不飽和シラスのせん断強度パラメータの不確実性を考慮した斜面崩壊確率のサクション依存性および簡易算出法に関する検討

A CONSIDERATION ON THE SUCTION DEPENDENCE AND SIMPLIFIED CALCULATION METHOD OF SLOPE FAILURE PROBABILITY CONSIDERING THE UNCERTAINTY OF SHEAR STRENGTH PARAMETERS OF UNSATURATED SHIRASU SOIL

岩崎 明里[1]・酒匂 一成[2]・田上 聖人[3]
Akari IWASAKI, Kazunari SAKO and Masato TAUE

[1]鹿児島大学大学院理工学研究科（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: k1429973@kadai.jp
[2]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: sako@oce.kagoshima-u.ac.jp
[3]鹿児島大学学術研究院理工学域工学系（〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40）
E-mail: taue@oce.kagoshima-u.ac.jp

***Key Words**: unsaturated soil, shirasu, direct shear test, probability of slope failure*

1. はじめに

近年，地球温暖化に伴い，梅雨時期や台風時の集中豪雨による土砂災害が毎年のように発生している．特に，鹿児島県を含む南九州一帯には，火砕流堆積物の非溶結部と定義されるシラスが広く分布している．シラスは，1)多孔質であるため土粒子密度が普通の砂質土よりも軽い，2)流水による侵食を受けやすい，3)粒子破砕を起こしやすい，4)攪乱試料と不攪乱試料の力学特性が異なるといった特徴を有している．また，シラスの主な構成粒子である火山ガラスは水の浸透や乾燥の繰り返しにより化学的風化作用を受けやすく，粘土鉱物の生成，単位体積重量の減少，強度低下等が生じる．このようなシラスの土質特性は，降雨時に斜面崩壊を生じさせる素因と考えられており[1]，豪雨時のシラス斜面の安定性を高精度に評価・予測する技術の確立が重要な課題となっている．従来，斜面の安定性は安全率により評価されてきたが，安全率では，土の不均質性や室内試験に起因するばらつきを十分に考慮することが困難であった．これに対し，松尾・上野[2]や佐竹・若井[3]は，土の物性値の不均質性が斜面安定解析に与える影響や設計手法について報告している．また，荒木ら[4]，酒匂ら[5]は，せん断強度パラメータ（見掛けの粘着成分 c，内部摩擦角ϕ）を 2 次元正規分布に従う独立した確率変数とみなし，c，ϕの不確実性を考慮した安定性評価指標として崩壊確率を提案している．しかし，この確率論的手法には主に 3 つの課題がある．1 つ目は，不飽和土の c，ϕのばらつきを定量的に評価するための試験データが不足していることである．小城ら[6]は，乾燥状態の豊浦砂とガラスビーズを対象に，同一条件で複数回の定体積一面せん断試験を実施し，せん断強度パラメータがばらつくことを確認している．一方，不飽和土ではサクション制御を要するため，試験装置や手順が複雑であることから，乾燥・飽和状態よりも c，ϕがより大きくばらつく可

能性があるが，ばらつきを評価した報告は未だ少ない．2 つ目は，不飽和土の c，ϕおよび崩壊確率のサクション依存性が十分に明らかになっていないことである．3 つ目は，崩壊確率算出時の計算負荷が大きいことであり，実務への適用には，より簡便な算出法が求められる．そこで本研究では，鹿児島県鹿児島市郡山町で採取したシラス（以降，郡山シラスと称す）を対象に，2 種類のサクション条件下で不飽和定体積一面せん断試験を複数回実施し，c，ϕのばらつきを定量的に明らかにする．さらに，得られた統計データを用いて崩壊確率を算出し，サクションの変化が c，ϕおよび崩壊確率に与える影響について考察する．また，簡易的な崩壊確率算出法を提案し，その妥当性を従来手法との比較により検証する．

