

不飽和土の土質諸係数と破壊確率に関する一考察

A STOCHASTIC STUDY ON SOME PROPERTIES AND
FAILURE PROBABILITY FOR UNSATURATED SOILS

松尾 稔*・黒田 勝彦**

By Minoru Matsuo and Katsuhiko Kuroda

1. はじめに

従来から、土の性質を表わす種々の係数がかなり大幅にばらつくことは、一般に認められてきた。そして、それらの分布形を検討する努力もなされてきた^{1), 2), 3), 4)}。しかし、いったん実験室や研究室を離れて設計や施工というフィールドに立ったとき、せいぜい、これらの性質は、経験的なある種の裕度という形で考慮されたり、あるいはまた、施工中や施工後の動態観測によって補われるにとどまっていた。経験や動態観測が土質工学においてきわめて重要であることに議論の余地はない。しかし、ばらつきの性質を設計、施工のフィールドへ定量的な形でもちこむことは、これらと同等に重要であると考えられる。

筆者らは、この観点から、主として、粘土地盤上の盛土の施工直後の破壊を取上げて研究し、成果の一部をすでに発表した^{5), 6), 7)}。しかし、現実には生じている破壊をふり返ってみると、粘土の非排水強度 c_u のみで検討できるケースよりも、むしろ、 c, φ の両者を問題にしなければならない不飽和土(以下 $c \sim \varphi$ 系の土と呼称する)に関する破壊の方が多い。本論文では、統計的な処置を行なう場合の一般的な考察と筆者らの姿勢を明らかにしたのち、不飽和土に関する諸係数の分布と相関について調べている。さらに、これらの結果を用いて破壊確率を定量化する場合、破壊確率の定義の仕方によってどのような差異が生ずるかを検討している。

2. 統計的な整理に関する一般的な考察

すべての科学は、必ず“現場”をもっている。実践という現場で有効性を発揮したとき、はじめて、その真理

性を獲得したことになる⁸⁾。このことは、実用学としての工学の分野では、特に基本的に重要なこととして認識されなければならない。設計や施工という分野で土質力学をながめるとき、そこには多くの不確実性を内包していることを認めざるを得ない。しかし、そうであるからといって、設計・施工をしないでおくわけにはいかない。多くの不確実性を含みながらも、これらの分野においては、現時点でのベストが尽されなければならない。

この観点が、設計、施工の分野における基本的に重要な姿勢である。この場合、われわれは、それが根本的な解決でないことを認識しつつも、その不確実性の処理に対して、確率、統計的手法を用いる方向に向う。そしてその目的は、既知の事実を説明することと未知のことがらを推測することの2点に要約される。

ところで、いうまでもなく統計は、集団的理解が許される現象を対象にしてその実験からの帰納を扱う基本的な方法である。また、確率論は推測の確からしさの理論であり、その性質を表わすストカスティックという概念は、非決定論的であることと、それにもかかわらず集団的規則性の存在することの2点によって規定される⁹⁾。したがって、統計や確率に不可欠の性格は、集団的把握と数量的表現である。ここでわれわれは数量化に際して、土に関する種々の性質の中からある限定された性質だけしか取出していないこと、さらにその上、本来“性質”であるものを“数”に抽象化していることを十分認識することが重要である。そうでなければ、いつのまにか数の遊戯に陥り、土質そのもの、あるいは土の工学そのものから離反していることに気付かなくなってしまうであろう。

はじめに、数量化しようとする土の“性質”が問題となる。含水比や間げき比、あるいは単位体積重量のように、状態を表わす量(物理的性質)は真の地盤内の性質を表わす量として比較的受入れやすい。しかし、種々の力学的性質、たとえば一軸圧縮強度 q_u などは、われわ

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部付属土工研究施設

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

れが便宜的に定めたある特定の手順・方法・拘束条件に従って試験した結果に過ぎない。すなわち、工学的な便宜さのために、地盤の性質を顕在化する量として仮定したものに過ぎない。この意味で、本論文において“母集団”と呼ぶのは、あくまでも、ある特定の条件に従って試験した結果の集合であり、たとえば、一軸圧縮強度という性質が実際の地盤の強度を表わすのに最適の尺度である、ということとは根本的に異なる。

さて、上述のような意味でのある性質を数量化して統計的に考える場合、まずその頻度分布を考えることになる。このとき、階級の数や幅をどのようにするかという問題が生ずるが、経験的に 10~20 くらいの階級数がよいとされている以外、一般的な理論はない。ただ、われわれの場合、その決定は種々の土の性質に関して、工学的意味を失わないように考慮しなければならない。また、頻度分布や母集団を正規分布で近似するような場合、 $-\infty$ から $+\infty$ までの範囲に分布する正規分布の数学的性質と、実際問題として物理的に有限とみなされる性質との対応に矛盾が生ずる。しかし、後にも示すように、筆者らが工学的な見地から主題としているのは破壊確率 P_F 、裏返せば破壊に対する信頼度である。航空機のように、 P_F の極小の領域が問題とされる場合に無限範囲で定義される分布をあてはめるならば、明らかに、実際の現象として起こりえないような事象を計算上取扱ってしまう危険がある。いま図-1の曲線を強度を無限範囲で定義される分布形であてはめたものとし、荷重の位置を a 点としよう。

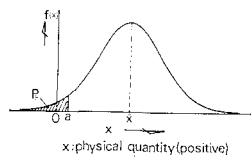


図-1 破壊確率の説明図

このようにすると、図斜線部は破壊確率 P_F を表わしている。 $-\infty$ に漸近していくような小さな強度は物理的に実存しないにもかかわらず、計算上は、 P_F はある有限値として算出される。論理的に P_F の極小領域を対象にしなければならない問題では、この計算上の P_F がたとえ非常に小さくてもおろそかにすることはできない。この理由により、たとえば、有限区間で定義される β 関数などを用いた方がより適切であるかも知れない。しかし、土に関する問題では、 P_F がかなり大きいことをすでに示した^{9)・6)}。したがって、無限範囲の正規分布の仮定が十分なる妥当性を有する対象であるということが出来る。

次に、分布形の適合度検定である。しばしば χ^2 -検定が用いられるし、筆者らもこれを用いる。いうまでもなく適合度検定とは、帰無仮説の棄却を通じて行なう統計的操作であるから、その性格上、あくまでも“……でないとはいえない”ということがいえるだけである。したがって、有意水準 α というパラメーターも、値をいくら

にすべきかという問題ではなく、むしろ統計を用いるものの思想を反映したものであり、そこには用いる際の一贯した態度が必要である。たとえば、5% で有意であっても 1% では有意ではない、ということとはしばしば経験するところである。土質工学の現状を考え、筆者らは以下の議論において $\alpha=5\%$ を用いるが、これはまた、統計量に対する信頼度として習慣的に用いられている標準値であることはいうまでもない¹⁰⁾。なお、 χ^2 -検定の場合、階級の数が直接検定法と関連してくることに注意しておく必要がある。

最後に、当然のことながら、線形相関の尺度でしかない相関係数の大小が、力学の因果関係の強弱とは何ら関係しない点にも注意を払うべきであろう。

3. 土質諸係数の分布と相関

粘土地盤の単位体積重量 γ_t 、非排水強度 c_u 、盛土の単位体積重量 γ_b の頻度分布が正規分布で近似できることはすでに発表した⁹⁾。また、砂質土のせん断抵抗角 ϕ や、シルト質土の粘着力 c とせん断抵抗角 ϕ についても、検討した結果の一部を示した⁶⁾。この章では、 γ_t, w, c, ϕ (あるいは $\tan \phi$) の頻度分布を調べ、その後、これらの諸係数間の統計的な相関度について検討する。用いたデータは、渡良瀬川流域の不飽和土に関する調査結果と、筆者らが行なった一面せん断試験結果である。

