

4. 土質力学**■** 2026年8月26日(水) 9:00 ~ 10:40 | **■** 第5会場(404教室)**[5-3] 土質力学③：ため池の材料特性とセンシング**

座長: 正田 大輔(農研機構農村工学研究部門)

9:00 ~ 9:15

[5-12] せん断による透水性変化と速度効果-花崗岩の強風化土の例-

*木村 匠¹、中村 真也¹ (1. 琉球大学農学部)

9:15 ~ 9:30

[5-13] 細粒分含有率と締固め度がまさ土の飽和三軸圧縮強度に与える影響

*太田 遥子¹、板倉 汰知²、端山 未夢¹、中田 幸男¹ (1. 山口大学大学院、2. (元) 山口大学大学院)

9:30 ~ 9:45

[5-14] 不飽和土のせん断強度を考慮したため池堤体の安定性評価

*小菅 達也¹ (1. NTCコンサルタンツ株式会社)

9:45 ~ 10:00

[5-15] 機械学習による粘着力 c 、内部摩擦角 φ の予測*佐藤 快成¹、豊原 大輔¹、下川 真徳¹、田中 藤一¹ (1. NTCコンサルタンツ (株))

10:00 ~ 10:15

[5-16] 微動アレイ探査の高度化を目指した拡張SPAC法とEnKFによるインバージョンシステムの構築

谷本 峻太¹、*西村 伸一²、柴田 俊文²、福元 豊² (1. (株) 大本組、2. 岡山大学)

10:15 ~ 10:30

[5-17] 宇宙線ミュオンを用いたトンネルの周辺地山の探査

*江村 隼青¹、柴田 俊文¹、西村 伸一¹、福元 豊¹ (1. 岡山大学大学院環境生命自然科学研究科)

10:30 ~ 10:40

セッション総括

せん断による透水性変化と速度効果-花崗岩の強風化土の例-

Shear-induced permeability changes and velocity effects: A case of highly weathered granite soil

○木村 匠*

中村 真也*

KIMURA Sho

NAKAMURA Shinya

1. はじめに

梅雨や台風による降雨を誘因として、花崗岩の風化物が分布する地域では斜面災害が多く発生している。地すべり等の斜面移動現象は、すべり面やすべり層の強度や透水性の特性が強く関与していると考えられる。斜面災害の防止と軽減のためには、すべり面やすべり層における特性を明らかにし、発生や移動形態の予測に繋げることが重要である。せん断による透水特性については、リングせん断試験によって実験的研究が進められており、これまでに試料の粒度特性や鉱物特性、せん断速度と垂直応力の試験条件によって特性が異なる結果が得られている（例えば、Zhang and Tullis、1998; Okada et al., 2004; Kimura et al., 2020; 木村・中村、2025）。本発表では、花崗岩が強風化して土砂化した地域で発生した斜面災害地より採取した試料について、透水性評価ができるリングせん断試験を行い、せん断変位と透水性の関係に対するせん断速度の効果を検討した。

2. 試料および試験方法

花崗岩の強風化土試料は、2017年九州北部豪雨災害地の滑落崖にて、すべり面に同等のものとして採取した。せん断による透水性変化は、透水リングせん断試験装置を用いた（木村ら、2024）。有効垂直応力 50 kN/m^2 と 100 kN/m^2 （背圧 200 kN/m^2 ）のそれぞれで正規圧密を行った後、定圧力下にて 2 mm/min および 100 mm/min で排水せん断を行った（一段階試験）。せん断時の流量は時間雨量約 100 mm となるように $3.5 \text{ cm}^3/\text{min}$ とし、せん断変位約 6000 mm まで連続的に透水性変化を測定した。

3. 試験結果

図1は、試料のリングせん断試験結果を示している。ここで、いずれの有効垂直応力下におけるせん断速度 2 mm/min の結果は、木村ら（2024）で得たものである。有効垂直応力 50 kN/m^2 におけるせん断速度 2 mm/min では、せん断による透水係数の低下は認められなかった。一方、せん断速度 100 mm/min 下では、せん断変位増加と共にわずかに透水係数の低下が継続していたが、顕著なせん断速度効果があるとは言えなかった。有効垂直応力 100 kN/m^2 下では、せん断速度 2 mm/min でせん断に伴う透水性低下が見られた。せん断による透水性変化はせん断変位 3000 mm 程度まで継続的に低下の様相を示したが、その後は低下が緩やかになった。最終的にせん断開始前の透水係数に比べて

*琉球大学農学部 (Faculty of Agriculture, University of the Ryukyus)

キーワード：透水性変化、速度効果、リングせん断、強風化土、花崗岩

約 1/100 となった。せん断速度 100mm/min 下において、せん断に伴う透水性低下の様相は 2mm/min の結果と類似していた。一方、せん断変位約 3000mm 以降の透水性低下は緩やかに継続しているように見える。せん断変位 6000mm においては、せん断前の透水係数と比べて約 1/100 より小さい値が得られた。なお、有効垂直応力 100 kN/m² 下のせん断速度 100mm/min の試験については、差圧の定格容量が 500kPa の差圧変換器を用いたため、初期のせん断変位 1000mm 程度までは計測限界に近くノイズが大きかった。そのため、移動平均値を算出して示したが、透水性の変化全体の挙動としては計測できているものとした。有効垂直応力の増加によって、せん断による透水特性に対するせん断速度の効果が見られたが顕著なものではない可能性が見出された。

謝辞：本研究の試料採取は、福岡県県土整備部砂防課のご支援をいただきました。本研究の一部は JSPS 科研費 23K23725、JKA2024M-577 の助成を受けたものです。

参考文献

- Zhang and Tullis (1998): Tectonophysics, 295 (1-2), 41-52.
- Okada et al. (2004): Engineering Geology, 75 (3-4), 325-343.
- Kimura et al. (2020): Tectonophysics, 789, 22851.
- 木村・中村 (2025): 第 64 回日本地すべり学会研究発表会講演集.
- 木村ら (2024): 日本地すべり学会誌、61 (6)、209-219.