2. 不飽和定体積一面せん断試験の概要

本試験で用いた不飽和一面せん断試験装置を**図-1** に示す．この試験装置は，せん断箱が圧力セル内に設置されており，供試体の間隙空気圧 u_a と間隙水圧 u_w を調整することで，サクション s_u（$=u_a-u_w$, $u_a \geqq u_w$）を制御しながら試験を実施できる．さらに，垂直応力 σ は，セル内の間隙空気圧 u_a の影響を受けるため，基底応力 σ_{net}（$=\sigma-u_a$）として制御される．せん断箱はセル室内の設置台に固定され，垂直力を上面から載荷する形式になっており，上箱を固定し，下箱を可動させ，せん断を行う．上箱と下箱の間はテフロンリング（1 mm×5 枚）を入れてせん断のすき間としている．せん断箱の寸法は，直径 60 mm，高さ 35 mm（せん断のすき間を含む）である．供試体上部にはポーラスストーン付き加圧板，下部にはセラミックディスク付きペデスタルを設置している．垂直荷重計（ロードセル）は加圧軸に取り付けてある．

本試験では，郡山シラス（ρ_s=2.42 Mg/m^3）を用い，間隙比 e=1.01，含水比 w=25 %を目標とし，供試体を 3 層に分け，各層，締固め棒を高さ 2 cm から 12 回自由落下させる動的締固めを行い，供試体を作製した．郡山シラスの粒径加積曲線を**図-2** に示す．供試体作製後，サクションを制御した後に基底応力を制御する圧密過程を実施した [7]．サクション s_u は 5，15 kPa の 2 条件，基底応力 σ_{net} は 50，100，250 kPa の 3 条件下で圧密を行った．その後，せん断過程では，供試体の体積が一定となるように垂直応力を制御しながら，せん断速度 0.2 mm/min で，せん断変位が 7 mm に達するまでせん断した．せん断強度に関しては，せん断応力のピークが明確な場合はピーク値を，ピークが不明確な場合はせん断変位 7 mm のときのせん断応力をせん断強度として採用した．

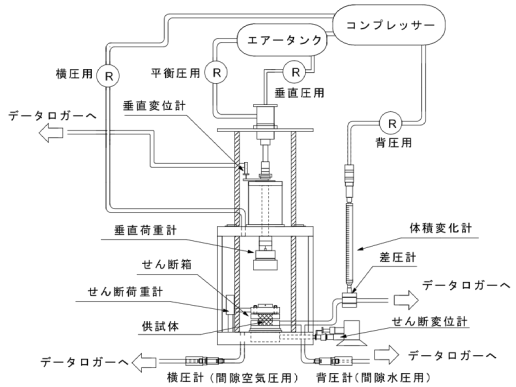


図-1　不飽和一面せん断試験装置の概略図

3. せん断試験結果

(1)　不飽和シラスのせん断特性

本試験では，せん断強度パラメータのばらつきを評価するため，各基底応力条件下（50, 100, 250 kPa）で 5 回ずつせん断試験を実施し，合計 15 回の試験を行った．**表-1** に，せん断試験結果を示す．同一条件下で実施した試験であっても，値がばらついていることが確認された．**図-3** にせん断中の応力経路を示す．全ての試験において，せん断初期には負のダイレイタンシーにより体積が収縮する挙動を示した．そのため，せん断中は定体積を維持するために基底応力は一時的に減少するが，せん断が進むにつれて基底応力は増加し，それに伴い，せん断応力も増加する傾向を示した．また，サクションの増加に伴い，せん断応力も増加する傾向が確認された．これは，サクションの増加により土粒子間に働く見掛けの粘着成分が増加し，外力に対して間隙構造を保持しようとする抵抗が増加したためであると考えられる．