(1) 土試料と実験の方法

用いられた土試料は表-1 に示されている。Soil-1, 2 は渡良瀬川周辺から採取されたもの、また Soil-3 は筆者らが一面せん断試験に用いた土で、筆者らの分類⁶⁾ では、Soil-1 は“粘土系”、Soil-2, 3 は“シルト系”に属する不飽和土である。さて、繰り返して強調するように、筆者らの基本的な立場は、現時点での設計、施工という見地から室内の実験結果をながめることである。このことは、とりもなおさず、“試験結果の設計へのよりよい適用”という立場であり、これについては前にも述べた¹¹⁾。すなわち、小さな土の供試体そのものの精密な力学的因果関係を、物性的な立場から究明しようというのではない。したがって、特別に精度の高い機械を用いて、特別に精度の高い方法によって試験することはむしろ適切ではなく、設計、施工の見地から現時点での最善を尽す、という立場をとらなければならない。この意味

表-1 土試料の分類

	分	類
Soil-1	粘土,	シルト質粘土
Soil-2	シルト,	砂質シルト, 粘土質シルト, シルト質砂
Soil-3	シルト質砂	

で、不飽和土に対して一般に行なわれる非圧密非排水せん断試験の結果を整理し直してみるとともに、一面せん断試験を実施した。Soil-1, 2 を用いた試験は過去の試験報告書から抽出したもので、直径 3.5 cm, 高さ 8 cm の供試体に関する非圧密非排水せん断試験である。せん断速度は 1%/min である。ただ、側圧の大きさや変化の個数が統一されていない。このことは、いくつかの側圧に対する試験結果から得られる $\tau \sim \sigma$ 図上から c, ϕ が決定されることを考えると、統計的な整理上“重み”の違いという点で、厳密な意味ではやや問題があるが、結果にはそれほど大きな影響は与えないものと考えられる。

一方、Soil-3 に関しては一面せん断試験を実施した。初期の供試体寸法は、直径 6 cm, 高さ 1.5 cm であり、せん断速度は 1 mm/min の変位制御とした。垂直応力は、 $\sigma = 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 \text{ kg/cm}^2$ の 4 段階とした。一面せん断試験の目的は大別して 2 つにわかれる。1 つは、 c, ϕ の分布を調べることである。また他の 1 つは、これらと湿潤単位体積重量 r_t , 乾燥密度 r_d , 含水比 w などとの相関を調べることである。前者に関する実験は、 $w = 10\% (\pm 0.8\%)$, $r_d = 1.55 \text{ g/cm}^3 (\pm 0.02 \text{ g/cm}^3)$ に固定し、同一の σ に対して各 10 回ずつ、合計 40 回の試験を行なった。相関を調べる実験に当っては、実験計画法を用いた。周知のように、この方法は推測統計学の 1 つの応用手法であり、他の手法の多くが得られたデータの解析に用いられるのに対し、データの集め方を決める 1 つの有効な手法である。実験結果を表わす特性値として c, ϕ を取り上げるとき、これに影響を及ぼすと考えられる諸因子とその水準を選択しなければならない。本研究では、従来からの経験に照らして、乾燥密度 r_d と含水比 w を主要因子として取り上げ、その水準については、 $r_d = 1.45, 1.50, 1.55, 1.60, 1.65 \text{ g/cm}^3$ の 5 水準、 $w = 5, 10, 15\%$ の 3 水準とした。 w の水準数については、後述するように、飽和度 S_r の範囲に着目し、 $w = 5, 10\%$ の 2 水準の場合 ($S_r = 16 \sim 44\%$)、 $w = 10, 15\%$ の 2 水準の場合 ($S_r = 32 \sim 66\%$) および上記の 3 水準の場合 ($S_r = 16 \sim 66\%$) の 3 通りについて分散分析を行なった。 (r_d, w) の選ばれた水準において、各 $\sigma (= 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 \text{ kg/cm}^2)$ に対する試験は 3 回行なわれた。したがって、実験の無作為性を考えると、 $3^4 (= 81)$ 本の $\tau \sim \sigma$ 関係が得られることになる。

なお、不飽和粘性土においては、せん断抵抗力 τ にピークが現われない場合がしばしば生ずる。この場合、「水平変位が 8 mm か、またはせん断開始時の供試体厚さの 50% のいずれか小さい方に達したときの値を用いる」という提案もあるが¹²⁾、その根拠がよくわからない。一方、松尾・軽部は τ の動員される過程を分析し、

設計への適用という見地から、短期破壊に関する設計には、 $\sigma \geq 0.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合、水平変位 $d = 5 \sim 7 \text{ mm}$ に対する τ を用いて c, ϕ を求めるよう提案した¹³⁾。本論文では、これに基づき、 $d = 6 \text{ mm}$ に対する τ を用いて c, ϕ を求めている。

(2) 諸係数の分布について

Soil-3 に関する一面せん断試験の結果、 c, ϕ の頻度分布は図-2 のようである。同一の σ に対して各 10 個の試験が行なわれたので、最小二乗法を用いて $\tau \sim \sigma$ 図を求めるとき、それらの組合せは 10 000 個ある。実験結果をこのような組合せとして解釈するのは、実験に際して何の作為的要素もないので、40 回がすべて等出現確率を有するという仮定は妥当と考えられるからである。さて、実験においては偶然誤差が支配的であると予想されたが、その当然の結果として、図-2 (a),

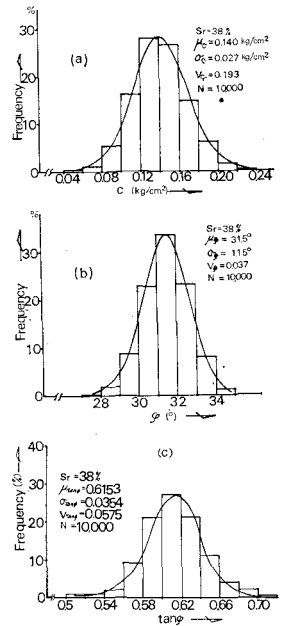


図-2 $c, \phi, \tan \phi$ の頻度分布 (Soil-3)

(b) の分布は、 χ^2 -検定の結果正規分布で近似できることが明らかとなった。 ϕ に関する変動係数 V_ϕ が c に関する V_c に比べて 1 オーダー小さいこと、また、 V_c も予想したよりは小さく非排水強度 c_u に関する値と同程度かそれ以下であることは、工学的な意味において注目すべき点である。なお、種々の設計計算等の見地から考えれば、 ϕ の分布もさることながら $\tan \phi$ の分布を調べることは有意義である。この意味で、図 (b) を $\tan \phi$ に関して整理し直したのが図 (c) であり、やはり正規分布で近似できる。これは ϕ 自体の変動範囲が小さいこと、したがって、 $\phi \sim \tan \phi$ 関係を直線で近似してもほとんど問題のないことを考えれば当然の結果である。

Soil-2 に関して、同様に、頻度分布の形で描いたのが図-3 である。図-3 の各分布が正規分布で近似できることは、 χ^2 -検定によって確かめられた。なお、Soil-1 の場合、 c, ϕ については試験個数が少なく、頻度分布を調べることはできなかった。

図-4, 5 は、Soil-1, 2 に関する r_t と w の分布を示している。 χ^2 -検定の結果、これらがいずれも正規分布で近似できることが明らかとなった。