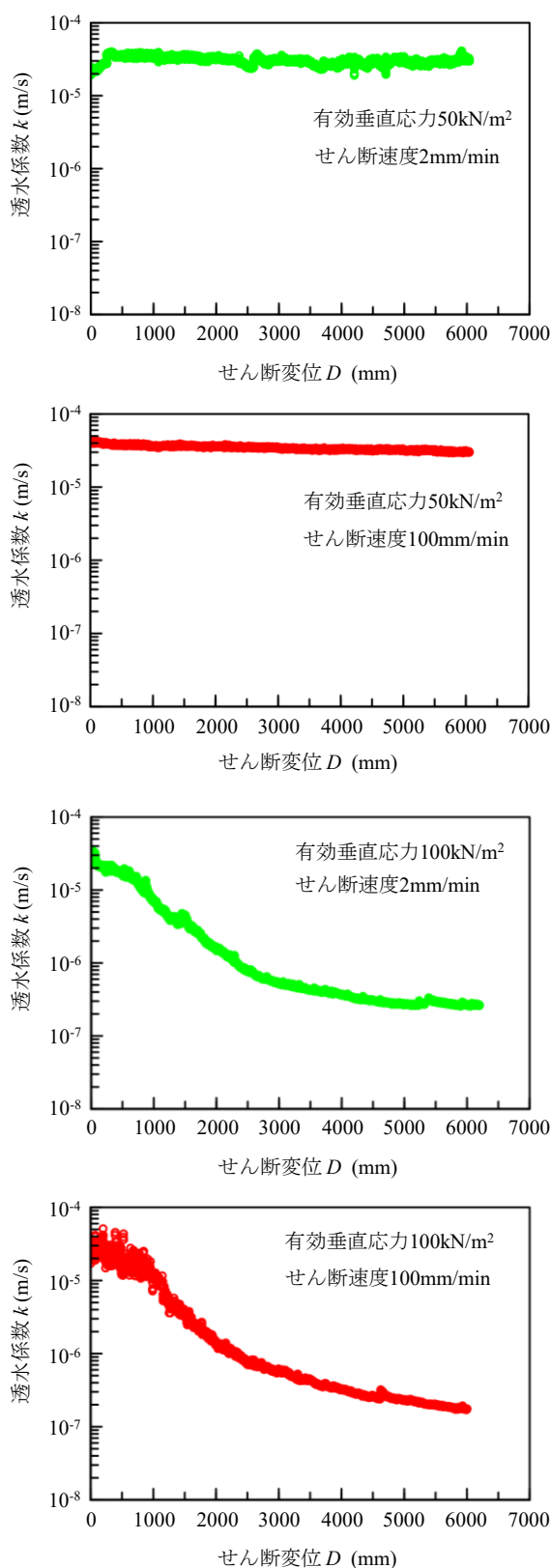


図 1 有効垂直応力 50kN/m² と 100kN/m² におけるせん断変位と透水係数

Fig. 1 Shear displacement and permeability at effective normal stresses of 50 kN/m² and 100 kN/m²

細粒分含有率と締固め度がまさ土の飽和三軸圧縮強度に与える影響 Effect of Fine Content and Degree of Compaction on the Saturated Triaxial Compressive Strength of Decomposed Granite Soil

○太田 遥子*

OHTA Yoko

板倉 汰知**

ITAKURA Taichi

端山 未夢*

HAYAMA Miyu

中田 幸男*

NAKATA Yukio

1. はじめに

近年、集中豪雨の増加に伴い、ため池堤体を含む老朽化盛土では、細粒分流出による粒度変化や密度低下に起因した崩壊リスクが懸念されている。本研究では、細粒分含有率と締固め度がまさ土の強度に与える影響を把握するために、三軸圧縮試験を実施した。試験結果から両者が飽和強度特性に及ぼす影響を評価するとともに、粒度や密度の状態変化を反映した強度定数の推定式を提案する。

2. 試験方法

表1に示す粒度および締固め条件で、直径50 mm、高さ100 mmの供試体を作製した。異なる粒度条件は、元粒度かつ $D_c=90\%$ を基準として、細粒分が流出した想定である。図1に粒度分布を示す。自立させるため、供試体は試験前に1日冷凍した。三軸圧縮試験は圧密非排水条件(CU)とした。拘束圧は50, 80, 150 kN/m^2 とし、せん断速度は0.05 mm/min、軸ひずみ15%に達するまでせん断を実施した。

3. 細粒分含有率と締固め度が飽和三軸強度に与える影響

図2に細粒分含有率と最大主応力差の関係を示す。細粒分含有率が低下するにつれ、最大主応力差が低下していることが分かる。特に拘束圧50 kN/m^2 時では、細粒分含有率が17.90%から15.91%に変化する間に、最大主応力差は68.0 kN/m^2 低下した。このことから、微小な細粒分含有率の変化であっても強度に与える影響は大きいと言える。締固め度についても同様に、締固め度が低下するにつれて最大主応力差は低下することが確認され、同じ粒度であっても、締固め度が変わることによって強度に影響を与えることがわかった。

表1 供試体の条件

Table1 Test conditions

(a) 粒度条件が異なるケース

粒度条件	F_c (%)	D_c (%)
元粒度	17.90	90.0
元粒度-1/8($\sim 32\mu\text{m}$)	15.91	88.2
元粒度-1/2($\sim 32\mu\text{m}$)	9.95	82.8
元粒度-1/2($\sim 75\mu\text{m}$)	8.95	81.9
元粒度-1/1($\sim 32\mu\text{m}$)	2.00	75.7
元粒度-1/1($\sim 75\mu\text{m}$)	0.00	73.9

