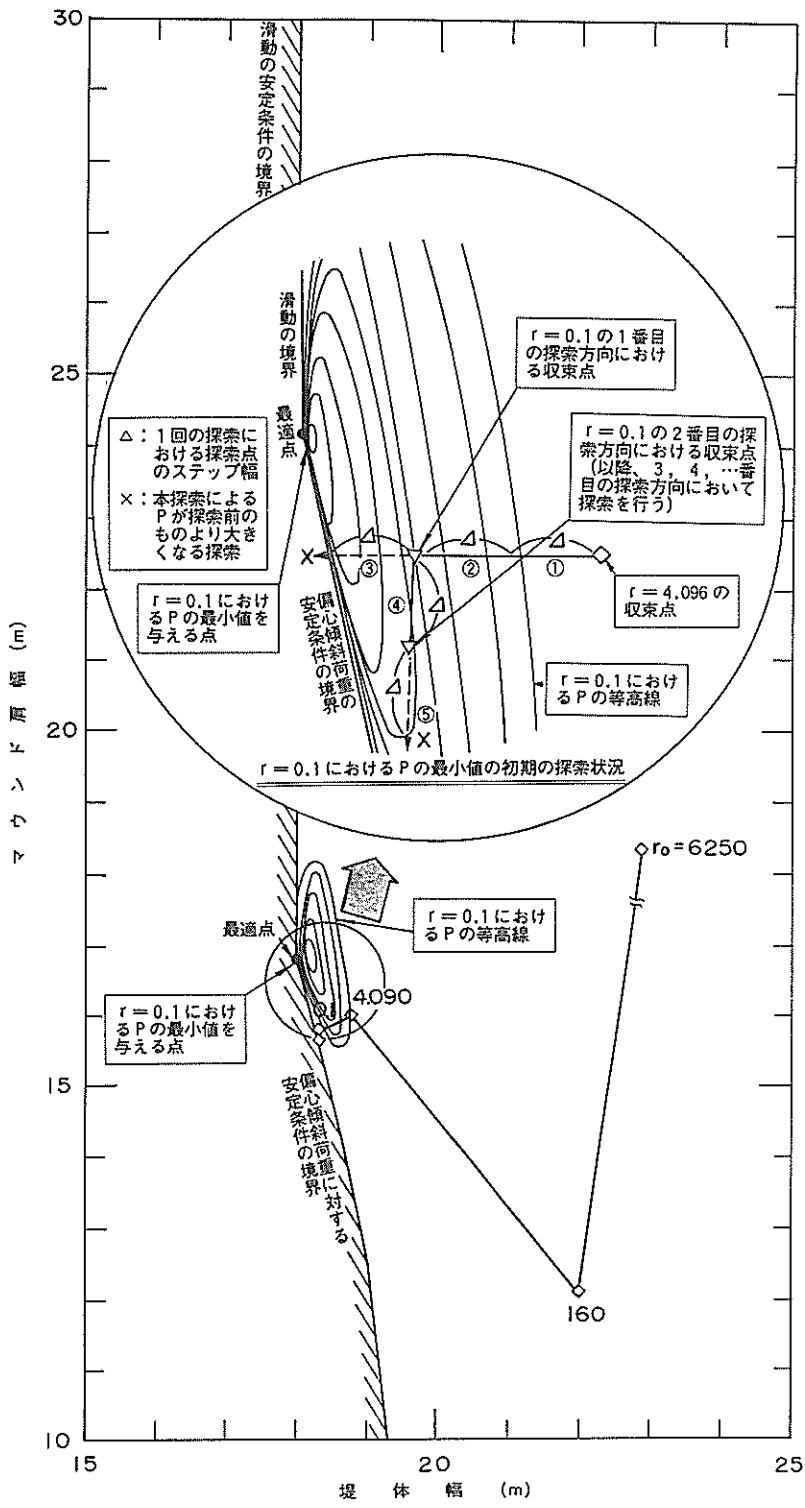


図-13 罰金係数の設定 ($\epsilon_r = 0.0256$, $r_0 = 6250$ の $r = 0.1$ における P の等高線の歪みと収束状況)

