

# 裏込め土が内部摩擦をもつ粘性土の 地震時主働土圧の算定

CALCULATION OF ACTIVE EARTH PRESSURE DURING EARTHQUAKE  
FOR COHESIVE SOILS POSSESSING INTERNAL FRICTION

市原松平\*・山田公夫\*\*・梶井源一朗\*\*\*

By Matsuhei ICHIHARA, Kimio YAMADA and Genichiro KAJII

## 1. まえがき

地震時における主働土圧の算定で、現在広く使用されているのは、物部土圧式<sup>1)</sup>である。これは1924年に発表されたもので、これが繋船岸ならびに重要基礎構造物の耐震設計に貢献してきた功績は大きい。この式はCoulomb土圧式と同じように、すべり面は直線として、すべり土塊の重心には、土塊の自重以外に地震力を水平に作用させて、土塊のつり合い条件と極値法を使用して求められたものである。土のせん断抵抗としては、Coulomb土圧式と同じように土の内部摩擦のみを考慮し、粘着力を考慮していない。

近時、擁壁や基礎構造物の耐震設計が重要視されており、与えられた設計震度に対して、裏込め土のせん断強さとして粘着力を考慮して、土圧を算定する場合もある。そのような場合に厳密に考えて、すべり面は物部土圧式のような直線すべり面とすることはできない。

筆者らは裏込め土の強度が $c_u$ 、 $\phi_u$ に依存している場合の擁壁に作用する地震時主働土圧をSokolovskiの方法で求めた。この方法によると、土のつり合い条件と強度条件が満足され、合理的な土圧算定を行うことができる。筆者の1人は以前、Sokolovskiの示した特性線に沿って、応力を数値積分して、土の強度が $c_u$ 、 $\phi_u$ で表される場合の地震時受働土圧を求めた<sup>2)</sup>。また、 $c_u \approx 0$ 、 $\phi_u = 0$ の場合の地震時受働土圧も求めた<sup>3)</sup>。

この研究では、擁壁の背面の傾角 $\alpha_1$ 、裏込め土の傾角 $\beta$ 、土の強度 $c_u$ 、 $\phi_u$ 、地震力の大きさを変化させ、壁摩擦角は $\delta = 2/3 \cdot \phi_u$ として主働土圧を算定したが、そのような一連の算定では、受働土圧の場合と同じように、原点(壁頂)の状況に応じて特異点の解を使用

し、あるいは不連続線の解を使用した。不連続線の解は受働土圧の場合と同じく、原点近傍点の4値を決定し、第4境界値問題を解いた。特殊な場合に特異点の解を強行して不連続線を決定したことも受働土圧と同じである。しかしながら、地震時主働土圧は地震時受働土圧と異なって、地震力を裏込め土から壁の背面に向かって作用させるために、後述する領域①が壁の背面に接近してくる。このために原点では特異点の解が適用される状況にあっても、擁壁の下方で各領域のすべり線網が重複してくる。この場合、擁壁の上部は後述する3領域に分離されると考え、擁壁下方では、不連続線を境界として左右で異なったすべり線網が得られるように、重複区間のすべり線網を処理した。この場合、不連続線に接する裏込め土砂内の点で、その条件が満足されるかの検証に重点をおいた。以上のようにして、上述した擁壁の種々の条件に対して、塑性論の応力場による主働土圧の算定が可能になることをこの報告では明らかにしている。

また、筆者らは、実用に供するために、無次元計算の結果から土圧係数と壁の背面で引張り応力が作用する深さを表に表している。この引張り応力が作用する区間における垂直応力を無視して、せん断応力は必ずしも無視せず、粘性土による壁面への付着力よりもいくぶん減少したせん断応力がこの区間に作用していると考えた。表の使用を容易にするために、計算例を示している。以下の考察では $c_u$ 、 $\phi_u$ を単に $c$ 、 $\phi$ と略記する。

## 2. $c$ 、 $\phi$ 材の主働土圧算定法(特異点の解)

### (1) 土圧算定のための基本式

図-1(a)のように $u-v$ 座標、 $x-y$ 座標、 $n-t$ 座標をとったとき、Sokolovskiの特性線の式は地震力の場において、次のように拡張される<sup>4)</sup>。

$$dv = -du \tan(\phi \pm \mu)$$

\* 正会員 工博 和歌山工業高等専門学校 校長

\*\* 正会員 工修 中部工業大学講師 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 中日本建設コンサルタント(株)

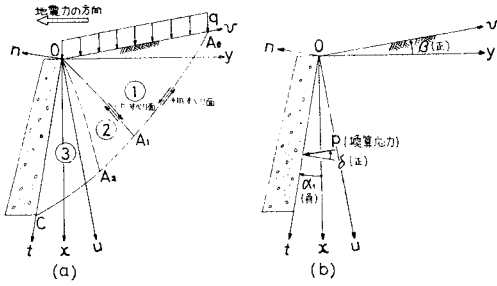


図-1 3つの領域と座標ならびに  $\alpha_1, \beta, \delta$  の符号

$$d\bar{\sigma} \pm 2\bar{\sigma} \cdot \tan \phi \cdot d\psi = \frac{r_0}{\cos \phi} \cdot [\cos(\beta_0 \mp \phi) \cdot du - \sin(\beta_0 \mp \phi) \cdot dv] \dots (1)$$

ここに、 $\mu = \pi/4 - \phi/2$ ,  $\beta_0 = \beta + \theta_0$ ,  $r_0 = r/\cos \theta_0$ ,  $\theta_0 = \tan^{-1} a/g$ ,  $a$  は水平加速度,  $g$  は重力の加速度で上式の複号の上号は  $+m$  すべり面<sup>2), 3)</sup>に, 下号は  $-m$  すべり面に適用される。 $\bar{\sigma}$  と  $\psi$  は文献 2), 4) に説明されている。

主働土圧を求めるために、図-1 (a) に示した地表面 ( $v$  軸) の境界値 ( $u, v, \bar{\sigma}, \phi$ ) から出発して、壁面に向かい、領域 ①~③ の各点の 4 値 ( $u, v, \bar{\sigma}, \phi$ ) を逐次求める。各節点の 4 値を求める漸化式、すなわち Cauchy 問題、Goursat 問題、混合境界値問題を解くための漸化式は式 (1) から容易に決定される<sup>2)</sup>。なお、壁面の主働土圧を求める場合、上記各領域のうち、① は主働領域、② は遷移領域、③ は受働領域である。

(2) 裏込めてんば面の境界条件

裏込めてんば面の換算荷重<sup>5), 6)</sup>を  $p'$ 、換算荷重の傾角<sup>2), 5), 6)</sup>を  $\delta'$ 、ならびに  $\psi$  と  $\bar{\sigma}$  は主働土圧では図-2 (a) を参照して次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} p' &= \frac{1}{\cos \delta'} (q_E \cos \beta_0 + c \cot \phi) \\ \tan \delta' &= \frac{q_E \sin \beta_0}{q_E \cos \beta_0 + c \cot \phi} \\ 2\psi &= \delta' + d' \\ \bar{\sigma} &= \frac{p' \sin d'}{\sin(d' + \delta')} \\ &= \frac{(q_E \cos \beta_0 + c \cot \phi) (\cos \delta' - \sqrt{\cos^2 \delta' - \cos^2 \phi})}{\cos \delta' \cdot \cos^2 \phi} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

ここに、 $q_E = q/\cos \theta_0$  で  $q$  は地表面載荷重であり、 $\sin d' = \sin \delta'/\sin \phi$ ,  $\pi/2 \geq |d'|$

(3) 壁面の境界条件

最大主応力面から測った  $n$  面 (壁面) までの角度  $\psi_1$  は図-2 (b) を参照して主働土圧では次式で与えられる。

$$2\psi_1 = d - \delta - \pi \dots (3)$$

ここに、 $\delta$  は壁摩擦角であり、 $\sin d = \sin \delta/\sin \phi$ ,  $\pi/2$

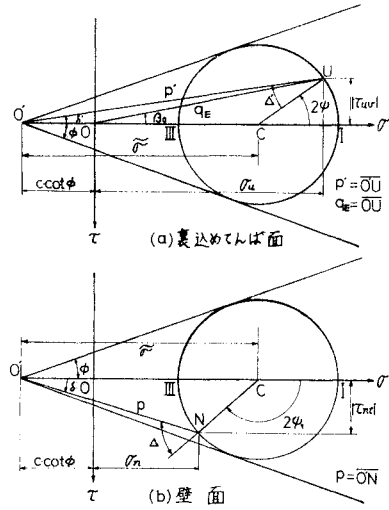


図-2 裏込めてんば面と壁面の応力状態

$\geq |d|$  である。

いま、最大主応力面から測った  $u$  面までの角度  $\psi$  で示すと次のようになる。

$$2\psi = (d - \delta) + 2(\beta - \alpha_1) \dots (4)$$

(4) 原点 O における条件

図-1 (a) の各領域を  $\lambda$ - $\nu$  座標<sup>2)</sup> に写像したものが図-3 である。原点では  $r=0$  の条件が成立するから、 $\lambda$ - $\nu$  座標を  $\xi$ - $\eta$  座標としてもよい。線分  $\overline{O_1 O_2}$  の任意の点の  $\bar{\sigma}$  は次式で与えられる。

$$\bar{\sigma} = p' \frac{\cos \delta' - \sqrt{\cos^2 \delta' - \cos^2 \phi}}{\cos^2 \phi} \cdot e^{(\delta' + d' - 2\psi) \tan \phi} \dots (5)$$

また、 $O_2$  点の  $\bar{\sigma}$  は次式で与えられる。

$$\bar{\sigma} = p' \frac{\cos \delta' - \sqrt{\cos^2 \delta' - \cos^2 \phi}}{\cos^2 \phi} \cdot e^{(\delta' + d' - d + \delta + 2(\alpha_1 - \beta)) \tan \phi} \dots (6)$$

(5) 壁面土圧の決定

壁面の各点の  $\bar{\sigma}$  が決定されたとき、土圧は次式から求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \bar{\sigma} (1 + \sin \phi \cdot \cos 2\psi_1) - c \cot \phi \\ \tau_{nt} &= (\sigma_n + c \cot \phi) \tan \delta \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

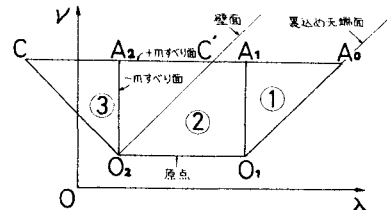


図-3 領域の写像

### 3. 不連続線による解法

図-4 に示すように領域 ①, ③ が重複する場合には, 不連続線を求めながら壁面の土圧を決定する. 不連続線上で成立する条件は受働土圧の場合とまったく同じで次式で与えられる<sup>2)</sup>.

