土木学会論文報告集
第 215 号・1973 年 7 月

地震時受働土圧係数

PASSIVE EARTH PRESSURE COEFFICIENTS DURING EARTHQUAKE

市原松平*・森　信夫**
By Matsuhei Ichihara and Nobuo Mori

1. まえがき

受働土圧の算定は擁壁，矢板壁，ピヤー基礎などの安定解析において，また構造物の支持力の問題において重要である。

しかしながら，受働土圧を求めることは一般に主働土圧を求めるよりもやっかいである。その理由は実験が示すように，受働時のすべり面は主働時のそれと異なって，明確な曲面を描くためである。われわれは現在壁摩擦角 δ としてかなりの大きさの値を期待しながらも，$\delta=0$ として常時ならびに地震時の受働土圧の算定を行なっている。この原因の帰するところは，われわれの手許に曲線すべり面による土圧係数表がないためである。

そこで筆者らは直線よりも，より合理的な曲線すべり面によって，常時ならびに地震時の受働土圧を算定することにした。曲線すべり面による常時の受働土圧の算定はかなり古い時代から研究されて実用に供されている。以下その主なる研究を示すと次のようになる。

Kötter (1888 年)[1]，Müller-Breslau (1906 年)[2]，Reissner (1909 年)[2]，安蔵 (1939 年)[3] らは過渡領域の問題を塑性論的に解決した。Kötter とほとんど同じときに Schwedler (1887 年) は，はじめてすべり面を対数ら線と仮定して，受働土圧の研究を行なったと報告されている[2]。また Kármán (1926 年) は平衡条件式に Mohr-Coulomb の破壊条件を入れて，級数展開によってすべり面の曲線形状を把握し，壁面に作用する主働土圧を求めた[4]。特にこれは壁摩擦角を $\delta=\varphi$ とおいて算定したことに特色をもっている。この方法はもちろん受働土圧の算定にも使用される。円弧すべり面を仮定し壁面土圧のうち土体のつり合い式を満足させる最小値を受働土圧と考えて，土圧を計算する方法は Fellenius (1927 年) によってはじめて行なわれた[1),2)]。これはもちろん内部摩擦のない土，あるいは安定解析で $\varphi=0$ とおく場合に適用される。Krey (1936 年)[5]，Ohde (1938 年)[2),6)] はそれぞれ円弧すべり面と直線すべり面，対数ら線と直線すべり面を複合させて，受働土圧問題を解明させている。Caquot と Kerisel (1949 年) は受働土圧の研究のために，すべり土塊内の応力を差分法で求めて，受働土圧係数の表を作成したと報告されている[2]。

近代に入って，Sokolovski (1960 年)[7] は上述の Kármán の方法をさらに進展させ，差分法を用いて土圧と支持力問題を解明し，土圧係数表を示している。最近，Mayer-Vorfelder (1970 年)[2] は対数ら線と直線で表現される複合すべり面を用いて，内部摩擦角 $\varphi=40°$ に対して詳細な受働土圧係数表を与えている。

上述したように地震時受働土圧を曲線すべり面で求めたものはない。筆者らはまず，すべり面を対数ら線と直線からなる複合すべり面と仮定して地震時土圧を求め，次にソコロフスキーの方法を地震時に拡張して土圧を求めた。土体のつり合い条件ならびに壁面とランキン領域の両端末において，すべり面が満足されなくてはならない境界条件を考えると，その合理性において前者の対数ら線法は後者のソコロフスキー法にはおよばない。

この研究では，壁摩擦角，内部摩擦角，擁壁の形状を変化させて，対数ら線法，ソコロフスキー法，直線すべり面法（物部地震時土圧）による地震時受働土圧係数 K_{PE} とすべり面の形状の比較を行なった。その際，これら3者の差は壁摩擦角を増大させるにしたがって明りょうにあらわれた。K_{PE} は地震力によって影響されるが，上述した3者のおのおのの適用できる限界は壁摩擦角，壁面ならびに基礎地盤土の傾角によって支配されることを明らかにした。なお水で飽和された砂の場合には土の単位体積重量として，水中重量を使用すれば空中震度注)に対応した有効土圧が決定される。

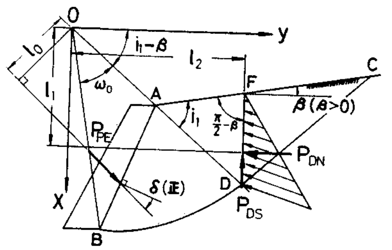
* 正会員　工博　名古屋大学教授　工学部土圧研究施設
** 正会員　工修　清水建設（株）研究所

2. すべり面の一部を対数ら線としたときの受働土圧

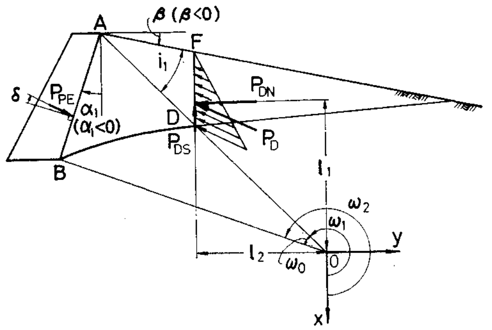
（1） 計算の方法

擁壁や矢板壁の場合に，受働土圧は壁体の前面の根入れ部に沿って，壁体の変位に抵抗して発生するものであるが，ここでは受働土圧に関する計算法の説明のために，**図—1** の壁体の右側を基礎地盤と考え，壁体が右方に変位し，壁体と基礎地盤との接する面（線）に受働土圧が発生すると考える。またこのときの地震力は壁体から基礎地盤側に向って水平に作用すると考える。壁の変位により基礎地盤土が塑性平衡状態に移行し，**図—1** に示すようなすべり面 BDC が壁体の下端点 B より発生する。ここではすべり面の一部をなす曲線 BD 区間を対数ら線，DC 区間を直線と仮定して受働土圧を求める。

図—1 の △ADC 区間はランキン領域で，線分 AD は $+m$ すべり面，DC は $-m$ すべり面となる。対数ら線の極 O が線分 AD の A 点より上方延長線上に位置するときは対数ら線は下方に向って凸なる曲線となり，線分 AD の D 点より下方延長線上に位置するときは対数ら線は **図—2** に示すように下方に向って凹なる曲線となる。また両図でそれぞれ D 点を通る鉛直線と地表面との交点を F とすると，鉛直面 FD には地震時ランキン系の受働土圧が作用する。



図—1 下方に向って凸なる対数ら線



図—2 下方に向って凹なる対数ら線

注）地上で想定した震度で，水中震度に対応する語である。水平加速度が作用する場合，水中震度 k' と，空中震度 k との間には $k'=k\cdot\gamma_{sat}/(\gamma_{sat}-1)$ なる関係がある。ここに $k=\tan\theta_0$ であり，γ_{sat} は飽和土の単位体積重量である。

いま両図で地震時に壁の前面の基礎地盤土がすべり面 BDC に沿って破壊するとすれば，すべり面 BD 区間の下部に位置する基礎地盤土からの全反力 R は極 O を通るから，壁面に作用する受働土圧 P_{PE} の極 O のまわりの回転モーメントは土塊 ABDF 区間に作用する重力と地震力ならびに鉛直面 FD に作用する上述の土圧によるいずれも O 点のまわりの回転モーメントとつり合うことになる。すなわち

$$P_{PE}\cdot l_0=M \quad \cdots\cdots(1)$$

l_0 は極 O から P_{PE} の作用線までの距離

上式 (1) の右辺のモーメント M の回転方向は左辺のモーメントの回転方向と逆になるようにとればよい。**図—1** の場合には，

$$M=-M_1+M_2+M_3+M_4 \quad \cdots\cdots(2)$$

とおくと，この右辺の各モーメント $M_1\cdots\cdots M_4$ は時計まわりとして算定する。**図—2** の場合には

$$M=M_1-M_2+M_3+M_4 \quad \cdots\cdots(3)$$

とおくと，この右辺の各モーメントは反時計まわりとして算定する。

ここに，

M_1：△OBA を土塊とみなしたとき，これに作用する重力と地震力による O 点のまわりの回転モーメント

M_2：扇形 BOD を土塊とみなしたとき，これに作用する重力と地震力による O 点のまわりの回転モーメント

M_3：△ADF の土塊に作用する重力と地震力による O 点のまわりの回転モーメント

M_4：土中の鉛直面 FD に作用する地震時受働土圧による O 点のまわりの回転モーメント

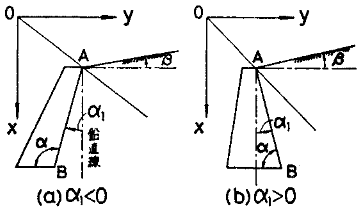
$$M_4=l_1P_{DN}+l_2P_{DS} \quad \cdots\cdots(4)$$

ここに，P_{DN}, P_{DS} はそれぞれ鉛直面 $\overline{FD}$ に作用する垂直土圧ならびにせん断力である。P_{DN} は正であるが，P_{DS} は後述するように正負の符号をもっている。P_{DS} が **図—1,2** のように上方に向って作用する場合が負の値をとる。なお l_1, l_2 はそれぞれ **図—1** に示すように原点 O から上記両力の作用線までの距離である。

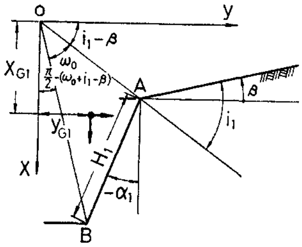
以下の回転モーメント $M_1, \cdots\cdots M_4$ の計算では土の単位体積重量 γ を $\gamma=1$ として算定する。座標の原点を極 O にとり **図—1** のように $x-y$ 座標を定める。

受働土圧は式 (1) を満足させる最小の P_{PE} で決定する。また地震時受働土圧係数は次式で求める。

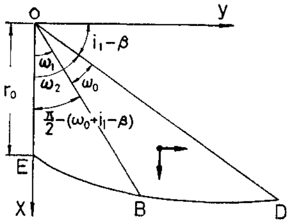
$$P_{PE}=\left(\frac{1}{2}\gamma H^2+qH\right)\frac{K_{PE}}{\sin\alpha\cos\delta} \quad \cdots\cdots(5)$$



図—3　壁の背面の傾角 α_1 の符号



図—4　△OBA の各辺長の決定



図—5　下方に向って凸なる対数ら線における M_2 の決定

上式で $r=1$，載荷重 $q=0$ とおくと，図—3 から

$$K_{PE}=\frac{2P_{PE}}{H_1^2}\cdot\frac{\cos\delta}{\cos\alpha_1}\cdots\cdots\cdots\cdots(6)$$

ここに，　H_1：壁の前面の基礎地盤土に接する長さ

α_1：壁の前面の鉛直面に対する傾角

図—3 (a) のように壁の前面が鉛直面からはかって反時計まわりに α_1 だけ傾斜している場合が $\alpha_1>0$，時計まわりにはかって α_1 だけ傾斜している場合が $\alpha_1<0$ である。

（2） すべり面 BD が下方に向って凸な対数ら線の場合

a） M_1 の算定

図—4 で壁の前面 $\overline{AB}$ の長さを H_1，基礎地盤てんば面の水平面に対する傾角を β（図—4 では $\beta>0$），すべり面 OA と基礎地盤てんば面との交角を i_1，$\angle AOB=\omega_0$ とおくと，△OBA の各辺長は

$$\left.\begin{aligned}\overline{AB}&=H_1\\ \overline{OA}&=\frac{\cos(\omega_0+i_1-\beta+\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1\\ \overline{OB}&=\frac{\cos(\beta-i_1-\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(7)$$

三角形の各頂点の座標は次のようになる。

O : (0, 0)

A : $\{\overline{OA}\sin(i_1-\beta),\ \overline{OA}\cos(i_1-\beta)\}$

B : $\{\overline{OB}\sin(\omega_0-\beta+i_1),\ \overline{OB}\cos(\omega_0-\beta+i_1)\}$

△OBA の重心の座標 (x_{G1}, y_{G1}) は

$$x_{G1}=1/3\cdot\{\overline{OA}\sin(i_1-\beta)+\overline{OB}\sin(\omega_0-\beta+i_1)\}$$

$$y_{G1}=1/3\cdot\{\overline{OA}\cos(i_1-\beta)+\overline{OB}\cos(\omega_0-\beta+i_1)\}$$