※「元粒度-1/8($\sim 32\mu\text{m}$)」とは、元粒度の土から粒径 $32\mu\text{m}$ 以下の土を1/8除いたもの

(b) 締固め条件が異なるケース

締固め条件	粒度条件	F_c (%)
$D_c = 92\%$		
$D_c = 90\%$	元粒度	17.90
$D_c = 87\%$		

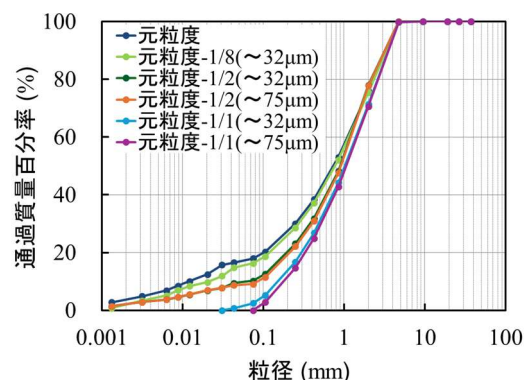


図1 粒度分布

Fig.1 Grain size distribution

* 山口大学大学院 (Graduate School of Yamaguchi University)

** (元) 山口大学大学院 (Former Graduate School of Yamaguchi University)

土の静力学的性質、締固め、粒度

まさ土の強度推定を行うため、本研究では内部摩擦角 ϕ_{cu} と粘着力 c_{cu} について以下の式 (1) (2) を提案した。提案式では、細粒分含有率 F_c と締固め度 D_c の2つの変数があり、各要因の影響をそれぞれ分離して評価した。

$$\phi_{cu} = f_{\phi}(F_c) + g_{\phi}(D_c) \quad (1)$$

$$c_{cu} = f_c(F_c) + g_c(D_c) \quad (2)$$

また、試験結果をもとに関数を設定したものを式 (3) (4) に示す。

$$\phi_{cu} = 0.193F_c + 19.38 + 0.07(D_c - 90) \quad (3)$$

$$c_{cu} = 11.264F_c - 155.23 + 9.28(D_c - 90) \quad (4)$$

一例として、粘着力の関数のうち $g_c(D_c)$ 項の決定方法について以下に示す。図 3 から、粘着力 c_{cu} は締固め度 D_c の増加に伴い、傾き 9.28 で増加することが分かる。式 (4) では、 $D_c=90\%$ の粘着力を基準とし、締固め度の差分と傾き 9.28 を乗じたものを加算することで、締固め度による粘着力の変化を考慮できるようにした。なお、本研究では先行研究¹⁾の結果をもとに $D_c \leq 85\%$ で $c_{cu}=0 \text{ kN/m}^2$ としている。

提案式から求めた強度定数を用いて、クーロンの破壊基準をもとに飽和強度を求めた。計算値と試験値との比較を図 4(a) (b) に示す。計算値と試験値は概ね一致しており、提案式により、細粒分含有率と締固め度を考慮した飽和強度を推定できることが示された。

4. 結論

本研究では、細粒分含有率と締固め度がまさ土の飽和強度に与える影響を検討するため、三軸圧縮試験を実施した。試験結果から、細粒分の流出に伴う粒度変化と密度低下が、まさ土の非排水強度に強く影響を与えることが確認できた。また、内部摩擦角および粘着力について、細粒分含有率と締固め度の関数からなる推定式を提案した。提案式により、細粒分含有率と締固め度を考慮した飽和強度を推定できることが明らかとなった。

参考文献：1) 板倉ら，締固め度がまさ土の不飽和強度特性に与える影響，第 77 回土木学会中国支部研究発表会，pp. 204-205，2025。

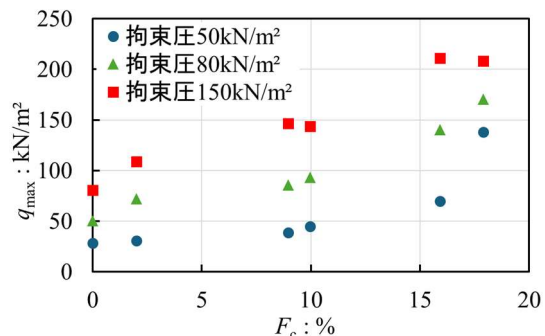


図 2 細粒分含有率と最大主応力差
Fig.2 Relationship between F_c and q_{max}

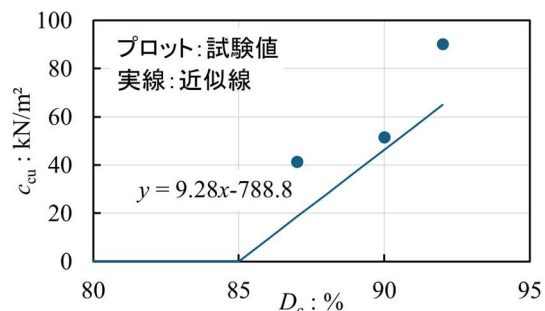
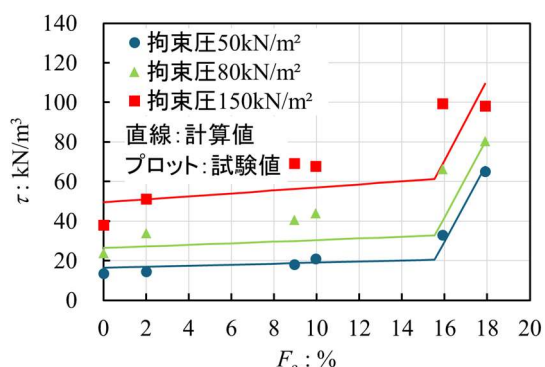
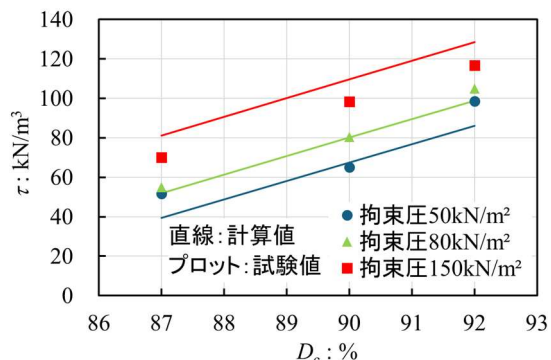