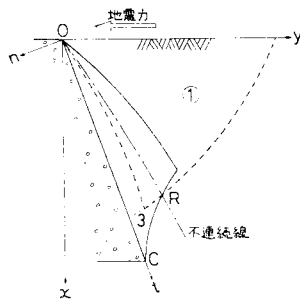


図-4 不連続線の説明

$$\left. \begin{aligned} \cos(\phi + \phi' + 2\omega) &= \sin \phi \cdot \cos(\phi - \phi') \\ \bar{\sigma} \cdot \sin 2(\phi + \omega) &= \bar{\sigma}' \cdot \sin 2(\phi' + \omega) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

記号も受働土圧の場合とまったく同じである. 不連続線の接線の  $u$  軸となす角度  $\omega$  は次式で与えられる.

$$2\omega = -(\phi + \phi') + k \left( d_1 - \frac{\pi}{2} \right) \dots (9)$$

ここに,  $\sin d_1 = \sin \phi \cdot \cos(\phi - \phi')$  であり, 次のように  $\omega$  を表すことができる.

$$\begin{aligned} \frac{dv}{du} &= \tan \omega \\ &= \frac{-\sin(\phi + \phi') - k \sqrt{1 - \sin^2 \phi \cos^2(\phi - \phi')}}{\cos(\phi + \phi') + \sin \phi \cos(\phi - \phi')} \end{aligned} \dots (10)$$

式 (9), (10) において, 主働土圧では  $k = -1$  である.

図-5 (a) に示した不連続線と壁面で囲まれた領域を  $\lambda$  面に写像したものが 図-5 (b) である. 原点ならびに原点近傍の 4 値を求めて, 第 4 境界値問題<sup>3)</sup> を解いて, 不連続線と壁面間の各節点の 4 値を逐次決定する. 原点近傍の 4 値を決定するために, 不連続線と壁面で囲まれた原点近傍点の  $\psi$  と  $\bar{\sigma}$ , 不連続線上の  $\omega$  と  $v$ , ならびに不連続線に接した領域 ① の点の  $\psi'$  と  $\bar{\sigma}'$  をべき級数に展開するための 9 個の未定係数を一例として 図-6 に示した. これは  $\alpha_1 = 20^\circ$ ,  $\beta = 0^\circ$ ,  $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 2/3 \cdot \phi$ ,  $c = 1 \text{ t/m}^2$ ,  $r = 1 \text{ t/m}^3$  の主働土圧の場合である. 未定係数を決定する式は主働土圧でも受働土圧でもまったく同じであるが, 求められた係数の値は両者間で大きな差がある.

### 4. 不連続線ならびに特異点の解の成立条件

#### (1) 土の自重を考慮した一般的な場合の不連続線の解

いま, 図-7 に示すように, 不連続線 OR 上に一点  $O'$  をとり, この点を通り, 領域 ① のすべり面  $O'S_1$  と

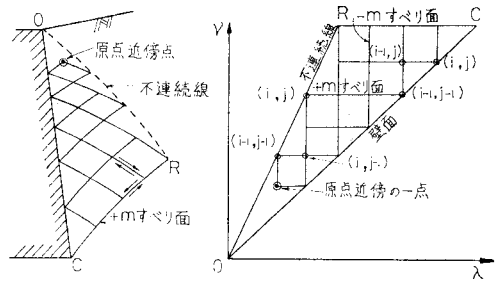


図-5 不連続線による解法の説明

図-5 不連続線による解法の説明

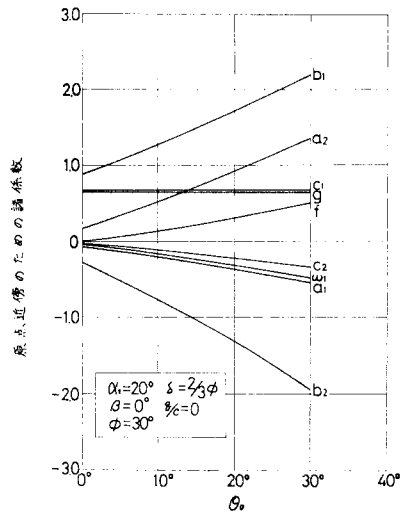


図-6 原点近傍の値を求めるための諸係数

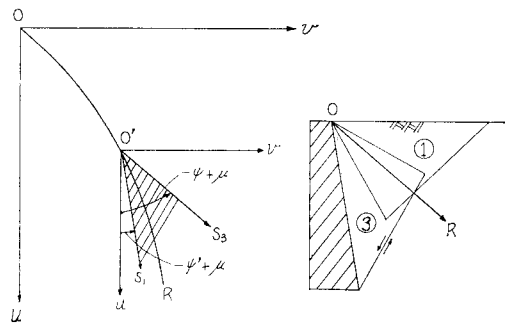


図-7 不連続線上の一点  $O'$  における領域 ①, ③ の  $-m$  すべり面の方向

領域 ③ のすべり面  $O'S_3$  を引く. 領域の重複を考えると, 不連続線は両すべり面にはさまれた斜線を付した部分にあることがわかる. 主働土圧の場合に,  $O'S_1$  と  $O'S_3$  はいずれも  $-m$  すべり面であるから, 両すべり面の  $u$  軸に対する傾角はそれぞれ  $-\phi' + \mu$ ,  $-\phi + \mu$  で表すことができる. これらのすべり面の傾角は図から明白なように  $-\phi' < -\phi$  となり, 不連続線上の各点において不連続線上の  $\phi$  と, これに接する領域 ① の点の  $\phi'$

間に次の関係が成立する。

$$\phi' > \phi \dots\dots\dots(11)$$

この関係は受働土圧でも成立する。

次に式(8)の第2式と式(9)を用いて主働土圧の場合に、不連続線上の各点における  $\bar{\sigma}$  と、これに接する領域①の点における  $\delta'$  間に次の関係が成立する。

$$\bar{\sigma}' < \bar{\sigma} \dots\dots\dots(12)$$

ただし、受働土圧では  $\bar{\sigma}' > \bar{\sigma}$  となる。

ある点が不連続線上の点であるかを判明させるには、主働土圧の場合に、式(8)、式(11)および式(12)が成立することが必要である。この関係は、後述する領域の重複部を不連続線で処理して、すべり線網を決定する場合にきわめて重要である。

(2) 土の自重を考慮しない場合の不連続線ならびに特異点の解

土の自重を考えないとき、すなわち  $r=0$  の場合は原点を通る不連続線は直線となり、その勾配は  $\omega_0$  で決定され、式(11)の条件は  $\phi_0' > \phi_0$  とかくことができる。 $\phi_0, \phi_0'$  にそれぞれ式(4)、式(2)の値を代入すると、次式が得られる。

$$2\alpha_1 > (A-\delta) - (\delta' + A') + 2\beta \dots\dots\dots(13)$$

裏込め土砂でんば面が水平で、地表面等分布荷重が鉛直に作用し、地震力がないときは、 $\beta=0, \delta'=A'=0$  であるから、上式は  $2\alpha_1 > (A-\delta)$  で表される。これは Sokolovski が決定した条件である。

$\alpha_1$  が大になり、 $\omega_0 + \beta \leq \alpha_1$  となると、不連続線が擁壁の内部に入ることになる。この限界の  $\alpha_1$  を  $\alpha_{1*}$  とおくと、不連続線が適用できる  $\alpha_1$  の範囲は次式で与えられる。

$$2\alpha_{1*} \geq 2\alpha_1 > (A-\delta) - (\delta' + A') + 2\beta \dots\dots\dots(14)$$

$\alpha_{1*}$  は式(8)の第1式で、 $\omega = \omega_0, \phi = \phi_0, \phi' = \phi_0', \alpha_1 = \alpha_{1*}$ 、さらに  $\omega_0 + \beta = \alpha_{1*}$  とおいて、次式から決定される。

$$\cos(A + \alpha_{1*}) = \sin \phi \cdot \cos(B - \alpha_{1*}) \dots\dots\dots(15)$$