△OBA の面積を S_{OBA} とすると，

$$S_{OBA}=1/2\cdot(\overline{OA}\cdot\overline{OB}\sin\omega_0)$$

$$M_1=S_{OBA}(y_{G1}-\tan\theta_0\cdot x_{G1})\cdots\cdots(8)$$

θ_0 は式 (26) に与えられるから，M_1 は ω_0 のみの関数として与えられる。

b） M_2 の算定

対数ら線を次式で表わす。

$$r=r_0e^{\omega\tan\varphi}\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

ここに，ω は 図—5 の x 軸から反時計まわりにはかった角度が正であり，r_0 は動径 r の x 軸上の長さである。M_2 は次式で与えられる。

$$M_2=M_x-M_y\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

ここに

$$M_x=\int ydA=\int_{\omega_1}^{\omega_2}\frac{2}{3}r\sin\omega\cdot\frac{1}{2}r^2d\omega$$

$$=\frac{1}{3}\int_{\omega_1}^{\omega_2}r^3\sin\omega\,d\omega$$

したがって，M_x, M_y は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}M_x&=\frac{1}{3}r_0^3\frac{1}{1+9f^2}[e^{3\omega f}(3f\sin\omega-\cos\omega)]_{\omega_1}^{\omega_2}\\ M_y&=\frac{1}{3}r_0^3\frac{1}{1+9f^2}[e^{3\omega f}(3f\cos\omega+\sin\omega)]_{\omega_1}^{\omega_2}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(11)$$

ここに $f=\tan\varphi$

$$\left.\begin{aligned}\omega_1&=\angle BOE=\pi/2-(\omega_0+i-\beta)\\ \omega_2&=\pi/2-(i-\beta)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(12)$$

また $\overline{OB}=r_0e^{(\pi/2-\omega_0-i_1+\beta)f}$ より

$$r_0=\frac{\cos(\beta-i_1-\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1e^{(\omega_0+i_1-\beta-\pi/2)f}\cdots\cdots(13)$$

M_2 も M_1 と同じように ω_0 のみの関数で与えられる。

c） M_3 の算定

図—1 より

$$\overline{AD}=\overline{OD}-\overline{OA}$$

$$\overline{OD}=\overline{OB}\,e^{\omega_0f}=\frac{\cos(\beta-i_1-\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1e^{\omega_0f}$$

したがって，

$$\left.\begin{aligned}\overline{AD}&=\{\cos(\beta-i_1-\alpha_1)e^{\omega_0f}\\ &\quad-\cos(\omega_0+i_1-\beta+\alpha_1)\}H_1/\sin\omega_0\\ \overline{AF}&=\frac{\cos(i_1-\beta)}{\cos\beta}\overline{AD}\\ \overline{FD}&=\frac{\sin i_1}{\cos\beta}\overline{AD}\end{aligned}\right\}\quad(14)$$

△ADF の各頂点の座標

A : $\{\overline{OA}\sin(i_1-\beta),\ \overline{OA}\cos(i_1-\beta)\}$

D : $\{\overline{OD}\sin(i_1-\beta),\ \overline{OD}\cos(i_1-\beta)\}$

F : $\{\overline{OD}\sin(i_1-\beta)-\overline{FD},\ \overline{OD}\cos(i_1-\beta)\}$

△ADF の重心 (x_{G3}, y_{G3})

$$x_{G3}=1/3\cdot[(2\overline{OD}+\overline{OA})\sin(i_1-\beta)-\overline{FD}]$$

$$y_{G3}=1/3\cdot[(2\overline{OD}+\overline{OA})\cos(i_1-\beta)]$$

△ADF の面積 S_{ADF}

$$S_{\mathrm{ADF}}=1/2\cdot\overline{\mathrm{AD}}\cdot\overline{\mathrm{AF}}\sin i_1$$

$$=\frac{1}{2}\overline{\mathrm{AD}}^2\frac{\cos(i_1-\beta)}{\cos\beta}\cdot\sin i_1$$

$$M_3=S_{\mathrm{ADF}}(y_{G3}-\tan\theta_0\cdot x_{G3}) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(15)$$

d) M_4 の算定

M_4 は式 (3) に与えられる。**図—1** より

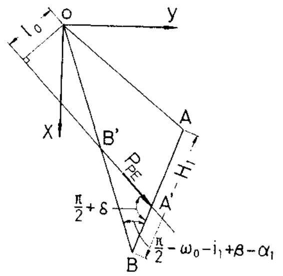
$$\left.\begin{aligned} l_1&=\overline{\mathrm{OD}}\sin(i_1-\beta)-1/3\cdot\overline{\mathrm{FD}} \\ l_2&=\overline{\mathrm{OD}}\cos(i_1-\beta) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(16)$$

$\overline{\mathrm{OD}}$ は M_3 に関連して示されている。

P_{DN}, P_{DS} は次節に示す。

e) 受働土圧の作用線の O 点からの距離 l_0 の算定

受働土圧は壁の下端から壁高 H の 1/3 の点に作用する。**図—6** の △B′BA′ より，



図—6 原点から受働土圧合力の作用線までの距離 l_0 の決定（下方に向って凸な曲線）

$$\overline{\mathrm{BB'}}=\frac{1}{3}H_1\frac{\cos\delta}{\sin(\omega_0+i_1-\beta+\alpha_1-\delta)}$$

図より

$$l_0=(\overline{\mathrm{OB}}-\overline{\mathrm{BB'}})\sin(\omega_0+i_1-\beta+\alpha_1-\delta)\cdots\cdots(17)$$

$\overline{\mathrm{OB}}$ は式 (7) に示される。

以上の結果を式 (1) に代入し，ω_0 を変化させて，P_{PE} の最小値を求める。

(3) すべり面 BD が下方に向って凹なる対数ら線の場合

a) M_1 の算定

図—2 の △ABO の各辺長

$$\overline{\mathrm{AB}}=H_1$$

$$\left.\begin{aligned} \overline{\mathrm{AO}}&=\frac{\cos(i_1-\beta+\alpha_1-\omega_0)}{\sin\omega_0}H_1 \\ \overline{\mathrm{BO}}&=\frac{\cos(i_1-\beta+\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots(18)$$

図—2 では $\beta<0$ であることに注意を要する。

△ABO の重心

$$x_{G1}=-1/3\cdot\{\overline{\mathrm{AO}}\sin(i_1-\beta)+\overline{\mathrm{BO}}\sin(i_1-\beta-\omega_0)\}$$

$$y_{G1}=-1/3\cdot\{\overline{\mathrm{AO}}\cos(i_1-\beta)+\overline{\mathrm{BO}}\cos(i_1-\beta-\omega_0)\}$$

△ABO の面積 S_{ABO}

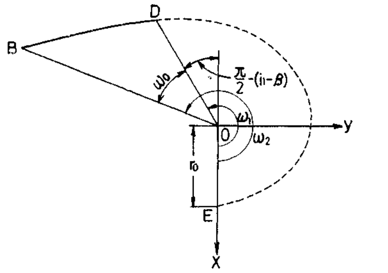
$$S_{\mathrm{ABO}}=1/2\cdot\overline{\mathrm{AO}}\cdot\overline{\mathrm{BO}}\sin\omega_0$$

$$M_1=S_{\mathrm{ABO}}\{|y_{G1}|-\tan\theta_0|x_{G1}|\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(19)$$

b) M_2 の算定

対数ら線ならびに M_2 をそれぞれ式 (9), (10) のようにおく。M_x, M_y は式 (11) のそれぞれの式で与えられる。

ω_1, ω_2, r_0 は **図—7** を参照して次式で与えられる。



図—7 下方に向って凹なる対数ら線における M_2 の決定

$$\left.\begin{aligned} \omega_1&=3\pi/2-i_1+\beta \\ \omega_2&=3\pi/2-i_1+\beta+\omega_0 \\ r_0&=\frac{\cos(i_1-\beta+\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1e^{(i_1-\beta-\omega_0-3\pi/2)f} \end{aligned}\right\} \cdots(20)$$

c) M_3 の算定

図—2 の △ADF の各辺長

$$\overline{\mathrm{AD}}=\overline{\mathrm{AO}}-\overline{\mathrm{DO}}$$

ここに

$$\left.\begin{aligned} \overline{\mathrm{DO}}&=\frac{\cos(i_1-\beta+\alpha_1)}{\sin\omega_0}H_1e^{-\omega_0 f} \\ \overline{\mathrm{FD}}&=\frac{\sin i_1}{\cos\beta}\overline{\mathrm{AD}} \\ \overline{\mathrm{AF}}&=\frac{\cos(i_1-\beta)}{\cos\beta}\overline{\mathrm{AD}} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots(21)$$

△ADF の重心 (x_{G3}, y_{G3})

$$x_{G3}=-1/3\cdot\{(\overline{\mathrm{AO}}+2\,\overline{\mathrm{DO}})\sin(i_1-\beta)+\overline{\mathrm{FD}}\}$$

$$y_{G3}=-1/3\cdot(\overline{\mathrm{AO}}+2\,\overline{\mathrm{DO}})\cos(i_1-\beta)$$

△ADF の面積 S_{ADF}

$$S_{\mathrm{ADF}}=\frac{1}{2}\overline{\mathrm{AD}}^2\frac{\cos(i_1-\beta)}{\cos\beta}\sin i_1$$

$$M_3=S_{\mathrm{ADF}}\cdot(|y_{G3}|-\tan\theta_0|x_{G3}|) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(22)$$

d) M_4 の算定

式 (4) に代入する l_1, l_2 の長さは **図—2** を参照して次式で与えられる。

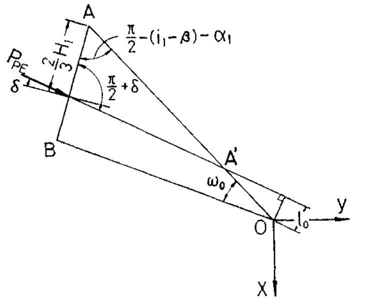
$$\left.\begin{aligned} l_1&=\overline{\mathrm{DO}}\sin(i_1-\beta)+1/3\cdot\overline{\mathrm{FD}} \\ l_2&=\overline{\mathrm{DO}}\cos(i_1-\beta) \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(23)$$

$\overline{\mathrm{DO}}$ は式 (21) に与えられる。

e) 受働土圧の作用線の原点 O からの距離 l_0 の算定

図—8 より

$$\overline{\mathrm{AA'}}=\frac{2}{3}H_1\frac{\cos\delta}{\sin(i_1-\beta+\alpha_1-\delta)}$$



図―8 原点から受働土圧合力の作用線までの距離 l_0 の決定（下方に向って凹な曲線）

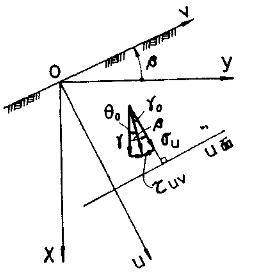
$$\overline{\mathrm{A'O}}=\overline{\mathrm{AO}}-\overline{\mathrm{AA'}}$$

$$l_0=\overline{\mathrm{A'O}}\sin(i_1-\beta+\alpha_1-\delta)\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(24)$$

$\overline{\mathrm{AO}}$ は式 (18) に与えられる。

(4) 土中の鉛直面 FD に作用する地震時受働土圧とすべり面の傾角

地震時ランキン領域の応力とすべり面の考察をするために，図―9 のように直交座標 u-v をとり，またこの座標の原点 O を通って鉛直に x 軸を，水平に y 軸をとる。なお前節に示した鉛直面 FD は x 軸と一致していると考える。



図―9 地震時ランキン領域の応力の説明図

u 面に作用する応力は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_u&=\gamma_0 u\cos\beta_0\\ \tau_{uv}&=-\gamma_0 u\sin\beta_0\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(25)$$

ここに $\tan\theta_0=a/g$

$$\left.\begin{aligned}\gamma_0&=\gamma/\cos\theta_0\\ \beta_0&=\beta-\theta_0\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(26)$$

