

長崎大学工学部 正員 落合英俊

はじめに 静止土圧係数は地下壁や地中埋設物等の設計に際し重要な要素となる。静止土圧係数は Tschebotarioff が指摘するように土の物理的諸性質との関連において論ずべきであるが、山口・安原は砂のような粒状土の場合には、かかる圧密平衡状態において発現する摩擦角 ϕ_m がその主要因子になることを述べている。しかしその ϕ_m というのが具体的にどのような摩擦角を表しているのか、 ϕ_c (粒子間摩擦角)、 ϕ_{cr} (critical void ratio state における摩擦角)、 ϕ' (有効応力に基づく内部摩擦角) とどのような値に等しい摩擦角であるのか明らかでない。本文では砂の直接せん断試験における主応力軸の回転を基とし、砂の静止土圧係数を ϕ_m あるいは ϕ_{cr} の関数形として新たに誘導し、さらに一種の実験式として、 ϕ' の関数として K_0 の算定式を新たに提示した。そして、従来の提案式との比較に基づき、その表わしている意味がよい妥当性が明らかとした。

従来の研究 従来の提案式のほとんどは、(i) $K_0 = f(\phi')$ 、(ii) $K_0 = f(\phi_m)$ あるいは $K_0 = f(\phi_{cr})$ の形に大別され、下表の通りである。なお、山口・安原は Casagut の $\tan \phi_m = (2/\pi) \tan \phi \cdots (1)$ を用いて、 $K_0 = f(\phi_m) \rightarrow K_0 = f(\phi)$ としているが、この Casagut の式における摩擦角 ϕ は、Rowe, Horne, Bishop, Lee は指摘しているように、その誘導過程から考え、 ϕ_{cr} と解釈すべきである。

砂の静止土圧係数 せん断面 (ゾーン) 指定型の直接せん断試験では、せん断とともに主応力軸が回転するが、その方向は小面・小面により決まると考えられている。 $\tau/\sigma_v = K \tan \phi \cdots (2)$ により、 σ_v 、 τ は水平面上の垂直およびせん断応力、 ϕ は最大主応力軸と鉛直軸のなす角、 K は土の固有土圧係数である。著者は式 (2) の定数 K は次式で表わされることを明らかにした。 $K = \sin \phi_{cr} = 2 \sin \phi_m / (1 + \sin \phi_m) \cdots (3)$ また、直接せん断試験におけるせん断面の各段階における主応力は次式で与えられることも併せて明らかにした。 $\sigma_3 = (1-K)\sigma_v$ 、 $\sigma_1 = \tau^2 + K\sigma_v^2 / K\sigma_v \cdots (4)$ とすると、直接せん断試験において、水平方向の試料境界面上に垂直応力 σ_v のみ作用したせん断前の状態 ($\psi = 0$) は、側方変位が拘束された静止土圧状態である。このとき、最大および最小主応力は、(4) より、 $\sigma_1 = \sigma_v$ 、 $\sigma_3 = (1-K)\sigma_v$ となる。したがって、静止土圧係数 K_0 は次式で与えられる。

$K_0 = \sigma_3/\sigma_1 = 1-K \cdots (5)$ 定数 K として (3) を用いると、 K_0 は次式で与えられる。 $K_0 = 1 - \sin \phi_{cr} \cdots (6)$ あるいは、 $K_0 = 1 - \sin \phi_m / (1 + \sin \phi_m) = \tan^2(45^\circ - \phi_m/2) \cdots (7)$ (7) は、垂直応力 σ_v のみ作用したせん断前の状態 ($\psi = 0$ 、静止土圧状態) における応力の最大傾角が ϕ_m に等しいことを示しているが、このことは先導性材料を用いた小面・小面実験結果とも一致する。また、(7) は主静止土圧係数と比較して、摩擦角が異なるものみで式形は同一である。このことは、側方変位が拘束された圧密平衡状態では粒子間摩擦角 ϕ_m が発現され、側方変位の増大とともに土質平衡状態に達するに内部摩擦角 ϕ' が発現するようになることを解釈し、せん断変形との関連を示唆しているように考えられる。そこで、Casagut の (1) 式における ϕ は上に述べたように ϕ_{cr} と解釈すべきである。山口・安原と同様、敢て ϕ に代る ϕ' とみれば、(7) 式に代る ϕ は次式で与えられる。

$$K_0 = \sqrt{(\pi/2)^2 + \tan^2 \phi'} - \tan \phi' / \sqrt{(\pi/2)^2 + \tan^2 \phi'} + \tan \phi' \cdots (8)$$