表-2 罰金係数の初期値 r_0 及び減少率 ε_r の設定

$\varepsilon_r \backslash r_0$	6 2 5 0	2 5 0 0	1 0 0 0
0. 0 2 5 6	<p>①罰金係数 r が大幅に減少（この場合は $6250 \rightarrow 160$）すると、減少した r の罰金関数 P の最小点は減少前の r のものから大幅に離れたところに位置する。このため、減少した r（この場合は $r=160$）の最適化計算で探索点が P の最小点に向かって一気に移動することとなり、図-5 に示すような Spline 関数による偏心傾斜荷重に対する安全率算定の対象範囲外の域に入ってしまう結果になったので、誤った安全率が求められ、収束点が P の最小点とならなくなった。さらに r が減少してこのような繰り返しを行った結果、探索点は最終的に最適点から離れたところに収束してしまった。</p> <p>② $r = 4.096$ 以下の P の等高線が極めて歪んでおり、そのもとで r が大幅な減少を繰り返しつつ最適化がされたため、収束値の精度が悪くなった。（図-13）</p>	同左（①のみ）	同左（①のみ）
0. 1 6	同上	同左	$r = 25.6$ の P の等高線が極めて歪んでいる中で、 r が 160 から 25.6 に大幅な減少をして最適化がされたため、 $r = 25.6$ の収束値の精度が悪くなった。
0. 4	r_0, r_1 の最適化計算は、罰金項が $F(X)$ に比べて非常に大きくなるため、 $P(r_0) \approx P(r_1)$ となり、終了した。	問題なし	問題なし
0. 6 3 3	r_0, r_1 の最適化計算は、罰金項が $F(X)$ に比べて非常に大きくなるため、 $P(r_0) \approx P(r_1)$ となり、終了するところであった。	r_0, r_1 の最適化計算は、罰金項が $F(X)$ に比べて非常に大きくなるため、 $P(r_0) = P(r_1)$ になり、終了した。	問題なし

ることとしている。4 $n+1$ 回の円形すべり計算においては、本来、ある断面で安全率を最小とする円弧を求めるために導入した格子の中心座標及び刻み幅の初期値を4 $n+1$ 回の各計算毎に設定する必要がある（付録参照）が、本最適設計においてはこれらのデータを入力の段階で一組しか与えることとしていないので、全てこのデータを初期値として各円形すべり計算を行うこととしてい

る。

従って、設計変数のとり得る範囲が広い場合等では、3. 3 における安全率算定の考え方から大幅に相違する4 $n+1$ 個の断面の安全率を円形すべり計算により求めなければならないが、各円形すべり計算における格子の中心座標及び刻み幅の初期値が全て入力値と同じであることから、それらの値によっては、安全率を最小にする

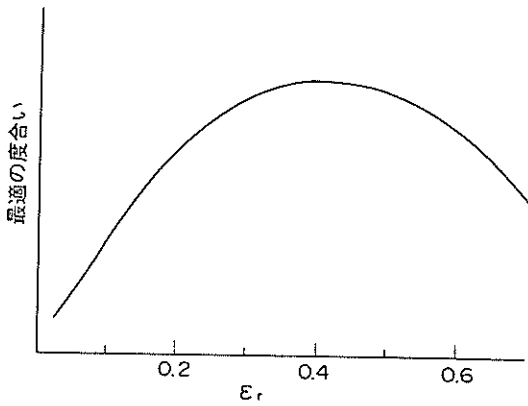


図-14 罰金係数の減少率 ϵ_r と最適の度合

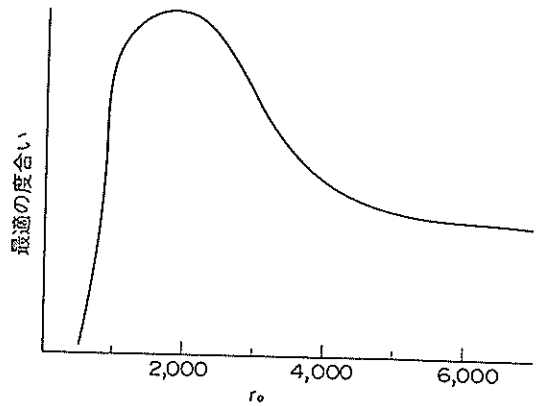


図-15 罰金係数の初期値 r_0 と最適の度合

円弧の中心座標が設定した格子の範囲を大幅に越えていることもあるため、その断面の真の安全率、延いては最適値を求めることができない場合も生じる。

このようなことから、偏心傾斜荷重に対する安全率の関数近似において円形すべり計算が適切に行われるようにするため、格子の中心座標及び刻み幅の入力値の設定方法について検討した。