(2)　せん断強度パラメータの算出

本試験では，各基底応力条件下で 5 回ずつせん断試験を実施したため，異なる 3 つの基底応力状態の

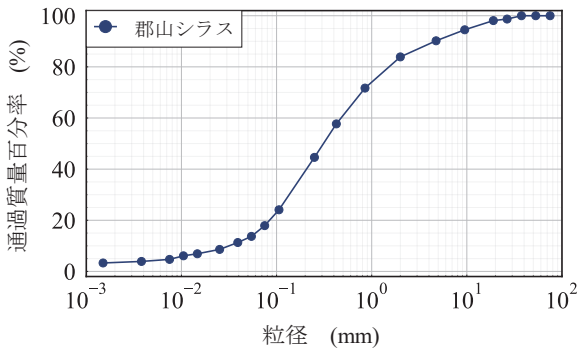


図-2　郡山シラスの粒径加積曲線

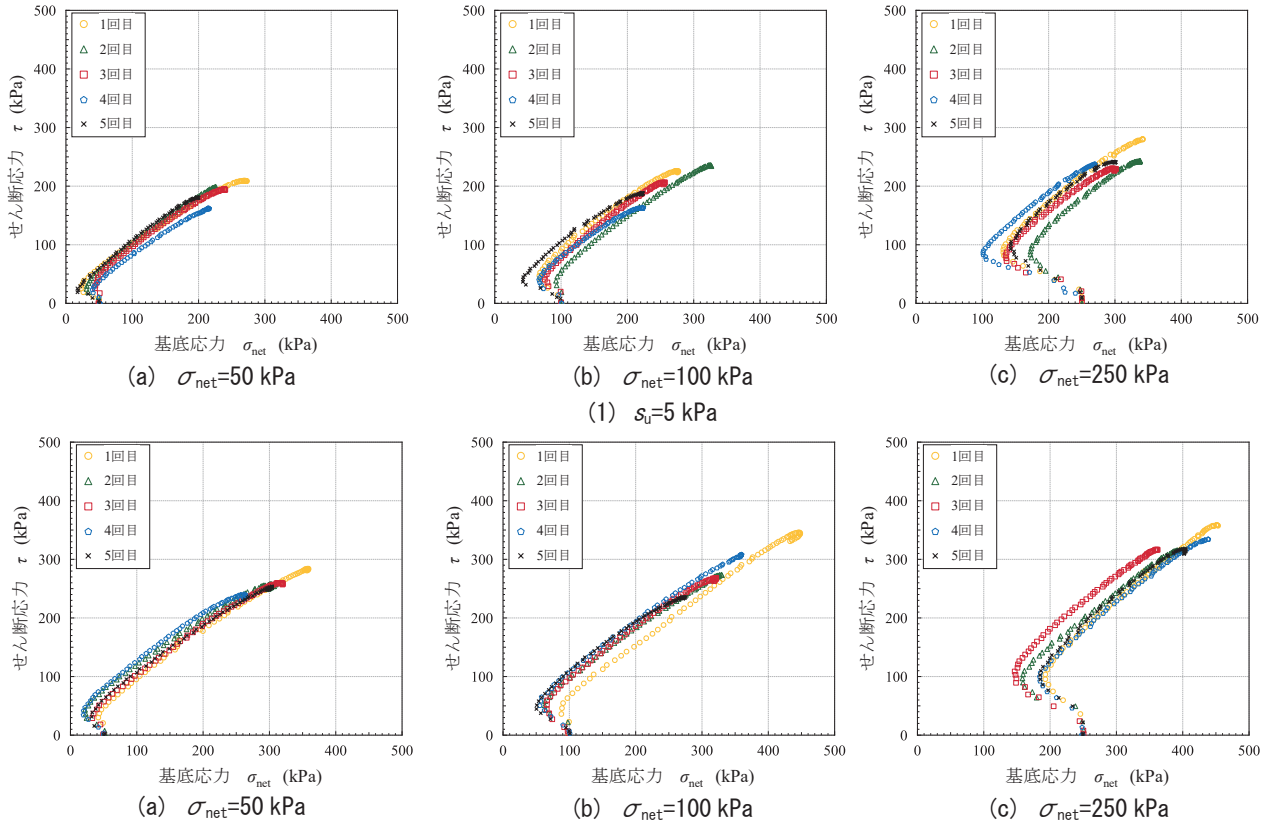
表-1　せん断試験結果

(1)　s_u=5 kPa

基底応力条件	試験回数	せん断強度 (kPa)	破壊時の基底応力 (kPa)	供試体作製時の含水比 (%)
	1回目	209	268	24.78
	2回目	199	226	25.31
σ_{net}=50 kPa	3回目	195	238	25.37
	4回目	162	216	24.88
	5回目	181	198	24.86
	1回目	226	272	24.82
	2回目	236	323	24.57
σ_{net}=100 kPa	3回目	207	257	25.06
	4回目	163	223	24.48
	5回目	188	223	25.09
	1回目	280	342	25.13
	2回目	243	337	24.40
σ_{net}=250 kPa	3回目	230	300	24.59
	4回目	237	269	24.43
	5回目	242	298	24.82

(2)　s_u=15 kPa

基底応力条件	試験回数	せん断強度 (kPa)	破壊時の基底応力 (kPa)	供試体作製時の含水比 (%)
	1回目	284	359	25.22
	2回目	258	309	24.76
σ_{net}=50 kPa	3回目	260	313	24.78
	4回目	240	262	24.85
	5回目	254	304	25.72
	1回目	346	446	26.00
	2回目	274	329	25.60
σ_{net}=100 kPa	3回目	268	322	24.81
	4回目	308	360	25.68
	5回目	235	275	25.24
	1回目	358	450	25.10
	2回目	317	402	25.05
σ_{net}=250 kPa	3回目	317	362	25.18
	4回目	334	438	24.95
	5回目	317	400	25.02



(a)　σ_{net}=50 kPa　(b)　σ_{net}=100 kPa　(c)　σ_{net}=250 kPa

(1)　s_u=5 kPa