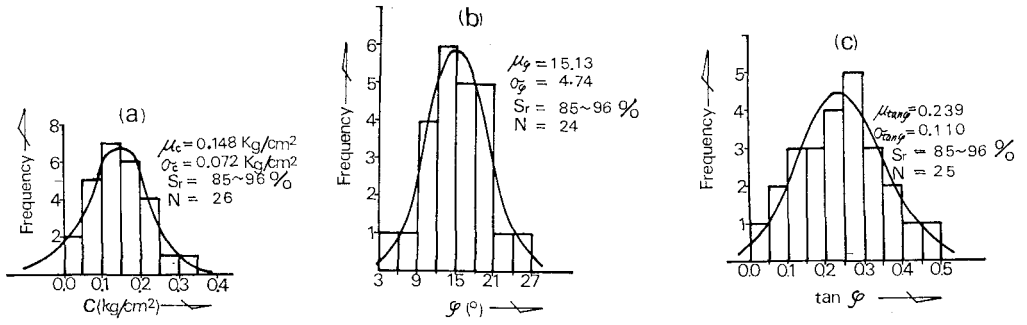


図-3 c, ϕ , $\tan \phi$ の頻度分布 (Soil-2)

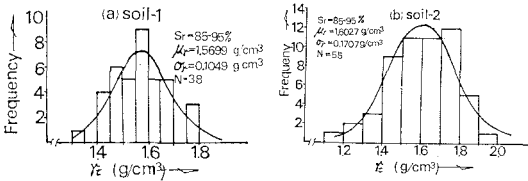


図-4 γ_s の頻度分布

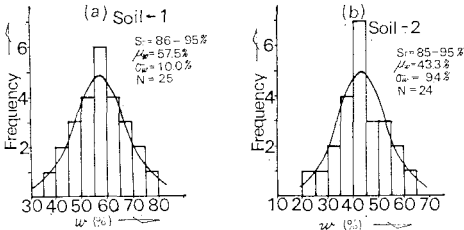


図-5 w の頻度分布

ところで、以上の諸係数の分布に関する検討においては、いずれも飽和度 S_r の範囲を限定している。これは以下の理由によっている。飽和度 S_r は不飽和土の力学的挙動に大きな影響をおよぼす。このことを Soil-1, 2, 3 について確かめてみよう。図-6 (a), (b), (c) は、それぞれ、 $c \sim S_r$, $\tan \phi \sim S_r$, $w \sim S_r$ の関係をプロットしたものである。図から明らかなように、 c , $\tan \phi$ は S_r の範囲によって顕著に異なったグループを作っている。 G_s を土粒子の真比重とすると、 S_r は

$$S_r = \frac{G_s w r_d}{G_s r_w - r_d} \dots \dots \dots (1)$$

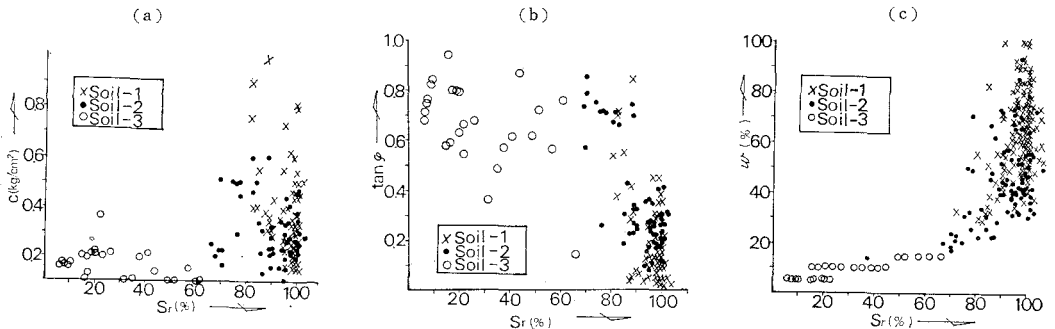


図-6 c, $\tan \phi$, w と S_r の関係

という形で与えられるから、 S_r を一つのファクターとして取り上げることは、 w , r_d 両者の影響を同時に考慮したことになる。そして、 c , ϕ などの検討において、 S_r の範囲を限定することは w と r_d の範囲を同時に限定することと同値の関係にある。さらに、次節で述べるように、 c , $\tan \phi$ が w と r_d に相関があることなどを考えれば、上記のように、 S_r のある限定された範囲で分布形を検討するのが妥当であるといえる。

(3) 諸係数間の相関性について

ここでは前節で取扱った諸係数間の相関性について検討を加える。前述したように、 w と r_d に対する c および $\tan \phi$ の相関が予想されるが、各試料について c あるいは ϕ と、 w , r_d および r_t との相関性を調べる。

a) ϕ (あるいは $\tan \phi$) $\sim r_d$ 関係について

Soil-1, 2, 3 に関して ϕ あるいは $\tan \phi$ を r_d に対してプロットした結果が、図-7, 8, 9 である。Soil-3 の場合、3.(1) で述べたように、 r_d は 5 水準、 w は 3 水準であるから、得られる c , ϕ は全部で $(3 \times 5 \times 3) = 1215$ 個であり、これらが図中にプロットされている。さて、図中破線は 2 次曲線

$$\left. \begin{aligned} \phi &= a_1 r_d^2 + b_1 r_d + c_1 \\ \tan \phi &= a_2 r_d^2 + b_2 r_d + c_2 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

を、最小二乗法による 2 次の最良多項式近似を行なった上で当てはめたものである (図-9 については繁雑になるため記してない)。係数 a, b, c の値は表-2 に一括

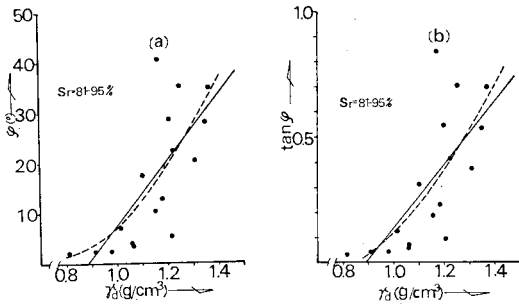


図-7 $\phi \sim \gamma_d, \tan \phi \sim \gamma_d$ 関係 (Soil-1)

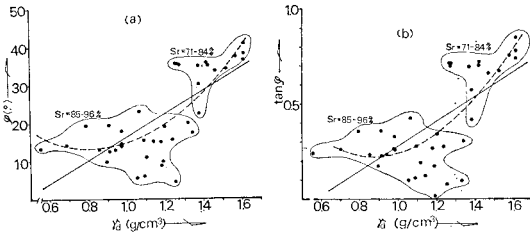


図-8 $\phi \sim \gamma_d, \tan \phi \sim \gamma_d$ 関係 (Soil-2)

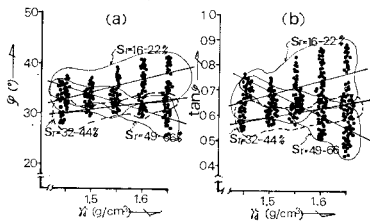


図-9 $\phi \sim \gamma_d, \tan \phi \sim \gamma_d$ 関係 (Soil-3)