図 3 締固め度と粘着力の関係
Fig.3 Relationship between D_c and c_{cu}



(a) 粒度条件が異なるケース



(b) 締固め条件が異なるケース

図 4 計算値と試験値の比較
Fig.4 Comparison of calculated and measured values

不飽和土のせん断強度を考慮したため池堤体の安定性評価 Stability Assessment of Reservoir Embankments Considering Shear Strength of Unsaturated Soil

○小菅 達也*

KOSUGE Tatsuya

1. はじめに

ため池やフィルダムの改修設計において、堤体の滑り安定計算は重要な設計項目の一つである。従来の設計実務では、堤体全域のせん断強度を飽和状態の強度(三軸圧縮試験等)に基づいて一律に設定することが一般的である。しかし、実際の堤体内には広範囲に不飽和領域が存在しており、特に下流側斜面においてはサクション効果による強度増加が期待できる。本稿では、不飽和土のせん断強度が堤体の安全率に及ぼす影響を、均一型堤体の単純モデルを用いた試算により検証した。

2. 不飽和土のサクション効果

2.1 土の不飽和形態

土の不飽和形態は、不飽和土の保水特性、毛管張力、サクションに着目すると 3 つの形態に分類される。A. 懸垂水不飽和状態: 間隙水が土粒子接触点周辺にメニスカスを形成し保持される状態、B. 過渡的不飽和状態: メニスカス拡大により間隙水が連続相を形成する状態、C. 封入不飽和状態: 間隙空気が気泡として間隙水中に封入される状態がある。

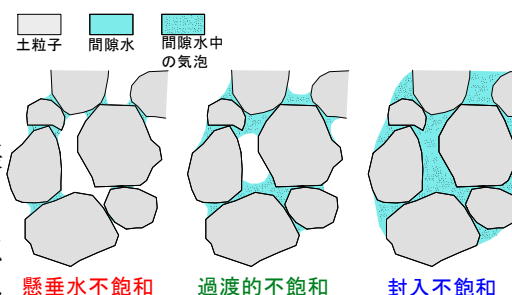


図1 土の不飽和形態の模式図

2.2 サクション効果がせん断強度に与える影響

不飽和土(懸垂水、過渡的不飽和状態)の力学挙動は、毛管張力に支配的な影響を受ける。土粒子接触点近傍に形成されるメニスカスより発生したサク

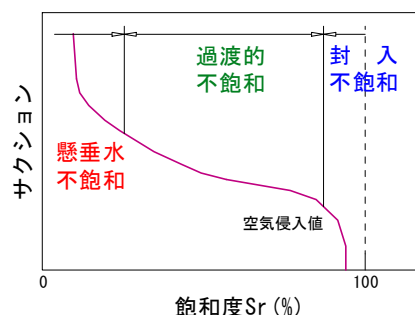


図2 保水特性曲線と不飽和形態

ション(負圧)は、土粒子を相互に引き寄せる内部拘束力として作用する。この効果により土粒子間の有効応力が増加し、せん断強度が向上する。工学的に、この強度増加は「見かけの粘着力の増大」として解釈され、堤体の安定性評価における重要な要素となる。

3. 不飽和土のせん断強度を用いた堤体の安定計算

3.1 飽和土・不飽和土のせん断強度

飽和部には式(1)に示すモール・クーロンの破壊規準を、不飽和部には、式(2)に示すFredlundら(1978)により提案された拡張モール・クーロンの破壊規準¹⁾を適用した。

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_w) \tan \phi' \quad \cdots \cdots (1) \quad \tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 τ_f は破壊時のせん断強度、 c' は粘着力、 σ_n は全応力、 u_a は間隙空気圧、 u_w は間隙水圧、 ϕ' は内部摩擦角、 ϕ^b はサクションによる強度増加パラメータである。

*NTC コンサルタンツ株式会社, NTC CONSULTANTS Co., Ltd. キーワード: 土の静力学的性質 斜面安定

3.2 安定計算条件

せん断強度は、飽和部には式(1)を、不飽和部には式(2)を適用した。不飽和部におけるサクシジョンによる強度増加パラメータ φ^b は、低塑性粘土の最低値相当(10°)とし、サクシジョン値を 10, 50, 100kPa の3段階を仮定した。安定計算モデルは均一型堤体とし、堤高は 5, 10, 15m とした。なお、設計水平震度 kh は 0.15 とした。

表 1 安定解析パラメーター一覧表

単位体積 重 量	飽和部 せん断強度		不飽和部 せん断強度		
	飽和 ρ_{sat}	粘着力 c'	内 部 摩擦角 φ'	強度増加 パラメータ φ^b	見かけの 粘着力 $(u_a - u_w) \tan \varphi^b$
湿潤 ρ_t					
18.0 kN/m ³	20.0 kN/m ³	10.0 kN/m ²	30.0°	10.0°	10kPa 1.7kN/m ²
					50kPa 8.8kN/m ²
					100kPa 17.6kN/m ²
低塑性粘土の一般値.			低塑性粘土最低値相当		

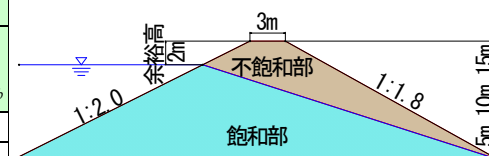


図 3 安定計算モデル図

3.3 安定計算結果

サクシジョン値を 0kPa から 100kPa へ変化させた結果、全ての計算結果で安全率が上昇した。特に堤高の低い堤高 5m では、上流斜面で 0.32, 下流斜面で 0.40 程度、最小安全率が上昇し、低堤高条件ほどサクシジョン効果の影響が顕著であった。また、堤高 10m では最小安全率が設計上の閾値である 1.2 を挟んで上昇することが確認された。従来の飽和土のせん断強度を前提とした安定解析手法では不飽和土のせん断強度を過小評価し、過大な堤体設計を招く可能性がある。