(a)　σ_{net}=50 kPa　(b)　σ_{net}=100 kPa　(c)　σ_{net}=250 kPa

(2)　s_u=15 kPa

図-3　せん断中の応力経路

せん断強度を用いて破壊包絡線を描くことにより，5^3 通りの組み合わせで，合計 125 本の破壊包絡線が得られた．**図-4** に試験結果のプロットおよび破壊包絡線を示す．これらの破壊包絡線から算出したせん断強度パラメータの統計量を**表-2** に示す．なお，c が負の値を示すケースも見られたため，「第 3 四分位数+四分位範囲×1.5」以上と「第 1 四分位数-四分位範囲×1.5」以下のデータを外れ値として除外し，統

計量を算出した．不偏標準偏差に着目すると，ϕに比べて，c のばらつきが大きいことが確認された．次にサクションの違いに着目すると，s_u=5 kPa に比べて s_u=15 kPa の c の標本平均は増加した．一方，ϕの標本平均は減少したものの，その変化は比較的小さかった．また，不偏標準偏差は，c, ϕともに s_u=15 kPa の方が小さい値を示した．

4. せん断強度パラメータの不確実性を考慮した斜面の安定性評価

(1) 2 次元正規分布（同時確率密度関数）によるせん断強度パラメータのばらつきの可視化

3 章 2 節で得られたせん断強度パラメータの統計量を用いて，c, ϕのばらつきを 2 次元正規分布で表す．式(1)に見掛けの粘着成分 c と内部摩擦角ϕを確率変数とした 2 次元正規分布の確率密度関数（同時確率密度関数）を示す．

$$f(c,\phi)=\frac{1}{2\pi\sigma_c\sigma_\phi\sqrt{1-\rho^2}}\cdot exp\left[-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\cdot\left\{\left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c}\right)^2-2\rho\cdot\left(\frac{c-\mu_c}{\sigma_c}\right)\cdot\left(\frac{\phi-\mu_\phi}{\sigma_\phi}\right)+\left(\frac{\phi-\mu_\phi}{\sigma_\phi}\right)^2\right\}\right] \quad (1)$$