表-2 回帰係数, 相関係数一覽表

		$Y=a(a')X^2+b(b')X+c(c')$			$Y=A(A')X+B(B')$		
		$a, (a')$	$b, (b')$	$c, (c')$	$A, (A')$	$B, (B')$	r
Soil-1	$\phi \sim w$	86.610	-237.182	158.186	49.767	-71.977	-0.7422
	$\tan \phi \sim w$	1.767	-4.722	3.170	0.969	-1.412	-0.7125
	$\phi \sim \gamma_d$	50.736	-48.626	4.834	63.625	-56.080	0.7387
	$\tan \phi \sim \gamma_d$	1.077	-1.135	0.185	1.247	-1.108	0.7133
	$\tan \phi \sim \gamma_t$	-1.348	6.238	-6.292	1.871	-2.765	0.6031
	$c \sim w$	2.868	-3.896	1.506	-0.901	0.784	-0.5529
Soil-2	$\phi \sim w$	54.153	-112.044	69.273	33.296	-25.163	-0.5132
	$\tan \phi \sim w$	1.123	-2.433	1.494	0.673	-0.559	-0.5318
	$\phi \sim \gamma_d$	43.557	-71.460	42.449	29.977	-13.735	0.6959
	$\tan \phi \sim \gamma_d$	1.096	-1.902	1.045	0.649	-0.368	0.6557
	$\tan \phi \sim \gamma_t$	2.284	-6.539	4.924	0.896	-1.070	0.5679
	$c \sim w$	0.217	-0.430	0.336	-0.158	0.270	-0.2650
Soil-3	$\phi \sim w$	44.440	-223.200	951.200	36.513	-32.960	-0.5515
$S_r = 16 \sim 66\%$	$\tan \phi \sim w$	0.942	-5.679	24.219	0.740	-0.835	-0.5526
Soil-3	$\phi \sim \gamma_d$				24.600	31.830	0.9273
	$\tan \phi \sim \gamma_d$	3.429	-9.985	7.940	0.644	-0.280	0.9258
	$\tan \phi \sim \gamma_t$	3.364	-10.327	8.597	0.604	-0.263	0.9202
Soil-3	$\phi \sim \gamma_d$				11.120	29.950	0.8620
	$\tan \phi \sim \gamma_d$	0.857	-2.393	2.262	0.264	0.207	0.8592
	$\tan \phi \sim \gamma_t$	1.006	-3.182	3.111	0.237	0.212	0.8500
Soil-3	$\phi \sim \gamma_d$				-28.600	36.350	-0.9531
	$\tan \phi \sim \gamma_d$	-1.886	5.134	-2.782	-0.712	1.739	-0.9431
	$\tan \phi \sim \gamma_t$	-1.219	3.723	-2.119	-0.630	1.760	-0.9523

して示してある。また従来考えられているように $\phi \sim \gamma_d$ あるいは $\tan \phi \sim \gamma_d$ の間に直線的相関

$$\left. \begin{aligned} \phi &= A_1 \gamma_d + B_1 \\ \tan \phi &= A_2 \gamma_d + B_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

があると考え、最小二乗法で直線回帰を行なうと図中実線のようになる。このときの回帰係数 A, B および相関係数 r は一括して表-2 に示してある。以上の結果から ϕ (または $\tan \phi$) は γ_d と正の相関があることがわかる。

なお、これらの結果は乾燥砂について認められる事実^{14), 15), 16)}とも一致している。図-10 は、土質工学会

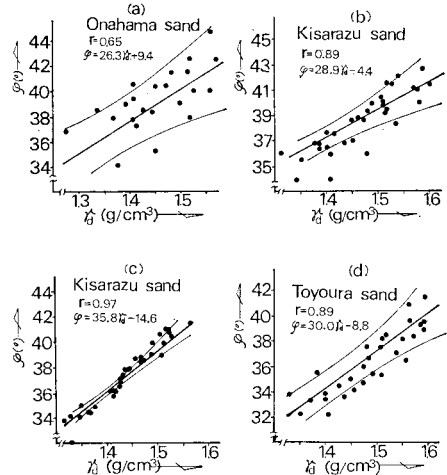


図-10 乾燥砂の $\phi \sim \gamma_d$ 関係 (文献 16 より再整理)

ん断試験法委員会によって行なわれた全国一斉試験の結果¹⁶⁾を、筆者らが $\phi \sim \gamma_d$ 関係に整理し直し、回帰直線と相関係数を求めた結果である。なお、回帰直線の両側の細曲線は、回帰直線の 95% 信頼限界を示している。

b) ϕ (あるいは $\tan \phi$) $\sim w$ 関係について

図-11 (a), (b) はそれぞれ $\phi \sim w$ および $\tan \phi \sim w$ の相関図であり、Soil-1, 2, 3 について同一図面にまとめてプロットしてある。前述したのと同様に、最小二乗法による 2 次の多項式近似を行なった結果は式 (4) に、また直線回帰を行なうと式 (5) のようになり、係数値その他はやはり表-2 に示してある。

$$\phi = a_1' w^2 + b_1' w + c_1' \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi &= A_1' w + B_1' \\ \tan \phi &= A_2' w + B_2' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

以上の結果から、 ϕ または $\tan \phi$ は w

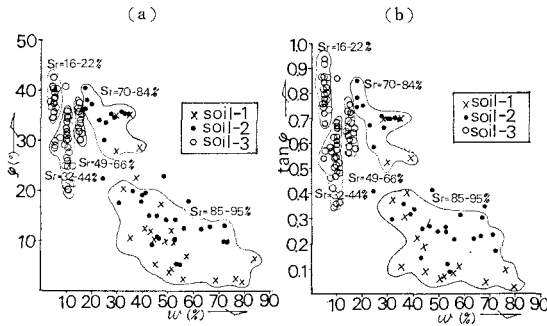


図-11 $\phi \sim w, \tan \phi \sim w$ 関係

と負の相関があることがわかる。ただし、図-11 からわかるように、 S_r の幅をある程度限定した範囲でいうと、両者に相関性があるとはいえない。

さて、筆者らの行なった Soil-3 に関する一面せん断試験の結果から2元配置による分散分析を実施したところ、 ϕ は r_d と w に影響されることがわかった。分散分析の結果は表-3 に示されている。この結果をみると $w=5, 10\%$ の2水準では w と r_d の1次項が、 $w=10, 15\%$ の2水準では r_d の1次項と $w \times r_d$ の項がそれぞれ有意である。また $w=5, 10, 15\%$ の3水準では w, w^2 および r_d の各項が有意となっている。上記の各場合につき、参考のため、直交多項式に展開した結果は式(6)である。

$$\left. \begin{aligned} \phi &= 16.95 r_d - 0.803 w + 13.38 && (w=5, 10\% \text{ の場合}) \\ \phi &= -40.92 r_d - 6.20 w + 4.00 r_d \cdot w + 95.42 && (w=10, 15\% \text{ の場合}) \\ \phi &= 52.12 r_d - 7.44 w + 0.09 w^2 - 5.21 r_d \cdot w - 36.38 && (w=5, 10, 15\% \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

これらは、いずれも w に対しては負の相関があり、Soil-1, 2 の結果とも矛盾しない。また、 w の寄与率が予想以上に大きいことは注目に値する。ただ、 w と r_d

表-3 ϕ に関する分散分析結果

	要 因	自由度	変動 S	分散 V	分散比 F_0	寄与率 (%)	
2(w) × 5(r_d)	w 1 次	1	40.28	40.28	53.7(**)	66.1	
	水準 r_d 1 次	1	14.37	14.37	19.2(**)	22.9	
	$w_1=5\%$	誤差 e	7	5.26	0.75	—	11.0
	$w_2=10\%$	全変動 ST	9	59.91	—	—	100.0
2(w) × 5(r_d)	r_d 1 次	1	4.15	4.15	5.8(*)	11.7	
	水準 w 1次 × r_d 1次	1	20.02	20.02	27.8(**)	66.0	
	$w_1=10\%$	e	7	5.06	0.72	—	22.3
	$w_2=15\%$	ST	9	29.23	—	—	100.0
3(w) × 5(r_d)	w 1 次	1	26.96	26.96	31.3(**)	29.3	
	水準 w 2 次	1	18.75	18.75	21.8(**)	20.1	
	$w_1=5\%$	w 1次 × r_d 1次	1	33.95	33.95	39.5(**)	37.1
	$w_2=10\%$	e	11	9.51	0.86	—	13.5
	$w_3=15\%$	ST	14	89.17	—	—	100.0

