

港 灣 技 研 資 料

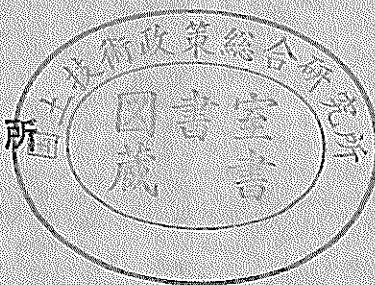
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 140 June 1972

偏心傾斜荷重を受ける二層系地盤上の帯状基礎の支持力

片 山 猛 雄
内 田 豊 彦

運輸省港湾技術研究所



偏心傾斜荷重を受ける二層系地盤上の 帯状基礎の支持力

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 二層系地盤上の基礎の支持力に対する従来の計算法	3
3. 摩擦円法を用いた二層系地盤の支持力の計算	4
3.1 計算上の仮定	4
3.2 支持方式	4
3.3 $W_i/\gamma_1 b^2$ および m'_i の算定	7
3.4 支持力係数の計算	22
4. 支持力係数の計算図表	22
4.1 計算図表	22
4.2 計算図表の使用法	45
5. 各パラメーターの支持力係数に与える影響	45
6. 在来の解との比較	47
7. 被災例および設計例による検討	49
8. 下層地盤が粘性土である場合への適用	57
9. あ と が き	57
参 考 文 献	57
付録1. 設計例および被災例における各パラメーターのひん度分布	58
付録2. 電子計算機によって支持力係数を求める場合のインプットデータ およびコーディングの方法	60

偏心傾斜荷重を受ける二層系地盤上の 帯状基礎の支持力

片 山 猛 雄*

内 田 豊 彦**

要 旨

一層系地盤上に置かれた基礎の支持力を求める計算法として提案されている立石の方法を、地表面に斜面を含む二層系地盤上に置かれた根入れを有する基礎の支持力の問題に拡張し、あわせて計算図表を作成した。

1. ま え が き

防波堤あるいはけい船岸などとして用いられる重力式構造物の基礎に作用する荷重は、一般に偏心し、かつ傾斜している。

これらの重力式構造物における基礎の支持力は、現行の設計法においては、偏心傾斜荷重を受ける支持力の問題として、立石の方法、マイヤホフ (Meyerhof) の方法、あるいはヤンブー (Janbu) の方法のいずれかを用いて計算することになっている¹⁾。また、混成防波堤などのようなマウンド上の基礎においては、立石の方法を斜面を持った地盤の場合に拡張した梅原の方法²⁾が用いられており、粘着力が深さとともに直線的に増加しているような粘性土地盤上の基礎については、中瀬・小林の方法³⁾が提案されている。これらの支持力計算法は、いずれも一様な地盤上の基礎についての解であるが、港湾構造物における重力式構造物は、地盤上に直接置かれていることはまれであり、支持力の増加、洗堀による基礎の破壊の防止、あるいは施工上の要請などによって地盤上に設けられた捨石基礎の上に置かれているのが普通である。そのため、偏心傾斜荷重を受ける基礎においては、二層系以上の多層系地盤として支持力を計算する必要があり、現在ではその計算法として港湾構造物設計基準の方法および三建法が用いられている。しかし、設計基準の方法は、簡便法としての性格が強く、実際の破壊現象をうまく説明できない。

また、三建法は、分割法による円形すべり計算を利用しているが、分割片は鉛直面によって分割されているため抵抗力の計算において、水平力の影響が考慮されていないこと、通常的支持力の安全率は耐荷力と荷重の比で表わされるが、三建法においては抵抗モーメントとすべりモーメントの比で表わされており、このため、一層系地盤に対する支持力の安全率をそのまま三建法に適用することには問題があること、さらには、一層系の計算でもっともよく使用されている立石法⁴⁾と計算上の仮定が異なるため、同一設計体系の中に組みにくいなどの難点がある。

筆者らは、一層系地盤上に置かれた基礎の支持力の計算にもっともよく使用されている立石の方法を、地表面に斜面を含む二層系地盤上に置かれた根入れを有する基礎の問題に拡張し、あわせて計算図表を作成した。

2. 二層系地盤上の基礎の支持力に対する従来の計算法

従来、二層系以上の多層系地盤上に置かれた基礎の支持力を求める方法として用いられて来た設計基準の方法および三建法の概要はつぎの通りである。

(1) 港湾構造物設計基準の方法⁵⁾

この方法は、現行の港湾構造物設計基準に示されている方法で、上層地盤すなわち捨石層上面に作用する荷重が、図-1に示すように捨石層内で荷重合力の方向から30°の方向に分散するものと考えて、捨石層下面における地盤反力分布を求め、その荷重分布幅に相当する幅の基礎が捨石層下面にあるものと仮定して、マイヤホフあるいは

* 第一港湾建設局 新潟調査設計事務所 所長
(設計基準部 前設計基準課長)

** 設計基準部 設計基準課

は立石の方法等を用いて支持力を計算する。この場合、仮想基礎面に作用する外力は捨石層上面に作用する荷重と仮想基礎面上の捨石層の重量の合力とし、安全率はこの合力を用いて計算される。下層地盤すなわち地盤および捨石層の内部摩擦角は、港湾構造物設計基準第5編第1章の解説⁶⁾により、一般に土圧計算に用いるものより5°大きい値が用いられている。

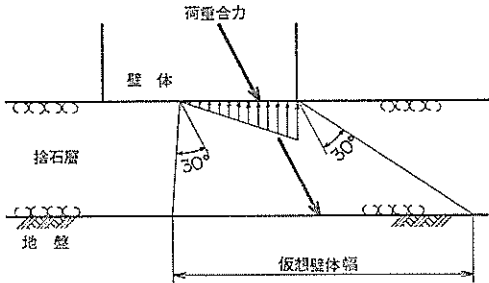


図-1 港湾構造物設計基準の方法

(2) 三建法

この方法は、図-2に示すように、始点を立石法と同様に考えた円形すべり面を仮定し、分割法によって円形すべり計算を行なうものである。この場合、壁体に作用する鉛直荷重は壁体前端とすべり面の始点の間に等分布に作用し、地盤内にも鉛直にすべり面まで伝達されると考える。水平力は壁体底面に作用させる。なお、円形すべり面の始点は上記の仮定を行なった場合に最小の安全率を与えることが確かめられている。地盤の内部摩擦角は、一般に通常の土圧計算に用いられる内部摩擦角より5°大きい値を用いている。安全率は、通常の円形すべり計算と同様にせん断抵抗力による抵抗モーメントと外力および土塊重量によるすべりモーメントの比であらわされる。

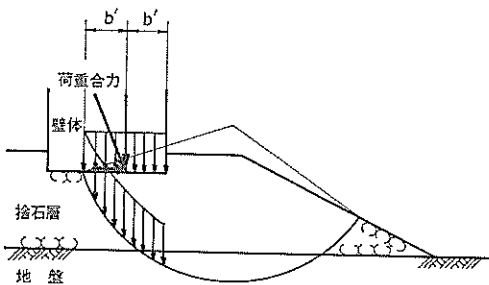


図-2 三建法におけるすべり面および地盤内荷重伝達の仮定

3. 摩擦円法を用いた二層系地盤の支持力の計算

3.1 計算上の仮定

計算上仮定した条件は、図-3を参照してつぎの通りである。

- (1) 砂は一様で等方性があり、粘着力はないものとする。
- (2) 基礎は無限長さの帯状のものとして、単位長さについて考える。
- (3) 上層と下層の境界は、のり先の位置にあるものとする。
- (4) すべり面は立石の方法を踏襲して円形とし、そのすべり面の始点は、荷重の着力点Dに対し、斜面側の基礎端Aの対称点Cとする。
- (5) すべり円の中心は、基礎底面より上にあるものとし、中心より上においては、鉛直きれつが発生するものとして、かつ、その面における土圧は考慮しない。
- (6) 帯状基礎に働く荷重は、斜面のある側に偏心し、かつ、鉛直より反時計方向に90°以下の傾きをもつ場合を対象とする。
- (7) 支持力式の計算には摩擦円法を用いる。

3.2 支持力式

図-3において、すべり面上の土塊をすべり面と土層境界面の交点を通る鉛直面によってすべり面が上層を通過している土塊と下層を通過している土塊の2つに分けて考える。以下、前者を上層土塊、後者を下層土塊とする。上層の内部摩擦角を ϕ_1 、下層の内部摩擦角を ϕ_2 とすると、上層に属する円弧 CC_1 と C_2C_3 に作用する反力の合力 F_1 は、半径 $R \sin \phi_1$ の摩擦円に接する方向に作用し、下層に属する円弧 C_1C_2 に作用する反力 F_2 は、半径 $R \sin \phi_2$ の摩擦円に接する方向に作用するとして支持力式を求める。ただし、 R はすべり円の半径である。なお、厳密には、反力の合力 F_1 および F_2 は $R \sin \phi_1$ および $R \sin \phi_2$ の摩擦円には接しないで、これよりやや大きい半径の円に接する。それゆえ、反力の合力が摩擦円に接するとして求める本計算法の支持力は、安全側の値を与えるものであり、近似的にこのような取扱いをしても問題はない。また、立石の方法においては、すべり面に作用する反力として1つの反力を考えているが、本計算法においては、図-3に示したように2つの反力 F_1 、 F_2 を考えているので立石法に比べてやや支持力係数を大きく(厳密解に近く)計算することとなる。若干の例

γ_i ; i 地盤の土の単位体積重量 (t/m³)
 q ; 極限支持力 (t/m²)
 N_i ; 各層における支持力係数
 N ; 支持力係数
 d ; 根入れ深さ (m)
 h ; 基礎底面から下層地盤の表面までの距離 (m)
 $b' = b - e$ (m)
 $r = R/b$
 $\varepsilon = e/b$
 $m'_i = m_i/R$
 $\delta = d/b$
 $\eta = h/b$
 $\gamma' = \gamma_i \gamma_1$

なお、添字 i が 1 の場合は上層における値を、2 の場合は下層における値を示す。

(1) 上層におけるつりあい

図-3において、上層におけるつりあいを考えるとつきのようなになる。

すべり円の中心 O に関するすべりモーメント M_{s1} は
 $M_{s1} = V_1(R \sin \theta - b') + \alpha V_1 R \cos \theta + W_1 m_1 \dots (1)$

$$V_1 = \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{m_1}{R} \right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_1 \right\} W_1}{\left(A_1 \frac{m_1}{R} \operatorname{cosec} \phi_1 - 1 \right) \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) \left(\frac{m_1}{R} \right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_1 - 2 A_1 \frac{m_1}{R} \operatorname{cosec} \phi_1 + A_1^2 - \alpha^2}} \dots (8)$$

ただし、複号はすべりに抵抗する摩擦力の上層土塊に関する合力 F_1 が抵抗側に作用する方、すなわち V_1 が大きくなる方を採用する。

(2) 下層におけるつりあい

$$V_2 = \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{m_2}{R} \right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_2 \right\} W_2}{\left(A_2 \frac{m_2}{R} \operatorname{cosec} \phi_2 - 1 \right) \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) \left(\frac{m_2}{R} \right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_2 - 2 A_2 \frac{m_2}{R} \operatorname{cosec} \phi_2 + A_2^2 - \alpha^2}} \dots (9)$$

ここに、

$$A_2 = \left(\sin \theta + \alpha \cos \theta - \frac{b'}{R} \right) \operatorname{cosec} \phi_2 \dots (10)$$

なお、複号は V_1 と同様に V_2 が大きくなる方を採用する。

(3) 極限支持力

極限支持力 q は、偏心傾斜荷重の鉛直成分を V 、 V の上層および下層における分力をそれぞれ V_1 、 V_2 とすれば、式(10)のように表わされる。

$$V = V_1 + V_2 \dots (11)$$

$$q = \frac{V}{2b} = \frac{V_1}{2b} + \frac{V_2}{2b} \dots (12)$$

また、右辺の各項について

すべり円の中心 O に関する抵抗モーメント M_{r1} は

$$M_{r1} = F_1 R \sin \phi_1 \dots (2)$$

力のつりあいから

$$F_1 = \sqrt{(V_1 + W_1)^2 + (\alpha V_1)^2} \dots (3)$$

極限状態で、 $M_{s1} = M_{r1}$ が成立つと考えると、式(1)、(2)、(3)より

$$V_1 \left(\sin \theta + \alpha \cos \theta - \frac{b'}{R} \right) + W_1 \frac{m_1}{R} = \sin \phi_1 \sqrt{(V_1 + W_1)^2 + (\alpha V_1)^2} \dots (4)$$

ここで、

$$A_1 = \left(\sin \theta + \alpha \cos \theta - \frac{b'}{R} \right) \operatorname{cosec} \phi_1 \dots (5)$$

とおくと

$$A_1 V_1 + W_1 \frac{m_1}{R} \operatorname{cosec} \phi_1 = \sqrt{(V_1 + W_1)^2 + (\alpha V_1)^2} \dots (6)$$

式(6)の両辺を 2 乗して整理すれば

$$\left\{ 1 - \left(\frac{m_1}{R} \right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_1 \right\} W_1^2 + 2 V_1 \left(1 - A_1 \frac{m_1}{R} \operatorname{cosec} \phi_1 \right) W_1 + (1 + \alpha^2 - A_1^2) V_1^2 = 0 \dots (7)$$

式(7)を V_1 について解くと

極限状態において、すべり円の中心 O に関するすべりモーメント M_{s2} と抵抗モーメント M_{r2} が等しいと考えて、(1)と同様に V_2 を求めると式(9)のようなになる。

$$\frac{V_i}{2b} = N_i \gamma_1 b \dots (13)$$

の関係が成立すると考えれば、

$$q = \frac{V}{2b} = N_1 \gamma_1 b + N_2 \gamma_1 b = \gamma_1 b (N_1 + N_2) \dots (14)$$

ここで

$$N = N_1 + N_2 \dots (15)$$

とおけば

$$q = \frac{V}{2b} = N \gamma_1 b \dots (16)$$

ここに、

$$N = N_1 + N_2$$

$$N_1 = \frac{W_1}{2\gamma_1 b^2} \times \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{m_1}{R}\right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_1 \right\}}{\left(A_1 \frac{m_1}{R} \operatorname{cosec} \phi_1 - 1 \right) \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) \left(\frac{m_1}{R}\right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_1 - 2A_1 \frac{m_1}{R} \operatorname{cosec} \phi_1 + A_1^2 - \alpha^2}} \dots\dots\dots(17)$$

$$N_2 = \frac{W_2}{2\gamma_1 b^2} \times \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{m_2}{R}\right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_2 \right\}}{\left(A_2 \frac{m_2}{R} \operatorname{cosec} \phi_2 - 1 \right) \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) \left(\frac{m_2}{R}\right)^2 \operatorname{cosec}^2 \phi_2 - 2A_2 \frac{m_2}{R} \operatorname{cosec} \phi_2 + A_2^2 - \alpha^2}} \dots\dots\dots(18)$$

式(17), (18)は、すべり円の半径 R および偏心量 e を基礎幅の $\frac{1}{2}$ すなわち b で割った無次元量 r および ε , ならびに i 土塊の重心からすべり円の中心までの距離 m_i を R すな

わち br で割った無次元量 m'_i で表わすとそれぞれ式(19), (20)のようにこれらの無次元量のみ関数として表わされる。

$$N_1 = \frac{W_1}{2\gamma_1 b^2} \times \frac{(1 - m'^2_1 \operatorname{cosec}^2 \phi_1)}{(A_1 m'_1 \operatorname{cosec} \phi_1 - 1) \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) m'^2_1 \operatorname{cosec}^2 \phi_1 - 2A_1 m'_1 \operatorname{cosec} \phi_1 + A_1^2 - \alpha^2}} \dots\dots\dots(19)$$

$$N_2 = \frac{W_2}{2\gamma_1 b^2} \times \frac{(1 - m'^2_2 \operatorname{cosec}^2 \phi_2)}{(A_2 m'_2 \operatorname{cosec} \phi_2 - 1) \pm \sqrt{(1 + \alpha^2) m'^2_2 \operatorname{cosec}^2 \phi_2 - 2A_2 m'_2 \operatorname{cosec} \phi_2 + A_2^2 - \alpha^2}} \dots\dots\dots(20)$$

ここに、

$$A_1 = \left\{ \sin \theta + \alpha \cos \theta - \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \right\} \operatorname{cosec} \phi_1 \dots\dots\dots(21)$$

$$A_2 = \left\{ \sin \theta + \alpha \cos \theta - \frac{(1 - \varepsilon)}{r} \right\} \operatorname{cosec} \phi_2 \dots\dots\dots(22)$$

ただし、複号は V_1, V_2 と同様に N_1, N_2 がそれぞれ大きくなる方を採用する。

式(16)が点 C を通る任意の円形すべり面による限界のつりあいにおける支持力の式である。したがって、式(16)より $V/2b$ を最小にする、すなわち N を最小にする円形すべり面における N の値が支持力係数であり、 $N\gamma_1 b$ の値が極限支持力である。

なお、中心が基礎底面以下にあるようなすべり円 ($\theta \geq \pi/2$) およびすべり面の終点が基礎底面内で終るすべり円は発生しないものと考え、計算から除外した。また、マウンドの天ばが基礎地盤以下にある場合 ($-\delta > \eta$) は、計算の対象からはずした。

3.3 $W_i/\gamma_1 b^2$ および m'_i の算定

i 土塊の重量 W_i および土塊の重心からすべり円の中心 O までの水平距離 m_i を、それぞれ $\gamma_1 b^2$ および $R = br$ で除した値 $W_i/\gamma_1 b^2$ および m'_i は、 $\varepsilon, \xi, \delta, \eta, \beta, \gamma', r, \theta$ の関数である。

なお、ここにおいてすべり面、傾斜面、基礎底面、下層地盤の表面およびマウンドの天ばは、座標の原点をすべり面の始点すなわち図-3の C 点に取り、 x 軸を右方

に、 y 軸を下方に取れば、それぞれつぎのように表わされる。

すべり面; $y = -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}$

傾斜面; $y = \frac{1}{\beta} x - \left(\frac{G}{\beta} + \delta \right)$

ただし、
 $G \leq x \leq G + \beta(\delta + \eta)$
 $-\delta \leq y \leq \eta$

基礎底面; $y = 0$

ただし、
 $-2\varepsilon \leq x \leq 2(1 - \varepsilon)$

下層地盤の表面; $y = \eta$

ただし、
 $G + \beta(\delta + \eta) \leq x$

マウンドの天ば; $y = -\delta$

ただし、
 $2(1 - \varepsilon) \leq x \leq G$

また、すべり面とマウンドの天ばとの交点 x_{P1} 、傾斜面との交点 x_{R1} およびすべり面と下層地盤の表面との交点 x_{C1}, x_{C2} は、それぞれつぎのように表わされる。

$$x_{P1} = r \sin \theta + \sqrt{r^2 \sin^2 \theta + 2\delta r \cos \theta - \delta^2}$$

$$x_{R1} = \frac{(G + \beta\delta - \beta r \cos \theta + \beta^2 r \sin \theta) + \sqrt{(G + \beta\delta - \beta r \cos \theta + \beta^2 r \sin \theta)^2 - (\beta^2 + 1)(G + \beta\delta)(G + \beta\delta - 2\beta r \cos \theta)}}{(\beta^2 + 1)}$$

$$x_{C1} = r \sin \theta - \sqrt{r^2 \sin^2 \theta - 2\eta r \cos \theta - \eta^2}$$

$$x_{C2} = r \sin \theta + \sqrt{r^2 \sin^2 \theta - 2\eta r \cos \theta - \eta^2}$$

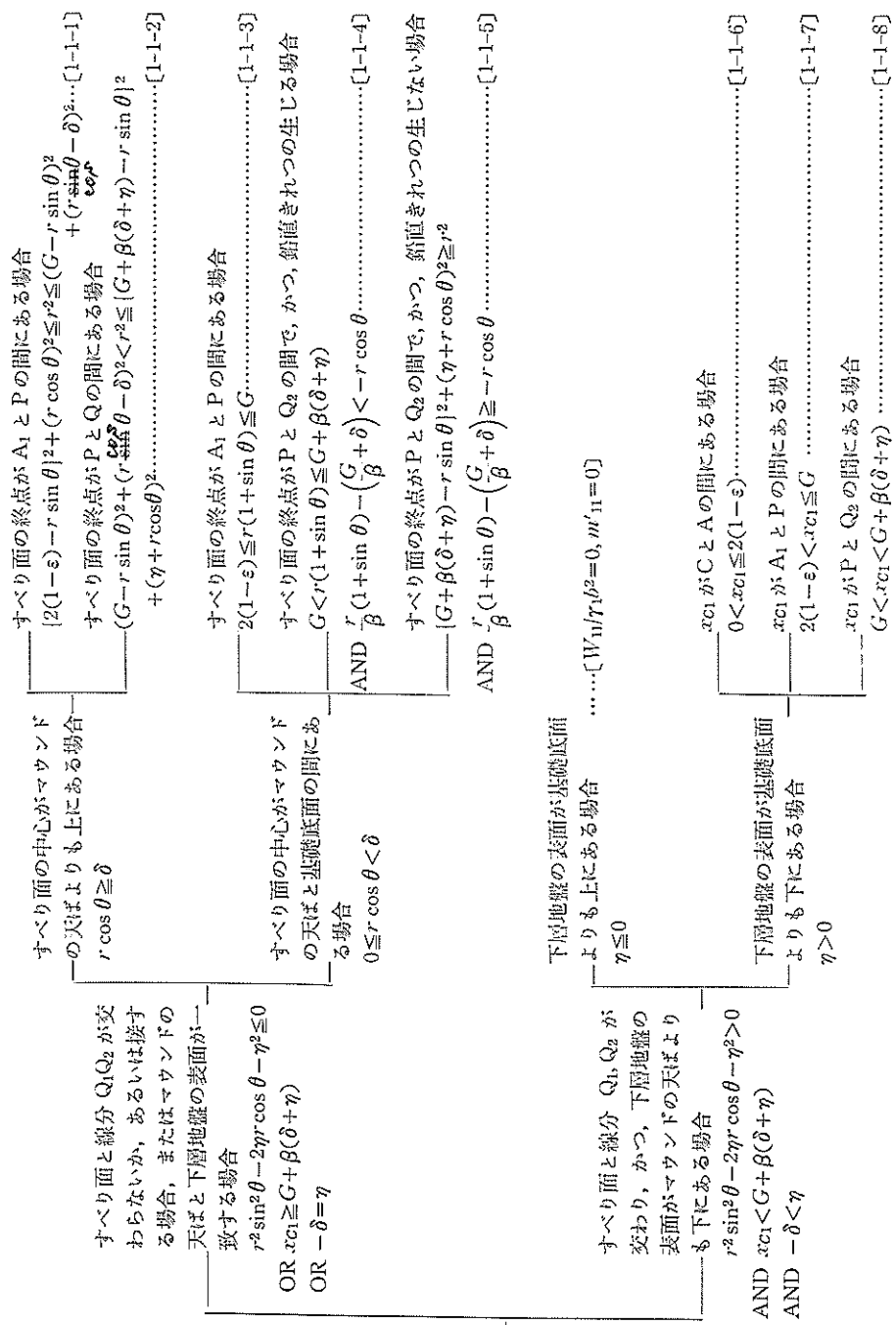


図-5 $W_{11}/r_1 b^2$ および m'_{11} を求める場合の条件式

$\frac{W_{11}}{r_1 b^2}$ m'_{11} を求める場合の条件式

$\frac{W_{12}}{r\beta^2}$, m'_{12} を求め る場 合の 条 件 式	すべり面と線分 Q_1 Q_2 が交わらないか、 あるいは接する場 合、またはマウンド の天はと下階地盤の… 表面が一致する場合 $r^2 \sin^2 \theta - 2\eta r \cos \theta$ $-\eta^2 \leq 0$ OR $x_{c2} \geq G + \beta(\delta + \eta)$ OR $-\delta = \eta$	$(W_{12}/r\beta^2)^2 = 0$, $m'_{12} = 0$ すべり面の 中心がマウ ントの天ば よりも上に ある場合 $r \cos \theta \geq \delta$	すべり面の終点が A_1 と P の間にある場合 $ 2(1-\varepsilon) - r \sin \theta ^2 + (r \cos \theta)^2 \leq r^2$ AND $2(1-\varepsilon) \leq r(1 + \sin \theta) \leq G$ [1-2-1] すべり面の終点が P と Q_2 の間にある場合 $(G - r \sin \theta)^2 + (-\delta + r \cos \theta)^2 < r^2 \leq [G + \beta(\delta + \eta) - r \sin \theta]^2 + (\eta + r \cos \theta)^2$ [1-2-2] すべり面の終点が A_1 と P の間にある場合 $ 2(1-\varepsilon) - r \sin \theta ^2 + (r \cos \theta)^2 \leq r^2$ AND $2(1-\varepsilon) \leq r(1 + \sin \theta) \leq G$ [1-2-3] すべり面の終点が P と Q_2 の間にある場合 $(G - r \sin \theta)^2 + (r \cos \theta - \delta)^2 \leq r^2 \leq [G + \beta(\delta + \eta) - r \sin \theta]^2 + (\eta + r \cos \theta)^2$ [1-2-4]
	すべり面と線分 Q_1 Q_2 が交わり、かつ、 下階地盤の表面がマ ウンドの天よりも 下にある場合 $r^2 \sin^2 \theta - 2\eta r \cos \theta$ $-\eta^2 > 0$ AND $x_{c2} < G + \beta(\delta + \eta)$ AND $-\delta < \eta$	x_{c2} が P と Q_2 の間 にある場合 $G < x_{c2} < G + \beta(\delta + \eta)$ x_{c2} が Q_2 より大き い場合 $x_{c2} \geq G + \beta(\delta + \eta)$ すべり面の中心が 下階地盤の表面よ りも下にある場合 $-r \cos \theta \geq \eta$	すべり面の終点が A_1 と P の間にある場合 $ 2(1-\varepsilon) - r \sin \theta ^2 + (r \cos \theta)^2 \leq r^2$ AND $2(1-\varepsilon) \leq r(1 + \sin \theta) \leq G$ [1-2-6] すべり面の終点が P と Q_2 の間で、かつ、鉛直きれつが生じる場合 $G < r(1 + \sin \theta) \leq G + \beta(\delta + \eta)$ AND $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) < -r \cos \theta$ [1-2-7] すべり面の終点が P と Q_2 の間で、かつ、鉛直きれつが生じない場合 $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) \geq -r \cos \theta$ AND $[G + \beta(\delta + \eta) - r \sin \theta]^2 + (\eta + r \cos \theta)^2 \geq r^2$ [1-2-8] すべり面の終点が A_1 と P の間にある場合 $ 2(1-\varepsilon) - r \sin \theta ^2 + (r \cos \theta)^2 \leq r^2$ AND $2(1-\varepsilon) \leq r(1 + \sin \theta) \leq G$ [1-2-9] すべり面の終点が P と Q_2 の間で、かつ、鉛直きれつが生じる場合 $G < r(1 + \sin \theta) \leq G + \beta(\delta + \eta)$ AND $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) < -r \cos \theta$ [1-2-10] すべり面の終点が P と Q_2 の間で、かつ、鉛直きれつが生じない場合 $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) \geq -r \cos \theta$ AND $[G + \beta(\delta + \eta) - r \sin \theta]^2 + (\eta + r \cos \theta)^2 \geq r^2$ [1-2-11] すべり面の終点が P と Q_2 の間にある場合 $G < r(1 + \sin \theta) \leq G + \beta(\delta + \eta)$ AND $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) < -r \cos \theta$ [1-2-12] すべり面の終点が P と Q_2 の間にある場合 $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) \geq -r \cos \theta$ AND $[G + \beta(\delta + \eta) - r \sin \theta]^2 + (\eta + r \cos \theta)^2 \geq r^2$ [1-2-13]
$0 \leq r \cos \theta < \delta$	x_{c2} が Q_2 より大き い場合 $x_{c2} \geq G + \beta(\delta + \eta)$	x_{c2} が C と A の間 にある場合 $0 < x_{c2} \leq 2(1-\varepsilon)$ x_{c2} が A_1 と P の間 にある場合 $2(1-\varepsilon) < x_{c2} \leq G$ すべり面の中心が 下階地盤の表面よ りも上にある場合 $-r \cos \theta < \eta$	すべり面の終点が A_1 と P の間にある場合 $ 2(1-\varepsilon) - r \sin \theta ^2 + (r \cos \theta)^2 \leq r^2$ AND $2(1-\varepsilon) \leq r(1 + \sin \theta) \leq G$ [1-2-14] すべり面の終点が P と Q_2 の間で、かつ、鉛直きれつが生じる場合 $G < r(1 + \sin \theta) \leq G + \beta(\delta + \eta)$ AND $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) < -r \cos \theta$ [1-2-15] すべり面の終点が P と Q_2 の間で、かつ、鉛直きれつが生じない場合 $\frac{r}{\beta}(1 + \sin \theta) - (\frac{G}{\beta} + \delta) \geq -r \cos \theta$ AND $[G + \beta(\delta + \eta) - r \sin \theta]^2 + (\eta + r \cos \theta)^2 \geq r^2$ [1-2-16]