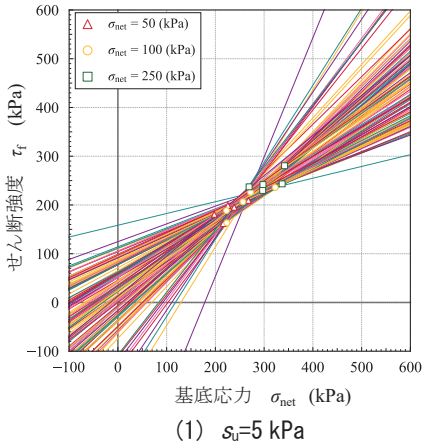
ここに，μ_c：見掛けの粘着成分の標本平均，σ_c：見掛けの粘着成分の不偏標準偏差，μ_ϕ：内部摩擦角の標本平均，σ_ϕ：内部摩擦角の不偏標準偏差，ρ：相関係数．

本研究では，2 次元正規分布に用いるデータとして，**表-2** の外れ値を除外したときの標本平均，不偏標準偏差および相関係数 ρ を用いた．**図-5** に試験結果から得られた c, ϕの 2 次元正規分布の平面図を，**図-6** に立体図をそれぞれ示す．図より，ϕの不偏標準偏差の値に対して，c の不偏標準偏差の値が大きいため，2 次元正規分布の概形が，c の方向に幅広く，ϕの方向に薄い分布となっていることが確認された．特に，c のばらつきが大きい s_u=5 kPa の条件において，その傾向が顕著であった．

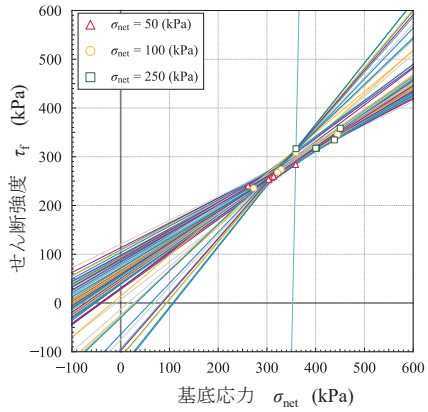
(2) 斜面崩壊確率の算出

a) 斜面崩壊確率の概要

本節では，せん断試験結果から得られた c, ϕの 2 次元正規分布に基づき，c とϕのばらつきを考慮した斜面崩壊確率 P_fの算出を行う．荒木，酒匂らが提案する崩壊確率とは，斜面の安全率 F_Sが 1 以下となる確率を表し，せん断強度パラメータの不確実性を考慮した斜面の安定性を確率論的に評価する手法である．計算手順としては，まず**図-5** に示す c, ϕの 2 次元正規分布の平面図において，c, ϕの各軸をそれぞれ $\mu_c\pm4\sigma_c$，$\mu_\phi\pm4\sigma_\phi$の範囲で 1,000 分割し，1,000,000 点の格子点を考える．作成した格子点 1 つ 1 つが c, ϕの値を持った組み合わせであるため，これらを式(2)に示す無限斜面法における体積力法の式に代入することで，1,000,000 通りの安全率を算出する．



(1) s_u=5 kPa



(2) s_u=15 kPa

図-4　試験結果のプロットおよび破壊包絡線

表-2　せん断強度パラメータの統計量

		標本平均 (kPa)	不偏標準偏差 (kPa)	相関係数 (-)
s_u=5 kPa	c	25.2	62.4	-0.99
s_u=15 kPa	c	64.7	21.4	-0.97
		標本平均 (°)	不偏標準偏差 (°)	相関係数 (-)
s_u=5 kPa	ϕ	34.5	8.6	-0.99
s_u=15 kPa	ϕ	32.4	2.5	-0.97

$$F_s=\frac{cl+\left(W-P_v\right)\cos\beta\tan\phi}{J+\left(W-P_v\right)\sin\beta} \quad (2)$$

