

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

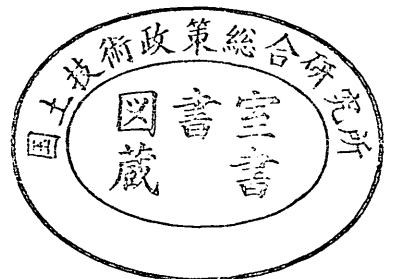
資料係  
文献複写  
禁持出

VOL. 7

NO. 4

DEC. 1968

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。

報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

和文篇 (Japanese Edition)

Vol. 1. No. 1 (1963)

Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)

Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)

Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)

Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)

Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

Report Nos. 1~15 (1963~1967)

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第7巻 第4号 (Vol. 7, No.4) 1968年12月 (DEC. 1968)

## 目 次 (CONTENTS)

1. 水波上の性質について……………浜田 徳 …… 3  
(On some properties of wind over water waves Tokuichi HAMADA)
2. 長周期波に対する防波堤の効果に関する計算 (第3報)  
——模型実験との比較——  
……………伊藤喜行・木原 力……………23  
(Digital Computation on the Effect of Breakwaters against Long-period Waves  
(3rd Report)…)…  
——Comparison with experiments——  
Yoshiyuki ITO and Tsutomu KIHARA,)
3. 長周期波に対する防決堤の効果に関する計算 (第4報)  
——1968十勝沖地震津波に対する大船渡防波堤の効果——  
……………伊藤喜行・谷本勝利・木原 力……………55  
(Digitel Computation on the Fffect of Breakwaters against Long-period Waves  
(4th Report)  
——On the Effect of Ofuuato Tsunami Breakwater against the Tsunami caused  
by the Earthauake on May 16 1968——  
…………… Yoshiyuki ITO Katsutoshi TANIMOTO and Tsutomu KIHARA
4. 生石灰による沖積粘土の安定処理について (第1報)  
……………柳瀬重靖……………85  
(Stabil zation of Alluvical Clays with Quicklime…… Shigeyasu YANESE)
5. 幹面安定解析におけるビンヨップ法とチェボタリオフ法の比較  
……………野村健司・早藤能伸・長友文昭…………… 133  
(Comparison betemeen Bishop's method and Tschebotarioff's method in slope  
stafiliy analysis  
……………Keuji NOMURA・Yoshinobu HAYAFUJI and Fumiaki NAGATOMO

## 5 斜面安定解析におけるビショップ法と チェボタリオフ法の比較

野村 健司\*・早藤 能伸\*\*・長友 文昭\*\*\*

### 要 旨

三つの斜面破壊例、およびいくつかの斜面の例に対して、ビショップの簡易法、およびチェボタリオフ法で計算し、比較検討をした。

破壊例において、チェボタリオフ法は、 $F_s=0.97\sim 1.01$ の範囲であったが、ビショップ法による値は、チェボタリオフ法の値に対して、6%~27%大きな値を与えた。

ビショップ法は、その下限の値が $(-\tan \alpha \cdot \tan \phi) \max (>0)$ で与えられるので(深いすべり円の場合に)異常に大きな値を与える可能性がある。

深いすべり円が起りえる港湾分野において、間ゲキ圧が静水圧で表わされる場合は、チェボタリオフ法を用いた方がよいと思われる。

---

\* 土質部 土性研究室

\*\* 設計基準部 計算室

\*\*\* 設計基準部 主任研究官

## 5 Comparison between Bishop's method and Tschebotarioff's method in slope stability analysis

Keuji NOMURA \*  
Yoshinobu HAYAFUJI\*\*  
Fumiaki NAGATOMO \*\*\*

### Synopsis

Bishop's simplified method which is said to give satisfactorily approximate value of factor of Safety  $F_s$ , obtained by its rigorous method, is compared to the Fellenius method with the buoyant weights of submerged materials which we name Tschebotarioff's method in this report.

Three case records of failure in which soil properties are carefully investigated show that  $F_s$  obtained by Tschebotarioff's method are between 0.97 and 1.01 and obtained by Bishop's simplified method are larger from 6 to 27 percent than these values.

Being varied the differences of  $F_s$  with the shapes of slopes and soil properties, this trend appeared in all examples treated in this report both with no pore pressure and with hydrostatic pressure.

In special case, Bishop's simplified method does not give  $F_s$  of positive.

Lower limit of  $F_s$  by Bishop's simplified method is defined as  $(-\tan\alpha \cdot \tan\phi) \max(>0)$ , where  $\alpha$  is central angle of slice and  $\phi$  is strength parameter.

In so called deep failure, that failure might occur in port and harbour field, this lower limit of  $F_s$  may become remarkably large value.

Therefore, Tschebotarioff's method seems to give more appropriate evaluation of  $F_s$  in port and harbour field.

Programming of both methods for electronic computer TOSBAC 3400 are reported as a supplement.

\* Member of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

\*\* Member of Computation Room, Design Standard Division

\*\*\* Senior Research, Design Standard Division

# 目 次

要 旨	133
1. ま え が き	137
2. 斜面安定の計算方法	137
2.1 概 説	137
2.2 これまでの研究	138
2.3 分割法の発展	139
3. フェレニウス法の代表的な方法	141
3.1 チェボタリオフの方法	141
3.2 ビショップの方法	141
3.3 USBRの方法	146
3.4 フェレニウス法の他の表現	146
3.5 転倒モーメント	148
4. チェボタリオフ法の問題点	149
5. ビショップ法の問題点	149
6. ビショップ法とチェボタリオフ法との比較	149
6.1 式による比較	149
6.2 計算結果による比較	150
7. ま と め	165
8. 結 論	166
あとがき	166
参考文献	167
記号表	168
付録A プログラムの概要	169
付録B 有効置換厚	174

## 1. まえがき

地盤上に基礎をおく構造物の設計においては、基礎地盤の支持力と沈下に関する検討が重要である。とくに我國の港湾分野においては近年、軟弱な地盤上に構造物を建設することが多くなっている。

このような場合、構造物を含めて基礎地盤全体の崩壊に対する安定性、いわゆる斜面安定の問題が重要になる。

斜面安定の解析はこれまで土質工学の発展とともに多くの調査、研究がなされ、いろいろな方法が提唱されている。<sup>1)</sup>

現在は、地域によって、あるいは対象となる構造物によって、いくつかの方法が、その都度用いられているようである。

我國の港湾分野では、通常斜面安定計算としては、土塊を分割して考えるいわゆるスエーデン法の内、チェボタリオフがのべている方法が用いられている。<sup>2)</sup>

ここでは、この方法をチェボタリオフの方法と仮称する。これは水中の物体の重量は浮力を差引いて考え、仮想した円形すべり面に沿ってセン断応力の極限のつりあい状態を考えるものであり、セン断強さとセン断応力の比、すなわち土のセン断強さに関する安全率を求める方法である。

チェボタリオフの方法は、安全率の計算に分割片側面に働く力が現われず、また過剰間ゲキ圧を直接とり入れることはできない。

ここでは、これまでに行なわれてきた円形すべりに関係のある研究のいくつかを紹介し、同じくスエーデン法の内、分割片側面に働く力を考慮しており、現在欧米で広く用いられているビンジョップの方法<sup>3)</sup>をいくつかの例についてチェボタリオフの方法と比較検討する。

なお、主な計算は、港湾技術研究所計算室に設置されているコンピューター TOSBAC-3400 に対して作成したプログラムを用いて行った。同計算室では以前に設置されていたコンピューター TOSBAC-3123 に対してビンジョップ法<sup>4)</sup>およびチェボタリオフ法のプログラムを有していたが、TOSBAC-3400 に機種を変更する機会に計算条件を拡張して新たにプログラムを作成したので<sup>5)</sup>その概要を付録Aで報告する。

## 2. 斜面安定の計算法

### 2.1 概 説

均質な地盤で地表面が水平でない場合、あるいは水平であっても、地盤が均質でないか上載荷重など外的な力が存在する場合、地盤内部にはセン断応力が発生する。一般に、発生したセン断応力が地盤内の任意の部分で土のセン断強さを越えない内は地盤全体は安定を保っているが、セン断応力がある連続面でセン断強さを超過すると、連続面より上にある土塊部分のすべり破壊が生じる。

このような部分的なすべり破壊が発達して地盤全体としてのすべり破壊に至る。

すべり破壊を起す要因としては、土の自重、浸透水の圧力、上載荷重などがあり、特別な場合として地震力および波力などの外力を考慮する必要がある。

一方、土のセン断強さは一般に次のクーロンの破壊条件式で表わされる。すなわち

$$s=c+\sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここに

- s: 土のセン断抵抗
- c: 土の強度定数でみかけの粘着力
- $\phi$ : 土の強度定数でみかけのセン断抵抗角
- $\sigma$ : セン断面における垂直応力

である。

三軸圧縮試験で有効応力に基づく強度定数を求めた場合、式(1)は

$$s=c'+(\sigma-u)\tan \phi' \quad (2)$$

ここに

- u: 間ゲキ圧
  - c': 有効応力に基づくみかけの粘着力
  - $\phi'$ : 有効応力に基づくみかけのセン断抵抗角
- である。

斜面安定解析にあたっては地盤の実状に応じて最も適当なセン断強さを用いる必要がある。一般に軟弱な正規圧密されている粘性土地盤の上に盛土工事など上載荷重を施工する場合には、施工直後が最も危険な状態と考えられる。このような場合は、いわゆる短期安定問題として  $\phi=0$  と考える方法が適当であるといわれている。

一方、大規模な掘削などによって地盤が膨潤するような場合は長期安定が重要になり、現在このような場合は  $c'$ ,  $\phi'$  を用いる方法、すなわち有効応力による解析が良いとされている。<sup>1)</sup>

斜面のすべり破壊の安定性を示す安全率  $F$  としては、粘着力に関するもの  $F_c$ 、まさつ抵抗に関するもの  $F_\phi$ 、斜面の高さに関するもの  $F_h$  などが提唱されてきたが、とくに  $F_c = F_\phi$  となる場合の  $F$  は強度に関する安全率  $F_s$  として、今日もっとも広く用いられている。

また、近年塑性論的立場からすべり破壊するまでの荷重を考慮する重量に関する安全率  $F_T$  が提唱されている。<sup>6)</sup>

斜面の安定を検討する方法は二つに大別することができる。すなわち地盤内の応力分布状態を調べて、地盤内の応力一ひずみ関係を求めていく解析方法と、考えられるいろいろな形状のすべり面を仮定して、それらのすべり面の上にある土塊がすべり面に沿って滑動するか否かを検討する方法である。

土圧論的見地から前者をランキン系、後者をクーロン系の安定解析ということもできる。

地盤内の応力一ひずみ関係を正確に求めることは容易なことではない。単純化した地盤に対して、これまで多くの研究がなされてきたが、複雑な地盤に対応できる一般的な方法はまだ確立されていないといえない。さらに実際に計算するにあたっては具体的な仮定が必要であるが、信頼できる仮定を得ることは容易ではない上、労の多い割に信頼できる結果は少ないのが実状で、現在はまだ実用的な方法とはなっていない。しかし、コンピューターの進歩が目ざましいので、今後は発展すべき分野である。

これに対してすべり面を仮定して、すべり面に沿う最小の安全率を求める方法は、実際の破壊にほぼ対応していることおよび、計算が比較的容易であることなど実用的立場から現在広く用いられている。本報告ではランキン系の方法についてはふれず、以下クーロン系の方法についてのべることにする。

すべり面を仮定する方法にもいくつかの根本的な問題がある。すなわち、もろい土（砂）の場合は連続した滑らかなすべり面ではなくすべり帯と考えるべきではないかということ<sup>7)</sup>、安全率としてセン断強さに関する  $F_s$  を用いることによって仮定したすべり面と破壊時のすべり面との相似性がなくなること<sup>8)</sup>、自然地盤内の応力の異方性およびすべり面に沿う主応力方向の変化が計算には考慮されていないことなどである。しかし、本報告においては以上の問題点にはふれないことにする。

## 2.2 これまでの研究<sup>1)</sup>

ここではクーロン系の方法について研究されてきた主要なものをあげてみる。

クーロンは 1773 年に粘着力および内部まさつ角を有する鉛直な斜面に平面すべりを仮定し臨界高さを与える式を提案している。

1820 年にはフランス人が単純斜面に拡張適用し、斜面先を通る平面すべりを仮定して臨界高さ求める式を導いている。

すべり面として曲面（サイクロイド）を用いて解析を行ったのは 1846 年コーリングが最初であった。

1900 年代に入ってスウェーデンでは鉄道、および港湾岸壁において多くの斜面崩壊が起ったため、土質調査委員会が組織され斜面安定ととりくんだ。<sup>8)</sup>

1910 年にフェレニウスは岸壁の安定計算に 3 本の直線からなるすべり面を導入する方法を発表している。

1916 年に起った岸壁のすべりに対してピーターソンはすべり面を円形と仮定し、鉛直線で斜面を分割する方法を提唱した。同年ハルトンはこの円形のすべり面を用いて岸壁の安定計算に成功した。この二人は夫々円形すべり計算法を発表したが土のセン断強さをまさつ抵抗だけで表わし、所要のまさつ角を求めるものであった。

ハルトンはもっとも危険なすべり面は必ずしも円形ではなく、いくつかの直線および円弧からなる複合すべり面となることを示唆している。

しかし、この円形すべり計算法を確立し、広く用いられる方法としたのはフェレニウスであった。1926 年に彼はすべり面での土のセン断抵抗として粘着力も導入し、安全率を土の極限平衡状態を仮定して定義した。フェレニウスの方法はその後今日にいたるまで斜面安定計算の基本的な方法として、安全率の定義とともに広く用いられている。なおフェレニウスは 1918 年に円形すべりにヘランの粘着力を用いて、 $\phi = 0$  法をはじめで紹介している。

このフェレニウスの方法は 1930 年代の初めにはスウェーデン法として国際的に広く用いられるに至った。

すべり面として円形を考える場合には解法としては、普通の分割法の他にまさつ円法がある。

これはピーターソンやハルトンらが用いていたまさつ円を用いるもので、各分割片底面に働く反力の作用線が同心のまさつ円  $R \cdot \sin \phi$  ( $R$  は円の半径、 $\phi$  はまさつ角) に接すると仮定して土塊に働く力のつりあいを考えるものであり、いくつかの  $F_\phi$ 、 $F_c$  の組から  $F_\phi = F_c$  となる  $F$  を安全率とする。

この方法は、最初は図解法として用いられていたが、ティラーは 1937 年、均一な  $r$ 、 $c$ 、 $\phi$  からなる単純斜



面に対してまさつ円法で計算し、対数ら線法および分割法などと比較している。<sup>9)</sup> まさつ円法による結果は1935年にレンデュリックが提案した対数ら線を用いた結果と殆ど変わらないといわれている。

地盤が均でない場合にはまさつ円法を厳密に適用することは困難になるのに対して、普通の分割法では比較的容易に計算を実行できることから、現在は円形すべりの計算としてはまさつ円法よりは普通の分割法が主として用いられている。

テイラーはまた、単純斜面の安定を保つに必要な量として、斜面傾斜角、土の内部まさつ角、および深度係数とこれらの値から決められる安定数との関係を図表化している。なお同様な図表はフェレニウスによっても発表されている。<sup>2)</sup>

近年、二個以上の円弧の組合せ、円弧と直線と組合せの計算法が紹介されているが任意の非円形すべりに適用できるものとしてヤンプーの方法がある。<sup>10)</sup> この方法は分割法に入るものであるが有効応力による解析が可能であり、すべり円が単一の円の場合は後にのべるビショップの方法によるものと同じ安全率を与える。すべり破壊が生じた場合にすべり面の形状を判断する方法としてモーゲンスタンは、すべり破壊した地盤の表面の乱さの程度が有益な手がかりになるとのべている。<sup>11)</sup>

### 2.3 分割法の発展

分割法は任意のすべり面に対して適用できるものであるが、ここでは単一の円形すべり面に対して用いられた方法について紹介する。フェレニウスが粘着力を導入してから、分割法は広く用いられるようになり、すべり面全長が同時に極限平衡状態に達すると仮定し、この状態における上のセン断強さに関する安全率を求める方法がいわゆるフェレニウスの方法として斜面安定解析法の中心となっていることはすでにのべた。ホイットマンとベイラー<sup>12)</sup>、およびターンブルとポシュレフら<sup>13)</sup>によって、水中単位体積重量  $\gamma'$  を用いる分割法、あるいは  $\gamma'$  を用いるフェレニウス法といわれている方法は、USBR(合衆国干拓局)法をさしている。

チェボタリオフは水位が断面内にある場合に水位以下の重量は全て水中重量を用いられる例を示している。<sup>2)</sup>

この方法は、現在我国の港湾分野で用いられているものである。<sup>14)</sup>

1954年、ロンドンで行なわれた斜面安定のシンポジウムで発表されたビショップの方法は分割片側面に働く力を考慮し、有効応力によって極限平衡状態を仮定する

方法で、やはりフェレニウス法の一つの拡張であると考えられる。なお、ビショップは計算をより容易に行なえるように、簡易法も示しており、アースダムのような断面においては簡易法による結果はビショップの厳密法に対して1%以下の誤差しかないことから、実用上は簡易法を使用してよいとしている。<sup>9)</sup> ホイットマンらによれば、彼らの用いたより厳密なモーゲンスタンプライスの方法に対しても、ビショップの簡易法は、多い場合で7%程度の誤差でありほぼ等しい結果を与えるものとしている。<sup>12)</sup>

1955年以降ビショップの方法に対して改良、拡張する研究がいくつかなされてきた。

1960年、ビショップとモーゲンスタンはビショップの簡易法を一定の間ゲキ圧比  $r_u$  をもった均一な単純斜面に適用して安全率  $F_s$  を求めるための安定係数を図表化した。 $F_s$  と  $r_u$  との間には直線的関係があることが確かめられており

$$F_s = m - r_u \cdot n \quad (3)$$

として求められる。<sup>15)</sup> ここに  $m$ 、 $n$  は安定係数で図-1に示されている記号から決る無次元値  $c'/\gamma H$ 、 $D$ 、 $\phi'$ 、 $\cot\beta$ 、 $r_u$  によって図表から求められる定数である。