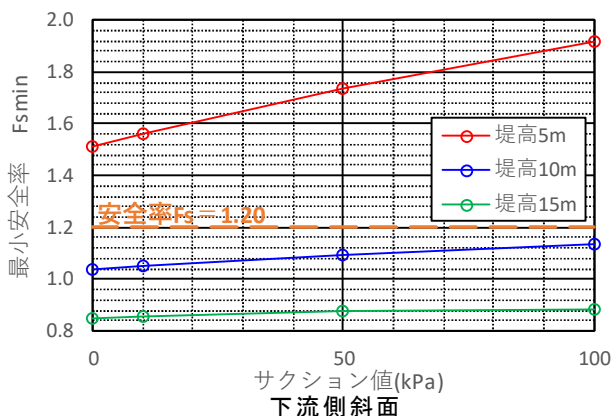
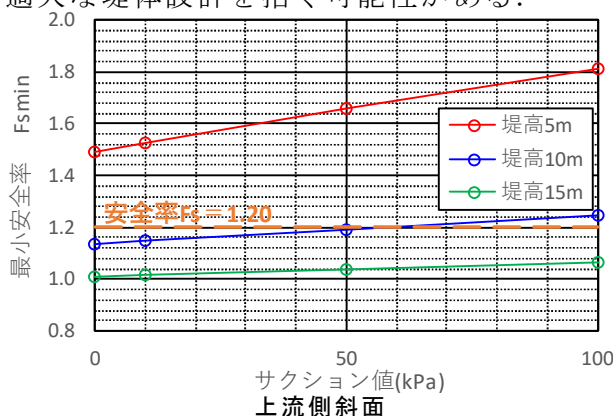


図 4 サクシジョン値と最小安全率 Fsmín の関係

4. 不飽和土のせん断強度を考慮した堤体安定性評価の有効性と展望

不飽和土のせん断強度を考慮した安定計算は、従来の飽和土のみの計算と顕著な差異を示した。堤体の安定性評価では、不飽和土のせん断強度特性を考慮することが重要である。実務適用には不飽和領域のサクシジョン値の適切な設定と浸透流解析との連成解析が必要となる。将来的には不飽和強度特性のデータベース構築も課題である。

従来手法は安全側設計として確立されているが、不飽和土のせん断強度を考慮することにより合理的な設計が可能となる。不飽和領域が広く分布する防災調節池等の設計実務への展開が望ましい。

参考文献

- 1) Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978): The shear strength of unsaturated soils, Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, No. 3, pp.313-321

機械学習による粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ の予測

Examination of Predicting Cohesion and Angle of Shear Resistance By Using Machine Learning

○佐藤 快成*
SATO Kaisei

豊原 大輔*
TOYOHARA Daisuke

下川 真徳*
SHIMOKAWA Masanori

田中 藤一*
TANAKA Hisaichi

1. はじめに

近年, 頻発化・激甚化する地震等の災害に適切に対応するため, 防災重点農業用ため池の耐震性能評価が全国的に推進されている。耐震性能評価では, 当該ため池堤体や基礎地盤の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ を把握する必要がある。しかし実務上は, 経済的・時間的制約等により三軸圧縮試験の実施が困難な場合が多い実情がある。その場合, N 値等から推定式を用いて当該数値を設定し, 耐震性の評価を行う。

このような背景を踏まえ, 従来法の代替として機械学習による粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ の予測モデルの構築の可能性を検討する。本研究では, 全国的にため池の多い広島県, 山口県のため池から得られた土質データ群から同地域内のため池における精度と実用性について検討を行った。

2. 機械学習の学習方法と検証方法

本研究では, 堤体盛土から採取した計 77 試料 (礫質土および砂質土: 54 試料, 粘性土: 23 試料) を用いた。このうち, 73 試料を教師データ, 4 試料 (砂質土: 2 試料, 粘性土: 2 試料) を検証用データ (表 1) とした。モデルの入力値は, 耐震性能評価の実務上, 調査項目として多く採用される「 N 値」と「粒度分布」(礫分, 砂分, シルト分, 粘土分の百分率) を設定した。またモデルは, 計 3 ケース (N 値のみ, 粒度分布のみ, 組合せ) として, 入力値による精度の違いを検証した。さらに予測は, 各 10 回の試行を行い変動性を確認した。モデルの学習アルゴリズムは, 多層パーセプトロンモデルを採用した。モデルの性能評価は, 平均予測率 (Average Prediction Rate: 以下, APR), 変動係数 (Coefficient of Variation: 以下, CV) により行った。APR は, 1 に近いほど予測精度が高く, CV は 0 に近いほど予測値のばらつきが小さいと評価できる。

表 1 検証用データ
Table1 Verification data

試料名	N 値	粒度分布 (%)				粘着力 c (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)
		礫分	砂分	シルト分	粘土分		
A 池 (砂質土)	9	9.7	51.8	22.1	16.4	2.0	38.0
B 池 (砂質土)	4	20.2	50.1	20.3	9.4	9.4	33.0
C 池 (粘性土)	9	10.3	12.8	45.9	31.0	12.6	34.0
D 池 (粘性土)	12	29.5	16.5	26.9	27.1	16.7	31.0

3. 予測モデルの結果, 考察

予測モデルによる結果を表 2 に示す。APR は, 粘着力 c の場合, 0.58~6.43 とばらつきがみられたが, 内部摩擦角 ϕ の場合, 1.00 ± 0.15 程度の範囲に分布した。また CV は, 粘着力 c より内部摩擦角 ϕ の方がばらつきが小さく安定性が高い傾向を示した。予測値は, ケースによらず一定の値に収束する傾向を示し, 砂質土と粘性土で同程度の値となった。これは, 教師データを土質区分ごとに分類せずに学習させたことに起因すると考えられ, 土質区分ごとにモデルの構築が必要であると考ええる。