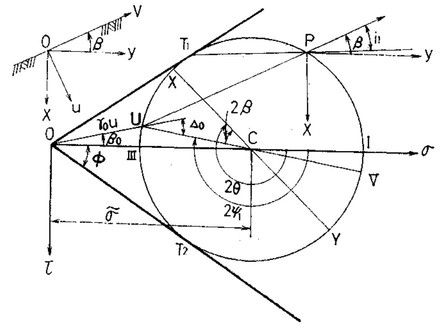
a：地震時の水平加速度で，地震時の受働土圧を常時のそれよりも減少させる方向に作用する場合が正である。

塑性平衡状態で次式が成立する。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_u&=\tilde{\sigma}(1+\sin\varphi\cos 2\psi_1)\\ \sigma_v&=\tilde{\sigma}(1-\sin\varphi\cos 2\psi_1)\\ \tau_{uv}&=-\tilde{\sigma}\sin\varphi\sin 2\psi_1\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(27)$$

ここに $\tilde{\sigma}$ は 図―10 に示した Mohr の円でクーロンの破壊包絡線の交点からはかった円の中心までの距離をあらわす。また ψ_1 は最大主応力面からはかった u 面までの角度で，反時計まわりが正である。

式 (25),(27) における σ_u と τ_{uv} をそれぞれ等しいとおくと，



図―10 地震時受働状態の応力を示すモールの円

$$\sin(2\psi_1-\beta_0)-\sin\Delta_0=0\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(28)$$

ただし，

$$\sin\Delta_0=\frac{\sin\beta_0}{\sin\varphi}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(29)$$

$$|\Delta_0|\leq\pi/2$$

式 (28) を満足させる ψ_1 のうち，図―10 の受働状態の Mohr の円に適する値は次式で表わされる。

$$2\psi_1=\beta_0-\Delta_0-\pi\quad\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(30)$$

式 (25),(27) における τ_{uv} を等しいとおくことにより，次の関係を得る。

$$\tilde{\sigma}=\gamma_0 u\frac{\sin\Delta_0}{\sin 2\psi_1}$$

この右辺に式 (29),(30) の関係を代入すると，

$$\tilde{\sigma}=\frac{\gamma_0 u}{\cos^2\varphi}(\cos\beta_0+\sqrt{\cos^2\beta_0-\cos^2\varphi})\quad\cdots\cdots(31)$$

x-y 座標に関して応力は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_x&=\tilde{\sigma}(1+\sin\varphi\cos 2\theta)\\ \sigma_y&=\tilde{\sigma}(1-\sin\varphi\cos 2\theta)\\ \tau_{xy}&=-\tilde{\sigma}\sin\varphi\sin 2\theta\end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(32)$$

ここに θ は最大主応力面からはかった x 面までの角度で，図―10 の Mohr の円からわかるように，θ は次式で表わされる。

$$\theta=\psi_1-\beta=1/2\cdot(\beta_0-\Delta_0)-\beta-\pi/2\cdots\cdots\cdots\cdots(33)$$

$y=0$ なる面上では $u=x\cos\beta$ であるから，この関係を式 (31) の右辺に代入し，かつ γ_0 に対して式 (26) を用いると，

$$\tilde{\sigma}=\frac{\gamma x\cos\beta}{\cos^2\varphi\cos\theta_0}(\cos\beta_0+\sqrt{\cos^2\beta_0-\cos^2\varphi})$$
$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(34)$$

なお $y=0$ なる面の応力すなわち 図―1,2 の鉛直面 $\overline{\mathrm{FD}}$ に作用する土圧は式 (33) の θ を式 (32) に代入して次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_y&=\tilde{\sigma}\{1+\sin\varphi\cos(\beta+\theta_0+\Delta_0)\}\\ \tau_{yx}&=-\tau_{xy}=\tilde{\sigma}\sin\varphi\sin(\beta+\theta_0+\Delta_0)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(35)$$

$\tilde{\sigma}$ は式 (34) に与えられる。

いま鉛直面上深さ $\overline{\mathrm{FD}}$ なる位置の垂直応力，せん断

応力を σ, τ とすると，

$$\left.\begin{aligned}\sigma&=\sigma_y(x=\overline{\mathrm{FD}})\\ \tau&=\tau_{yx}(x=\overline{\mathrm{FD}})\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(36)$$

鉛直面 $\overline{\mathrm{FD}}$ に作用する地震時受働土圧合力の垂直分力ならびにせん断力は

$$\left.\begin{aligned}P_{DN}&=1/2\cdot\overline{\mathrm{FD}}\cdot\sigma\\ P_{DS}&=1/2\cdot\overline{\mathrm{FD}}\cdot\tau\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(37)$$

$\overline{\mathrm{FD}}$ は式 (14) または式 (21) に与えられている。

P_{DS} の正負の決定として次のように考えられる。

$$\left.\begin{aligned}\pi>\beta+\Delta_0+\theta_0\geqq 0\\ 0\geqq\beta+\Delta_0+\theta_0>-\pi\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(38)$$

上式の第1式が成立するときは式 (35) より $P_{DS}\geqq 0$，第2式が成立するときは $P_{DS}\leqq 0$ となる。

前述したように，基礎地盤土の受働状態で **図―1** または **図―2** のすべり面 AD は $+m$ すべり面となる。**図―10** に示す Mohr の円で，応力点 U から v 軸に平行な直線を引いて Mohr の円と再び交わる点が Pole P となる。直線 PT_1 が $+m$ すべり面の方向を与える。このすべり面と地盤表面との交角を i_1 とすると，i_1 は **図―10** の Mohr の円から次式で表わされる。

$$i_1=1/2\cdot(\beta_0-\Delta_0)+\mu\cdots\cdots(39)$$

ここに $\mu=\pi/4-\varphi/2$

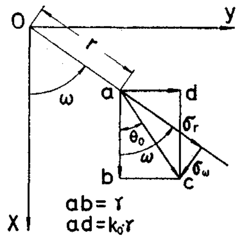
なおこのすべり面の鉛直線（x 軸）に対する角度を α_2 とおくと，α_2 は次式で与えられる。

$$2\alpha_2=\varphi+\pi/2+\beta+\theta_0+\Delta_0\cdots\cdots(40)$$

3. ソコロフスキーの方法による地震時受働土圧

ソコロフスキーは $c=0$ の基礎地盤土に対して，$\tilde{\sigma}$ は基礎地盤てんば面からの深さに比例して大きくなると仮定して，静的の主働ならびに受働土圧を求めた[6]。この土圧の計算法を地震時受働土圧で行なうためのつり合い方程式は次のようになる。なお極座標 (r, ω) で表示するための座標を **図―11** に示す。

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\sigma_r}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{r\omega}}{\partial\omega}+\frac{\sigma_r-\sigma_\omega}{r}&=\gamma_0\cos(\omega-\theta_0)\\ \frac{\partial\tau_{r\omega}}{\partial r}+\frac{1}{r}\frac{\partial\sigma_\omega}{\partial\omega}+\frac{2\tau_{r\omega}}{r}&=-\gamma_0\sin(\omega-\theta_0)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(41)$$



図―11 地震時地盤内の応力の極座標表示

上式は **図―11** からわかるように，地震力が y 軸の正の方向に向って作用する場合である。$\theta_0\geqq 0$ であるが，地震力が y 軸の負の方向に作用する場合は，$\theta_0<0$ として考える。

塑性平衡状態の応力は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\sigma_r&=\tilde{\sigma}(1+\sin\varphi\cos 2\psi)\\ \sigma_\omega&=\tilde{\sigma}(1-\sin\varphi\cos 2\psi)\\ \tau_{r\omega}&=-\tilde{\sigma}\sin\varphi\sin 2\psi\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(42)$$

ここに ψ は最大主応力面からはかった r 面までの角度で，反時計まわりを正とする。前述した ψ_1, θ と ψ との関係は次のようになる。

$$\psi=\theta+\omega=\psi_1-\beta+\omega\cdots\cdots(43)$$

ψ と $\tilde{\sigma}$ に対してソコロフスキーにならって，次に示す S なる関数を導入する。ψ も S も ω のみの関数である。

$$\left.\begin{aligned}\psi&=\psi(\omega)\\ \tilde{\sigma}&=\gamma_0 r\,S(\omega)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(44)$$

式 (41),(42) より，

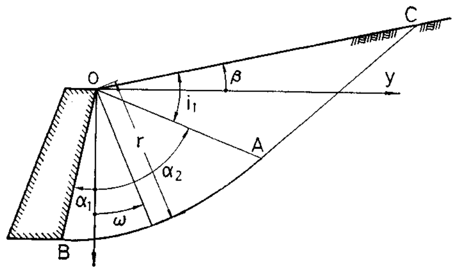
$$\left.\begin{aligned}\frac{dS}{d\omega}&=\frac{\sin\{2\psi-(\omega-\theta_0)\}-S\sin 2\psi}{\cos 2\psi-\sin\varphi}\\ \frac{d\psi}{d\omega}-1&=\frac{\cos(\omega-\theta_0)-\sin\varphi\cos\cdot\{2\psi-(\omega-\theta_0)\}-S\cos^2\varphi}{-2S\sin\varphi(\cos 2\psi-\sin\varphi)}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(45)$$

上式は **図―12** の基礎地盤土が，すべり面 BAC に沿ってせん断破壊をするときに，曲線で与えられるすべり面 BA に沿う S と ψ の変化を表わす。△OAC で表わされる領域はランキンの受働領域（直線すべり面の領域）であり，これに関しては前述した **2.(4)** に示している。したがってすべり面 OA に沿う θ, ψ, ω, S は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\theta&=1/2\cdot(\beta_0-\Delta_0)-\beta-\pi/2\\ \psi&=-\mu=-(\pi/4-\varphi/2)\\ \omega&=\alpha_2=1/2\cdot(\varphi+\pi/2+\beta+\theta_0+\Delta_0)\\ \sin\Delta_0&=\sin\beta_0/\sin\varphi\\ S&=\frac{\cos(\alpha_2-\beta)}{\cos^2\varphi\cos\beta_0}(1-\lambda)\\ \lambda&=\sin^2\beta_0-\cos\beta_0\sqrt{\sin^2\varphi-\sin^2\beta_0}\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(46)$$

次に **図―12** の壁面の OB 線に作用する受働土圧の壁摩擦角 δ は **図―1** の場合と同じように，受働土圧が壁面の法線に対して，下方から作用する場合を $\delta>0$ とする。OB 線上の θ, ψ, ω, S は次式で与えられる。

$$\left.\begin{aligned}\theta&=1/2\cdot(\delta+\Delta'-\pi)-\alpha_1\\ \sin\Delta'&=\sin\delta/\sin\varphi\\ \psi&=1/2\cdot(\delta+\Delta'-\pi)\end{aligned}\right\}\cdots\cdots(47)$$



図—12 ソコロフスキー法の計算説明図

$$\left.\begin{array}{l} S=S_0 \\ \omega=\alpha_1 \end{array}\right\}$$

ここに α_1 は 図—12 に示すように壁の背面の傾角をあらわすことは対数ら線の場合と同じである。

いま ω, φ, S を OA 線上と OB 線上で比較すると，OA 線上ではこれら 3 者はいずれも既知であり，OB 線上では $S=S_0$ のみが未知で，他の ω と ψ は既知である。したがって S_0 をまず仮定して，次の漸化式を用いて OA 線上の S と ψ を求め，これら求めた値が OA 線上の式 (46) に示すそれぞれの値と合致するまで計算を繰返す。

$$\left.\begin{array}{l} S_{i+1}=S_i+\dfrac{\sin(2\psi_i-\omega_i+\theta_0)-S_i\sin 2\psi_i}{\cos 2\psi_i-\sin\varphi}\varDelta\omega \\ \psi_{i+1}=\psi_i+\left\{\dfrac{\cos(\omega_i-\theta_0)-\sin\varphi\cos}{-2Si\sin\varphi}* \right. \\ \qquad \left. *\dfrac{(2\psi_i-\omega_i+\theta_0)-S_i\cos^2\varphi}{(\cos 2\psi_i-\sin\varphi)}+1\right\}\varDelta\omega \end{array}\right\} \cdots\cdots(48)$$