図-6 $W_{12}/r\beta^2$ および m'_{12} を求める場合の条件式

(1) $W_1/\gamma_1 b^2$ および m'_1 の算定

$W_1/\gamma_1 b^2$ および m'_1 の算定にあたっては、上層土塊を 図-4 に示した土塊 1, 土塊 2 に分けて考える。ここ

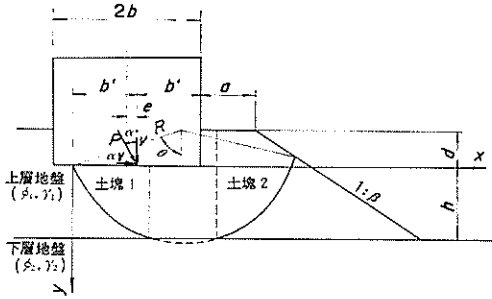


図-4 上層土塊

で、土塊 1, 土塊 2 の重量および土塊の重心からすべり円の中心 O までの水平距離をそれぞれ $\gamma_1 b^2$ および $R = br$ で除した値を $W_{11}/\gamma_1 b^2, W_{12}/\gamma_1 b^2$ ならびに m'_{11}, m'_{12} とすれば、式(23), (24)より、 $W_1/\gamma_1 b^2, m'_1$ が求まる。

$$\frac{W_1}{\gamma_1 b^2} = \frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} + \frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} \quad (23)$$

$$m'_1 = \frac{\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} m'_{11} + \frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} m'_{12}}{\frac{W_1}{\gamma_1 b^2}} \quad (24)$$

土塊 1 に属する任意のすべり面を、図-5 に示した条件により、図-7~図-9 に示した 8 種のすべり面に分類し、土塊 2 についても、図-6 に示した条件により、図-10~図-14 に示した 13 種のすべり面に分類して、それぞれのすべり面に応じて、 $W_{11}/\gamma_1 b^2, m'_{11}$ または $W_{12}/\gamma_1 b^2, m'_{12}$ を求める。

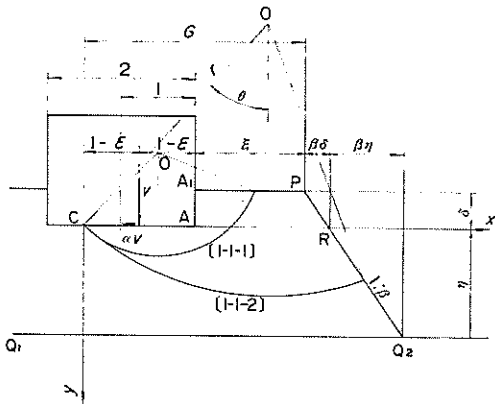


図-7 条件 [1-1-1] から条件 [1-1-2] に属するすべり面

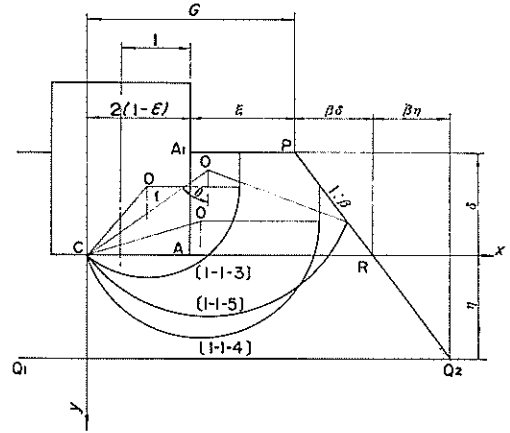


図-8 条件 [1-1-3] から条件 [1-1-5] に属するすべり面

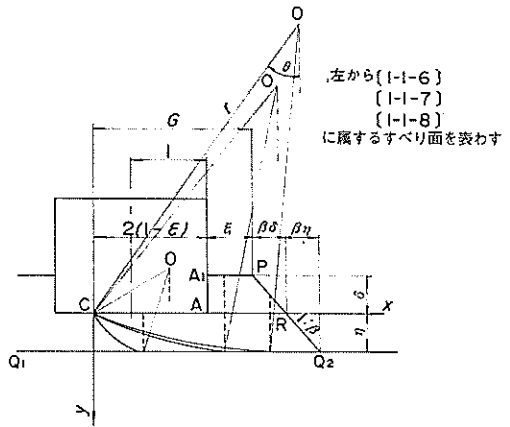


図-9 条件 [1-1-6] から条件 [1-1-8] に属するすべり面

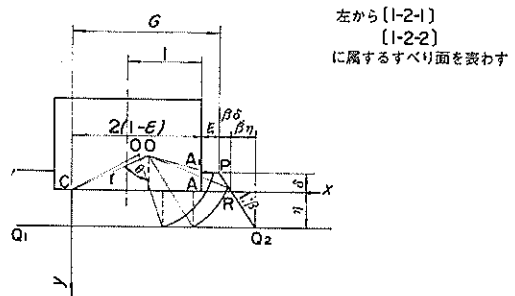


図-10 条件 [1-2-1] から条件 [1-2-2] に属するすべり面

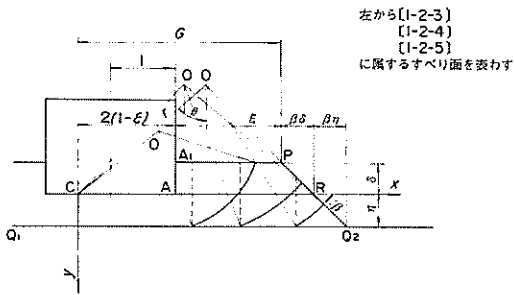


図-11 条件 [1-2-3] から条件[1-2-5]に属するすべり面

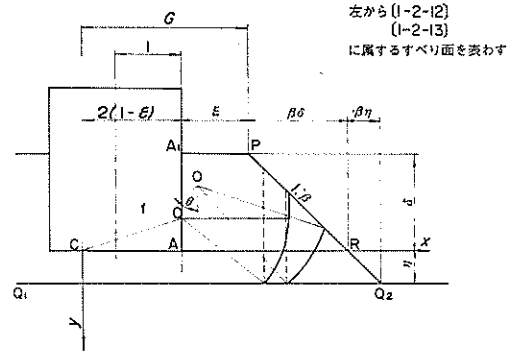


図-14 条件 [1-2-12] から条件[1-2-13]に属するすべり面

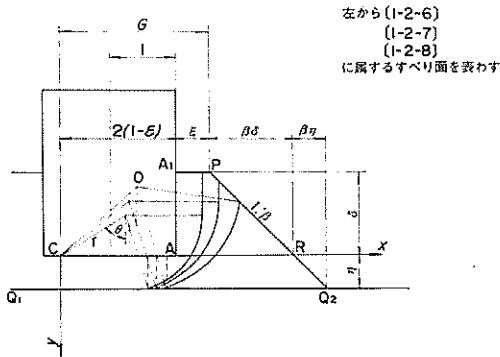


図-12 条件 [1-2-6] から条件[1-2-8]に属するすべり面

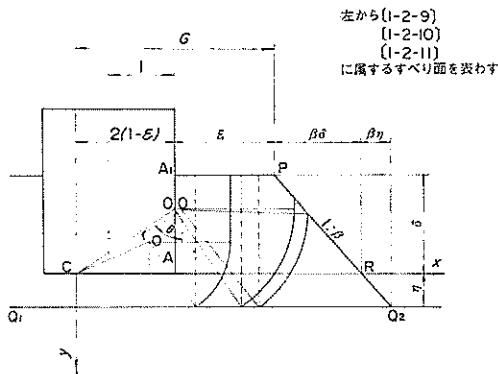


図-13 条件 [1-2-9] から条件[1-2-11]に属するすべり面

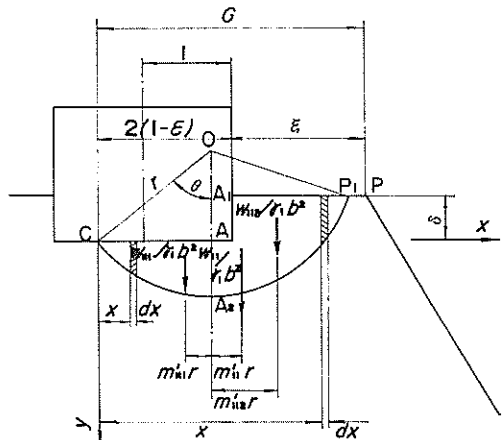


図-15 条件 [1-1-1] に属するすべり面の W_{11}/r_1b^2 および m'_{11} を求めるキースケッチ

(b) 条件 [1-1-1] に属するすべり面

図-15において,

円弧 CA_2P_1 は

$$y = -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}$$

線分 CA は

$$y = 0$$

線分 A_1P は

$$y = -\delta$$

と表わされる。

円弧 CA_2P_1 と線分 A_1P との交点 P_1 の x 座標 x_{P_1} は

$$x_{P_1} = r \sin \theta + \sqrt{r^2 \sin^2 \theta + 2\delta r \cos \theta - \delta^2} \dots\dots(8)$$

$W_{111}/\gamma_1 b^2$ は CA_2A の面積に等しいので、

$$\frac{W_{111}}{\gamma_1 b^2} = \int_0^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} dx = \int_0^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta dx + \int_0^{2(1-\varepsilon)} \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \quad \dots\dots\dots (26)$$

$W_{112}/\gamma_1 b^2$ は $A_2P_1A_1A$ の面積に等しいので、

$$\frac{W_{112}}{\gamma_1 b^2} = \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} - (-\delta)\} dx = \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} (\delta - r \cos \theta) dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \quad \dots\dots\dots (27)$$

したがって、土塊 1 の重量 W_{11} を $\gamma_1 b^2$ で除した値 $W_{11}/\gamma_1 b^2$ はつぎのようになる。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = \frac{W_{111}}{\gamma_1 b^2} + \frac{W_{112}}{\gamma_1 b^2} = \int_0^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta dx + \int_0^{xP_1} \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} (\delta - r \cos \theta) dx = A'_{11} + A'_{21} + A_{31} \quad \dots\dots\dots (28)$$

つぎにすべり面の中心から土塊 1 の重心までの距離 $m'_{11}r$ を求める。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} m'_{11}r = \frac{W_{111}}{\gamma_1 b^2} m'_{111}r + \frac{W_{112}}{\gamma_1 b^2} m'_{112}r \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{111}}{\gamma_1 b^2} m'_{111}r &= \int_0^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} (r \sin \theta - x) dx = r \sin \theta \int_0^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \\ &\quad + \int_0^{2(1-\varepsilon)} x r \cos \theta dx - \int_0^{2(1-\varepsilon)} x \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \quad \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{112}}{\gamma_1 b^2} m'_{112}r &= \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} - (-\delta)\} (r \sin \theta - x) dx \\ &= r \sin \theta \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} + \delta dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} x (r \cos \theta - \delta) dx - \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} x \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \\ &\quad \dots\dots\dots (31) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{111}}{\gamma_1 b^2} m'_{111}r + \frac{W_{112}}{\gamma_1 b^2} m'_{112}r &= r \sin \theta \left[\int_0^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} + \delta\} dx \right] \\ &\quad + \int_0^{xP_1} x r \cos \theta dx - \int_{2(1-\varepsilon)}^{xP_1} x \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx = r \sin \theta (A'_{11} + A'_{21} + A_{31}) + A'_{71} - A_{81} - A'_{41} \dots\dots\dots (32) \end{aligned}$$

式 (28), (29), (32) より

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{71} - A_{81} - A'_{41}}{r(A'_{11} + A'_{21} + A_{31})} \quad \dots\dots\dots (33)$$

(b) 条件 [1-1-2] に属するすべり面

条件 [1-1-1] と同様にして、 $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} を求めると、式 (30), (33) のようになる。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = A'_{11} + A'_{22} + A_{32} + A_{51} \quad \dots\dots\dots (34)$$

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{72} - A_{82} + A_{91} - A'_{42}}{r(A'_{11} + A'_{22} + A_{32} + A_{51})} \quad \dots\dots\dots (35)$$

(c) 条件 [1-1-3] に属するすべり面

条件 [1-1-1] と同様にして、 $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} を求めると、式 (30), (37) のようになる。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = A'_{11} + A'_{23} + A_{33} \quad \dots\dots\dots (36)$$

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{74} - A_{86} - A'_{43}}{r(A'_{11} + A'_{23} + A_{33})} \quad \dots\dots\dots (37)$$

(d) 条件 [1-1-4] に属するすべり面

条件 [1-1-1] と同様にして、 $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} を求めると、式 (30), (39) のようになる。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = A'_{11} + A'_{23} + A_{32} + A_{52} \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{74} - A_{86} + A_{94} - A'_{43}}{r(A'_{11} + A'_{23} + A_{32} + A_{52})} \quad \dots\dots\dots (39)$$

(e) 条件 [1-1-5] に属するすべり面

$W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} は、条件 [1-1-2] に属するすべり面の $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} と同じであり、それぞれ式 (30), (33) で表わされる。

(f) 条件 [1-1-6] に属するすべり面

図-16 において

円弧 CC_1 は

$$y = -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}$$

線分 CA は

$$y = 0$$

線分 Q_1Q_2 は

$$y = \eta$$

と表わされる。

円弧 CC_1 と線分 Q_1Q_2 との交点 C_1 の x 座標 x_{c1} は

$$x_{c1} = r \sin \theta - \sqrt{r^2 \sin^2 \theta - 2\eta r \cos \theta - \eta^2} \quad \dots\dots\dots (40)$$

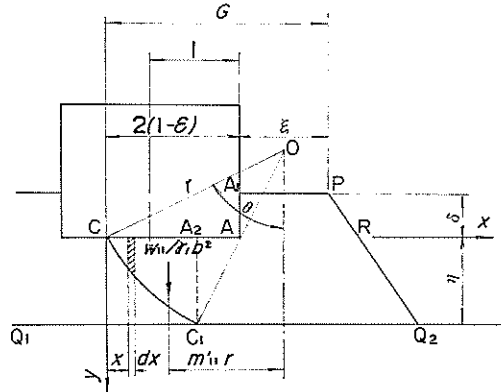


図-16 条件 [1-1-6] に属するすべり面の $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} を求めるキースケッチ

$W_{11}/\gamma_1 b^2$ は CC_1A の面積に等しいので、

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = \int_0^{xc_1} [-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}] dx = \int_0^{xc_1} -r \cos \theta dx + \int_0^{xc_1} \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} dx = A'_{12} + A'_{24} \dots (41)$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} m'_{11} &= \int_0^{xc_1} [-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}] (r \sin \theta - x) dx = r \sin \theta \int_0^{xc_1} [-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}] dx \\ &+ \int_0^{xc_1} x r \cos \theta dx - \int_0^{xc_1} x \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} dx = r \sin \theta (A'_{12} + A'_{24}) + A'_{73} - A'_{44} \dots (42) \end{aligned}$$

式 (41), (42) より

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{73} - A'_{44}}{r(A'_{12} + A'_{24})} \dots (43)$$

(g) 条件 [1-1-7] に属するすべり面

条件 [1-1-6] と同様にして、 $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} を求めると、式(44), (45)のようになる。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = A'_{11} + A'_{24} + A_{34} \dots (44)$$

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{73} - A_{82} - A'_{44}}{r(A'_{11} + A'_{24} + A_{34})} \dots (45)$$

(h) 条件 [1-1-8] に属するすべり面

条件 [1-1-6] と同様にして、 $W_{11}/\gamma_1 b^2$ および m'_{11} を求めると、式(46), (47)のようになる。

$$\frac{W_{11}}{\gamma_1 b^2} = A'_{11} + A'_{24} + A_{32} + A_{53} \dots (46)$$

$$m'_{11} = \sin \theta + \frac{A'_{73} - A_{82} + A_{92} - A'_{44}}{r(A'_{11} + A'_{24} + A_{32} + A_{53})} \dots (47)$$

(i) 条件 [1-2-1] に属するすべり面

図-17 において

円弧 C_2P_1 は

$$y = -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}$$

線分 CA は

$$y = 0$$

線分 A_1P は

$$y = -\delta$$

線分 Q_1Q_2 は

$$y = \eta$$

と表わされる。

円弧 C_2P_1 と線分 Q_1Q_2 との交点 C_2 の x 座標 xc_2 は

$$xc_2 = r \sin \theta + \sqrt{r^2 \sin^2 \theta - 2\eta r \cos \theta - \eta^2} \dots (48)$$

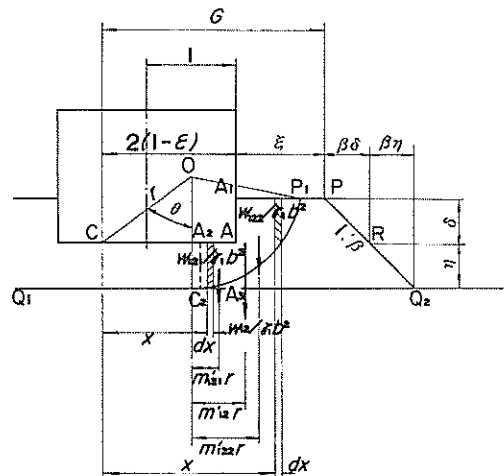


図-17 条件[1-2-1] に属するすべり面の $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めるキースケッチ

$W_{121}/\gamma_1 b^2$ は $C_2 A_3 A A_2$ の面積に等しいので、

$$\frac{W_{121}}{\gamma_1 b^2} = \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} dx = \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta dx + \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \dots\dots\dots (49)$$

$W_{122}/\gamma_1 b^2$ は $A_3 P_1 A_1 A$ の面積に等しいので、

$$\frac{W_{122}}{\gamma_1 b^2} = \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} - (-\delta)\} dx = \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} (\delta - r \cos \theta) dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \dots\dots\dots (50)$$

したがって、土塊 2 の重量 W_{12} を $\gamma_1 b^2$ で除した値 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ はつぎのようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = \frac{W_{121}}{\gamma_1 b^2} + \frac{W_{122}}{\gamma_1 b^2} = \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta dx + \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} (\delta - r \cos \theta) dx = A_{11} + A_{21} + A_{31} \dots\dots\dots (51)$$

つきにすべり面の重心から土塊 2 の重心までの距離 $m'_{12} r$ を求める。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} m'_{12} r = \frac{W_{121}}{\gamma_1 b^2} m'_{121} r + \frac{W_{122}}{\gamma_1 b^2} m'_{122} r \dots\dots\dots (52)$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{121}}{\gamma_1 b^2} m'_{121} r &= \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} (r \sin \theta - x) dx = r \sin \theta \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} dx \\ &\quad + \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} x r \cos \theta dx - \int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} x \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \dots\dots\dots (53) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{122}}{\gamma_1 b^2} m'_{122} r &= \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} - (-\delta)\} (r \sin \theta - x) dx \\ &= r \sin \theta \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} + \delta\} dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} x (r \cos \theta - \delta) dx - \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} x \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \dots\dots\dots (54) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{121}}{\gamma_1 b^2} m'_{121} r + \frac{W_{122}}{\gamma_1 b^2} m'_{122} r &= r \sin \theta \left[\int_{x_{C2}}^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2}\} dx \right. \\ &\quad \left. + \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} + \delta\} dx \right] + \int_{x_{C2}}^{x_{P1}} x r \cos \theta dx - \int_{2(1-\varepsilon)}^{x_{P1}} \delta x dx - \int_{x_{C2}}^{x_{P1}} x \sqrt{r^2 - (x-r \sin \theta)^2} dx \\ &= r \sin \theta (A_{11} + A_{21} + A_{31}) + A_{71} - A_{81} - A_{42} \dots\dots\dots (55) \end{aligned}$$

式 (51), (52), (55) より

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{71} - A_{81} - A_{42}}{r(A_{11} + A_{21} + A_{31})}$$

(j) 条件 [1-2-2] に属するすべり面

条件 [1-2-1] と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式 (56), (57) のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{11} + A_{22} + A_{32} + A_{51} \dots\dots\dots (56)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{72} - A_{83} + A_{91} - A_{41}}{r(A_{11} + A_{22} + A_{32} + A_{51})} \dots\dots\dots (57)$$

(k) 条件 [1-2-3] に属するすべり面

条件 [1-2-1] と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式 (58), (59) のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{21} + A_{35} \dots\dots\dots (58)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{71} - A_{84} - A_{42}}{r(A_{21} + A_{35})} \dots\dots\dots (59)$$

(l) 条件 [1-2-4] に属するすべり面

条件 [1-2-1] と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式 (60), (61) のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{22} + A_{36} + A_{51} \dots\dots\dots (60)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{72} - A_{85} + A_{91} - A_{41}}{r(A_{22} + A_{36} + A_{51})} \dots\dots\dots (61)$$

(m) 条件 [1-2-5] に属するすべり面

条件 [1-2-1] と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式 (62), (63) のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{22} + A_{54} \dots\dots\dots (62)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{72} - A_{85} + A_{93} - A_{41}}{r(A_{22} + A_{54})} \dots\dots\dots (63)$$

(n) 条件 [1-2-6] に属するすべり面

条件 [1-2-1] と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式 (64), (65) のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{11} + A_{23} + A_{33} \dots\dots\dots (64)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{73} - A_{86} - A_{43}}{r(A_{11} + A_{23} + A_{33})} \dots\dots\dots (65)$$

(o) 条件 [1-2-7] に属するすべり面

条件 [1-2-1] と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を

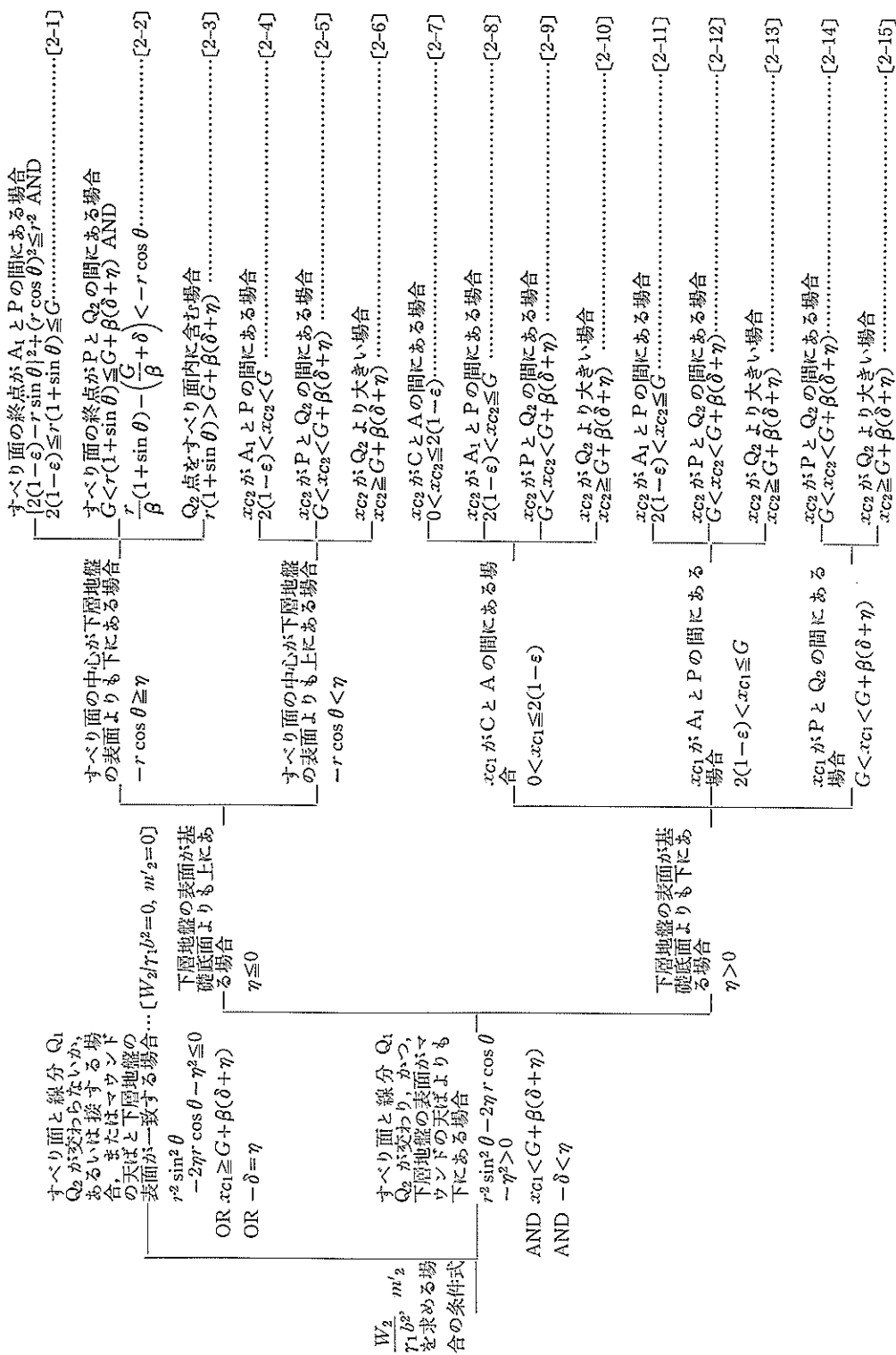


図-18 $W_2 / r_1 b^2$ および m'_2 を求める場合の条件式

求めると、式(66),(67)のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{11} + A_{23} + A_{32} + A_{52} \dots\dots\dots(66)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{73} - A_{85} + A_{94} - A_{43}}{r(A_{11} + A_{23} + A_{32} + A_{52})} \dots\dots\dots(67)$$

(p) 条件[1-2-8]に属するすべり面

条件[1-2-1]と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式(66),(67)のようになる。

(q) 条件[1-2-9]に属するすべり面

条件[1-2-1]と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式(68),(69)のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{23} + A_{37} \dots\dots\dots(68)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{73} - A_{87} - A_{43}}{r(A_{23} + A_{37})} \dots\dots\dots(69)$$

