

成卓高寿

正員 狩保恒一

大阪大学工学部

正員 伊藤富雄

1. まえがき 土のアーチ作用をうける土圧について、アーチ作用が鉛直に働く場合には、地下構造物上のボテンシャル鉛直せん断面における土の安定問題を解析するTerzaghi¹⁾のせん断面法が基本となつて、平面ひずみの問題として解析ができる。しかしアーチ作用が水平に働く場合には、土のせん断力の伝播が三次元的で、平面ひずみの問題の解析を困難ならしめる。近似的解法としてトレンク壁面の土圧についてPiaskowski等の研究²⁾、斜面のすべり防止杭に作用するアーチ力についてWang³⁾等の研究がある。ここではせん断すべり面を仮定している。このような問題解析には、三次元の有限要素法は有効である。本論ではアーチ力がすべり面に沿って働くものとして、擁壁の主働土圧について、仮定せん断面における抵抗せん断力が土体内に伝達されるという考えを基本として、Sokolouski⁴⁾の塑性力学を用いて解析を行う。

2. 基本仮定 (1) 図1のような構造物が主働土圧をうける場合、二擁壁間のすべり土塊の概略的図像は、図1(c)に示すとおりと考える。即ち二擁壁間のすべり土塊はRankinの主働土圧の三井錐土塊の中に、放物線面の土塊(BDB'-AEA')が発生して落下し、残余の土塊は、土のアーチ作用による仮定せん断面における抵抗せん断力と下底面の抵抗力によつて支持される。(2) 土は剛塑性体であり、土のせん断係数はMohr-Coulombの破壊定理に従う。

3. 解析. (1) せん断面におけるアーチ力 Rankinの主働すべり面を仮定している土塊のつりあいは、仮定せん断面上の抵抗せん断力を S_1 、せん断面に垂直に働くCyrによるせん断抵抗力を S_2 、とすると、(図1参照)

$$2S_1 + W \cos \lambda \tan \phi + W \sin \lambda = 0 \quad S_1 = \frac{W}{2} (\sin \lambda - \cos \lambda \tan \phi) \quad (1)$$

$$S_2 = \int_A K_0 \sigma_z \tan \phi \, ds = \frac{1}{6} \gamma \frac{H^3}{m} K_0 \tan \phi \quad (2)$$

$$\therefore W: \text{支持されている土塊の重量} = \gamma H^2 d \left(\frac{1}{m} - \frac{2}{3} \frac{1}{H} \cot \phi + \frac{8}{9} \frac{1}{H^2} \cot^2 \phi \cdot m \right) \quad (3)$$

$m = \tan \lambda - \tan \phi$, $\lambda = \pi/4 + \phi/2$, γ : 土の単位体積重量, K_0 : 静止土圧係数 $1 - \sin \phi$, A はせん断面の領域, ϕ : 土の内部摩擦角. 仮定せん断面上の全せん断力 S を全せん断面で割ると、単位面積あたりがせん断力となり、二擁壁間の空間距離で割ると、単位体積あたりの物体力 γ^* となる。これは、擁壁間の距離、擁壁の高さおよび土の強度パラメータよりさまつてのアーチ力である。整理すると次の形で表わされる。

$$S = (S / (\frac{1}{6} \frac{H^3}{m})) / d = \gamma \left[\left(1 - \frac{2}{3} \frac{1}{H} m \cot \phi + \frac{8}{9} \frac{1}{H^2} \cot^2 \phi \cdot m \right) (\sin \lambda - \cos \lambda \tan \phi) + \frac{1}{3} \frac{H}{6} K_0 \tan \phi \right] \quad (4)$$

S はせん断面から、図2のように減衰して伝播するとせん断面からの任意の点のアーチ力は次式で示される。

$$S = S_1 - 2S_1 \gamma + S_1 \gamma^2 + S_2 \gamma^2 \quad S_{mean} = \frac{1}{3} (S_1 + S_2) \quad (5)$$

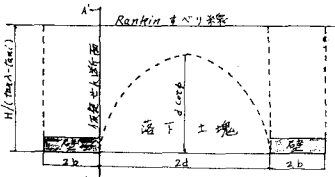
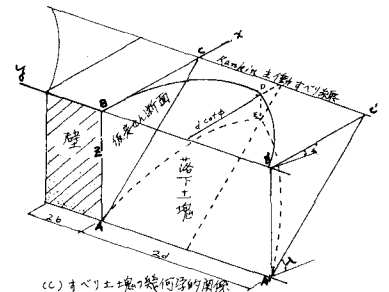
擁壁後面の土体内には、アーチ力

γ^* が作用する。これによつて、図3-(a)に示すような物体力 γ^* が生ずる。

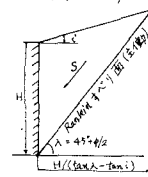
$$\gamma^* = \sqrt{\gamma^2 + S^2 + 2\gamma S \sin \theta} \quad (6)$$

γ^* が鉛直方向となす角を α とすると

$$\tan \alpha = S \sin \theta / (\gamma + S \sin \theta) \quad (7)$$



(a) 平面図



(b) AA'断面

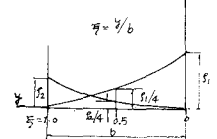


図2 せん断力の伝播

物体力 P は 2 つの力 P_1 と P_2 で、一般にすべり線に沿って働くことが常識的であるから、 θ は図 3-(b) を参照して、 $\theta = \pi/2 - \varphi - \mu$
 $\therefore \mu = \varphi$: 最大主応力の鉛直軸となす角、反時計方向を正とする。
 $\mu = 45^\circ - \varphi/2$ である。