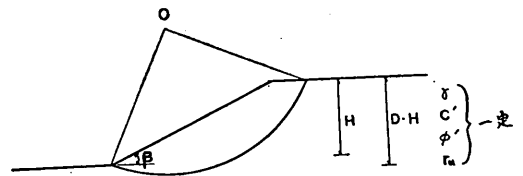


図-1 ビショップ-モーゲンスタンの用い単純斜面

ここに

$r_u$ : 間ゲキ圧比。  $u/\gamma h$  と定義される

$h$ : 考えている点の地表面からの深さ

$\gamma$ : 土の単位体積重量

$u$ : 間ゲキ圧

$\beta$ : 斜面の傾角

$D$ : 深度係数

$H$ : 斜面高さ

である。

ビショップ、モーゲンスタン図表では深度係数  $D$  は  $D=1.00, 1.25, 1.50$  の三種類しかないので  $D$  が与えられない場合、あるいは、 $D$  が与えられていても実際の臨界円がより浅い場合で臨界内の  $D$  がこれらの  $D$  の間にある場合には、与えられている図表だけからは臨界円を正確に決定することはできないと思われる。した

がって最小  $F_s$  を厳密に求めることはできないと思われるが、計算のために斜面を単純化していることを考慮すれば、実用的な立場から、斜面安定の概略を知る方法として利用できるであろう。

1965年、モーゲンスタンとプライスは、任意のすべり面に分割法を適用するにあたって、有効応力に基いて分割片側面に働く力を考慮する一般的方法を提唱し、これをさらに円形すべりに適用して、ビショップの厳密法の具体的な解法を示している<sup>11)</sup>。

まず分割片に働く力のつり合およびモーメントのつり合から解けるような静定問題とするために、各分割片に働く垂直方向の力の和  $X$  および水平方向の力の和  $E$  の間に次の関係が成立つものとした。

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (4)$$

ここに

$\lambda$ : 定数

$f(x)$ : 断面内の水平方向の位置  $x$  の関数

またスペンサーは分割片間の力の和が全て水平方向に対して一定の角  $q$  をなす場合、すなわち、分割片間の力の和は全て平行である場合を仮定し、モーメントのつり合および力のつり合から夫々の安全率  $F_m, F_f$  を求め  $\theta$  を変化させて  $F_m = F_f$  となる  $F$  を求めている。<sup>16)</sup>

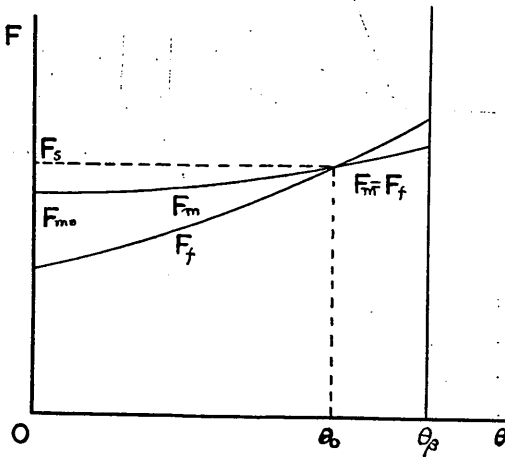


図-2  $F_m$  および  $F_f$  と  $Q$  の関係

図-2において  $\theta = \theta_0$  に対応する  $F$  は  $F_m = F_f$  の関係にあり、モーメントのつり合および力のつり合を満足させている。なお  $\theta = 0$  のときの  $F_m$  の値  $F_{m0}$  は簡易ビショップ法によって求められる  $F_s$  に相当するが、多くの場合  $F_{m0}$  は  $F_s$  に近い値を示しているといわれてい

る。すなわち  $\theta$  が 0 から斜面傾角  $\theta_\beta$  までの範囲にある  $\theta_0$  まで変化する間、 $F_m$  は大きな変化を示さないようである。なおスペンサーは、図-3 のような均一な単純斜面に対して計算し、安定係数および臨界円の位置を求めることができるように図表を与えている。

すなわち、角度  $A, B$  と無次元値  $r \cdot H \cdot \frac{\tan \phi'}{C'}$  との関係、 $N_x$  と  $r \cdot H \cdot \frac{\tan \phi'}{C'}$  との関係、および  $N_d$  と  $r \cdot H \cdot \frac{\tan \phi'}{C'}$  との関係をそれぞれ間ゲキ圧比  $r_u$  と  $\beta$  をパラメーターとして図表化している。これらの記号は図-3 に示してある。また  $\frac{C'}{F \cdot r \cdot H}$  と  $\beta$  の関係も  $r_u$  と  $\phi'_m$  をパラメーターとして図表化している。ここに  $\phi'_m$  はつり合を保つために発揮されるせん断抵抗角である。

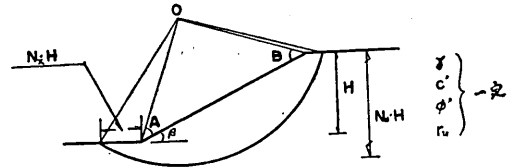


図-3 スペンサーが用いた単純斜面

ホイットマンらが呼んでいる普通のフェレニウスの方法は簡易ビショップ法、およびそれより厳密と思われるモーゲンスタン、プライスの方法に比べて過度に安全側(小さな)の値を与えるといわれており<sup>3), 12)</sup> 通常の計算には簡易ビショップ法を用いることをすすめている。ホイットマンらはまた、モーゲンスタンとプライスの方法およびビショップの方法においても分割片底面に働くせん断抵抗が過大になる場合、あるいは、負になる場合があるとのべているが実用的、合理的な解決はなされていない。

次にチェボタリオフの方法、ビショップの方法(簡易法)および USBR の方法について安全率の求め方をのべる。

なお、式から明らかなことであるが上記の三つの方法は  $\phi = 0$  の場合は全て等しい結果になるから、これらの方法による差異を問題にすることは、すべり面に沿って  $\phi \neq 0$  となる土質が存在することを前提としている。

### 3. フェレニウス法の代表的な方法

#### 3.1 チェボタリオフの方法

この方法は水がある場合には定常浸透状態にあるものとして水中重量を用いるフェレニウスの方法とすることができる。任意の分割片に働く力は 図-4(a) に、力の多角形は 図-4(b) のように示される。

ここに

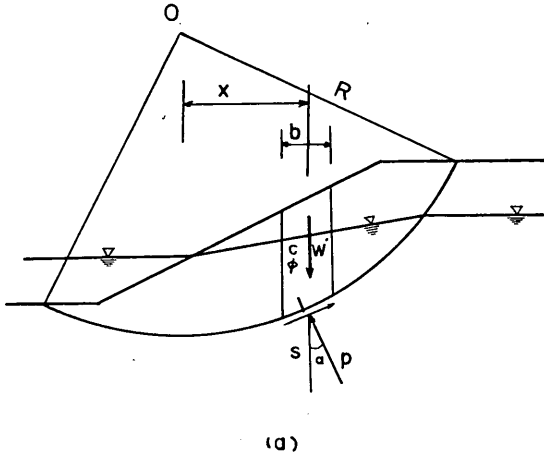


図-4(a) チェボタリオフ法における分割片

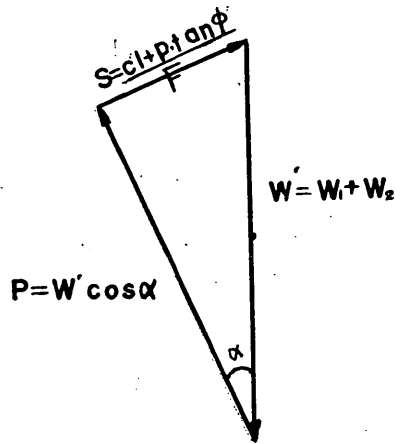
- $W_1$  : 水位より上の重量
- $W_2$  : 水位より下の浮力をさしひいた重量
- $P$  : 分割片底面反力
- $S$  : つり合状態で発揮されているせん断抵抗力
- $S_f$  : せん断抵抗力
- $b$  : 分割片幅
- $l$  : 分割片底面の長さ
- $\alpha$  : 分割片底面が水平となす角とする。

#### (1) 基本式

いま  $W' = W_1 + W_2$ ,  $x = R \sin \alpha$  とすれば、安全率は

$$F = \frac{R \sum (cl + W' \cos \alpha \tan \phi)}{\sum W' x} \quad (5)$$

式(5)は抵抗モーメントと滑動モーメントの比である。滑動モーメントを回転モーメントあるいは転倒モーメントという。ここに  $x$  は中心  $O$  から  $W'$  の作用線までの水平距離である。有効応力に関する土質定数を用いようとする場合式(5)に間ゲキ圧を直接とり入れることはできない。



(b)

図-4(b) チェボタリオフ法の力の多角形

なお次々に示す式(6)あるいは式(8)において  $C' = C$ ,  $\phi' = \phi$ ,  $P = (W_1 + W_2) \cdot \cos \alpha$ ,  $u = 0$  とおくことによって式(5)はえられる。

#### 3-2 ビショッフの方法

この方法は分割片側面に働く力を考慮に入れ、有効応力によって極限平衡状態を仮定するフェレニウスの方法とすることができる。任意の断面に働く力は 図-5(a) に、力の多角形は 図-5(b) のように示される。

ここに

- $W$  : 分割片底面上の水も含めた全重量
- $P$  : 分割片底面反力
- $X_n, X_{n+1}$  : 分割片底面に働く鉛直方向の力
- $E_n, E_{n+1}$  : 分割片底面に働く水平方向の力
- $u$  : 分割片底面における全間ゲキ圧
- $C'$  : 有効応力に基づくみかけの粘着力
- $\phi'$  : 有効応力に基づくみかけのせん断抵抗角とし、その他の記号は 図-4 と同様とする。

#### (1) 基本式

分割片底面に働くせん断応力  $\tau$  は

$$\tau = \{C' + (P/l - u) \cdot \tan \phi'\} / F \quad (6)$$

となる。 $F$  が一定であるとし、中心に関する回転モー



$X_n, X_{n+1}, \dots$ を求める計算が不要という利点も考えて本報告では以後比較計算にはビショップ法としては簡易法で代表するものとする。

(3) 断面内に水位がある場合

ビショップは水位がある断面をパーシャリイ・サブマージの場合として水中重量( $W_2$ )、および過剰間ゲキ圧( $u_s$ )を用いて次のように示している。<sup>3)</sup>

$$F = \frac{1}{\sum(W_1 + W_2)\sin\alpha} \left[ \sum \left\{ c' \cdot b + \tan\phi' (W_1 + W_2 - b \cdot u_s + \overline{X_n - X_{n+1}}) \right\} \cdot \frac{\sec\alpha}{1 + \frac{\tan\phi' \tan\alpha}{F}} \right] \quad (13)$$

式(13)において転倒モーメントの項はあとの3.5で述べるように水も含めて分割片底面上の全ての重量を用いても、水位以下の重量は水中重量を用い水の重量としては残留水位によるものだけを計算しても同じである。

また、式(13)の抵抗モーメント項の内 ( $W_1 + W_2 - b \cdot u_s + \overline{X_n - X_{n+1}}$ ) に  $+bu_0 - bu_0$  を加えると ( $W_1 + W_2 + bu_0 - b \cdot u_0 + b \cdot u_s + \overline{X_n - X_{n+1}}$ ) となる。ここでは  $u_0$  は静水圧である。この値の第一項は水も含めた底辺上の全重量であり、第二項は全間ゲキ圧である。

したがって、式(13)は式(11)と同じものである。

(4) プログラミングに用いた式

実際にビショップ法の計算を行なうには二つの方法が考えられる。すなわちビショップ法の各式に含まれている角 $\alpha$ (分割片底面が水平となす角)をいくつかの有限幅の分割片に対して近似値で代表する方法と、積分で正確に求める方法である。本報告でもこの二つの方法についてプログラミングを行なった。プログラムの内容について詳しくは付録Aで述べることにして、ここでは簡単な紹介にとどめる。また、本報告では以後分割片に対して近値で代表する方法をDB法、積分する方法をIB法と呼ぶことにする。

IB法は地盤の形状、性状が変化する位置で区切って積分するが、DB法は、通常、円弧全幅に対して全幅の $1/10$ の幅で分割片をつくり、このほか地盤の形状、性状が変化する点でも分割するものとする。したがって、DB法の場合分割片の個数は最小10個である。また、DB法の $\alpha$ は分割片中線が円弧と交わる点におけるものを用いるものとする。

式(12)において

$$A_i = \tan\alpha_i \cdot \tan\phi_i' \quad (14)$$

$$B_i = \{C_i' \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i) \cdot \tan\phi_i'\} \sec\alpha_i \quad (15)$$

とおけば

$$F = \frac{1}{\sum W \sin\alpha} \sum_i \frac{B}{1 + \frac{A}{F}} \quad (16)$$

$$= \frac{1}{\sum W \sin\alpha} \sum_i \left(1 - \frac{A}{F+A}\right) \cdot B \quad (16)$$

$$= \frac{R}{\sum W \cdot x} \sum_i \left(1 - \frac{A}{F+A}\right) \cdot B \quad (17)$$

となり、この式(16)を満足する $F_s$ が求める安全率である。DB法は式(17)に対してコーディングしてある。

一方IB法については、同じく式(15)を変形すると、

$$F = \frac{F \cdot R}{\sum W \cdot x} \sum \frac{c' \cdot l \cdot \cos\alpha + (W - u \cdot b) \tan\phi'}{F \cos\alpha + \tan\phi' \sin\alpha}$$

$$= \frac{F \cdot R}{\sum W \cdot x} \sum \frac{c' \cdot l \cdot \cos\alpha + (W' - u_s \cdot b) \tan\phi'}{F \cos\alpha + \tan\phi' \sin\alpha} \quad (18)$$

となり、この式(18)に対してコーディングしてある。

この式(18)の $c', l, W', u_s b$ は $\alpha$ の関数であるので、 $\alpha$ について積分して式(18)を満足する $F_s$ を求める。

(5) 安全率 $F$ の求め方

DB法の場合、式(17)の右辺を $F$ の関数 $g(F)$ とすれば、安全率 $F_s$ を求めることは $F = g(F)$ という関数を満足する $F_s$ を求めることである。

分割片一個毎の $g(F)$ は次の四つの場合が考えられる。

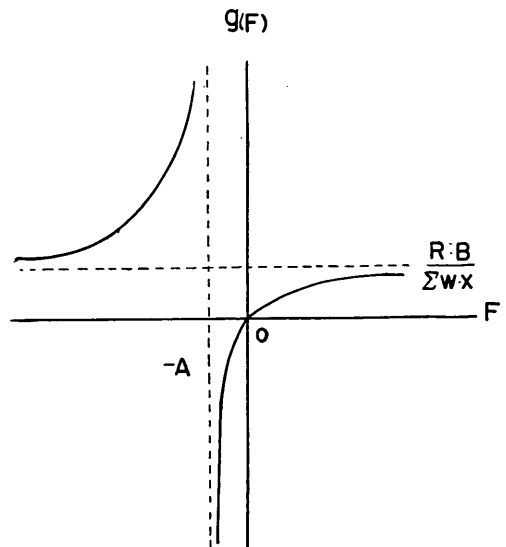


図-6(a)  $A > 0, B > 0$  の場合

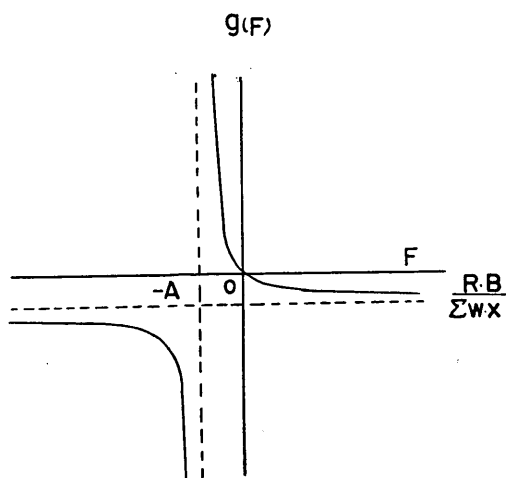


図6-(b)  $A > 0, B < 0$  の場合

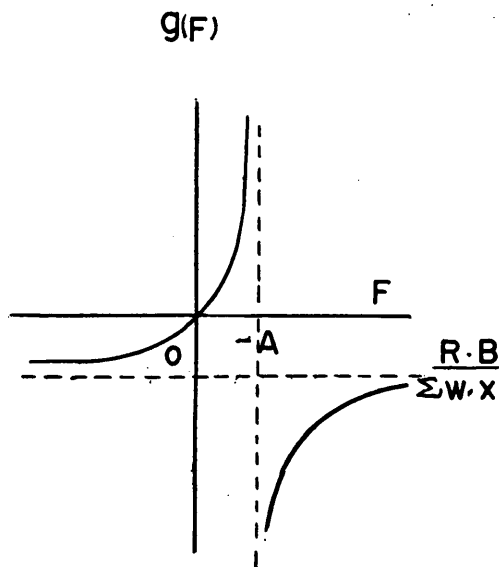


図-6(d)  $A < 0, B < 0$  の場合

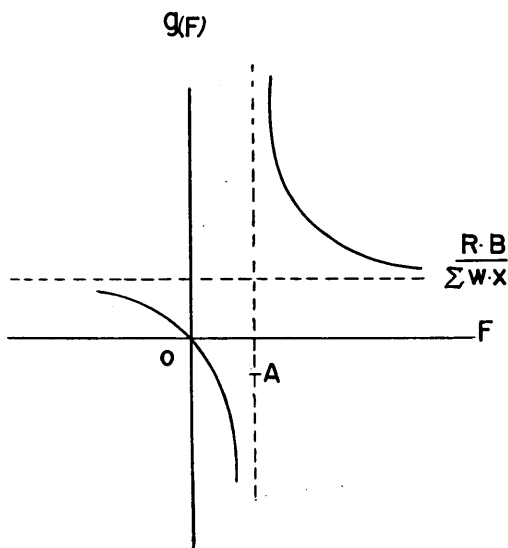


図-6(c)  $A < 0, B > 0$  の場合

実際に  $F_s$  を求める場合はこれらの関数値を合成した曲線と原点を通り  $45^\circ$  の傾きをもつ直線との交点を求めることになる。一般に図-6の各関数値を合成した曲線は図-7(a), 図-7(b)のどちらかである。但し  $F > 0$  の範囲のみを示す。

いま  $F=0$  のとき  $g(0)=0$  となる。

また  $F=\pm\infty$  ならば  $g(\pm\infty)=R \cdot \Sigma B / M_s$  となり、式(7)に対して以下の三つの場合にわけることができる。

(i)  $A > 0$  の場合

図-8(a)のように任意の分割片の  $\tan \alpha \cdot \tan \phi$  の値が正である場合、合成関数  $g(F)$  は図-7(a)のように  $F > 0$  のはんいにおいて上に凸な双曲線の合成関数となる。

求める  $F_s$  は図-7(a)において示されているような交点の座標である。

(ii)  $A < 0$  となる分割片がある場合

これは図-8(b)のように  $\alpha < 0$  の範囲に  $\phi$  が存在する場合であり、このような範囲の分割片の個数を  $m$  とすると  $A < 0$  である  $m$  個の  $A$  の値に対して  $g(-A)$  は発散する。 $(-A) > 0$  の内最大のを  $F_{0m}$  とすれば  $0$  から  $F_{0m}$  の範囲の分割片の位置を任意に細くとることによって、この範囲の  $F_s$  に対する  $g(F)$  は全て発散する可能性がある。

