

歴史的建造物後背斜面の安定性評価のための 強度定数に関する基礎的研究

A study of shear strength parameters for stability estimation
of a slope behind a cultural asset

深川良一¹・酒匂一成²・浅田信仁³・安川郁夫⁴

Ryoichi Fukagawa, Kazunari Sako, Nobuhito Asada and Ikuo Yasukawa

仲矢順子⁵・石田優子⁵・里見知昭⁶・関目季亮⁶

Junko Nakaya, Yuko Ishida, Tomoaki Satomi and Sueaki Sekime

¹立命館大学 都市システム工学科 教授 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Dept. of Civil Engineering, Ritsumeikan University

²立命館大学 COE推進機構 ポスドクトラルフェロー (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Postdoctoral Fellow, COE Promotion Program, Ritsumeikan University

³ケミカルグラウト株式会社 (〒105-0001 東京都港区虎ノ門2-2-5 共同通信会館)

CHEMICAL GROUTING CO.LTD

⁴立命館大学 COE推進機構 特別研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Fellow, COE Promotion Program, Ritsumeikan University

⁵立命館大学 COE推進機構 客員研究員 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Guest Researcher, COE Promotion Program, Ritsumeikan University

⁶立命館大学大学院 理工学研究科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

In Kyoto city, many cultural assets are located near the steep slopes, so preserving these cultural assets from slope disaster due to rainfall is very important. However, mechanism of slope failure is not clearly understood since we need to know the shear strength properties of soil in a slope behind a cultural asset. Therefore, a soil specimen is conducted to model the local soil conditions in the slope, and then a direct shear test is performed. In this paper, the results of direct shear test are presented, and the stability estimation of the slope using an inverse analysis by the shear test's results is discussed. Moreover, the measures against a field measurement are performed through this paper.

Key Words : *Steep slope failure, shear strength parameter, degree of saturation, ground water, cultural assets*

1. はじめに

歴史都市「京都」は、盆地をなす平野の周辺は断層活動で造られた山地で囲まれ、豊富な地下水が湧出することと見晴らしがよいことなどの立地から山麓に多くの文化遺産である歴史的建造物が建設されている。そのため、重要な文化遺産の背後地が急傾斜地をなすことが多い。

斜面の崩壊は、「地すべり」と急傾斜地などの「表層崩壊」に分類される。地すべりは、地質や地形的な要因に支配されることが多く、また、崩壊の速度がゆっくりであったり、前兆的な兆候が観測されたりするなど、予測が比較的容易である。これに対し、表層崩壊についてはそのメカニズムが複雑であるため、崩壊

するかどうかの判定が困難であり、その時期に至っては予測できないというのが現状である。ただし、力学的な安定が保てなくなったときに斜面崩壊が発生することから、まず、その斜面を構成する土の強度定数を的確に把握することが一つの重要な鍵となる。

ところで、降雨時の斜面崩壊では、すべり厚さが数十 cm～数m程度のごく表層部分で崩壊が生じる表層すべり型崩壊が多い。表層すべり型崩壊の原因の一つに、雨水の浸透に伴うせん断強度定数の一つである見掛けの粘着力の低下が挙げられる。したがって、降雨時の斜面の安定性について検討するためには、地盤の含水量と見掛けの粘着力の関係に注意する必要がある。

また、表層すべり型崩壊のすべり厚さが数十 cm～数m程度であることから、すべり面に作用する土被り厚さに基づく垂直応力は数 kPa～数十 kPa である。斜面安定解析を行う際に必要とされるせん断強度定数（見掛けの粘着力 c と内部摩擦角 ϕ ）を求めるために実施されるせん断試験における垂直応力は、標準的な試験で、100、200、300kPa 程度である。このことから、表層すべり型崩壊について安定解析を行うためには、低拘束圧条件下におけるせん断試験の実施が必要である。

そこで、本論文では、圧密定圧一面せん断試験を行い、低拘束圧条件（垂直応力 20、40、60kPa）下における飽和度と見掛けの粘着成分の関係について考察を加えた。また、拘束圧が通常拘束圧（100、150、200kPa）、低拘束圧（20、40、60kPa）、超低拘束圧（1、1.7、2.4、3.1kPa）条件下における強度特性の違いについて考察を加えた。さらに、実斜面に対して、斜面の安定に必要な強度定数を安定解析の逆解析から求め、対象斜面の現状の安全性の診断を行った。