*NTCコンサルティング(株) NTC Consultants Inc. キーワード: 機械学習, 粘着力, 内部摩擦角

表 2 予測モデルによる予測結果
Table 2 Prediction results by using neural network model

試料名	ケース	粘着力 c			内部摩擦角 ϕ		
		予測値	APR	CV	予測値	APR	CV
A 池 (砂質土)	N 値	11.4	5.72	0.053	32.6	0.86	0.001
	粒度分布	10.8	5.41	0.098	33.1	0.87	0.021
	N 値+粒度分布	12.9	6.43	0.189	33.0	0.87	0.040
B 池 (砂質土)	N 値	10.5	1.12	0.038	32.3	0.98	0.005
	粒度分布	10.5	1.12	0.128	33.9	1.03	0.027
	N 値+粒度分布	10.6	1.13	0.173	33.4	1.01	0.027
C 池 (粘性土)	N 値	11.4	0.91	0.053	32.6	0.96	0.001
	粒度分布	11.2	0.89	0.412	27.3	0.80	0.057
	N 値+粒度分布	11.6	0.92	0.404	30.5	0.90	0.049
D 池 (粘性土)	N 値	11.7	0.70	0.118	32.8	1.06	0.005
	粒度分布	9.7	0.58	0.314	29.3	0.95	0.069
	N 値+粒度分布	11.3	0.68	0.265	33.3	1.08	0.056

4. 礫質土および砂質土データモデルの結果, 考察

土質区分が混在したモデルによる予測が困難であると考えられることから, 礫質土および砂質土のみを教師データとしたモデルで予測を行った(表 3). APR は, 粘着力 c の場合, 0.70~5.22(混在モデル時: 1.12~6.43), 内部摩擦角 ϕ の場合, 0.88~1.04(混在モデル時: 0.86~1.03)の範囲に分布した. CV は, 混在モデルと比較し増加傾向を示した. 混在したモデルと比較し, 教師データ数の減少から予測の安定性は減少しているが, 予測精度は向上する傾向がみられた. このことから, 教師データを土質区分ごとに分類してモデルを構築することが予測性能の向上に有効であると判断された.

表 3 礫質土および砂質土データモデルによる予測結果
Table 3 Prediction results by gravelly soil and sandy soil data model

試料名	ケース	粘着力 c			内部摩擦角 ϕ		
		予測値	APR	CV	予測値	APR	CV
A 池 (砂質土)	N 値	10.3	5.15	0.095	35.2	0.93	0.027
	粒度分布	8.5	4.27	0.083	34.1	0.90	0.037
	N 値+粒度分布	10.4	5.22	0.391	33.3	0.88	0.028
B 池 (砂質土)	N 値	7.8	0.83	0.131	30.2	0.92	0.018
	粒度分布	6.6	0.70	0.158	34.3	1.04	0.025
	N 値+粒度分布	8.4	0.89	0.385	33.6	1.02	0.063

5. 従来の推定手法との比較

従来手法による内部摩擦角 ϕ の推定は, N 値が用いられることが多い. そこで, 予測値(ケース:N 値)と従来手

表 4 従来手法との比較結果
Table 4 Neural network model results and conventional methods

試料名	内部摩擦角 ϕ			
	実測値	予測値	従来手法	
			大崎	Peck
A 池	38.0	35.2(差-2.8)	28.4(差-9.6)	29.7(差-8.3)
B 池	33.0	30.2(差-2.8)	23.9(差-9.1)	28.2(差-4.8)

法(大崎, Peck)による推定値との比較を表 4 に示す. 予測値は, 従来手法による推定値よりも実測値に近い傾向を示した. これは, 同一地区の土質データを教師データとしたことにより, 地域特性を反映したためと考えられる.

6. おわりに

本研究では, 機械学習を活用したため池の粘着力 c, 内部摩擦角 ϕ の予測モデルを構築した. モデルの予測精度は, 入力値の違い(N 値, 粒度分布)による影響は小さいことが確認された. また, 教師データを土質区分毎に分類してモデルを作成することが予測精度の向上につながると推察した. 従来手法との比較から, 本手法の予測値は, 当該地域において従来手法よりも地域特性を反映した予測を実現できる可能性が示された.

【参考文献】

- 1) 金山素平, 山下裕貴, 東孝寛, 大坪政実 (2009): 実測値に基づいた圧密沈下予測手法の検討 —ニューラルネットワークを利用した沈下予測—農業農村工学会論文集, 第 259 号, 61-69.

微動アレイ探査の高度化を目指した拡張 SPAC 法と EnKF によるインバージョンシステムの構築

Development of an Inversion System Using Extended SPAC Method and EnKF for Advanced Microtremor Array Exploration

谷本峻太*, ○西村伸一**, 柴田俊文**, 福元 豊**

Ryota Tanimoto, ○Shin-ichi NISHIMURA, Toshifumi SHIBATA and Yutaka Fukumoto

1.はじめに

大規模地震への懸念から、構造物の基礎設計や液状化判定に必要となる S 波速度構造の正確な把握が不可欠である。微動アレイ探査(MAS)は広範囲の探査に有効だが、従来の逆解析では解の非一性や局所解への陥りやすさが課題であった。本研究では、多次元解析やインバージョンにおける不確定性評価を可能とするために、拡張 SPAC 法(ESPAC)¹⁾によるデータ処理からアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)による確率論的逆解析までを一貫して行う自動解析システムを構築する。ここでは、第一段階として一次元解析に限るが、分散曲線の実測値から地層構造を明らかにする。

2. 解析手法

従来、微動アレイ探査では観測データからデータ解析を行うことで分散曲線を取り出し、その後逆解析を行うことで地盤構造を推定することができる。本研究では、この一連のプロセスについて Python を用いて自動化・高度化するシステムを構築した。まず、主観的評価を排除し、ノイズの影響を抑えるため、データ解析に用いる拡張 SPAC 法に「連続性制約」と「多項式近似」を導入した。次に、逆解析には強い非線形問題に有効なアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を採用した。順解析には、高周波数域での桁落ちを防ぐ Dunkin 法に基づく計算ライブラリ(disba)を組み込み、膨大な反復計算に対する高速化と安定化を図った。さらに、初期値への依存や局所解への収束を防ぐため、物理的にあり得ない不の弾性係数を排除するクリッピング処理(安全装置)や、反復後半で指数関数的に減衰させる摂動観測制御を逆解析に実装した。本システムを岡山県 K 池にて取得した実データに適用し、表層付近の不均質性を捉えるため、深度 20m の 20 層モデル(各層厚 1m)に分割したモデルを用いて解析を行い、有効性を検証した。

