

安全率 F_s (factor of safety) の計算方法

安全率 $F_s = \text{抵抗力} \div \text{滑動力}$ です。下記の式 (もっと複雑な式もありますが、最も簡単でわかりやすい式が下記です) で、 c 、 ϕ に “ダッシュ” がついているのは、水圧を考慮する「有効応力で解く場合」の粘着力 c' 、内部摩擦角 ϕ' のことを意味します。水圧を考慮しない方法を「全応力法」といってダッシュなしで表示します。土質工学の細かい決まりごとですが、地すべり問題は地下水圧を考慮するのが普通なので、いちいちダッシュをつけないことが多いです。

安定計算式

$$F_s = \frac{\sum \{c' \ell + (N - U) \tan \phi'\}}{\sum T} = \frac{\sum \{c' \ell + (W \cdot \cos \alpha - u \cdot \ell) \tan \phi'\}}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

ここで F_s : 安全率

c' : すべり面の土の粘着力 (kN/m^2) (有効応力表示)

ℓ : すべり面の長さ (m)

N : すべり面上に働くスライス重量のすべり面に垂直な分力 $N = W \cdot \cos \alpha$ (kN/m)

U : すべり面上での間隙水圧に起因する力 $U = u \cdot \ell$ (kN/m)

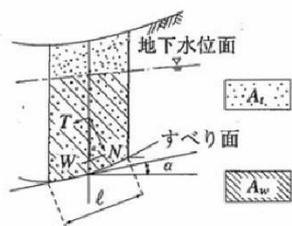
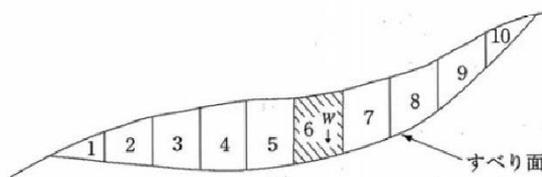
ϕ' : すべり面の土の内部摩擦角 ($^\circ$) (有効応力表示)

T : すべり面上に働くスライス重量の接線分力 $T = W \sin \alpha$ (kN/m)

W : スライス重量 (kN/m)

u : スライスのすべり面上に働く間隙水圧 (kN/m^2)

α : すべり面が水平方向に対してなす角 ($^\circ$)



分割された地すべり断面について

A_t : 各細片の面積 (m^2)

A_w : 各細片の水浸面積 (m^2)

γ_t : 土の湿潤単位体積重量 (kN/m^3)

γ_{sat} : 土の飽和単位体積重量 (kN/m^3)

γ_w : 水の単位体積重量 (kN/m^3)

とすると

$W = (A_t - A_w) \cdot \gamma_t + A_w \cdot \gamma_{sat}$ (kN/m)