本検討では、水深-10m、-20mで通常設定されるような設計条件の混成式防波堤の平均的な断面における格

子の中心座標及び刻み幅の設定を対象とした。具体的には、大幅に相違する4 $n+1$ 個の断面の円形すべり計算が円滑に行われるようにするため、各設計変数のとり得る範囲と格子の刻み幅の関係を検討することとした。検討は、各設計変数を単独に変化させ、この変化とこれに伴う円弧の中心座標の変化の関係を分析することにより行った。なお、各設計変数は、本検討で扱ったような設計条件に対して設計された数多くの既存混成式防波堤の断面諸元値の中の最大または最小の値に単独に変化させ

表-3 格子の中心座標及び刻み幅の検討のための設計条件及び断面諸元

[設計条件]		
水深 (m)	- 10	- 20
波高 (m)	5.0	8.0
周期 (sec)	10.0	12.0
海底勾配	1 : 200	1 : 200
潮位		
H.W.L (m)	2.0	2.0
L.W.L (m)	0.0	0.0
捨石マウンド		
内部摩擦角 (°)	40 (35)	40 (35)
水中単位体積重量 (tf/m ³)	1.0	1.0
見かけの粘着力 (tf/m ²)	— (2.0)	— (2.0)
基礎地盤 (砂質土)		
内部摩擦角 (°)	30 (40)	30 (40)
水中単位体積重量 (tf/m ³)	1.0	1.0
[断面諸元] {最小値, 平均的な値, 最大値}		
マウンド厚 (m)	{ 1.5, 2.5, 5.0 }	{ 2.5, 5.0, 10.0 }
堤体幅 (m)	{ 10.0, 15.0, 20.0 }	{ 10.0, 20.0, 30.0 }
マウンド肩幅 (m)	{ 5.0, 10.0, 20.0 }	{ 5.0, 15.0, 25.0 }
フーチング長 (m)	1.0	2.0
ケーソン法線方向長 (m)	15.0	15.0
マウンド勾配	1 : 2	1 : 2

注) ()内は、偏心傾斜荷重に対する検討における値

表-4 各設計変数を変化させた断面における円弧の中心座標

水深：-10m

設計変数 検討断面	マウンド厚 (x_1)	堤体幅 (x_2)	マウンド肩幅 (x_3)
最 小	1.5	10.0	5.0
	(20.0, 12.8)	(18.5, 7.3)	(20.8, 16.5)
小	2.0	12.5	7.5
	(20.8, 15.8)	(20.0, 15.3)	(21.0, 16.8)
平均断面	2.5	15.0	10.0
	(21.8, 19.8)		
大	3.75	17.5	15.0
	(24.5, 30.8)	(23.5, 22.8)	(23.0, 23.5)
最 大	5.0	20.0	20.0
	(26.8, 28.8)	(25.5, 26.8)	(25.3, 29.3)

水深：-20m

設計変数 検討断面	マウンド厚 (x_1)	堤体幅 (x_2)	マウンド肩幅 (x_3)
最 小	2.5	10.0	5.0
	(29.0, 11.0)	(31.5, 23.8)	(31.0, 22.0)
小	3.75	15.0	10.0
	(31.8, 25.3)	(31.3, 11.3)	(33.0, 27.3)
平均断面	5.0	20.0	15.0
	(35.0, 32.5)		
大	7.5	25.0	20.0
	(39.0, 34.8)	(38.0, 46.5)	(36.0, 35.0)
最 大	10.0	20.0	25.0
	(46.3, 49.3)	(41.8, 56.3)	(38.3, 40.8)

注) 1. 検討断面において、

①最小(最大)：当該設計変数が最小値(最大値)である断面(他の設計変数は当該設計条件の平均的な断面諸元)

②小(大)：当該設計変数が最小値(最大値)と当該設計条件における平均的な断面諸元との中間値である断面(他の設計変数は当該設計条件の平均的な断面諸元)

2. 各検討断面において、

①上段：設計変数値

②下段：()内：円弧中心座標(図-1においてケーソンの壁面(防波堤では港外側、係船岸では海側)と観測基準面(D.L.)の交点Oを原点としたものである)