備考 有意でない要因効果はすべて誤差項にくみ入れて F 検定を行なった。** は 1%, * は 5% の危険率で有意なことを示す。

の寄与率を調べるには、 w の水準が少ないという点に多少疑問の点が残されている。

c) $\tan \phi \sim r_t$ 関係について

安定問題の解析に当っては、その簡便性と工学的な有用性から、しばしば全応力法が採用される。その際に必要なのは r_d よりもむしろ r_t である。そこで $\tan \phi$ と r_t の関係について調べておく必要がある。図-12 は $\tan \phi \sim r_t$ の相関図である。図中実線は最小二乗法による回帰直線、点線は2次の最良多項式近似で、係数その他は表-2 に示した。これによると $S_r=49 \sim 66\%$ の場合を除きいずれも $\tan \phi \sim r_t$ は正の相関が認められる。このことは S_r の幅を限定して考えていく

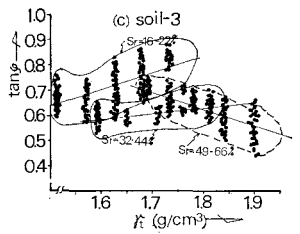
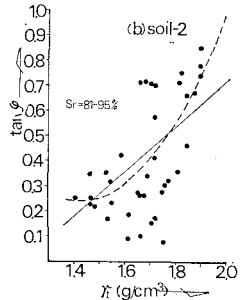
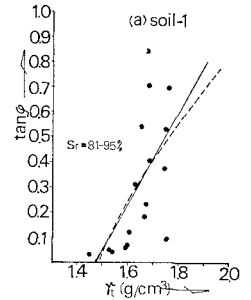


図-12 $\tan \phi \sim r_t$ 関係

と、 $\tan \phi$ が w の影響を受けず、 r_d のみの影響を受けることから、当然説明される。 $S_r=49 \sim 66\%$ の場合 ($w=15\%$) は Soil-3 の最適含水比 13% を超過して試料の作製が困難であって他の場合に比べると実験結果の信頼度が低いが参考のためプロットしてある。

d) $\tan \phi \sim c$ 関係について

次章で明らかになるように、 c, ϕ を確率変数として τ を取扱っていくとき、 c, ϕ が独立であるかどうかという点が基本的な問題となる。図-13 は $c \sim \tan \phi$ 関係をプロットしたものである。これによると、従来言われていた

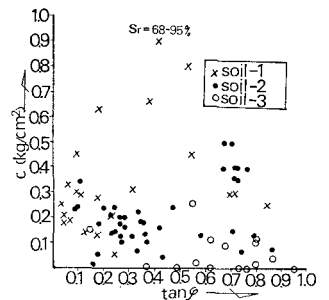


図-13 $c \sim \tan \phi$ 関係

ように²⁾、弱い負の相関があるようにも思われるが $\tan \phi$ と r_d, w, r_t などとの関係のように、強い相関性は認められない。したがって、最初の近似として独立と考えることは許されるであろう。

e) $c \sim w$ 関係について

c は w の影響を大きく受け、 r_d にはあまり影響を受けないであろうと一般には予想される。図-14 は、Soil-1, 2 について c と w の相関をみるために描いた図である。予想とは逆に、 c は w とほとんど相関がないように見える。このことは Soil-3 についての分散分析の結果からも支持される。表-4 は w

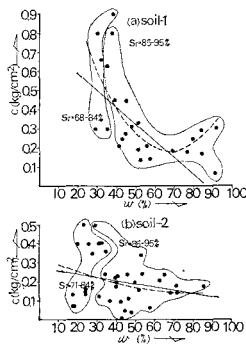


図-14 $c \sim w$ 関係

$=5, 10\%$ および $w=10, 15\%$ の2水準の場合と $w=5, 10, 15\%$ の3水準の場合と合計3通りの場合について分散分析を行なった結果である。この表からわかることは $w=5, 10\%$ の場合は $S_r=16 \sim 22\%$ であり、飽和度の範囲が狭い。このときは c は w と r_d に対し無相関であり、 $w=10, 15\%$ の場合 ($S_r=32 \sim 66\%$) は w と r_d の1次項が有意で、 $w=5, 10, 15\%$ の場合 ($S_r=16 \sim 66\%$) は w の1次項が有意である。すなわち、 S_r の範囲がある程度小さく限定されている場合は、 c は w と r_d に対し無相関で、 S_r の範囲が広がってくると c は w に対し負の相関性を持つてくる。これらのことから、前述したように不飽和土の性質は S_r によって大きく影響されることがわかる。

表-4 c に関する分散分析結果

	要因	自由度	変動 S	分散 V	分散比 F_0	寄与率 (%)
2(w) \times 5(r_d) 水準 $w_1=5\%$ $w_2=10\%$	有意な要因なし					
	w 1次	1	18.32	18.32	65.4(**)	62.3
	r_d 1次	1	8.69	8.69	31.0(**)	29.1
2(w) \times 5(r_d) 水準 $w_1=10\%$ $w_2=15\%$	e	7	1.95	0.28	—	8.6
	ST	9	28.96	—	—	100.0
3(w) \times 5(r_d) 水準 $w_1=5\%$ $w_2=10\%$ $w_3=15\%$	w 1次	1	43.96	43.96	13.5(**)	47.2
	e	13	42.25	3.25	—	52.8
	ST	14	86.21	—	—	100.0
	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—

備考 有意でない要因効果はすべて誤差項にくみ入れて F 検定を行なった。 $**$ は 1%, $*$ は 5% の危険率で有意なことを示す。

なお、 c と r_d の相関を調べるために描いたのが図-15 である。予想されたように、相関はほとんどなく、飽和度 S_r の範囲を限定しても無相関である。

以上、力学係数と物理係数の間の相関性を種々の角度から検討したが、その結果をまとめると以下のとおりである。

- (i) 不飽和土は S_r の範囲によって特徴づけられる。
- (ii) ϕ または $\tan \phi$ は r_d と正の相関がある。
- (iii) ϕ または $\tan \phi$ は w と負の相関がある。
- (iv) ϕ または

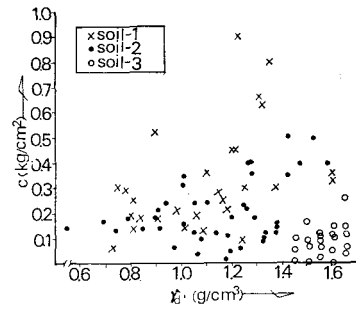


図-15 $c \sim r_d$ 関係

$\tan \phi$ は S_r の範囲を限定すれば r_d に対して正の相関がある。(v) c と $\tan \phi$ は弱い負の相関があるが、 S_r の範囲を限定すれば独立と考えてよい。(vi) c は w に対し S_r の範囲を限定すれば相関性は弱くなる。(vii) c は r_d とは無相関である。

4. 破壊確率について

前章までに検討したように、土の力学係数や物理係数は一般にばらつく。これらのばらつきをどのように把握するかということ、把握されたばらつきをいかに設計、施工の分野に生かせばよいかということが重要な問題である。本章では、前章までの成果を利用し、土構造物の設計、施工の問題における基本的な尺度と考えられる破壊確率（または信頼度）について議論する。