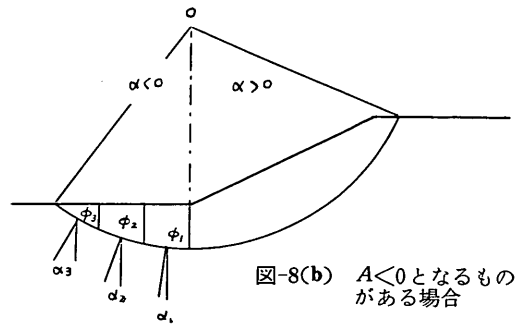
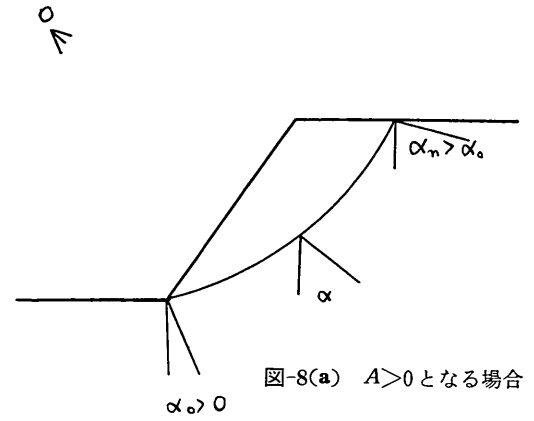
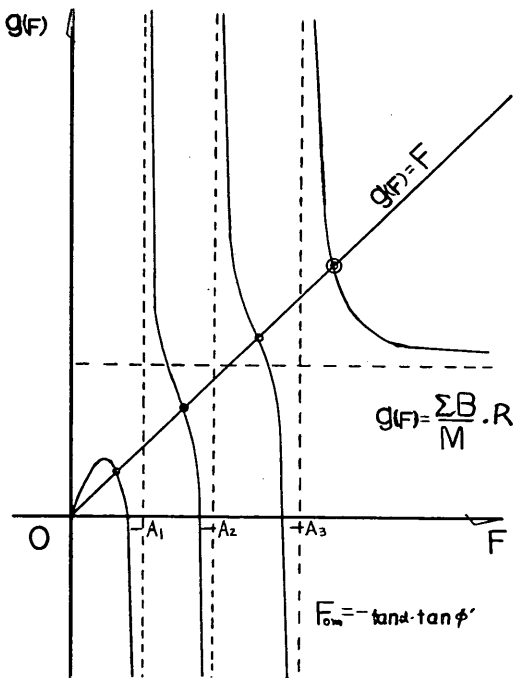
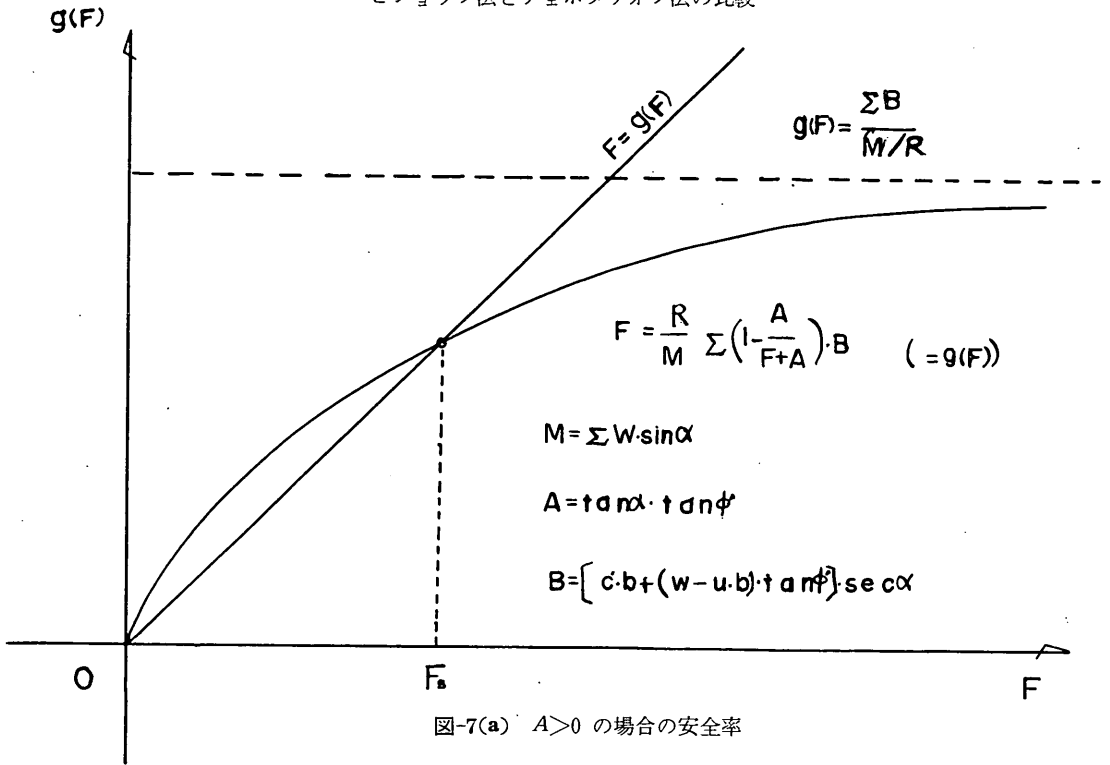
このような関係を図-7(b)に示す。

原点を通り傾きが  $45^\circ$  の直線との交点は、原点を除いて一般に  $m$  個あるが、 $F_{0m}$  より小さい範囲の交点は分割片のとり方によって全て発散する点となり得るから、求めるべき  $F_s$  は  $F_{0m}$  より大きい範囲にある一点である。

(iii)  $A=0$  の場合

この場合は一般に  $\phi=0$  であり、ビンヨップ法はチェボタリオ法と同一になる。

ビショップ法とチェボタリオフ法の比較



### 3.3 USBR 法

ターンブルらによればこれは最も広く用いられてきたフェレニウスの方法であり、ホイットマンらは水の重量も含んだ単位体積重量と間ゲキ圧を用いる普通の分割法

とのべているものである。任意の断面に働く力は図-9(a)に、力の多角形は図-9(b)図のように示される。記号は図-5と同様とする。

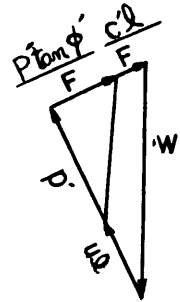
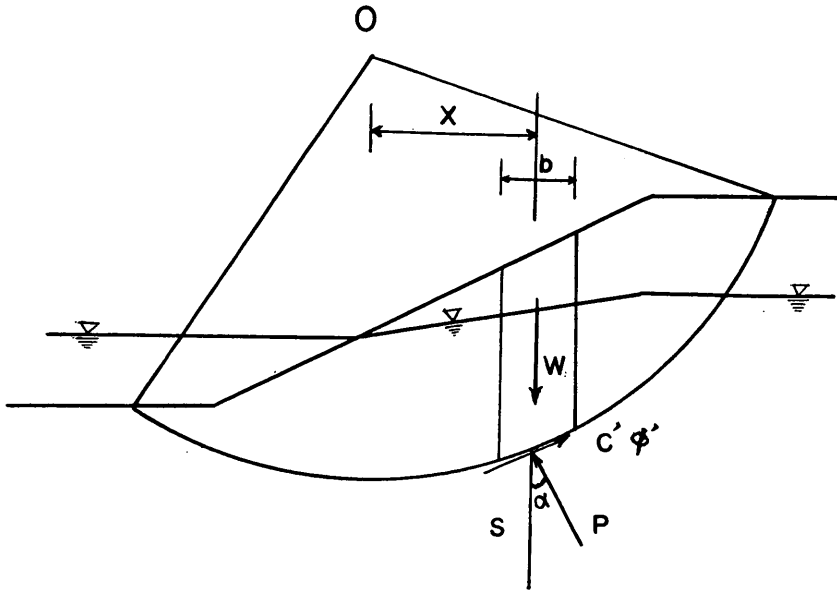


図-9(a) USBR 法における分割片

図-9(b) USBR 法の力の多角形

#### (1) 基本式

図-9 において分割片底面に垂直な方向の力のつりあより  $P=W \cos \alpha$ , これを式(8)へ代入すると

$$F = \frac{R}{\sum W \cdot x} \sum \left\{ c'l + (W \cos \alpha - ul) \cdot \tan \phi' \right\} \quad (19)$$

となる。これは合衆国干拓局 (U.S. Bureau of Reclamation) において用いられているものであり、図-5 において  $X_n - X_{n+1}$ ,  $E_n - E_{n+1}$  を共に 0 とおいても得られる。

ビショップはパーシャルイ・サブマージの場合、式(19)は

$$F = \frac{1}{\sum (W_1 + W_2) \sin \alpha} \cdot \sum \left\{ c'l + \tan \phi' (\overline{W_1 + W_2} \cos \alpha - u_s \cdot b \cdot \sec \alpha) \right\} \quad (20)$$

としている。 $W_2$ に $(u_0 b - u_s b)$ を加えると

$$F = \frac{1}{\sum (W_1 + W_2) \sin \alpha} \cdot \sum \left\{ c'l + \tan \phi' (\overline{W_1 + W_2 + u_0 b} \cos \alpha - \right.$$

$$\left. \overline{u_0 \cdot b \cos \alpha + u_s \cdot l} \right\} \quad (21)$$

となり、この式では間ゲキ圧を静水圧によるものと過剰間ゲキ圧によるものとに分けて、過剰間ゲキ圧は底面に垂直方向に、静水圧は鉛直方向に働くと考えて分割片底面にはその垂直方向の成分を考えていることになる。

メイとブラッツは、静水圧が作用する場合式(19)において  $U$  としては鉛直方向の静水圧の底面に垂直な方向の成分を用いることを示している<sup>17)</sup>。このとき式(20)は式(5)と同じものとなるからチェボタリオフの方法は、間ゲキ圧として静水圧のみを考える場合の USBR 法であるといえる。

#### 3.4 フェレニウス法のその他の表現

式(19)において、 $W$ としては水も含んだ分割片底面上の全重量をとり、 $U$ としては全水圧をそのままとするものとして、図-10のような分割片上端が静水圧面に一致している場合について考えてみる

記号は図-4、図-5と同様であるとし、土の単位体積重量、水の単位体積重を  $\gamma$  および  $\gamma_w$  とすると、トン、



ビショップ法とチェボタリオフ法の比較

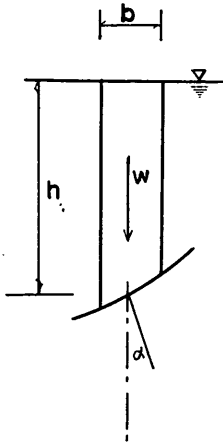


図-10 上端が水低に一致している分割片  
メートルで表わせば  $\gamma_w=1.0$ ,  $\gamma'=\gamma-\gamma_w=\gamma-1$  となる。  
いま過剰間ゲキ圧  $u_s=0$  とすれば

$$u = \gamma_w \cdot h = h \quad (2)$$

$$W = b \cdot h \cdot \gamma = W' + b \cdot h \quad (2)$$

これらの関係を用いて式(19)からせん断抵抗  $S_f$  は

$$S_f = c'l + \{(W + b \cdot h) \cos \alpha - u \cdot l\} \tan \phi'$$

$$= c'l + W \cos \alpha \tan \phi' - b \cdot h (\sec \alpha - \cos \alpha) \cdot \tan \phi' \quad (24)$$

となる。強度定数を同じものとすれば式(24)の右辺第一項と第二項の和はチェボタリオフ法によるせん断抵抗  $S_r$  に等しい。第三項は  $\alpha=0$  で 0 になるが  $|\alpha| (\leq \frac{\pi}{2})$  が大きくなるに従って大きな負の値になる。よって  $\phi$  層を円弧が通過し、水位が存在する場合、この方法はチェ

ボタリオフ法よりつねに小さいせん断抵抗を与えることになる。転倒モーメントは後にのべるように両方法とも同じになるから、この関係は安全率に対してもいえる。ホイットマンらはこの方法を湿潤重量  $\gamma$  と全間ゲキ圧  $U$  を用いたフェレニウスの方法と名づけて水中重量  $\gamma'$  を用いたフェレニウスの方法(本報告においてチェボタリオフの方法としているもの)と区別している<sup>12)</sup>。

また、ターンブルらは  $\gamma$  と  $u$  を用いる方法を普通のフェレニウスの方法とし、チェボタリオフ法(過剰間ゲキ圧がなく静水圧のみの場合の USBR 法)に相当する方法を水中単位体積重量  $\gamma'$  を用いる第 2 のフェレニウス法と名づけている<sup>13)</sup>。

またビショップは式(19)の  $u$  に全間ゲキ圧をそのまま用いる方法を簡便法と呼び、同一の円弧に対しては、簡便法による  $F_s$  は一般にビショップ法による  $F_s$  より小さく、また円弧の中心角が増大するとともにビショップ法によって得られる  $F_s$  より著しく小さい値を与えるよ

Material	Density lb/ft <sup>3</sup>	C' lb/ft <sup>2</sup>	$\phi'$ degrees
Clay Fill	145	350	37.5

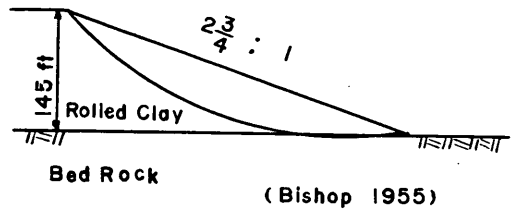


図-11(a) ビショップによる断面

Material	Density lb/ft <sup>3</sup>		C' lb/ft <sup>2</sup>	$\phi'$
	Subm <sup>g</sup>	Above WL		
Moraine	72	135	0	40°
Rock	72	118	0	40°

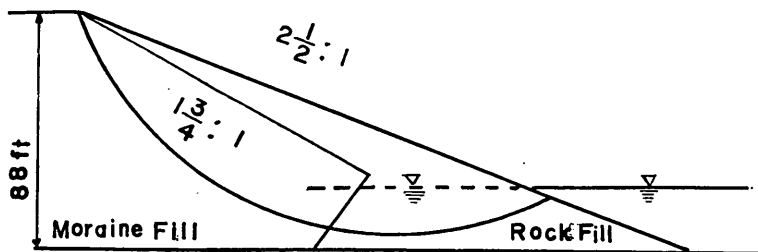


図-11(b) ビショップによる断面

表-1 フェレニウス法の代表的 5 方法の相違点

方 法	分割片底面に働く有効垂直応力	分割片側面に働く力	分割片に働く力のつり合をとる方向	$F_s$ の式の形	全体としての $F_s$ と分割片ごとの $F_{si}$ の関係
ビンヨップ法厳密法	$P'=P-u \cdot l$ $u=u_s+u_0$	水平方向、鉛直方向を考慮する	鉛直方向	多価関数	断面全長において一様 $F_B=F_{Bi}$
ビンヨップ法簡易法	$P'=P-u \cdot l$ $u=u_s+u_0$	鉛直方向を無視水平方向は考慮する	鉛直方向	多価関数	
USBR 法	$P'=P-u \cdot l$ $u=u_s+u_0 \cos \alpha$	とくに考慮していない	底面に垂直方向	一価関数	$F \approx F_i$
チェボタリオフの方法	$P'=W' \cdot \cos \alpha$ $W'$ : 水中重量		底面に垂直方向	一価関数	
普通のフェレニウスの方法	$P'=P-ul$ $u=u_s+u_0$		底面に垂直方向	一価関数	

但し  $u_0$  : 静水圧,  $u_s$  : 過剰間ゲキ圧,  $\alpha$  : 分割片底面が水平となす角

うになると述べている。

たとえば 図-11(a) のような断面における安全率を比べるとビンヨップ法で  $F_s=1.59$  であるのに対して、簡便法では  $F_s=1.38$  になる。

また、図-11(b) においてはビンヨップ法の  $F=1.48$  に対して簡便法では  $F=1.14$  であって安全に過ぎるといわれている。

3.1~3.4 で述べた各方法の相違点をまとめると 表-1 のようになる。

### 3-5 転倒モーメント

本報告で用いたプログラムの転倒モーメントの求め方は付録 A において述べる。

ここでは定常的浸透を表わす水位がある場合に、すべり円内の水中重量および残留水を用いる方法と、水も含めた全重量をとる方法が同じ転倒モーメントを与える一例をのべる。

ビンヨップ法および USBR 法ではテイラー<sup>9)</sup>、および中瀬<sup>10)</sup>によって明らかにされているように、自由水があれば水の中まですべり円（抵抗はないが重量はある）を仮定し、すべり円内の水も含めた全重量を用いて計算するものとする。すなわち、図-12 に示すような断面においては、水位以下の重量を図形 ABCDE は水も含んだ単位体積重量  $\gamma$  を用いて計算するものとする。

一方、チェボタリオフ法は 図-12 において水平な線 ECGF 以下の重量を  $\gamma'$  用いて求める。このとき図形 ABCE には  $\gamma'=\gamma-\gamma_w$  を用い、図形 ABCGF には  $\gamma_w$

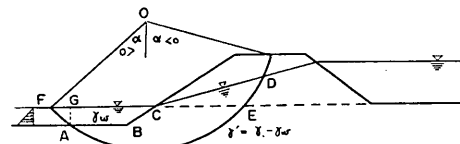


図-12 堤体内に定常状態の浸透水がある場合

$-\gamma_w=0$  を用いることになる。すなわち、モーメントは 0 である。中心角  $\alpha$  を図-12 のようにとり  $\alpha$  の正負に対応して符号を考慮して重量の代数和をとれば水平な線 ECGF より下側の重量による転倒モーメントは、ビンヨップ法とチェボタリオフ法は同じ値になる。

直線 ECGF より上の重量の内、チェボタリオフ法では図形 CDE に関しては、 $\gamma'$  を用いて求めた転倒モーメントと残留水として  $\gamma_w$  を用いて求めた転倒モーメントの和として求められるが、これは  $\gamma=\gamma'+\gamma_w$  を用いて求めるビンヨップ法による転倒モーメントと同じである。

以上のことから、チェボタリオフ法、ビンヨップ法およびその他の円形すべりの方法においても転倒モーメントは一致する。

なお 図-12 において図形 AFG の水の重量による転倒モーメントは  $\overline{AG}$  に働く静水圧によってえられる中心 O に関する転倒モーメントに等しい。すなわち、図-13 において水深  $z$  の位置で、幅  $\Delta z$  に働く静水圧は