3. 解析結果

拡張 SPAC 法に安定化処理を適用した結果、ノイズによる局所的な変動が効果的に抑制され、物理的に妥当かつ客観的な分散曲線を抽

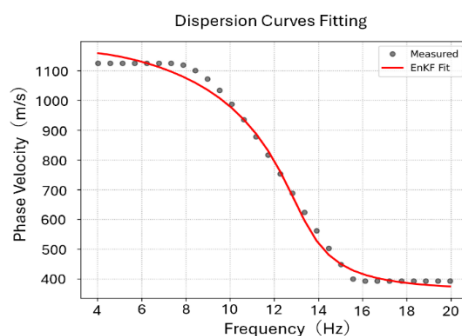


図-1 分散曲線の観測値と推定値の比較
Comparison of measured predicted
dispersion curves

* (株) 大本組, Ohmoto CO. LTD. **岡山大学, Okayama University,
キーワード: 微動アレイ, アンサンブルカルマンフィルタ, 拡張 SPAC 法

出した．EnKF による逆解析では，1m という薄層モデル(全 20 層)であっても計算が破綻することなく安定して推移し，初期値に依存せずパラメータが収束した．最終的な推定モデルから得られた理論分散曲線は，実測値と全周波数帯域において極めて高い精度で一致している（図-1）．

推定された深度 20m までの地盤構造をヤング率として図-2 に示している．これによると，深度 5m 付近で若干硬質な地盤が検出されており，12m 以深が基盤層と考えられる．図-3 には，現地で実施したスクリーウェイトサウンディング (SWS) 試験とミニラムサウンディング試験 (MRS) から推定した N 値分布 (N_{SWS} および N_d) を示している．MRS 試験では，薄層の剛性変化を捉えることが可能である．なお，どちらの試験も，10m 以深では，貫入不能となっており基盤層が検出されている．図-2 と図-3 の結果を比較したところ， N_d で見られた深度 1m および 9m 付近の硬質層に対し，MAS では深度 4m および 10m 付近でヤング率の顕著な上昇が確認された．浅部の硬質層において数 m の深度のズレ(オフセット)は生じたものの，浅部に硬い層が挟在する点や支持層の出現深度といった，地盤の全体的な剛性変化の傾向は一致している．

EnKF による構造推定において浅部の硬質層に数 m のズレが生じた要因として，第一に，MRS 試験が点推定値であるのに対して，MAS による推定値が面平均値であるという空間分解能の違いが挙げられる．第二に，表面波の波長特性による平滑化効果が働き，厚さ 1m 程度の薄い層が分離できず，少し深い深度まで平滑化されて解釈されたための推察される．しかし，推定されたヤング率プロファイルは実測 N 値の分布傾向と物理的に強く相関している．特に，基礎設計で重要となる深度 10m 付近の支持層の剛性の急な変化が明瞭にとらえられている．

4. 結論

本研究では，拡張 SPAC 法によるデータ処理と EnKF による確率論的逆解析を統合したインバージョンシステムを構築した．独自の安定化アルゴリズムと計算破綻を防ぐ安全装置の実装により，安定した解析を実現した．現地試験による検証の結果，本システムはサウンディング試験の N 値分布と剛性変化の傾向が整合しており，工学的に妥当な地盤モデルを推定可能であることが確認された．

参考文献 1) 凌魁群，岡田広 (1993): 微動探査法における空間自己相関法の拡張，物理探査学会第 89 回学術講演会論文集，pp. 44-48.

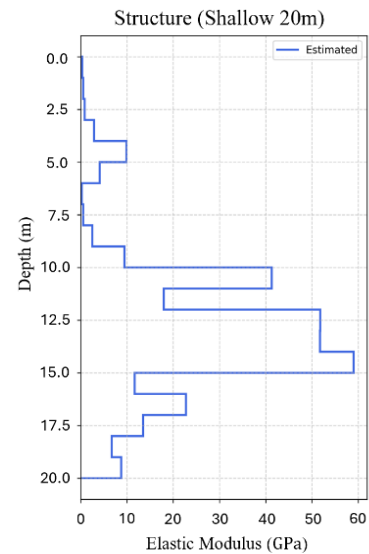


図-2 MAS により推定された地盤構造
Predicted soil layers by MAS

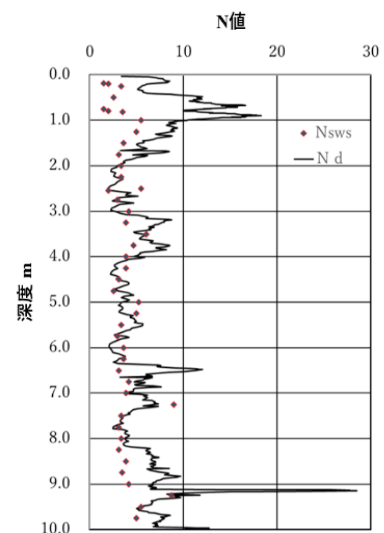


図-3 SWS と MRS 試験の結果
Results of SWS and MRS tests

宇宙線ミュオンを用いたトンネルの周辺地山の探査 Investigation of surrounding rock mass of a tunnel using cosmic-ray muons