ている。

検討条件は、表-3に、各断面の円形すべり計算の結果は表-4に示すとおりである。

表-4から、各設計変数ごとに、平均的な断面と各設計変数を変化させた断面の円弧中心座標の変化を設計変数の当該変化と成分毎に関連づけた。ここで、入力値である格子の中心座標と各断面の円形すべり計算によって得られる安全率を最小にする円弧の中心座標(収束値)の各成分毎の差の許容範囲は、本最適設計において、円形すべり計算が最大 9×9 (交点数)の格子の各交点を円弧の中心点として全て行われ、その結果から安全率の収束点(隣接するどの点の安全率よりも小さい安全率を与える点)が求められることとなっているため、 $4 \times \Delta$ (Δ :格子の刻み幅)とする。なお、この許容範囲は、本最適設計における円形すべり計算が円弧の中心座標を最初に設定した格子内で追跡するほか、当該格子を拡張して追跡して行われることとしていること(付録参照)から、安全側のみで設定している。

この結果を踏まえて式(4.3)に設計変数の範囲と格子の刻み幅の関係を成分毎に示した(例えば、水深-10mにおいて、マウンド厚が最小値である断面(他の諸元は平均的なもの)と平均的な断面(このマウンド厚を x_{10} とする)の円弧中心座標のX方向成分(ケーソン法線直角方向成分)を比較すると、その変化は1.8m(=21.8m-20.0m)であり、マウンド厚自体の変化は1m(=2.5m-1.5m)である。一方、中心座標の変化の許容値は $4 \times \Delta_x$ (Δ_x :X方向(ケーソン法線直角方向)の刻み幅)であるので Δ_x におけるマウンド厚のとり得る最小値 x_{1Xmin} は $x_{1Xmin} = x_{10} - 2 \Delta_x$ となる)。ただし、円弧中心座標の変化の許容値を安全側に設定していること、本検討は格子データの設定の「目安」についてであることから、概ねの関係式としている。また、水深-10mと-20mのものとの関係はほぼ同じであったため、一つにまとめている。

$$\begin{aligned}
 x_{1Xmin} &= x_{10} - 2 \Delta_x, & x_{1Xmax} &= x_{10} + 2 \Delta_x \\
 x_{1Ymin} &= x_{10} - \Delta_y, & x_{1Ymax} &= x_{10} + \Delta_y \\
 x_{2Xmin} &= x_{20} - 5 \Delta_x, & x_{2Xmax} &= x_{20} + 5 \Delta_x \\
 x_{2Ymin} &= x_{20} - \Delta_y, & x_{2Ymax} &= x_{20} + \Delta_y \\
 x_{3Xmin} &= x_{30} - 10 \Delta_x, & x_{3Xmax} &= x_{30} + 10 \Delta_x \\
 x_{3Ymin} &= x_{30} - 4 \Delta_y, & x_{3Ymax} &= x_{30} + 4 \Delta_y
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

ここに x_{10} : 初期仮定断面におけるマウンド厚

x_{20} : " 堤体幅
 x_{30} : " マウンド肩幅

Δ_x : X方向(ケーソン法線直角方向)の刻み幅

Δ_y : Y方向(水深方向)の刻み幅

x_{iXmin} ($i = 1 \sim 3$) : Δ_x における設計変数のとり得る最小値

x_{iXmax} (") : Δ_x における設計変数のとり得る最大値

x_{iYmin} (") : Δ_y における設計変数のとり得る最小値

x_{iYmax} (") : Δ_y における設計変数のとり得る最大値

さらに、上記より各設計変数の最大値および最小値と格子の刻み幅との関係は、

$$\begin{aligned}
 x_{1min} &\geq \max(x_{10} - 2 \Delta_x, x_{10} - \Delta_y) \\
 x_{1max} &\leq \min(x_{10} + 2 \Delta_x, x_{10} + \Delta_y) \\
 x_{2min} &\geq \max(x_{20} - 5 \Delta_x, x_{20} - \Delta_y) \\
 x_{2max} &\leq \min(x_{20} + 5 \Delta_x, x_{20} + \Delta_y) \\
 x_{3min} &\geq \max(x_{30} - 10 \Delta_x, x_{30} - 4 \Delta_y) \\
 x_{3max} &\leq \min(x_{30} + 10 \Delta_x, x_{30} + 4 \Delta_y)
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

ここに x_{imin} ($i = 1 \sim 3$) : 設計変数の最小値

x_{imax} (") : 設計変数の最大値

偏心傾斜荷重に対する検討における円形すべり計算の格子の刻み幅は、上記を目安に各設計変数の範囲との関係によって設定できるものと考えられる。なお、フーチング長については、細部設計等からその範囲が決定されるものと考えられるので、過去の事例等から経験的に設定すればよいものと思われる。