$\gamma_{sat} = \gamma_t$ なら $W = A_t \cdot \gamma_t$

$U = A_w \cdot \gamma_w (u \cdot \ell \text{ kN/m})$

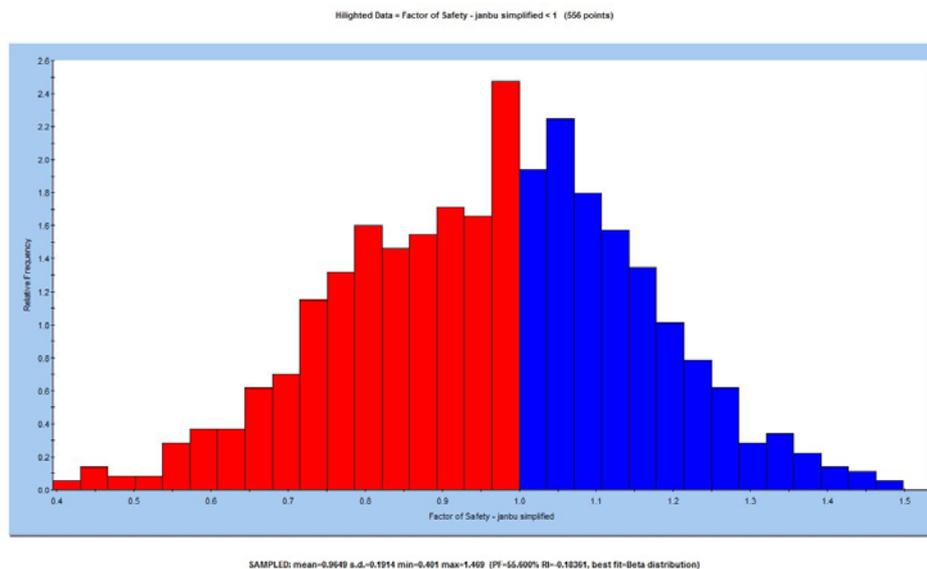
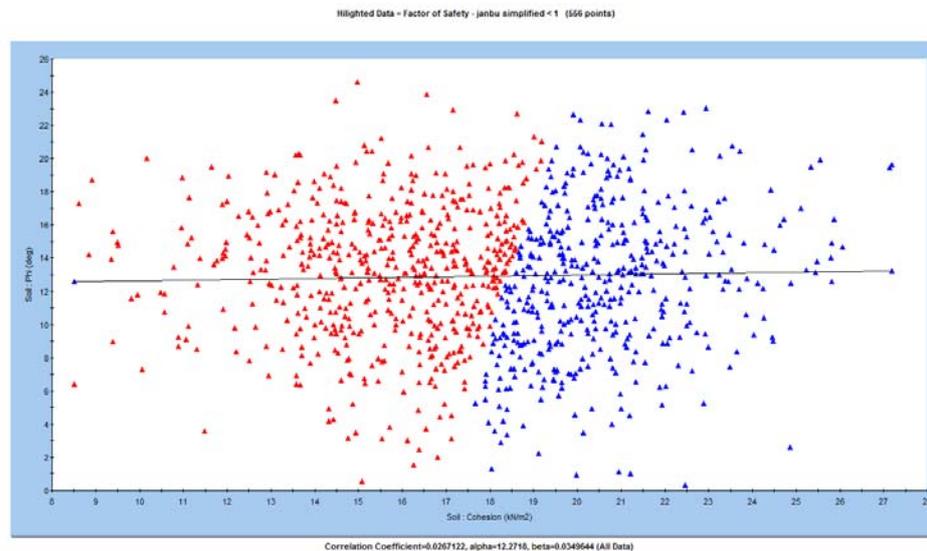
ともなる

(土地改良事業計画設計基準より引用)

崩壊確率 PF (probability of failure) の求め方

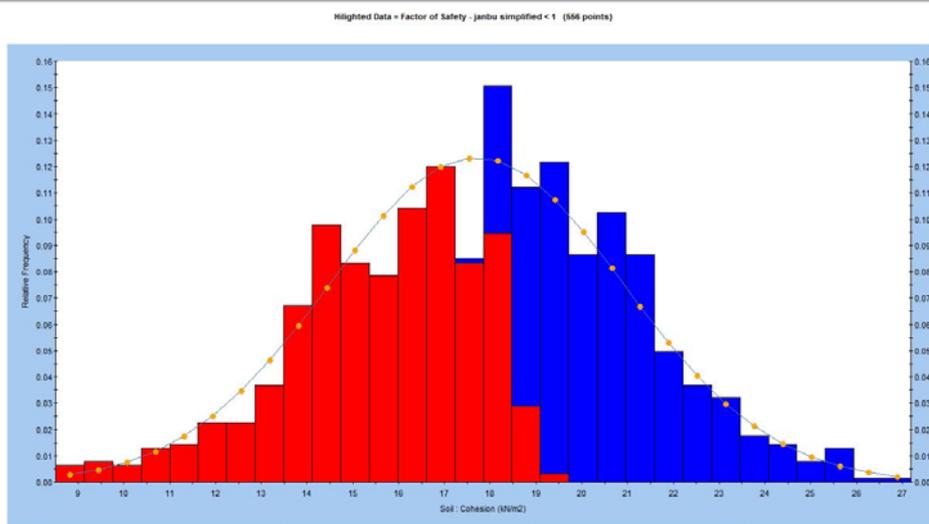
c と (場合によっては単位体積重量 γ も) を計測した値から得られた標準偏差 σ を使って、プラスマイナス 3σ の幅で正規分布させて変動させます。前述の安全率の計算式で、その変動した値を使って安全率を計算します (少なくとも 1000 回くらい)。そうすると、いろいろな F_s 値が計算されますが、その中で $F_s < 1.0$ となる回数の比率を崩壊確率と定義しています。 ($F_s < 1.0$ 未満の回数 \div 全計算回数) $\times 100 =$ 崩壊確率%

上側の図は横軸が粘着力 c 、縦軸が内部摩擦角 ϕ です。それぞれの点は、 c と ϕ の組み合わせです。赤色が $F_s < 1.0$ 、青色が $F_s \geq 1.0$ です。下の図は、 F_s の頻度グラフです。色の意味は同様です。 c と ϕ を変動させますので、 F_s もその都度違う答えを出します。