○江村 隼青*

柴田 俊文*

西村 伸一*

福元 豊*

EMURA Hayase

SHIBATA Toshifumi

NISHIMURA Shin-ichi

FUKUMOTO Yutaka

1. 背景と目的

大規模地震の危険性は広く知られており、トンネルの大規模地震に対する対策が急務である。地震によるトンネルの被害は地質不良区画で発生する割合が大きいため、トンネルの周辺地山の状態を把握することが重要となっている。これらを調査する方法として地中レーダ探査や弾性波探査などがあるが、これらの探査手法は探査深度と解像度の両者を満たすことに課題がある。宇宙線ミュオンは透過能力が高く、深い地点でも探査を行うことができる手法で、検出器を適切に設定することで高い解像度の探査が可能であるとされている。本論文では、トンネル地山の地質不良区間の密度を探査することを目的に、宇宙線ミュオンを用いた探査手法の適用性を検討する。

2. 測定

ミュオンの検出器は半径 200mm のものを 2 部用意し、2m の間隔に固定して計測を行う。重力式コンクリートダムの左岸リムトンネル内に検出器を設置して、天頂角を 0° としたものを 10m ごとに位置を変化させながら宇宙線ミュオンを測定し、実際の密度の値と比較することで精度を検討した。Fig.1 にダム左岸の断面図およびミュオン測定を行った位置を示す。なお図中の地点 2 では天頂角を 30° 、 45° および 60° に変化させて測定を行った。また、計測器の位置と角度、そして測定した宇宙線ミュオンのデータを用い、Lasso 回帰を考慮した逆解析手法により、地山の密度分布の推定を行った。

本研究では三宅の式¹⁾を用いて密度を算出した。式(1)に三宅の式を示す。

$$I_\mu(h, \theta) = \frac{A}{h+H} (h \sec \theta + \alpha)^{-a} \exp(-\beta \sec \theta) \quad (1)$$

ここで $I_\mu(h, \theta)$ はフラックス ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)、 $A=174$ 、 $H=400$ 、 $a=11$ 、 $\alpha=1.53$ 、 $\beta=8.0 \times 10^{-4}$ は

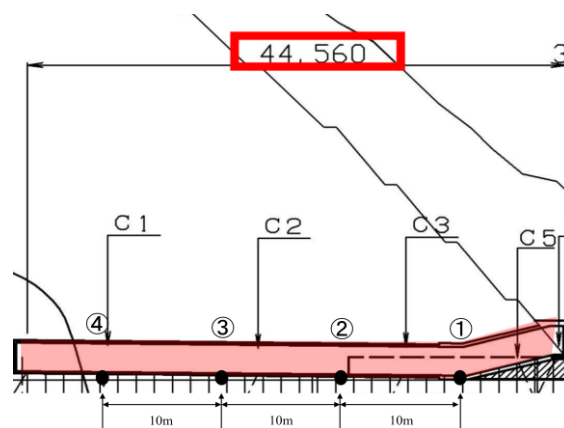


Fig.1 トンネル断面図とミュオン測定位置

Cross-sectional view of tunnel and muon measurement locations

*岡山大学大学院環境生命自然科学研究科(Graduate School of Environmental Life, Natural Science and Technology, Okayama University)

キーワード：ミュオン Lasso 回帰 密度

パラメータである．また， h は面密度（土被り厚と密度の積）で θ は天頂角を表す．

3. 実験結果

Table 1 に三宅の式を用いて算出した 4 地点でのフラックスおよび算出密度で約 2.4 g/cm^3 となった．また，ボーリング調査で得た密度 (Table 2) は約 3.0 g/cm^3 であったことから，算出した密度は実際の密度より 0.6 g/cm^3 程度低く評価されていることがわかる．原因として，ミュオンで算出した密度は地山の岩石だけでなく水が溜まっている亀裂部や空隙をすべて含めた密度となっていると考えられることから，実際の密度より小さい値となっていると考えられる．計測数が増えれば他より少ない地点①は除いて，土被り量が増加すると算出密度の値が若干減少しており，面密度が大きければ地山の岩石部以外の亀裂等が増加し，ミュオン測定数に影響を与えていると考えられることができる．

また，Fig.2 に Lasso 回帰を用いた逆解析の結果を示す．測線が重なっている部分では密度の変化を確認することができたが，重複していない部分では，密度が一様に表示されていることがわかる．本研究では測定地点や角度の数が十分ではなく，重なっている地点が非常に少なくなっていることから，密度の分布を把握するには，計測地点や計測する角度を増加させること必要であることが確認できる．

4. 結論

本研究では実際の地山で観測実験を行い，その結果からシミュレーションで内部状況の把握をすることを検討した．その結果，観測実験のデータは実際の現地調査と近い値をとっていたことからミュオンによる密度探査は可能であることが分かった．しかし，Lasso を用いたデータ処理を行う上では，より多数の地点・角度で計測を行う必要があり，大規模な地山を対象とする場合，探査条件の検討を行う必要がある．

参考文献

- 1) 三宅三郎，地下深部における宇宙線研究，日本物理学会誌，第 34 巻，第 4 号，pp.292-301，1979．

Table 1 測定数から算出した密度

Density derived from count data

地点	天頂角 (deg)	算出密度 (g/cm^3)
①	0	2.33
②	0	2.48
	30	2.47
	45	2.56
③	0	2.35
④	0	2.24

Table 2 ボーリング調査で得た密度

Density in borehole testing

深度(m)	岩種	乾燥 密度 (g/cm^3)
46.05～ 46.25	黒色 片岩	2.947
46.75～ 46.95		2.912
50.80～ 51.00		3.013
54.60～ 54.80		2.807

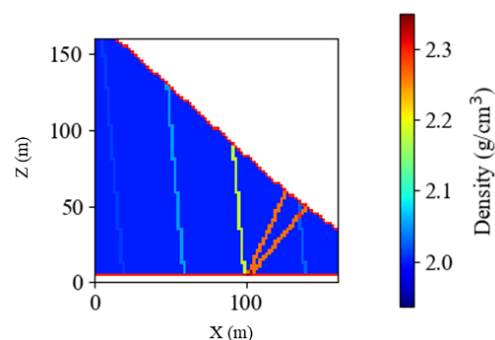


Fig.2 逆解析の結果
Result of inverse analysis