また、本検討で扱ったような設計条件での最適設計における格子の中心座標は、当該設計条件の平均的な断面における円弧の中心座標を目安にして設定すればよいものと考えられる(表-4)。

5. 偏心傾斜荷重に対する検討法の比較

偏心傾斜荷重に対する検討方法は、昭和63年10月に改定された技術基準の中で、「荷重分散法と片山・内田法の組み合わせ」(以下「従来法」という)等に基づいて行うこととしていたものから、ビショップ法に基づくことを標準とすることに改正された。このため、ビショップ法を適用した場合の設計断面を従来法によるものと比較した。

検討条件は、

①構造は混成式防波堤とする。

②波高 8m, 周期 12sec. とする。

③水深は -10m, -20m, -30m について検討する。

④基礎地盤の土質は砂質土とし, 水中単位体積重量を $\gamma = 1.0 \text{ tf/m}^3$, 内部摩擦角を $\phi = 30^\circ$ (ビショップ法では $\phi = 40^\circ$) とした。

⑤マウンド捨石の設計値は水中単位体積重量を $\gamma = 1.0 \text{ tf/m}^3$, 内部摩擦角を $\phi = 40^\circ$ (ビショップ法では, $\phi = 35^\circ$ のほか見掛けの粘着力 $c = 2 \text{ tf/m}^2$) とした。

⑥設計変数はマウンド厚, 堤体幅, マウンド肩幅, フーチング長とした。それらの範囲のうち, マウンド厚の最小値を 1.5m, マウンド肩幅の最小値を 5.0m, フーチング長の最大値を 4.0m とした。その他の断面諸元はケーソン高の最大値を 25.0m (ケーソン天端高は +2.5m) としたほかは各設計条件における平均的な値を用いている。

⑦偏心傾斜荷重に対する検討法は「ビショップ法」及び「従来法」とした。

⑧「従来法」を用いる場合, ケーソン底面の前しにおける反力の許容値は 60 tf/m^2 とした。

⑨工費単価は東京湾内における過去の建設事例を参考にした。¹⁹⁾

これらの条件のもとで, 各検討法により最適設計を行い, 滑動, 偏心傾斜荷重等各種安全率の影響を踏まえつつ, 水深と工費または断面諸元の関係を比較した。

本検討は, 本研究で行った事例が極めて限定的なものであるため一般的な傾向を示すものではないが, その条件の範囲内では図-16~20より次のことがわかる。

工費は, 両手法とも水深が大きくなるに従って増大しており, その差も増大する傾向が見られる (図-16)。

これは, 「従来法」により得られた断面, 特にマウンド厚及び堤体幅がケーソン底面の前しにおける反力等の制約を受けたため, ビショップ法によるものに比べて大きくなったものと考えられる。このように, 偏心傾斜荷重に対する検討にビショップ法を用いることにより, より経済的な構造物の建設が可能となるものと考えられ,

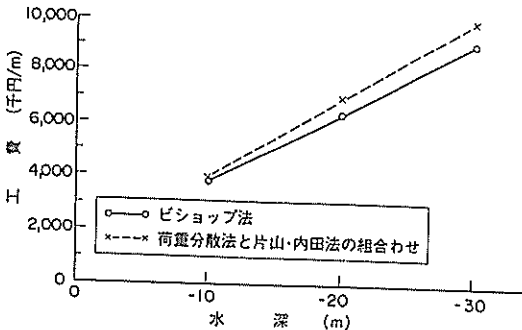


図-16 偏心傾斜荷重に対する検討法の比較 (工費)

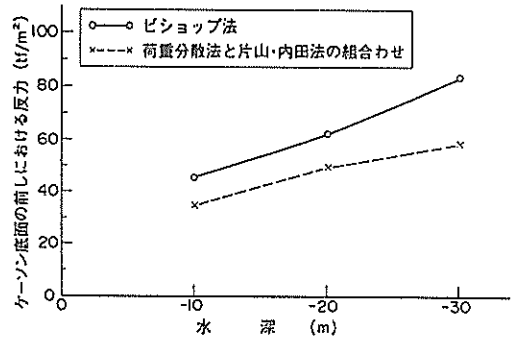


図-17 偏心傾斜荷重に対する検討法の比較 (ケーソン底面の前しにおける反力)