式 (8) は実験式とみはすべきである。

従来の式との比較 図-1 は Leighton Buzzard Sand ($\phi_{cr} = 35^\circ$) に関する実験結果と本文による (6) 式および Jaky の式を示している。本文による (6) 式は、その砂の平均的な K_0 値を与えてくれることを知られる。

$K_0 = f(\phi')$		$K_0 = f(\phi_m)$ or $K_0 = f(\phi_{cr})$		ϕ' = 有効応力に基づく内部摩擦角 ϕ_m = 粒子間摩擦角 ϕ_{cr} = critical void ratio state における摩擦角 ϕ_e = Hvorslev に基づく内部摩擦角 K' = 圧密曲線における割法傾度のコタン
Jaky	$K_0 = (1 - \sin \phi') / (1 + (2/3) \sin \phi') / (1 + \sin \phi')$ $\approx 0.9 (1 - \sin \phi')$ $K_0 = 1 - \sin \phi'$	Roscoe et al	$K_0 = 3 - \eta K_0 / 2 \eta K_0 + 3$ $\eta K_0^2 + 3(1 - (K'/\lambda)) \eta K_0 - M^2 = 0$ $\sin \phi_{cr} = 3M/\delta + M$	
Brooker et al	$K_0 = 0.95 - \sin \phi'$	Rowe	$K_0 \approx \tan^2(45^\circ - \phi_e/2)$	
山口	$K_0 = 1 - (2/\pi)^2 \tan \phi' / (1 + \tan \phi')$	山口	$K_0 = 1 - (2/\pi) \tan \phi_m / (1 + (2/\pi) \tan \phi_m)$	
山口・安原	$K_0 = \sqrt{2} - \tan \phi' / \sqrt{2} + 2 \tan \phi'$	山口・安原	$K_0 = \sqrt{2} - \tan \phi_m / \sqrt{2} + 2 \tan \phi_m$	

図-2は本文における山口、山内、安原の式と比較である。約30°以下のφに対して、これらの式はほとんど一致するに似て見える。しかし、山口、山内、安原の式と、 $0 \leq \phi \leq 90^\circ$ に対して、 $0 \leq K_0 \leq 1$ であり、山口の式は $\tan \phi \leq \pi/2$ ($\phi \leq 57.5^\circ$)、山内、安原の式は $\tan \phi \leq \sqrt{2}$ ($\phi \leq 54.7^\circ$) と、 $K_0 \leq 0$ となり矛盾が生じる。本文による(7)式は $0 \leq \phi \leq 90^\circ$ に対して、 $0 \leq K_0 \leq 1$ であり、 $\phi = 90^\circ$ ときのみ $K_0 = 0$ となり矛盾はない。また、Kowalevskyの式は本文による(7)式と摩擦角が異なるのみで、式形は同一である。Hvorslevの摩擦角φとφ₀が同一と仮定する

にすると未知であるが、これから摩擦角の値はさかたに大きくなる傾向はとらえられる。このように、本文による(7)式は従来の式を含括し、しかもすべてのφに対して矛盾のないK₀値を与える式であることを見られる。図-3はK₀とφ'の関係で、本文による(8)式は従来の式と比較である。図-2と類似して、本文による(8)式と山口、山内、安原の式は約45°以下のφ'に対してほとんど一致する。しかし、本文による(8)式は、 $0 \leq \phi' \leq 90^\circ$ に対して、 $0 \leq K_0 \leq 1$ であるが、山口の式は $\phi' \geq 68.0^\circ$ 、山内、安原の式は $\phi' \geq 65.8^\circ$ と $K_0 \leq 0$ となる。本文による(8)式は、φ₀が約40°以下では、砂質土に対して実験結果といふことがわかっておりJakyの式と、粘性土に対しては、いふことがわかっておりBrooker et al.の式の中間の値をとる。それ以上のφ'になるとJakyの式より多少大きなK₀値をとる。この式で得た中から多数の実験結果を、Jakyの式とBrooker et al.の式の間にはさまれていることがあつたと、本文による(8)式は実験結果をよく満足する式であることを見られる。