(r) 条件[1-2-10]に属するすべり面

条件[1-2-1]と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式(70),(71)のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{23} + A_{35} + A_{52} \dots\dots\dots(70)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{73} - A_{87} + A_{94} - A_{43}}{r(A_{23} + A_{35} + A_{52})} \dots\dots\dots(71)$$

(s) 条件[1-2-11]に属するすべり面

条件[1-2-1]と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式(66),(67)のようになる。

(t) 条件[1-2-12]に属するすべり面

条件[1-2-1]と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式(72),(73)のようになる。

$$\frac{W_{12}}{\gamma_1 b^2} = A_{23} + A_{55} \dots\dots\dots(72)$$

$$m'_{12} = \sin \theta + \frac{A_{73} - A_{87} + A_{95} - A_{43}}{r(A_{23} + A_{55})} \dots\dots\dots(73)$$

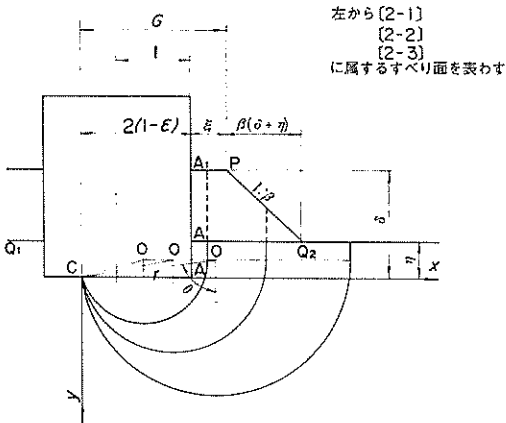


図-19 条件[2-1]から条件[2-3]に属するすべり面

(u) 条件[1-2-13]に属するすべり面

条件[1-2-1]と同様にして、 $W_{12}/\gamma_1 b^2$ および m'_{12} を求めると、式(62),(63)のようになる。

(2) $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 の算定

下層における任意のすべり面を、図-18 に示した条件により、図-19~図-23に示した15種のすべり面に分類して、それぞれのすべり面について、 $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求める。

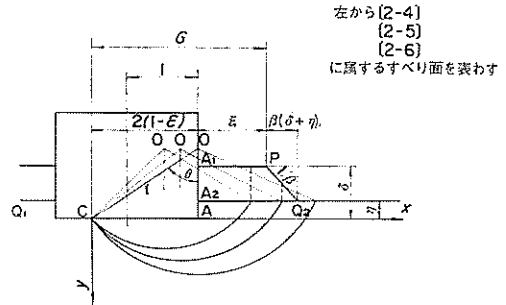


図-20 条件[2-4]から条件[2-6]に属するすべり面

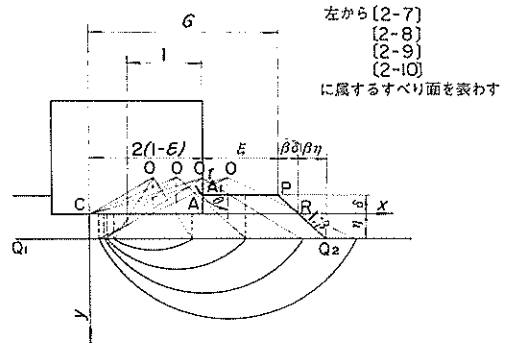


図-21 条件[2-7]から条件[2-10]に属するすべり面

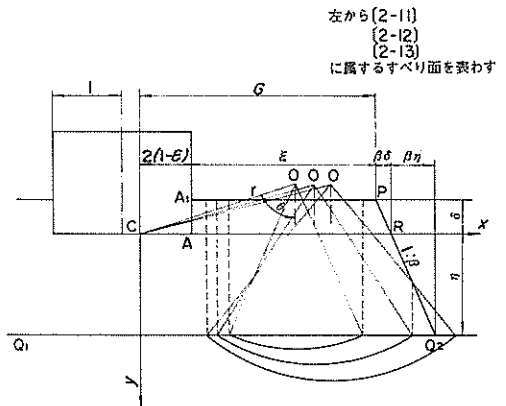


図-22 条件[2-11]から条件[2-13]に属するすべり面

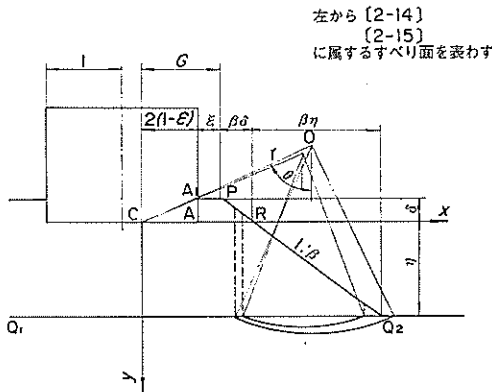


図-23 条件[2-14]から条件[2-15]に属するすべり面

(a) 条件 [2-1] に属するすべり面

図-24 において、

円弧 CA_3P_3 は

$$y = -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}$$

線分 CA は $y=0$

線分 A_2Q_2 は $y=\eta$

線分 A_1P は $y=-\delta$

と表わされる。

$W_{21}/\gamma_1 b^2$ は $\gamma' \times CA_3A$ の面積に等しいので、

$$\frac{W_{21}}{\gamma_1 b^2} = \gamma' \int_0^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}\} dx = \gamma' \left[\int_0^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta dx + \int_0^{2(1-\varepsilon)} \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} dx \right] \dots (74)$$

$W_{22}/\gamma_1 b^2$ は $\gamma' \times A_3P_3P_2A_2A$ の面積に等しいので、

$$\frac{W_{22}}{\gamma_1 b^2} = \gamma' \int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} - \eta\} dx = \gamma' \left[\int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} (-\eta - r \cos \theta) dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} dx \right] \dots (75)$$

$W_{23}/\gamma_1 b^2$ は $A_2P_2P_1A_1$ の面積に等しいので、

$$\frac{W_{23}}{\gamma_1 b^2} = \int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} \{\eta - (-\delta)\} dx \dots (76)$$

したがって、下層土塊の重量 W_2 を $\gamma_1 b^2$ で除した値 $W_2/\gamma_1 b^2$ はつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \frac{W_2}{\gamma_1 b^2} &= \frac{W_{21}}{\gamma_1 b^2} + \frac{W_{22}}{\gamma_1 b^2} + \frac{W_{23}}{\gamma_1 b^2} = \gamma' \left[\int_0^{2(1-\varepsilon)} -r \cos \theta dx + \int_0^{r(1+\sin \theta)} \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} dx + \int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} (-\eta - r \cos \theta) dx \right] + \int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} (\eta + \delta) dx \\ &= \gamma' (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) + A_{101} \dots (77) \end{aligned}$$

つぎにすべり面の中心から下層土塊の重心までの距離 $m'_2 r$ を求める。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} m'_2 r = \frac{W_{21}}{\gamma_1 b^2} m'_{21} r + \frac{W_{22}}{\gamma_1 b^2} m'_{22} r + \frac{W_{23}}{\gamma_1 b^2} m'_{23} r \dots (78)$$

$$\begin{aligned} \frac{W_{21}}{\gamma_1 b^2} m'_{21} r &= \gamma' \int_0^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}\} (r \sin \theta - x) dx \\ &= \gamma' \left[r \sin \theta \int_0^{2(1-\varepsilon)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}\} dx + \int_0^{2(1-\varepsilon)} x r \cos \theta dx - \int_0^{2(1-\varepsilon)} x \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} dx \right] \dots (79) \end{aligned}$$

$$\frac{W_{22}}{\gamma_1 b^2} m'_{22} r = \gamma' \int_{2(1-\varepsilon)}^{r(1+\sin \theta)} \{-r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} - \eta\} (r \sin \theta - x) dx$$

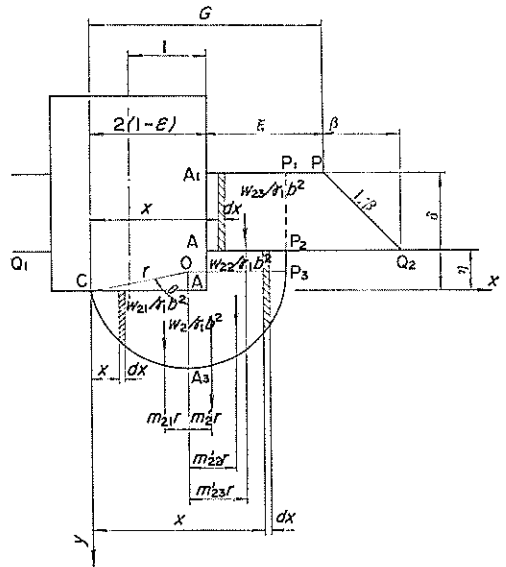


図-24 条件 [2-1] に属するすべり面の $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めるキースケッチ

$$= \gamma' \left[r \sin \theta \int_0^{r(1+\sin \theta)} \left\{ -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} - \eta \right\} dx \right. \\ \left. + \int_0^{r(1+\sin \theta)} (r \cos \theta + \eta) x dx - \int_0^{r(1+\sin \theta)} \frac{x \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}}{2(1-\varepsilon)} dx \right] \dots\dots\dots (80)$$

$$\frac{W_{23}}{\gamma_1 b^2} m'_{23} r = \int_0^{r(1+\sin \theta)} \left\{ \eta - (\eta + \delta) \right\} (r \sin \theta - x) dx = r \sin \theta \int_0^{r(1+\sin \theta)} (\eta + \delta) dx - \int_0^{r(1+\sin \theta)} x (\eta + \delta) dx \dots\dots\dots (81)$$

$$\frac{W_{21}}{\gamma_1 b^2} m'_{21} r + \frac{W_{22}}{\gamma_1 b^2} m'_{22} r + \frac{W_{23}}{\gamma_1 b^2} m'_{23} r = \gamma' r \sin \theta \left[\int_0^{2(1-\varepsilon)} \left\{ -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} \right\} dx \right. \\ \left. + \int_0^{r(1+\sin \theta)} \left\{ -r \cos \theta + \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2} - \eta \right\} dx \right] + \gamma' \left[\int_0^{r(1+\sin \theta)} x r \cos \theta dx + \int_0^{r(1+\sin \theta)} \frac{\eta x}{2(1-\varepsilon)} dx - \int_0^{r(1+\sin \theta)} \frac{x \sqrt{r^2 - (x - r \sin \theta)^2}}{2(1-\varepsilon)} dx \right] \\ + r \sin \theta \left[\int_0^{r(1+\sin \theta)} (\eta + \delta) dx - \int_0^{r(1+\sin \theta)} x (\eta + \delta) dx \right] = \gamma' r \sin \theta (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) \\ + \gamma' (A'_{74} + A_{111} - A'_{43}) + r \sin \theta \times A_{101} - A_{121} \dots\dots\dots (82)$$

式(77), (78), (82)より

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A'_{74} + A_{111} - A'_{43}) - A_{121}}{r \{ \gamma' (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) + A_{101} \}} \dots (83)$$

(b) 条件 [2-2] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(84), (85) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) + A_{102} + A_{131} \dots\dots\dots (84)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A'_{74} + A_{111} - A'_{43}) - A_{122} + A_{141}}{r \{ \gamma' (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) + A_{102} + A_{131} \}} \dots\dots\dots (85)$$

(c) 条件 [2-3] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(86), (87) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) + A_{102} + A_{132} \dots\dots\dots (86)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A'_{74} + A_{111} - A'_{43}) - A_{122} + A_{142}}{r \{ \gamma' (A'_{11} + A'_{23} + A_{61}) + A_{102} + A_{132} \}} \dots\dots\dots (87)$$

(d) 条件 [2-4] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(88), (89) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A'_{11} + A'_{25} + A_{62}) + A_{103} \dots\dots\dots (88)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A'_{75} + A_{112} - A'_{45}) - A_{123}}{r \{ \gamma' (A'_{11} + A'_{25} + A_{62}) + A_{103} \}} \dots (89)$$

(e) 条件 [2-5] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(90), (91) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A'_{11} + A'_{25} + A_{62}) + A_{102} + A_{133} \dots\dots\dots (90)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A'_{75} + A_{112} - A'_{45}) - A_{122} + A_{143}}{r \{ \gamma' (A'_{11} + A'_{25} + A_{62}) + A_{102} + A_{133} \}} \dots\dots\dots (91)$$

(f) 条件 [2-6] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(92), (93) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A'_{11} + A'_{25} + A_{62}) + A_{102} + A_{132} \dots\dots\dots (92)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A'_{75} + A_{112} - A'_{45}) - A_{122} + A_{142}}{r \{ \gamma' (A'_{11} + A'_{25} + A_{62}) + A_{102} + A_{132} \}} \dots\dots\dots (93)$$

(g) 条件 [2-7] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(94), (95) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A_{24} + A_{63}) + A_{151} \dots\dots\dots (94)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{113}}{r \{ \gamma' (A_{24} + A_{63}) + A_{151} \}} \dots\dots\dots (95)$$

(h) 条件 [2-8] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(96), (97) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A_{24} + A_{63}) + A_{103} + A_{152} \dots\dots\dots (96)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{114} - A_{123}}{r \{ \gamma' (A_{24} + A_{63}) + A_{103} + A_{152} \}} \dots\dots\dots (97)$$

(i) 条件 [2-9] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(98), (99) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma' (A_{24} + A_{63}) + A_{102} + A_{133} + A_{152} \dots\dots\dots (98)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma' (A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{114} - A_{122} + A_{143}}{r \{ \gamma' (A_{24} + A_{63}) + A_{102} + A_{133} + A_{152} \}} \dots\dots\dots (99)$$

(j) 条件 [2-10] に属するすべり面

条件 [2-1] と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(100), (101) のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{102} + A_{132} + A_{152} \dots (100)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma'(A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{114} - A_{122} + A_{142}}{r[\gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{102} + A_{132} + A_{152}]} \dots (101)$$

(k) 条件 [2-11] に属するすべり面

条件[2-1]と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(102), (103)のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{104} \dots (102)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma'(A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{124}}{r[\gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{104}]} \dots (103)$$

(l) 条件 [2-12] に属するすべり面

条件 [2-1]と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(104), (105)のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{105} + A_{133} \dots (104)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma'(A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{125} + A_{143}}{r[\gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{105} + A_{133}]} \dots (105)$$

(m) 条件 [2-13] に属するすべり面

条件[2-1]と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求め

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= r \cos \theta \{x_{c2} - 2(1 - \varepsilon)\} \\ A'_{11} &= -2(1 - \varepsilon)r \cos \theta \\ A'_{12} &= -x_{c1}r \cos \theta \end{aligned} \right\} \dots (112-1)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{21} &= \frac{r^2}{2} \left\{ \left(\frac{x_{p1}}{r} - \sin \theta \right) \sqrt{1 - \left(\frac{x_{p1}}{r} - \sin \theta \right)^2} + \left(\sin \theta - \frac{x_{c2}}{r} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{x_{c2}}{r} - \sin \theta \right)^2} \right. \\ &\quad \left. - \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{x_{p1}}{r} \right) + \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{x_{c2}}{r} \right) \right\} \end{aligned} \right\} \dots (112-2)$$

A_{22} は, A_{21} の式において, x_{p1} を x_{R1} と置換えればよい。
 A_{23} は, A_{21} の式において, x_{p1} を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。
 A_{24} は, A_{21} の式において, x_{p1} を x_{c2} , x_{c2} を x_{c1} と置換えればよい。

$$A'_{21} = \frac{r^2}{2} \left\{ \frac{x_{p1}}{r} - \sin \theta \sqrt{1 - \left(\frac{x_{p1}}{r} - \sin \theta \right)^2} - \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{x_{p1}}{r} \right) + \frac{\sin 2\theta}{2} + \theta \right\}$$

A'_{22} は, A'_{21} の式において, x_{p1} を x_{R1} と置換えればよい。
 A'_{23} は, A'_{21} の式において, x_{p1} を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。
 A'_{24} は, A'_{21} の式において, x_{p1} を x_{c1} と置換えればよい。
 A'_{25} は, A'_{21} の式において, x_{p1} を x_{c2} と置換えればよい。

$$\left. \begin{aligned} A_{31} &= (\delta - r \cos \theta) \{x_{p1} - 2(1 - \varepsilon)\} \\ A_{32} &= (\delta - r \cos \theta) \xi \\ A_{33} &= (\delta - r \cos \theta) \{r(1 + \sin \theta) - 2(1 - \varepsilon)\} \\ A_{34} &= (\delta - r \cos \theta) \{x_{c1} - 2(1 - \varepsilon)\} \\ A_{35} &= (\delta - r \cos \theta) (x_{p1} - x_{c2}) \\ A_{36} &= (\delta - r \cos \theta) (G - x_{c2}) \\ A_{37} &= (\delta - r \cos \theta) \{r(1 + \sin \theta) - x_{c2}\} \end{aligned} \right\} \dots (112-3)$$

ると, 式(106), (107)のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{105} + A_{132} \dots (106)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma'(A_{74} + A_{113} - A_{44}) - A_{125} + A_{142}}{r[\gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{105} + A_{132}]} \dots (107)$$

(n) 条件 [2-14] に属するすべり面

条件[2-1]と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(108), (109)のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{134} \dots (108)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma'(A_{74} + A_{113} - A_{44}) + A_{144}}{r[\gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{134}]} \dots (109)$$

(o) 条件 [2-15] に属するすべり面

条件[2-1]と同様にして, $W_2/\gamma_1 b^2$ および m'_2 を求めると, 式(110), (111)のようになる。

$$\frac{W_2}{\gamma_1 b^2} = \gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{135} \dots (110)$$

$$m'_2 = \sin \theta + \frac{\gamma'(A_{74} + A_{113} - A_{44}) + A_{145}}{r[\gamma'(A_{24} + A_{63}) + A_{135}]} \dots (111)$$

なお, 式(28)~式(111)の中に使用されている A_i および A'_j は, 式(112)から求められる。

$$\begin{aligned}
A_{41} = & \frac{r^3}{6} \left[2 \left\{ 1 - \left(\frac{xc_2}{r} - \sin \theta \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} - 2 \left\{ 1 - \left(\frac{x_{R1}}{r} - \sin \theta \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} \right. \\
& + 3 \sin \theta \left(\sin \theta - \frac{xc_2}{r} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{xc_2}{r} - \sin \theta \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\
& - 3 \sin \theta \left(\sin \theta - \frac{x_{R1}}{r} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{x_{R1}}{r} - \sin \theta \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\
& \left. + 3 \sin \theta \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{xc_2}{r} \right) - 3 \sin \theta \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{x_{R1}}{r} \right) \right]
\end{aligned}$$

A_{42} は, A_{41} の式において, x_{R1} を x_{P1} と置換えればよい。
 A_{43} は, A_{41} の式において, x_{R1} を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。
 A_{44} は, A_{41} の式において, x_{R1} を xc_2 , xc_2 を xc_1 と置換えればよい。

$$\begin{aligned}
A'_{41} = & \frac{r^3}{6} \left[-2 \left\{ 1 - \left(\frac{x_{P1}}{r} - \sin \theta \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}} - 3 \sin \theta \left(\sin \theta - \frac{x_{P1}}{r} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{x_{P1}}{r} - \sin \theta \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right. \\
& \left. - 3 \sin \theta \cdot \sin^{-1} \left(\sin \theta - \frac{x_{P1}}{r} \right) - \cos^3 \theta + 3(\cos \theta + \theta \sin \theta) \right]
\end{aligned}$$

A'_{42} は, A'_{41} の式において, x_{P1} を x_{R1} と置換えればよい。
 A'_{43} は, A'_{41} の式において, x_{P1} を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。
 A'_{44} は, A'_{41} の式において, x_{P1} を xc_1 と置換えればよい。
 A'_{45} は, A'_{41} の式において, x_{P1} を xc_2 と置換えればよい。

$$\begin{aligned}
A_{51} = & (G - x_{R1}) \left(\frac{x_{R1} - G}{2\beta} + r \cos \theta - \delta \right) \\
A_{52} = & \{ G - r(1 + \sin \theta) \} \left\{ \frac{r(1 + \sin \theta) - G}{2\beta} + r \cos \theta - \delta \right\} \\
A_{53} = & (G - x_{C1}) \left(\frac{x_{C1} - G}{2\beta} + r \cos \theta - \delta \right) \\
A_{54} = & \frac{(xc_2^2 - x_{R1}^2)}{2\beta} + \left(\frac{G}{\beta} + \delta - r \cos \theta \right) (x_{R1} - xc_2)
\end{aligned}$$

A_{55} は, A_{54} の式において, x_{R1} を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。

$$\begin{aligned}
A_{61} = & (\eta + r \cos \theta) \{ 2(1 - \varepsilon) - r(1 + \sin \theta) \} \\
A_{62} = & (\eta + r \cos \theta) \{ 2(1 - \varepsilon) - xc_2 \} \\
A_{63} = & (\eta + r \cos \theta) (xc_1 - xc_2)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A_{71} = & \frac{r \cos \theta}{2} (x_{P1}^2 - xc_2^2) \\
A_{72} = & \frac{r \cos \theta}{2} (x_{R1}^2 - xc_2^2) \\
A_{73} = & \frac{r \cos \theta}{2} \{ r^2(1 + \sin \theta)^2 - xc_2^2 \} \\
A_{74} = & \frac{r \cos \theta}{2} (xc_2^2 - xc_1^2) \\
A'_{71} = & \frac{x_{P1}^2}{2} r \cos \theta \\
A'_{72} = & \frac{x_{R1}^2}{2} r \cos \theta
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
A'_{73} &= \frac{xc_1^2}{2} r \cos \theta \\
A'_{74} &= \frac{r^3}{2} (1 + \sin \theta)^2 \cos \theta \\
A'_{75} &= \frac{xc_2^2}{2} r \cos \theta \\
A_{81} &= \frac{\delta}{2} [x_{P1}^2 - 4(1 - \varepsilon)^2] \\
A_{82} &= \frac{\delta}{2} [xc_1^2 - 4(1 - \varepsilon)^2] \\
A_{83} &= \frac{\delta}{2} [x_{R1}^2 - 4(1 - \varepsilon)^2] \\
A_{84} &= \frac{\delta}{2} (x_{P1}^2 - xc_2^2) \\
A_{85} &= \frac{\delta}{2} (x_{R1}^2 - xc_2^2) \\
A_{86} &= \frac{\delta}{2} \{r^2(1 + \sin \theta)^2 - 4(1 - \varepsilon)^2\} \\
A_{87} &= \frac{\delta}{2} \{r^2(1 + \sin \theta)^2 - xc_2^2\}
\end{aligned}
\tag{112-8}$$

$$\begin{aligned}
A_{91} &= \frac{1}{6\beta} (2x_{R1}^3 - 3Gx_{R1}^2 + G^3) \\
A_{92} &= \frac{1}{6\beta} (2xc_1^3 - 3Gxc_1^2 + G^3) \\
A_{93} &= \frac{1}{6\beta} [2(x_{R1}^3 - xc_2^3) + 3G(xc_2^2 - x_{R1}^2)] \\
A_{94} &= \frac{1}{6\beta} [2r^3(1 + \sin \theta)^3 - 3Gr^2(1 + \sin \theta)^2 + G^3]
\end{aligned}
\tag{112-9}$$

A_{95} は、 A_{93} の式において、 x_{R1} を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。

$$\begin{aligned}
A_{101} &= (\eta + \delta) \{r(1 + \sin \theta) - 2(1 - \varepsilon)\} \\
A_{102} &= (\eta + \delta) \xi \\
A_{103} &= (\eta + \delta) [xc_2 - 2(1 - \varepsilon)] \\
A_{104} &= (\eta + \delta)(xc_2 - xc_1) \\
A_{105} &= (\eta + \delta)(G - xc_1)
\end{aligned}
\tag{112-10}$$

$$\begin{aligned}
A_{111} &= \frac{\eta}{2} \{r^2(1 + \sin \theta)^2 - 4(1 - \varepsilon)^2\} \\
A_{112} &= \frac{\eta}{2} [xc_2^2 - 4(1 - \varepsilon)^2] \\
A_{113} &= \frac{\eta}{2} (xc_2^2 - xc_1^2)
\end{aligned}
\tag{112-11}$$

$$\begin{aligned}
A_{114} &= \frac{\eta}{2} [4(1 - \varepsilon)^2 - xc_1] \\
A_{121} &= \frac{(\eta + \delta)}{2} \{r^2(1 + \sin \theta)^2 - 4(1 - \varepsilon)^2\} \\
A_{122} &= \frac{(\eta + \delta)}{2} [G^2 - 4(1 - \varepsilon)^2] \\
A_{123} &= \frac{(\eta + \delta)}{2} [xc_2^2 - 4(1 - \varepsilon)^2]
\end{aligned}
\tag{112-12}$$

$$A_{124} = \frac{(\eta + \delta)}{2}(xc_2^2 - xc_1^2)$$

$$A_{125} = \frac{(\eta + \delta)}{2}(G^2 - xc_1^2)$$

A_{131} は, A_{133} の式において, xc_2 を $r(1 + \sin \theta)$ と置換えればよい。

A_{132} は, A_{133} の式において, xc_2 を $G + \beta(\delta + \eta)$ と置換えればよい。

$$A_{133} = (G - xc_2) \left(\frac{xc_2 - G}{2\beta} - \eta - \delta \right)$$

$$A_{134} = \frac{1}{2\beta}(xc_1^2 - xc_2^2) + \left(\eta + \frac{G}{\beta} + \delta \right)(xc_2 - xc_1)$$

A_{135} は, A_{134} の式において, xc_2 を $G + \beta(\delta + \eta)$ と置換えればよい。

A_{141} は, A_{144} の式において, xc_2 を $r(1 + \sin \theta)$, xc_1 を G と置換えればよい。

A_{142} は, A_{144} の式において, xc_2 を $G + \beta(\delta + \eta)$, xc_1 を G と置換えればよい。

A_{143} は, A_{144} の式において, xc_1 を G と置換えればよい。

$$A_{144} = \frac{1}{3\beta}(xc_2^3 - xc_1^3) + \frac{1}{2} \left(\eta + \frac{G}{\beta} + \delta \right)(xc_1^2 - xc_2^2)$$

A_{145} は, A_{144} の式において, xc_2 を $G + \beta(\delta + \eta)$ と置換えればよい。

$$A_{151} = \eta(xc_2 - xc_1)$$

$$A_{152} = \eta \{ 2(1 - \varepsilon) - xc_1 \}$$

.....(112-13)

.....(112-14)

.....(112-15)

3.4 支持力係数の計算

$\xi, \delta, \eta, \beta, \varepsilon, \alpha, \phi_1, \phi_2, \gamma'$ が与えられたとき, 一般に $\partial N / \partial r = 0, \partial N / \partial \theta = 0$ の関係から N の最小値を求めるのが普通であるが, 今回の計算においては, これらの式を解析的に解くことは不可能であるので, 試行法により N の最小値を求めた。

なお, ここで用いた試行法はつぎの手順によった。

(1) r を 2 から 20 の範囲で 1 きざみに変化させ, かつ θ を 10° から 90° の範囲で 5° きざみに変化させて得られる r と θ のすべての組合せに対して N を求める。

(2) (1) によって求められた N のうち, まわりのすべての値よりも小さい値を持つ N (複数個あることもある) を求め, この N を与える r, θ を始点として単一変数変化法⁷⁾ によって N の最小値を求める。

(3) (1) によって求められた N のうち, まわりのすべての値よりも小さい値を持つ N が複数個ある場合には, (2) をその数だけ繰返して得られる複数個の N の最小値のうち, もっとも小さい値をあらたに N の最小値とした。