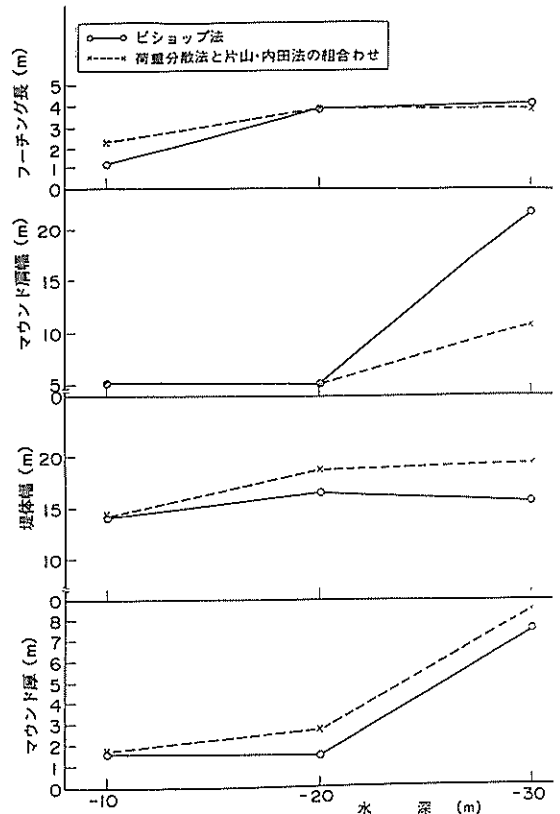


図-18 偏心傾斜荷重に対する検討法の比較 (最適断面諸元)

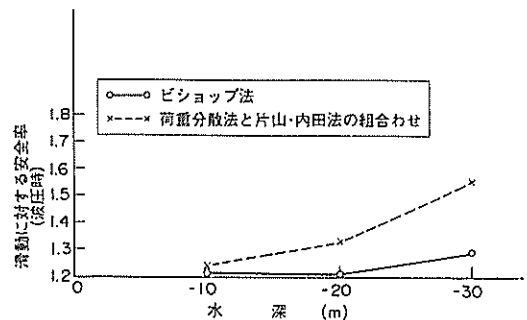


図-19 偏心傾斜荷重に対する検討法の比較 (滑動に対する安全率)

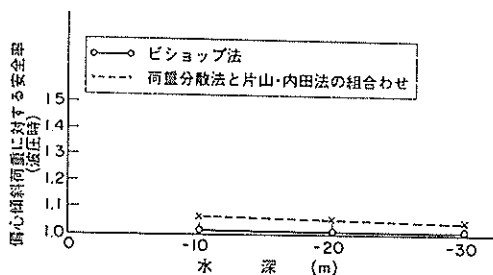


図-20 偏心傾斜荷重に対する検討法の比較
(偏心傾斜荷重に対する安全率)

これは水深が増大するとより顕著となることがわかる。しかし、ケーソン底面の前しにおける反力は、水深が大きい場合、極めて大きくなっており、本事例では、水深-30mの場合 $80\text{tf}/\text{m}^2$ 程度となっている(図-17)。このため、このケーソン底面の前しにおける極めて大きい反力によって局部的な沈下等が生じる可能性があるのではないと思われる。特に係船岸や基礎地盤が粘性土を対象とする場合、この沈下等が構造物の機能に大きく影響を及ぼすとすれば、施工断面を決定する際はこの点についての妥当性を確認することも必要かと思われる。

一方、ビショップ法による最適断面諸元を見ると(図-18)、水深-30mでは、与えられた制約条件や単価の範囲内でケーソン高が最大値をとっている。これは従来法で行っていたケーソン底面の前しにおける反力等の制約を外したためと考えられる。また、同水深において、マウンド厚は従来法に比べてほぼ同じであるにもかかわらず堤体幅が小さく、マウンド肩幅が大きくなっている。

この理由として、

- ①従来法で行っていたケーソン底面の前しにおける反力等の制約を外したこと
- ②偏心傾斜荷重に対する安定条件により、同一マウンド厚では堤体幅が減少するとマウンド肩幅は増大するが、本事例の条件においてはケーソン堤体幅を減少させるとそれともなうケーソン製作費の減少分がマウンド肩幅の増加ともなう工費の増大分に比べて大きいため、与えられた制約条件の範囲内で堤体幅を小さく、マウンド肩幅を大きくした方が経済的であることが考えられる。

6. 結論

ケーソン式防波堤及び係船岸の基本設計の最適化について以下のことが明らかとなった。

- (1)罰金関数は、式(3.3)を用いれば、合理的な断面を得ることができることを確認した。

- (2)偏心傾斜荷重に対する安全率の算出は、主要な断面で行った円形すべり計算の結果を Spline 関数で近似する方法を用いれば、その計算時間を短縮できることがわかった。