2. 急傾斜地における表層崩壊の危険性の要因分析

急傾斜地の表層崩壊について、その原因は素因と誘因に分けて考えられる。

素因は、斜面にもともとあった崩壊の素地のようなもので、①斜面の物性：土質や岩質（強度）、②斜面の構造：傾斜や地形地質構造、③水：地下水などが挙げられる。

素因を有する斜面に崩壊のきっかけとなる誘因が作用することで崩壊に至ると考えられ、誘因となるものに①降水：降雨や融雪、②地震、③人為的要因：人工的な斜面の改変、設計や管理などが挙げられる。

本論文では、対象斜面が地すべり地であるような場所に歴史的建造物が立地していないこともあり、急傾斜をなす表層の土砂部分の崩壊を対象としている。

急斜面の表層崩壊は、比較的軟らかい表層の土砂部分が岩盤から剥離して下方に移動する現象と表現でき、傾斜角 $30\sim 60^\circ$ の斜面で主に発生すると言われる。この表層崩壊は素因も誘因もさまざまであることから、潜在的に危険との判定はできても、崩壊の予測は困難とされてきた。千木良は表層崩壊が発生した多くの事例に基づいて、次の3つのパターンに崩壊を分類している¹⁾。

- ① 表層の土層（ルーズな風化帯）の下が明瞭な境界を介して高強度、低透水な岩盤である場合
- ② 表層の風化帯が細粒で、明瞭な境界を介して下の粗粒な物質と接する場合
- ③ 水平に近い地層で下部が低透水性で上部が高透水性の場合

この内、表層の土層に対し下層が漸移的であれば崩壊はしにくいといわれる。①のような土層構造を形成しやすい岩盤では、表層の土層と岩盤の間において透水係数に大きな差があり、浸透した降雨は土層内に地下水を形成し、土層内の間隙水圧上昇と有効応力減少が生じ、豪雨時に崩壊している。

急傾斜地の表層崩壊の危険性の要因分析においては、斜面地形と傾斜角、土層厚、土層の土の強度、降雨、地下水、植生の根系の土質補強効果が重要になる。本論文では主に土の強度に関して考察を加えている。

3. 強度定数評価の現状

表層の土の強度に関しては、理想的には、表層から採取された不攪乱状態の土試料を用い、種々の力学試験を実施して強度定数を得ることが望ましい。しかし不攪乱土の採取は非常に難しいため、攪乱した試料を用いて強度定数の推定が試みられているのが通常である。

また、斜面表層の多くは不飽和状態であり、間隙水の表面張力に起因するサクションが不飽和土の変形・強度特性にかなり影響する。したがって、斜面崩壊の安定解析には不飽和土の力学特性を考慮することが、本来、必要である。しかし、飽和土の力学的特性に関しては多くの研究が行われており解明が進んではいる

ものの、不飽和土に関しては、かなりの研究にも関わらず現象の理解・理論化は、あまり進んでいないのが現状である²⁾。

不飽和領域のせん断強度に着目した研究の例として、軽部らの研究があり³⁾、その中で不飽和土のせん断挙動と間隙水の関係を示し、力学的挙動と水分特性曲線を関連づけている。

一面せん断強度にサクシオンを考慮した研究の例としては西村らの研究^{4), 5)}があり、不飽和用一面せん断試験機を用いて、定圧一面せん断試験を行い、サクシオンと破壊時のせん断強度の関係について考察を行っている。その中で、定圧せん断強度については、サクシオンに対して非線形な関係を示すことが報告されている。さらに、低拘束圧状態における不飽和土のせん断変形特性も研究されている⁶⁾。また横山ら⁷⁾は、サクシオンを考慮した不飽和土の一面せん断強度を求め、試験機の違いによるせん断強度への影響を検討している。

不飽和土の一面せん断試験における供試体作製に着目した研究の例として、横山らの研究⁸⁾がある。不飽和土の一面せん断試験における供試体作製時の問題点として、含水比と締固めエネルギーの関係を挙げている。含水比によって締め固まりやすさが異なるため、供試体の土粒子骨格構造が異なることを指摘している。さらに、供試体の間隙比は一定としても、締固めエネルギーが異なれば土粒子骨格構造、構造の卓越・剛性に影響をおよぼすものと考えられ、供試体作製条件がせん断強度に影響を与えると報告している。