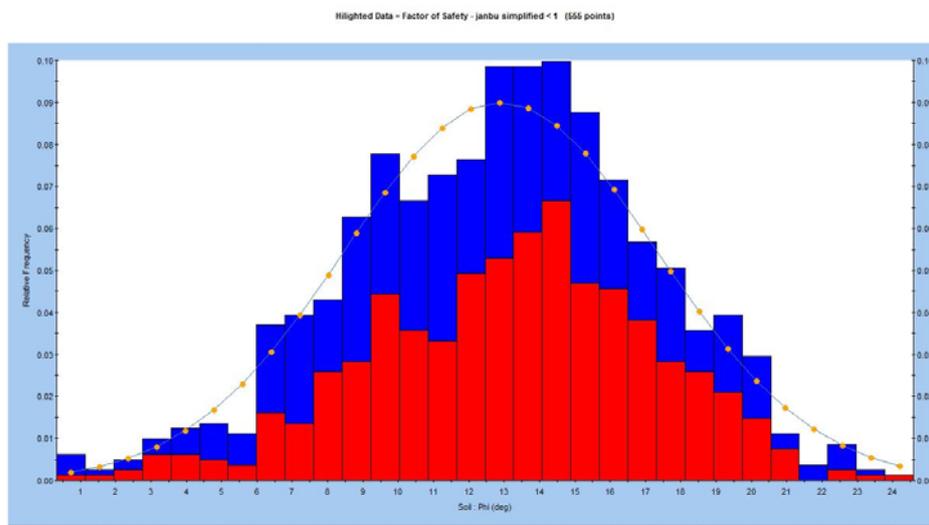


#	Material Name	Property	Distribution	Mean	Std. Dev.	Rel. Min	Rel. Max
1	Soil	Cohesion	Normal	17.7	3.23	9.69	9.69
2	Soil	Phi	Normal	12.9	4.43	12.9	13.29

3x の幅で正規分布させています（負の値にならないように の下側は調整していますが）。



c の分布（色は計算の結果 $F_s < 1.0$ となったか $F_s \geq 1.0$ となったか）



の分布（色は計算の結果 $F_s < 1.0$ となったか $F_s \geq 1.0$ となったか）

信頼性指数 RI (reliability index) の求め方

実は、RI は日本ではあまり使われませんが、崩壊確率 0%の信頼性があるかどうかの指標です。クリティカルな安全率 $F_s=1.0$ と計算結果の平均安全率との間の標準偏差の離れ(倍数) を表します。正規分布では 3 内に 99.73%が入りますので、 $RI > 3$ だと斜面の安定性は十分(崩壊確率 0%)を意味します。 $RI=0$ は平均安全率 $F_s=1.0$ の意味し、 $RI < 0$ は平均安全率 $F_s < 1.0$ を意味します。(十進法の RI と対数の RI があります)

$$\beta = \frac{\mu - 1}{\sigma} \quad \text{Eqn. 1}$$

where:

β = Reliability Index,

μ = Mean Factor of Safety,

σ = Standard Deviation of FS

$$\beta_{LN} = \frac{\ln \left[\frac{\mu}{\sqrt{1 + V^2}} \right]}{\sqrt{\ln(1 + V^2)}} \quad \text{Eqn. 2}$$

where:

β_{LN} = lognormal Reliability Index

μ = Mean Factor of Safety

V = coefficient of variation of Factor of Safety = σ / μ

σ = Standard Deviation of FS

日本では設計の目標値は、目標安全率 $F_{sp} > 1.2 \sim 1.5$

海外での設計の目標値は、信頼性指数 $RI > 3$ (・・・崩壊確率 $PF=0\%$ と同義)

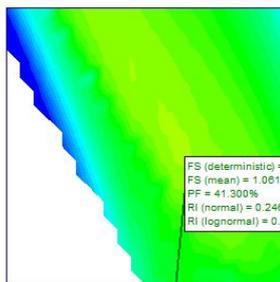
データ取得数が多いと確率的解析が可能

簡易に現場でデータ取得が可能な方法、例えば土層強度検査棒の利用が有効

確定論的安全率 $F_s=1.0$ は崩壊確率 $PF=約50\%$

例えば $F_s=1.1$ は $PF=約30\%$ 、 $F_s=1.2$ は $PF=約20\%$ 、 $F_s=1.5$ は $PF=約2\%$

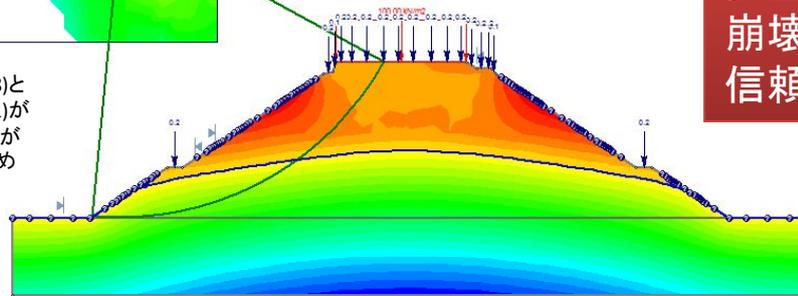
確定論的安全 (F_s ; Factor of Safety): 唯一の土質定数で計算したときの唯一の安全率解
崩壊確率(PF: Probability of Failure): 土質定数をばらつかせて数多く計算し、安全率が1.0を下回る確率