筆者らは、上記の問題に関して、道路の盛土を例に、ばらつきを考慮に入れた土質調査の方法を提案するとともに、調査結果と設計変更の基準および合理的な設計係数 \bar{F}_s^* の決定法について発表した^{5),6),7)}。そして調査、設計、施工において、ばらつきを考慮に入れた有力な指標となるのは信頼度、裏返して言えば破壊確率 P_F であることを指摘した。しかし、そこでは全体的な方法論の確立という点に重点が置かれていたので、簡単なケースとして $\phi=0$ 法による安定解析が可能 な場合と、 $\tan \phi$ のみを考慮に入れればよい砂系の土質の場合に問題を限定してきた。本章では、前章までの結果をもとに、一般的な $c \sim \phi$ 系地盤での全応力法による解析結果を $\phi=0$ 法の場合と対比しつつ検討を進める。そのため、第1節では破壊の定義と各定義ごとに P_F の定式化を試み、第2節では種々の数値計算を行なった結果を検討する。

(1) 破壊確率の定義と定式化

本節で取扱う破壊はすべりによる急速せん断破壊とし、円弧すべりの試行法によって安定問題が検討できるとして議論を進める。

検討すべき斜面の形状を一般的に、図-16 に示すように固定された座標に対し、 $y=f_1(x)$ とする。また、

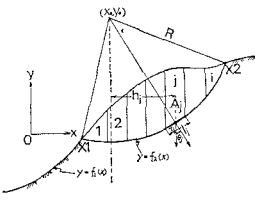


図-16 斜面形状と安定解析

円弧の中心の座標を (x_0, y_0) 、円弧の半径を R とし、斜面内に含まれる円弧を $y=f_2(x)$ で与える。

$$f_2(x) = y_0 - \sqrt{R^2 - (x-x_0)^2} \quad \dots\dots\dots(7)$$

また、斜面を形成する土の湿潤単位体積重量を γ_t 、粘着力およびせん断抵抗角を c および ϕ とする。

斜面内に含まれる円弧と斜面 $f_1(x)$ が囲む部分を図-16 のように i 個のスライスに分割し、 j 番目のスライスの面積を A_j 、スライスを囲む弦の長さを l_j 、弦 l_j の中点と円中心 (x_0, y_0) を結ぶ直線が鉛直となす角を θ_j とすれば、弦 l_j の部分で発揮される平均的なせん断抵抗力 τ_j は次式で与えられる。

$$\tau_j = c + \left(\frac{A_j \cdot \cos \theta_j}{l_j} \right) r_c \cdot \tan \phi \quad \dots\dots\dots(8)$$

ゆえに、すべりに対する抵抗モーメント M_R は

$$M_R = \sum_{j=1}^i R \cdot (\tau_j l_j) = \sum_{j=1}^i R \{ c l_j + (A_j \cos \theta_j) r_t \cdot \tan \phi \} \\ = c \left(\sum_{j=1}^i R l_j \right) + r_t \cdot \tan \phi \left(\sum_{j=1}^i R A_j \cos \theta_j \right) \quad \dots\dots\dots(9)$$

一方、転倒モーメント M_0 は、スライスの重心と $x = x_0$ との距離を h_j とすると

$$M_0 = \sum_{j=1}^i h_j A_j \gamma_t r_t = r_t \left(\sum_{j=1}^i h_j A_j \right) \quad \dots\dots\dots(10)$$

さて、スライスの数 i を $i \rightarrow \infty$ にすれば、近似的に

$$\left. \begin{aligned} l_j &= dl = \sqrt{1 + \left\{ \frac{d}{dx} f_2(x) \right\}^2} \cdot dx \\ A_j &= \{ f_1(x) - f_2(x) \} dx \\ \cos \theta_j &= \sqrt{R^2 - (x-x_0)^2} / R \\ h_j &= (x-x_0) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

なる変換が可能である。式 (11) を式 (9)、(10) に用いると、 M_R, M_0 はそれぞれ式 (12)、(13) で与えられる。

$$M_R = c \int_{x_1}^{x_2} R \sqrt{1 + \left\{ \frac{d}{dx} f_2(x) \right\}^2} dx + r_t \cdot \tan \phi \cdot \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{R^2 - (x-x_0)^2} \{ f_1(x) - f_2(x) \} dx \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$M_0 = r_t \int_{x_1}^{x_2} (x-x_0) \{ f_1(x) - f_2(x) \} dx \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 x_1, x_2 は $f_1(x)$ と $f_2(x)$ の交点の x 座標である。また、式 (12)、(13) における記号は、すべて x, y の増加する方向を正にとってある。

さて、式 (12)、(13) において

$$\left. \begin{aligned} p_1(x_0, y_0, R) &= \int_{x_1}^{x_2} R \sqrt{1 + \left\{ \frac{d}{dx} f_2(x) \right\}^2} dx \\ p_2(x_0, y_0, R) &= \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{R^2 - (x-x_0)^2} \{ f_1(x) - f_2(x) \} dx \end{aligned} \right\}$$

$$q(x_0, y_0, R) = \int_{x_1}^{x_2} (x-x_0) \{ f_1(x) - f_2(x) \} dx \quad \dots\dots\dots(14)$$

とおくと、 p_1, p_2, q はすべて、 $f_1(x)$ と $f_2(x)$ が支配する幾何学的条件のみによって決定される関数形である。式 (12)~(14) を用いると、 M_R と M_0 の比で与えられる係数 F_s は

$$F_s = \frac{p_1(x_0, y_0, R)c + p_2(x_0, y_0, R) \cdot r_t \cdot \tan \phi}{q(x_0, y_0, R) \cdot r_t} \quad \dots\dots\dots(15)$$

伝統的な従来の設計では、式 (15) の $c, r, \tan \phi$ にある一定値を代入して F_s が最小になる値を求め、これを安全率と称していた。このようにして定義された安全率は、前章で述べた土質諸係数のばらつきを反映していない。またかりに、ばらつきが把握されて、 $c, \tan \phi, r_t$ などの母集団がわかり、式 (15) の $c, \tan \phi, r_t$ にその母平均値を用いたとしても、得られた最小安全率は次節で示すように、“安全性”を示す尺度としては不十分な点がある。そこで、筆者らは、“安全率”という用語はいっさい使わずに、後述する破壊確率、または信頼度という尺度で議論することにする。

さて、従来の経験によれば、式 (15) の F_s が最小になるようなすべり面に関する x_0, y_0, R の組（これを x_0^*, y_0^*, R^* と記し、これに対応する諸数値にはすべて * 印をつける）が工学的に意味を持っていることが知られている。筆者らは、このときの F_s を F_s^* とし、その平均値 \bar{F}_s^* を“設計係数”と呼称する。このように定義し、 $c, \tan \phi, r_t$ の母平均値を $\mu_c, \mu_{\tan \phi}, \mu_{r_t}$ と記せば、

$$\left. \begin{aligned} F_s^* &= \frac{p_1^*(x_0^*, y_0^*, R^*) \cdot c}{q^*(x_0^*, y_0^*, R^*) \cdot r_t} \\ &\quad + \frac{p_2^*(x_0^*, y_0^*, R^*) \cdot \tan \phi}{q^*(x_0^*, y_0^*, R^*)} \\ \bar{F}_s^* &= \frac{p_1^*(x_0^*, y_0^*, R^*) \cdot \mu_c}{q^*(x_0^*, y_0^*, R^*) \cdot \mu_{r_t}} \\ &\quad + \frac{p_2^*(x_0^*, y_0^*, R^*) \cdot \mu_{\tan \phi}}{q^*(x_0^*, y_0^*, R^*)} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(16)$$