これらは不飽和土の力学特性についての基礎的な研究の域にあり、実地盤にその結果を適用できる状況にはない。また、以上の試験では不飽和土用の三軸、一面せん断試験機が用いられており、非常に高価であり、操作が複雑なものである。本研究では、斜面の安定性評価に用いるための強度定数（低拘束圧下における不飽和土の強度定数）をより簡易に求めること目指し、一面せん断試験および結果に対する考察を行った。

4. 一面せん断試験の内容および結果に対する考察

(1) 試験試料

自然地盤の強度を推定するには、現地から不攪乱試料を採取してせん断試験を行うのが望ましい。しかし急傾斜地で表層の不攪乱試料を採取することには困難を伴うことから、安定性を評価しようとする斜面地付近から試料を採取し、現地の状態に再現するように室内で締め固めてせん断試験の供試体とした。対象斜面の土試料は、内径 5cm、高さ 5cm の薄肉鋼製サンプラーを利用して押し込み採取した。自然状態の土の密度と含水比を求め、その周辺の攪乱試料で一連の土の物理的性質を求める試験を行った。採取した各深度の試料の物理的性質を表 1 に示す。

ここで、当該斜面において、簡易コーン貫入試験の結果などから滑り面を想定したとき、深度 80cm と 110cm における強度が斜面の安定性を支配すると考えられるため、この 2 つの深度の試料に関する評価を行った。この 2 つの試料に関して、自然含水比 w が約 20%、飽和度 S_r は 70% 前後、間隙比 e は 0.8 前後であった。また、コンシステンシーを示す塑性指数 I_p は 20 以上を示し、比較的、塑性の高い粘性土であった。

サンプラーで採取した不攪乱試料から得られた湿潤密度 ρ_t は、表 1 に示すように 1.8g/cm^3 前後であり、乾燥密度 ρ_d は、 1.5g/cm^3 であった。別途採取した試料で締固め試験を行った結果では、JIS による締固め試験の低い方のエネルギーで締固めて、最大乾燥密度 ρ_{dmax} が 1.7g/cm^3 より少し大きく、最適含水比は 18% 程度であることから、実験に用いる供試体作製で現地の状態にあわせた密度を得るには締固めエネルギーはかなり小さくてよいことがわかる。

表 1 土質試験結果

試料深さ (cm)	50	80	110
含水比 w (%)	18.4	20.5	20.6
土粒子密度 ρ_s (g/cm^3)	2.606	2.634	2.656
湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	1.581	1.753	1.839
乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.335	1.454	1.525
間隙比 e	0.95	0.81	0.74
飽和度 S_r (%)	50.5	66.8	74.0
液性限界 w_L (%)	97.5	47.0	57.0
塑性限界 w_P (%)	NP	17.7	16.8
塑性指数 I_P	—	29.3	40.2
最大乾燥密度 ρ_d (g/cm^3)	1.774	1.704	1.737
最適含水比 w_{opt} (%)	16.5	18.5	18.0
透水係数 k_T (cm/s)	7.50×10^{-3}	6.50×10^{-4}	1.60×10^{-6}

(2) 一面せん断試験の概要

斜面の強度定数を評価するせん断試験として、少ない試料で試験が出来ること、供試体作製が容易であること、せん断強度の



写真 1 改良型一面せん断試験機

評価が単純に出来ること等を考慮し、一面せん断試験を行った。試験装置は三軸圧縮試験と同様の排水条件のコントロールが可能な改良型一面せん断試験を用いた。

一面せん断試験に用いる垂直応力は規格の試験では $100\sim 200\text{ kN/m}^2$ (通常拘束圧領域と表現する) であるが、この圧力は土被り厚さでいえば $5\sim 6\text{ m}$ 以上の深度に相当し、表層のせん断強度を評価するには大きすぎるため、低い拘束圧にも対応できるように試験装置を改良し、垂直応力が $20\sim 60\text{ kN/m}^2$ (低拘束圧領域) の表層における土被り圧条件下での強度を評価できるようにした。また、地表面のごく表面の強度を評価するためには、この低拘束圧でも垂直応力が大きすぎるため、特別に工夫された装置を用いて $1.0\sim 3.1\text{ kN/m}^2$ (超低拘束圧領域) の垂直圧力でも試験を行い、強度特性を調べた。

今回の実験に用いた改良型一面せん断試験機を写真 1 に、超低拘束圧試験機を写真 2 に示す。写真 1 の左、写真 2 の中央部の箱型のものが直径 6 cm 、厚さ 2 cm の供試体を納めたせん断箱である。せん断箱は、厚さ 2 cm の供試体の中央でせん断を行えるように上下に分割された容器である。