$\Delta z \cdot \gamma_w \cdot z$  であり、中心に関するモーメントは、 $\gamma_w=1$  とすれば

$$\gamma_w \cdot z \cdot \Delta z \cdot R \cdot \cos \alpha = R \cdot z \cdot \Delta z \cdot \cos \alpha \quad (25)$$

となる。

一方、 $\Delta z$  に対する弧上の水の重量による転倒モーメントは

$$\begin{aligned} & \Delta b \cdot z \cdot R \cdot \sin \alpha \\ &= \Delta z \cdot \frac{1}{\tan \alpha} \cdot z \cdot R \sin \alpha \\ &= \Delta z \cdot R \cdot z \cdot R \cos \alpha \quad (26) \end{aligned}$$

となって両者は等しい。したがって AC 全体についても同様のことがいえる。

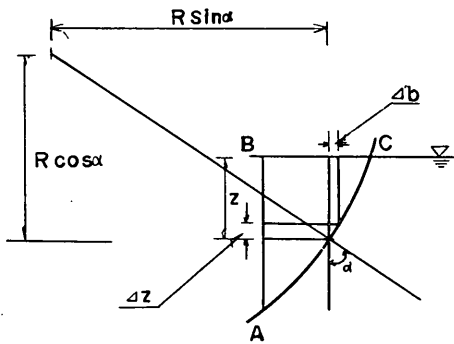


図-13 水の重さによる転倒モーメント

なお、これまで安全率  $F_s$  を求める式は、転倒モーメントに正負 ( $M_{s1} > 0$ ,  $M_{s2} < 0$ ) を考えて

$$F_s = M_r / (M_{s1} + M_{s2}) \quad (27)$$

としてきたが次のように表わす場合も考えられる。

$$F = (M_r - M_{s2}) / M_{s1} \quad (28)$$

ここに  $M_r$  抵抗モーメント。

式(28)の  $F$  は  $M_{s2} = 0$  のとき  $F = F_s = M_r / M_{s1}$ ,  $M_r = M_{s1} + M_{s2}$  のとき  $F = F_s = 1$  となるがそれ以外では  $0 < F < F_s < 1$  か  $1 < F < F_s$  という関係にある。

しかし  $F_s$  はまたせん断抵抗力と滑動力の比であることを考えれば分子に  $M_r$  以外の値が現われない式(28)が適当である。

#### 4. チェボタリオフ法の問題点

- (1) 分割片間に働く力の考慮がなされていない。

#### 5. ビショップ法の問題点

- (1)  $\alpha < 0$  の範囲に  $\phi$  層がある場合、 $g(F)$  は多価関

数となって不連続点が生じること。 $F$  を求める場合には最も大きい不連続値を限界  $F$  値 ( $F_{0m} > 0$ ) として  $F_{0m}$  より大きい範囲で  $F_s$  を求めているが、この  $F_{0m} = (-\tan \alpha \cdot \tan \phi)_{\max}$  はすべり面の位置と土質定数だけで定ってしまうこと。

特に極端な場合として円の中心が低い、深い円において上層部に  $\phi$  層がある場合は、転倒モーメントの大きさに無関係に大きな  $F$  の値を与えること。

- (2) 式(27)から分割片底面におけるせん断抵抗成分  $S_f$

は

$$S_f = \left\{ c' \cdot b + (W - u \cdot b) \cdot \tan \phi' \right\} \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \cdot \tan \phi'}{F}} \quad (29)$$

と表わされる。この式(29)の右辺は  $u$  が静水圧のみを表わす場合は問題ないが、特殊な過剰間ゲキ圧をも含む場合には負になることがある。

(3) 式(27)から求められる  $F$  の値によって、図-5(b)の力の多角形から決定される水平方向の力  $E_n, E_{n+1}$  は、ほかに外力が作用してない場合は  $\sum (E_n - E_{n+1}) = 0$  とならなければならないが、この条件を満足するという確証がない。

以上がビショップ法のもつ主な問題点であり、このほかに積分で求めない場合に分割数の多少が結果に影響を与えること、安全率  $F_s$  についての多価関数を解かねばならないので計算が面倒なことなどがあげられるが、これらはコンピュータを用いれば解決するもので本質的な問題点ではない。

また USBR 法は、すでに述べたように間ゲキ圧として静水圧のみを考える場合はチェボタリオフ法と同じであり、過剰間ゲキ圧をも考慮する場合はその取扱いについて明確に示されていない。したがって本報告では、以下において USBR 法には触れないことにする。

## 6. ビショップ法とチェボタリオフ法との比較

港湾構造物において起り得る深いすべり円にビショップ法を適用した場合の問題点をチェボタリオフ法と比較して検討する。

### 6.1 式による比較

まず、もっとも簡単な場合として、分割を必要としない程度の小さな断面をとりあげ、全断面を一つの分割片とすれば、断面内に水位が存在しない場合チェボタリオ

フ法は式(5)から、

$$F_T = \frac{R}{W \cdot x} (c \cdot l + W \cos \alpha \tan \phi) \quad (5')$$

となる。またビショップ法は式(12)から、

$$F_B = \frac{1}{W \cdot \sin \alpha} \left\{ (c \cdot b + W \tan \phi) \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F_B}} \right\} \quad (12')$$

となる。いま  $\sin \alpha = \frac{x}{R}$ 、 $b = l \cdot \cos \alpha$  の関係を用い、

式(12')を変形すると次のようになる。

$$\begin{aligned} F_B &= \frac{R}{W \cdot x} \left\{ (c \cdot l \cdot \cos \alpha + W \tan \phi) \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi}{F_B}} \right\} \\ &= \frac{R}{W \cdot x} \cdot \frac{c \cdot l \cdot \cos \alpha + W \tan \phi}{\cos \alpha + \frac{\sin \alpha \cdot \tan \phi}{F_B}} \\ F_B \cdot \cos \alpha + \sin \alpha \cdot \tan \phi &= \frac{R}{W \cdot x} (c \cdot l \cdot \cos \alpha + W \cdot \tan \phi) \end{aligned}$$

$$F_B = \frac{R}{W \cdot x} \left( c \cdot l + \frac{W \cdot \tan \phi}{\cos \alpha} \right) - \tan \alpha \cdot \tan \phi$$

いま

$$\begin{aligned} \tan \alpha \cdot \tan \phi &= \frac{R}{W \cdot x} \tan \phi \cdot \tan \alpha \cdot \frac{W \cdot x}{R} \\ &= \frac{R}{W \cdot x} \tan \phi \cdot \tan \alpha \cdot W \cdot \sin \alpha \end{aligned}$$

であるから

$$\begin{aligned} F_B &= \frac{R}{W \cdot x} \left( c \cdot l + \frac{W \cdot \tan \phi}{\cos \alpha} - \tan \phi \cdot \tan \alpha \cdot W \cdot \sin \alpha \right) \\ &= \frac{R}{W \cdot x} \left\{ c \cdot l + W \cdot \tan \phi \cdot \left[ \sec \alpha (1 - \sin^2 \alpha) \right] \right\} \end{aligned}$$

となり、 $\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha = 1$  の関係を用いると

$$\begin{aligned} \sec \alpha (1 - \sin^2 \alpha) &= \sec \alpha \cdot \cos^2 \alpha \\ &= \cos \alpha \end{aligned}$$

したがって

$$F_B = \frac{R}{W \cdot x} (c \cdot l + W \cos \alpha \tan \phi) \quad (12'')$$

であり

$$F_B = F_T$$

となって、分割片一個の場合はビショップ法とチェボタリオフ法とは同じ方法であるといえる。このことは、分割片一個の場合には  $E_n$  や  $X_n$  などが存在しないので当然のことである。

ところが、この同じ断面をより正確に計算するために、二個以上に分割した場合として、もっとも正確な積分に移行した場合を考えると、チェボタリオフ法の式(A-3)とビショップ法の式(A-9)から、安全率  $F_s$  を求める式は、全然異なったものであることが分かる。

分割片が一個の場合には  $F_B = F_T$  であるのに、同じ断面を二個以上の分割片にした場合  $F_B \neq F_T$  となってしまふ。この理由として、ビショップ法における各分割片の力の多角形 図-5(b) において用いられている  $F$  が各分割片個有の  $F_i$  ではなく、断面全体の安全率  $F_s$  であることが考えられる。このため、図-5(b) において力の多角形を閉じさせるために、分割片によっては水平力  $E$  が異常な値となることがあると思われる。このことは、実際の計算において  $F_{0m}$  があることにもあらわれていると思われる。ちなみに、チェボタリオフ法における各分割片の力の多角形 図-4(b) において用いられている  $F$  は各分割片個有の  $F_i$  である。

このように分割片が二個以上の一般的な場合には、直接に式の上で比較することはむづかしいので、以下種々の断面の計算例によって比較する。

## 6.2 計算結果による比較

ここでは、まず実際に存在し得る断面の臨界円における比較を行なう目的で、破壊例、矢板式岸壁、水平な軟弱地盤上に荷重盛土を置く場合、単純斜面上に水位がある場合の四つのケースについて述べた。そして次にこれら臨界円における比較で得られた傾向、すなわち  $\phi$  層が存在する断面においては  $F_B > F_T$  となる傾向が任意のすべり円でもみられるかどうかを、単純斜面上における任意のすべり円と水平な砂地盤における任意の深いすべり円の二つのケースについて、 $c=0$ 、 $u=0$  とし  $r$ 、 $\phi$  をそれぞれ一定とした単純な条件の下で比較した。

### (1) 破壊例における比較

港湾構造物の破壊例をチェボタリオフ法とビショップ法で比較計算をした。入念な土質調査の結果、断面および土質定数は、図-14、図-15、図-16 のように定められ、順にケースⅠ、ケースⅡ、ケースⅢとする。調査の結果三ケースとも円形すべりを適用してもよいことが

ビショップ法とチェボタリオフ法の比較

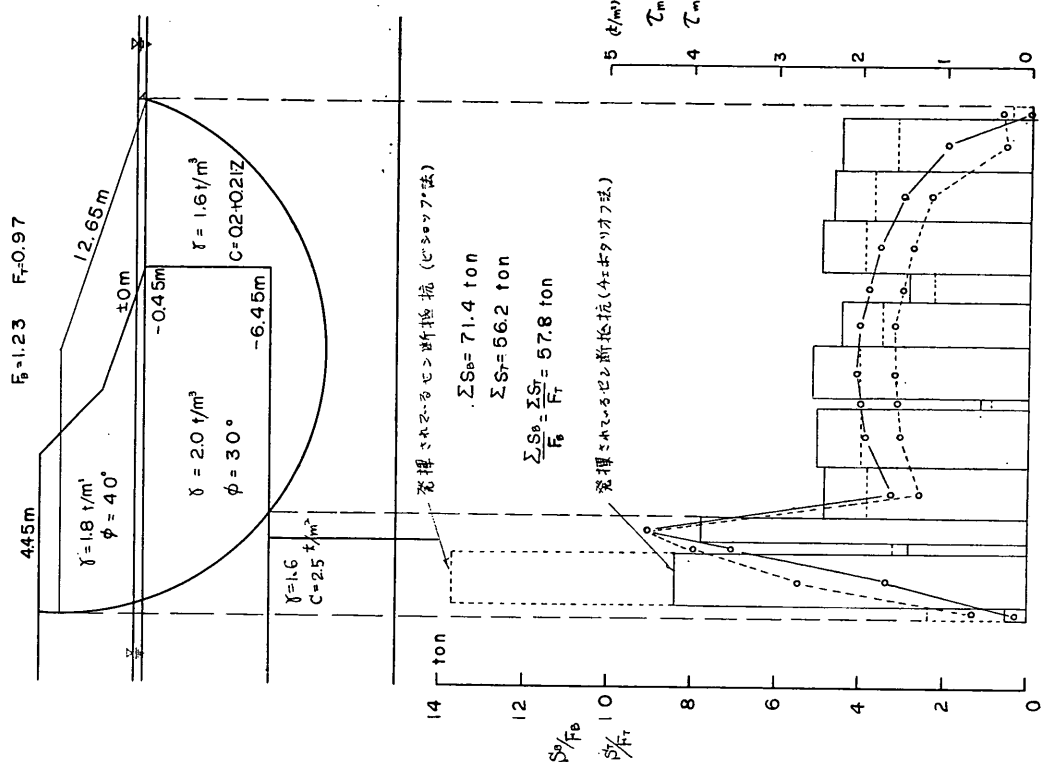


図-14 破壊例 I

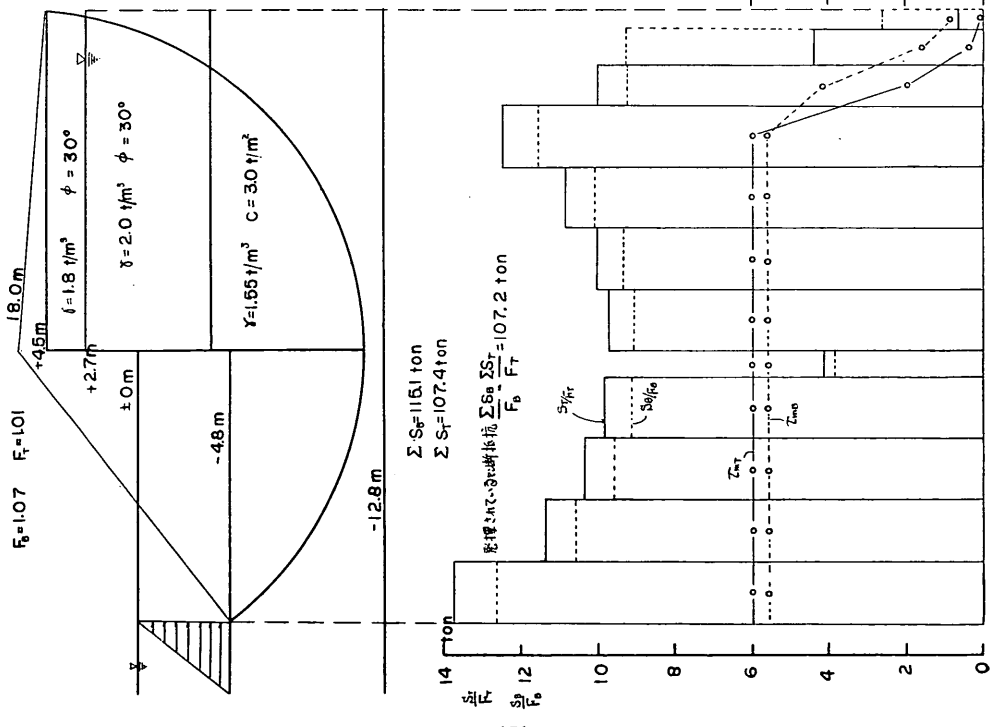


図-15 破壊例 II



表-2 破壊例における 2 方法の結果

ケース	$F_T$	$F_B$	$(F_B - F_T)/F_T$	水 位	臨界円における $\phi$ 層	臨 界 円
I	0.97	1.23	+27%	水平	$\alpha > 0$ のはんいにかなり存在	ほとんど一致
II	1.01	1.07	+6%	堤体内で上昇	$\alpha > 0$ のはんいに少し存在	ほとんど一致
III	0.99	1.08	+9%	堤体内で上昇	$\alpha > 0$ のはんいに少し存在	ビンヨップ法はより深く大きい

確められている。なお、これらの破壊はいずれも地震とは無関係である。計算結果は表-2 に示す通りである。

ケース I およびケース II においては、二方法による臨界円の位置、大きさは殆ど一致したので共通の臨界円で 13 個の分割を行って、臨界円に沿うセン断応力  $\tau_{mB}$ ,  $\tau_{mT}$  および計算上つり合状態で発揮しているセン断抵抗力  $S_B/F_B$  と  $S_T/F_T$  の分布を示してある。実線はチェボタリオフ法、点線はビンヨップ法を表わている。

したがって、セン断抵抗力  $S_B$ ,  $S_T$  およびセン断強度  $\tau_{fB}$ ,  $\tau_{fT}$  はこれらの値にそれぞれ  $F_B$ ,  $F_T$  を乗じたものとなる。

粘着力は、方法によらず同じであるからケース I の  $\sum S_B$  と  $\sum S_T$  との差 15.2 ton は臨界円の  $\phi$  層における差である。すなわちビンヨップ法の方が  $\phi$  層において大きな抵抗を与えている。

ケース II において  $\phi$  層におけるセン断抵抗力の差は、 $\sum S_B - \sum S_T = 115.1 - 107.4 = 7.7$  ton でやはりビンヨップ法の方が大きい。

ケース I は転倒モーメントは反時計回りが正であり角  $\alpha$  は円の中心より左側を正、右側を負とする。

ケース III においてはチェボタリオフ法による臨界円は  $\alpha < 0$  の範囲で砂質土層を通過するが、ビンヨップ法による臨界円は  $\alpha < 0$  の範囲の砂質土層をさけて、その下方を通っている。

したがってこの場合はビンヨップ法の臨界円はチェボタリオフ法より大きく、深い円となっている。

円の中心もビンヨップ法のもは、チェボタリオフ法に対して斜め前方に位置している。

ケース I の水位は水平であるのに対し、ケース II とケース III は堤体内の水位が前面より高い。このことは、ケース II とケース III において  $F_B$  と  $F_T$  の差がそれほど大きくないのに対して、ケース I の場合  $F_B$  と  $F_T$  の

差がかなり大きいことと関係があると思われる。

(2) 直立型斜面一矢板式岸壁一における比較

直立型斜面として図-17 に示すような砂地盤に施工されている矢板岸壁を用い、矢板を通る円は安全であるとして両方法で計算した。 $F_B$  は  $F_T$  に対してかなり大きな値を与えている。

計算条件は図-17 に示す通りであり、砂地盤に単一の円形すべり計算を適用することの問題はここではふれないものとする。また、円の中心が堤体より下部に位置する場合は円の中心から上の土には鉛直キレットを仮定し抵抗力は働かないものとしている。

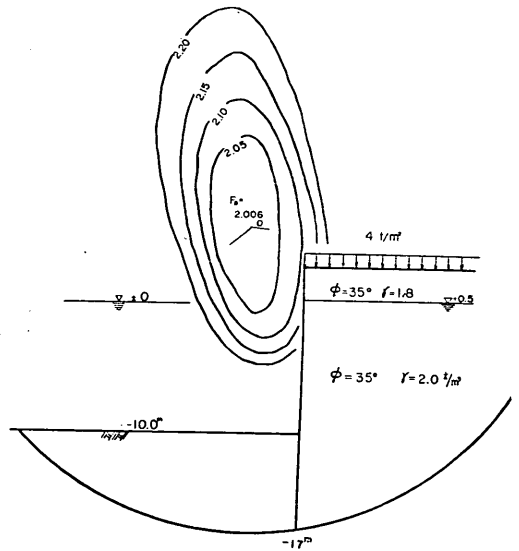


図-17(a) 施工されている矢板式岸壁の例 (ビンヨップ法)