ここに、

$$A = \frac{1}{2}(A-\delta) + \frac{1}{2}(A' + \delta') - \beta$$

$$B = \frac{1}{2}(A-\delta) - \frac{1}{2}(A' + \delta') + \beta$$

これより、

$$\tan \alpha_{1*} = \frac{\cos A - \sin \phi \cdot \cos B}{\sin A + \sin \phi \cdot \sin B} \dots\dots\dots(16)$$

裏込めでんば面が水平で、地表面等分布荷重が鉛直に作用し、地震力がない場合には、 $\beta=0, \delta'=A'=0$  であるから  $A=B$ 、式(16)より、

$$\tan \alpha_{1*} = \cot A \cdot \tan^2\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right) \dots\dots\dots(17)$$

この式から求めた  $\alpha_{1*}$  は Sokolovski が示した次式の結果と一致する。

$$2\alpha_{1*} = \pi - \delta - A \dots\dots\dots(18)$$

$\alpha_1$  の値が式(13)の右辺の値よりも小なるときは、領域①、③は重複せず、すなわち特異点の解が使用できる。したがって、その条件は次式で与えられる。

$$2\alpha_1 \leq (A-\delta) - (\delta' + A') + 2\beta \dots\dots\dots(19)$$

または、この式は次のように書くこともできる。

$$\phi_0' \leq \phi_0 \dots\dots\dots(20)$$

ここに述べた特異点ならびに不連続線の解の成立条件はあくまでも  $r=0$  の場合であって、これらの条件は原点の状況からのみ決定されるものである。 $r \neq 0$  の場合には原点で特異点の解を満足させても、擁壁の下方で満足させるとは限らない。しかしながら計算開始前に、われわれには原点の状況しかわからないので、式(19)または式(20)が満足されるときには特異点の解で計算を行い、式(14)が満足されるときには、不連続線の解で計算を行う。

5. 計算結果と考察

(1) 特異点で求まる一般的なもの

以下に示す計算では、加速度が大きい特別な場合を除いて、無次元量  $H'$  (壁の鉛直高さ) が 10 になるように計算した。この無次元化にあたって、 $l$  (特性線長)、 $s$  (特性線応力) をそれぞれ  $l=c/r, s=c$  とおき、 $u'=u/l, v'=v/l, \sigma'=\sigma/s, \tau'=\tau/s$  で表した。また、土圧を求めるための漸化式では、 $c=1 \text{ t/m}^2, r=1 \text{ t/m}^3$  とおいた。得られた無次元量から実際の長さとお応力を求めるためには、 $c$  と  $r$  に対応する  $l$  と  $s$  を求め、 $u=u'l, v=v'l, \sigma=\sigma's$  とすればよい。このことはすでに述べている<sup>2),3)</sup>。

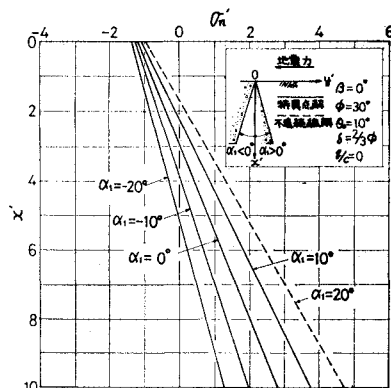


図-8  $\beta=0^\circ$  のとき  $\alpha_1$  による  $\alpha_1'$  の変化 ( $\phi=30^\circ, \delta=2/3 \cdot \phi, \theta_0=10^\circ$ )

図-8, 9 は  $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 2/3\phi$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$ ,  $g = 0$ ,  $\beta = 0^\circ$  のとき, 種々の傾角  $\alpha_1$  をもつ壁面に作用する垂直応力  $\sigma_n'$ , とせん断応力  $\tau_{nt}'$  の分布をそれぞれ示している. 実線は特異点の解により, 点線は不連続線の解によって算定されたものである.  $\alpha_1$  の値が大きいほど  $\sigma_n'$ ,  $\tau_{nt}'$  の値はともに大である. なお  $\sigma_n'$  と  $\tau_{nt}'$  間には次に示される関係がある.

$$\tau_{nt}' = (\sigma_n' + \cot \phi) \tan \delta \dots\dots\dots (21)$$

ここで注目すべきことは,  $\sigma_n'$  は擁壁の上部では負の値, すなわち引張りの応力となり, 擁壁の下部では圧縮応力となるのに対して,  $\tau_{nt}'$  はこの研究におけるすべての擁壁において, 負になることはない. このことは壁頂におけるせん断応力は式 (7), 式 (3) から  $\tau_{nt} = \delta \sin \phi \cdot \sin(A - \delta)$  で表され,  $\delta > 0$  のとき  $\tau_{nt} > 0$  となることである. すなわち,  $\delta > 0$  なる限り, せん断応力は壁の背面全域に沿って下方に向かって作用していること

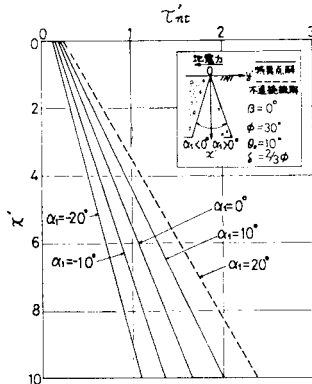


図-9  $\beta = 0^\circ$  のとき  $\alpha_1$  による  $\tau_{nt}'$  の変化 ( $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 2/3 \cdot \phi$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$ )

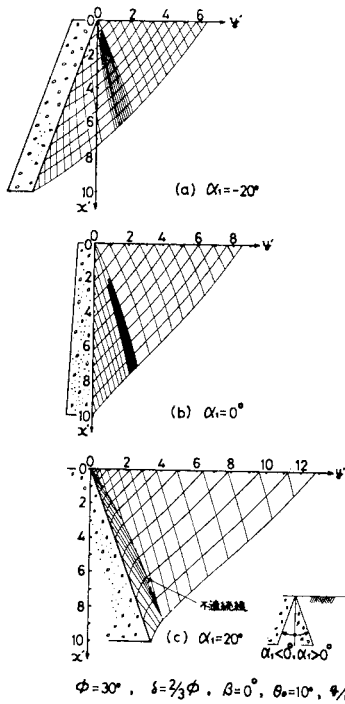


図-10  $\beta = 0^\circ$  のとき  $\alpha_1$  によるすべり線網の変化 ( $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 2/3 \cdot \phi$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$ )

になる. なお, この場合のすべり線網を  $\alpha_1 = -20^\circ, 0^\circ, 20^\circ$  の代表的 3 つの条件で描くと, それぞれ 図-10 (a) ~ (c) に示されたようになる.  $\alpha_1$  が大になるに従って, すべり面と壁背面で囲まれた領域が増大して, すべり面は裏込めてんば面上, 壁頂より測って遠方に到達する.

図-11 は  $\alpha_1 = 0^\circ$  で  $\beta$  が変化した場合の  $\sigma_n'$  の分布を示したもので, 裏込め土の状態と地震力は 図-8 の場合と同じである.  $\beta$  すなわち  $\beta_0$  の値が大きいくほど,  $\sigma_n'$  の値は大になる. このことは 図-12 に示すすべり線網の比較からも納得できることである.

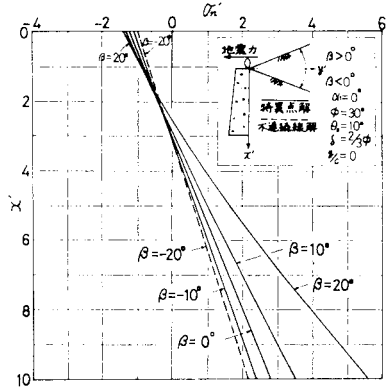


図-11  $\alpha_1 = 0^\circ$  のとき  $\beta$  による  $\sigma_n'$  の変化 ( $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 2/3 \cdot \phi$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$ )

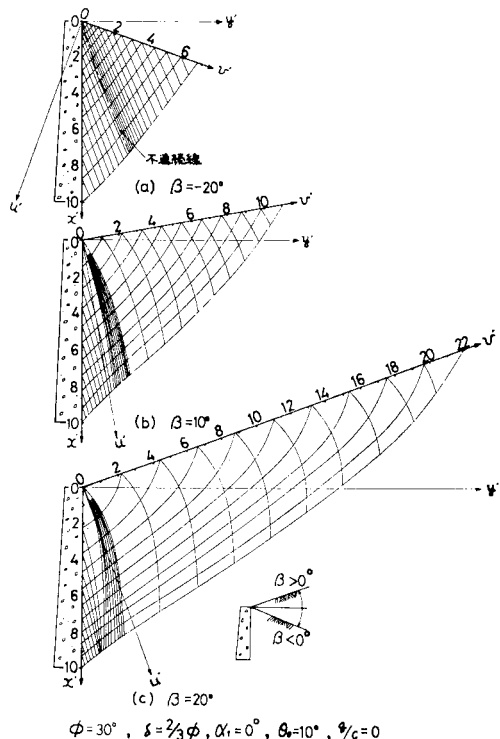


図-12  $\alpha_1 = 0^\circ$  のとき  $\beta$  によるすべり線網の変化 ( $\phi = 30^\circ$ ,  $\delta = 2/3 \cdot \phi$ ,  $\theta_0 = 10^\circ$ )

応力（土圧）算定が可能な限界深さは次式で与えられる。

$$u_* = \frac{c \cos \phi \cdot \cos \theta_0}{r \sin(\beta_0 - \phi)} \frac{q}{r} \dots \dots \dots (22)$$