このように決定された S_0 の値から地震時受働土圧係数 K_{PE} は次式によって求める。

$$K_{PE}=\frac{S_0\cos\delta(\cos\delta+\sqrt{\sin^2\varphi-\sin^2\delta})}{\cos\theta_0\cos\alpha_1}\cdots(49)$$

また壁の下端から発生するすべり面を決定するための動径 r は次式から求める。

$$r=r_1\exp\left[-\int_{\alpha_1}^{\omega}\cot(\psi-\mu)\,d\omega\right]\cdots\cdots(50)$$

上式で ψ が ω に対して変化せず一定であれば，上式の示す曲線は対数ら線になる。しかるに ψ は ω に対して変化するので，式 (50) の曲線は対数ら線にはならない。この式の右辺は数値積分で求める。

なお式 (46), (47) の θ の大小を比較することによって，次の 3 つの場合があることがわかる。

$$\left.\begin{array}{l} 2\alpha_1<\delta+\varDelta'+\beta+\theta_0+\varDelta_0 \\ 2\alpha_1=\delta+\varDelta'+\beta+\theta_0+\varDelta_0 \\ 2\alpha_2>2\alpha_1>\delta+\varDelta'+\beta+\theta_0+\varDelta_0 \end{array}\right\}\cdots\cdots(51)$$

すべり面 BD の形状は上式の第 1 式が成立するときは下方に向って凸なる曲線，第 2 式が成立するときは直線，第 3 式が成立するときは下方に向って凹なる曲線となる。しかしながら第 3 式が成立するときは土中に不連続線が生ずる。ここにはその解法は示していない。なお $\alpha_1\geqq\alpha_2$ の場合には，壁面は土中のランキン領域内にあるものとみなすと，土圧は容易に求められる。

式 (51) によるすべり面の形状の判定は，厳密には対数ら線には適用できない。なんとなれば，対数ら線で与えられるすべり面は壁面における境界条件，式 (47) を満足させているとは限らないためである。しかしながら，両曲線の形状の近似性から考えて対数ら線によるすべり面の形状をこれで判定すると非常に都合がよい。

4. 対数ら線による計算結果と他の方法との比較

(1) 土圧係数 K_{PE}

以下対数ら線，ソコロフスキーの方法，物部土圧式から地震時受働土圧係数 K_{PE} やすべり面を求める方法をそれぞれ対数ら線法，ソコロフスキー法，物部法と略記する。

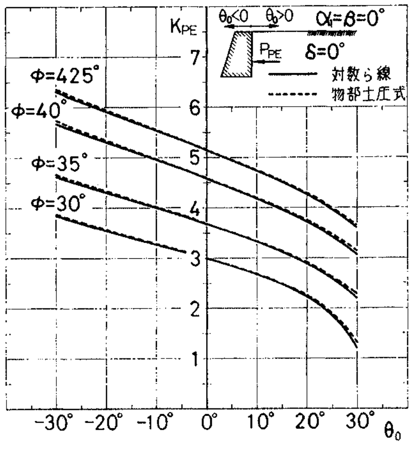
ここで述べる対数ら線法では K_{PE} の極小値を与えるための ω_0 の決定では，$\varDelta\omega=0.2°$ ピッチにとった。またソコロフスキー法では OB 線から出発して求めた OA 線上の ψ と S の計算値は式 (46) に示す OA 線上の ψ ならびに S と比較して小数点以下 4 桁まで合致させるようにして求めた。なお計算に用いた漸化式の $\varDelta\omega$ は $\delta=1/2\cdot\varphi$ では $\alpha_2-\alpha_1$ を 1 000 分割，$\delta=2/3\cdot\varphi$，$\delta=\varphi$ では 3 000 分割して求めた。

以下壁摩擦角 δ によってわけて K_{PE} を示す。まず $\delta=0$ では対数ら線法と物部法による K_{PE} が比較される。$\delta=\pm1/2\cdot\varphi$, $\delta=2/3\cdot\varphi$ では対数ら線法に対して物部法，ソコロフスキー法の 3 者が比較される。$\delta=\varphi$ では対数ら線に対してソコロフスキー法が比較される。

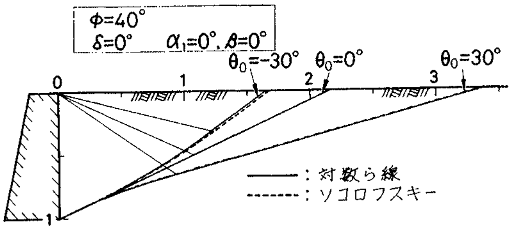
a) $\delta=0$ の場合

$\delta=0$, $\alpha_1=\beta=0$ の場合，対数ら線法と物部法による K_{PE} の比較は 図—13 に示される。両者による K_{PE} は $\theta_0=0$ の場合のみ合致し，θ_0 の絶対値が大きくなると，わずかな差が生ずる。この理由は 図—14 の θ_0 に対応するすべり面をみればわかる。θ_0 の絶対値が大きくなると，すべり面が湾曲してくる。これらのすべり面は対数ら線法とソコロフスキー法で描いたものである。

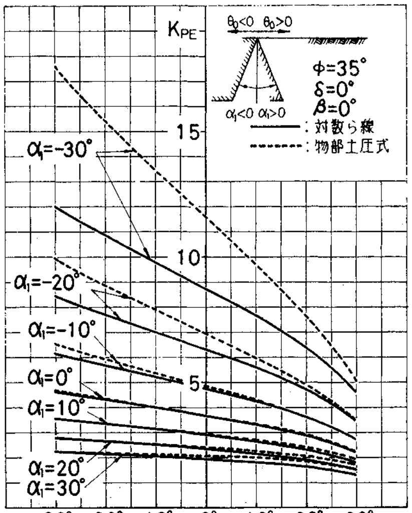
同じく $\delta=0$ ではあるが，α_1, β のいずれかが 0 でないときは，図—15, 16 に示すように，α_1 が小になるほど，また β が大になるほど物部法による K_{PE} は対数ら線法による値よりも大きくなる。図—15 の $\varphi=35°$, $\alpha_1=-30°$, $\theta_0=20°$ では，物部法による K_{PE} は対数ら線法に比して 27% も大きく，図—16 の $\varphi=35°$, $\beta=30°$, $\theta_0=20°$ では物部法は対数ら線法より 39% も大き



図—13 $\alpha_1=\beta=0$ のとき，対数ら線法と物部法の K_{PE} の比較 ($\delta=0$)



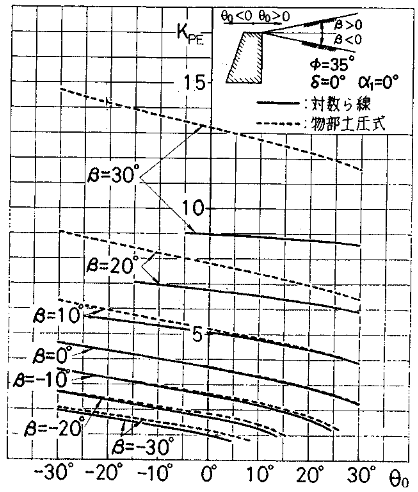
図—14 $\delta=0$, $\alpha_1=\beta=0$ で地震力が作用した場合のすべり面を対数ら線法，ソコロフスキー法で求めたもの



図—15 $\delta=0$, $\beta=0$, α_1 を変化させたとき，対数ら線法と物部法の K_{PE} の比較

い。また同じ φ と θ_0 で $\beta=20°$ では対数ら線より 10 % も大きい。なお 図—16 に対数ら線法で計算されない区域があるのは $|\sin \Delta_0|>1$ となるためである。

b) $\delta=\pm 1/2\cdot\varphi$, $\delta=2/3\cdot\varphi$ の場合

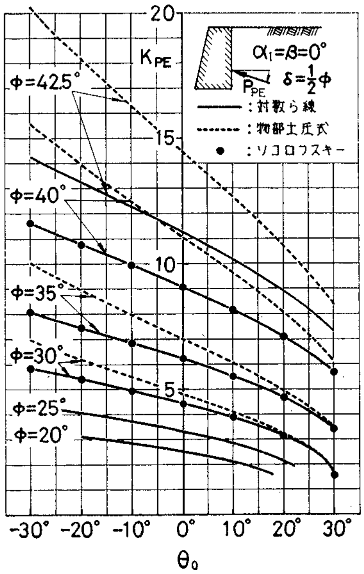


図—16 $\delta=0$, $\alpha_1=0$, β を変化させたとき，対数ら線法と物部法の K_{PE} の比較

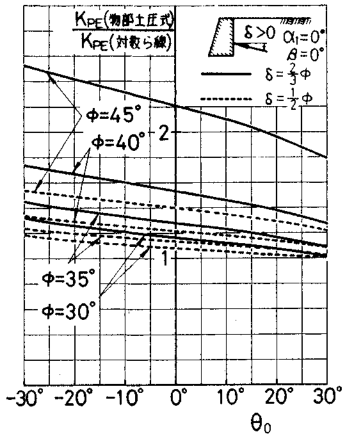
最初に $\delta=1/2\cdot\varphi$, $\alpha_1=\beta=0$ の簡単な場合について示す。表—1 に K_{PE} と ω_0 を示している。ω_0 はすべり面を描くために必要である。この K_{PE} を図示したものが 図—17 である。対数ら線法による K_{PE} がソコロフスキー法による値とよくあっているのは，後述するように，この場合すべり面が近似しているためである。

表—1 $\alpha_1=\beta=0$, $\delta=1/2\,\phi$ のとき，対数ら線法で求めた K_{PE} と ω_0

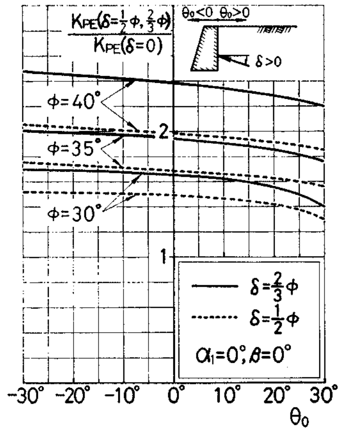
θ_0	K_{PE}, ω_0 (単位 度) \ ϕ	20°	25°	30°	35°	40°	42.5°
−30°	ら線 K_{PE}	—	—	5.865	8.078	11.632	14.257
	ら線 ω_0	—	—	58.8	43.4	39.9	39.1
	ソコロフスキー K_{PE}			5.833	8.064	11.611	
−20°	ら線 K_{PE}	3.098	4.048	5.404	7.459	10.764	13.215
	ら線 ω_0	60.2	41.1	37.0	35.2	34.7	34.7
	ソコロフスキー K_{PE}			5.401	7.455	10.754	
−10°	ら線 K_{PE}	2.833	3.696	4.947	6.851	9.933	12.227
	ら線 ω_0	31.7	30.0	29.6	30.1	30.8	31.5
	ソコロフスキー K_{PE}			4.945	6.848	9.929	
0°	ら線 K_{PE}	2.520	3.308	4.458	6.220	9.089	11.234
	ら線 ω_0	35.0	22.3	24.0	25.7	27.6	28.7
	ソコロフスキー K_{PE}			4.456	6.219	9.086	
10°	ら線 K_{PE}	2.114	2.840	3.896	5.520	8.174	10.166
	ら線 ω_0	10.1	14.7	18.4	21.5	24.4	27.2
	ソコロフスキー K_{PE}			3.895	5.518	8.173	
20°	ら線 K_{PE}	—	2.173	3.175	4.667	7.099	8.927
	ら線 ω_0	—	4.7	11.8	16.8	20.9	22.6
	ソコロフスキー K_{PE}			3.173	4.666	7.098	
30°	ら線 K_{PE}	—	—	1.567	3.432	5.675	7.330
	ら線 ω_0	—	—	(7.2)	9.4	16.1	18.6
	ソコロフスキー K_{PE}			1.563	3.432	5.674	



図—17 $\delta=1/2\,\phi$, $\alpha_1=\beta=0$ のとき，対数ら線法による K_{PE}（物部法，ソコロフスキー法の値も示している）



図—18 $\alpha_1=0$, $\beta=0$ のとき，対数ら線法と物部法の K_{PE} の比較（$\delta=1/2\,\phi$, $\delta=2/3\,\phi$）