まとめ K₀は土の物理的諸性質に影響されるが、砂の場合、乙と乙₀は影響因子は粒子間のすべり摩擦である。側方変位が拘束された静止土圧状態は破壊前の非塑性状態であり、この状態を發揮させる摩擦角は、微小変位のもとでも發揮させるφと考えるのが妥当であり、砂のK₀は本質的にφである。φ₀はφ₀と決まると考えられ、この $K_0 = g(\phi)$ 、 $K_0 = g'(\phi_0)$ はその砂の平均的なK₀値と考えることができる。しかし、実験事実として、K₀は $K_0 = g(\phi)$ 、 $K_0 = g'(\phi_0)$ の現象をよめるように、あつた。この砂に対して一定値とはならない。このことは、φ以外の因子もK₀値に影響することを示しているといふことがわかれ、これから影響因子は多岐にわたると、φ₀とあり、 $K_0 = f(\phi')$ の現象をよめば、実験結果といふことがわかってきた。このことは、 $K_0 = f(\phi')$ は一般の実験結果といふことがわかれ、非塑性状態のK₀と塑性状態のφ'と直接関係づけられる。この物理的意味は不明確なものである。

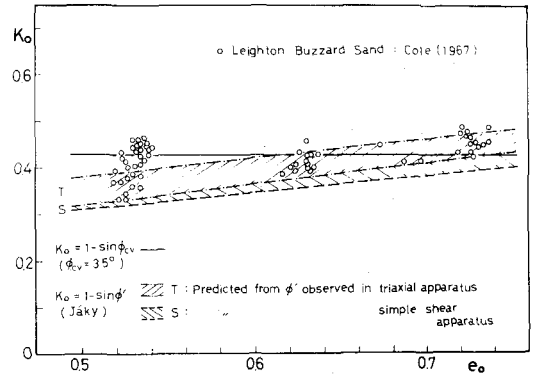


図-1. 砂の静止土圧係数の実験値 (Cole)

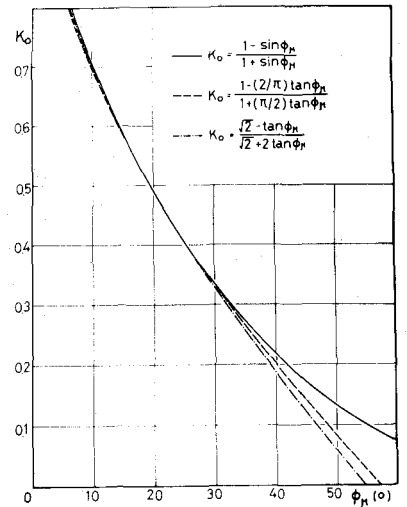


図-2. K₀とφの関係

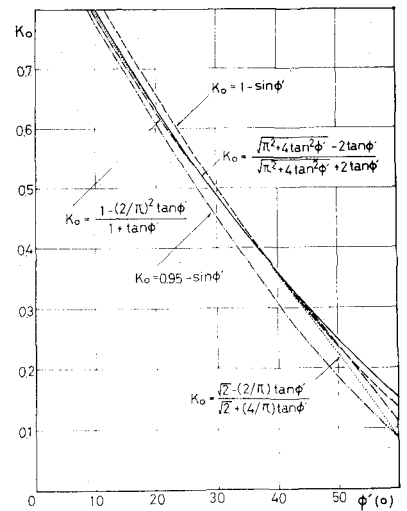


図-3. K₀とφ'の関係