(4) 上記の単一変数変化法によって求められた N の最小値が真の最小値とならない場合があるので, この場合には, 最大傾斜⁸⁾ の方向に r, θ を変化させて, さらに N の最小値を求め, この値を支持力係数 N とした。

4. 支持力係数の計算図表

4.1 計算図表

根入れのない水平二層系地盤の支持力係数 N' の値を図-25~図-29に示した。また, 使用されるひん度の高い内部摩擦角の組合せ $\phi_1 = 45^\circ, \phi_2 = 35^\circ$ および $\phi_1 = 50^\circ, \phi_2 = 40^\circ$ の場合については, $\gamma', \beta, \xi, \delta, \eta, \alpha$ をパラメーターとして, ε に対する N の値を図-30~図-45に示した。なお, 各パラメーターとしては, 付録1 設計例における各パラメーターのひん度分布を参考にしてつぎの値を用いた。ここにおいて, β は 1.5 として計算してあるが, β が 2 の場合にこの表を用いても安全側の値が得られ, その誤差は最大 2 割である。

$$\gamma': 1$$

$$\beta: 1.5$$

$$\xi: 0.8, 1.2, \infty$$

$$\delta: 0, 0.1, 0.2$$

$$\eta: 0.4, 0.6, 0.8$$

$$\alpha: 0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$$

内部摩擦角が $\phi_1 = 45^\circ, \phi_2 = 35^\circ$ および $\phi_1 = 50^\circ, \phi_2 = 40^\circ$ 以外の場合については, 計算図表は根入れのない水平二層系地盤の場合のみが準備されているが, 図-25~図-29の下に示した近似式⁹⁾ を用いれば, 斜面を

含む地盤上に根入れを有する基礎の支持力も計算できる。なお、この近似式を用いた場合には、つぎに示した変数の範囲内で、近似値に対して、危険側の誤差の最大は、25%、安全側の誤差の最大は45%である。

$r' : 1$

$\beta : 1.5, 2$

$\phi_1 : 45^\circ, 50^\circ$

$\phi_2 : 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$

$\xi : 0.8 \sim 8$

$\delta : 0 \sim 0.2$

$\eta : 0.4 \sim 0.8$

$\alpha : 0 \sim 0.6$

$\varepsilon : 0 \sim 0.6$

この近似式を求めるに当って種種検討した結果、近似式の数をかなりふやして精度をあげたとしても20%程度の誤差は、避けられないことがわかった。したがって、危険側で最大25%の誤差を生じるが、比較的近似式の数が少なくすむ本近似式を用いることにした。

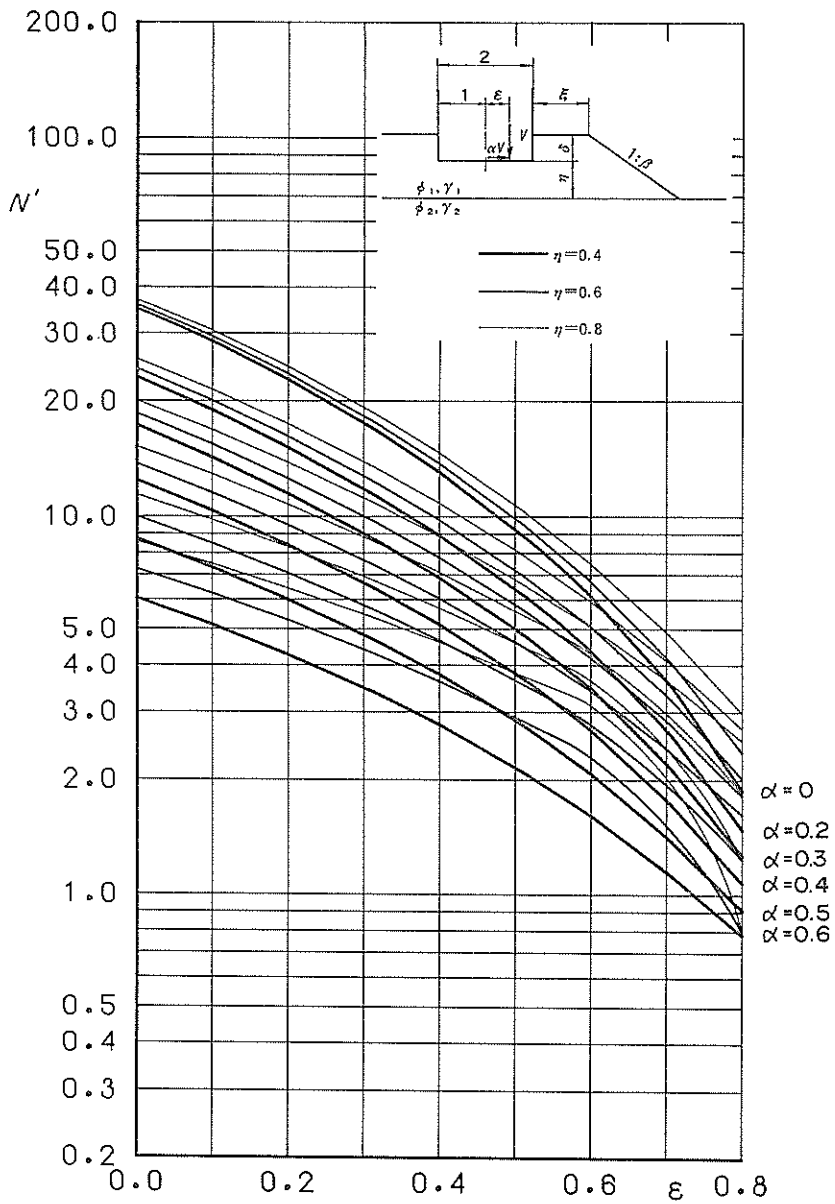
この程度の誤差でよとした理由の一つには、地盤の内部摩擦角の推定の誤差が大きく、しかも、その変動が支持力係数に与える影響が表-1に示すように大きいことがある。

すなわち実際の計算においては、 $\phi=37.5^\circ$ は 35° あるいは 40° 、 $\phi=42.5^\circ$ は 40° あるいは 45° として N を計

表-1

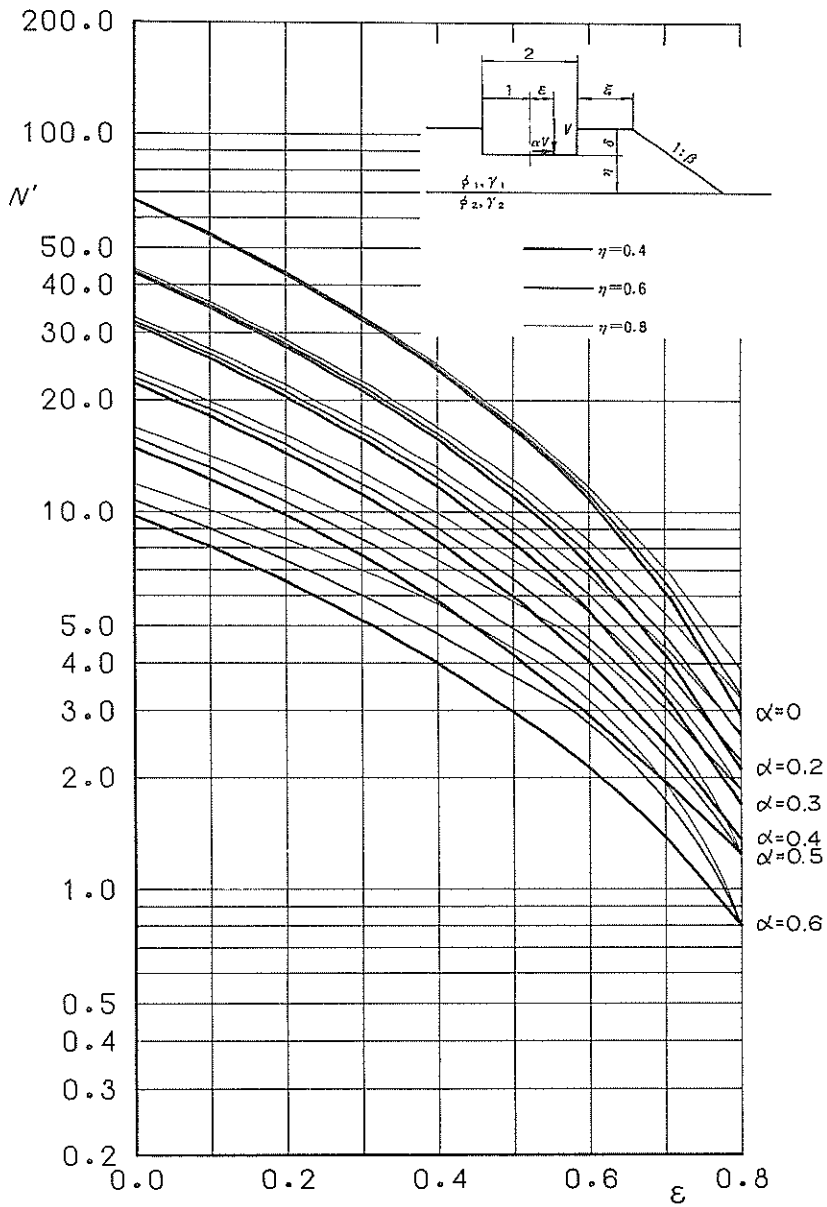
α	ε	ϕ	N	誤差
0	0	35°	6.76	-0.396
0	0	37.5	9.44	0.289
0	0	40	13.28	-0.422
0	0	42.5	18.89	0.305
0	0	45	27.19	-0.600
0.6	0.6	35	0.11	0.353
0.6	0.6	37.5	0.18	-0.537
0.6	0.6	40	0.27	0.347
0.6	0.6	42.5	0.42	
0.6	0.6	45	0.64	

算することが普通であり、このようにして計算した場合の計算値に対する誤差は、表-1からあきらかなように危険側の最大で約35%、安全側の最大で約60%の誤差が生じるものと思われる。したがって、今回の近似式による支持力係数の推定の精度は、推定の誤差をカバーするに足る適当な安全率を用いれば、実用上問題がないと判断した。



$\xi \rightarrow \infty, \delta \rightarrow 0$ の $N = N'(1+x)$ $\beta = 1.5$ の場合 $x = -0.357 - 0.143\alpha - 0.0269\epsilon - 0.355\eta + 0.0860\epsilon + 0.706\delta$
 場合の近似式 $\beta = 2.0$ の場合 $x = -0.360 - 0.130\alpha + 0.0154\epsilon - 0.327\eta + 0.0814\epsilon + 0.767\delta$

図-25 ($\phi_1 = 45^\circ, \phi_2 = 35^\circ, \xi = \infty, \delta = 0, \gamma' = \gamma_2/\gamma_1 = 1$)

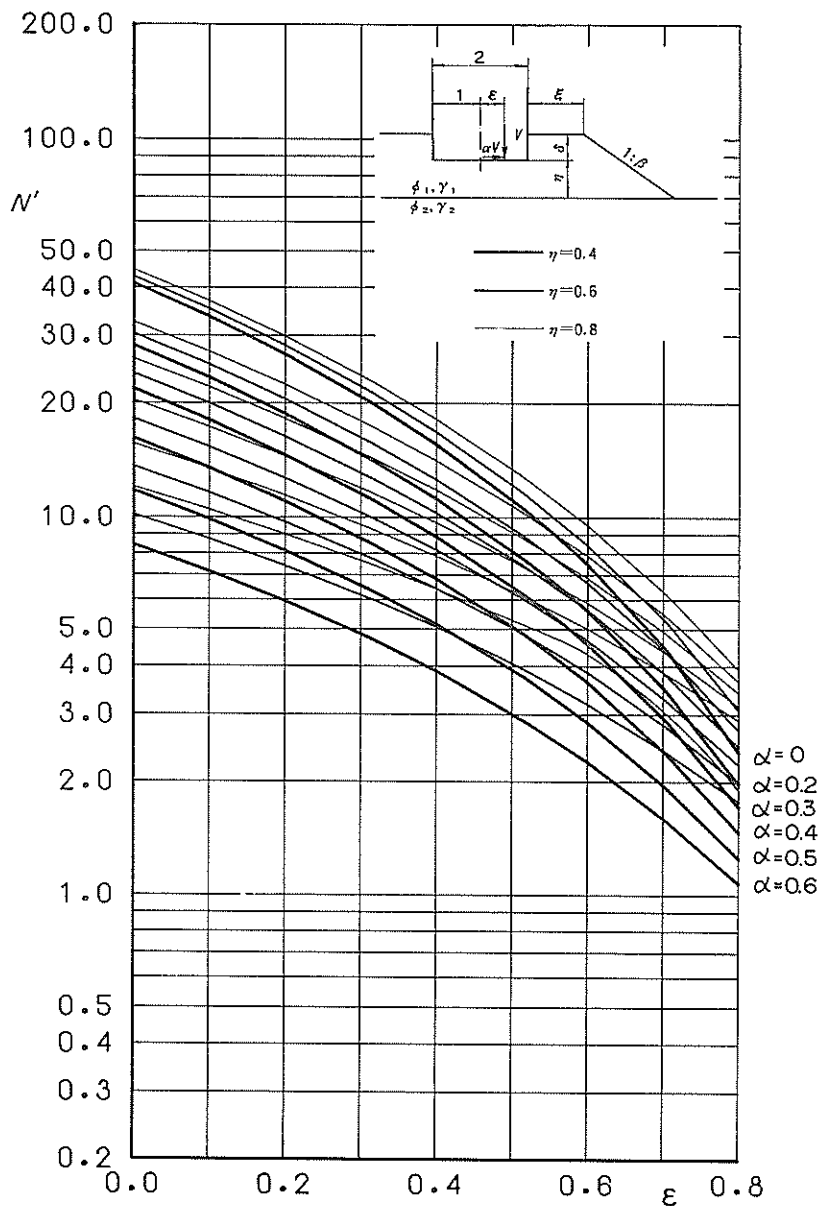


$\xi = \infty, \delta = 0$ の場合の近似式 $N = N'(1 + \kappa)$

$\beta = 1.5$ の場合 $\kappa = -0.280 - 0.147\alpha - 0.0195\epsilon - 0.324\eta + 0.0728\xi + 0.669\delta$

$\beta = 2.0$ の場合 $\kappa = -0.292 - 0.120\alpha + 0.0266\epsilon - 0.288\eta + 0.0682\xi + 0.726\delta$

図-26 ($\phi_1 = 45^\circ, \phi_2 = 40^\circ, \xi = \infty, \delta = 0, \gamma' = \gamma_2/\gamma_1 = 1$)

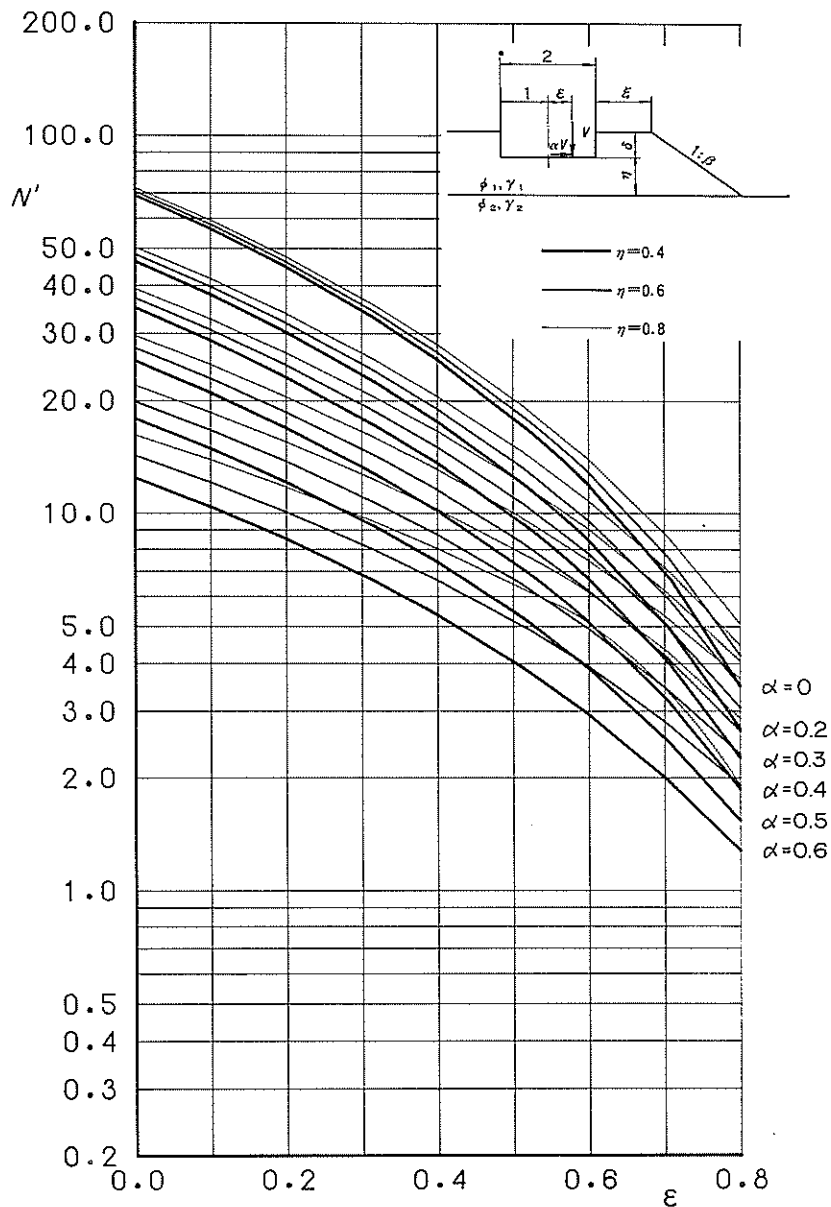


$\xi=\infty, \delta=0$ の場合の近似式 $N = N'(1+x)$

$\beta=1.5$ の場合 $x = -0.485 - 0.026\alpha - 0.0401\epsilon - 0.301\eta + 0.0964\xi + 0.597\delta$

$\beta=2.0$ の場合 $x = -0.486 - 0.093\alpha - 0.0076\epsilon - 0.277\eta + 0.0930\xi + 0.641\delta$

図-27 ($\phi_1=50^\circ, \phi_2=35^\circ, \xi=\infty, \delta=0, \gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

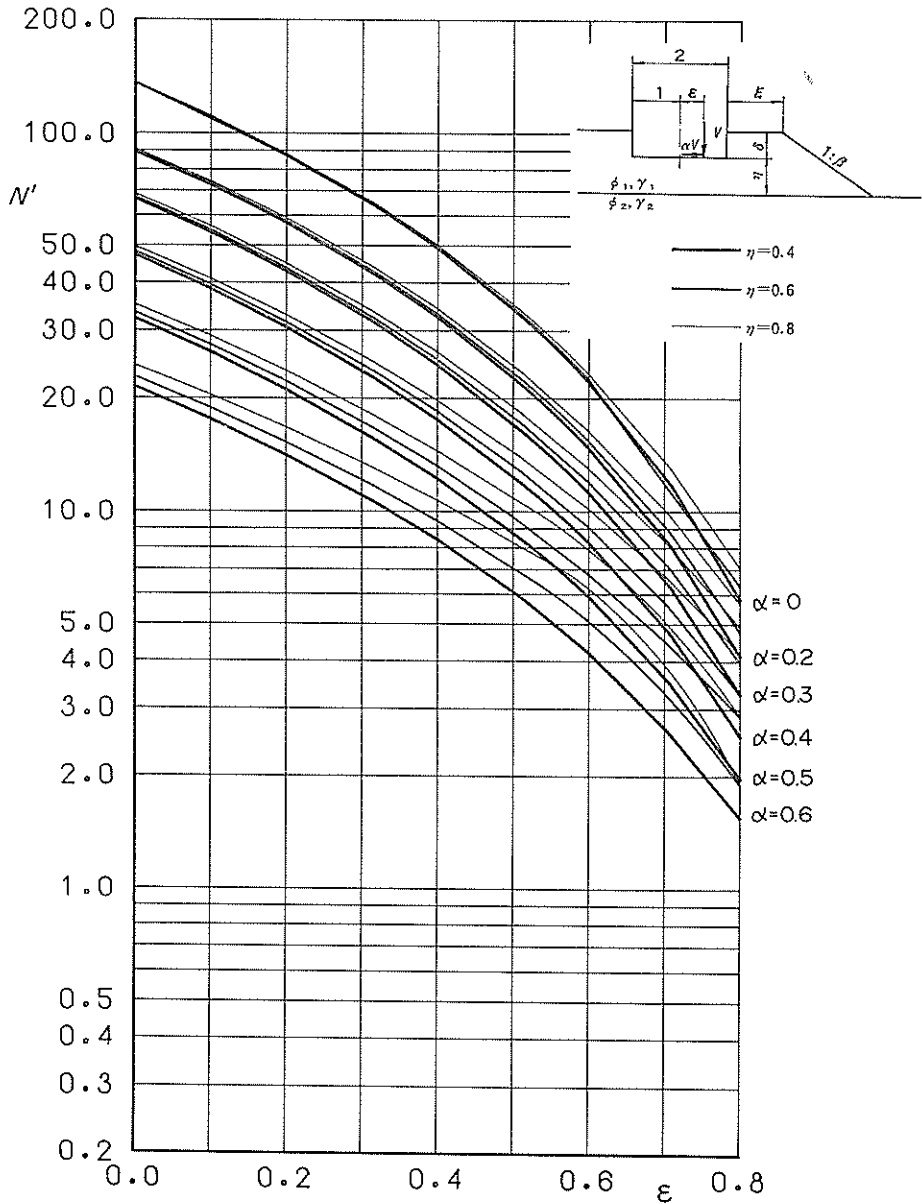


$\xi = \infty, \delta = 0$ の場合の近似式 $N = N' (1 + \kappa)$

$\beta = 1.5$ の場合 $\kappa = -0.312 - 0.191\alpha - 0.0826\epsilon - 0.328\eta + 0.0812\xi + 0.559\delta$

$\beta = 2.0$ の場合 $\kappa = -0.318 - 0.178\alpha - 0.0490\epsilon - 0.304\eta + 0.0779\xi + 0.603\delta$

図-28 ($\phi_1 = 50^\circ, \phi_2 = 40^\circ, \xi = \infty, \delta = 0, \gamma' = \gamma_2/\gamma_1 = 1$)



$\xi \rightarrow \infty, \delta = 0$ の場合の近似式 $N = N' (1 + \kappa)$

$\beta = 1.5$ の場合 $\kappa = -0.197 - 0.215\alpha - 0.0993\epsilon - 0.322\eta + 0.0665\delta + 0.495\delta$

$\beta = 2.0$ の場合 $\kappa = -0.210 - 0.192\alpha - 0.0639\epsilon - 0.295\eta + 0.0634\delta + 0.534\delta$

図-29 ($\phi_1 = 50^\circ, \phi_2 = 45^\circ, \xi = \infty, \delta = 0, \gamma' = \gamma_2/\gamma_1 = 1$)

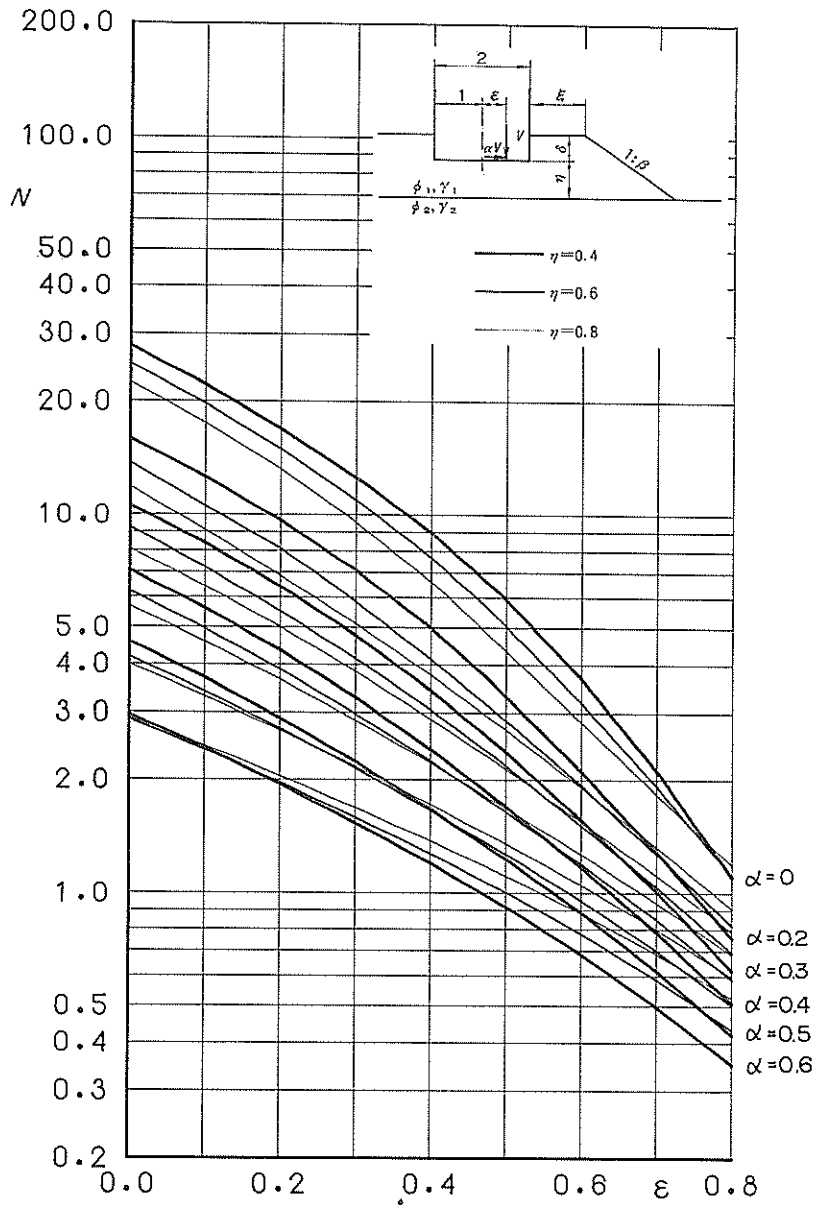


图-30 ($\phi_1=45^\circ$, $\phi_2=35^\circ$, $\xi=0.8$, $\delta=0$, $\beta=1.5$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