図—19 対数ら線法による K_{PE} の δ による比較（$\alpha_1=\beta=0$）

なお同じく $\alpha_1=\beta=0$ で $\delta=2/3\cdot\varphi$ の場合を **表—2** に示した。$\delta=1/2\cdot\varphi$, $\delta=2/3\cdot\varphi$ で物部法による K_{PE} は対数ら線法による値の何倍になるかを一括して示したのが **図—18** である。これから δ が増加すると，この比は増加することがわかる。一例を示すと，$\delta=1/2\cdot\varphi=20°$, $\theta_0\geqq20°$ で，前者は後者よりも 10%～20% 大きく，同じ条件で $\delta=2/3\cdot\varphi=26.7°$ では 30%～50% 大きい。

ここで特筆すべきことは，**図—18** の $\alpha_1=\beta=0$ では θ_0 が大きくなるにしたがって，曲線が右下りになっていることである。すなわち θ_0 が大きくなるにしたがって，物部法による K_{PE} は対数ら線法による値に接近する。この理由は後述する両者によるすべり面の比較でわかる。

なお対数ら線法で計算した K_{PE} そのものが δ に応じてどのように変化するかを一目でわかるようにしたものが **図—19** である。δ の増加により K_{PE} は $\delta=0$ の場合に比して $\theta_0\geqq0$, $\delta=1/2\cdot\varphi=20°$ では 1.8 倍～2.0 倍，$\delta=2/3\cdot\varphi=26.7°$ では 2.2 倍～2.4 倍に達することになる。

擁壁の受働土圧の算定では，$\delta=1/2\cdot\varphi$ は重要である。そのために α_1 または β のいずれかが0でない場合の対数ら線法による K_{PE} を $\theta_0\geqq0$ に対して示すと，**表—3, 4** のようになる。これらの表でかっこ内に示した ω_0 は下方に向って凹なる曲線における値を示す。

さらにまた α_1 も β もともに0でない場合の一例として，$\delta=1/2\cdot\varphi=20°$ で $\beta=20°$ の場合の K_{PE} を示すと **図—20** のようになる。**図—21** はこれに対応する ω_0 を示す。この場合ソコロフスキー法との比較が示されているが，$\theta_0\geqq0$ ではその差の最大値は $\alpha_1=-30°, \theta_0=0°$ で 2.0% であり，θ_0 が大きくなるとこの差は小になる。

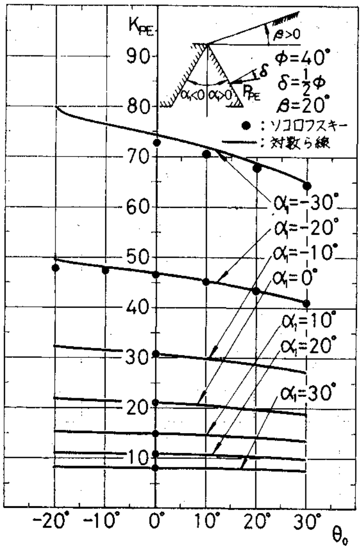
このように α_1 が小になり，β が大きくなるにしたがって，$\alpha_2-\alpha_1$ が増大し対数ら線法とソコロフスキー法による K_{PE} の差は大になる。両者の差は他の条件が同じ場合に δ によっても異なる。ここに壁摩擦角 δ は α_2

表—2 $\alpha_1=\beta=0$, $\delta=2/3\,\phi$ のとき，対数ら線法で求めた K_{PE} と ω_0

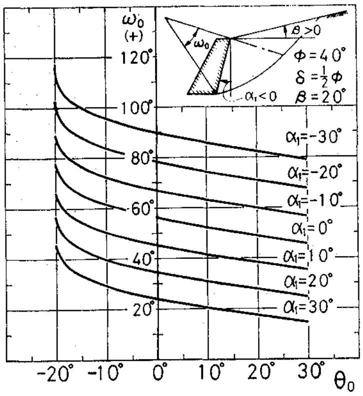
θ_0	ϕ / K_{PE}, ω_0（単位 度）	30°	35°	40°	42.5°
−30°	ら線 K_{PE}	6.510	9.313	14.030	17.677
	ら線 ω_0	64.4	50.4	47.7	47.7
	ソコロフスキー K_{PE}			14.013	
−20°	ら線 K_{PE}	6.017	8.598	12.981	16.384
	ら線 ω_0	43.6	42.4	42.7	43.1
	ソコロフスキー K_{PE}			12.952	
−10°	ら線 K_{PE}	5.499	7.887	11.967	15.149
	ら線 ω_0	36.6	37.5	39.0	39.9
	ソコロフスキー K_{PE}			11.953	
0°	ら線 K_{PE}	4.943	7.147	10.935	13.903
	ら線 ω_0	31.0	33.5	36.0	37.3
	ソコロフスキー K_{PE}	4.939	7.138	10.922	13.869
10°	ら線 K_{PE}	4.037	6.324	9.814	12.561
	ら線 ω_0	25.8	29.3	32.8	42.6
	ソコロフスキー K_{PE}			9.814	
20°	ら線 K_{PE}	3.490	5.325	8.497	11.003
	ら線 ω_0	19.2	24.6	29.3	31.4
	ソコロフスキー K_{PE}			8.486	
30°	ら線 K_{PE}	1.688	3.883	6.755	8.995
	ら線 ω_0	1.6	17.1	24.7	27.6
	ソコロフスキー K_{PE}			6.750	

表—3 α_1 を変化させたときの対数ら線法で求めた K_{PE} と ω_0 ($\beta=0$, $\delta=1/2\,\phi$)

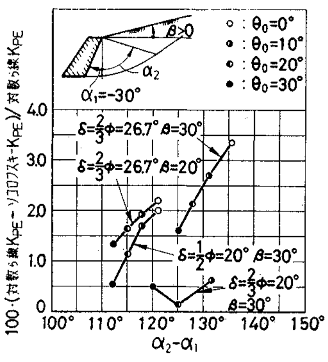
ϕ, δ	θ_0	K_{PE}, ω_0 (単位 度) \ α_1	$-30°$	$-20°$	$-10°$	0	10°	20°	30°
$\phi=30°$ $\delta=\frac{1}{2}\phi$ $\beta=0$	0°	ら 線 K_{PE}	10.122	7.493	5.712	4.458	3.547	2.867	2.340
		ら 線 ω_0	54.4	44.0	34.0	24.0	13.8	3.4	(8.0)
	10°	ら 線 K_{PE}	8.662	6.456	4.957	3.896	3.122	2.542	2.098
		ら 線 ω_0	48.4	38.2	28.4	18.4	8.4	(2.2)	(14.0)
	20°	ら 線 K_{PE}	6.837	5.151	3.997	3.175	2.569	2.110	1.758
		ら 線 ω_0	41.0	31.2	21.4	11.8	1.6	(9.4)	(22.4)
	30°	ら 線 K_{PE}	3.025	2.375	1.912	1.567	1.304	1.107	1.000
		ら 線 ω_0	21.6	12.4	3.0	(7.2)	(19.4)	(35.2)	(59.4)
$\phi=35°$ $\delta=\frac{1}{2}\phi$ $\beta=0$	0°	ら 線 K_{PE}	17.056	11.800	8.446	6.220	4.692	3.612	2.831
		ら 線 ω_0	56.9	46.3	36.1	25.7	15.5	4.9	(6.2)
	10°	ら 線 K_{PE}	14.895	10.350	7.451	5.520	4.190	3.247	2.561
		ら 線 ω_0	52.5	42.1	31.7	21.5	11.3	0.9	(10.6)
	20°	ら 線 K_{PE}	12.311	8.616	6.249	4.667	3.572	2.791	2.220
		ら 線 ω_0	47.2	36.8	26.8	16.8	6.6	(4.0)	(15.8)
	30°	ら 線 K_{PE}	8.667	6.152	4.528	3.432	2.664	2.109	1.702
		ら 線 ω_0	39.2	29.2	19.2	9.4	(0.6)	(11.8)	(25.0)
$\phi=40°$ $\delta=\frac{1}{2}\phi$ $\beta=0$	0°	ら 線 K_{PE}	31.044	19.863	13.213	9.089	6.440	4.683	3.485
		ら 線 ω_0	59.8	48.8	38.2	27.6	17.2	6.6	(4.4)
		ソコロフスキー K_{PE}	30.819						
	10°	ら 線 K_{PE}	27.598	17.711	11.827	8.174	5.823	4.260	3.191
		ら 線 ω_0	56.4	45.6	35.0	24.4	14.0	3.6	(7.6)
		ソコロフスキー K_{PE}	27.517						
	20°	ら 線 K_{PE}	23.592	15.205	10.207	7.099	5.092	3.753	2.832
		ら 線 ω_0	52.5	41.7	31.1	20.9	10.5	0.5	(11.2)
		ソコロフスキー K_{PE}	23.372						
	30°	ら 線 K_{PE}	18.367	11.925	8.077	5.675	4.115	3.065	2.339
		ら 線 ω_0	47.1	36.5	26.3	16.1	5.9	(4.8)	(16.4)
		ソコロフスキー K_{PE}	18.269						



図—20 $\beta=20°$, $\delta=1/2\ \phi=20°$, α_1 を変化させたときの K_{PE}



図—21 $\beta=20°$, $\delta=1/2\ \phi=20°$, α_1 を変化させたときの ω_0



図—22 $\delta\geqq2/3\ \phi$ の場合，対数ら線法による K_{PE} とソコロフスキー法による K_{PE} の差

$-\alpha_1$ に無関係の値である。図—22 は $\alpha_1=-30°$, $\beta=30°$, $\theta_0=0°\sim30°$ で $\delta=2/3\cdot\varphi=26.7°$, $\delta=2/3\cdot\varphi=20°$, $\delta=1/2\cdot\varphi=20°$ のそれぞれに対して，両方法による K_{PE} の差を百分率で表わしている。またこの図に $\alpha_1=-30°$, $\beta=20°$, $\theta=0°\sim30°$, $\delta=2/3\cdot\varphi=26.7°$ を併記している。これら4本の線から他の条件が同じで，δ,φ,β がそれぞれ変化した場合の両方法による K_{PE} の差の百分率を比較することができる。一例として δ が大きいほど両者の差は大になる。また次の重要なこともわかる。すなわち $\alpha_1\geqq-30°$, $\beta\leqq30°$, $\delta\leqq2/3\cdot\varphi$ で，$\alpha_2-\alpha_1\leqq136°$ に

表—4　β を変化させたときの対数ら線法で求めた K_{PE} と ω_0 ($\alpha_1=0,\ \delta=1/2\,\phi$)

ϕ, δ	θ_0	K_{PE} ω_0(単位 度) ＼ β	−30°	−20°	−10°	0°	10°	20°	30°
$\phi=30°$, $\delta=\frac{1}{2}\phi$, $\alpha_1=0$	0°	ら線 K_{PE}	—	1.863	3.008	4.458	6.168	8.170	—
		ら線 ω_0	—	(9.4)	8.4	24.0	39.8	57.6	—
	10°	ら線 K_{PE}	—	0.915	2.392	3.896	5.689	7.840	10.416
		ら線 ω_0	—	(35.2)	1.8	18.4	34.0	50.2	68.2
	20°	ら線 K_{PE}	—	—	1.183	3.175	5.088	7.397	10.236
		ら線 ω_0	—	—	(19.4)	11.8	28.4	44.2	60.6
	30°	ら線 K_{PE}	—	—	—	1.567	4.238	6.771	9.904
		ら線 ω_0	—	—	—	(7.2)	21.6	38.4	54.4
$\phi=35°$, $\delta=\frac{1}{2}\phi$, $\alpha_1=0$	0°	ら線 K_{PE}	—	2.464	4.038	6.220	9.040	12.640	17.188
		ら線 ω_0	—	(4.0)	11.5	25.7	40.5	56.2	75.6
	10°	ら線 K_{PE}	—	1.743	3.330	5.520	8.412	12.205	17.155
		ら線 ω_0	—	(11.8)	6.6	21.5	36.1	50.9	67.0
	20°	ら線 K_{PE}	—	—	2.418	4.667	7.650	11.638	16.985
		ら線 ω_0	—	—	(0.8)	16.8	31.7	46.5	61.5
	30°	ら線 K_{PE}	—	—	—	3.432	6.632	10.863	16.648
		ら線 ω_0	—	—	—	9.4	26.8	42.1	57.1
$\phi=40°$, $\delta=\frac{1}{2}\phi$, $\alpha_1=0$	0°	ら線 K_{PE}	1.754	3.211	5.613	9.089	14.012	20.882	30.377
		ら線 ω_0	(16.4)	0.3	14.2	27.6	41.4	56.1	72.5
	10°	ら線 K_{PE}	0.769	2.533	4.750	8.174	13.157	20.308	30.493
		ら線 ω_0	(36.8)	(4.8)	10.5	24.4	38.2	52.2	67.1
	20°	ら線 K_{PE}	—	1.094	3.700	7.099	12.144	19.573	30.451
		ら線 ω_0	—	(21.2)	5.9	20.9	35.0	48.8	63.2
	30°	ら線 K_{PE}	—	—	—	5.675	10.838	18.584	30.223
		ら線 ω_0	—	—	—	16.1	31.1	45.6	59.8