図-17 において臨界円の大きさ、位置がかなり異っている。円の中心は、ビンヨップ法のものがチェボタリオフ

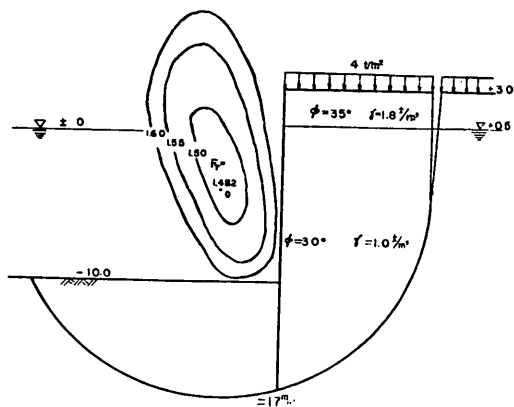


図-17(b) 施工されている矢板式岸壁の例  
(チエボタリオフ法)

法に比べて斜め上方にある。またビショップ法による臨  
界円はチエボタリオフ法によるものよりかなり大きい。

(3) 水平な粘性土地盤上に荷重盛土をおく場合に、地  
盤を砂層で置換えた場合の比較

(i) 計算方法

軟弱地盤上に比較的低い盛土荷重を施工することは港  
湾分野ではしばしば行なわれる。計算に用いた断面例を  
図-18 に示す。

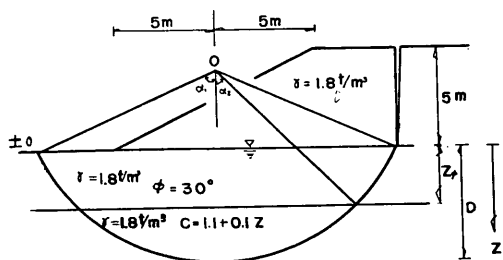


図-18 粘性土地盤に置換砂層を考える場合

水位は地表面に一致して存在する場合と十分低い位置  
にある場合を考え、砂による置換厚 ( $z_{\phi}^m$ ) を変化させ  
て、ビショップ法。チエボタリオフ法で比較計算した。

臨界円を決定するための円の位置、通過点の変化は、  
1mピッチとし、円の中心が低くなった場合はとくに0.5  
mピッチとした。すべり面は地表面以下だけに対して  
考え、盛土荷重内は鉛直キレットを考慮するものとした。

この場合、両方法とも  $F$  は斜面の鉛直な中線上に対  
称に分布した。なお、置換なしの場合は両方法とも  
 $F_{\min}=0.99$  である。

(ii) 計算結果

計算結果は表-3 のようである。

また、両方法でそれぞれ水位がある場合とない場合につ  
いて安全率  $F$ 、置換厚  $z_{\phi}$ 、円弧終端部での角  $\alpha_1$  と  
の関係を図-19 に示す。

表-3-1 チエボタリオフ法の結果(水なし)  
 $z_{\phi}$  に対する  $F_{\min}$

$z_{\phi}$	$F_T$	中心位置	円の深さ $D$	$D/z_{\phi}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0m	0.995	+6m	5m	$\infty$	57°	57°
0.5						
1.0	0.977	+4	5	5	64	56
2	0.977	+3	6	3	71	56
4	1.043	+2	7	1.75	77	48
6	1.165	+1	11	1.83	85	54
8	1.312	+0.5	14	1.75	88	54
10	1.460	-1	17	1.70	94	56
16						
18						
$\infty$	3.019	+3	4	0	65	65

表-3-2 チエボタリオフ法の結果(水あり)  
 $z_{\phi}$  に対する  $F_{\min}$

$z_{\phi}$	$F_T'$	中心位置	円の深さ $D$	$D/z_{\phi}$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0m	0.995	+6m	5m	$\infty$	57°	57°
0.5						
1	0.971	+4	5	5	64	56
2	0.958	+3	6	3	71	56
4	0.975	+2	7	1.75	77	48
6	1.051	+1	9	1.5	85	46
8	1.152	+1	12	1.5	86	46
10	1.270	+0.5	15	1.5	87	47



ビショップ法とチェボタリオフ法の比較

$z_\phi$	$F_T'$	中心位置	円の深さ $D$	$D/z_\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
16	/	/	/	/	/	/
18	1.746	-10	23	1.28	127	52
$\infty$	2.050	+2	5	0	74	74

表-3-3 ビショップ法の結果(水なし)  
 $z_\phi$  に対する  $F_{min}$

$z_\phi$	$F_B$	中心位置	円の深さ $D$	$D/z_\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0m	0.995( 0)	+6m	5m	$\infty$	57°	57
0.5	1.035	+8	5	10	54	50
2	1.260(+29)	+9	7	3.5	51	47
3	1.431	+11	10	3.3	58	48
4	1.605(+54)	+13	12	3	59	47
6	1.958(+68)	+16	16	2.7	60	47
8	2.311(+76)	+20	20	2.5	60	45
10	/	/	/	/	/	/
16	/	/	/	/	/	/
18	/	/	/	/	/	/
$\infty$	3.726(+23)	+6	3	0	48	48

備考：( )内の値は対応する  $F_T$  に対する増分%である。

表-3-4 ビショップ法の結果(水あり)  
 $z_\phi$  に対する  $F_{min}$

$z_\phi$	$F_B$	中心位置	円の深さ $D$	$D/z_\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
0m	0.995( 0)	+6m	5m	$\infty$	57°	57°
0.5	/	/	/	/	/	/
2	1.161(+21)	+8	7	3.5	58	48
3	1.270	+8	8	2.7	60	47
4	1.384(+42)	+9	9	2.3	60	44
6	1.619(+54)	+10	12	2.0	63	43
8	1.853(+61)	+13	16	2.0	64	44
10	/	/	/	/	/	/

$z_\phi$	$F_B$	中心位置	円の深さ $D$	$D/z_\phi$	$\alpha_1$	$\alpha_2$
16	*2.784	+20	28	1.8	65	41
18	/	/	/	/	/	/
$\infty$	2.648(+29)	5	4	0	56	56

備考： $z_\phi=16$  m のとき、\* 印の値を  $F_{min}$  とすることはできない。

図-19 によれば、図-18 で与えられる地盤条件では  $F_B$  はつねに  $F_T$  より大きい値となっている。

$F_B$  の増加は  $z_\phi$  の増加とともに顕著にみられ、 $z_\phi$  の増大に伴ってほぼ直線的に増加している。

$F_T$  の値が  $z_\phi=2$  m 付近までいったん減少してから増大しているのは与えられ地盤条件に原因があるものと思われる。

(iii) 水位の影響

図-19 においてビショップ法は  $z_\phi=2$  m より大きくなると  $F_B, F_B'$  の値はともに直線的に増えている。チェボタリオフ法も  $z_\phi=6$  m より大きくなると  $F_T, F_T'$  の値は直線的に増えている。これらの直線部分の勾配の傾きをそれぞれ  $K_B, K_B', K_T, K_T'$  とすると表-4 のようである。

表-4 直線部分の傾き

方	法	$K_T, K_T', K_B, K_B'$
チェボタリオフ法(水なし)		$K_T$ 0.725/10
チェボタリオフ法(水あり)		$K_T'$ 0.576/10
ビショップ法(水なし)		$K_B$ 1.73 /10
ビショップ法(水あり)		$K_B'$ 1.15 /10

両方法とも水位がある場合はない場合より小さい値となっているが  $(K_B'-K_B)=-0.58/10$ ,  $(K_T'-K_T)=-0.15/10$  であるから

$$(K_B'-K_B) < (K_T'-K_T) < 0 \quad (9)$$

という関係を得る。これは、水位があることによって  $F$  の減少する度合は、チェボタリオフ法よりも、ビショップ法の方が顕著であることを示している。

したがって  $\phi$  層によるせん断抵抗は水圧によって減少するが、チェボタリオフ法よりはビショップ法の方が減少の割合が大きいと思われる。

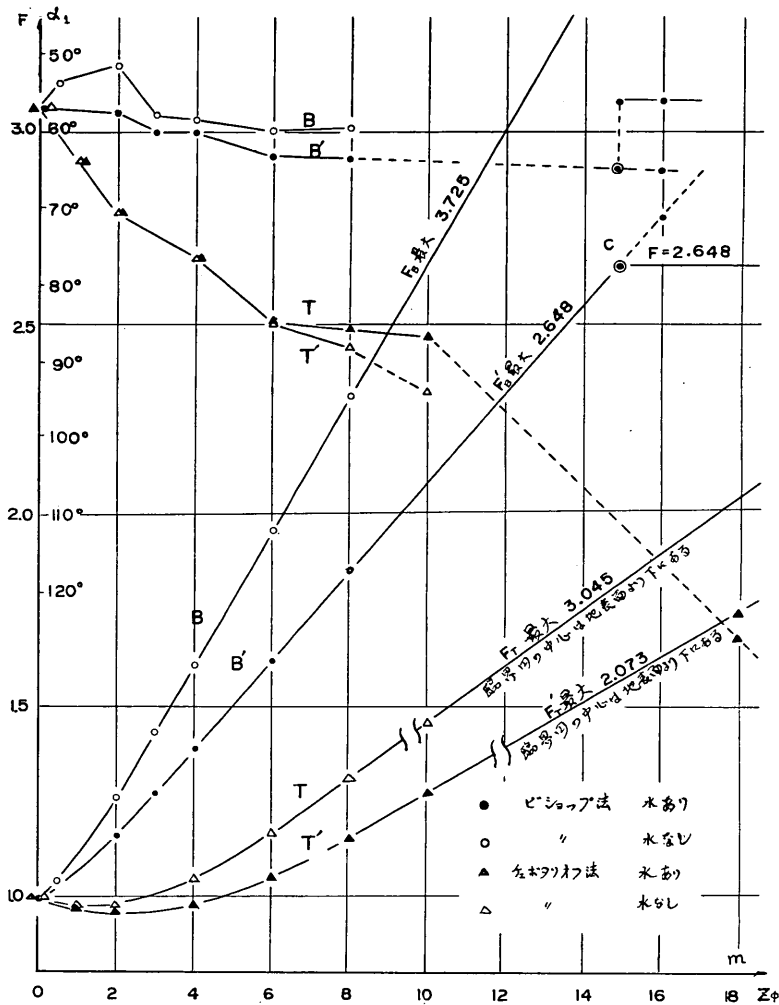


図-19  $F$  および  $\alpha_1$  と  $z_\phi$  との関係

(iv) 臨界円の位置

臨界円の中心はビンヨップ法では  $z_\phi$  の増加とともに、上方に移動し、チェボタリオフ法では地表面以下にまで移動している。図-19には  $z_\phi$  と角  $\alpha_1$  の関係を示してある。

(v)  $z_\phi = \infty$  の場合、両方法による比較

一例として  $z_\phi = \infty$  で水位がある場合をビンヨップ法の臨界円をビンヨップ法 ( $F_{B'} = 2.648$ ) およびチェボタリオフ法 ( $F_{T'} = 2.166$ ) で計算した結果を図-20 に示す。

この場合、チェボタリオフ法による臨界円での値  $F_{T'}$  は 2.050 であった。

分割片に対応して、底面に沿って極限のつり合状態で

発揮されている両方法によるせん断抵抗力  $S/F$ 、および発揮されているせん断応力  $\tau_m$  の分布を示してある。

実線はチェボタリオフ法の結果を点線はビンヨップ法の結果を表わす。

円弧の中間部で  $\tau_{mB}$  は  $\tau_{mT}$  はより小さいが両端部においては  $\tau_{mB}$  の方が大きい。 $\tau_{mB} < \tau_{mT}$  となる範囲は中心角  $\alpha$  ではほぼ  $-23^\circ \sim 34^\circ$  である。

$F_{B'} > F_{T'}$  であるからビンヨップ法によるせん断強度  $\tau_{fB}$  がチェボタリオフ法による  $\tau_{fT}$  より大きくなる範囲は  $\tau_m$  の場合より大きくなる。

なお、 $F_{0m} = -\tan(-56^\circ) \cdot \tan 30^\circ = 0.86$  であり、この場合は  $F_{B'} = 2.648$  の値は  $F_{0m}$  の影響を受けていな



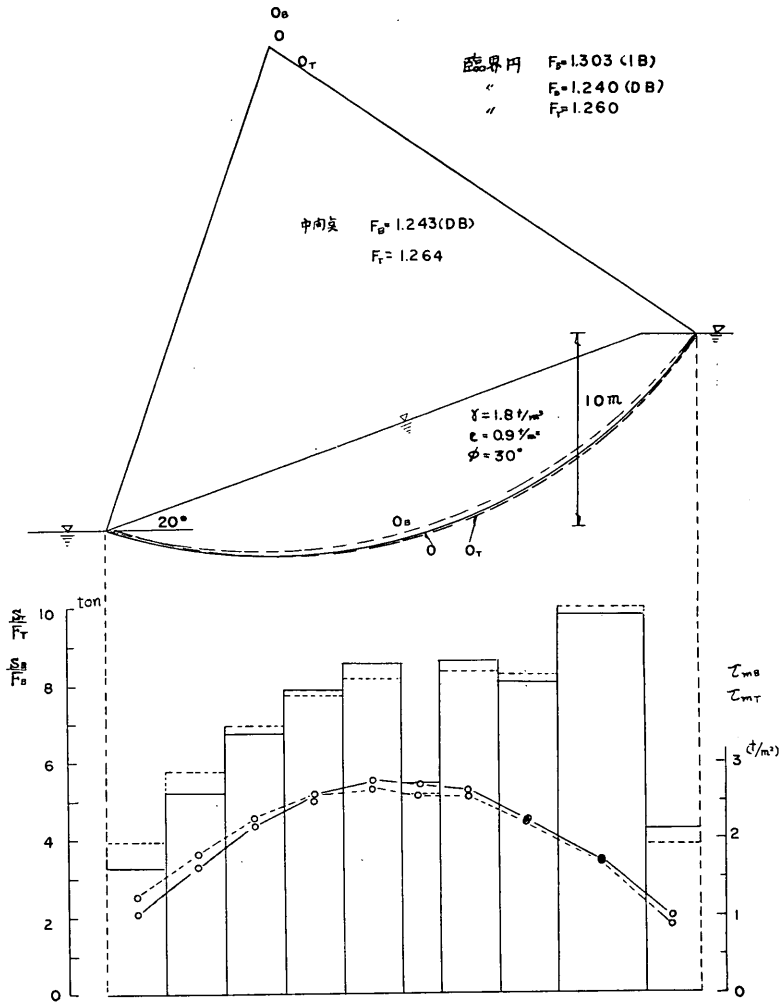


図-21 水位(I)の単純斜面

表-5 水位を変化させた場合の  $F_{min}$  および  $D$  の変化臨界円における2方法の結果

ケース	$F_T$	$D_T$	$\frac{F_B}{IB}$ (DB)	$D_B$	$(F_B - F_T)/F_T$	$\frac{(DB - IB)}{IB}$
(I)	1.260	1.16	1.303 (1.240)	1.12	+3(-2)%	-4.8%
(II)	1.549	1.36	(1.693)	1.24	(+10)%	
(III)	1.952	1.55	(2.204)	1.29	(+12)%	

備考:  $F_T$ ,  $F_B$  を与える臨界円の位置は一致していない。

( ) 内は分割して近似計算した値である。

分割数11

ビショップ法とチェボタリオフ法の比較

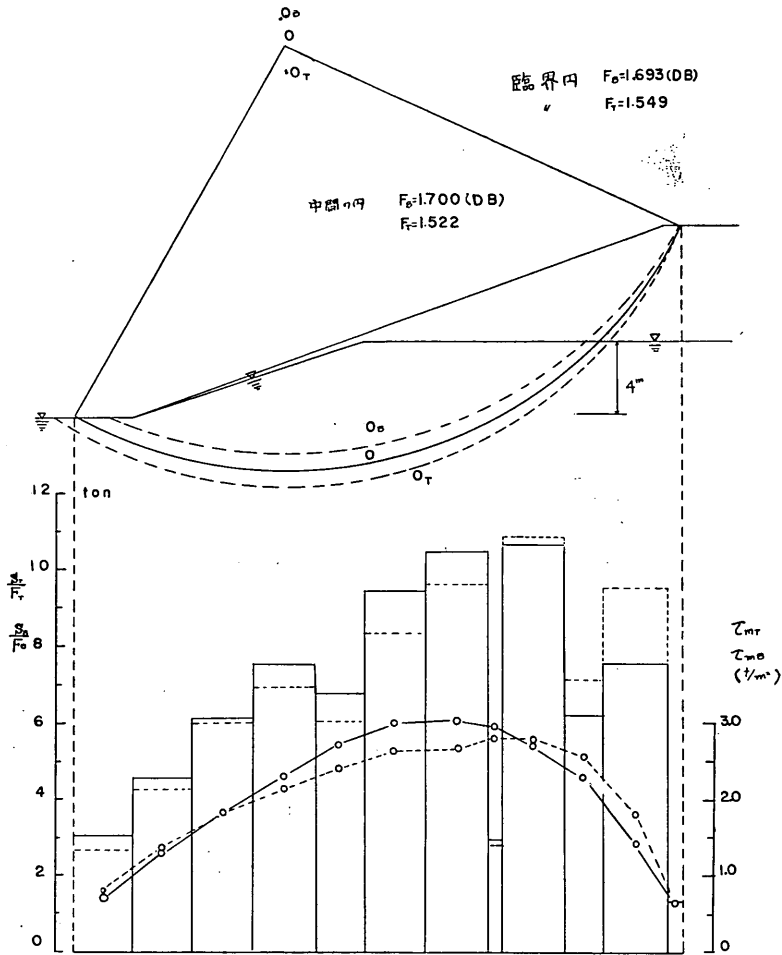


図-22 水位(II)の単純斜面

も  $F_B$  は  $F_T$  より大きい値であることが確められた。しかし、堤体内部の水位が高いものほどその割合は小さい。この傾向は、考えられる計算誤差の範囲をこえた水の影響を考える場合の計算式の根本的な相違からくるものと思われる。

表-5 および 表-6 からビショップ法の内、分割して近似計算をする場合 (DB法) は、積分する場合 (IB法) に比べて 0~5%程度小さい  $F_B$  を与えている。とくに、水位(I)の断面では DB法の値では  $F_T$  より小さくなっている。