確定論的安全率(1.038)と確率論的安全率(1.061)が異なるのは、粘着力値が負とならない操作のため

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kPa)	Phi (deg)	Water Surface	Phi b (deg)	Air Entry (deg)
Morido	Yellow	20	Mohr-Coulomb	5	31.1	None	0	0
Basement	Green	20	Mohr-Coulomb	100	10	None	0	0

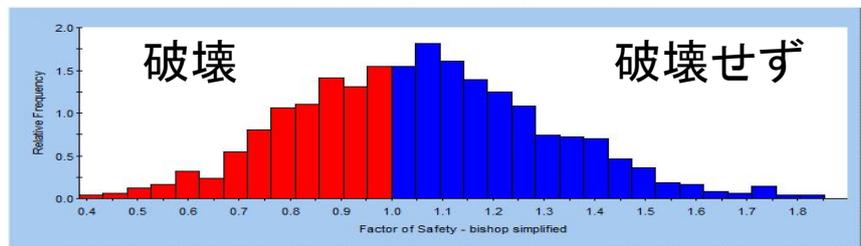
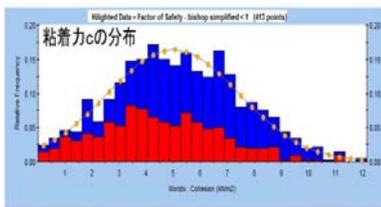
Material Name	Color	Model	KS (m/s)	K2/K1	K1 Angle (deg)	Soil Type
Morido	Yellow	Simple	2e-005	1	0	General
Basement	Green	Simple	1e-007	1	0	General



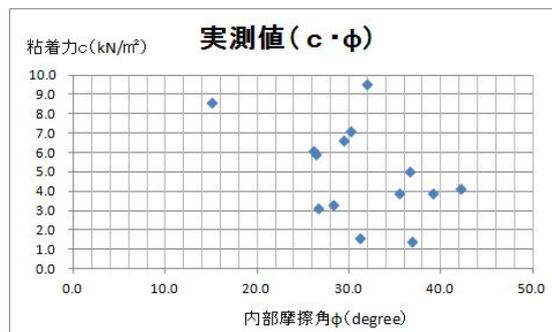
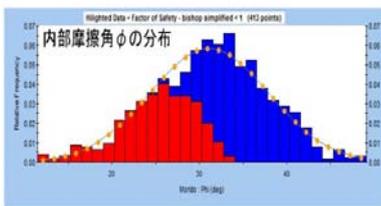
確率解析結果
安全率 $F_s=1.061$
崩壊確率 $PF=41.3\%$
信頼性指数 $RI=0.246$

RI: Reliability Index
信頼性指数; この値が3以上であれば完全に安定(崩壊確率0%)な斜面

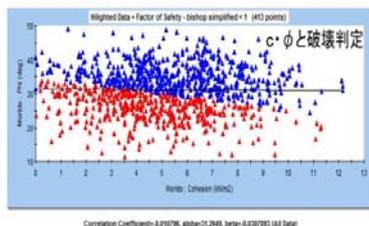
Highlighted Data = Factor of Safety - bishop simplified < 1 (413 points)



SAMPLED: mean=1.061 s.d.=0.2465 min=0.4092 max=1.828 (PF=41.300% RI=0.24553, best fit=Normal distribution)



	ϕ (°)	c (kN/m ²)
実測値	36.9	1.4
	31.2	1.6
	26.6	3.1
	28.3	3.3
	35.5	3.9
	39.1	3.9
	42.2	4.1
	36.6	5.0
	26.4	5.9
	26.2	6.1
	29.4	6.6
	30.2	7.1
	15.0	8.6
	32.0	9.5
	平均値	31.1
標準偏差	6.84	2.43



土層名	項目	分布形態	実測値の統計量			
			平均値	標準偏差	値の幅	
Morido	粘着力	正規分布	5.0	2.43	-5.0	7.29
Morido	内部摩擦角	正規分布	31.1	6.84	-20.52	20.52

※値の幅としては標準偏差×3とすることにより、実際の値が含まれる確率が99.73%となる。ただし、強度値がゼロを下回る場合には、ゼロを下限とする。