の擁壁で任意の δ に対する K_{PE} と ω_0 とを内挿法で決定できる。

c)　$\delta=\varphi$ の場合

地盤または土体内の平面すべり面に沿う受働土圧は $\delta=\varphi$ として算定される。図—23 は K_{PE} を，図—24 は ω_0 をいずれも同一の $\delta=\varphi=30°$, $\beta=0$ に対して示している。両図は数多くの α_1 に対する値を示しているので，われわれは任意の傾角をもつ壁面に作用する受働土圧を決定することができ，支持力の算定に便利である。

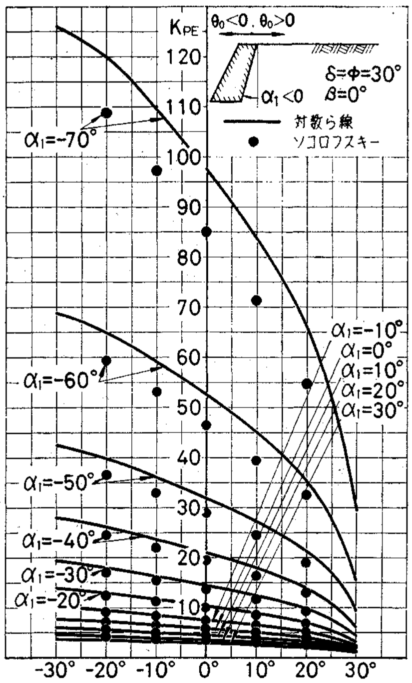
図—23 から両者による K_{PE} の比を求めると，図—25 のようになる。この図から同一 θ_0 で α_1 が小であるほど，この比は小であることがわかる。換言すると，$\theta_0=20°$, $\alpha_1=-70°$ ではソコロフスキー法による値は対数ら線法に比して 17% も小であり，$\alpha_1=-30°$ では 6% も小である。また $\alpha_1\geqq0$ では両者の差は 2% 以下である。

表—6 にはさらに $\delta=\varphi=35°$, $\delta=\varphi=40°$ に対する K_{PE} が一括して示されているが，両計算法による差は大きい。これに対しては両者による K_{PE} の差は最大 3.4% にすぎないということがわかる。これにより擁壁の受働土圧は対数ら線で求めても実用上差支えないことが明白である。

なお 表—5 に $\alpha_1=\beta=0,\ \delta=-1/2\cdot\varphi$ の場合，対数ら線法による K_{PE} と ω_0 を示している。δ を変化させた以上に示した表と，次に示す $\delta=\varphi$ の表から，$\alpha_1=\beta=0$

表—5　$\alpha_1=\beta=0,\ \delta=-1/2\,\phi$ のとき，対数ら線法で求めた K_{PE} と ω_0

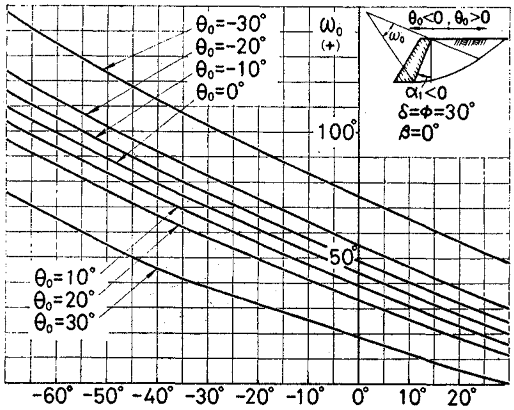
θ_0	K_{PE}, ω_0 ＼ ϕ	30°	35°	40°	42.5°
−30°	ら線 K_{PE}	—	2.190	2.298	2.344
	ら線 ω_0	—	(11.6)	(19.2)	(22.1)
−20°	ら線 K_{PE}	2.005	2.129	2.239	2.287
	ら線 ω_0	(14.2)	(19.8)	(24.0)	(25.9)
−10°	ら線 K_{PE}	1.916	2.044	2.160	2.213
	ら線 ω_0	(21.6)	(24.8)	(27.4)	(28.7)
0°	ら線 K_{PE}	1.803	1.938	2.065	2.124
	ら線 θ_0	(30.0)	(28.8)	(30.2)	(30.9)
10°	ら線 K_{PE}	1.656	1.805	1.947	2.015
	ら線 ω_0	(32.8)	(32.8)	(33.0)	(33.3)
20°	ら線 K_{PE}	1.433	1.623	1.792	1.873
	ら線 ω_0	(39.6)	(37.2)	(36.0)	(35.7)
30°	ら線 K_{PE}	—	1.323	1.559	1.665
	ら線 ω_0	—	(44.0)	(40.0)	(38.9)



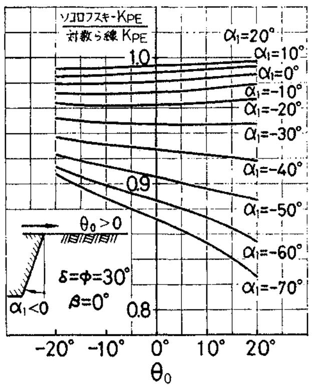
図—23　$\delta=\phi=30°$, $\beta=0$, α_1 を変化させたときの K_{PE}

表—6 $\delta=\phi$, $\beta=0$ のとき，α_1 に対する K_{PE} と ω_0 ($\phi=35°$, $\phi=40°$)

ϕ, δ	θ_0	K_{PE}, ω_0 (単位 度) \ α_1	−70°	−60°	−50°	−40°	−30°	−20°	−10°	0°	10°	20°	30°
$\phi=35°$ $\delta=35°$ $\beta=0°$	−30°	ら線 K_{PE}	307.917	156.422	89.632	55.041	35.447	23.696	16.344	11.553	8.340	6.132	4.582
		ら線 ω_0	132.8	121.4	110.8	100.6	90.6	81.0	71.6	62.4	53.4	44.6	36.2
	−20°	ら線 K_{PE}	287.298	145.269	82.928	50.785	32.652	21.817	15.059	10.661	7.714	5.690	4.267
		ら線 ω_0	124.4	113.6	103.0	93.0	83.2	73.6	64.4	55.2	46.4	37.8	29.4
		ソコロフスキー K_{PE}	258.325	131.033	75.514	46.878	30.603	20.742	14.481	10.358	7.563	5.618	
	−10°	ら線 K_{PE}	263.856	133.025	75.772	46.335	29.774	19.902	13.756	9.759	7.081	5.239	3.944
		ら線 ω_0	119.3	108.5	98.1	88.1	78.3	68.9	59.7	50.7	42.1	33.5	25.5
		ソコロフスキー K_{PE}	233.661	118.625	68.450	42.551	27.797	18.903	13.229	9.490	6.950	5.181	
	0°	ら線 K_{PE}	238.410	119.911	68.185	41.653	26.760	17.902	12.397	8.817	6.418	4.766	3.601
		ら線 ω_0	114.9	104.3	94.1	84.1	74.3	65.1	55.9	47.1	38.5	30.1	22.1
		ソコロフスキー K_{PE}	208.393	105.912	61.194	38.107	24.973	17.003	11.933	8.585	6.308	4.719	3.584
	10°	ら線 K_{PE}	209.579	105.165	59.703	36.441	23.414	15.685	10.890	7.772	5.679	4.235	3.214
		ら線 ω_0	110.7	100.1	89.9	79.9	70.3	61.1	52.1	43.3	34.9	26.7	19.1
		ソコロフスキー K_{PE}	180.720	91.984	53.244	33.226	21.832	14.908	10.498	7.582	5.593	4.200	
	20°	ら線 K_{PE}	174.174	87.170	49.397	30.127	19.367	13.004	9.067	6.503	4.778	3.584	2.735
		ら線 ω_0	105.6	95.2	85.0	75.0	65.6	56.6	47.8	39.2	30.8	23.0	15.6
		ソコロフスキー K_{PE}	147.65	75.315	43.714	27.369	18.054	12.384	8.763	6.361	4.718	3.562	
	30°	ら線 K_{PE}	123.089	61.347	34.668	21.124	13.602	9.182	6.459	4.680	3.475	2.634	2.028
		ら線 ω_0	197.8	87.4	77.4	67.6	58.2	49.4	41.0	32.8	24.8	17.4	10.6
$\phi=40°$ $\delta=40°$ $\beta=0°$	−30°	ら線 K_{PE}	843.994	396.109	209.845	119.259	71.159	44.114	28.256	18.601	12.545	8.647	6.078
		ら線 ω_0	131.3	120.3	109.9	99.7	89.7	79.9	70.3	61.1	51.9	42.9	34.3
	−20°	ら線 K_{PE}	787.407	368.283	194.585	110.370	65.773	40.752	26.110	17.204	11.622	8.030	5.662
		ら線 ω_0	126.3	115.5	105.1	94.9	85.1	75.3	65.9	56.5	47.5	38.7	30.1
		ソコロフスキー K_{PE}	692.627	325.045	173.432	99.769	60.442	38.079	24.766	16.541	11.308	7.891	
	−10°	ら線 K_{PE}	728.258	339.822	179.224	101.527	60.458	37.456	24.013	15.842	10.722	7.426	5.252
		ら線 ω_0	122.6	112.0	101.6	91.4	81.6	72.0	62.4	53.2	44.2	35.6	27.2
		ソコロフスキー K_{PE}	633.692	297.497	158.808	91.422	55.437	34.970	22.776	15.243	10.443	7.306	
	0°	ら線 K_{PE}	665.838	310.077	163.295	92.412	55.003	34.081	21.869	14.450	9.801	6.807	4.829
		ら線 ω_0	119.4	108.8	98.6	88.4	78.6	69.0	59.6	50.4	41.6	32.8	24.6
		ソコロフスキー K_{PE}	574.098	269.622	144.025	82.970	50.366	31.812	20.754	13.919	9.560	6.706	4.792
	10°	ら線 K_{PE}	596.590	277.300	145.830	82.453	49.058	30.409	19.538	12.936	8.797	6.130	4.365
		ら線 ω_0	116.4	105.8	95.6	85.6	75.6	66.2	56.8	47.6	38.8	30.4	22.2
		ソコロフスキー K_{PE}	509.776	239.542	128.040	73.842	44.877	28.393	18.562	12.478	8.595	6.048	
	20°	ら線 K_{PE}	513.991	238.414	125.190	70.717	42.066	26.095	16.800	11.155	7.614	5.329	3.812
		ら線 ω_0	112.7	102.3	92.1	82.1	72.3	62.7	53.5	44.5	35.7	27.3	19.5
		ソコロフスキー K_{PE}	434.686	204.406	109.374	63.160	38.456	24.387	15.987	10.783	7.455	5.268	3.793
	30°	ら線 K_{PE}	403.629	186.713	97.849	55.210	32.843	20.408	13.189	8.803	6.047	4.261	3.070
		ら線 ω_0	107.9	97.5	87.3	77.3	67.7	58.3	49.1	40.1	31.7	23.5	15.9