- (3)罰金係数の設定は、下記に示した方法によるのが妥当であることがわかった。

- ①減少率は0.4程度とする。

- ②初期値は、経験的に見積もられた単位mあたりの工費の0.2から0.3程度に設定し、計算の結果得られた工費が当初のものと大幅に相違することがないことを確認することで合理的なものとする。

- (4)偏心傾斜荷重に対する検討で行われる円形すべり計算における格子の刻み幅は各設計変数の範囲との関係によって設定できるようにした。

- (5)偏心傾斜荷重に対する検討法の比較により、本研究で行った事例の条件の範囲内では、ビショップ法を用いて得られた断面の方が経済的であり、これは、水深が増大するとより顕著となることがわかった。しかし、ケーソン底面の前しにおける反力は、水深が大きい場合、極めて大きいものとなっている。

7. あとがき

本研究の成果は、改訂後の技術基準に基づいたケーソン式防波堤及び係船岸の基本設計の断面決定の一助になるものと考えられる。

今後は、以下のことが課題と考えられる。

- (1)SUMT及び円形すべり計算により、計算時間が4設計変数で30分程度かかるため、入力作業を慎重に行うことが望ましい。
- (2)本研究の事例は良質な砂地盤であるが、同一の傾向が粘性土地盤で得られることは示していない。今後、種々の設定条件による実施例が得られた段階でそれらを取りまとめ、考察を加えることが貴重であろう。
- (3)偏心傾斜荷重の検討法の比較において、水深-30mの場合、ビショップ法を用いて得られる最適断面のマウンド厚は、ケーソン高の制限を行っていること及びケーソン製作等の単価を水深にかかわらず一定にしていること等の制約の範囲内で最小となったが、さらにその制限を外し、単価の与え方によっては、設定したマウンド厚の範囲内で最小となる可能性がある。

本研究を行うにあたっては、当所の情報センタープログラム開発室藤崎室長並びに横田主任研究官及び土質部土性研究室小林室長に多大なる便宜を計っていただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

(1990年9月29日受付)

参考文献

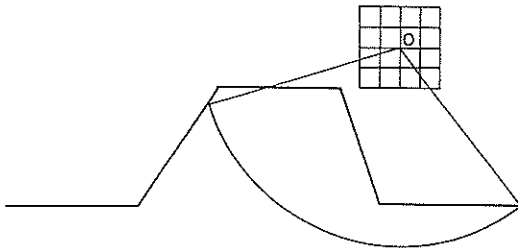
- 1) 山本修司, 塩沢俊彦: 混成式防波堤の最適設計, 港湾技研資料, No.301, 1978年9月
- 2) 山本修司, 内田豊彦: 混成式防波堤の最適設計(その2), 港湾技研資料, No.347, 1980年6月
- 3) 福井正幸, 内田豊彦: 港湾構造物の最適設計について— 解の収束性と港湾構造物の設計変数等の検討 —, 港湾技研資料, No.406, 1982年3月
- 4) 山本修司, 塩沢俊彦: 地盤改良断面の最適設計, 港湾技研資料, No.328, 1979年12月
- 5) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1989年, pp. 338~344
- 6) 山田善一, 大久保禎二: 最適構造設計— 概念・方法・応用 —, 丸善, 1983年, pp. 152~163
- 7) 長尚: 構造物の最適設計, 朝倉書店, 1971年, p. 74
- 8) 参考文献 1) に同じ, pp. 8~10
- 9) 参考文献 1) に同じ, p. 8
- 10) 参考文献 2) に同じ, p. 6
- 11) 参考文献 3) に同じ, p. 4
- 12) 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年3月
- 13) 参考文献 6) に同じ, pp. 160~161
- 14) 参考文献 4) に同じ, pp. 9~11
- 15) 参考文献 3) に同じ, p. 10
- 16) 参考文献 7) に同じ
- 17) 柳生忠彦: 港湾施設の設計における設計条件寄与率, 港湾技研資料, No. 381, 1981年6月