(iii)  $c$ ,  $\phi$  を別々に与えて計算した例

$\phi=0$  として  $c$  だけ与えてビショップ法で計算した  $F$  を  $F_B(c)$ ,  $c=0$  として  $\phi$  だけを与えた場合を  $F_B(\phi)$

とする。水位(I)の場合、ビショップ法の臨界円について  $F_B(c)$ ,  $F_B(\phi)$  を求めると  $F_B(c)=0.470$ ,  $F_B(\phi)=0.777$  であり、 $F_B(c)+F_B(\phi)=1.247$  となって、これは  $F_B(c, \phi)=1.240$  に対して 1%以下の違いでありほぼ等しい値となっている。したがって DB法では、 $F_B(c)+F_B(\phi)=F_B(c, \phi)$  という関係が成り立つと思われる。IB法に対しては確めることをしなかった。

(iv) 臨界内の位置

ビショップ法、チェボタリオフ法の臨界円の中心をそれぞれ  $O_B$ ,  $O_T$  とすると 図-21, 図-22, 図-23 において示されるように斜面の斜め上方に位置するが  $O_B$  は  $O_T$  より上になっている。

また、ビショップ法の臨界円はチェボタリオフ法のもの

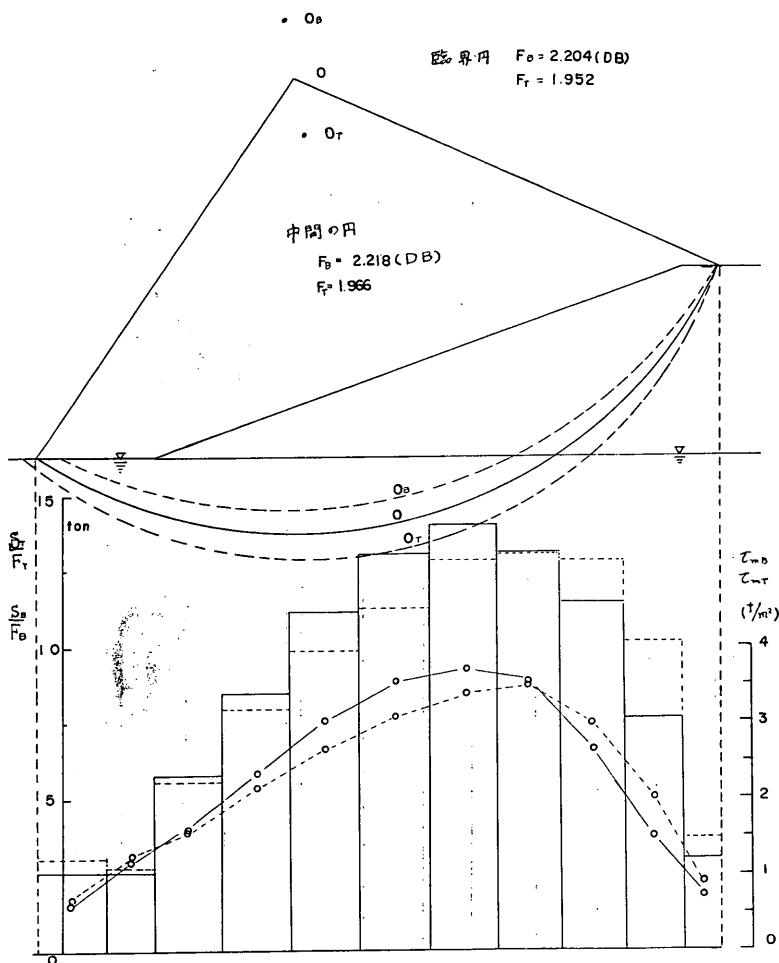


図-23 水位(Ⅲ)の単純斜面

のより浅い円となっている。以上の傾向は水位が低下するほど顕著になっている。

(v) 共通の円における両方法の比較

両方法を同じ円で比較するために、水位

(Ⅱ)、水位(Ⅲ)のおおのの  $O_B$ ,  $O_T$  の中間の点を中心  $O$  とし、通過点も中間点を通る円について計算した。

結果は、表-6、図-21、図-22、図-23 に示す。

表-6 の値は、表-5 の値に比べて全体に少し大きい

表-6 中間の円における 2 方法の結果

ケース	$F_T$	$\frac{F_B}{IB}$ (DB)	$D$	$(F_B - F_T)/F_T$	$\frac{DB - IB}{IB}$
(Ⅰ)	1.264	1.304 (1.243)	1.14	+ 3(- 2)%	-4.6%
(Ⅱ)	1.552	1.742 (1.702)	1.30	+12(+ 9)%	-2.3%
(Ⅲ)	1.966	2.235 (2.218)	1.42	+13(+13)%	-0.7%

備考：( ) 内は分割して近似計算した値である。

分割数11



方法で計算した。ビショップ法の場合は、とくに図に示すように断面を 10 分割して DB 法によっても計算した。断面全体としての  $F_s$  は、表-7 の最下段に示してある。また、表-7には同じように分割した断面に対して、10 個の内、1 個に  $\phi$  を与え、残りの部分を  $\phi=0$  として、すなわち重さはあるが抵抗はないものとして、順に計算した結果を示してある。

表-7 1 個の分割片にだけ  $\phi$  を与えた場合の安全率

分割片 No.	方 法			
	チェボタリオフ	I B法	DB法	$\alpha$ の近似値
1	0.055	0.257	0.261	-19°05'
2	0.153	0.276	0.276	-11°10'
3	0.232	0.271	0.271	-3°40'
4	0.286	0.250	0.249	3°40'
5	0.313	0.211	0.210	11°10'
6	0.311	0.149	0.148	19°05'
7	0.278	0.056	0.054	27°15'
8	0.215	*	*	31°30'
9	0.123	*	*	46°00'
10	0.016	*	*	55°30'
計	[1.982]	[1.470]	[1.469]	
全 体	1.982	2.206	2.207	
備 考	* 印の分割片の F は非常に小さい			

この場合は、ビショップ法の I B 法と DB 法の  $F_s$  は全体としては同じとみてよい。しかし、各分割片の  $F_s$  の和は全体の安全率より小さい値となっている。チェボタリオフ法は当然のことながら個々の  $F_s$  の和が全体の  $F_s$  の値に一致している。

図-24 の下には、各分割片に対応してそれぞれの底面に沿うセン断抵抗力  $S_{fT}$ ,  $S_{fB}$  の値がプロットされている。タンブルは  $u=0$ ,  $c=0$  の場合、一つの分割片について  $\tau_f$  (フェレニウス法によるセン断強度—この場合チェボタリオフ法におけるセン断強度と同じである) と  $\tau_B$  (ビショップ法によるセン断強度) の比を、

$$\tau_F/\tau_B = (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi) \cos^2 \alpha \quad (31)$$

と表し、例として  $\phi=10^\circ$  および  $35^\circ$  の場合の  $\tau_F/\tau_B$  と  $\alpha$  の関係を示している。

しかし、式(31)よりはるその誘導からみて、ビショップ法による安全率  $F_B$  を含んだ次の式(32)が一般的である。

$$\frac{\tau_F}{\tau_B} = \frac{\tau_T}{\tau_B} = \left(1 + \frac{\tan \phi \cdot \tan \alpha}{F_B}\right) \cdot \cos^2 \alpha \quad (32)$$

式(31)は式(32)において  $F_B=1.0$  の場合であると考えられる。

ここに  $\tau_T$  はチェボタリオフ法による土のセン断強さである。

図-24 のすべり円では  $F_B=2.206$  であるから、この値を式(32)に用いて、この場合の  $\alpha$  と  $\tau_T/\tau_B$  の関係を示せば図-25 のようになる。また、計算でえられた  $\tau_T/\tau_B = S_T/S_B$  も示してある。但し分割片の  $\alpha$  は中線と底面との交点におけるものとする。これらの値は、式(32)の曲線の近くに分布している。

図-25 において、 $\alpha=0 \sim 14^\circ 30'$  の範囲では  $\tau_T > \tau_B$  となっているがそれ以外の範囲では  $\tau_T < \tau_B$  となっている。

なお、 $\tan \phi$  および  $F_B$  が一定のとき、式(32)は  $\alpha$  だけの関数となり、これを  $f(\alpha)$  とすると

$$f(\alpha) = (1 + C \cdot \tan \alpha) \cos^2 \alpha \quad (33)$$

となる。ここで  $C = \tan \phi / F_B (> 0)$  とする。

このとき  $f(\alpha)$  と  $\alpha$  の関係は次のようである。

a)  $f(\alpha) = 0$  となる  $\alpha$ ,

$$\alpha = \pm \pi/2$$

$$\alpha - \tan^{-1}(-1/C) = \tan^{-1}C - u/2$$

b)  $f(\alpha) = 1$  ( $\tau_F = \tau_T$ ) となる  $\alpha$ ,

$$\alpha = 0$$

$$\alpha = \tan^{-1}C$$

c)  $f(\alpha)$  の最大値を与える  $\alpha$ ,

$$\alpha = \sin^{-1} \sqrt{\frac{1+C^2 - \sqrt{1+C^2}}{2(1+C^2)}}$$

d)  $f(\alpha)$  の最小値を与える  $\alpha$ ,

$$\alpha = \sin^{-1} \left( -\sqrt{\frac{1+C^2 + \sqrt{1+C^2}}{2(1+C^2)}} \right)$$

e)  $f(\alpha) > 1.0$  となる範囲、

$$0 < \alpha < \tan^{-1}C$$

以上の関係から、 $\tau_T > \tau_B$  となる範囲は  $C = \tan \phi / F_B$  の値が大きいほど大きいことになる。

$\tau_T > \tau_B$  の関係が直接斜面全体の安全率に対して  $F_T > F_B$  という関係を与えるとはいえないが  $C$  を大きく与えて  $\tau_T > \tau_B$  となる範囲を大きくするために  $F_B < 1.0$  と



ビショップ法とチェボタリオフ法の比較

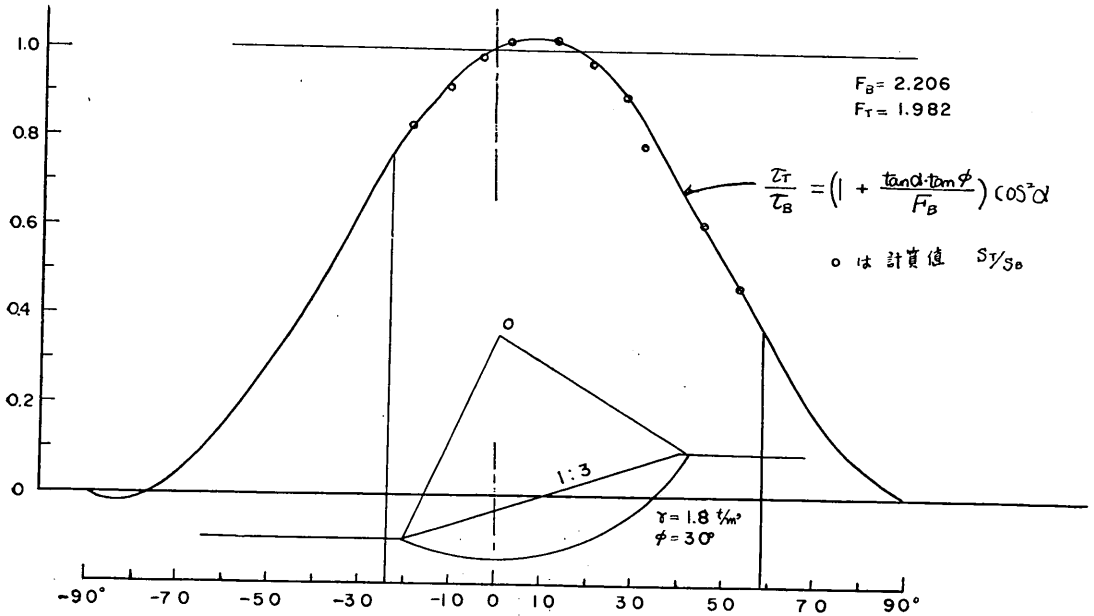


図-25  $\tau_T/\tau_b$  の分布

なるような例として 図-26 に示す断面について比較する。

(ii)  $F_B < 1$  の場合

図-26 に示すような 10 分割で計算した結果、

$F_T = 0.703$ ,  $F_B = 0.777$  となりこの場合も  $F_B > F_T$  と

いう関係にある。各分割片に対して、セン断抵抗  $S_{fB}$ ,  $S_{fT}$  を 図-26 に示してある。

角  $\alpha$  が大きいはんいでは  $S_{fB}$  は  $S_{fT}$  より大きい。したがって  $\tau_{fB} > \tau_{fT}$  となっているが、 $\alpha$  が小さくなるとこの関係は逆になっている。

(6) 水平な砂地盤における任意の深いすべり円による比較

ひじょうに特殊な場合であるが  $\phi$  層におけるセン断抵抗を比較するために 図-27 のような、深い円を考える。

分割は 10 とし各分割片に対してセン断抵抗  $S_{fB}$ ,

$S_{fT}$  およびセン断強度  $\tau_{fB}$ ,  $\tau_{fT}$  の分布も 図-27 に示す。

この場合、すべり円の全長において  $S_{fB}$  が  $S_{fT}$  より大きい。とくに、両端部において顕著な差があらわれている。

式(2)の曲線において、 $\tau_{fT} < \tau_{fB}$  となる範囲は  $\alpha = 0^\circ \sim 1^\circ 30'$  であるがその量は、ひじょうに小さいため、全体としては、無視しえるほどである。

なお、 $F_B(\text{IB法}) = 20.96$  に対して  $F_B(\text{DB法}) = 20.66$  と積分による値は 10 分割の近似法による値より約 1.5%ほど大きい。

このとき  $F_{0m} = -(\tan \phi \cdot \tan \alpha)_{\max} = 11.54$  でこの値は、 $F_T$  および  $F_B$  の値よりかなり小さい。

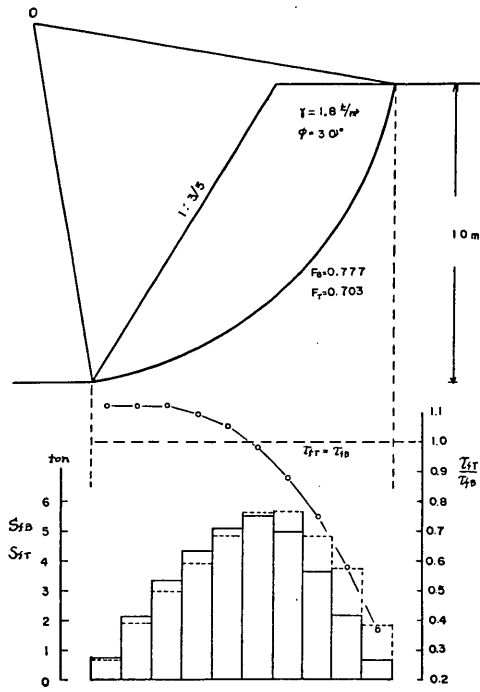


図-26  $F_B < 1.0$  の場合の  $S_B$ ,  $S_T$  および  $\tau_T / \tau_B$  の分布の一例

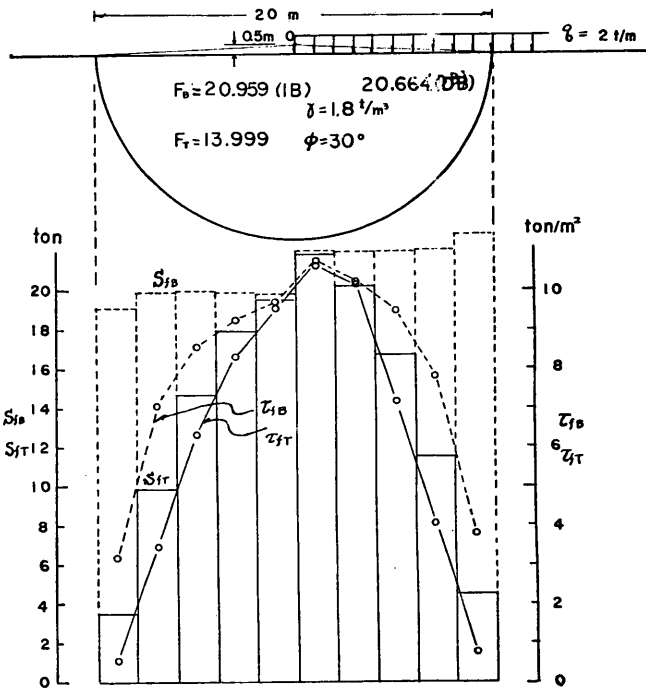


図-27 水平な砂地盤における深いすべり円

7. ま と め

(1) 5. でのべた  $F_{0m} = -(\tan\alpha \cdot \tan\phi)_{\max} > 0$  の値が臨界円の  $F_B$  に直接影響する例を示すことはできなかったが、上部に  $\phi$  層がある場合、中心が低いすべり円では  $F_T < F_{0m} < F_B$  となり、 $F_{0m}$  が直接  $F_B$  の値に影響を与える。

6-2-(3)に示された例において、 $\phi$  層厚の増大に伴ってチェボタリオフ法の臨界円の中心は低下しているのに対し、円の中心が低い場合  $F_B$  は増大しているため、ビショップ法の臨界円の中心は上方にあることになる。したがって、すべり円の位置を規制しないで自由に変化させる場合、 $F_{0m}$  の影響は、一般に、ビショップ法の臨界円の中心が結果的にチェボタリオフ法による臨界円の中心より上方に位置することに関係が深い。

(2) 式(9)で表わされるビショップ法のセン断抵抗成分が負になる例は本報告においてなかった。

これは  $u$  として静水圧だけを考えたためと思われ、特別な過剰間ゲキが存在するような場合については検討していない。過剰間ゲキ圧が存在しているときは、チェボタリオフ法では、その取扱い方から問題が発生する。

(3) 5. でのべた分割片に働く水平力  $E_n, E_{n+1}$  については、 $F_B$  を求める式(11)、式(12)に現われないため、特に考慮することはしなかったが、最終的にえられる  $E_n, E_{n+1}$  は外力が存在しないとき  $\sum(E_n - E_{n+1}) = 0$  という条件を満足しているという確証はないと思われる。

(4) 6-2-(1)に示した三つの破壊例においてチェボタリオフ法による安全率  $F_T$  は 0.97~1.01 で 1.0 に近い値を示している。これに対してビショップ法による安全率  $F_B$  は  $F_T$  より大きい値を与えている。

その大きさの程度は 6%~27% である。

(5) 破壊例においては、つり合状態で発揮されているセン断応力は、砂層においてビショップ法がチェボタリオフ法の場合より大きく、粘土層においてこの関係は逆転している。