ここに，c：試験結果から算出した見掛けの粘着成分，l：斜面長さ，W：スライス自重，β：斜面の傾斜角，ϕ：試験結果から算出した内部摩擦角，J：浸透力，P_v：浮力．

次に，得られた安全率の中から F_s=1 となる c, ϕの組み合わせ(c_f, ϕ_f)を求める．最後に，式(3)に示す c

とφの 2 次元正規分布に従う確率密度関数に対して，安全率が 1 以下となる領域を積分することで，崩壊確率 P_f を算出する．

$$P_f = \int_{-\infty}^{c_f} \int_{-\infty}^{\phi_f} f(c,\phi) \cdot d\phi \cdot dc \qquad (3)$$

ここに，c_f： F_s=1 のときの見掛けの粘着成分，
ϕ_f：F_s=1 のときの内部摩擦角．

図-7 に本解析で仮定した斜面モデルを示す．また，本試験では郡山シラスを用い，サクション条件を s_u=5，15 kPa（飽和度 S_r=60，30 %）としたことから，同様の飽和度条件で必要なパラメータを設定し，安定解析を実施した．さらに，浸透力 J および浮力 P_v は作用していないものとした．

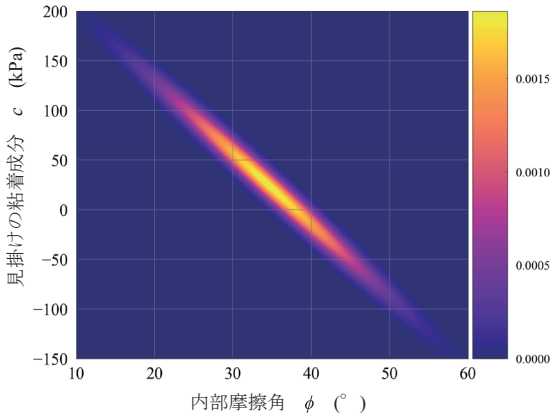
b)　斜面崩壊確率の算出結果と考察

図-8 に，c，φの 2 次元正規分布の平面図に安全率の等高線を重ねた結果を示す．なお，等高線上の数値は，各等高線に対応する安全率 F_s の値を表す．図より，両サクション条件において，安全率が負の値を示すケースや非常に高い安全率を示すケースが確認された．これは，c のばらつきにより，c が現実的ではない負の値や極端に大きな値も安全率の計算対象となっているためであると考えられる．また，安全率の分布は，φの影響は比較的小さく，主として c の変動により安全率が大きく変化する傾向が見られた．崩壊確率 P_f は，s_u=5 kPa において P_f=34.88 %，s_u=15 kPa において P_f=0.14 %となった．これより，サクションの増加に伴い崩壊確率は低下することが明らかとなった．これは，本試験条件においては，サクションの増加により土の強度が増加するためであると考えられる．

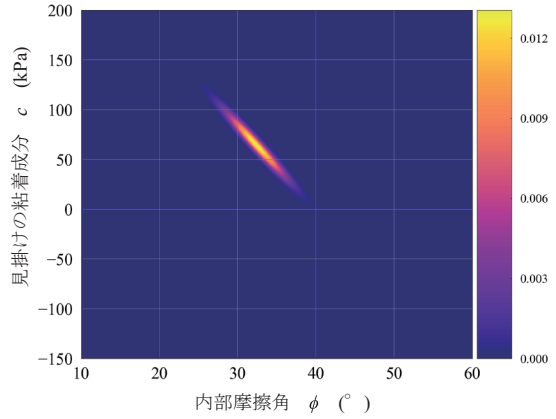
5. 見掛けの粘着成分のみのばらつきを考慮した崩壊確率の算出に関する検討

(1)　c の 1 次元正規分布を用いた崩壊確率の算出

これまでの崩壊確率の算出では，せん断強度パラメータ c，φ両方のばらつき考慮していた．しかし，**4 章 2 節 b 項**の結果より，内部摩擦角φのばらつきが崩壊確率に与える影響は，比較的小さい可能性が示唆された．そこで，本章ではφを標本平均値で固定し，見掛けの粘着成分 c のみのばらつきを考慮した c の 1 次元正規分布を用いた崩壊確率について検討する．なお，これ以降，c，φの 2 次元正規分布を用いて算出した崩壊確率を「基準崩壊確率 $P_{f,2D}$」，φを固定し c の 1 次元正規分布のみを用いて算出した崩壊確率を「簡易化崩壊確率 $P_{f,1D}$」と呼ぶ．