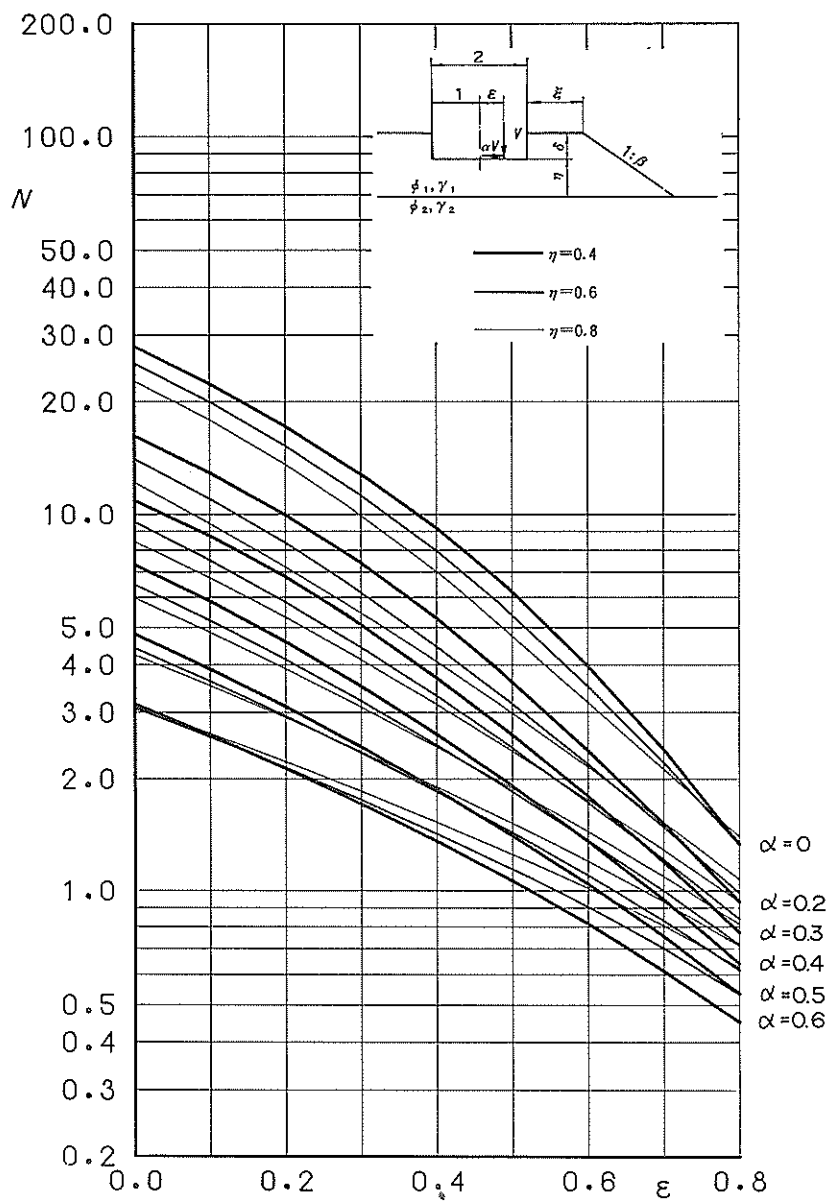


图-31 ($\phi_1=45^\circ$, $\phi_2=35^\circ$, $\xi=0.8$, $\delta=0.1$, $\beta=1.5$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

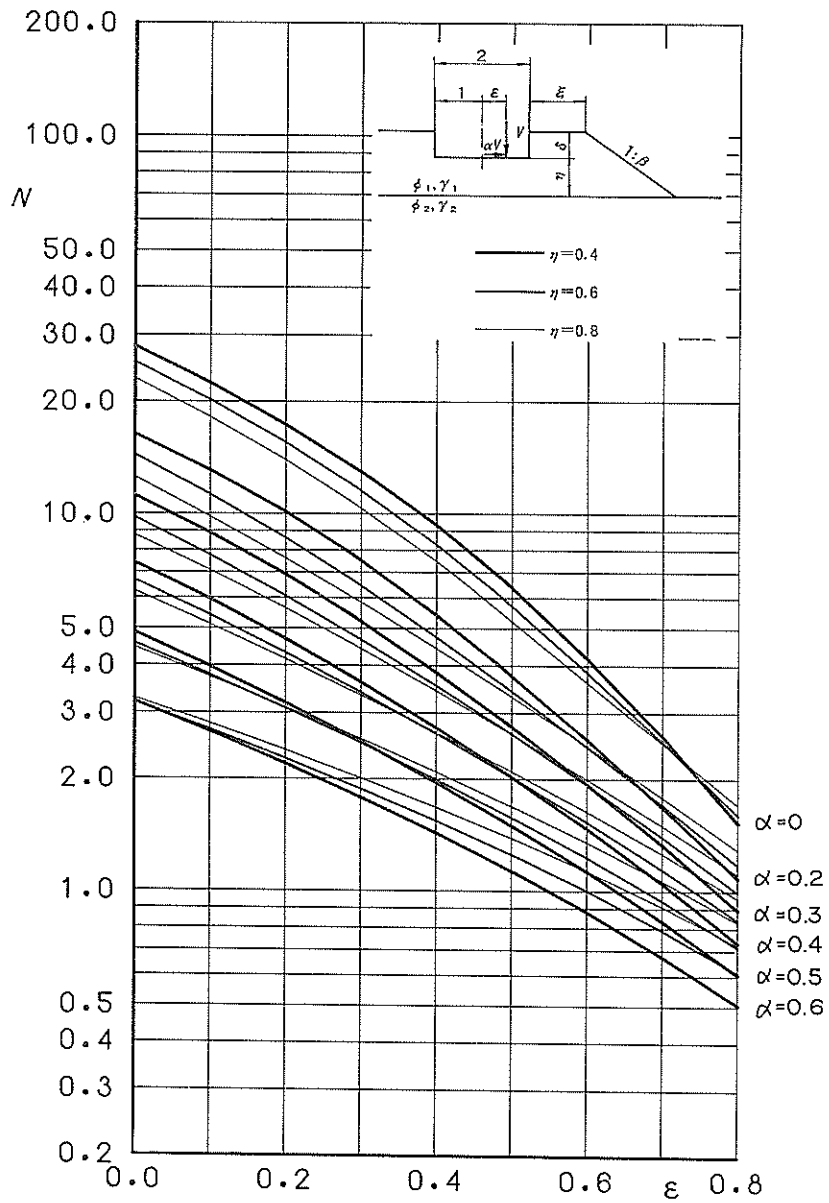


图-33 ($\phi_1=45^\circ$, $\phi_2=35^\circ$, $\xi=1.2$, $\delta=0$, $\beta=1.5$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

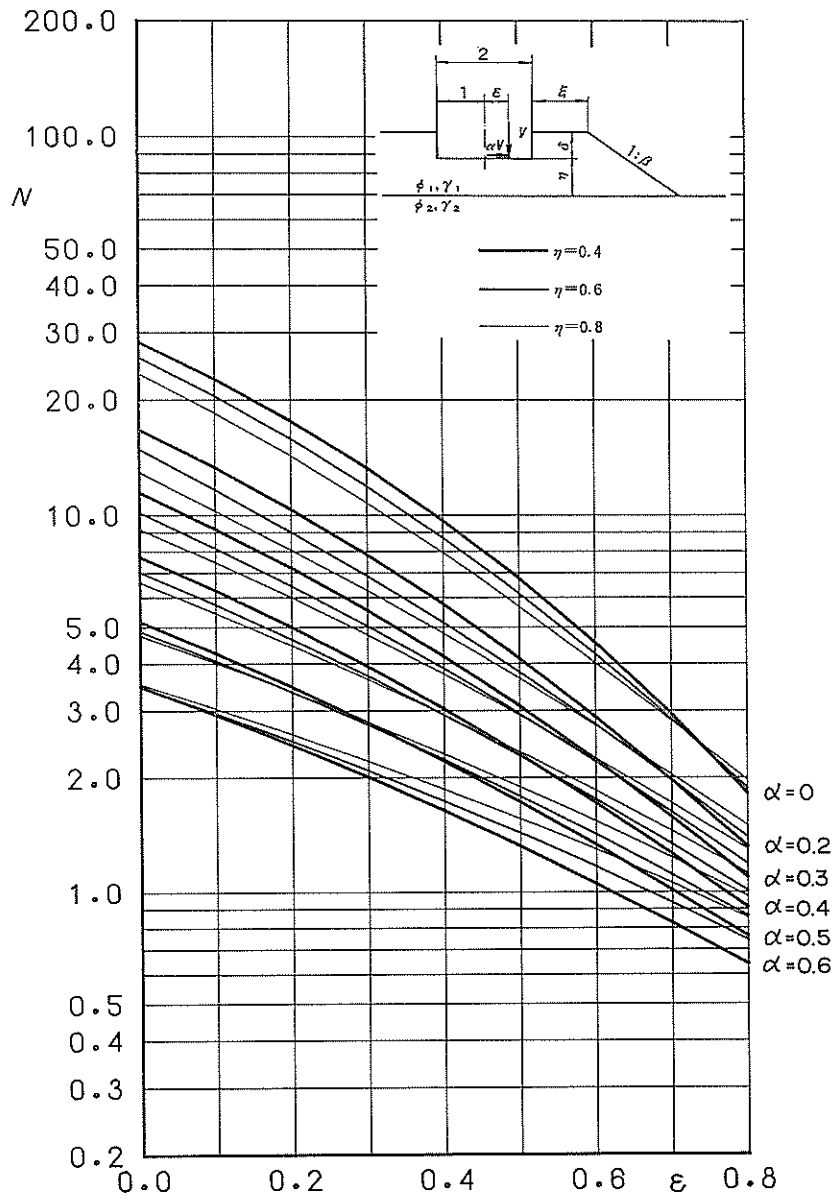


图-34 ($\phi_1=45^\circ$, $\phi_2=35^\circ$, $\xi=1.2$, $\delta=0.1$, $\beta=1.5$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

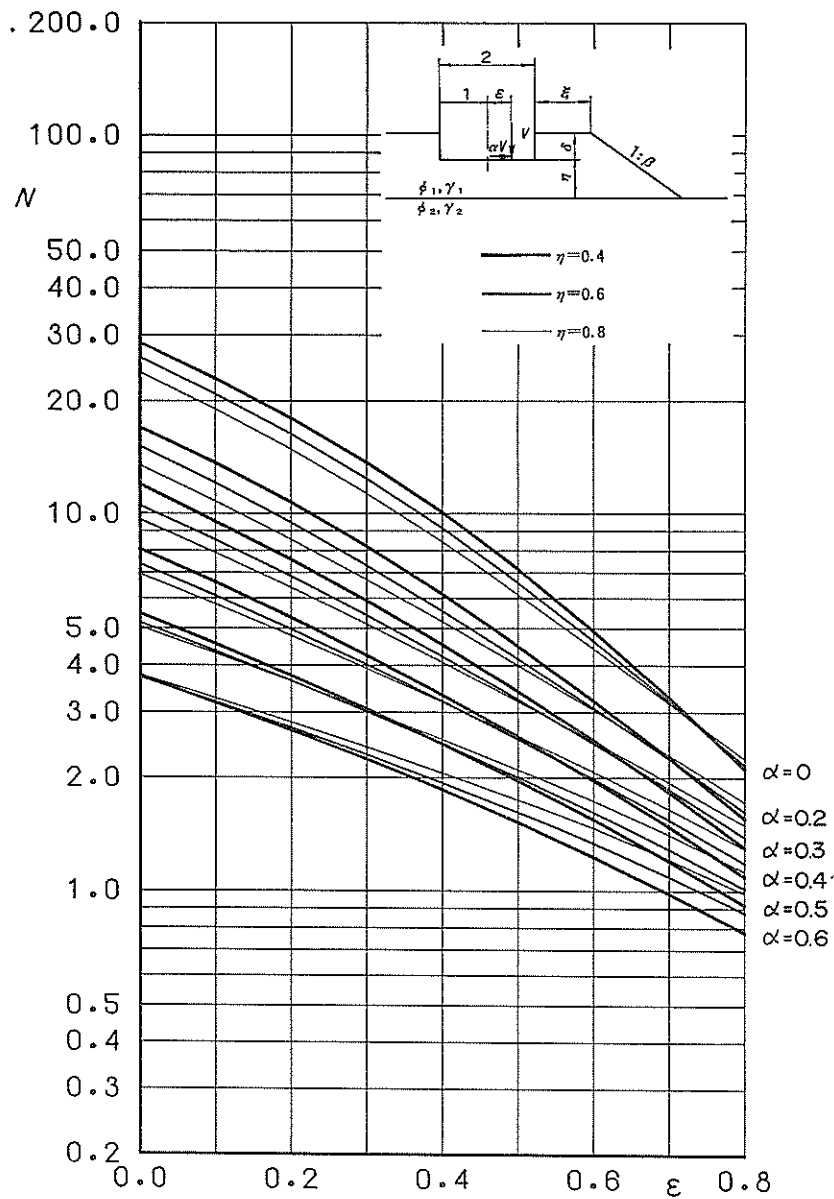


图-35 ($\phi_1=45^\circ, \phi_2=35^\circ, \xi=1.2, \delta=0.2, \beta=1.5, \gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

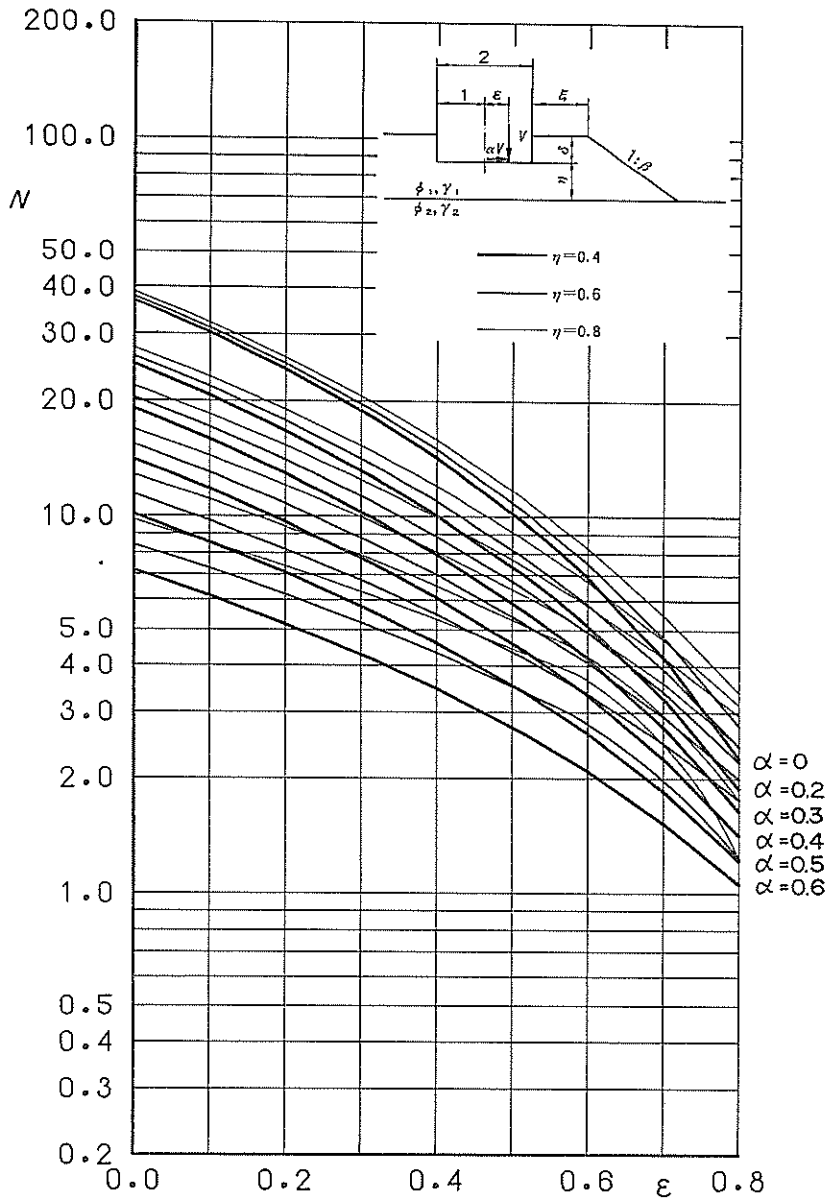


图-36 ($\phi_1=45^\circ, \phi_2=35^\circ, \xi=\infty, \delta=0.1, \gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

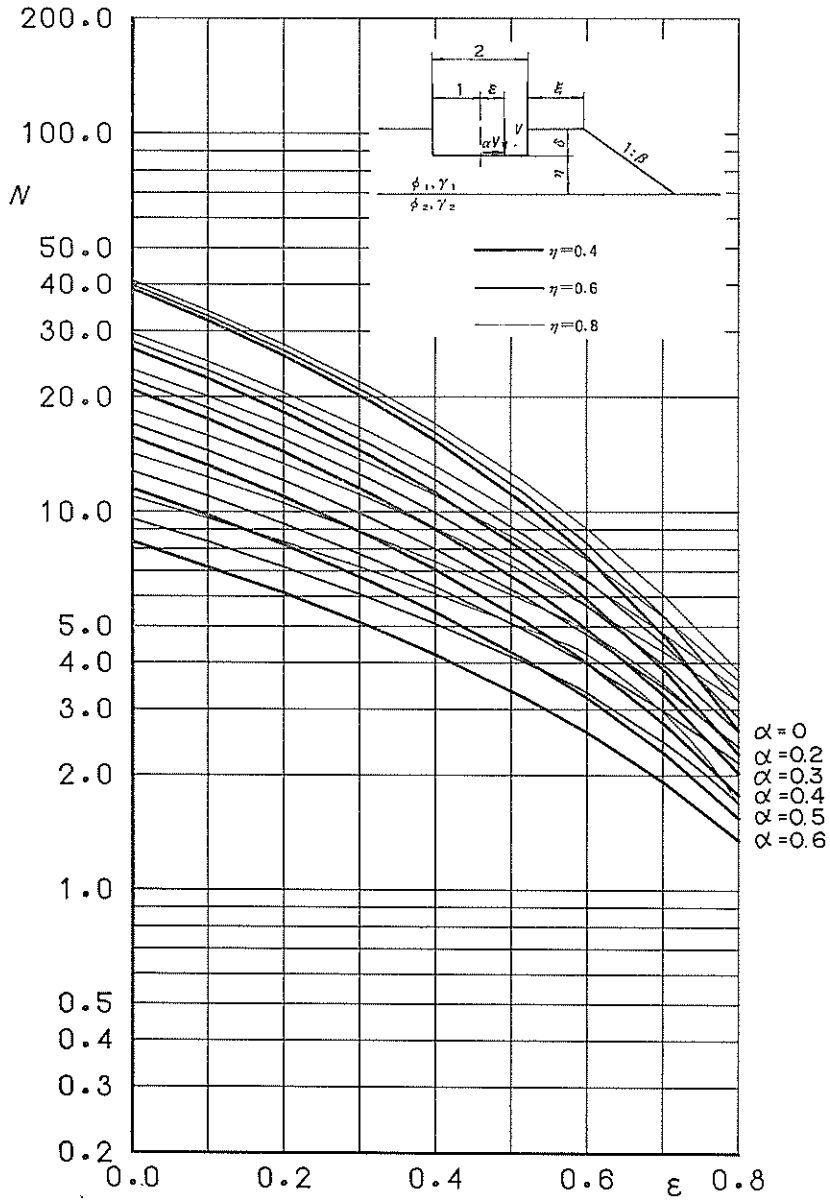


图-37 ($\phi_1=45^\circ, \phi_2=35^\circ, \xi=\infty, \delta=0.2, \gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

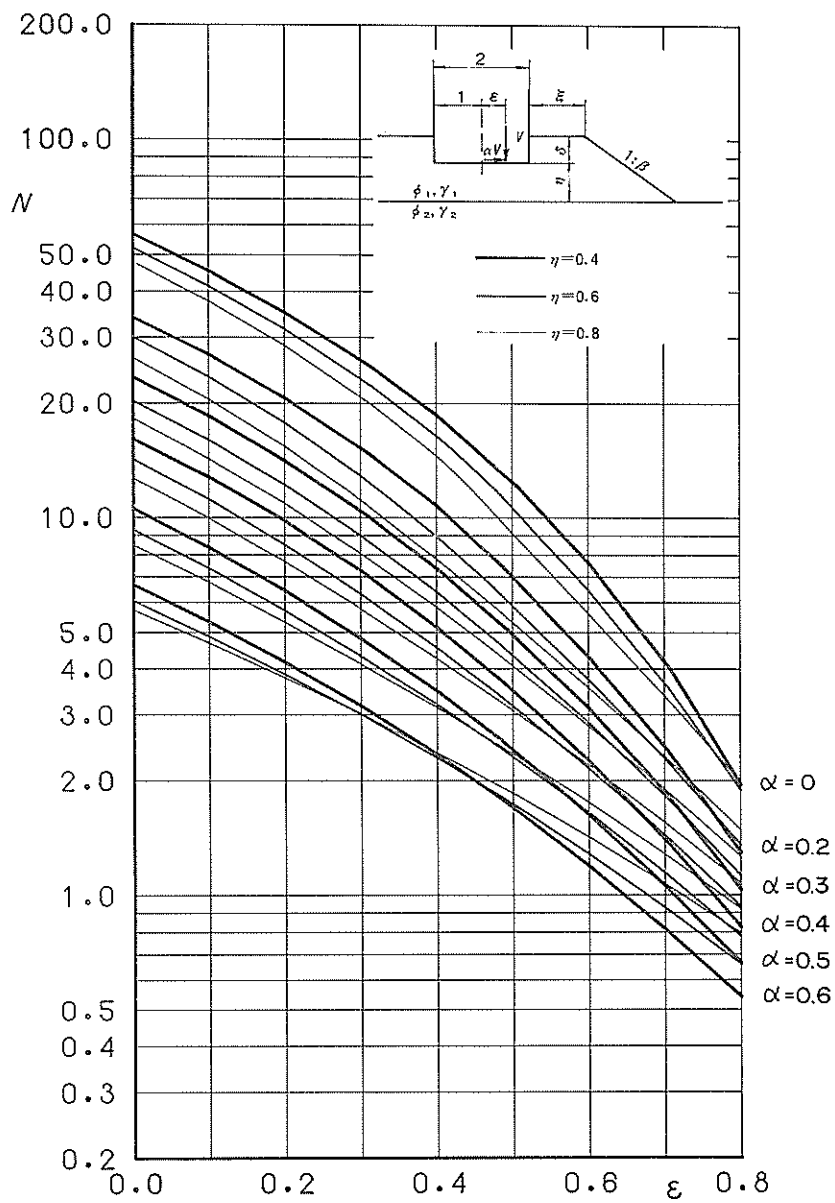


图-38 ($\phi_1=50^\circ$, $\phi_2=40^\circ$, $\xi=0.8$, $\delta=0$, $\beta=1.5$, $r'=r_2/r_1=1$)

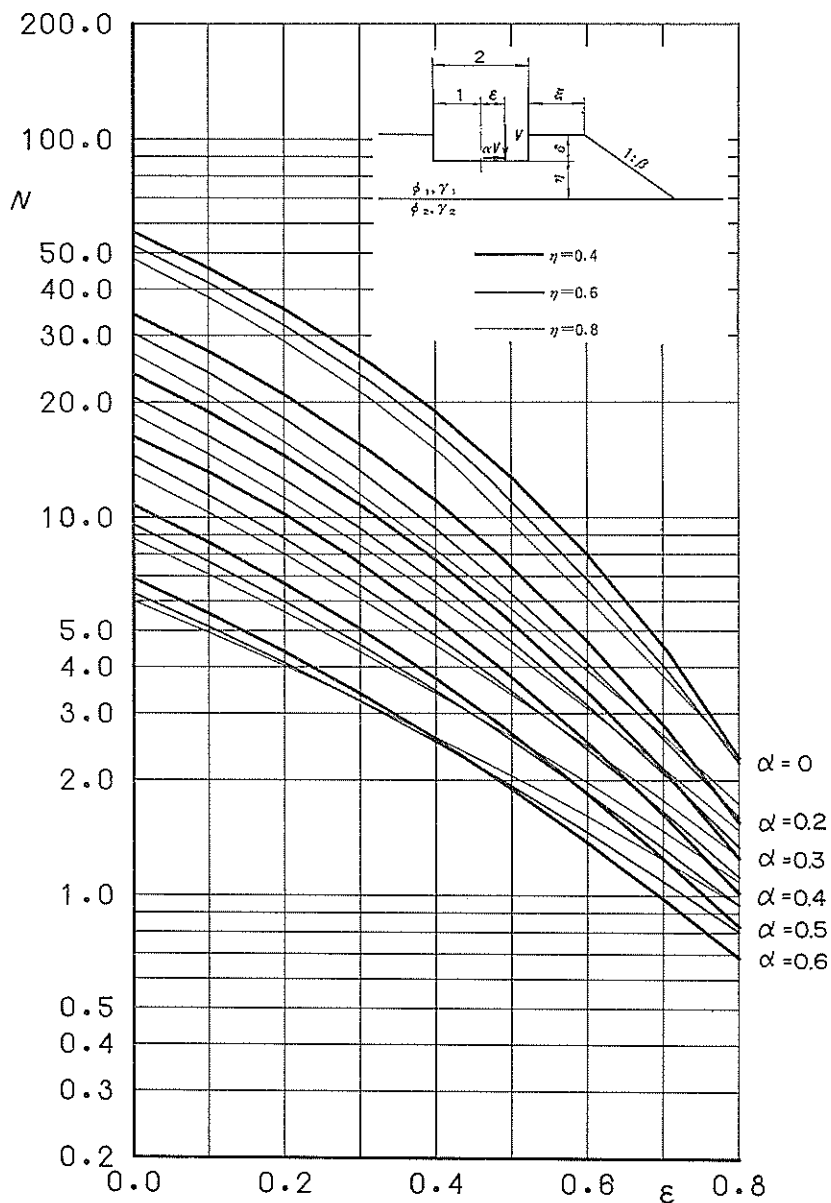


图-39 ($\phi_1=50^\circ$, $\phi_2=40^\circ$, $\xi=0.8$, $\delta=0.1$, $\beta=1.5$, $r'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

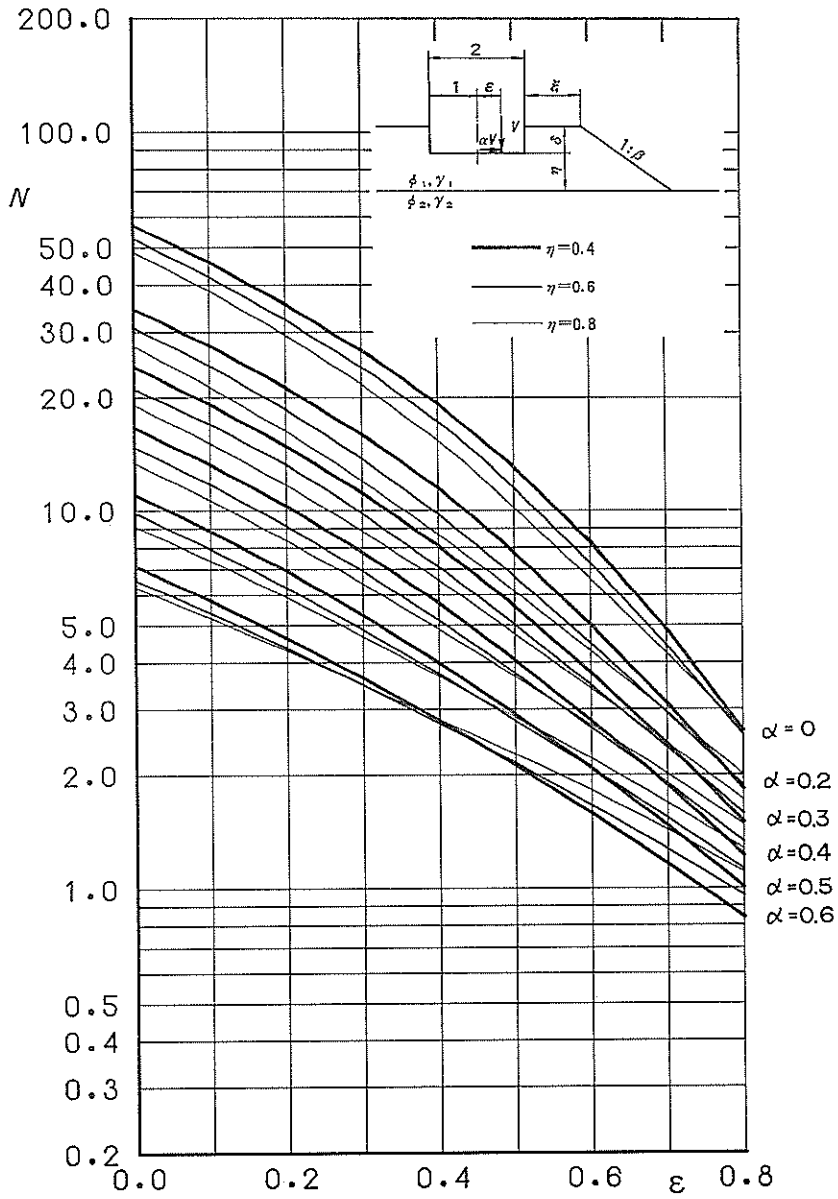


图-40 ($\phi_1=50^\circ$, $\phi_2=40^\circ$, $\xi=0.8$, $\delta=0.2$, $\beta=1.5$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