(6) 破壊例において斜面の後部にだけ  $\phi$  層がある場合は臨界円の位置、大きさは、ほぼ一致している。

前面にも  $\phi$  層がある場合、チェボタリオフ法の臨界円はこの  $\phi$  層を通るのに対し、ビショップ法の臨界円はこの  $\phi$  層の下方を通り、中心は上方にある。したがってより大きいすべり円になっている。

(7) 破壊例のうち、ケース I の水位は水平で、このとき  $F_B$  は  $F_T$  の値より 27% 大きい。他方、ケース II、

ケース III は、残留水位がある場合であるが、このとき  $F_B$  は  $F_T$  に対して、それぞれ 6%、9% 大きくなっているに過ぎない。

この傾向は、6-2-(4)の単純斜面における例でも、みられ一般に、 $\phi$  層内に残留水位がある場合は  $F_B$  と  $F_T$  の差は少なくなるようである。

(8) 6-2-(2)の図-17に示す、現在安定を保っている矢板岸壁の例では  $F_B = 2.00$ 、 $F_T = 1.48$  であり、深いすべり円では  $F_B$  と  $F_T$  の差は大きいことを示している。

ビショップ法の円の中心はチェボタリオフ法に比してかなり上方にあり、すべり円も大きい。

(9) 6-2-(3)の図-18に示すような、水平な粘性土地盤を  $\phi$  層で置換える例において、 $F_T$  は  $z_\phi$  が増大すると一度低下をしそれから増大している。これに対して  $F_B$  は有効置換厚(付録 B)まで低下することなく、単調に増加している。

(10) 図-18の例においては、図-19に示すように  $F_B > F_T$ 、 $F_B' > F_T'$  (水位がある場合)となっている。

また、6-2-(3)の式(30)の関係から、水平な水位があることによって  $F_s$  の低下する割合は、チェボタリオフ法よりもビショップ法の方が顕著である。

(11) 6-2-(4)の図-21において積分で求めた場合(I B法)、 $F_B = 1.303$  であるのに対し、11分割して近似計算をした場合(DB法)、 $F_B = 1.240$  であった。この場合、数値は大きいですが、分割数を多くした極限の場合の値が I B法による値であると考えられるから  $F_B = 1.303$  をとるものとする。なお、 $F_T = 1.264$  であるから、分割数が 11程度では、DB法で求めた場合  $F_B < F_T$  となってしまうことがある。

(12) 図-21のビショップ法の臨界円において、 $c$  と  $\phi$  を別々に与えて計算すると  $F_B(c) = 0.470$ 、 $F_B(\phi) = 0.777$  であり、 $F_B(c) + F_B(\phi) = 1.247$  となって、これは  $F_B(c, \phi) = 1.240$  に対して 1%以下の違いである。

したがって、実用的には DB法によれば、 $F_B(c) + F_B(\phi) = F_B(c, \phi)$  という関係が満足されるものと思われる。I B法に対しては確かめることをしなかった。

なお、チェボタリオフ法ではこの関係は、つねに成立つ。

(13) 図-24に示す  $\phi$  だけの断面で 10 分割し、これらの分割片に別々に  $\phi$  を与え、他の分割片を  $\phi = 0$  として  $F$  を求めると、チェボタリオフ法の場合は

$F_T = \sum F_{Ti}$  ( $i$  は  $i$  番目であることを意味する) が成立つがビショップ法の場合は成立たなかった。

(14) 式(2)において $\phi$ 一定とすれば $\tau_T/\tau_B$ の値は $F_B$ と角 $\alpha$ の関数となり $F_B$ の値が小さいほど $\tau_T/\tau_B > 1$ , すなわち $\tau_T > \tau_B$ となる範囲は増大する。

(15)  $F_B$ が1より大きい場合として図-24のような断面における例では $F_B=2.209$ ,  $F_T=1.982$ であり,  $F_B > F_T$ の関係にあった。

(16)  $F_B$ が1より小さい場合として図-26のような断面における例では $F_B=0.777$ ,  $F_T=0.703$ であり, やはり $F_B > F_T$ という関係に変わりはなかった。

(17) 図-24の場合, 各分割片(10個)に対して, 計算された $\tau_T$ と $\tau_B$ の比をプロットすると, 式(2)によって決定される曲線の近くに分布している。

(18) 図-27に示す砂地盤に深いすべり円を仮定すると $F_B=20.96$ ,  $F_T=14.00$ となり, 中央から離れるにしたがってビショップ法のセン断強さ $\tau_{FB}$ はチエボタリオフ法に対してひじょうに大きな値を与えている。

(19) 本報告で扱った断面に対して両方法の臨界円での $F_s$ の間には, つねに $F_B > F_T$ という関係がみられた。したがって, 同一の円弧に対しても, つねに $F_B > F_T$ である。

しかし, この一般的な関係を式の上で解明することはできなかった。すなわち, 任意の断面に対して, ビショップ法による値がチエボタリオフ法に比べて, どれほど異った値を与えるということは解明されていない。

## 8. 結 論

三つの破壊例に対して, 二方法で求めた安全率は, チエボタリオフ法の場合,  $F_T=0.97\sim 1.01$ であり, 破壊の規準 $F_s=1.0$ によく適合している。ビショップ法の場合,  $F_B=1.07\sim 1.23$ であり,  $F_B$ の値は $F_T$ より, すべりの円の範囲に $\phi$ 層がかなり存在するケースⅠの場合が27%と非常に大きく,  $\phi$ 層が少ししか存在しないケースⅡ, ケースⅢの場合はそれぞれ6%, 9%と差が小さくなっている。

本報告で扱った破壊例は, 全て港湾分野におけるものである。港湾分野における斜面には水平な地盤上に載荷する場合から, 矢板などを利用した直立型岸壁にいたるまで多くの種類があり, 比較的, 深い部分でのすべり破壊が起り得るといわれているが, まとめの(1)で述べた $F_{0m}=(-\tan\alpha \cdot \tan\phi)_{\max} > 0$ の値が $F_B$ の大きさに与える影響は, この深い円の場合ほど顕著になる。

ビショップ法はこのほかに, 異常な過剰間ゲキ圧が作用する場合すべり円において部分的にセン断抵抗が負に

なることも式の上からは考えられる。また,  $F_B$ を求める場合には表われないが, 求められた $F_B$ によって力の多角形から決定される水平方向の力 $E_n, E_{n+1}$ の総和が零になるという確証はない。

以上のことはすでに述べたように, すべり円の範囲に $\phi$ 層が存在する場合に生じることなので, 断面内に $\phi$ 層を有し, 間ゲキ水圧が静水圧だけで表わされている場合, 港湾分野における通常の円形すべりの計算には, チエボタリオフ法を用いる方がよいと思われる。

## 9. あ と が き

複雑な土構造物の安定問題を, 簡単な円形すべりという仮定で論じることは, かなり大胆で自ずから限界がある。

本報告において, ビショップの簡易法とチエボタリオフ法の二方法の比較検討を試みたが, 十分な解析がなされたとはいえ, 問題を提起したにすぎない部分もあるので, 今後さらに検討をつづける必要があると思われる。

なお, 本報告をまとめるにあたり, 土質部, 中瀬明男室長, 設計基準部, 寺尾健元計算室長から多大の御指導をいただき, プログラム作成においては, 東芝, 電子計算機事業部の小林親子, 原田雅英両氏の御協力を得た。

また, 本報告における図面の整理にあたっては, 土質部, 伊藤昌英技官の手をわずらわせた。

ここにあわせて感謝の意を表する。

参 考 文 献

1. 齊藤迪孝, 山田剛二: “斜面安定”土質工学ハンドブック第8章, 1965年, p.195~220
2. G.P.Tschebotarioff: “Soil Mechanics, foundation and earth structures” McGraw-Hill. 1951年. p.167~p.186.
3. A.W.Bishohs: “The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes” Geotechnique, Vol.5 No.1 March 1955. p.7~p.17
4. 中瀬明男, 紙山一雄: “ビンヨップの安全計算法とそのプログラミング” 港研報告, 4巻1号, 1965年, p.29~p.44
5. “プログラム・ライブラリー第1集” 港湾技術研究所, 計算室資料, 1967年3月
6. 山口柏樹: 法面安定計算における安全率の塑性論的解釈 “第12回土質工学シンポジウム, 1967年, p.31~p.36
7. W. Kjellman “Do slipsurfaces exist?” Geotechnique, Vol.5 No.1. March. 1955
8. L. Bjerrum and N. Flodin: “The Development of Soil Mechanics in Sweden, 1900-1925” Geotechnique Vol.10 No.1. 1960
9. D. W. Taylor: “Fundamentals of Soil Mechanics, Chapter 16, Stability of Slopes” 1948, p.406~p.479
10. N.Janbu: “Application of Composite Slip Surfaces for Stability Analysis” European Conference on Stability of Earth Slopes, Vol.III 1954
11. N. R. Morgenstern and V. E. Price “The Analysis of Stability of General Slip Surfaces” Geotechnique, Vol.15 No.1 March, 1965 p.79~p.93
12. R. V. Whitman and W. A. Bailey: “Use of Computers for Slope Stability” Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, A. S. C. E, Vol.93, No. SM4, Proc Paper 5327 July 1967 p.475~p.498
13. W. J. Turnbull and M. J. Hvorslev; “Special Problems in Slope Stability” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, A. S. C. E, Vol. 93, No. SM. 4, p.499~p.528
14. 港湾構造物設計基準, 5編4章, 日本港湾協会, 1967年
15. A. W. Bishop and N. Morgenstern: “Stability Coefficients for Earth Slopes” Geotechnique Vol. 10, No.4 Decembor 1960 p.129~p.150
16. E. Spencer: “A Method of Analysis of Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces” Geotechnique, Vol. 17, No.1, March 1967, p.11~p.25
17. D. R. May and I. H. A. Brahtz: “proposed Methods Calculating The Stability of Earth Dams” Second Congress on Large Dams, Washinton, D.C., 1936, p.539~p.576
18. R. F. Scott: “Principles of Soil Mechanics” Addison-Wesley, 1962, p.463

記号表

- $A$ : 簡易ビンヨップ法で計算する場合に必要な定数で、各分割片に対して、式(6)で与えられる。
- $B$ :  $A$ と同様で、式(7)で与えられる。
- $b$ : 分割片の幅
- $c, c'$ : 土の強度定数でみかけ上の粘着力。 $c'$ は有効応力に基くもの。
- $D$ : 単純斜面における深度係数、あるいは円弧の下端の深度。
- $D_B, D_T$ : ビンヨップ法およびチェボタリオフ法を用いた場合の深度係数。
- $E$ : 各分割片に働く水平方向の力の和。 $E=E_n-E_{n+1}$ 。
- $E_n, E_{n+1}$ : 任意の分割片の両側面に働く水平方向の力。
- $F$ : 安全率。一ぱんに強さに関する安全率  $F_s$  を表わす。
- $F_s$ : 土のせん断強さに関する安全率。
- $F_c$ : 粘着力に関する安全率。
- $F_\phi$ : まさつ抵抗に関する安全率
- $F_h$ : 高さに関する安全率
- $F_r$ : 重量に関する安全率。
- $F_f$ : 力のつり合からえられる  $F$
- $F_m$ : モーメントのつり合からえられる  $F$ 。
- $F_{m0}$ :  $\theta=0$ とした場合の  $F_{m0}$
- $F_T$ : チェボタリオフ法による  $F_s$ 。
- $F_B$ : ビンヨップ法による  $F_s$ 。
- $F_{(c)}$ :  $\phi=0$ としてえられる  $F$ 。
- $F_{(c\phi)}$ :  $c=0$ としてえられる  $F$ 。
- $F(c, \phi)$ :  $c$ および  $\phi$ を与えてえられる  $F$ 。
- $H$ : 斜面の高さ。
- $h$ : 土被り厚。
- $l$ : 分割片底面長。 $l=b \cdot \sec \alpha$
- $M_s, M_d$ : 転倒モーメント。
- $M_T$ : 抵抗モーメント
- $m, n$ : ビンヨップ——モーゲンスターの安定図表によって与えられる安定係数。
- $N_d$ : 深度係数  $D$ と同一。
- $N_x$ : 単純斜面において円弧の終点を示す係数。図-3
- $O$ : 円の中心。
- $O_B, O_T$ : ビンヨップ法およびチェボタリオフ法による円の中心。
- $P, P'$ : 分割片底面に働く垂直反力。 $P'$ は有効応力に基いた垂直反力
- $p, p'$ : 分割片底面に働く垂直反力による応力  
 $p=P/l, p'=P'/l$
- $R$ : 円の半径。
- $r_u$ : 間ゲキ圧比。 $r_u=u/rh_0$ 。
- $S_f$ : 土のせん断抵抗力。
- $S, S_m$ : 発揮されているせん断抵抗力。
- $U$ : 間ゲキ圧による力。
- $u$ : 間ゲキ圧。 $u=U/l_0=u_0+u_s$
- $u_0$ : 静水圧による間ゲキ圧
- $u_s$ : 過剰間ゲキ圧
- $W$ : 分割片重量。
- $W'$ : 分割片の水中重量。 $W'=W_1+W_2$ 。
- $W_1$ : 水位より上の重量。
- $W_2$ : 水位より下の水中重量。
- $X$ : 各分割片に働く鉛直方向力の和。 $X=X_n-X_{n+1}$
- $X_n, X_{n+1}$ : 任意の分割片の両側面に働く鉛直方向の力。
- $z_\phi$ : 置換砂層厚。
- $z_c$ : 有効置換深さ。それ以上、置換厚を大きくしても  $F$ の値は変わらず一定となる置換深さ。
- $\alpha$ : 分割片幅の中線が円弧と交る点と円の中心を結ぶ線が鉛直となす角。分割片幅が小さい場合は、分割片底面が水平となす角に等しい。
- $\alpha_1$ : 図-18 および 図-19 において示される角度。
- $\beta$ : 単純斜面の傾斜角度。
- $\gamma$ : 土の単位体積重量。(水も含んだ重量)
- $\gamma_w$ : 水の単位体積重量。 $t-m$ 単位では1.0。
- $\gamma'$ : 水中での単位体積重量。 $\gamma'=\gamma-1$ 。
- $\theta$ : 各分割片間の力の合力が、水平方向となす角度。
- $\theta_0$ :  $F_m=F_f$ が成立つ場合の  $\theta$ 。
- $\phi, \phi'$ : 土のみかけのせん断抵抗角。 $\phi'$ は有効応力に基くもの。
- $\phi_m$ : 極限のつり合を保つために発揮されている  $\phi$ 。
- $\sigma, \sigma'$ : 分割片底面に働く垂直応力。 $\sigma'$ は有効な垂直応力。これらの大きさは夫々、 $p, p'$ に等しい。
- $\lambda$ : 不静定力  $X, E$ の間の関係を定める定数。
- $\tau_m$ : 極限のつり合を保つために発揮されているせん断応力。
- $\tau_{mB}, \tau_{mT}$ : ビンヨップ法およびチェボタリオフ法における  $\tau_m$ 。

付録：A

A プログラムの概要

A.1. 計算式

(1) 基本式

土の粘着力およびせん断抵抗力によって生ずる抵抗モーメントと；堤体重量，上載荷重，残留水，水平外力，水平震度によって発生する転倒モーメントから，安全率  $F$  を次の式で求める。

$$\text{安全率 } F = \frac{\sum(\text{抵抗モーメント})}{\sum(\text{転倒モーメント})}$$

但し，ビショップ法では抵抗モーメントの中に  $F$  が現われるため多価関数となっている。又上の式で和の記号は分割片に対して行なう。

(2) 抵抗モーメントの計算

抵抗モーメントを粘着力成分とせん断抵抗角成分に分けて

$$MR = MRC + MRF$$

とすれば，

a) チェボタリオフ法

粘着力によるモーメントは， $C = C_0 + C_k \cdot Z$  であるから，

$$\begin{aligned} MRC &= \sum RCi = \sum R^2 \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (C_0 + C_k \cdot Z(\theta)) d\theta \\ &= \sum R^2 \left[ (C_0 - C_k (Y_0 - Y_{gl})) \right. \\ &\quad \left. \cdot \alpha + C_k \cdot R \sin \alpha \right]_{\alpha_1}^{\alpha_2} \dots\dots\dots (A \cdot 1) \end{aligned}$$

となる。 $R$  半径， $C$  粘着力強度， $\alpha_1 \alpha_2$  分割片端角度， $Y_0$  円中心  $y$  座標， $Y_{gl}$  粘着力増加の基準座標である。

せん断抵抗角成分は，分割片内の異なる土層を区別する為の境界線を表わす直線の式を  $y_i = A_i x + b_i$  とすれば，

$$\begin{aligned} MRF &= \sum \int_{x_1}^{x_2} \left\{ \sum_i^{n-1} \gamma_{i+1} \{ (a_i - a_{i+1}) x + b_i - b_{i+1} \} \right. \\ &\quad \left. + \gamma_{n+1} \{ (a_n x + b_n) - y(x) \} \right\} \\ &\quad R \tan \phi dx \cos \theta \dots\dots\dots (A \cdot 2) \end{aligned}$$

となるが， $y(x)$  が円の方程式の下半分を表わすから，

$$\begin{aligned} MRF &= \sum \tan \phi \left[ \frac{Ax_0 + B - \gamma_{n+1} \cdot r_0}{2} (x - x_0) \right. \\ &\quad \left. \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2} + R^2 \tan^{-1} \frac{x - x_0}{\sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{A}{3} (R^2 - (x - x_0)^2)^{\frac{3}{2}} \right] \end{aligned}$$

$$+ \gamma_{n+1} \left( R^2 x - \frac{(x - x_0)^3}{3} \right) \Big|_{x_1}^{x_2} \dots\dots\dots (A \cdot 3)$$

ここで， $\phi$  内部マサツ角， $\gamma$  単位体積重量， $x_0 y_0$  円中心で，又

$$A = \sum_i^{n-1} \gamma_{i+1} (a_i - a_{i+1}) + \gamma_{n+1} a_n \dots\dots\dots (A \cdot 4.1)$$

$$B = \sum_i^{n-1} \gamma_{i+1} (b_i - b_{i+1}) + \gamma_{n+1} b_n \dots\dots\dots (A \cdot 4.2)$$

である。

b) 積分によるビショップ法

本文(8)式から抵抗モーメントは，

$$\begin{aligned} MR &= R \sum C_i + F K \sum \\ &\quad \frac{W - U \cdot b}{F \cos \alpha + \tan \phi \sin \alpha} \tan \phi \dots\dots\dots (A \cdot 5) \end{aligned}$$