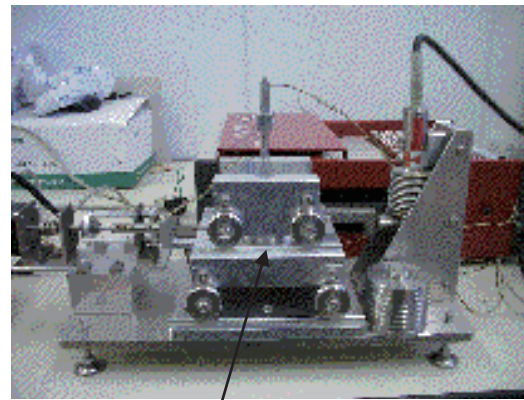
急傾斜面の崩壊は、現有の有効応力状態で強度を評価することが必要なため、せん断試験の供試体の排水条件は圧密排水せん断条件を用いた。この条件の一面せん断試験は、圧密定圧せん断試験となり、せん断中に過剰間隙水圧が発生しないようにするため、せん断速度を使用したせん断試験機で最も遅い 0.1 mm/min とした。また、供試体を 8 mm せん断したところで試験を終了した。

表 2 に試験条件を示す。本論文では、低拘束圧条件 (垂直応力 $20, 40, 60\text{ kPa}$) 下で、さらに供試体の飽和度が $60, 80, 100\%$ の場合における圧密定圧せん断試験と拘束圧が通常拘束圧 ($100, 150, 200\text{ kPa}$)、低拘束圧 ($20, 40, 60\text{ kPa}$)、超低拘束圧 ($1, 1.7, 2.4, 3.1\text{ kPa}$) 条件下において、飽和度 100% の供試体を使用した場合の圧密定圧せん断試験を行った。

供試体作製にあたっては、試料が設定飽和度になるよう加水して調整 (水が十分なじむようタッパーに入れて 2 日間養生) した。そして、現地の間隙比と同じにするために予め試料の質量を計量し、その量をせん断箱に厚さ 2 cm に納まるよう締固めて整形した。締固めの前に含水比調整をしているため、設定条件の供試体にするための締固めのエネルギーは、それぞれの条件において同じにはならない。

(3) 一面せん断試験結果と強度定数の評価

土は、地下水面より上にある場合は不飽和の状態にある。不飽和の状態では間隙内の水の表面張力に基づくサクションという負圧が働き、それは土粒子を互いに引きつける作用を及ぼすため、土粒子間に有効応力



せん断箱

写真 2 超低拘束圧型一面せん断試験機

表 2 試験条件

低拘束圧条件 (27ケース)		
使用試料採取深度 (cm)	50, 80, 110	
設定飽和度 S_r (%)	60, 80, 100	
採用垂直応力 (kPa)	20, 40, 60	
拘束圧条件の相違によるせん断特性 (10ケース)		
使用試料採取深度 (cm)	110	
設定飽和度 S_r (%)	100	
採用垂直応力 (kPa)	通常拘束圧	100, 150, 200
	低拘束圧	20, 40, 60
	超低拘束圧	1, 1.7, 2.4, 3.1

として作用することになり、せん断強度を増加させる効果を発揮する。採取した試料がどの程度のサクシオンを有するかを測定した結果が図 1 である。図 1 から、今回使用した試料の水分保持特性は、飽和度が 80% 以下になると急激にサクシオンが増加し、80% 以上ではサクシオンの効果がなくなるといった特性を持っていることがわかる。

まず、低拘束圧条件（垂直応力 20、40、60kPa）および供試体の飽和度が 60、80、100% の場合における圧密定圧せん断試験の結果について考察を行う。図 2 にせん断試験により得られたクーロンの破壊線の垂直応力がゼロのときのせん断応力である見掛けの粘着力 c と供試体の飽和度の関係を示す。見掛けの粘着力 c は飽和度が低くなると増加していることから、サクシオンの影響があることがわかる。

また、供試体の飽和度と内部摩擦角 ϕ の関係を図 3 に示す。図 3 では飽和度が 80% の状態でかなりばらついているが、傾向として内部摩擦角は飽和度の影響を受けないと判断しても良いと考えられる。