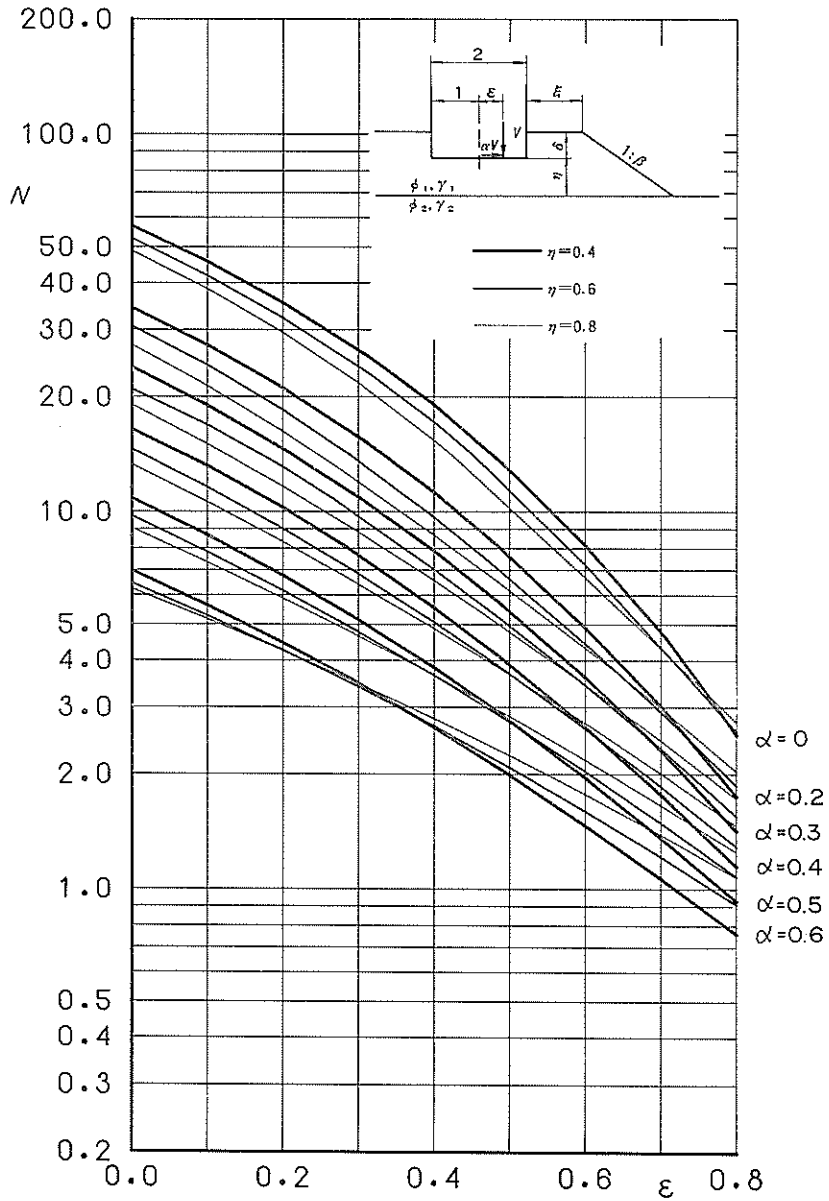


图-41 ($\phi_1=50^\circ, \phi_2=40^\circ, \xi=1.2, \delta=0, \beta=1.5, r'=r_2/r_1=1$)

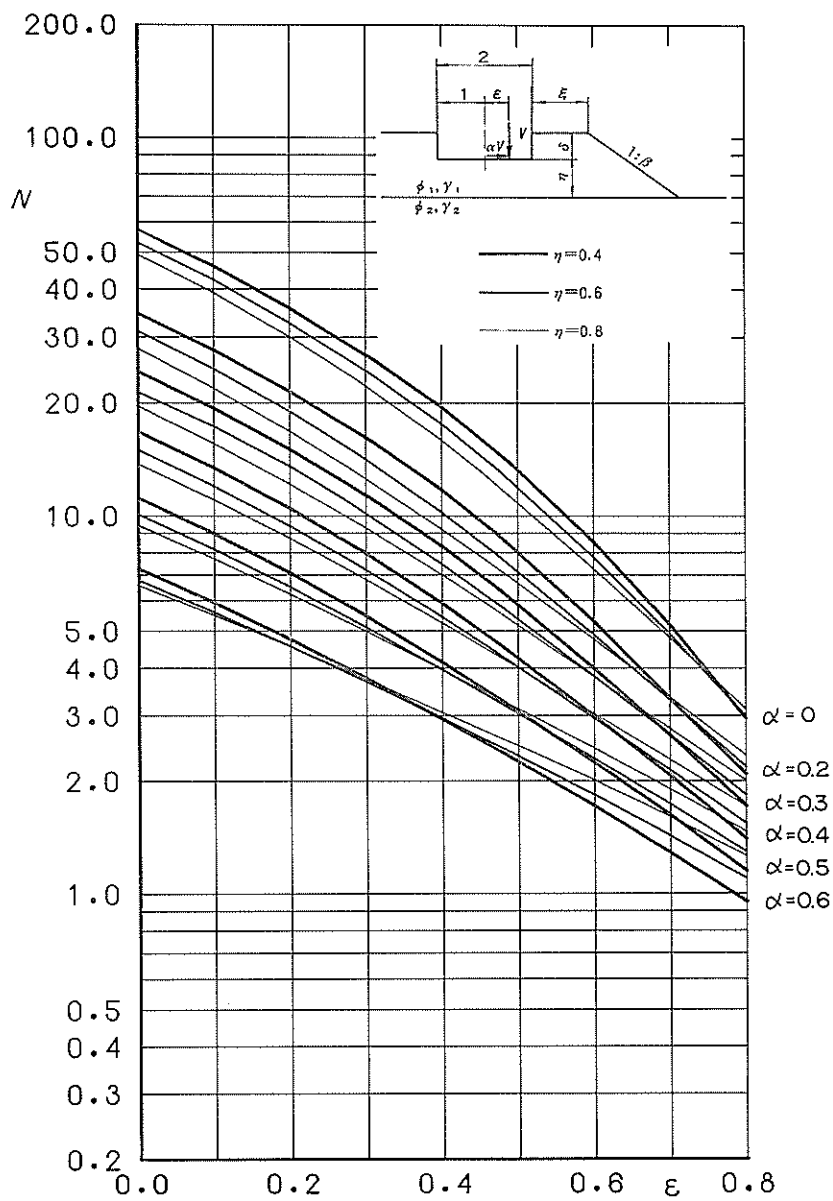


图-42 ($\phi_1=50^\circ$, $\phi_2=40^\circ$, $\xi=1.2$, $\delta=0.1$, $\beta=1.5$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

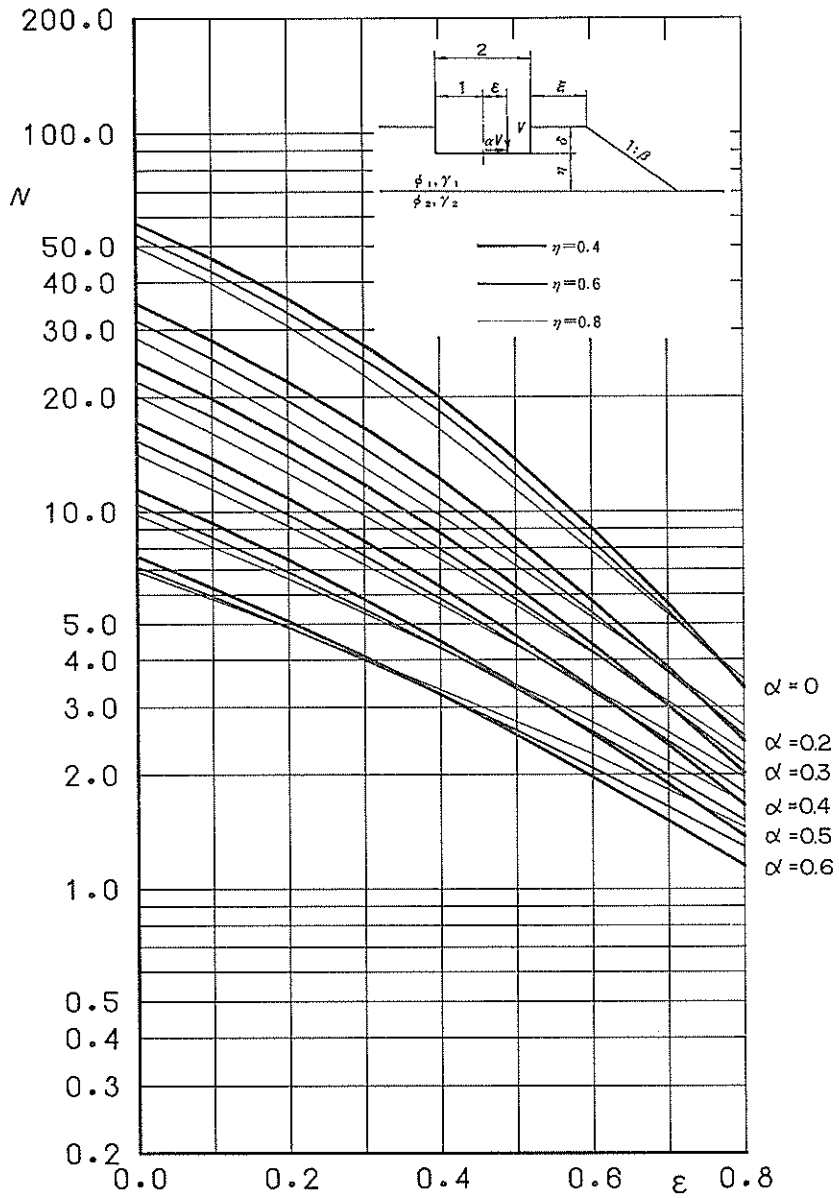


图-43 ($\phi_1=50^\circ$, $\phi_2=40^\circ$, $\xi=1.2$, $\delta=0.2$, $\beta=1.5$, $r'=r_2/r_1=1$)

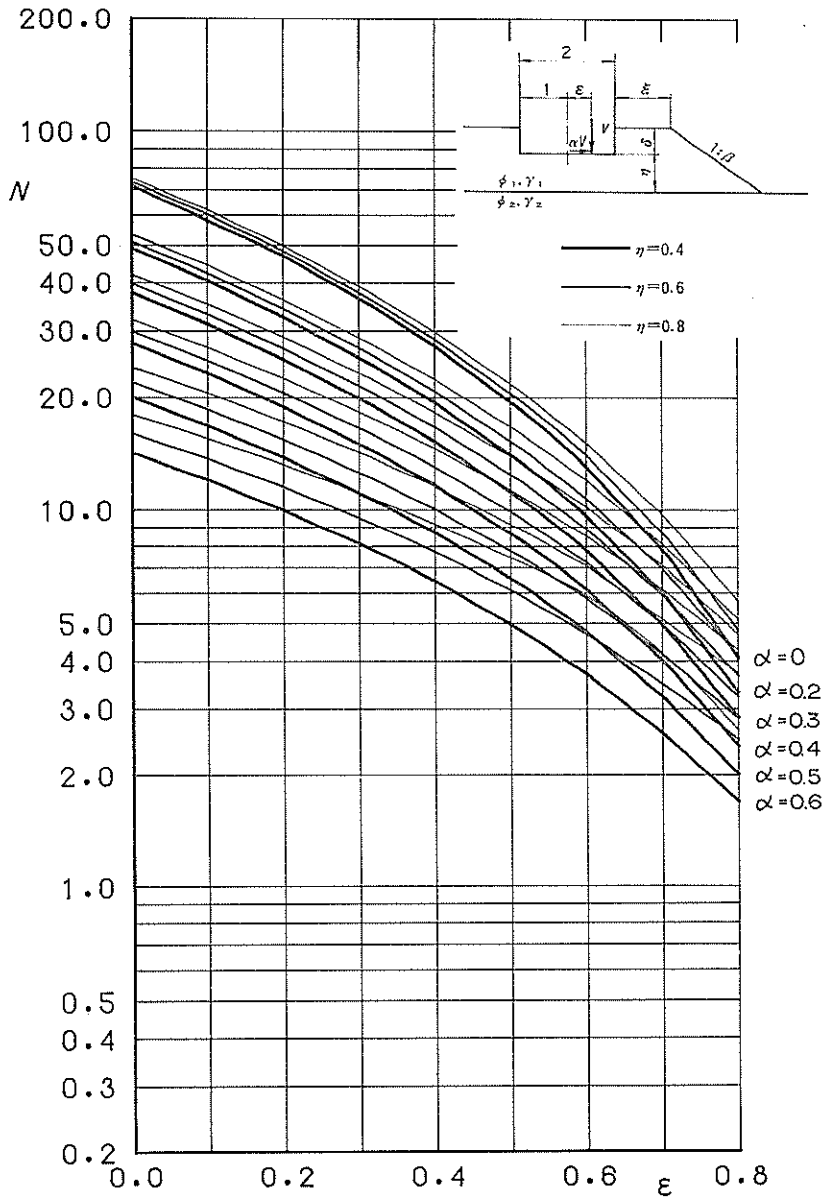


图-44 ($\phi_1=50^\circ, \phi_2=40^\circ, \xi=\infty, \delta=0.1, \gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

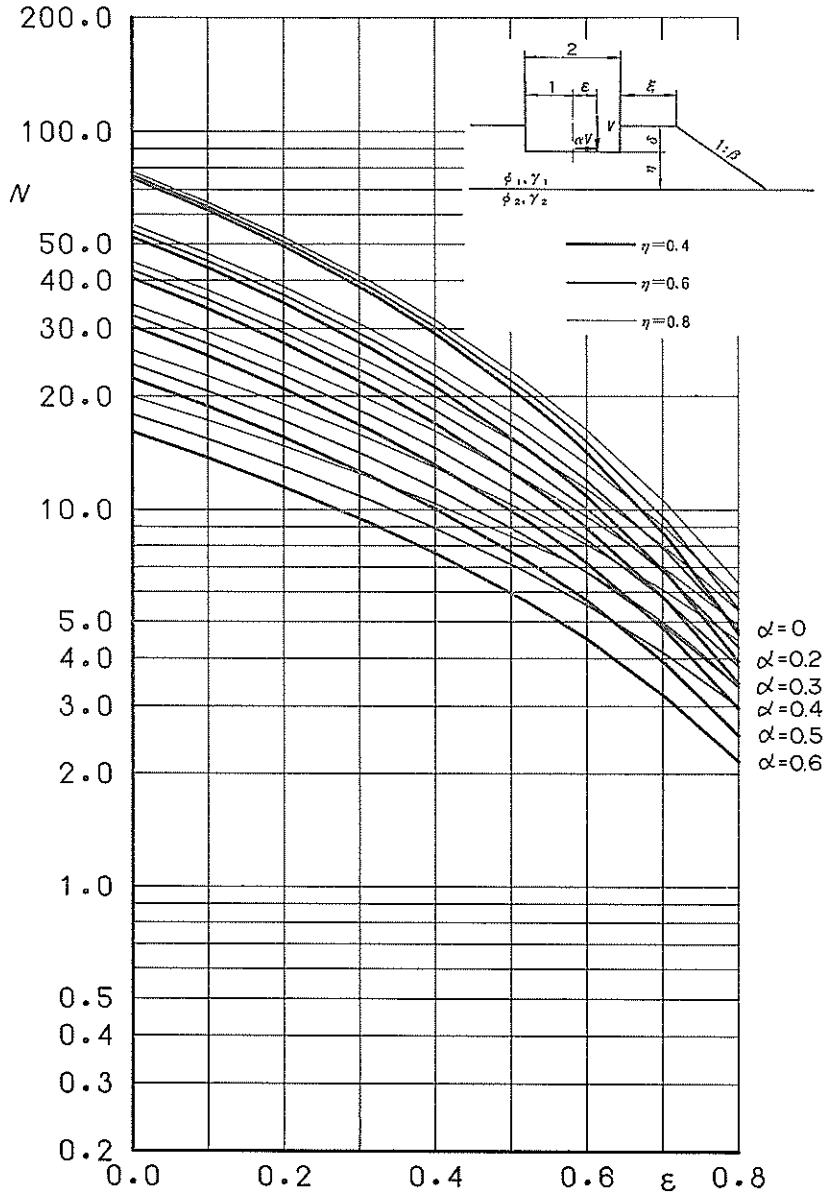


图-45 ($\phi_1=50^\circ$, $\phi_2=40^\circ$, $\xi=\infty$, $\delta=0.2$, $\gamma'=\gamma_2/\gamma_1=1$)

4.2 計算図表の使用法

(1) 基礎の自重，地震力，上載荷重および土圧の合力を求め，さらにその鉛直成分 V' を求める。

(2) 基礎に働く荷重の作用線が基礎底面をきる点より偏心量 e を求め，基礎幅の½すなわち b で割って ξ を求める。また，荷重の傾きより α を求める。

(3) 基礎の前端よりのり肩までの距離 a ，根入れ深さ d および基礎底面から下層地盤の表面までの距離 h を b で割って ξ, δ, η を求める。斜面のこう配 $1/\beta$ より β を求める。

(4) 土圧の計算に用いる内部摩擦角より，防波堤（荒天時）およびけい船岸（常時）なら 5° 大きい値，けい船岸（地震時）なら 10° 大きい値を内部摩擦角 ϕ_1, ϕ_2 として用いる。

(5) 根入れのない水平二層系地盤ならば，図-25～図-29を用いて，根入れのない水平二層系地盤における支持力係数 N' を求める。

内部摩擦角 $\phi_1=45^\circ, \phi_2=35^\circ$ および $\phi_1=50^\circ, \phi_2=40^\circ$ の場合については， $\beta=1.5$ ならば，図-30～図-45を用いて，支持力係数 N を求める。 $\beta=2$ の場合については，安全側の誤差の最大2割を許容できるならば， $\beta=1.5$ の場合と同様に図-30～図-45を用いることができる。なお，図-30～図-45を用いる場合には， ξ, δ については，図にある値以外は内そうするか，または近似式を用いて，支持力係数 N を求めなければならない。

例として， $\gamma'=1, \beta=1.5, \phi_1=45^\circ, \phi_2=35^\circ, \xi=1.1, \delta=0.14, \eta=0.5, \alpha=0.45, \varepsilon=0.35$ の場合について，内そうする方法と近似式を用いる方法について，それぞれ計算するとつぎのようになる。

(a) 内そうによる方法

(i) ξ および δ のつぎの値に対して， $\eta=0.5, \alpha=0.45, \varepsilon=0.35$ に対応する N の値をそれぞれ計算図表から求める。

① $\xi=0.8, \delta=0.1$ (図-31) $\rightarrow N=2.5$

② $\xi=0.8, \delta=0.2$ (図-32) $\rightarrow N=2.7$

③ $\xi=1.2, \delta=0.1$ (図-34) $\rightarrow N=2.85$

④ $\xi=1.2, \delta=0.2$ (図-35) $\rightarrow N=3.2$

(ii) δ について直線補間することによって， $\delta=0.14$ に対応する N の値を求める。

①②の結果より

⑤ $\xi=0.8, \delta=0.14 \rightarrow N=2.58$

③④の結果より

⑥ $\xi=1.2, \delta=0.14 \rightarrow N=2.99$

(iii) ξ について直線補間することによって， $\xi=1.1$

に対応する N の値を求める。

⑤⑥の結果より

$\xi=1.1, \delta=0.14 \rightarrow N=2.89$

(b) 近似式による方法

(i) N' を求める。

$\phi_1=45^\circ, \phi_2=35^\circ$ であるので図-25より， $\eta=0.5, \alpha=0.45, \varepsilon=0.35$ に対応する N' の値を求めると， $N'=5.45$ となる。

(ii) κ を求める。

図-25に示されている $\beta=1.5$ に対応する κ の式（上段の式）より κ を求めるとつぎのようになる。

$$\begin{aligned} \kappa = & -0.357 - 0.143 \times 0.45 - 0.0269 \times 0.35 - 0.355 \\ & \times 0.5 + 0.0860 \times 1.1 + 0.706 \times 0.14 = -0.415 \end{aligned}$$

(iii) N を求める

$$N = N'(1 + \kappa) = 5.45(1 - 0.415) = 3.19$$

なお，真の値は $N=2.87$ であって，この例では内そうした場合には誤差はほとんどないが，近似式による値は計算値に対して10%の誤差を生じた。

上記以外の場合については，図-25～図-29の下に示されている近似式を用いて，支持力係数 N を求める。

(6) 支持力係数 N に $\gamma_1 b^2$ をかけて，極限支持力 q を求める。

(7) 安全率 F を式(113)より求める。

$$F = \frac{\gamma_1 b N}{V'} = \frac{2bq}{V'} \dots\dots\dots(113)$$

5. 各パラメーターの支持力係数に与える影響

支持力係数 N に及ぼす各パラメーターの影響はつぎの通りである。

(1) β の影響について

β の影響については，図-46および図-47からもわかるように， β が大きく (β' が小さく) なれば N の値は増大し， ξ が2～8以上になると β (β') の値に関係なく一定の値となる。

(2) ξ の影響について

ξ の影響については，図-48からわかるように ξ が大きくなれば， N の値も大きくなるが， ξ が2～8以上になると ξ の値に関係なく一定の値となる。また， α および ε の値が大きくなると， ξ の値の小さい範囲で， ξ の値に関係なく N が一定の値となる傾向にある。

(3) δ の影響について

δ の影響については，図-49から δ が大きくなれば， N の値は直線的に増加し， α および ε の値が大きくなれば，その増加の割合は小さくなる。

(4) α および ε の影響について

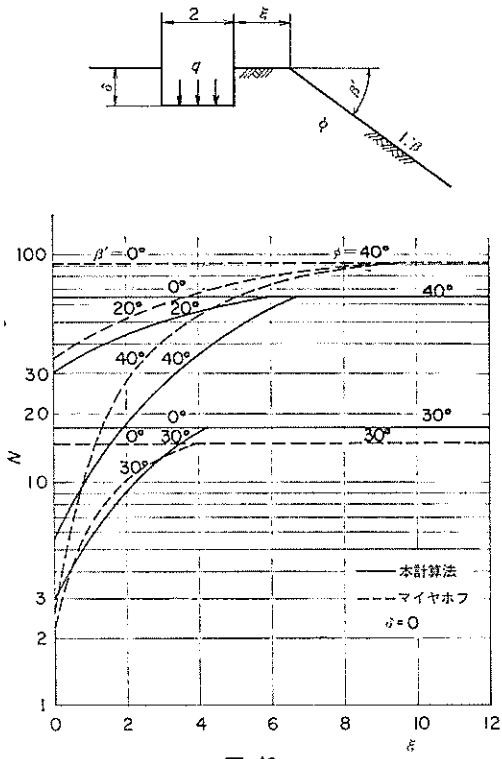


図-46

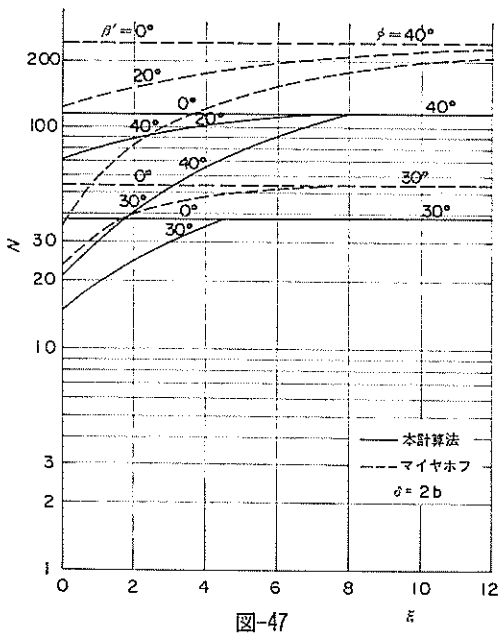


図-47

図-46～図47 マイヤホフの方法との比較（斜面上の基礎の支持力）

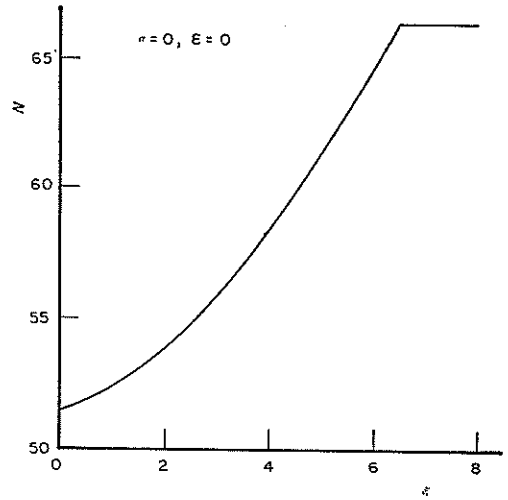


図-48 (1)

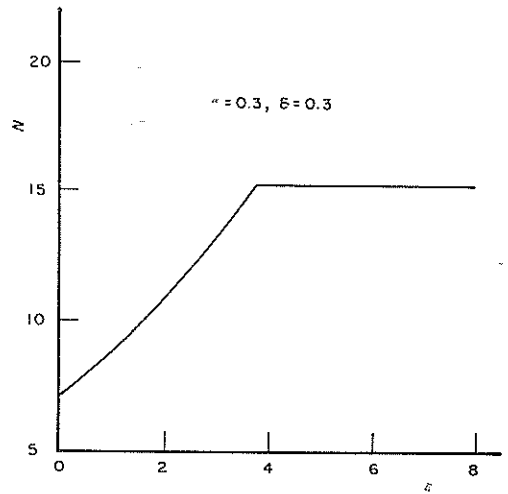


図-48 (2)

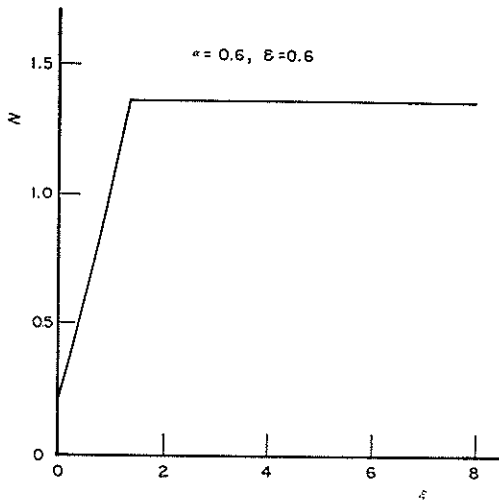


図-48 (3)

図-48 (1)~(3) N と ξ の関係

($\gamma' = 1, \beta = 1.5, \phi_1 = 40^\circ, \phi_2 = 40^\circ, \delta = 0, \eta = 0.6$)