となるが，第1項は粘着力成分であり，第2項がマサツ角成分である。この(8)式を  $\alpha$  の関数として表わし，積分の形にすると次のようになる。

$$\begin{aligned} MR &= \sum \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} R^3 C_k \cos \alpha d\alpha \\ &\quad + \sum \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \{ C_0 + C_k (G_i - y_0) \} R^2 d\alpha \\ &\quad + F \cdot R \sum \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{R (\gamma - U_k) \cos \alpha + AR \sin \alpha}{F \cos \alpha} \\ &\quad \frac{+ Ax_0 + B - \gamma y_0 - (U_0 + U_k (Y_{SLH} - y_0))}{\tan \phi R \cos \alpha} d\alpha \dots\dots\dots (A \cdot 6) \end{aligned}$$

ここで

$$\tan \frac{\alpha}{2} = t$$

とおけば，

$$\sin \alpha = \frac{2t}{1+t^2}$$

$$\cos \alpha = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

$$d\alpha = \frac{2}{1+t^2} dt$$

であるから，始めの2項はすぐ積分できて，

$$\begin{aligned} MRC &= \sum 2R^2 \left[ \{ C_0 + C_k (G_i - y_0) \} \tan^{-1} t \right. \\ &\quad \left. + RC_k \frac{t}{t^2 + 1} \right]_{t_1}^{t_2} \dots\dots\dots (A \cdot 7.1) \end{aligned}$$

となる。残りの項は，

$$\begin{aligned} MRF &= \\ &= F \cdot R \sum \int_{t_1}^{t_2} 2R \frac{A_3 t^4 + B_3 t^3 + C_3 t^2 + D_3 t + E_3}{(-F t^2 + 2t \tan \phi + F)(t^2 + 1)} dt \dots\dots\dots (A \cdot 7.2) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned}
 A_3 &= (\gamma - U_k)R - (Ax_0 + B - \gamma y_0 - (U_0 + U_k) \\
 &\quad (Y_{SLH} - y_0)) \\
 B_3 &= -2AR \\
 C_3 &= -2(\gamma - U_k)R \\
 D_3 &= 2AR \\
 E_3 &= (\gamma - U_k)R + (Ax_0 + B - \gamma y_0 - (U_0 + U_k) \\
 &\quad (Y_{SLH} - y_0)) \\
 U &= U_0 + U_k \cdot Z \text{ で表わされる過剰間ゲキ圧} \\
 Y_{SLH} &= U \text{ 増加の基準Y座標}
 \end{aligned}$$

である。積分の中を未定係数法で部分分数分解し、更に積分し易いように変形すると、

$$\begin{aligned}
 MRF &= 2FR^2 \sum \int_{t_1}^{t_2} \left[ \frac{-G}{2F} - \frac{-2Ft + 2 \tan \phi}{-Ft^2 + 2t \tan \phi + F} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{H + \frac{G \tan \phi}{F}}{2F \sqrt{\frac{\tan^2 \phi}{F^2} + 1}} \right. \\
 &\quad \left. \left\{ \frac{-1}{-t + \frac{\tan \phi}{F} + \sqrt{\frac{\tan^2 \phi}{F^2} + 1}} \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{t - \frac{\tan \phi}{F} + \sqrt{\frac{\tan^2 \phi}{F^2} + 1}} \right\} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{I}{4} \frac{4t^3 + 4t}{t^4 + 2t^2 + 1} + \frac{-I + K}{(t^2 + 1)^2} t \right. \\
 &\quad \left. + \frac{L - J}{(t^2 + 1)^2} + \frac{J}{t^2 + 1} \right] dt \dots\dots (A \cdot 8)
 \end{aligned}$$

ここで未定係数  $G \sim L$  は次式で与えられる、

$$\begin{aligned}
 L &= \{F(3E_3 - A_3 - C_3) + 2D_3 \tan \phi\} \\
 &\quad / 4(\tan^2 \phi + F^2) \\
 K &= \{2(C_3 - 2E_3) \tan \phi + F(3D_3 - B_3)\} \\
 &\quad / 4(\tan^2 \phi + F^2) \\
 J &= (C_3 - 2E_3) / F - 2F \tan \phi / F + 3L \\
 I &= D_3 / F - K - 2L \tan \phi / F \\
 H &= E_3 - F \cdot L \\
 G &= D_3 - F \cdot K - 2L \tan \phi
 \end{aligned}$$

積分を実行して、

$$\begin{aligned}
 MRF &= R^2 \sum \left[ -G \ln(-Ft^2 + 2t \tan \phi + F) \right. \\
 &\quad \left. - \frac{H + \frac{G \tan \phi}{F}}{\sqrt{\frac{\tan^2 \phi}{F^2} + 1}} \ln \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &\quad \left. -t + \frac{\tan \phi}{F} + \sqrt{\frac{\tan^2 \phi}{F^2} + 1} \right. \\
 &\quad \left. t - \frac{\tan \phi}{F} + \sqrt{\frac{\tan^2 \phi}{F^2} + 1} \right. \\
 &\quad \left. + F \ln(t^2 + 1) + F(J + L) \tan^{-1} t \right. \\
 &\quad \left. + \frac{(L - J)t + I - K}{t^2 + 1} F \right]_{t_1}^{t_2} \dots\dots (A \cdot 9)
 \end{aligned}$$

となる。

(A・9)式でも同じ事だが、式(A・5)を発散させないよ  
うに、

$$F > -\tan \phi \tan \alpha, \quad \alpha < 0$$

という制限を付けている。

c) 分割によるビンヨップ法

この場合には、計算機の都合上、成分に分けないで、

$$MR = \sum R \frac{FE}{F + D} \dots\dots (A \cdot 10)$$

とした。ただし

$$D = \tan \phi \cdot \tan \alpha$$

$$\begin{aligned}
 E &= \left[ Cx + \left\{ Ax + B - \gamma(y_0 - \sqrt{R^2 - (x - x_0)^2}) \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - U \cdot x \right\} \tan \phi \right]_{x_1}^{x_2} \sec \alpha
 \end{aligned}$$

この方法のときは、角度  $\alpha$ 、粘着係数  $C$ 、間ゲキ圧  $U$   
は分割片  $x$  座標の midpoint の値を用いた。

(3) 転倒モーメントの計算

転倒モーメントは、3方法とも同じ式で求められる。  
一分割片内の土層を構成する小辺の重量を  $W$  とし、  
震度の重力加速度比を  $G_k$  とし、又水平外力を  $T$  とすれば、  
転倒モーメント  $MA$  は、

$$MA = \sum \left\{ \sum_i W_i (\bar{X}_i + \bar{Y}_i \cdot G_k) \right\} + \sum_j T_j \cdot Y_j \quad (A \cdot 11)$$

$\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$  はそれぞれ水平方向、垂直方向のアーム

### A. 2. 安全率の収束基準

ビンヨップの式では安全率  $F$  を求めるのに、一般には  
未知数  $F$  を用いて計算しなければならない。

$$F = f(F)$$

この  $F$  が代数的に求まらないので、数値的にフィード  
バック法で求める。実際の計算では2等分法で  $10^{-4}$  の誤  
差範囲にあるように計算させた。但し  $f(F)$  が発散する  
付近で収束するときは  $10^{-3}$  とした。

### A. 3. インพุットデータ

(1) データの種類

- (a) 名称
- (b) 計算方法



ビショップ法とチェボタリオフ法の比較

- (c) 外力
  - (d) 杭
  - (e) 鉛直キレット
  - (f) 震度
  - (g) 上載荷重
  - (h) 基準線
  - (i) 堤体形状
  - (j) 円の中心
  - (k) 円弧の通過点
  - (l) 土質条件
  - (m) 水位線
- (2) データの制限条件
- a) 水平外力を1個又は2個
  - b) 鉛直キレット1個
  - c) 水平震度9層まで

- d) 上載荷重は堤体上に分布する形状で与える。19点までの点のつらなりで与えることができる。
  - e) 堤体形状を最大30点のつらなりで与える。
  - f) 中心点は81個まで
  - g) 地層は12点のつらなりを12個まで
  - h) 水位線は12点のつらなりまで
- A.4. その他

(1) 演算時間は 図-A.1 の断面例で、1つの円につき、

チェボタリオフ法	2 sec
積分によるビショップ法	8 "
分割による "	6 "

程度である。

(2) 断面例、コーディング例、印字形式を、図-A.1 図-A.2、図-A.3に掲げる。

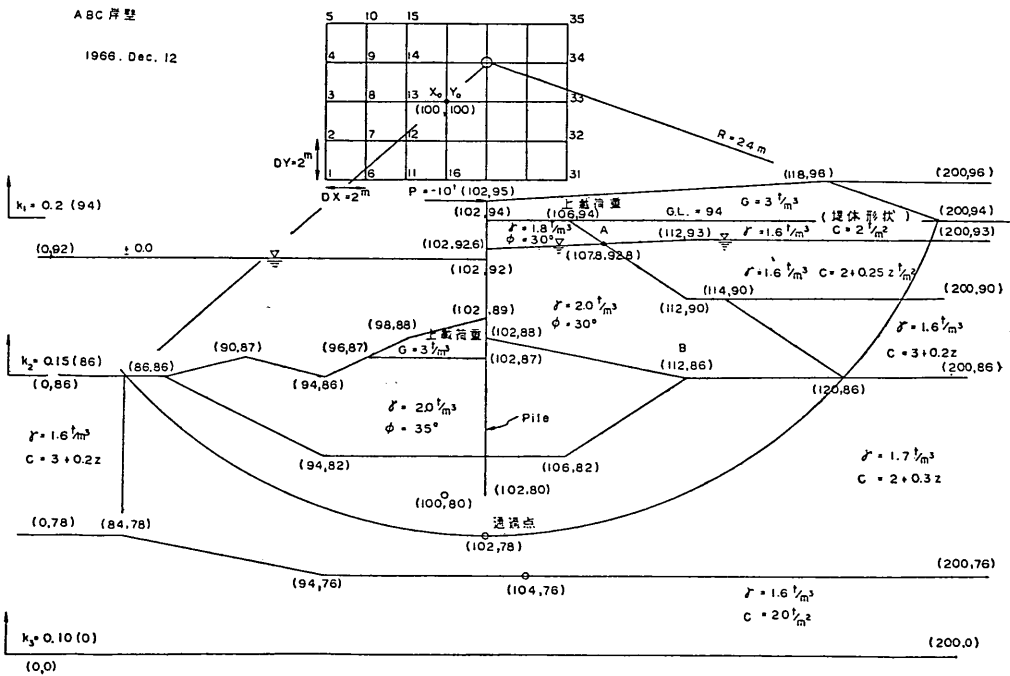


図-A-1 断面例

野村健司・早藤能伸・長友文昭

1	10	20	30	40	50	60	70	80
AW: GANPEN	19.6.6	DEC	19. KOKEN	KEI.SAN.SITU				
3	1.0	9.5						
4	1.0.2	9.4	1.0.2	8.0				
6	0.2	9.4	0.1.5	8.6	0.1			
7	9.6	8.7	9.8	8.8	1.0.2	8.9	1.0.2	9.5
8	1.1.8	9.6	2.0.0	9.6	3			
8	9.4							
9		8.6	8.6	8.6	9.0	8.7	9.4	8.6
9	9.6	8.7	1.0.2	8.7	1.0.2	9.2	1.0.2	9.4
	2.0.0	9.4						
	1.0.0	1.0.0	2	2	3	2		
	1.0.0	8.0	1.0.2	7.8	1.0.4	7.6		
S		9.2						
	1.0.2	9.2						
	1.0.2	9.2.6	1.8	0	0	3.0		
	1.0.7.8	9.2.8	1.6	2				
	1.1.2	9.3	1.6	2				
	2.0.0	9.3	1.6	2				
	1.0.6	9.4	1.6	2				
	1.0.7.8	9.2.8	1.6	2	0.2.5			

1	10	20	30	40	50	60	70	80
1.1.2	9.0	1.6	2	0.2.5				
2.0.0	9.0							
1.1.4	9.0	1.6	3	0.2				
1.2.0	8.6	1.6	3	0.2				
2.0.0	8.6							
1.0.2	8.8	2	0	0	3.0			
1.1.2	8.6	2	0	0	3.0			
1.2.0	8.6							
8.6	8.6	2	0	0	3.5			
9.4	8.2	2	0	0	3.5			
1.0.6	8.2	2	0	0	3.5			
1.1.2	8.6							
	<del>7.8</del>	1.6	3	0.2				
8.4	7.8	1.7	2	0.3				
9.4	7.6	1.7	2	0.3				
2.0.0	7.6							
		1.6	2.0					
2.0.0								

図-A-2 断面例のコーディング

ビンジョップ法とチェボタリオブ法の比較

タイトル		ENKOSUBERI NO KEISAN (TSCHEBOTARIOFF'S METHOD)										PAGE 20				
SHIOGAMA KO		NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
TSUKATEN		X	100.00	100.00	100.00											
		Y	92.60	88.60	84.60											
	通過点 NO	中心点 X0	中心点 Y0	半径 R	安全率 F	抵抗モー メント (MR)	転倒モー メント (MA)	摩擦力 による 抵抗モ メント MRG	上載荷 重による 摩擦 抵抗モ メント MRS	粘着力 による 抵抗モ メント MRC	土の 転倒 モー メント MAG	上載荷 重による 転倒 モー メント MAS	残留水 による 転倒 モー メント MAW	外力に よる 転倒 モー メント MAT	震度 による 転倒 モー メント MAK	
円弧発生 個数	→2	→P														
	→3	→P														

- 注意 (1) 安全率は小数第4位四捨五入により 9999.999 までの数値が打出される。  
 (2) 各モーメントは小数点以下切捨てにより、8,388,607 までの数値が打出される。  
 (3) 円弧発生個数は、1 個の場合は、スペース、2 個から 5 個まではその個数、その他の場合は、Z が打出される。  
 (4) MAG より右の項の値は正の場合は右まわりの、負の場合は左まわりの転倒モーメントを表わすものとする。  
 (5) モーメントの合計は絶対値である。  
 (6) 1 つの円によって 2~5 個円弧が発生する場合は、それらの円弧長最大なものについて計算しプリントする。  
 (7) メッシュ内の中心点の移動は左下から右上へ、例えば図-10 では中心点の番号順に行なわれ、結果のプリントアウトもこの順序で行なわれる。

図-A-3 OUTPUT FÖRMAT

付録：B 有効置換厚

十分な深さまでφ層で置換えがなされた場合の結果は本文表-3の最下段に示してある。これらの $F_s$ の値 $F_s$ ( $Z\phi=\infty$ )が2.0~3.7程度の有限の大きさであること、それらの臨界円が有限の深さ $D$ をもっていること、および本文の図-19の $F-Z\phi$ の関係から、ある有限の置換えによって十分深くまで置換えた場合と同じ $F_s$ を与える置換厚が存在することが考えられる。このときの置換え深さを $Z_c$ とすると $Z_c$ は本文図-19において $F$ の値が

$F_s(Z\phi=\infty)$ となる深さを推定することによって求められる。このとき、 $Z\phi=\infty$ の場合の臨界円が $D=4m$ である。本文図-19にはビショップ法で水位がある場合の $Z_c$ を点Cで示してある。

このとき $Z_c=14.9m$ である。

いま、 $Z\phi=16m$ 、および $Z\phi=8m$ としてそれぞれすべり円の深さと円の中心位置を変化させ、各すべり円の深さ(すべり円の最下部の深度)に対応した最小の $F_s$ をプロットした結果を 図-B.1 に示した。

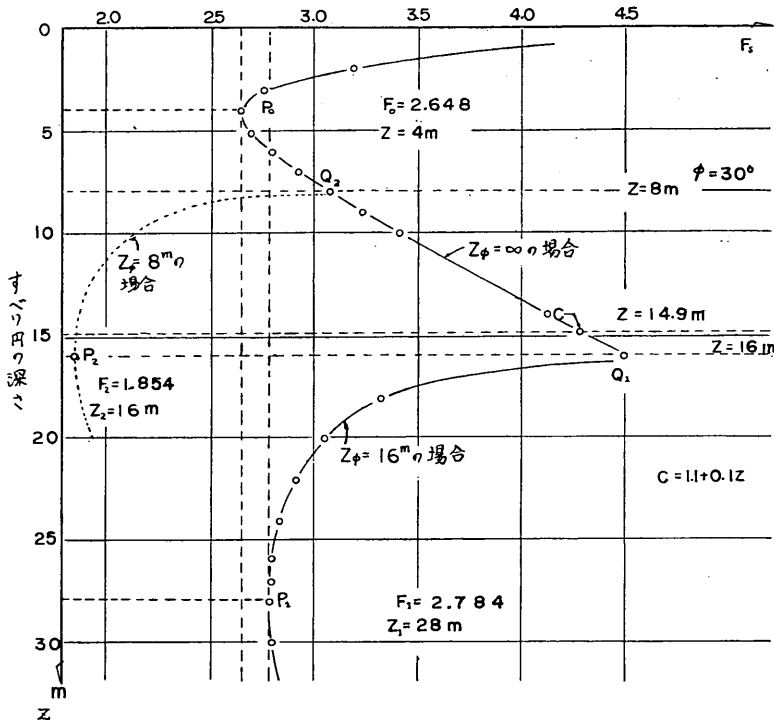


図-B-1  $Z_\phi=16m$ 、および  $Z_\phi=8m$  の場合の置換え深さ( $Z_\phi$ )に対する最小 $F_s$ の分布。(ビショップ法)

図-B.1の $P_0$ 点はφ層を十分強くまで与えて計算した場合の $F_{min}$ を表わす点であり、このとき円の深さは $Z=4m$ 、 $F_{min}=2.648$ となっている。

$Z_\phi=16m$ の場合は曲線 $P_0Q_2Q_1P_1$ で示され、点 $P_1$ ( $Z=28m$ )は一つの極小点 $F_s=2.784$ であるが $P_0$ における値よりは大きい。したがって、 $Z_\phi=4m$ の場合の安全率を採用する。

一方、 $Z_\phi=8m$ とした場合は曲線 $P_0Q_2P_2$ となる。点 $P_2$ ( $Z=16m$ )は極小点 $F=1.854$ であるが $P_0$ よりも小さい値であるからそのまま安全率となる。

以上のことから、この場合 $Z_\phi=Z_c=14.9m$ 以上の深い置換えは安全率の増加には、効果がないといえる。

このような深さ $Z_c$ を、限界有効置換え深さとする表-B.1のようになる。

ビシヨップ法とチェボタリオフ法の比較

表-B-1 有効置換え深さ

方 法	F	$z_c$	$z_{p0}$
チェボタリオフ法(水なし)	3.019	31.5m	4 m
チェボタリオフ法(水あり)	2.050	23.5	5
ビシヨップ法(水なし)	3.726(+23)	16.2	3
ビシヨップ法(水あり)	2.648(+29)	14.9	4

備考： $z_{p0}$  は全層砂の場合の臨界円の深さを表す。

( ) 内の数は  $F_T$  に対する  $F_B$  の増分を%で表したもの。