(2). 常時および地震時における擁壁土圧の計算

土の塑性域における応力のつり合い式、破壊条件式は、土のグレイスタンシーを無視して、 u , v 座標にあらわすと、図 4 を参照して

$$\frac{\partial \sigma_u}{\partial u} + \frac{\partial \tau_{uv}}{\partial v} = \gamma_0^* \cos \alpha_E \quad (9)$$

$$\frac{\partial \tau_{uv}}{\partial u} + \frac{\partial \sigma_v}{\partial v} = -\gamma_0^* \sin \alpha_E$$

$$\sigma_u, v = \sigma (1 \pm \sin \phi \cos 2\varphi) \quad (10)$$

$$\tau_{uv} = \sigma \sin \phi \sin 2\varphi$$

$\therefore \sigma = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$, σ_1, σ_3 は最大、および最小主応力

$\gamma_0^* = \gamma^*/\cos \theta_0$, $\theta_0 = \tan^{-1}(x/g)$, x : 地震時の水平加速度 (gal),
 g : 重力加速度 (gal),

(4), (10) の 2 次元解は次のとおり、 $u = u/H$, $v = v/H$,

$$\bar{\sigma} = \sigma/\gamma H, \quad \bar{\tau} = \tau/\gamma, \quad \bar{p} = p/\gamma \quad \text{と表す。}$$

$$\bar{\tau} = \sqrt{1 + \bar{p}^2 + 2\bar{p}\sin\theta}, \quad \tan \bar{\alpha} = \bar{p}\sin\theta/(1 + \bar{p}\sin\theta)$$

となり 2 次元化してよい。以後は 2 次元化した状態にして、 (σ, τ) を取り扱うた記号で表す。(9), (10) の 2 次元解は次の微分方程式が導くことになり、これを Sokolovski⁵⁾ は示した。

$$d\bar{v} = d\bar{u} \tan(\varphi + \mu) \quad (11)$$

$$d\sigma \mp 2\sigma \tan \phi \cdot d\varphi = \gamma_0^* (\cos(\alpha_E + \phi) d\mu - \sin(\alpha_E + \phi) d\varphi) / \cos \phi$$

(11) の 2 次元解は Graham⁶⁾, Bransby⁷⁾, 市原^{8), 9)} 等が導いた。物体力 P は θ の関数であり、 θ はまた φ の関数であるので、 θ を差分法で解く場合は、 θ の φ を仮定して計算をし、ある数値値を設けて、くり返し計算を行う必要がある。解例を図 5, 図 6 に示した。図 6 に、計算例と同じ条件の静的実験結果も示した。実験結果と解析結果とは非常に近い値である。計算は阪大大型計算機を利用した。すべり線網の作成は日本橋梁 KK 羽田野呂の助を受けた。感謝の意を表す。

参考文献 1) Terzaghi, K: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley Sons, 1943, 2) Prashowski, A. and Kowaleski, Z., Proc. 6th ICMFE, Vol. 2, 1965.

3) Wang, W. L. and Yen, B. C., J. of Geotech. Eng. D, ASCE, Vol. 100, NO. GT 1, 1974. 4) 伊藤嘉雄, 狩保恒一: 55 年土木学会関西支部年次学術講演概要集.

5) Sokolovski, V. V., Statics of Soil Media, Butterworth Scientific Pub. 1960. 6) Graham, J. B., Geotech. Vol. 18, NO. 3, 1968.

7) Bransby, P. L. and Smith, I. A. A., J. of Geotech. Eng. D, ASCE, Vol. 101, NO. GT 7, 1975. 8) 市原松平, 中根進, 土木学会論文報告集, 253, 1976. 9) 市原松平, 山田公夫, 宇都宮洋一, 34 回土木学会年次学術講演概要集 3 部, 昭. 54 年.

図 3 まるく力 P と物体力 P_1 の関係

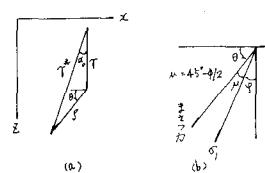


図 3 まるく力 P と物体力 P_1 の関係

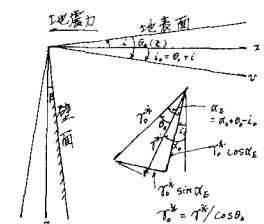


図 4 地震時の物体力座標

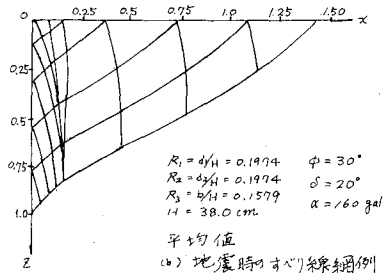
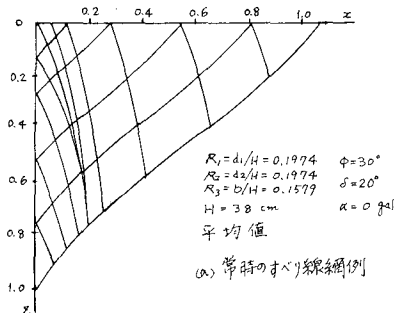


図 5 A-4 作用をうける土のすべり線網例

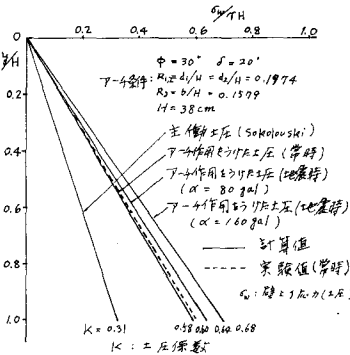


図 6 A-4 作用をうける土のすべり線網例