付録 安全率が最小となる円弧の中心座標等の算出方法について

安全率が最小となる円弧の中心座標等を見つけるため、本最適設計における円形すべり計算では以下に示す3段階の円弧中心座標の追跡計算を行うこととしている。

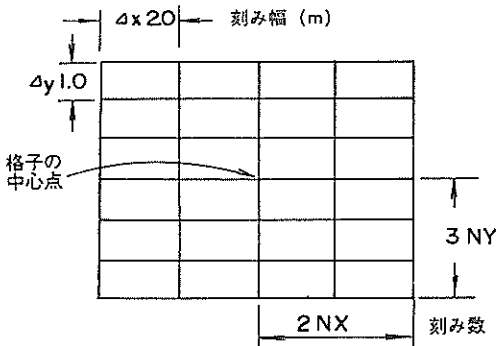
(1) 最初の格子による計算

円形すべり計算は、円弧の中心座標と円の通過点のデータを与えることにより、計算が実行される。



付図-1 円形すべり計算における格子

円弧の中心座標は入力時に格子データ（格子の中心座標、格子の刻み幅、刻み数）として与える（付図-2）。

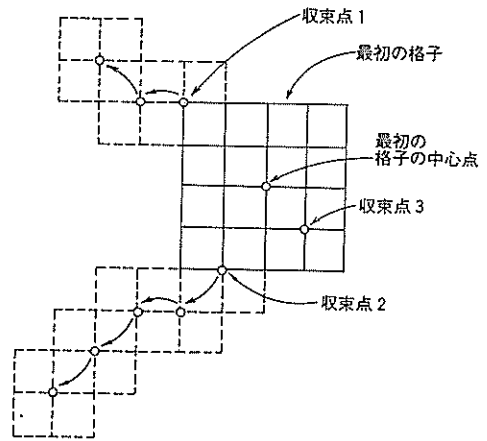


付図-2 格子の諸元

この計算では、格子の交点（入力時の格子の交点は最大 $9 \times 9 = 81$ 点）を円弧の中心点とするものについて円形すべり計算がすべて行われ、安全率の収束点（隣接するどの点の安全率よりも小さい安全率を与える円弧の中心点）がすべて表示される。

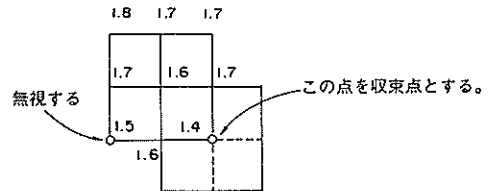
(2) 拡張追跡

(1)の計算で、安全率の収束点が格子の外側の交点上にあるときは、その点を中心とする最小の格子（交点数9）を形成して、再度円形すべり計算を行い、収束点を見つける（1次拡張）（付図-3）。



付図-3 拡張追跡

点が2点ある場合は安全率の小さい方が採用される（付図-4）。この時、1次拡張の追跡計算での収束点が格

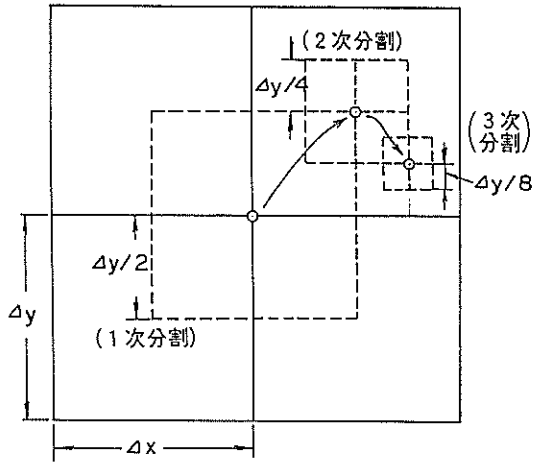


付図-4 収束点が2点の場合の処理

子の中心点にこなければ、再びその収束点を中心とする格子を形成して2次拡張計算を行う。この拡張追跡計算は収束点が最小格子の中心にくるまで（ただし、最大9次拡張まで）追跡を続ける。この拡張追跡計算は入力時の指定なしに自動的に行われる。

(3) 分割追跡（1次～3次）

(1)または(2)の追跡計算により収束点が見つかったとき、次にそれらの収束点を中心とし、格子の刻み幅が最初の $1/2$ の最初の格子（交点数9）を形成して、収束点を見つける（1次分割）。次に、1次分割の収束点を中心とし、格子刻み幅が最初の $1/4$ の格子による追跡計算を行う（2次分割）。同様に、3次分割の追跡計算まで行う。この分割追跡計算は入力時に次数を指定することとしている。これらを付図-5に示した。



付図-5 分割追跡

港湾技研資料 No. 693

1990・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 東京プリント

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

Copyright © (1990) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a matching language without the written permission of the Director General of P.H. R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。