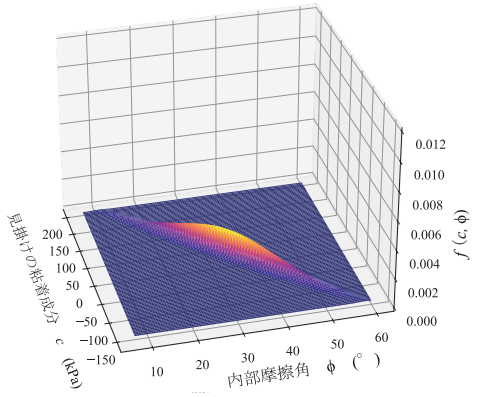


(1)　s_u=5 kPa

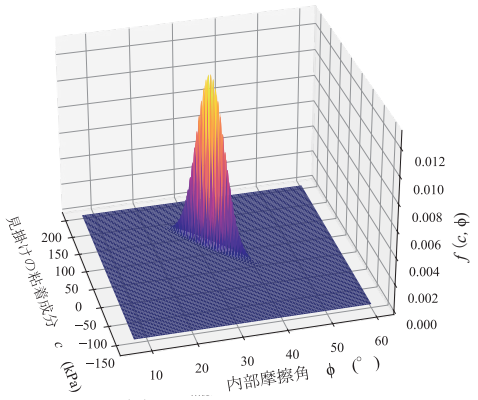


(2)　s_u=15 kPa

図-5　c，φの 2 次元正規分布の平面図



(1)　s_u=5 kPa



(2)　s_u=15 kPa

図-6　c，φの 2 次元正規分布の立体図

(2)　簡易化崩壊確率の算出結果と考察

簡易化崩壊確率を算出した結果，s_u=5 kPa において $P_{f,1D}$=35.10 %，s_u=15 kPa において $P_{f,1D}$=0.16 %となった．ここで，基準崩壊確率 $P_{f,2D}$ に対する簡易化崩壊確率 $P_{f,1D}$ の相対誤差を$|P_{f,1D}-P_{f,2D}|/P_{f,2D}$ により評価した．その結果，s_u=5 kPa において 0.62 %，s_u=15 kPa において 9.61 %となった．この結果より，本研究の条件においては，$P_{f,1D}$ と $P_{f,2D}$ の差は小さく，内部摩擦角ϕのばらつきが崩壊確率に与える影響は小さいことが確認された．したがって，内部摩擦角ϕを標本平均値で固定し，見掛けの粘着成分 c のみのばらつきを考慮した 1 次元正規分布を用いた場合でも，2 次元正規分布で算定した場合と大きな違いは見られないことがわかり，崩壊確率算出の簡易化ができる可能性があることが示された．

6. おわりに

本研究では，不飽和定体積一面せん断試験により得られたシラスのせん断強度パラメータを用いて，2 種類のサクション条件の斜面崩壊確率のサクション依存性について考察した．また，見掛けの粘着成分 c のみのばらつきを考慮した 1 次元正規分布を用いた崩壊確率の簡易算出手法について検討した．得られた知見を以下に示す．

(1)内部摩擦角ϕのばらつきに比べて，見掛けの粘着成分cのばらつきが大きいことが確認された．

(2)せん断強度パラメータのサクション依存性については，サクションの増加に伴い，cの標本平均は増加した．一方，ϕは減少したものの，その変化は比較的小さかった．ばらつき（不偏標準偏差）は，サクションの増加に伴い減少した．