地表面載荷重  $q=0$  の場合、 $\beta_0 < \phi$  の条件では  $u_* < 0$  となり、応力算定が可能な限界深さは裏込め土内に存在しない。 $c$  が小さいほど、また  $\beta_0$  の値が大きいくほど、 $u_*$  は小になり、計算可能な裏込め土砂内の深さが縮小されることになる。ここでは  $c, r$  の広範囲の値に対して土圧算定を可能にするために、 $\sigma_n'$  は前述したように  $x'=H'=10$  を目標として計算を行った。ここに  $II$  は擁壁の鉛直高さである。なお  $\beta_0 > \phi$  の場合は、ここでは計算不能として取り扱った。

$\beta_0$  の値がしだいに増大して、 $\beta_0 = \phi$  になると、 $\sigma_n'$  の分布は 図-11 に示すように、直線ではなく、湾曲した形状を示すことに注意しなければならない。

図-13, 14 は代表的一例として、地震力を変化させたときの  $\sigma_n'$  とすべり面の外枠の形状をそれぞれ示す。この擁壁は  $\alpha_1 = \beta = 0^\circ, \phi = 30^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$  である。 $\theta_0$  が大になるに従って、主働土圧が増大し、すべり面は壁頂から測って、裏込めてんば面上遠方に到達する。図-14 の点線は  $c=0$  の場合の物部土圧によるすべり面を比較

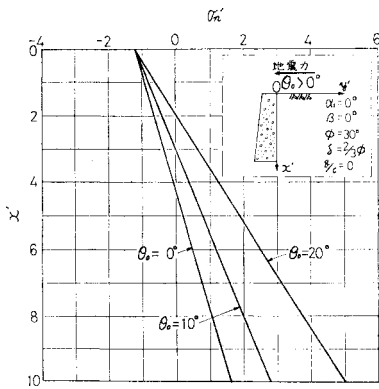


図-13  $\alpha_1 = \beta = 0^\circ$  のとき  $\theta_0$  による  $\sigma_n'$  の変化 ( $\phi = 30^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$ )

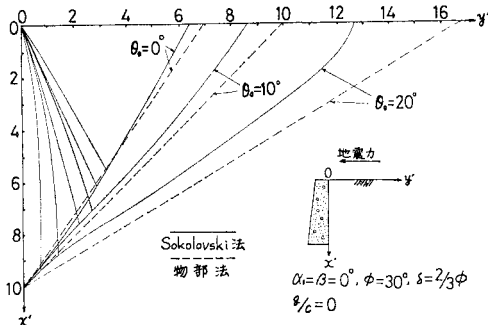


図-14  $\alpha_1 = \beta = 0^\circ$  のとき  $\theta_0$  によるすべり線網の外枠の比較 ( $\phi = 30^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$ )

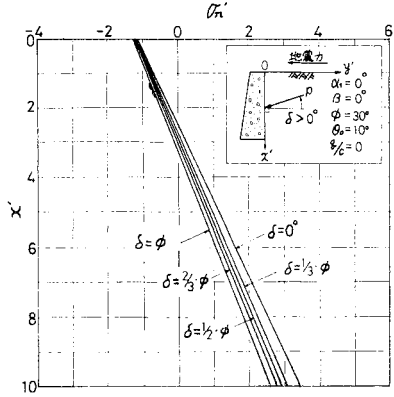


図-15  $\alpha_1 = \beta = 0^\circ$  のとき  $\delta$  による  $\sigma_n'$  の変化 ( $\phi = 30^\circ, \theta_0 = 10^\circ$ )

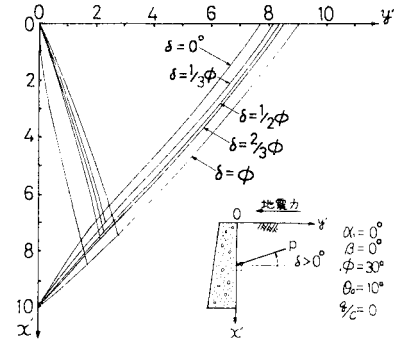


図-16  $\alpha_1 = \beta = 0^\circ$  のとき  $\delta$  によるすべり線網の外枠の比較 ( $\phi = 30^\circ, \theta_0 = 10^\circ$ )

のために示したものである。なお、すべり線網を受働土圧<sup>2)</sup>のそれと比較して大きく異なる点は、加速度が大になるに従って、図-1 に示す領域 ①, ② が主働では受働の場合よりもはるかに壁面に接近してくることである。これは地震力の作用方向が両者を比較して異なるためである。

図-15 は壁摩擦角  $\delta$  が変化したときの  $\sigma_n'$  の比較を  $\alpha_1 = \beta = 0, \phi = 30, \theta_0 = 10^\circ$  の条件で行っている。 $\delta = 2/3 \cdot \phi$  でも  $\delta = 1/2 \cdot \phi$  でも  $\sigma_n'$  の大きさに大差がない。この場合のすべり面は 図-16 に示されているが、すべり面は受働土圧の場合と同じように、 $\delta$  が大であるほど、壁頂から測って裏込めてんば面上遠方に到達する。

図-17, 18 は  $\delta = 2/3 \cdot \phi$  で内部摩擦角を変化させたときの  $\sigma_n'$  とすべり面の外枠の形状をそれぞれ示す。この擁壁は図に示されたように、 $\alpha_1 = 0^\circ, \beta = 20^\circ$  であり、 $\theta_0 = 10^\circ$  であるから、 $\beta_0 = 30^\circ$  となる。前述したように、内部摩擦角が  $\beta_0$  に接近するに従って、 $\sigma_n'$  が直線分布からしだいに湾曲した形状になることがわかる。すべり面は受働土圧<sup>2)</sup>と相反して、内部摩擦角が小さいほど、壁頂から測って遠方に到達することがわかる。

以上の特異点の解の計算では、差分法における分割数

$M$  を 20 とした. 分割数を変化させたときの  $\sigma_n'$  の分布を一例として, 図-19 に示す. 擁壁の形状と裏込め土の条件は図に示されている. 分割数が  $\sigma_n'$  に与える影響は受働土圧のそれに比して小さい. この理由は主働土圧では, すべり面が極度に湾曲していないためである.

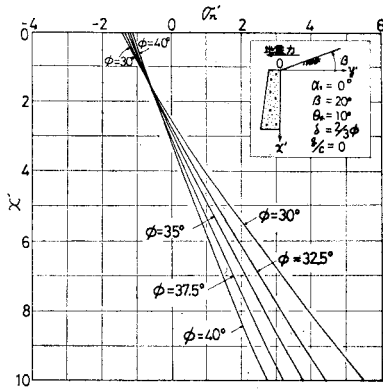


図-17  $\alpha_1=0^\circ, \beta=20^\circ$  のとき  $\phi$  による  $\sigma_n'$  の変化 ( $\delta=2/3\cdot\phi, \theta_0=10^\circ$ )

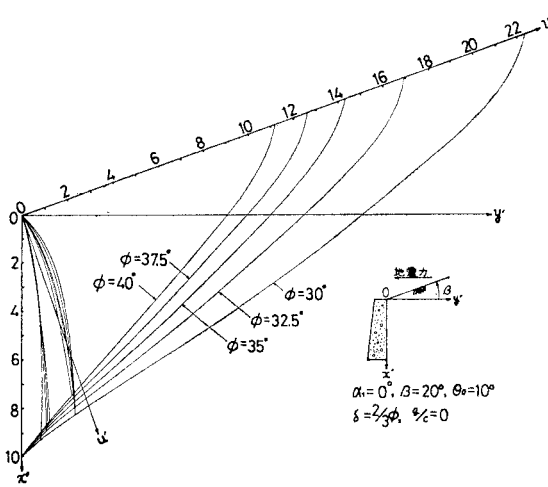


図-18  $\alpha_1=0^\circ, \beta=20^\circ$  のときの  $\phi$  によるすべり線網の外枠の比較 ( $\delta=2/3\cdot\phi, \theta_0=10^\circ$ )

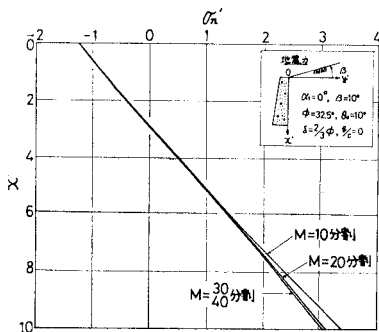


図-19 分割法による  $\sigma_n'$  の比較

(2) 不連続線が形成されるもの

a)  $\phi_0 \geq \phi'_0$  であって, 領域が擁壁下方で重複する場合

擁壁背後の裏込め土の上部では領域は重複せず, 下方で領域が重複するという事は, 地震時主働土圧の1つの特徴で, 加速度が大になると, このようなことが起こる. この場合,  $\phi_0 \geq \phi'_0$  であるから 図-3 に示した特異点の解を求める方法で計算を行う. 図-20 (a) が, この下方で重複したすべり線網の一例である. Goursat 問題を解いて求めた領域 ② が領域 ③ に重複していることがわかる. そこで重複区間のそれぞれの領域の  $+m$  すべり面の交点を逐次結びと 図-20 (b) に示したように1つの曲線 ABC が得られる. 上述した交点を拡大して明確にさせたものが 図-20 (c) に示される. この曲線 ABC の左側に領域 ③ を残し, 右側に領域 ② を残すと, 以下の検証でわかるように, 曲線 ABC のうち A 点を除いた部分が不連続線となることがわかる.