次に、拘束圧が通常拘束圧（100、150、200kPa）、低拘束圧（20、40、60kPa）、超低拘束圧（1、1.7、2.4、3.1kPa）条件下において、飽和度 100% の供試体を使用した場合の圧密定圧せん断試験の結果について考察を

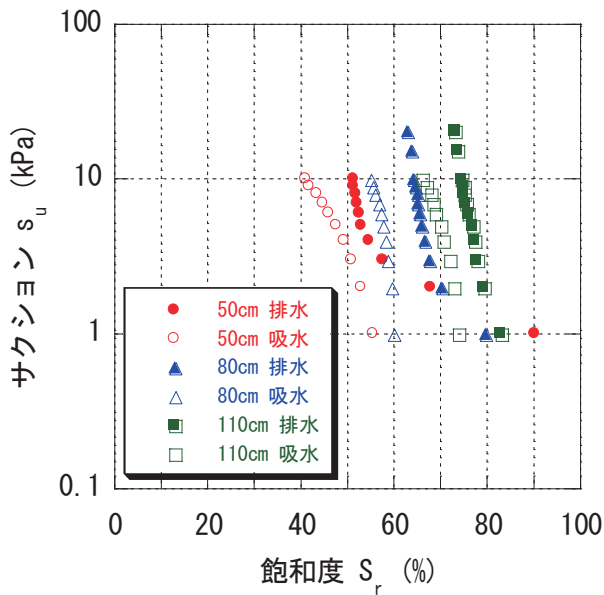


図 1 各深度の試料の水分特性曲線

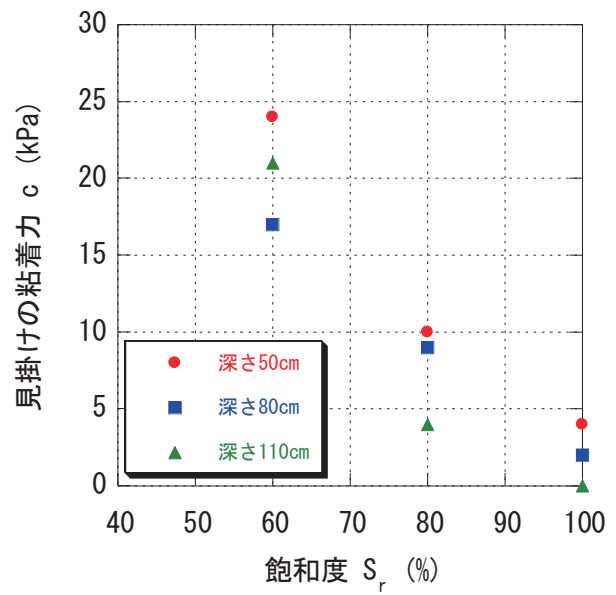


図 2 飽和度と見掛けの粘着力の関係

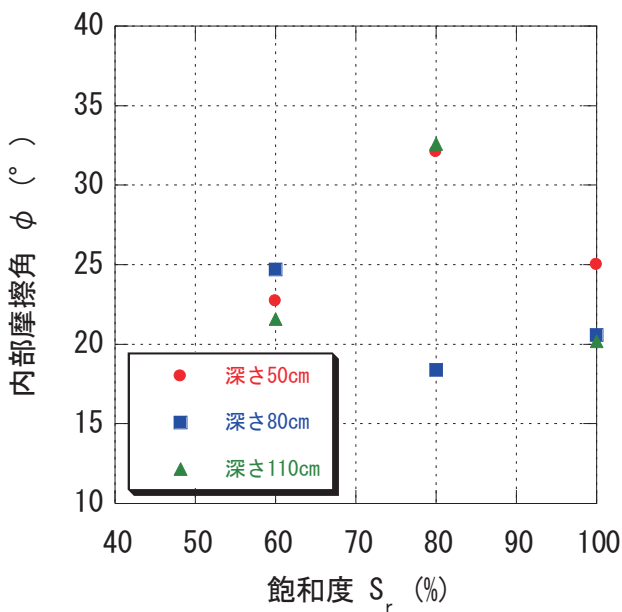


図 3 低拘束圧状態でのせん断における飽和度と内部摩擦角の関係

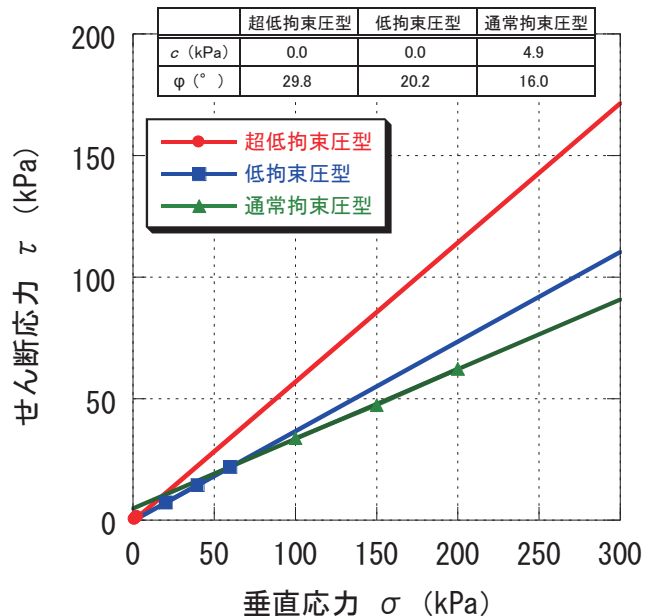


図 4 拘束圧の広い範囲でみたクーロンの破壊線の違い

行う。

深度 110cm の試料を用いて、土を飽和 ($S_r=100\%$) させ、拘束圧を超低拘束圧から通常拘束圧の条件でせん断したときのクーロンの破壊線を示したのが図 4 である。ここで、クーロンの破壊線の傾きである内部摩擦角に着目して、拘束圧の違いによる影響について考察する。

超低拘束圧では内部摩擦角が $\phi=29.8^\circ$ と最も大きくなった。今回行った圧密定圧せん断では、最初の圧密で供試体の高密度化が生じ、通常拘束圧 (垂直応力 100、150kPa) では現地のせん断を再現していない可能性が指摘できる。その意味では超低拘束圧 (1、1.7、2.4kPa) では最初の圧密過程では圧密がほとんど生じないため、現地のせん断を再現している可能性は高いが、超低拘束圧では試験の条件が直接的に影響することが考えられ、さらに実験を継続して試験条件の影響について解明する予定である。これに対し、通常拘束圧条件では、内部摩擦角 $\phi=16^\circ$ 、見掛けの粘着力 $c=5\text{kPa}$ と得られ、内部摩擦角はかなり低い値であった。