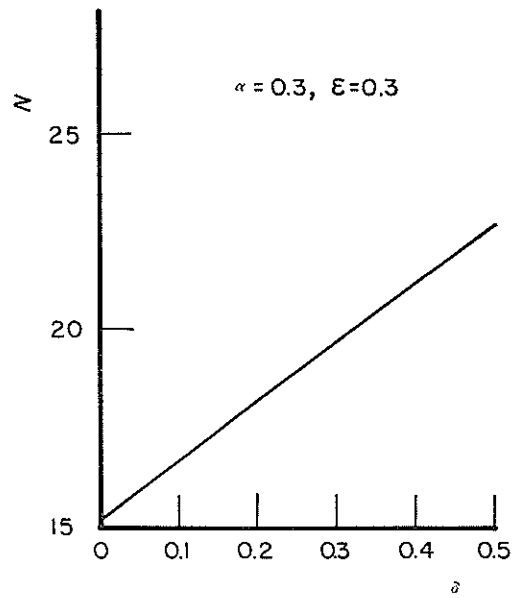


図-49 (2)

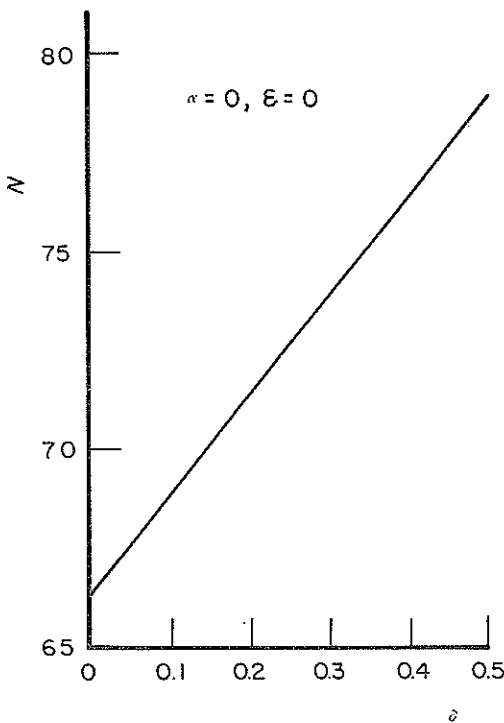


図-49 (1)

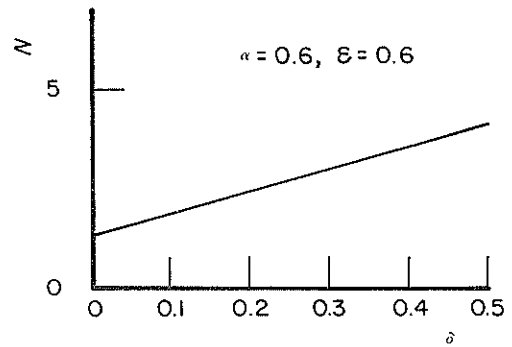


図-49 (3)

図-49 (1)~(3) 水平な地表面を持つ一層系地盤の N と δ の関係 ($\phi = 40^\circ$)

α, ε の値の大きいところでは、もっとも危険なすべり面が比較的浅い所に発生するため、 N は上層の土質条件の影響を強く受ける。また、逆に α, ε の値が小さいところでは、もっとも危険なすべり面が深い所に発生するため、 N は下層の土質条件の影響を強く受けることになる。

6. 在来の解との比較

ここでは、いくつかの条件について、本計算結果と在来の解との比較を行なってみる。

(1) 水平一層系地盤に対するマイヤホフ法との比較

基礎幅を 4 m, 基礎に加わる荷重の鉛直成分を 90 t と
して水平な地表面を持つ一層系地盤について比較を行な
った。なお、この計算で用いた支持力係数は、港湾構造
物設計基準¹⁰⁾によった。図-50～図-52までは、根入れの
ない場合であり、さらに、図-50は偏心および傾斜のな
い場合、図-51は偏心があって傾斜のない場合、図-52は
偏心がなくて傾斜のある場合である。偏心による安全率
 F への影響は両者ともほぼ等しく、荷重の傾斜率 α が増
大すると、安全率 F は下に凸の曲線で減少する傾向は同
じであるが、マイヤホフ法では内部摩擦角による影響が
大きい。つぎに根入れの影響は、図-53および図-54から
わかるようにマイヤホフ法においては、内部摩擦角が大
きくなると根入れの影響が大きく表われてくる。本計算
結果においては、内部摩擦角が大きくなっても根入れの
影響はそれほど大きくはなく、しかも根入れの影響は直
線的である。

$\alpha = 0, \varepsilon = 0$

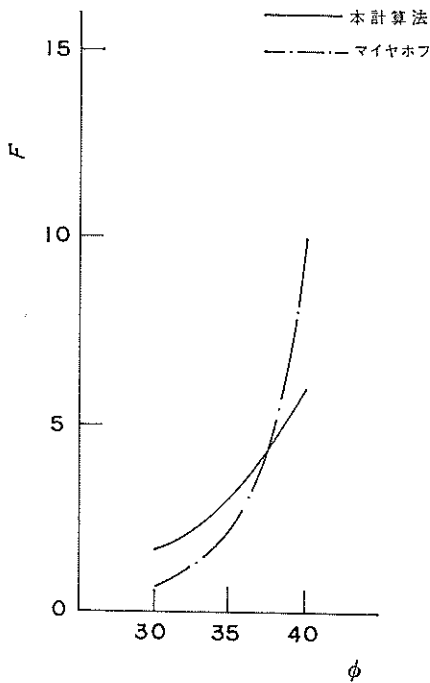


図-50

$\alpha \neq 0, \varepsilon = 0$

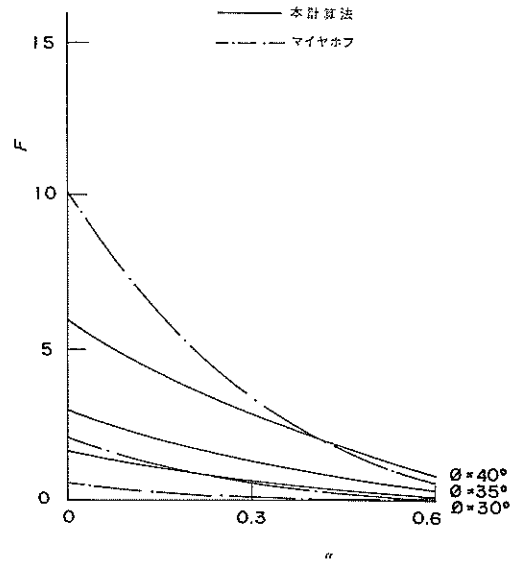


図-51

$\alpha = 0, \varepsilon \neq 0$

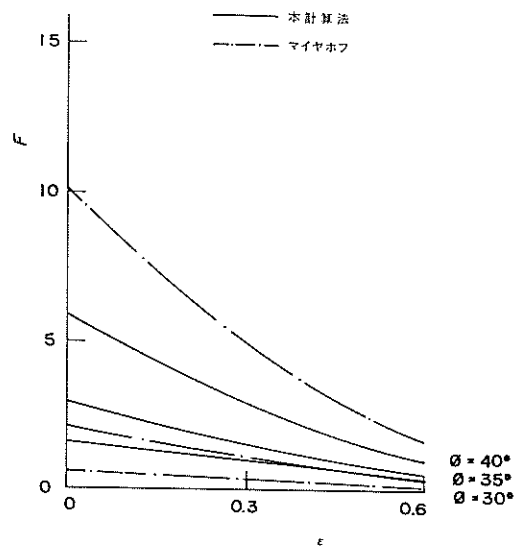


図-52

図-50～図-52 マイヤホフの方法との比較（根入れのない場合）

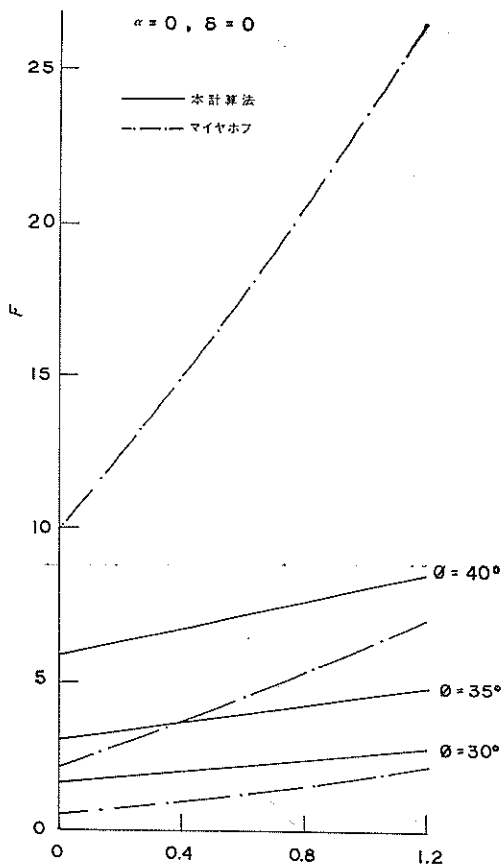


図-53

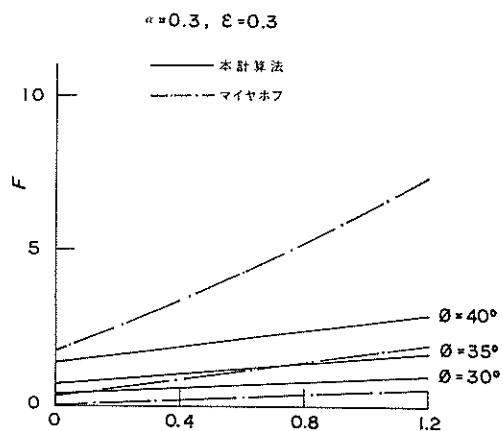


図-54

図-53～図-54 マイヤホフの方法との比較（根入れのある場合）

(2) 地表面傾斜地盤上の基礎に対するマイヤホフ法¹¹⁾（荷重に偏心傾斜のない場合）との比較

つぎに、基礎地盤が傾斜している一層系地盤について、荷重に偏心および傾斜のともない場合について比較してみると図-46、図-47のようになる。ここにおいて根入れのない内部摩擦角 ϕ が 30° の場合には、両者の値がよく一致しているが、内部摩擦角および根入れが大きくなるにしたがってマイヤホフの方が本計算の一層系の場合よりも N の値が大きくなる傾向にある。

(3) 二層系地盤に対する港湾構造物設計基準の方法⁵⁾との比較

港湾構造物設計基準の方法（支持力の計算は立石の方法によった）と本計算結果の比較を図-55～図-58に示した。これによれば、設計基準の方法で計算した安全率の値は本計算による安全率の値よりも一般に大きい。また、この設計基準の方法では、図-55に示したけい船岸の地震による被災例¹²⁾や図-56に示した防波堤の波による被災例¹³⁾をうまく説明することはむづかしい。

(4) 二層系地盤に対する三建法との比較

三建法と本計算結果の比較を図-59～図-62に示した。なお、三建法の安全率は抵抗モーメントとすべりモーメントの比で表わされているため、直接比較することはできないが、安全率1以下のものでは三建法による安全率が、本計算による安全率よりも大きく、安全率1を超えるものでは、逆に三建法による安全率が、本計算による安全率よりも小さくなっている。すなわち三建法による安全率は1の周辺に集まる傾向がある。また、この方法によれば、図-60にみられるように、防波堤の被災例はすべて安全率1を割り、設計条件程度の波浪を受けたにもかかわらず支持力不足による被災のなかったもの（滑動した例を含む）に対する安全率はすべて1を越えている。また、図-59に示したけい船岸の震害例に対しては、安全率と被災の傾向は完全には一致しないが、変形があったものに対する安全率はすべて1を割っており、被災例と計算結果は比較的よくあっている。しかし、分割法によるためせん断抵抗力の計算において水平力の影響が考慮されていないこと、ならびに安全率がモーメントの比で表示されているため、一層系の地盤に対する支持力の安全率をそのまま三建法に適用することなどには問題がある。