前章で示したように、 $c, \tan \phi, r_t$ は正規分布し、 $\tan \phi$ は r_t と線形相関がある。また、 c と $\tan \phi$ は、 S_r の範囲を限定すれば独立、すなわち、 c と r_t も独立と考えることは許される。このことは以下の議論において基本的に重要である。いま、 $\tan \phi$ と r_t の関係を

$$\tan \phi = a r_t + b \quad \dots\dots\dots(17)$$

とすれば、式 (16) の F_s^*, \bar{F}_s^* はそれぞれ次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} F_s^* &= \frac{M_R^*}{M_0^*} = \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{c}{r_t} + \frac{p_2^*}{q^*} (a r_t + b) \\ \bar{F}_s^* &= \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{r_t}} + \frac{p_2^*}{q^*} (a \mu_{r_t} + b) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(18)$$

このように、 F_s^* は、 c, τ_t なる正規分布に従う独立な2つの確率変数の関数で与えられる1つの確率変数である。したがって、破壊の定義は、 $F_s^* \leq 1.0$ 、あるいは $M_R^* \leq M_0^*$ と定義すると、これらの事象が生じる確率が普通の場合必ず存在する。筆者らは、この確率を破壊確率 P_F と定義するが、この場合、次のように2通りの定義の仕方が考えられる。

$$P_{F1} = P_{\text{rob}}[F_s^* \leq 1.0] \dots\dots\dots(19)$$

または

$$\begin{aligned} P_{F2} &= P_{\text{rob}}[M_R^* \leq M_0^*] \\ &= P_{\text{rob}}[Z = M_R^* - M_0^* \leq 0] \dots\dots\dots(20) \end{aligned}$$

式(18)の $a=b=0$ 、すなわち $\tan \phi=0$ の場合には $\phi=0$ 法となり、このときの F_s^* がコーシー分布に従うことはすでに示した⁵⁾が、一般に式(19)、(20)に基づいて P_F を解析的に求めるのは非常に困難である。そこで、 F_s^* と Z の確率密度関数を求める方法として、電子計算機によるシミュレーション手法を用いた。これには、まず、電子計算機内で独立に $N[\mu_c, \sigma_c^2], N[\mu_{\tau_t}, \sigma_{\tau_t}^2]$ なる正規乱数を発生させ、式(18)の第1式を用いて F_s^* または $Z = M_R^* - M_0^*$ を計算し、その F_s^* 、 Z の頻度分布を調べる方法をとった。その結果の一例が図-17である。他の計算例においても、いずれも高い有意水準で正規分布と言えることがわかった。したがって、式(19)、(20)の定義による破壊確率は、それぞれ、次のように書くことができる。

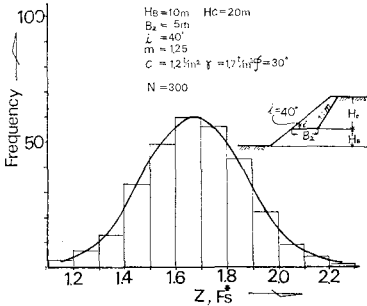


図-17 Z, F_s^* の分布例

$$\left. \begin{aligned} P_{F1} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{K_1} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \\ K_1 &= \frac{1.0 - \left[\left(\frac{p_1^*}{q^*} \right) \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} + \left(\frac{p_2^*}{q^*} \right) \cdot (a \mu_{\tau_t} + b) \right]}{\sqrt{\left(\frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} \right)^2 \left(\frac{V_c^2 + V_r^2}{1 + V_r^2} \right) + \left(\frac{p_2^*}{q^*} a \sigma_{\tau_t} \right)^2}} \dots\dots\dots(21) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} P_{F2} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{K_2}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \\ K_2 &= \frac{\left(\frac{p_1^*}{q^*} \right) \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} + \frac{p_2^*}{q^*} \left[\frac{a(\mu_{\tau_t}^2 + \sigma_{\tau_t}^2) + b \mu_{\tau_t}}{\mu_{\tau_t}} \right] - 1.0}{\sqrt{\left(\frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} \right)^2 V_c^2 + \left[\left(\frac{2 a p_2^* \mu_{\tau_t} + b}{q^*} - 1 \right)^2 + 2 \left(\frac{p_2^*}{q^*} a \sigma_{\tau_t} \right)^2 \right] V_r^2}} \dots\dots\dots(22) \end{aligned} \right\}$$

ここに、 V_c, V_r は c および τ_t に関する変動係数であり、 K_1, K_2 はそれぞれ標準正規積分の積分上限値と積分下限値である。標準正規分布は平均値 $t=0$ に対して左右対称であるから、 $|K_1|=|K_2|$ ならば $P_{F1}=P_{F2}$ になることはいうまでもない。

さて、すでに示したように、 σ_{τ_t}, V_r は非常に小さい値であるから、 $a, b, p_2^*/q^*$ に比べて、 $\sigma_{\tau_t}^2, V_r^2$ を含む項は無視できる。したがって

$$\begin{aligned} |K_1|=|K_2| &= \frac{1.0 - \left[\left(\frac{p_1^*}{q^*} \right) \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} + \left(\frac{p_2^*}{q^*} \right) (a \mu_{\tau_t} + b) \right]}{\sqrt{\left(\frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} \right)^2 V_c^2}} \\ &= \frac{1.0 - \bar{F}_s^*}{\left| \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} \cdot V_c \right|} \dots\dots\dots(23) \end{aligned}$$

となり、 $P_{F1} \doteq P_{F2}$ となるから、定義の相違による P_F の違いはないと考えてよい。さらに、 $\tan \phi$ が無視できる場合には、式(23)で $a=b=0$ とすれば、 K_1, K_2 は

$$|K_1|=|K_2| = \frac{1.0 - \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}}}{\left| \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} \cdot V_c \right|} \dots\dots\dots(24)$$

となる。ところで、式(18)よりわかるように、 $a=b=0$ の場合

$$\bar{F}_s^* = \frac{p_1^*}{q^*} \cdot \frac{\mu_c}{\mu_{\tau_t}} \dots\dots\dots(25)$$

で与えられるから

$$|K_1|=|K_2| = \frac{1.0 - \bar{F}_s^*}{\bar{F}_s^* V_c} \dots\dots\dots(26)$$

となり、これは $\phi=0$ の場合としてすでに示した式⁵⁾と一致する。

以上の検討を通じて重要なことは、式(23)、(26)から明らかなように、同じ \bar{F}_s^* であっても、 $c \sim \phi$ 系と $\phi=0$ 系とは異なる P_F を与えることである。すなわち、 \bar{F}_s^* は、この意味において、絶対的な信頼度を与えるものではない。このことは次節において具体例を示しながら説明する。