これは最初の加圧で圧密が進行し間隙比が大きく減少していることから、過圧密領域と同じせん断特性を示したと推定できる。これらに対し、低拘束圧条件では $\phi=20.2^\circ$ で $c=0\text{kPa}$ で正規圧密領域と同じ傾向を示した。同じ試料で土の含水比を液性限界の 1.5 倍にしてスラリー状にし、この試料土の正規圧密条件を与えることで固有の内部摩擦角を調べる試験を別に行ったが、得られた内部摩擦角は 22.4° で、図 3 の結果とあわせて考察すれば、深度 110cm の試料の内部摩擦角は 21° 程度であると考えられる。

5. 原位置試験および解析による強度定数の評価

図 5 に示す斜面に対して安定性評価を行う。本論文で述べた土質試験結果は、図 5 に示す対象斜面付近から採取した試料を用いて得られたものである。この斜面では土砂部分の強度を評価するため簡易コーン貫入試験を 4 地点で行っており、その結果から図 5 に示すような崖錐堆積物と基盤岩との境界を想定した。また、図 5 には、表層の崖錐堆積物の層において崩壊が発生するとした場合の想定すべり面を示している。斜面安定解析に室内土質試験の結果を適用する場合の課題や問題点について検討するため、図 5 の想定すべり面において、斜面が最も危険な状態を考慮し、地下水位が地表面まで達した条件で逆解析を試みた。斜面安定解析において安全率が 1 以上となる時、斜面が安定性を保てる条件であり、逆解析によって、安全率が 1 となるような強度定数を計算した。逆解析の結果を図 6 に示す。また、図 7 には簡易コーン貫入試験を実施した K2-2 地点における貫入試験結果の N_d 値から一軸圧縮強さ q_u を求め、 q_u を 1/2 にすることで得られた見掛けの粘着力 c と深さの関係を示している。このとき、 N_d から q_u の推定は、粘性土の場合の次式^{9)、10)}