まず, 上述した交点のすぐ左側の領域 ③ における  $\bar{\sigma}$ ,  $\psi$  と右側の領域 ② における  $\bar{\sigma}'$ ,  $\psi'$  を求め,  $\omega$  は式 (9) より求める. ついで式 (8) の第1式, 第2式が満足されるかを各式の右辺と左辺の大きさを調べることによって検査する. 表-1 の第1行目がこの場合の検証を示す. 曲線上の A~C の各点は上述の関係を近似的に満足さ

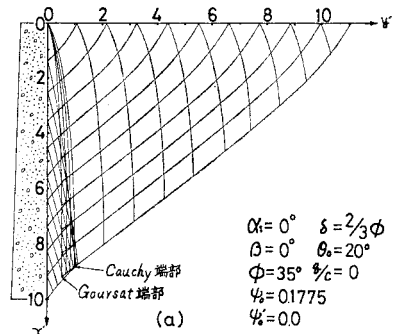


図-20 (a) 擁壁下部の裏込め土内で領域 ②, ③ の重複

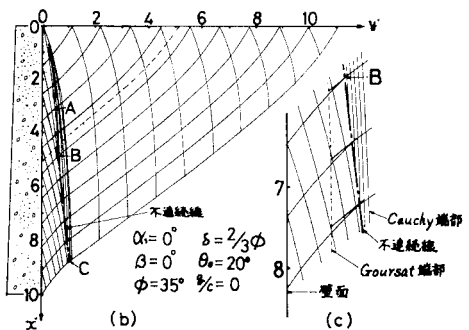


図-20 (b), (c) 領域の重複部分における不連続線 BC

表-1 式(8)による不連続線の検証 ( $\delta=2/3\phi, q/c=0$ )

条 件	節点	$\phi$	$\sigma$	$\phi'$	$\sigma'$	第1式の 左 辺	第1式の 右 辺	誤 差 (%)	第2式の 左 辺	第2式の 右 辺	誤 差 (%)
$\alpha_1=0^\circ, \beta=0^\circ$ $\phi=35^\circ, \theta_0=20^\circ$	A	0.4094	2.9804	0.3582	3.1871	0.5729	0.5728	0.0	2.5271	2.5154	0.5
	B	0.3482	5.6338	0.4438	4.9398	0.5710	0.5710	0.0	4.2970	4.3061	-0.2
	C	0.3164	8.9556	0.4507	7.4285	0.5684	0.5684	0.0	6.6201	6.6220	0.0
$\alpha_1=0^\circ, \beta=10^\circ$ $\phi=35^\circ, \theta_0=20^\circ$	A	0.6093	3.0968	0.6452	2.9469	0.5732	0.5732	0.0	2.4722	2.4738	0.0
	B	0.5021	7.1306	0.7210	5.3034	0.5599	0.5599	0.0	4.9000	4.9341	-0.7
	C	0.4909	11.3440	0.7300	8.1669	0.5573	0.5573	0.0	7.6541	7.6661	-0.2

$$\text{誤差 (\%)} = \frac{\text{左辺} - \text{右辺}}{\text{右 辺}} \times 100$$

せるが、A点だけはさらに式(11)、(12)の関係を満足させないから、曲線ABCのうち上部A点を除いた部分が不連続線であることがわかる。

この問題を解いた結果、次の2つの特筆すべきことがわかった。その1つは裏込め土砂上部で、図-20(b)に示された点線の+mすべり面より上方の区域では、図-1に示されたような3つの領域が分離され、やや深いところで、不連続線が形成されるということ、他の1つは不連続線はその右側で、図-20(b)に示されたように、Goursat問題を解いて求められる領域②に接することである。3.で考察した不連続線は式(8)の $\sigma'$ 、 $\phi'$ が示すように領域①の値であり、不連続線の右側に領域①が接している場合である。

前節5.(1)の特異点の解の図-12に示したように、 $\beta$ が大になると領域①が壁面に接近してくる。この場合の一例として、 $\theta_0, \phi, \alpha_1$ を図-20と同じにして、 $\beta=10^\circ$ の場合の例を図-21(a)に示す。これも図-20と同じく、 $\phi_0 \geq \phi'_0$ であるが、やや深いところで領域③が領域②に、さらに深いところで、領域③が領域①に重複していることが図-21(a)からわかる。これら2つの重複部分におけるそれぞれの+mすべり面の交点を結ぶと、図-21(b)に太い鎖線で示した曲線ABCが得られる。これが不連続線であることは表-1の第2行目に示された検証から明白である。A~Cの3点ともに、式(8)の第1、第2式を近似的に満足させ、しかも式(11)、(12)の関係を満足させている。

この問題を解いた結果、特筆すべきことが2つわかった。その1つは不連続線はその上方右側でGoursat領域に接し、下方右側でCauchy領域に接するというきわめて興味あるすべり線網になるということ、他の1つは計算の途中において、すべり面が擁壁内に入っても、不連続線を考えることによって、その左右で図-21(b)に示すように、納得のゆくすべり線網が得られ、すべり面に沿ってつり合い条件と強度条件が満足されるから、合理的に土圧算定ができるということである。

**b)  $\phi_0 < \phi'_0$  の場合**

この場合は壁頂から領域が重複する一般的な場合で、不連続線は壁頂から、下方へと延びて形成される。前述

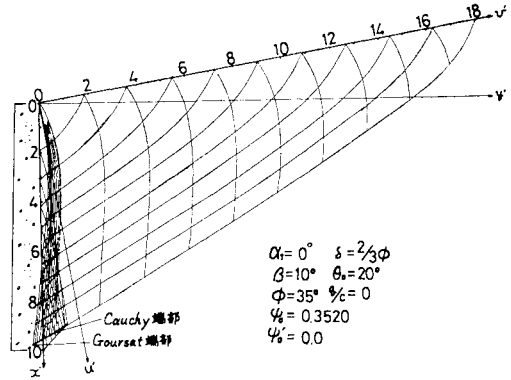


図-21(a) 擁壁下部の裏込め土内で領域①、③の重複

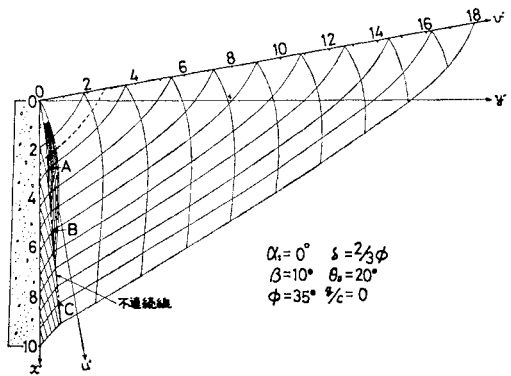


図-21(b) 領域の重複部分における不連続線 ABC

した3.に示した方法、すなわち原点近傍点の4値を決定し、第4境界値問題を解いて、不連続線を決定しながら壁面に作用する土圧を求める。図-10(c)、図-12(a)に不連続線の一例が示される。原点近傍点を決定するための $u^*$ の値は一例として、図-22に示した。

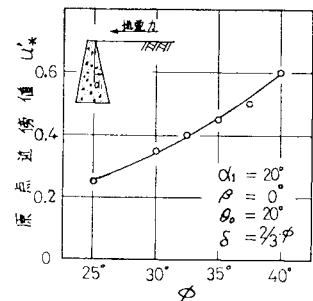


図-22 原点近傍点を決定するための $u^*$

した。図-22に示した。



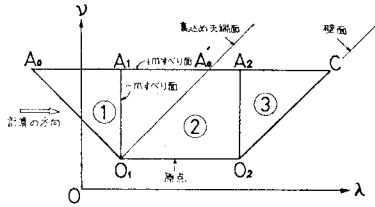


図-23 特異点の解を強行する場合の領域の写像

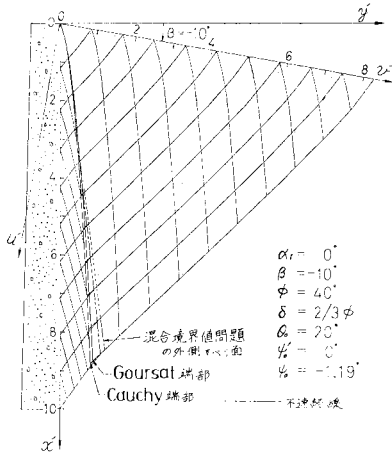


図-24 特異点の解を強行して求めた不連続線の一例

計算した多くの場合のうち、わずかな例ではあったが、地震時受働土圧と同じように、壁頂では  $\phi_0 < \phi_0'$  でありながら、壁の下方で  $\phi = \phi_0'$  となり、第4境界値問題の解法を適用すると、不連続線上の節点の間隔が大きくなり、土圧算定を不正確にする場合があった。これは領域 ①、③ の重複がわずかな場合に起こる。この場合は受働土圧のそれと同じように<sup>2)</sup> 領域を 図-23 のように写像して、特異点の解を強行して土圧を求めた。一例を 図-24 に示した。