図—24 $\delta=\phi=30°$, $\beta=0$, α_1 を変化させたときの ω_0



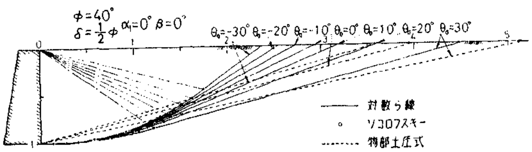
図—25 $\delta=\phi=30°$, $\beta=0$, α_1 を変化させたとき，対数ら線法とソコロフスキー法の K_{PE} の比較

く，これは前述した $\delta=1/2\cdot\varphi$, $\delta=2/3\cdot\varphi$ ではみられない。両計算法のうちいずれの方法による K_{PE} を採用するかは後述する $\delta=\varphi$ におけるすべり面でわかるように，対数ら線法ではすべり面の壁面における条件を満足させないので，土圧算定の合理性から考えて，ソコロフスキー法による値を採用するのが正しいと考えられる。特に $\delta=\varphi=40°$ を考えると，$\alpha\leqq0$, $\beta=0$ ではソコロフスキー法で求めたほうがより小なる K_{PE} が得られる。

(2) すべり面

a) 地震力とすべり面

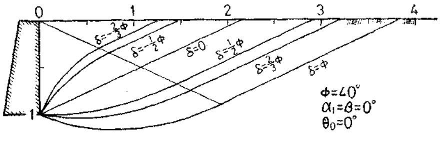
図—26 の実線で示した曲線は $\alpha_1=\beta=0$, $\delta=1/2\cdot\varphi=20°$ におけるすべり面を対数ら線法で求めたものである。θ_0 が大きくなるにしたがって，すべり面の直線区間が増大し，かつすべり面は基礎地盤てんば面上，壁より遠方に到達する。同じ図にソコロフスキー法によるすべり面上の点が○印で示されているが，これは対数ら線法による実線のすべり面上に位置している。また物部法によるすべり面を点線で示しているが，対数ら線法によるすべり面は θ_0 が増すとこの物部法によるすべり面にその位置が接近してくる。さきに示した **図—18** の K_{PE} の比は θ_0 が増大するにしたがって，1に接近するのはこのためである。



図—26 地震力の大きさによるすべり面の比較
($\delta=1/2\,\phi=20°$, $\alpha_1=\beta=0°$)

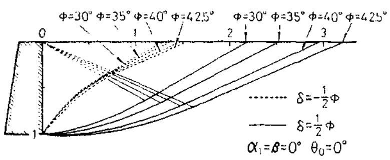
b) 壁摩擦角または内部摩擦角が変化した場合のすべり面

図—27 は壁摩擦角が変化したときのすべり面をいずれも対数ら線で求めたものであって，$\alpha_1=\beta=0$, $\varphi=40°$, $\theta_0=0$ の場合である。これによると他の条件が同じ場合，壁摩擦角が大きいほどすべり面は地盤てんば面上遠方に到達する。



図—27 壁摩擦角によるすべり面の比較
($\phi=40°$, $\alpha_1=\beta=0°$, $\theta_0=0$)

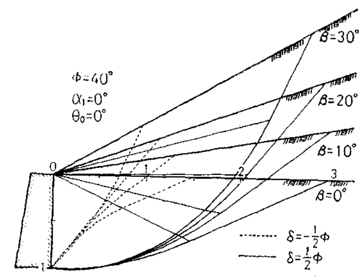
図—28 は $\alpha_1=\beta=0$, $\theta_0=0$ の場合，内部摩擦角とすべり面の位置の関係を対数ら線法で示したものである。実線が $\delta=1/2\cdot\varphi$, 点線が $\delta=-1/2\cdot\varphi$ のすべり面をあらわすが，両者ともに φ が大きいほどすべり面は地盤てんば面上遠方に到達する。



図—28 内部摩擦角によるすべり面の比較
($\alpha_1=\beta=0$, $\theta_0=0$, $\delta=1/2\,\phi$, $\delta=-1/2\,\phi$)

c) 地盤てんば面の水平面に対する傾角 β が変化したときのすべり面

図—29 は $\alpha_1=0$, $\theta_0=0$ の場合，β を変化させたときのすべり面を対数ら線法で求めたものである。δ の正負にかかわらず，β が大きいほどすべり面で曲線部分の占める範囲が増大する。



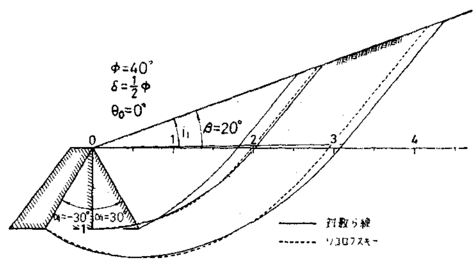
図—29 β によるすべり面の比較
($\phi=40°$, $\alpha_1=0$, $\theta_0=0$)

d) 壁の背面が傾斜している場合のすべり面

図—30 は $\beta=20°$, $\delta=1/2\cdot\varphi=20°$, $\theta_0=0$ で同一壁高に対して，α_1 を変化させた場合のすべり面を対数ら線法とソコロフスキー法で求めたものである。α_1 が小であるほどすべり面で曲線部分の占める範囲が大になり，またすべり面は地盤てんば面上遠方に到達する。他の条件が同じで，α_1 が小さく β が大きいほど $\alpha_2-\alpha_1$ が大になり，対数ら線法とソコロフスキー法におけるすべり面の差は大になる。$\alpha_1=-30°$ でこの場合 K_{PE} の差は前述したように 2% である。

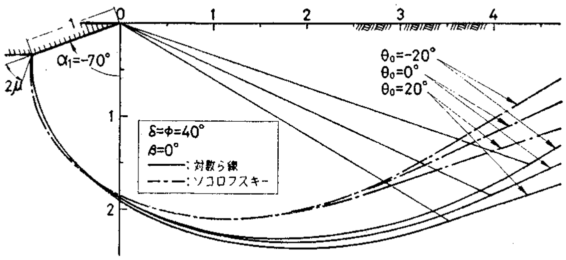
e) 対数ら線法とソコロフスキー法のすべり面の比較

図—31 は $\delta=\varphi$ の場合の対数ら線法とソコロフスキ



図—30 α_1 が変化したとき，対数ら線法とソコロフスキー法によるすべり面の比較
($\delta=1/2\,\phi=20°$, $\beta=20°$, $\theta_0=0$)

一法のすべり面を $\beta=0, \alpha_1=-70°$ で比較したものである。この場合，壁面もすべり面であるから，すべり面が壁面における条件を満足させるには，すべり面は壁面と $2\mu=\pi/2-\varphi$ で交わらなければならない。しかるに，ソコロフスキー法では δ の値のいかんにかかわらず，この壁面条件を満足させているが，対数ら線法は図に示すように満足させていないことが明りょうである。



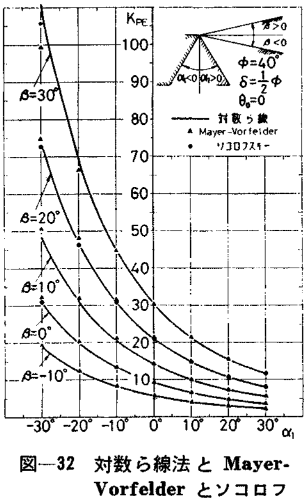
図—31 対数ら線法，ソコロフスキー法におけるすべり面の壁面における比較 ($\delta=\phi=40°$)

（3） Mayer-Vorfelder の計算値との比較

Mayer-Vorfelder は対数ら線を用いて，静的の水平方向の受働土圧係数 λ_{Ph} を求めた[2]。いま $\delta=1/2 \cdot \varphi=20°$ における λ_{Ph} を次式を用いて筆者らの K_P に換算して示すと 図—32 の▲印のようになる。

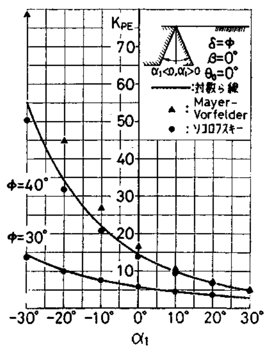
$$K_P=\frac{\cos\delta \cdot \cos\alpha_1}{\cos(\delta-\alpha_1)}\lambda_{Ph} \quad \cdots\cdots\cdots(52)$$

この図にはソコロフスキー法による値も併記されている。これによると筆者らの行なった対数ら線法から求めた $\delta=1/2 \cdot \varphi=20°$ の K_P はソコロフスキー法から求めた値ならびに Mayer-Vorfelder の値とよくあっている。



図—32 対数ら線法と Mayer-Vorfelder とソコロフスキーによる K_P の比較 ($\delta=1/2\,\phi=20°$)

しかしながら δ がさらに大になり，$\delta=\varphi=40°$ では Mayer-Vorfelder による値は 図—33 に示すように，筆者らの対数ら線法による値よりも $\alpha_1=-30°$ で 40% も大きい。またこの α_1 の値でソコロフスキー法による値は対数ら線法よりも 9% 小なる値を与えている。このような対数ら線法とソコロフスキー法との差は前述したように異なった曲線で $\alpha_2-\alpha_1$ と δ がともに増大したときに当然考えられる結果である。しかしながら同じ対数ら線法で Mayer-Vorfelder との間に生じた差の原因はわからない。そこで筆者らは別の K_P と比較することにした。

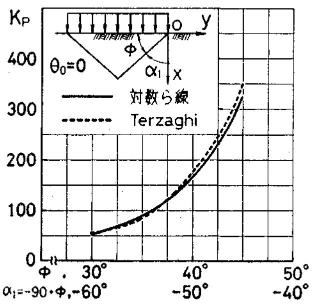


図—33 対数ら線法と Mayer-Vorfelder とソコロフスキーによる K_P の比較 ($\delta=\phi$)

図—34 に示す点線の値は Terzaghi の支持力係数[8] N_γ から次式で K_P を逆算したものである。

$$N_\gamma=\frac{1}{2}\tan\varphi\left(\frac{K_P}{\cos^2\varphi}-1\right) \quad \cdots\cdots\cdots(53)$$

この場合は与えられた φ に対して，壁の傾斜角 α_1 は $\alpha_1=\varphi-90°$ で与えられる。いま筆者らの求めた α_1 と φ に対応する K_P を図示すると同じ図に実線で与えられたようになり，両曲線はきわめてよく近似している。Terzaghi のほうが 7% 程度大きいが，これはおそらく筆者らのような精密な計算でなかったためであろう。これによると $\delta=\varphi=40°$, $\alpha_1=-50°$ でわずかに 7% の差である。



図—34 対数ら線法による K_P と Terzaghi の N_γ から求めた K_P の比較

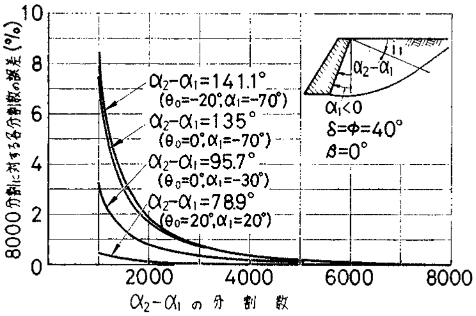
前述の Mayer-Vorfelder では $\delta=\varphi=40°$, $\alpha_1=-30°$ で筆者らの値よりも 40% も大きいことは明らかに誤りであると考えられる。

5. 計算の精度

ソコロフスキー法による計算で二つの誤差が導入される。その一つは差分法のための $\Delta\omega$ の値のとりかたに基づくものである。前述したように筆者らは $\delta=1/2 \cdot \varphi$ では $\Delta\omega$ として $\alpha_2-\alpha_1$ を 1 000 分割したので，これによる結果は 4 000～6 000 分割したものに対してどれだけの誤差をもっているかを調べた。ここに 4 000～6 000 分割すると，得たる K_{PE} は分割数に関係なくほとんど一定になる。表—7 は上述した 1 000 分割の誤差を示す。分割数を増すと K_{PE} は小になる。また $\delta=1/2 \cdot \varphi$

表—7 ソコロフスキー法による数値計算で $\Delta\omega$ として $\alpha_2-\alpha_1$ の分割数を変えたとき，4 000〜6 000 分割に対する誤差 ($\delta=1/2\,\phi=20°$)