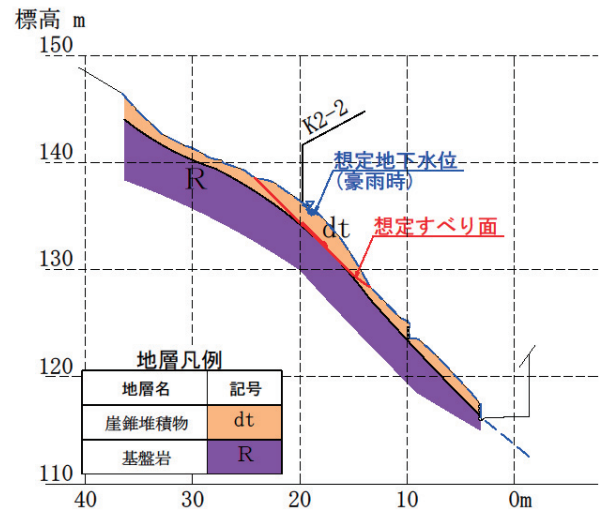


図 5 安定性評価の対象斜面と想定すべり面

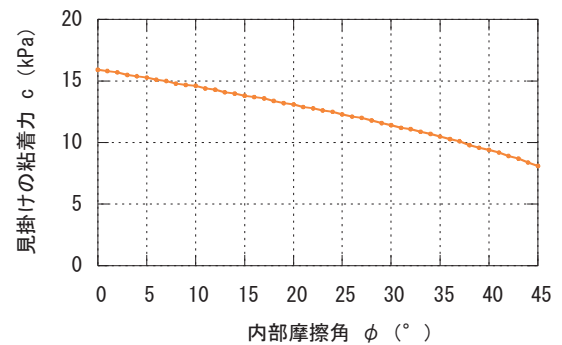


図 6 逆解析で得た安全率が 1 の状態を保つために必要な内部摩擦角と見掛けの粘着力の関係

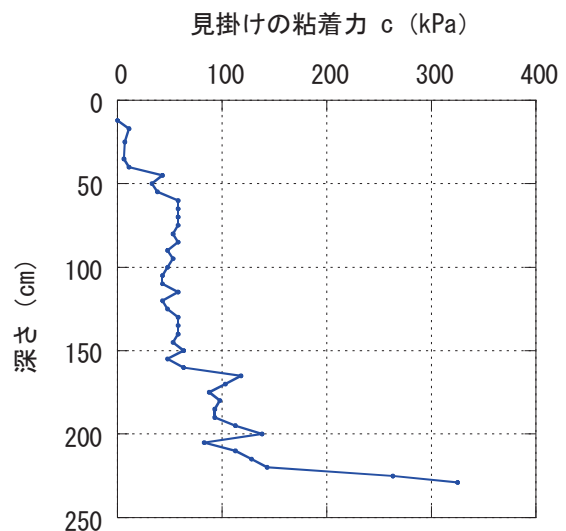


図 7 K2-2 地点における換算 c 値

を用いた。

$$N_d < 4 \quad q_u = 11 \cdot N_d \quad (\text{kN/m}^2) \quad (1)$$

$$N_d \geq 4 \quad q_u = 25 + 5 \cdot N_d \quad (\text{kN/m}^2) \quad (2)$$

図 6 の結果を得た逆解析では、直線と円弧の組み合わせによる複合すべり形状を想定し、道路土工で盛土の安定計算として示している有効応力法に基づく分割法の計算¹¹⁾を準用した。解析については盛土であっても自然斜面であっても複合すべり面の計算方法は同じである。図 6 からわかるように、見掛けの粘着力が $c = 15.9 \text{ kN/m}^2$ 程度あれば内部摩擦角 $\phi = 0^\circ$ でも斜面は安定性を保つことになり、斜面の安定に見掛けの粘着力が効いていることが理解できる。4-(3)節で示したように斜面を構成する粘性土の内部摩擦角 ϕ が $\phi = 20 \sim 21^\circ$ であると考え、安全であるために必要な見掛けの粘着力は図 6 から 13 kN/m^2 であることがわかる。今回の安定解析では、斜面が飽和状態になっていることを想定しており、飽和度 100% 時の見掛けの粘着成分が 13 kPa 以上あれば、常に安定することになる。そこで、図 1、図 2 から考察すると、この斜面の飽和度が 60% 程度であれば、必要な粘着力が十分確保できることになる。しかし、斜面土が飽和してしまうとこのような見掛けの粘着力は期待できないため危険になることが推定できる。