(3) 計算法のとりまとめ

いままで述べてきた擁壁に作用する土圧  $\sigma_n'$ 、 $\tau_{nt}'$  がどの方法で算定されたかは後述する土圧係数表(表-2~4)のところで一括して示されている。表の係数に付した\*印は前節(2).b)に示した第4境界値問題を解いて求めた不連続線の解によるもので、 $\phi_0 < \phi_0'$  である。同じく係数が [ ] 印の中に示されたものは、 $\phi_0 < \phi_0'$  であるが、特異点の解を強行して求めたもので、前述したようにその個数は少ない。( ) 印内に示されたものは、 $\phi_0 \geq \phi_0'$  であるが、特異点の解を使用し、擁壁の下部におけるすべり線網の重複を不連続線で処理して、1つの不連続線網を形成したもので、この個数はかなり多い。表の係数になんの記号も付せられていないものが、 $\phi_0 \geq \phi_0'$  であって、特異点の解から求められたものである。また、\*\* 印が算定不能のところである。

以上、表に付せられた記号から判断して、不連続線が形成されるもの、すなわち \* 印, [ ] 印, ( ) 印で示される係数の個数は全体の中でかなり多い。このことは塑性論の応力場を用いた土圧算定において、不連続線がその適用範囲を著しく拡大させていることを明白にさせている。

6. 土圧係数

前章 5.(1) に示した結果から明白なように、粘着力をもつ裏込め土では、壁体に引張り応力が作用する。いま、引張り応力が作用する最大の深さを 図-25 に示すように、 $x_0'$  で表し、これに対応する  $l'$  軸の値を  $l_0'$  で表す。 $x_0' = l_0' \cos \alpha_1$  であるから、 $x_0'$  は、一連の数値計算中に、 $\sigma_n' = 0$  を与える  $l'$  軸の値を内挿法で求めて決定することができる。引張り応力が作用する区間における  $\sigma_n'$  を無視すれば、土圧算定の土圧係数  $K_{AET}$  は次式から求められる。

$$K_{AET} = \frac{\sigma_n'(x'=10) - \sigma_n'(x'=x_0')}{10 - x_0'} \dots\dots\dots (23)$$

ここに、 $\sigma_n'(x'=x_0') = 0$  であり、 $K_{AET}$  は  $x_0'$  から  $x' = 10$  までの間の土圧分布の勾配から決定される。壁頂から測って深さ  $x'(x' \geq x_0')$  の点の  $\sigma_n'$  は次式から求められる。

$$\sigma_n' = (x' - x_0') K_{AET} \dots\dots\dots (24)$$

また、任意の  $(c, r)$  をもつ裏込め土による壁面に垂直な土圧  $\sigma_n$  は、 $s=c, l=c/r$  を用いて次式から決定される。

$$\begin{aligned} \sigma_n &= s\sigma_n' = c(x' - x_0') K_{AET} = \frac{c}{l}(x - x_0) K_{AET} \\ &= r(x - x_0) K_{AET} \dots\dots\dots (25) \end{aligned}$$

$\beta = 0^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$  で  $\alpha_1, \phi, \theta_0$  を変化させたときの  $x_0'$  と  $K_{AET}$  を表-2 に、 $\alpha_1 = 0^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$  で  $\beta, \phi, \theta_0$  を変化させたときの  $x_0', K_{AET}$  を表-3 に示し、また  $\phi = 30^\circ$  と  $\phi = 35^\circ$  で、同じく  $\delta = 2/3 \cdot \phi$  で  $\alpha_1, \beta, \theta_0$  を

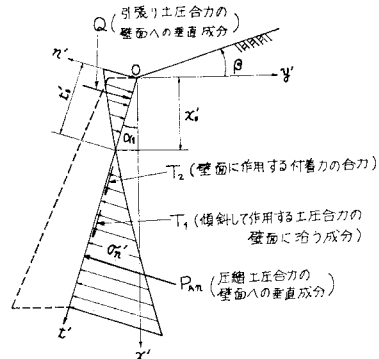


図-25  $K_{AET}$  と  $x_0'$  の説明

表-2  $\beta=0^\circ$ ,  $\alpha_1$  を変化させたときの  $x_0'$ ,  $K_{AET}$

$\phi$	$\theta_0$	$\alpha_1 = -20^\circ$		$\alpha_1 = -10^\circ$		$\alpha_1 = 0^\circ$		$\alpha_1 = 10^\circ$		$\alpha_1 = 20^\circ$	
		$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$
25.0°	0°	6.9184	0.2345	5.2048	0.2903	3.9705	0.3499	3.0214	0.4150	*2.2394	*0.4906
	10°	4.6562	0.3478	3.6753	0.4145	2.9008	0.4880	2.2631	0.5708	*1.7441	*0.6580
	20°	3.1364	0.5621	2.5776	0.6560	2.1027	0.7644	1.6881	0.8925	*1.3608	*0.9556
30.0°	0°	8.1565	0.1721	5.8908	0.2246	4.3546	0.2829	3.2456	0.3498	*2.3086	*0.4272
	10°	5.2923	0.2645	4.0361	0.3296	3.0492	0.4047	2.3579	0.4970	*1.7751	*0.5858
	20°	3.4412	0.4313	2.7400	0.5263	2.1763	0.6396	(1.6828)	(0.7757)	*1.3432	*0.8362
32.5°	0°	8.9560	0.1464	6.3097	0.1968	4.5770	0.2537	3.3396	0.3197	*2.3482	*0.3992
	10°	5.6838	0.2296	4.2496	0.2937	3.2021	0.3681	(2.4010)	(0.4574)	*1.7815	*0.5485
	20°	3.6351	0.3781	2.8386	0.4715	(2.2164)	(0.5852)	(1.7267)	(0.7283)	*1.3344	*0.7875
35.0°	0°	9.8868	0.1237	6.7781	0.1718	4.8167	0.2272	3.4541	0.2926	*2.3875	*0.3733
	10°	6.1206	0.1992	4.4794	0.2611	3.3129	0.3346	(2.4414)	(0.4248)	*1.8013	*0.5216
	20°	3.8418	0.3316	2.9397	0.4231	(2.2536)	(0.5368)	(1.7239)	(0.6829)	*1.3269	*0.7454
37.5°	0°	10.9088	0.1045	7.3039	0.1493	5.0762	0.2029	*3.5623	*0.2680	*2.4366	*0.3477
	10°	6.6114	0.1720	4.7275	0.2316	3.4275	0.3039	*2.8155	*0.3873	*1.7146	*0.4840
	20°	4.0643	0.2907	3.0436	0.3800	(2.2871)	(0.4934)	*2.0303	*0.6048	*1.3222	*0.7096
40.0°	0°	11.6719	0.0856	7.9003	0.1292	5.3578	0.1807	*3.6507	*0.2474	*2.4354	*0.3261
	10°	7.1671	0.1478	4.9970	0.2050	3.5457	0.2759	*2.6495	*0.3550	*1.7131	*0.4615
	20°	4.3053	0.2545	3.1496	0.3413	(2.3156)	(0.4543)	*1.9195	*0.5696	*1.3206	*0.6764

\* 不連続線の解 ( ) 特異点の解を使用し, 重複部を不連続線で処理

表-3  $\alpha_1=0^\circ$ ,  $\beta$  を変化させたときの  $x_0'$ ,  $K_{AET}$

$\phi$	$\theta_0$	$\beta = -20^\circ$		$\beta = -10^\circ$		$\beta = 0^\circ$		$\beta = 10^\circ$		$\beta = 20^\circ$	
		$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$
30.0°	0°	*4.2631	*0.2295	4.5225	0.2553	4.3546	0.2829	4.1646	0.3198	3.9231	0.3792
	10°	*3.1744	*0.3160	3.2289	0.3490	3.0942	0.4047	2.9238	0.4931	2.5498	0.7437
	20°	*2.3187	*0.4275	2.2849	0.5087	2.1763	0.6396	1.7733	0.9714	**	**
32.5°	0°	*4.3710	*0.2162	4.7490	0.2301	4.5770	0.2537	4.3852	0.2840	4.1433	0.3327
	10°	*3.2714	*0.2909	3.3396	0.3197	3.2021	0.3681	3.0300	0.4420	2.7061	0.6106
	20°	*2.3614	*0.3988	(2.3261)	(0.4722)	(2.2164)	(0.5852)	(1.9513)	(0.8570)	**	**
35.0°	0°	*4.6914	*0.1909	4.9924	0.2070	4.8167	0.2272	4.6224	0.2532	4.3798	0.2919
	10°	*3.4045	*0.2671	3.4541	0.2926	3.3129	0.3346	3.1391	0.3968	2.8379	0.5230
	20°	*2.3974	*0.3728	(2.3653)	(0.4386)	(2.2536)	(0.5368)	(2.0402)	(0.7439)	**	**
37.5°	0°	*5.1011	*0.1748	[5.2700]	[0.1859]	5.0762	0.2029	4.8046	0.2214	4.6354	0.3261
	10°	*3.5373	*0.2419	[3.5795]	[0.2677]	3.4275	0.3039	3.2508	0.3564	2.9636	0.4548
	20°	*2.4325	*0.3480	[2.3842]	[0.4068]	(2.2871)	(0.4934)	(2.0808)	(0.6585)	**	**
40.0°	0°	*5.4549	*0.1558	[5.5563]	[0.1163]	5.3578	0.1807	5.1568	0.1988	4.9104	0.2242
	10°	*3.6631	*0.2419	[3.6940]	[0.2441]	3.5457	0.2759	3.3650	0.3202	3.0829	0.3984
	20°	*2.4666	*0.3480	[2.4160]	[0.3781]	(2.3156)	(0.4543)	(2.1128)	(0.5899)	**	**