7. 被災例および設計例による検討

本資料の計算法によって求めた防波堤の波による被災例およびけい船岸の地震による被災例の安全率を 図-63

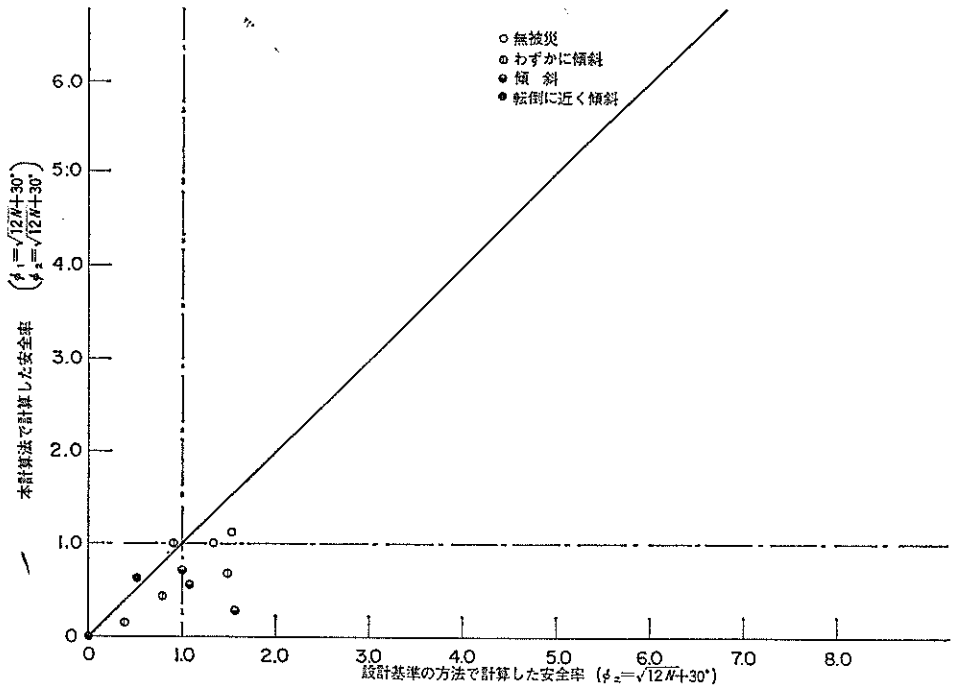


図-55 1968年十勝沖地震におけるけい船岸の被災例

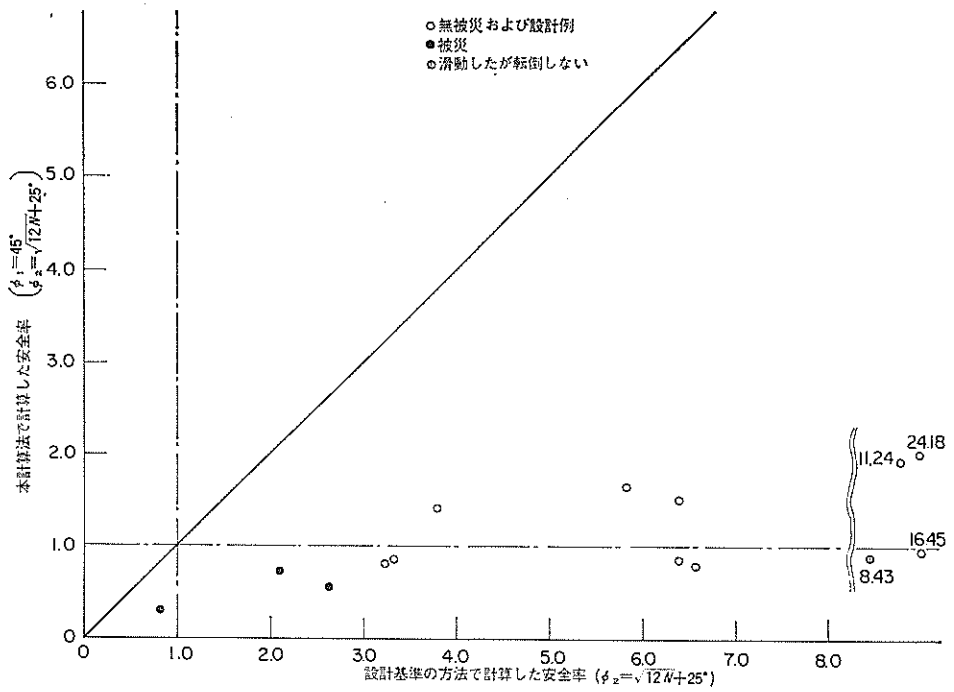


図-56 防波堤(荒天時)の被災例および設計例

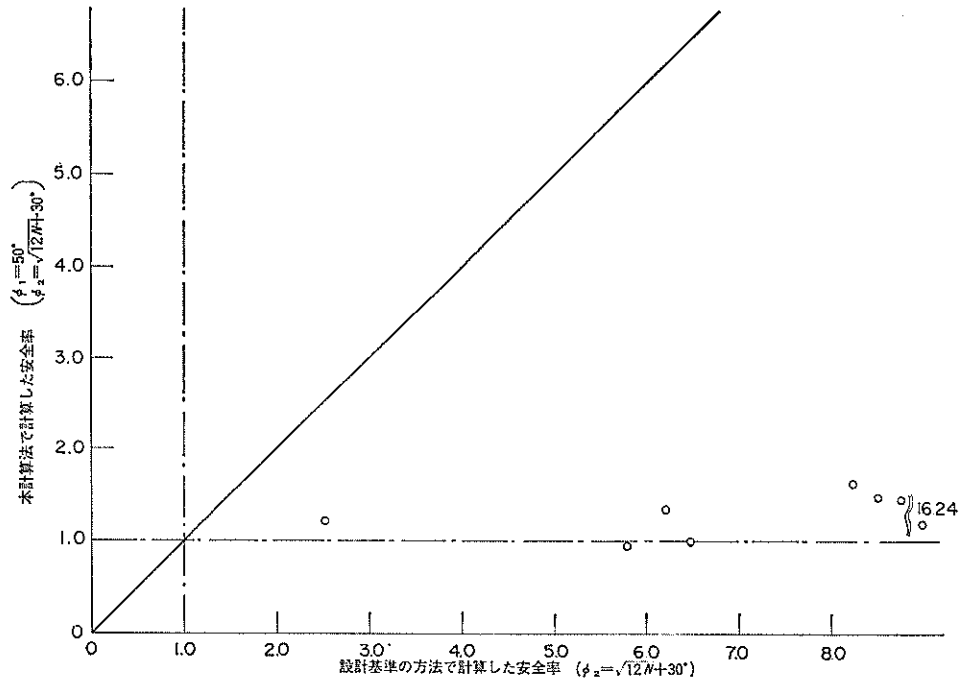


図-57 けい船岸（地震時）の設計例

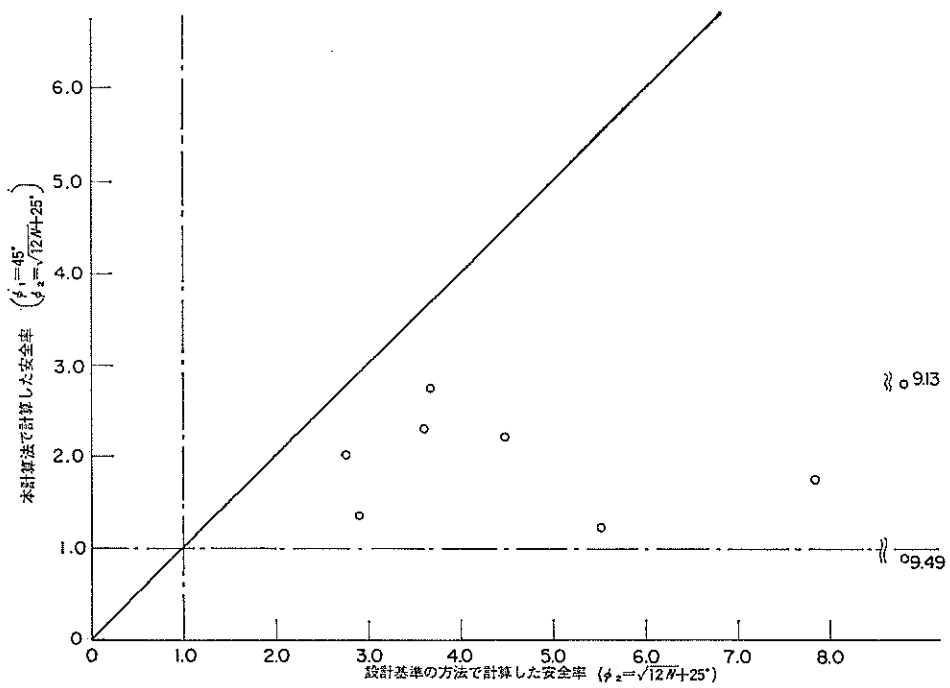


図-58 けい船岸（常時）の設計例

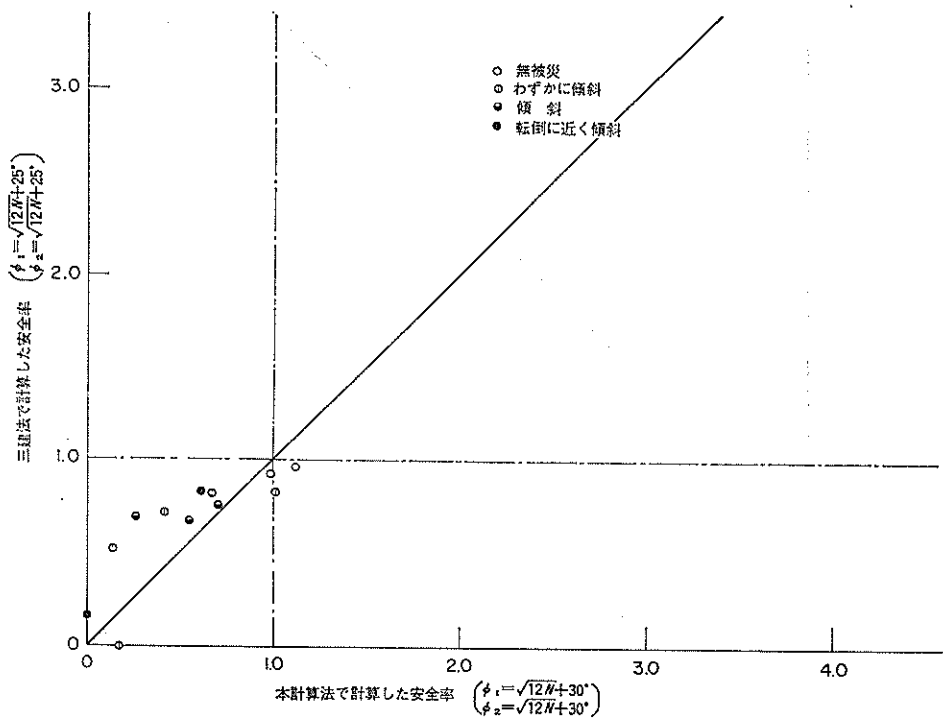


図-59 1968年十勝沖地震におけるけい船岸の被災例

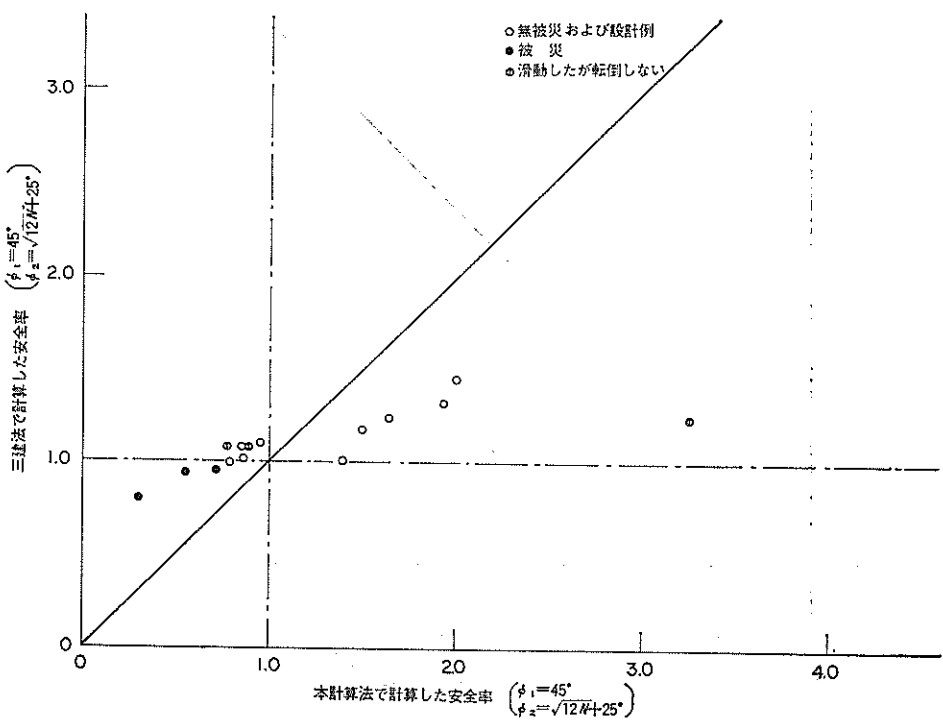


図-60 防波堤（荒天時）の被災例および設計例

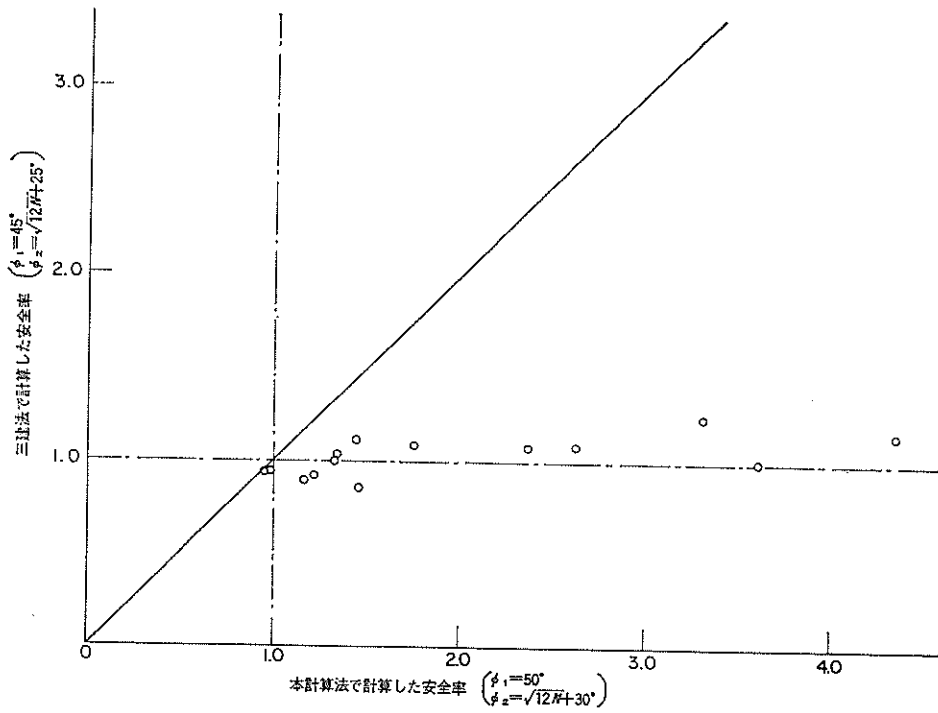


図-61 けい船岸(地震時)の設計例

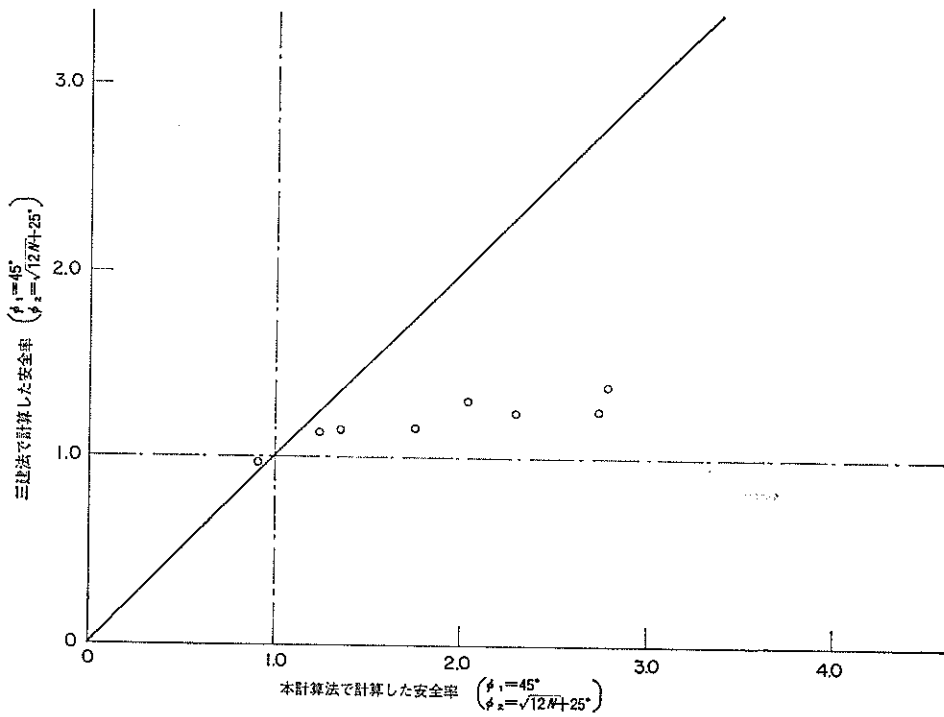


図-62 けい船岸(常時)の設計例

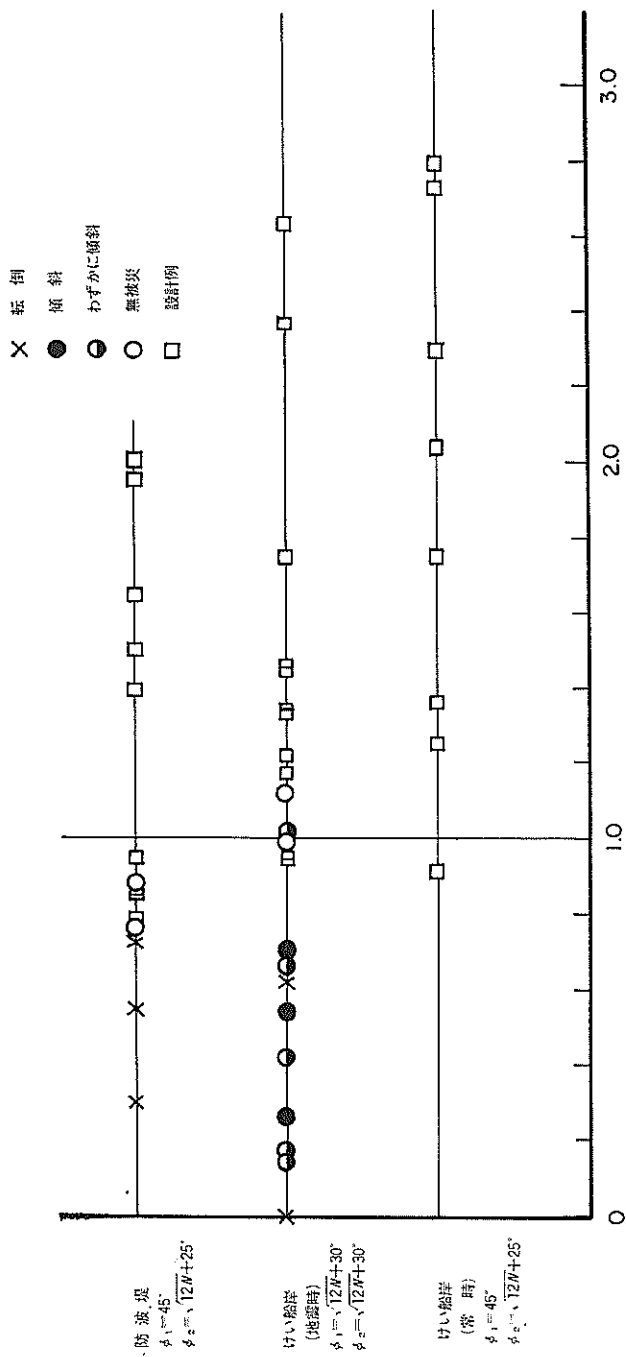


図-63 被災例および設計例の安全率

中間部ケーソン

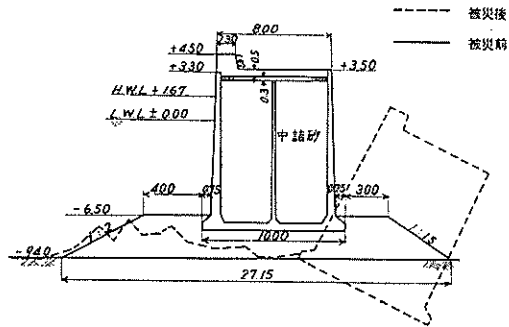


図-64 神戸港長田港区防波堤の6420号台風による被災状況図

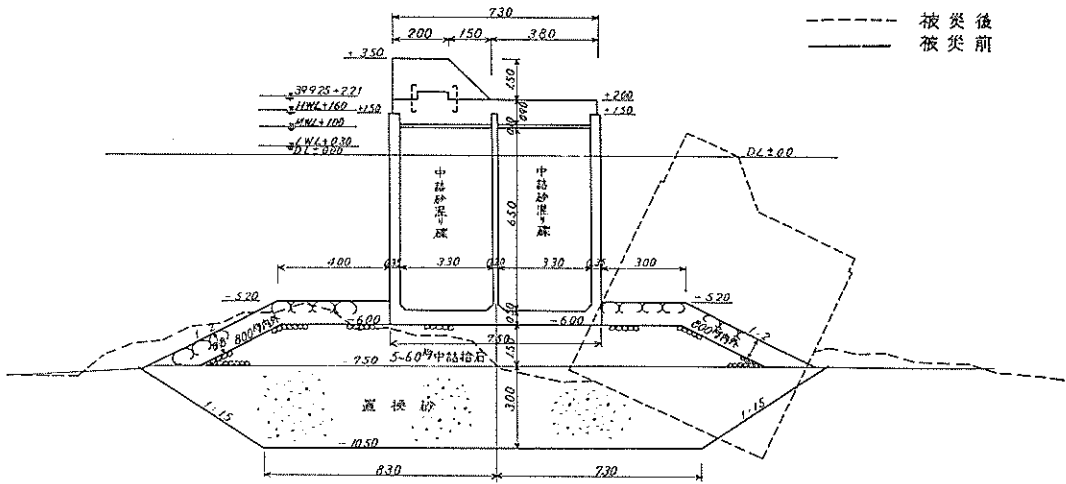


図-65 始路港飾磨港区東防波堤の6420号台風による被災状況図

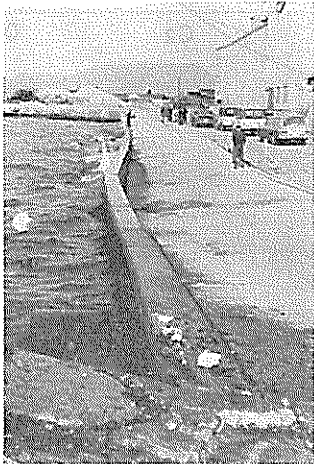


写真-1 青森港堤&頭消波護岸の1968年十勝沖地震による壁体の傾斜



写真-2 野辺地港 -3.0m 物揚場の1968年十勝沖地震による壁体の傾斜

に示した。なお、けい船岸の地震時の内部摩擦角は、通常の土圧計算に用いられる内部摩擦角より 10° 大きくした値を、その他の場合は 5° 大きくした値を用いている。この図-63によれば、震害例に対する安全率の大きさと被災程度は、他の方法と同様ならずとも一致していないが、まったくの無被災例は、いずれも安全率 $0.8\sim 1.0$ 以上となり、同時に図示したいくつかの設計例とも矛盾は生じていないので、本計算法は実用設計計算法として十分使用できるものと思われる。また、設計に用いる安全率については、現行の設計基準に示されている値、すなわち常時 1.0 および異常時 1.0 を用いるのが適当と思

われる。

なお、被災の状況についてみると、波による防波堤の被災と、地震によるけい船岸の被災ではいちじるしく異なった様相を呈している。防波堤の場合は比較的高い安全率にもかかわらず完全に転倒しているものが普通であり、けい船岸の場合は安全率がかなり低くても軽度の前傾にとどまったものが多い。このように防波堤とけい船岸に差が生じた原因としては、外力の作用機構、とくに作用時間の相違、外力算定法の相違、裏込めの有無の影響などが考えられる。なお、図-64および図-65に防波堤の波による被災の実例³⁾を示し、写真-1および写真-2に

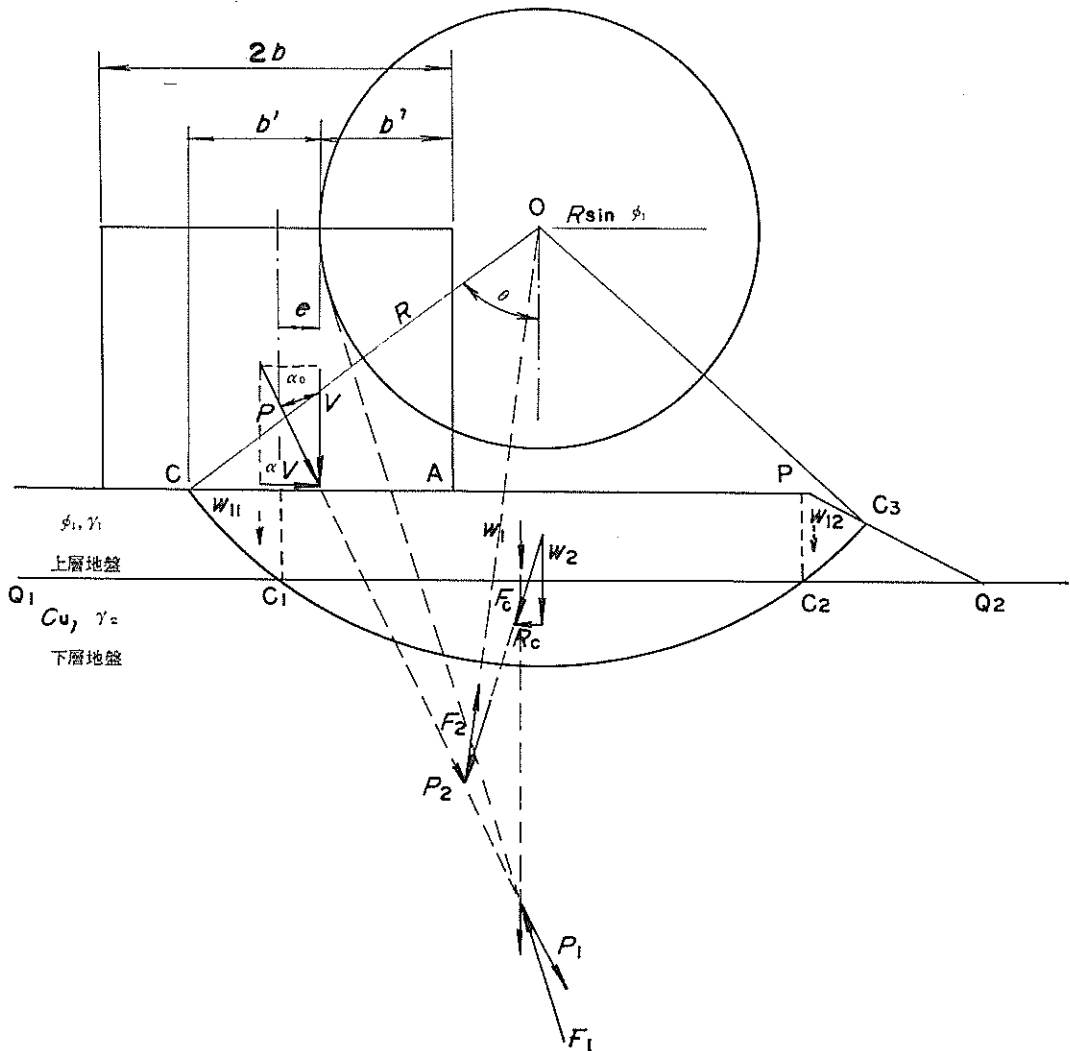


図-66 上層砂質土、下層粘性土の場合の計算法

けい船岸の地震による被災の実例¹⁴⁾を示した。

8. 下層地盤が粘性土である場合への適用

本資料においては、上層、下層ともに砂質土の場合について述べたが、下層地盤が粘性土である場合には、図-66のようにすべり土塊重量 W_2 のかわりに、すべり土塊重量 W_2 と粘着力によるせん断抵抗力 R_c の合力 F_c を用い、粘性土の内部摩擦角をゼロとして、摩擦円法を適用すれば支持力の計算は可能である。ただし、このような場合についての被災例はほとんどなく、また設計例も少ないため、粘性土層のせん断抵抗力の計算に用いる土のせん断パラメーター、および安全率の提案はできない。

9. あとがき

本資料においては、偏心傾斜荷重を受ける二層系砂質土地盤上の基礎の支持力を求める計算法を提案し、計算図表を作成したが、本資料の計算法における内部摩擦角としては、けい船岸の地震時には、通常の土圧計算に用いられる内部摩擦角よりも 10° 大きくした値、その他の場合は 5° 大きくした値を用いる。この場合の安全率は、現行の港湾構造物設計基準に示されている常時 1.0、異常時 1.0 を用いるのが適当と思われる。また、近似式を用いた場合には、危険側の誤差を考慮して、安全率は 1.2 程度を用いばよからう。

なお、本計算法においては、地盤の内部摩擦角の推定法および外力の作用機構等の持つ問題点をそのままにして、地盤の内部摩擦角を操作することによって、計算結果を被災例などに合わせているという問題点を含んでおり、現象との適合性も確かめられてはいない。今後、これらの問題点が模型実験などによって解決されることを願ってやまない次第である。

本資料作成にあたって、たびたび有益な助言を下さった中瀬明男土性研究室長および三建法について御教示下さった第三港湾建設局の本浩司工事専門官に謝意を表するとともに、既設構造物などについての解析は、一部、七尾港工事事務所次長堀井修身氏（元設計基準課）の行った作業の結果を用いたことをここに述べ、謝意を表する。

参考文献

- 1) 運輸省港湾局編，“港湾構造物設計基準”，日本港湾協会，1967，p. 5-1-10～p. 5-1-16
- 2) 梅原靖文，“マウンドの偏心傾斜荷重に対する安

定”，設計基準課資料，No. 12，1965

- 3) 中瀬明男・小林正樹，“偏心傾斜荷重を受ける粘性土地盤上の基礎の支持力”，港湾技術研究所報告，Vol. 9，No. 2，1970
- 4) 立石哲郎・福家竜男・須田照，光本司，“傾斜偏心荷重を受ける帯状基礎の支持力に関する研究”，運輸技術研究所報告，Vol. 12，No. 1，1962
- 5) 運輸省港湾局編，“港湾構造物設計基準”，日本港湾協会，1967，p. 8-3-5
- 6) 運輸省港湾局編，“港湾構造物設計基準”，日本港湾協会，1967，p. 5-1-2～p. 5-1-4
- 7) 沖野教郎，“自動設計(8)”，機械の研究，第21巻，第12号，1969，p. 81～p. 84
- 8) 熊谷三郎編，“システムズ エンジニヤリング入門”，オーム社，1962，p. 77～p. 88
- 9) 米沢慎吾，“統計解析”，日本情報処理開発センター，1968，p. 1～p. 19
- 10) 運輸省港湾局編，“港湾構造物設計基準”，日本港湾協会，1967，p. 5-1-1～p. 5-1-2
- 11) G. G. Meyerhof，“The Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Slopes”，Géotechnique，II-4，1951
- 12) 片山猛雄・中野拓治・蓮見隆・山口孝市，“1968年十勝沖地震などの被災例による現行設計法の検討”，港湾技術研究所資料，No. 93，1969
- 13) 第三港湾建設局，“第6420号台風に関する調査”，第三港湾建設局，1965
- 14) 運輸省港湾局・港湾技術研究所・第二港湾建設局・北海道開発局港湾部，“1968年十勝沖地震—港湾被災報告—津波調査報告”，運輸省港湾技術研究所，1968

記号表

- B ; 基礎幅 (m)
 b ; 基礎幅の $\frac{1}{2}$ (m)
 a ; 基礎の前端よりのり肩までの距離 (m)
 d ; 根入れ深さ (m)
 h ; 基礎底面から下層地盤の表面までの距離 (m)
 e ; 荷重の偏心量 (m)
 $b' = (b - e)$ (m)
 ε ; 偏心率 $\varepsilon = e/b$
 α_0 ; 荷重が鉛直となす角度 (度)
 α ; 荷重の傾斜率 $\alpha = \tan \alpha_0$
 β ; 斜面のこう配

$$\xi = a/b$$

$$\delta = d/b$$

$$\eta = h/b$$

$$G = 2(1-\varepsilon) + \xi$$

R ; すべり円の半径 (m)

$$r = R/b$$

θ ; すべり面の始点と中心を結ぶ線分が鉛直となす角度 (ラジアン)

m_i ; i 土塊の重心からすべり円の中心までの水平距離 (m)

$$m'_i = m_i/R$$

P ; 偏心傾斜荷重 (t)

P_i ; 偏心傾斜荷重の分力 (t)

V ; 偏心傾斜荷重の鉛直成分 (t)

V_i ; 偏心傾斜荷重の鉛直成分の i 土塊に関する分力 (t)

V' ; 基礎に加わる荷重の鉛直成分 (t)

F_i ; すべりに抵抗する摩擦力の i 土塊に関する合力 (t)

R_c ; 粘着力によるせん断抵抗力 (t)

F_c ; すべり面より上の土塊の重量と粘着力によるせん断抵抗力の合力 (t)

W_i ; i 土塊の重量 (t)

M_{si} ; すべりモーメント (t-m)

M_{ri} ; 抵抗モーメント (t-m)

γ_i ; i 地盤の土の単位体積重量 (t/m³)

$$\gamma' = \gamma_2/\gamma_1$$

ϕ_i ; i 地盤の土の内部摩擦角 (度)

N' ; 根入れのない水平二層系地盤における支持力係数

κ ; 補正係数

q ; 極限支持力 (t/m²)

N ; 支持力係数

F ; 安全率

なお、添字 i が 1 の場合は上層における値を、2 の場合は下層における値を示す。

付録1. 設計例および被災例における各パラメータのひん度分布

設計例および被災例より求めた $\alpha, \varepsilon, \delta, \eta, \xi, \beta$ のひん度分布を付図-1～付図-6に示した。

ここに、

α : 荷重の傾斜率

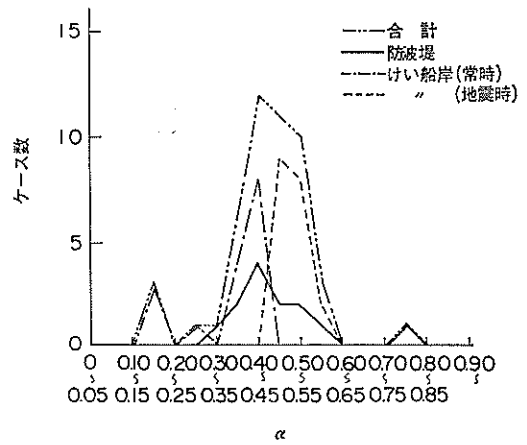
ε : 荷重の偏心量を基礎幅の $\frac{1}{2}$ で割った値

δ : 根入れ深さを基礎幅の $\frac{1}{2}$ で割った値

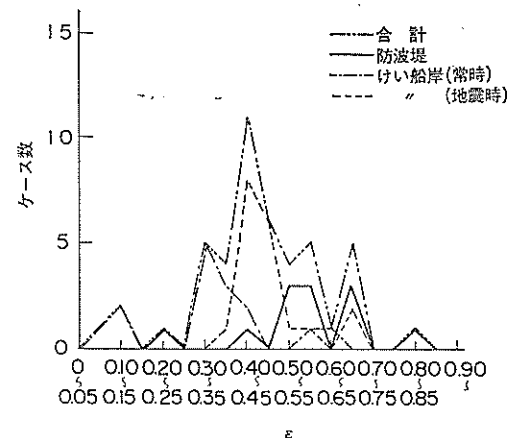
η : 基礎底面から下層地盤の表面までの距離を基礎幅の $\frac{1}{2}$ で割った値

ξ : 基礎の前端より右の肩までの距離を基礎幅の $\frac{1}{2}$ で割った値

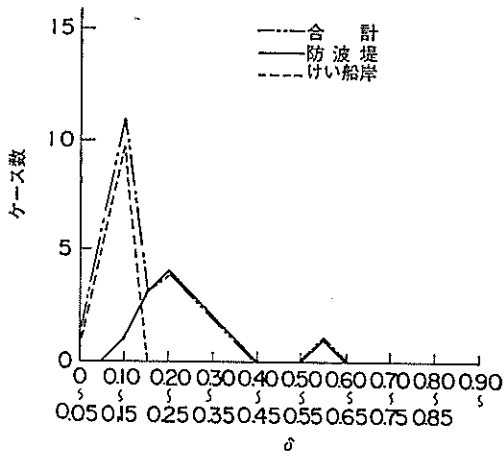
β : 斜面のこう配



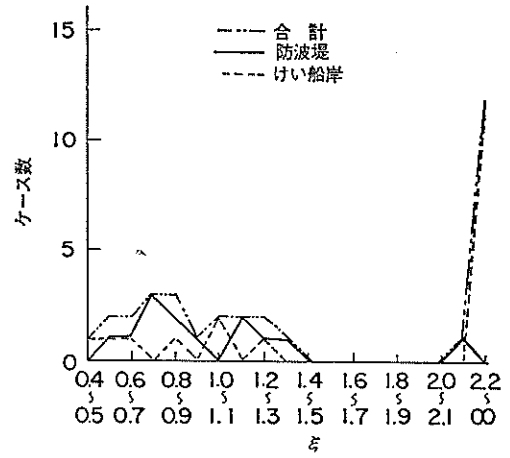
付図-1 設計例および被災例における α のひん度分布



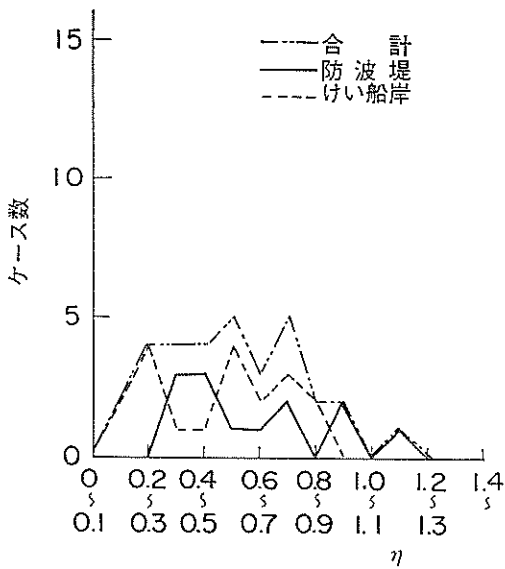
付図-2 設計例および被災例における ε のひん度分布



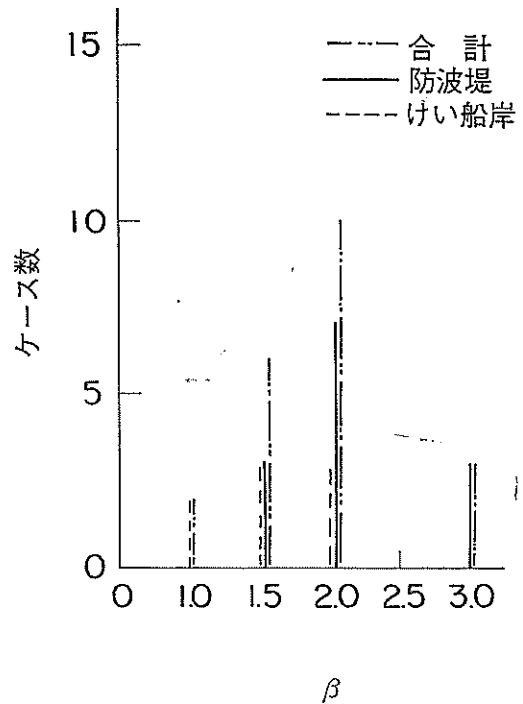
付図-3 設計例および被災例における δ のひん度分布



付図-5 設計例および被災例における ξ のひん度分布



付図-4 設計例および被災例における η のひん度分布



付図-6 設計例および被災例における β のひん度分布

付録2. 電子計算機によって支持力係数を求める
場合のインプットデータおよびコーディ
ングの方法

(1) インプットデータおよびコーディングの方法
インプットデータおよびコーディングの方法は、付図
-7の通りである。

10	20	30	40	50	60	70	80	
n	(I 10)							
ケース名								(10A8)
B	e	a	d	h	α	β	ϕ_1	(8F10.0)
ϕ_2	γ_1	γ_2	V'					(4F10.0)

(ケース数が2以上のときは、ケース名以下をケ
ース数だけ繰返す)

付図-7

ここに、

- n : ケース数
- B : 基礎幅 (m)
- e : 荷重の偏心量 (m)
- a : 基礎の前端よりのり肩までの距離 (m)
- d : 根入れ深さ (m)
- h : 基礎底面から下層地盤の表面までの距離 (m)
- α : 荷重の傾斜率
- β : 斜面のこう配
- ϕ_1 : 上層地盤の土の内部摩擦角 (度)
- ϕ_2 : 下層地盤の土の内部摩擦角 (度)
- γ_1 : 上層地盤の土の単位体積重量 (t/m^3)
- γ_2 : 下層地盤の土の単位体積重量 (t/m^3)
- V' : 基礎に加わる荷重の鉛直成分 (t)

(2) アウトプット

計算の結果としてアウトプットされるものは、付表-1
の通りである。

付表-1

ライブラリに 打出される記 号	本資料に用いた 記号 (単位)	記号の意味
B	b (m)	基礎幅の $\frac{1}{2}$
BD	b' (m)	b から荷重の偏心量 (e) を引いた値
EPSILON	ϵ	偏心量 (e) を b で割った値
XI	ξ	基礎の前端よりのり肩までの距離 (a) を b で割った値
DELTA	δ	根入れ深さ (d) を b で割った値
ETA	η	基礎底面から下層地盤の表面までの距離 (h) を b で割った値
R	r	すべり円の半径 (R) を b で割った値
THETA	θ (度および分)	すべり面の始点と中心を結ぶ線分が鉛直となす角度
N	N	支持力係数
FS	F	安全率
GBG	γ'	下層地盤の土の単位体積重量(γ_2)を上層地盤の土の単位体積重量(γ_1) で割った値

(3) 制限条件

ケース数は100以下であること

(4) 演算時間

1ケースの平均演算時間は1分である。

港湾技研資料 No. 140

1972・6

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 第一印刷所