分割数 ＼ S_0, K_{PE} ＼ α_1, β, θ_0 ＼ $\alpha_2-\alpha_1$		54.5°	58.9°	65.0°	75.5°	84.5°	95.0°	105.5°	115.5°	135.5°
		$\alpha_1=0°$ $\beta=0°$ $\theta_0=30°$	$\alpha_1=0°$ $\beta=0°$ $\theta_0=20°$	$\alpha_1=0°$ $\beta=0°$ $\theta_0=0°$	$\alpha_1=0°$ $\beta=0°$ $\theta_0=-30°$	$\alpha_1=-30°$ $\beta=0°$ $\theta_0=30°$	$\alpha_1=-30°$ $\beta=0°$ $\theta_0=0°$	$\alpha_1=-30°$ $\beta=0°$ $\theta_0=-30°$	$\alpha_1=-20°$ $\beta=20°$ $\theta_0=-10°$	$\alpha_1=-30°$ $\beta=30°$ $\theta_0=0°$
1 000	S_0	3.524	4.783	6.516	7.211	9.836	19.143	21.705	31.353	65.740
	K_{PE}	5.674	7.098	9.086	11.611	18.288	30.823	40.355	47.243	105.852
4 000〜6 000	S_0	3.524	4.783	6.514	7.205	9.826	19.110	21.647	5 000 分割 31.243	6 000 分割 65.334
	K_{PE}	5.674	7.098	9.083	11.601	18.269	30.770	40.247	47.077	105.198
誤　差	(%)	0.00	0.00	0.04	0.08	0.10	0.17	0.27	0.35	0.62



図—35 ソコロフスキー法による数値計算で $\alpha_2-\alpha_1$ の分割数を変化させたとき 8 000 分割に対する K_{PE} の誤差 ($\delta=1/2\,\phi=40°$)

の場合，上述した分割数では最大 0.6% の誤差に達し誤差は $\alpha_2-\alpha_1$ が大であるほど大である。

なお $\delta=2/3\cdot\varphi$, $\delta=\varphi$ では 1 000 分割ではなくて，3 000 分割して K_{PE} を求めた。これらが 8 000 分割に対する誤差は $\delta=\varphi$ の場合，図—35 の横軸に分割数をとって示している。すなわち $\alpha_2-\alpha_1=141.1°$ の場合には 8 000 分割に対して 0.78% だけ大き目に算定されたことになる。前述した表では有効数字 3 桁〜4 桁しか信用がおけないにもかかわらず，桁数を大きくとって示しているのはソコロフスキー法と対数ら線法による値とを比較するためである。

ソコロフスキー法の他の誤差は $\delta=\varphi$ の場合の近似解によるものである。$\delta=\varphi$ の場合には式 (45) からわかるように，壁面では S も ψ も不連続になる。したがってソコロフスキーが行なったように，壁頂（原点 0）を中心として，壁面から $\Delta\omega'$ だけ回転した面（線）を壁面として，その位置における ψ', S', ω から OA 線に向って計算する方法をとる。ψ', S' と壁面の S_0 との間には次の近似式が成立する。

$$\left.\begin{aligned}(\psi'+\mu)^2&=\frac{1}{2}\cot\varphi\left[1-\frac{\cos(\varphi-\alpha_1+\theta_0)}{S_0\cos\varphi}\right](\omega-\alpha_1)\\ S'&=S_0[1+2(\psi'+\mu)\tan\varphi]\end{aligned}\right\}\quad\cdots\cdots(54)$$

ここに $\omega=\alpha_1+\Delta\omega'$

これまで示してきた $\delta=\varphi$ における K_{PE} では，$\Delta\omega'$ として 0.001° を用い，$\alpha_2-(\alpha_1+\Delta\omega')$ を 3 000 分割して求めた。$\Delta\omega'$ として大きな値を用いると，K_{PE} として小なる結果が得られ，これによる誤差は上述した差分法による誤差と相殺するように考えられるが，壁面付近のすべり面の精度を考えると，$\Delta\omega'$ としてはきわめて小なる値を採用しなければならない。表—8 は $\Delta\omega'=1°$, 0.1° の 2 つで求めた場合，$\Delta\omega'=0.001°$ に対する K_{PE} のもつ誤差を示す。

表—8 $\delta=\phi$ におけるソコロフスキー法の近似計算で $\Delta\omega'=0.001°$ に対する K_{PE} の誤差 ($\delta=\phi=30°$, $\theta_0=20°$, $\beta=0°$)

$\Delta\omega'$ ＼ K_{PE} 誤差 ＼ α_1		−70°	−60°	−40°	−20°	0°	20°
1°	K_{PE}	53.649	29.699	12.651	6.638	3.895	2.446
	誤 差 (%)	1.88	1.84	1.79	1.79	1.89	2.28
0.1°	K_{PE}	54.513	30.169	12.846	6.743	3.962	2.496
	誤 差 (%)	0.30	0.29	0.27	0.24	0.20	0.28
0.001°	K_{PE}	54.678	30.256	12.881	6.759	3.970	2.503

最後に対数ら線法による誤差を考える。このために ω_0 を変化させて K_{PE} の極小値を求めるための角度のピッチは $\Delta\omega=0.01°$ としてまず K_{PE} を求めた。次にこの K_{PE} を基準にとって各 $\Delta\omega$ による K_{PE} の誤差を調べた。その結果によれば，$\Delta\omega=0.2°$ で計算したことの妥当であることがわかった。

6. あとがき

直線すべり面法，対数ら線法，ソコロフスキー法による受働土圧を比較してきたが，すべり面としての厳密性から考えると，塑性論に基づくソコロフスキー法が一番よい。なんとなれば，すべり面上部の土塊に作用する力のつり合い条件は $\Sigma H=0$, $\Sigma V=0$, $\Sigma M=0$ を満足させかつ曲線すべり面の両端における境界条件を満足させているためである。対数ら線法では，曲線すべり面上部の土塊に作用する力は $\Sigma M=0$ のみを満足させ，かつすべり面はランキン領域との接合点の境界条件のみを満

足させ，他端の壁面における条件を満足させていない。そのために土圧の決定は土圧を最小にするすべり面に基づいて行なっている。このすべり面を直線でおきかえたものが，直線すべり面法（物部法）である。したがってこの方法では，すべり面の両端（壁面と地盤てんば面）における境界条件はいずれも満足されていない。そのかわりに，すべり面上部の土塊に作用する力のつり合いは $\Sigma H=0$, $\Sigma V=0$ の2つを満足させ，土圧の決定は土圧を最小にするすべり面に基づいて行なっている。

すべり面が具備すべき条件に関する限り，一番不十分なものは直線すべり面法である。対数ら線法はソコロフスキー法に比して算定が簡単であり，またすべり面の位置と形状を知りたい場合に，ら線の極（中心）の位置を ω_0 として表から知ることができるので都合がよい。擁壁では $\delta\leqq 2/3\cdot\varphi$ であるから本文に示されたように，対数ら線法による K_{PE} を用いて差支えない。

得られた結果を要約すると次のようになる。

（**1**） ソコロフスキー法ですべり面の形状を判定するために，式（51）が使用される。この式は対数ら線法から求められたものではないが，両方法によるすべり面の形状の近似から，この式は対数ら線法による曲線の形状の判定にも有効に使用される。

（**2**） 物部法による K_{PE} は $\delta=0$, $\alpha_1=\beta=0$ のときのみ対数ら線法による K_{PE} とわずかな差であるから，この条件でのみ使用できる。$\delta=0$ で α_1 または β のいずれかが0でない場合には，物部法による K_{PE} は対数ら線法による値と明確に異なる。たとえば $\varphi=35°$, $\theta_0=20°$, $\alpha_1=-30°$, $\beta=0$ では前者は後者よりも 27% も大きい。

（**3**） 他の条件が同じ場合に δ の値が大きくなるにしたがって，物部法による K_{PE} は対数ら線法による K_{PE} よりもしだいに大になる。一例を示すと，$\delta=1/2\cdot\varphi=20$, $\alpha_1=\beta=0$, $\theta_0\geqq 0$ では θ_0 によって異なるが，前者は後者よりも 10%～20% 大きく，同じ条件で $\delta=2/3\cdot\varphi=26.7°$ では 30%～50% 大きい。

（**4**） $\delta\neq 0$, $\alpha_1=\beta=0$ のとき，θ_0 が大きくなるにしたがって，対数ら線法による K_{PE} は物部法による K_{PE} に，またソコロフスキー法による K_{PE} は対数ら線法による K_{PE} にしだいに接近する。

（**5**） δ が増加するにしたがって，また $\alpha_2-\alpha_1$ が増加するにしたがって，ソコロフスキー法による K_{PE} は対数ら線法による K_{PE} よりも減少する。しかしながら，$\delta=2/3\cdot\varphi=26.7°$, $\alpha_1=-30°$, $\beta=30°$, $\alpha_2-\alpha_1=135.5°$ であっても，両者の差は対数ら線法で求めた値の 3.4% にすぎない。このことから 3～4% の差を許せば，擁壁の受働土圧は対数ら線法で求めてよい。

（**6**） $\delta=\varphi=30°$ では $\alpha_1=-30°$, $\beta=0$, $\theta_0=20°$, $\alpha_2-\alpha_1=78.4°$ でソコロフスキー法による K_{PE} は対数ら線法による K_{PE} よりも 5%小さく，また同一条件で $\alpha_1=-70°$ では 17% も小である。$\varphi=40°$ を考えると，$\delta=\varphi$, $\beta=0$, $\alpha_1\leqq 0$ では対数ら線法によらないで，ソコロフスキー法で求めたほうがより正確な K_{PE} が得られる。

（**7**） Mayer-Vorfelder が対数ら線法で求めた K_P は $\delta=\varphi=40°$, $\alpha_1=-30°$, $\theta_0=0$ で筆者らの対数ら線法による値よりも 40% も大きく，Terzaghi の支持力公式に示された K_P は $\delta=\varphi=40°$, $\alpha_1=-50°$ で筆者らの値よりも 7% も大である。

（**8**） θ_0 が大になると，すべり面は基礎地盤てんば面上，壁よりはかって遠方に到達する。

（**9**） 対数ら線法によるすべり面は壁面における条件を満足させないことを $\delta=\varphi=40°$, $\beta=0$ の場合を例にとって **図―31** に示した。

（**10**） ここに示したソコロフスキー法の計算誤差は $\delta=1/2\cdot\varphi$ で最大 0.6%，$\delta=\varphi$ では最大 0.78% であるが，これらはいずれも $\alpha_2-\alpha_1$ が約 140° という特別の場合である。$\alpha_2-\alpha_1$ が減少し，$\alpha_2-\alpha_1=100°$ ではこれらの誤差はそれぞれ 0.2%，0.35% 程度になる。$\alpha_2-\alpha_1$ がさらに小になると誤差は急激に減少する。

（**11**） 対数ら線法による計算誤差は本文にのべたようにほとんどない。

ここに示した計算は，名古屋大学の大型計算機センター FCOM-203-60 によった。計算に専念した文部教官中根進君に感謝する。

参考文献

1) Brinch Hansen, J.: Earth Pressure Calculation. pp, 15～20, 1953.
2) Mayer-Vorfelder, H.J.: Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der Logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion, Von der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs genehmigte Abhandlung. pp. 19～22, pp. 217～223, 1970.
3) 安蔵善之輔：土圧公式とその図式解法，土木学会誌 25巻 5号，pp. 485～491, 1939.
4) Kármán, Th.: Uber Elastische Grenzzustände, Proc. 2nd, International Congresses on Applied Mechanics, pp. 23～32, Zürich. 1926.
5) Krey, H.: Erddruck, Erdwiderstand und Tragfähigkeit des Baugrundes. 1936.
6) Ohde, J.: Zur Theorie der Erddruckes unter besonderer Berücksichtigung der Erddruck Verteilung, Die Bautechnik, Vol. 16, pp. 150～159, 176～180, 241～245, 331～335, 480～487, 570～571, 753～761, 1938.
7) Sokolovski, V.V.: Statics of Soil Media, pp. 137～172, 1960.
8) Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, pp. 124～125, 1943.

（1973.3.5・受付）