降雨のない状態で測定した簡易コーン貫入試験から推定する見掛けの粘着力は、図 7 に示すように深さ方向の平均（深さ 50～150cm に対して）で、およそ 50 kN/m^2 と求められ、この値からも当該斜面は、降雨が続いて飽和状態に近いような場合意外は、安全であることが理解できる。

6. おわりに

本論文では、降雨時に歴史的建造物の後背斜面において多く発生する表層すべり型崩壊を対象とし、斜面の安定性評価を行うために必要な強度定数について研究を行った。

まず、表層部分の応力レベルを考慮した低拘束圧条件下における圧密定圧一面せん断試験を行い、飽和度と見掛けの粘着成分および内部摩擦角の関係について考察をし、見掛けの粘着成分 c は、土の水分保持特性の影響を受け、飽和度が増加すると共に低下していくという結果が得られた。また、飽和度と内部摩擦角の関係については、飽和度が 80% の場合はデータのばらつきが見られるが、大まかには内部摩擦角 ϕ は、飽和度の変化に影響を受けないと判断することができた。

次に、拘束圧の違いに伴う強度特性の違いについて圧密定圧一面せん断試験を実施し、考察を行った。結果として、超低拘束圧（1、1.7、2.4、3.1 kPa）条件下の試験から得られた内部摩擦角が、より大きい拘束圧条件下のものより大きくなった。また、超低拘束圧条件下では、最初の圧密過程では圧密がほとんど生じないため、現地のせん断を再現している可能性は高いといえるが、試験の条件が直接的に影響することが考えられるため、今後、多くの試験を行うことにより、試験条件の影響を明らかにする必要がある。

また、今回の圧密定圧一面せん断試験における供試体の作製方法で、含水量調整後に供試体を作製しているため、含水量が異なる供試体作製時の締固めエネルギーが異なっているため、今後、その影響および作製方法の改良を検討する必要がある。

最後に、実斜面に対して、斜面の安定に必要な強度定数を安定解析の逆解析から求め、対象斜面の現状の安全性の診断を行った。逆解析の結果と室内土槽試験結果から、対象斜面の飽和度が 60% 程度以下であれば、必要な粘着力が十分確保できるが、高飽和度状態では、見掛けの粘着力は期待できないため危険性が増すことが推定できた。

今後、室内土質試験から得られた飽和度と見掛けの粘着力の関係を用いて、2次元不飽和浸透解析と安定解析を組み合わせた数値シミュレーションを実施し、降雨に伴い時々刻々と変化する斜面の安定性の定量的評価を行いたい。また、今回行った一面せん断試験について、試験手法および試験機器の改良について検討していきたい。

参考文献

- 1) 千木良雅弘：降雨と地質と崩壊，地質と調査'07 第1号，pp.10～16，土木春秋社，2007.
- 2) (社)地盤工学会編：不飽和地盤の挙動と評価，第4章不飽和地盤の評価法 pp.1-9，2004.
- 3) 軽部大蔵，加藤正司，浜田耕一，鶴ヶ崎和博：不飽和土のせん断挙動と間隙水状態の関係について，土木学会論文集，No575，Ⅲ-40，pp.49-58，1997.
- 4) 西村友良，柿崎佳和，和栗将貴：低サクシオン領域における土の定圧一面せん断強度と含水比の関係，土木学会第60回年次学術講演会，pp.709-710，2005.
- 5) 西村友良，柿崎佳和，和栗将貴：湿潤側で締固めた不飽和土の定圧一面せん断強度とサクシオンの関係，土木学会第60回年次学術講演会，pp.711-712，2005.
- 6) 加藤正司，吉村優治：低拘束圧状態における不飽和土のせん断変形特性，第40回地盤工学研究発表会，pp.869-870，2005.
- 7) 横山真之：一面せん断試験による不飽和土のせん断特性に関する実験的研究，平成16年度鹿児島大学大学院修士論文，pp.5-84，2004.
- 8) 横山真之，北村良介：一面せん断試験装置を用いた不飽和土のせん断特性に関する研究－考察，第38回地盤工学研究発表会，pp.921-922，2003.
- 9) 岡田勝也，杉山友康，野口達雄，村石 尚：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性，土と基礎，Vol.40，No.411，pp.11-16，1992.
- 10) 地盤工学会：簡易動的コーン貫入試験（第3章），地盤調査の方法と解説，pp.274～278，2004.
- 11) 日本道路協会：道路土工「のり面工・斜面安定工指針」，pp.164-175，1999.