\* 不連続線の解 ( ) 特異点の解を使用し, 重複部を不連続線で処理  
 \*\* 算定不能 [ ] 不連続線の条件に対して特異点の解を強行

変化させたときの  $x_0'$ ,  $K_{AET}$  を表-4 に示している。ただし、表-4 の  $\theta_0$  は表-2, 3 に比較して  $\theta_0$  の間隔を小にとっている。

鉛直高さが  $H$  である擁壁に作用する壁面に垂直な土圧合力  $P_{An}$  は次式で与えられ、壁底から測って高さ  $1/3 \cdot (H-x_0)$  の点に作用する。これは  $x_0$  区間に作用する引張り応力を無視した土圧合力である。

$$P_{An} = \frac{1}{2} r(H-x_0)^2 K_{AET} / \cos \alpha_1 \dots\dots\dots (26)$$

壁面のせん断応力  $\tau_{nt}$  の算定では、 $x_0$  区間の垂直応力を無視できない。そこで壁面に垂直な土圧合力  $Q$  を次のように表す。

$$Q = Q_1 + P_{An} \dots\dots\dots (27)$$

$Q_1$  は壁の上部に作用する引張り応力の合力で、引張り応力は壁頂から深さ  $x_0$  まで直線的に分布するとすれば、 $Q$  は次式で与えられる。

$$Q = \frac{1}{2} c x_0 \frac{K_{AETc}}{\cos \alpha_1} + P_{An} \dots\dots\dots (28)$$

ここに、 $K_{AETc}$  は無次元量で求めた壁頂の壁面に垂直な土圧から決定され、この値は負である。

壁面に作用するせん断力  $T$  は次式で表される。

$$T = \int_0^{H_1} \tau_{nt} \cdot dt = \tan \delta \int_0^{H_1} (\sigma_n + c \cot \phi) dt = T_1 + T_2 \dots\dots\dots (29)$$

表-4  $\alpha_1 \neq 0^\circ, \beta \neq 0^\circ$  のときの  $x_0', K_{AET}$  ( $\phi = 30^\circ, \phi = 35^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$ )

$\phi$	$\beta$	$\alpha_1$ $\theta_0$	$-20^\circ$		$-10^\circ$		$10^\circ$		$20^\circ$	
			$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$	$x_0'$	$K_{AET}$
30°	10°	0°	7.9181	0.1867	5.6917	0.2485	3.1112	0.4039	(2.2826)	(0.5067)
		6°	6.0317	0.2490	4.5044	0.3219	(2.5770)	(0.5106)	(1.9209)	(0.6393)
		12°	4.6183	0.3414	3.5610	0.4329	(2.1298)	(0.6788)	(1.6198)	(0.8533)
		17°	3.6780	0.4686	2.9041	0.5888	(1.8094)	(0.9272)	(1.4097)	(1.1789)
	20°	0°	7.4836	0.2107	5.3806	0.2868	2.9633	0.4899	(2.1971)	(0.6332)
		6°	5.6001	0.3017	4.1966	0.4001	(2.4340)	(0.6737)	(1.8469)	(0.8760)
		12°	4.1019	0.5064	3.1538	0.6770	(1.9087)	(1.2321)	(1.5297)	(1.5842)
		17°	**	**	**	**	**	**	**	**
35°	10°	0°	9.6754	0.1322	6.5886	0.1872	3.3343	0.3340	(2.3657)	(0.4368)
		6°	7.1567	0.1807	5.1008	0.2466	(2.7111)	(0.4274)	(1.9546)	(0.5580)
		12°	5.3536	0.2503	3.9545	0.3334	(2.2006)	(0.5699)	(1.6198)	(0.7474)
		17°	4.2016	0.3386	3.1819	0.4456	(1.8469)	(0.7629)	(1.3929)	(1.0098)
	20°	0°	9.2487	0.1450	6.2824	0.2101	3.1886	0.3945	(2.2833)	(0.5318)
		6°	6.7393	0.2081	4.8031	0.2917	(2.5750)	(0.5363)	(1.8865)	(0.7258)
		12°	4.9143	0.3172	3.6300	0.4370	(2.0483)	(0.8115)	(1.5552)	(1.1236)
		17°	(3.4675)	(0.5855)	(2.6814)	(0.7832)	(1.7105)	(1.3937)	(1.3649)	(1.8631)

( ) 特異点の解を使用し、重複部を不連続線として処理 \*\* 解法不能

ここに、 $H_1$  は壁の背面に沿う壁の長さで、 $H = H_1 \cdot \cos \alpha_1$

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= \left[ \frac{1}{2} c x_0 \frac{K_{AEC}}{\cos \alpha_1} + P_{An} \right] \tan \delta \\ T_2 &= \left[ \frac{c \cot \phi}{\cos \alpha_1} \cdot H \right] \tan \delta \end{aligned} \right\} \dots \dots (30)$$

$T > 0$  のときこのせん断力は壁面に沿って下方に向かって作用する。ここに、 $c \cot \phi \cdot \tan \delta = c_1$  とおくと、これは壁面に沿う付着力に相当し、 $T_2$  は付着力の合力でこれは壁面に沿って下方に向かって作用する。また、 $T_1$  は傾斜して作用する土圧合力の壁面に沿う成分である。式 (29) に示すせん断力  $T$  は引張り区間において、付着力よりも減少されたせん断応力を考えていることになる。なお、表-2~4 に示した擁壁の  $K_{AEC}$  は表-5 と表-6 に一括して示されている。 $K_{AEC}$  の値は地震力を表すパラメーター  $\theta_0$  に無関係である。壁体上部  $x_0$  区間に作用するせん断応力  $\tau_{nt}$  を無視すると、 $T$  は次式の  $T'$  で表される。

$$T' = \left[ P_{An} + \frac{c \cot \phi}{\cos \alpha_1} (H - x_0) \right] \tan \delta \dots \dots (31)$$

これは安全側の計算をしたことになるが、上述したように  $x_0$  区間で付着力まで無視したことになる。

上述した表の値  $K_{AET}, x_0', K_{AEC}$  を使用して求めた土圧合力の誤差は主として土圧分布を直線と仮定して求めた  $K_{AET}$  の値に起因している。

いま、 $P_{An}'$  は表の上述した係数を使用して求めた  $H' = 10$  の擁壁に作用する垂直土圧合力、 $(P_{An})'$  は同じ擁壁で無次元計算によって求めた  $\sigma_n'$  の分布から求めた圧縮部分の垂直土圧合力として、両者を比較すると、図-26 のようになる。この擁壁は、土圧分布が図-17 に示されている擁壁と同じである。これによると、 $P_{An}'$

表-5  $\delta = 2/3 \cdot \phi$  で (1)  $\beta = 0^\circ, \alpha_1$  を変化させたとき (2)  $\alpha_1 = 0^\circ, \beta$  を変化させたときの  $K_{AEC}$  の値

$\phi$	$\alpha_1$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$
		(1)	30.0°	-1.4019	-1.3282	-1.2380
	32.5°	-1.3122	-1.2481	-1.1680	-1.0680	-0.9438
	35.0°	-1.2275	-1.1719	-1.1010	-1.0104	-0.8957
	37.5°	-1.1472	-1.0993	-1.0366	-0.9547	-0.8488
	40.0°	-1.0709	-1.0298	-0.9746	-0.9008	-0.8031
$\phi$	$\beta$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$
		(2)	30.0°	-0.9934	-1.1277	-1.2380
	32.5°	-0.9438	-1.0680	-1.1680	-1.2481	-1.3122
	35.0°	-0.8957	-1.0104	-1.1010	-1.1719	-1.2275
	37.5°	-0.8488	-0.9547	-1.0366	-1.0993	-1.1472
	40.0°	-0.8031	-0.9008	-0.9746	-1.0298	-1.0709

表-6  $\alpha_1 \neq 0^\circ, \beta \neq 0^\circ$  のときの  $K_{AEC}$  ( $\delta = 2/3 \cdot \phi$ )

$\phi$	$\beta$	$-20^\circ$	$-10^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$
		30°	10°	-1.4622	-1.4019
	20°	-1.5114	-1.4622	-1.3282	-1.2380
35°	10°	-1.2710	-1.2275	-1.1010	-1.0104
	20°	-1.3051	-1.2710	-1.1719	-1.1010

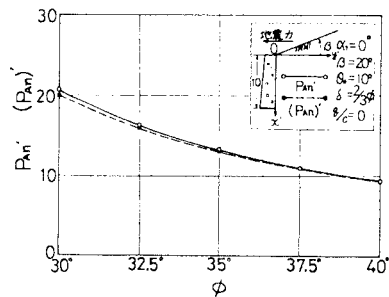


図-26 表の  $K_{AET}$  と  $x_0'$  を使用して求めた無次元量の土圧合力  $P_{An}'$  と無次元量の土圧分布から求めた土圧合力  $(P_{An})'$  の比較

と  $(P_{An})'$  との差は  $\beta_0 = \phi$  の場合に大きい、表の値を使用して、式 (26) から求めた  $P_{An}'$  は実際の土圧分布から求めた  $(P_{An})'$  よりも最大 3.5% 大きめの値を与え、安全側の誤差となる。