(3)サクションの増加に伴い崩壊確率は低下することが確認された．

(4)ϕを固定し，c のみのばらつきを考慮した 1 次元正規分布を用いて崩壊確率を算出した場合でも，2 次元正規分布を用いた場合と同程度の結果が得られ，崩壊確率算出の簡易化ができる可能性があることが確認された．

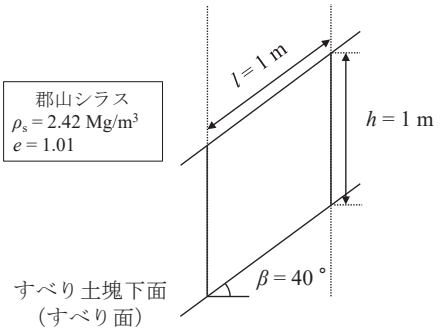
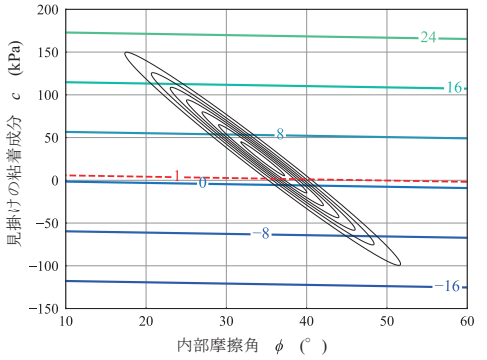
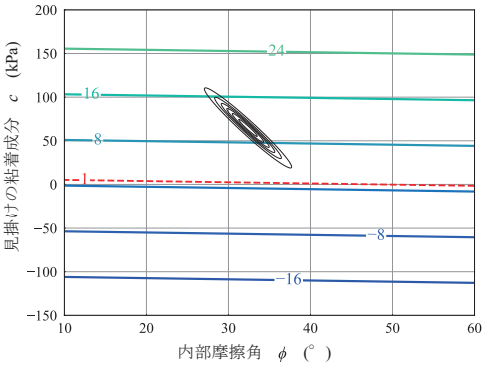


図-7　斜面モデル



(1)　s_u=5 kPa



(2)　s_u=15 kPa

図-8　c, Φの 2 次元正規分布の平面図に F_s の等高線を重ねた図

参考文献

1)　北村良介，酒匂一成，加藤俊二，水島俊基，今西肇：降雨時のしらす斜面の浸透・崩壊に関する室内土層試験，地盤工学ジャーナル，Vol.2，No.3，pp.149-168，2007.

2)　松尾稔，上野誠：斜面崩壊防止のための信頼性設計に関する研究，土木学会論文報告集，No.276，pp.77-87，1978.

3)　佐竹亮一郎，若井明彦：材料の不均質性が斜面の安定性に及ぼす影響に関する解析的検討，地盤工学ジャーナル，Vol.14，No.2，pp.95-109，2019.

4)　荒木功平，松尾和昌，北村良介，阿部廣史：降雨による斜面崩壊確率に関する一考察，第 37 回地盤工学研究発表会，pp.2177-2178，2002.

5)　酒匂一成，北村良介，荒木功平，島田龍郎，田中秀明，横山陽一：降雨による斜面の不安定化の定量的評価，平成 14 年度土砂災害に関するシンポジウム講演論文集，pp.13-16，2002.

6)　小城美咲，酒匂一成，田上聖人：不飽和定体積一面せん断試験結果のばらつきに関する一考察，令和 7 年度土木学会西部支部研究発表会，III-073，pp.377-378，2026.

7)　森山史也，酒匂一成，伊藤真一，小田柿晶紘：基底応力とサクションの制御過程の違いが不飽和せん断強度特性に与える影響について，令和 4 年度土木学会西部支部研究発表会，III-016，pp.289-290，2023.

（2026. 5. 29　受付）