(2) 試算例による破壊確率の検討

図-18, 19 は、 \bar{F}_s^* と P_F の関係を式(21)、(22)を用いて計算した結果である。ただし、図-18は図中に示した斜面について、図-19は、図-16の $f_1(x)$ として次式で与えられる斜面について計算した。

$$f_1(x) = \frac{H_B + H_C}{\pi}$$

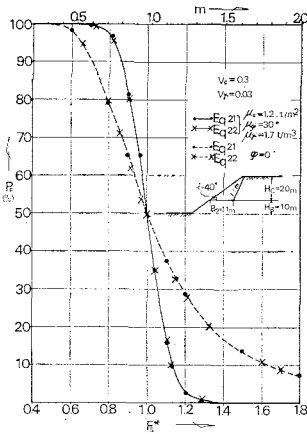


図-18 $\bar{F}_s^* \sim P_F$ 関係

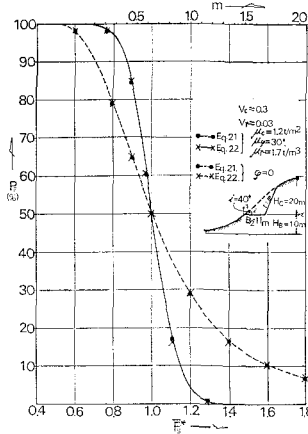


図-19 $\bar{F}_s^* \sim P_F$ 関係

$$\cdot \tan^{-1} \left\{ \frac{\pi \tan i}{H_B + H_C} \cdot \frac{1}{\cos^2 \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{H_B - H_C}{H_B + H_C} \right)} \right.$$

$$\cdot x + \tan \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{H_B - H_C}{H_B + H_C} \right) \left. \right\}$$

$$+ \frac{1}{2} (H_C - H_B) \dots \dots \dots (27)$$

この計算では、式(17)の a, b の値としてかりに、 $a = 0.5, b = -0.225$ 、また $\mu_c = 1.2 \text{ t/m}^2, \mu_r = 1.7 \text{ t/m}^2, V_c = 0.3, V_r = 0.03$ を用いた。実線は $c-\phi$ 系、破線は $\phi=0$ 系の場合である。いうまでもなく、 $\phi=0$ 系の場合は斜面の形状とは無関係に設計係数 \bar{F}_s^* の値によって一義的に P_F が定まる。また実線の P_F の変化は、それぞれの図中に示した斜面の勾配 m の変化に対応するものである。これらの図からわかることは、同じ斜面であっても、 $\phi=0$ 系の場合と $c-\phi$ 系の場合とは、同じ設計係数 \bar{F}_s^* でありながら P_F が顕著に異なることである。すなわち、前節でも触れたように、設計係数 \bar{F}_s^* が、たとえば 1.3 という数値であっても、それが $\bar{F}_s^* = 1.0$ の場合よりも 1.3 倍安全であるとか、1.3 倍の信

頼性があるとかを意味しているのではなく、同じ土質条件、同じ構造物においては、少なくとも 1.0 よりも 1.3 の方が信頼度が高い、いいかえると、破壊の可能性が低いということの意味しているに過ぎない。このことはきわめて重要である。すなわち、信頼度という観点からは、 \bar{F}_s^* の絶対値は何ら重要な意味を持ち得ないということに注意しておく必要がある。

また図中●印は式(21)の定義によるもの、*印は式(22)の定義による計算値である。これによっても明らかなように、定義の差による P_F の違いはほとんどない。また図-20, 21 は $V_r = 0.1$ という非常に大きな値で計算したものであるが、この程度の値をとったとしても P_F

にはあまり差がないことがわかる。

図-18 と図-19 あるいは図-20 と図-21 の2組を別々にみてわかるように、ここで取上げた斜面形状の違いによっては、 P_F 値の顕著な差はない。しかし、一般には、 $p_1^*/q^*, p_2^*/q^*$ の値が斜面形状に左右される。したがって、 $P_F \sim \bar{F}_s^*$ 関係も異なってくる。今後、種々の斜面について同様の検討を加え、 $\bar{F}_s^* \sim P_F$ の関係を明らかにしていくことが重要である。

以上の検討の結果、本章で明らかにされたことは以下のとおりである。(i) $\phi=0$ 系と $c-\phi$ 系では同一形状の斜面であっても、同じ \bar{F}_s^* 値に対し P_F の値が最大 25% 程度異なってくる。(ii) V_r 値の P_F に対する影響は $\phi=0$ 系と $c-\phi$ 系とは同じ程度である。(iii) P_F 値は斜面形状の影響を受けるので解析に際して極端な斜面の簡略化は避けた方がよい。

5. ま と め

本研究では、不飽和土に関する土質諸係数の確率、統計的取扱いにおける一般的考察を行なうとともに、各係数の分布および相関について検討を加えた。さらに、これらの検討結果をもとに、土構造物の設計において基本となるのは信頼度あるいは破壊確率であることを示し、破壊確率の定義の相違による P_F の変動、 $\phi=0$ 系と $c-\phi$ 系における基本的な差異などについて明らかにした。

終りに臨み、本研究を実施するに際し多くのデータを快く提供して下さいました建設省関東地建の関係各位、実験にご協力下さいました奥村研一氏(元、京都大学・大学院生)また分散分析にご協力下さいました浅岡 顕氏(京都大学・大学院生)に対し深く感謝致します。

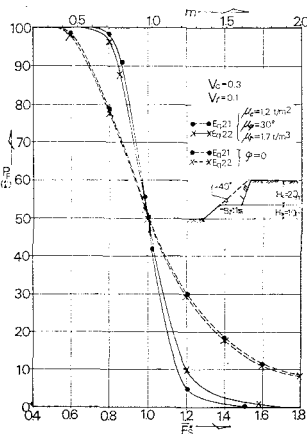


図-20 $\bar{F}_s^* \sim P_F$ 関係

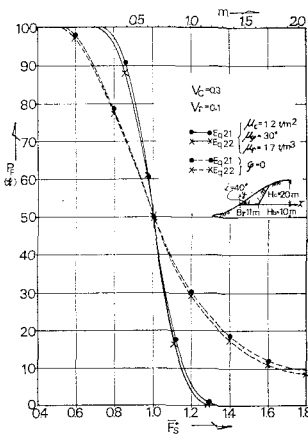


図-21 $\bar{F}_s^* \sim P_F$ 関係

参 考 文 献

- 1) Hooper, J.A. and Butler, F.G. : Some Numerical Results Concerning the Shear Strength of London Clay, *Geotechnique*, Vol. 16, pp. 282~304, 1966.
- 2) Lumb, P. : The variability of natural soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 74~97, 1966.
- 3) Lumb, P. : Safety factors and the probability distribution of soil strength, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, No. 3, pp. 225~242, 1970.
- 4) Meyerhof, G.G. : Safety factors in soil mechanics, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, No. 4, pp. 349~355, 1970.
- 5) 松尾 稔・黒田勝彦 : 盛土建設のための土質調査と盛土の安定性に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 196 号, pp. 75~86, 1971.
- 6) 松尾 稔・黒田勝彦 : 盛土の破壊確率を考慮した土質調査の規模決定法について, 土木学会論文報告集, 第 198 号, pp. 69~81, 1972.
- 7) 長尾義三・松尾 稔・黒田勝彦 : 盛土の設計安全率決定に関する研究, 土木学会論文報告集, 第 203 号, pp. 13~27, 1972.
- 8) 山崎 謙 : 哲学とは何か, 青木新書, p. 73, 1971.
- 9) 北川敏男 : 統計学の認識 (基盤と方法), 白揚社, p. 43, 1969.
- 10) レーマン, E.L. 著, 竹内 啓・渋谷敏昭訳 : 統計的検定論, 岩波書店, pp. 69~70, 1969.
- 11) 松尾 稔, 軽部大蔵 : 室内セン断試験結果の設計への適用に際する 2, 3 の問題点に関する討議, 土と基礎, Vol. 15, No. 2, pp. 38~39, 1967.
- 12) 土質工学会編 : 土質試験法, pp. 378~379.
- 13) 松尾 稔・軽部大蔵 : 室内セン断試験結果の設計への適用に際する 2, 3 の問題点, 第 11 回土質工学シンポジウム, pp. 91~100, 1966.
- 14) Terzaghi, K. and Peck, R.B. : *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 80~84, 1967.
- 15) Scott, R.F. : *Principles of Soil Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., p. 309, 1965.
- 16) 土質工学会編 : 土のセン断試験法に関する基礎的研究, 1968.

(1972. 6. 21・受付)