図-27 は  $\beta = 0^\circ, \theta_0 = 10^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$  の条件で  $\alpha_1$  が変化したときの  $\alpha_1$  に対する  $K_{AE\gamma}$  を図示している。実線は特異点の解で求めたもの、点線は不連続線が出現する方法で求めた値である。このように解法が異なっても、算定した  $K_{AE\gamma}, x_0'$  は 1 つの曲線上に図示される。

次に、他の条件が同じで、 $\delta = 2/3 \cdot \phi$  の場合に、内部摩擦角が減少すると、 $K_{AE\gamma}$  が増大し、 $x_0'$  が減少する。また、図-28 は表-2 の  $\alpha_1 = -10^\circ, \beta = 0^\circ, \phi = 35^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$  に着目して、 $\theta_0$  が変化したときの  $K_{AE\gamma}$  と  $x_0'$  を図示したものであるが、 $\theta_0$  が増大すると、 $K_{AE\gamma}$  は増大し、 $x_0'$  が減少する。

図-29 は  $K_{AE\gamma}$  を物部土圧の土圧係数  $K_{AE}''$  と比較したものである。この場合、 $\alpha_1 = 0, \beta = 10^\circ, \phi = 35^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$  で  $\theta_0$  を変化させている。実線が  $K_{AE\gamma}$ 、点線

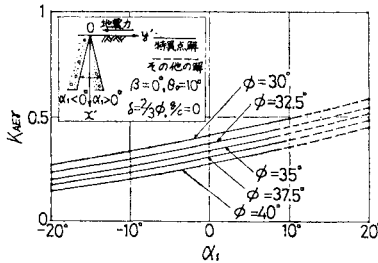


図-27  $\beta = 0^\circ, \theta_0 = 10^\circ$  のとき  $\alpha_1$  による  $K_{AE\gamma}$  の変化

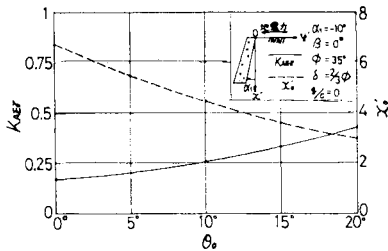


図-28  $\beta = 0^\circ, \alpha_1 = -10^\circ, \phi = 35^\circ$  のとき  $\theta_0$  の変化による  $K_{AE\gamma}$  と  $x_0'$  の変化

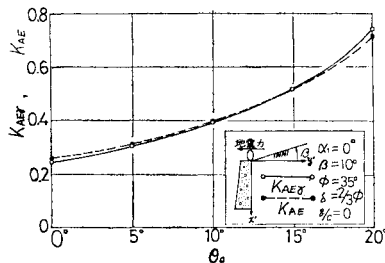


図-29  $\alpha_1 = 0^\circ, \beta = 10^\circ, \phi = 35^\circ$  のとき、 $K_{AE\gamma}$  と物部土圧による  $K_{AE}''$  の比較 ( $\phi = 35^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi$ )

が  $K_{AE}$  であるが、両者は比較的によくあっている。以下、表を使用した場合の計算例を示す。

擁壁の鉛直高さ  $H = 8\text{ m}$  で、 $\alpha_1 = -10^\circ, \beta = 0^\circ, \theta_0 = 20^\circ, \phi = 35^\circ, \delta = 2/3 \cdot \phi, c = 2\text{ t/m}^2, \gamma = 1.6\text{ t/m}^3$  の場合に、壁面に作用する垂直土圧合力  $P_{An}$  とせん断力  $T$  を求める。

$$\cos \alpha_1 = 0.985, \tan \delta = 0.431, \cot \phi = 1.428$$

表-2 より、

$$x_0' = 2.94, K_{AE\gamma} = 0.423$$

$$s = c = 2\text{ t/m}^2, l = c/\gamma = 2/1.6 = 1.25\text{ m}$$

$$x_0 = l x_0' = 1.25 \times 2.94 = 3.68\text{ m}$$

式 (26) より、

$$P_{An} = \frac{1}{2} \times 1.6 \times (8 - 3.68)^2 \times 0.423 \times \frac{1}{0.985} = 6.41\text{ t/m}$$

表-5 より、

$$K_{AEc} = -1.17$$

式 (30) より、

$$T_1 = \left\{ \frac{1}{2} \times 2 \times 3.68 \times \frac{-1.17}{0.985} + 6.41 \right\} \times 0.431 = 0.879\text{ t/m}$$

$$T_2 = \left( \frac{2 \times 1.43}{0.985} \times 8 \right) \times 0.431 = 10.0\text{ t/m}$$

$$T = T_1 + T_2 = 10.9\text{ t/m}$$

式 (31) で求めると、

$$T' = \left\{ 6.41 + 2 \times \frac{1.43}{0.985} \times (10 - 3.68) \right\} \times 0.431 = 10.7\text{ t/m}$$

となり、 $T$  と  $T'$  でこの場合は大きな差はない。

また、 $c = 0$  の場合には、式 (26) で  $x_0 = 0$ 、式 (30)、(31) で  $c = 0$  として  $P_{An}$  と  $T$  を決定できる。

## 7. 結 語

裏込め土に粘着力がある場合のすべり線網の重複を不連続線で処理することにより、塑性論の応力場を主働土圧算定に適用できる範囲を拡大させることができた。また、擁壁に作用する主働土圧を容易に決定できるように、土圧係数  $K_{AE\gamma}, K_{AEc}$  ならびに  $x_0'$  の値を  $\delta = 2/3 \cdot \phi$  の場合に表に表した。この土圧は擁壁上部の  $x_0$  区間の垂直応力  $\sigma_n$  を無視しているが、せん断応力の  $\tau_{nt}$  は無視していない。得られた結果の要旨を示すと次のようになる。

(1) 裏込め土に粘着力がある場合の壁面に作用する  $\sigma_n'$  の符号は、壁の上部では負であるが、 $\tau_{nt}'$  の符号は  $\delta$  の符号によって変化し、 $\delta > 0$  なるときは、壁面のいずれの点においても正である。

(2) 他の条件が同じ場合に、 $\alpha_1$  が大きいほど、ま

た  $\beta$  が大きいほど、 $\sigma_n'$  の正の値は大になる。

(3) 他の条件が同じ場合に、 $\alpha_1$  が大きいほど、また  $\beta$  が大きいほど、すべり面は裏込めてんば面上、壁頂より測って遠方に到達する。

(4) 壁摩擦角の変化が  $\sigma_n'$  の大きさに与える影響は受働土圧のように顕著ではない。

(5) 他の条件が同じで  $\delta$  が大きいほど、すべり面は裏込めてんば面上壁頂から測って遠方に到達する。また、 $\delta=2/3\cdot\phi$  で  $\phi$  が小さいほど、すべり面は裏込めてんば面上遠方に到達する。後者の性質は受働土圧の場合と相反する。

(6) 地震力が増大するに従って、特異点の解から求められる領域 ①、領域 ② は壁面に接近する。

(7) 地震力が増大し、 $\beta_0$  が  $\phi$  に接近するほど、 $\sigma_n'$  の分布形状は曲線になる。

(8) 土圧算定のための差分法における分割数を 20 としたが、分割数が  $\sigma_n'$  に与える影響は同じ  $c, \phi$  材の地震時受働土圧ほど大ではない。

(9) 不連続線の解の成立条件を  $r \neq 0$  と  $r=0$  の 2 つの場合に分けて考察した。壁頂で特異点の条件が満足されても地震力が大になると、擁壁の下方で領域が重複する。重複部分を不連続線で処理すると、合理的なすべり線網が得られる。

(10) 上記 (9) の場合に不連続線は Goursat 問題を解いて求められる領域に接する場合がある。

(11) 壁頂で不連続線の解が満足されても、擁壁下方

で  $\phi$  が  $\phi'$  に接近したとき、壁面土圧を求める間隔を密にするためには、受働土圧の算定と同じように、特異点の解を強行して求められる。

(12) 地震力が大になるに従って、 $K_{AEr}$  は増大し、 $x_0'$  は減少する。 $K_{AEC}$  の値は地震力によって変化しない。

(13)  $K_{AEr}$  の値は  $c=0$  の物部土圧式で求めた土圧係数  $K_{AE}$  の値と近似している。

この研究の数値計算は、中部工業大学計算機センター FACOM 270-30 と名古屋大学大型計算機センター FACOM 230-60, 75 によった。

#### 参 考 文 献

- 1) 物部長徳：地震上下動に関する考察ならびに振動雑論，土木学会誌，Vol. 10, No. 5, 1924.
- 2) 市原松平・中根 進：内部摩擦をもつ粘性土の地震時受働土圧の算定，土木学会論文報告集，No. 253, pp. 69~84, 1976.9.
- 3) 市原松平・河邑 眞・千田正孝： $\phi_u=0, c_u \neq 0$  で与えられる土の地震時受働土圧の算定，土木学会論文報告集，No. 274, pp. 79~94, 1978.6.
- 4) 市原松平・千田正孝・大島 博：Sokolovski 法を用いた地震時受働土圧算定における誤差軽減の方法，土質工学会論文報告集，Vol. 19, No. 2, pp. 103~113, 1979.6.
- 5) Sokolovski, V.V. : Statics of soil media, 1954.
- 6) 星 桢 和・佐藤建吉共訳，ソコロフスキー著：土のような粒状体の力学，オーム社，1964.
- 7) 市原松平：第 7 章土圧，土と基礎実用教式・図表の解説，p. 132, 土質工学会ライブラリー 7.

(1979.9.29・受付)