

## 関門層群の崩壊素因が不攪乱試料の応力-軸ひずみ関係に与える影響

Influences of Inherent Failure Factors on Stress-Strain Relationship  
of Undisturbed Sample in the Kanmon Group

居石和昭 Kazuaki SUEISHI (山口大学大学院創成科学研究科)  
 鈴木素之 Motoyuki SUZUKI (山口大学大学院創成科学研究科)  
 逢阪勇輝 Yuki OSAKA (山口大学大学院創成科学研究科)  
 河内義文 Yoshifumi KOCHI ((株)ケイズラブ)

山口県北西部～南西部に分布する関門層群では切土後に時間が経過して崩壊が発生する事例がある。その原因としてスレーキング特性や光沢質黒色薄層土の存在があげられるが、どのような強度特性を有しているかは解明されていない。本研究では乱した試料および乱さない試料に対して圧密非排水三軸圧縮試験とその試験後供試体に対してスレーキング試験を実施し、スレーキング特性や光沢質黒色薄層土が応力-軸ひずみ関係および強度特性に及ぼす影響について検討した。その結果、スレーキングの違いによってせん断強度および破壊モードが異なることが明らかになった。

キーワード：関門層群，切土，三軸圧縮試験，乱さない試料，スレーキング  
(IGC : D-6)

## 1. はじめに

山口県北西部～南西部に分布する白亜紀後期の安山岩、流紋岩、堆積岩からなる関門層群は深部まで風化し、切土による応力解放を受けると、その後徐々に強度低下を起こす特性を有している。図-1に関門層群の分布域を示しているが<sup>1)</sup>、現在、山陰道が建設されている。関門層群では道路供用後、のり面勾配が緩い場合であっても地すべり性崩壊に進展した事例がある。そのため、調査・設計時に地質および地質構造、土質特性に十分に留意して、施工中はのり面の変状に注視する必要がある。

関門層群風化部における地すべり性崩壊因子として①強風化を受けているか、②黒色薄層土(写真-1)が観察されるか、③高さ15m以上の切土であるか、④褶曲(特に向斜)を受けているか、⑤頭部に断層があるか、⑥日雨量100mm程度以上の豪雨を受けたかの6つが考えられている<sup>2)</sup>。図-2に既往の崩壊事例の位置図、表-1にその因子に関する星取表を示しているが、複数の因子を複合的に評価する必要がある。また、それらの因子が土の応力-軸ひずみ関係や強度特性にどう影響するかを解明する必要もある。そこで、本研究では、山陰道豊田・俵山道路建設予定地で採取した乱した試料および乱さない試料に対して圧密非排水三軸圧縮試験(CU)とその試験後供試体に対してスレーキング試験を実施し、双方の試験結果に基づいてスレーキング特性<sup>3)</sup>や光沢質黒色薄層土<sup>4), 5)</sup>が乱さない試料の応力-軸ひずみ関係および強度特性に及ぼす影響について検討した。



図-1 山口県地質図<sup>1)</sup>



写真-1 豊田・俵山道路建設予定地の黒色薄層土面

## 2. 関門層群に関する既往研究

関門層群の地質学的検討は植田<sup>6)</sup>や村上ら<sup>7)</sup>によってなされており、西村ら<sup>1)</sup>によって山口県地質図第3版(15万分の1)説明書にまとめられている。また、歌田ら<sup>8)</sup>は、本調査地近傍にて実施された掘進長700mを超えるボーリングのコアを用いた薄片観察、XRD試験、帯磁率測定等をおこなった。その結果より、関門層群の変質作用について調査し、関門層群における変質の種類は、広域、ホルンフェルシック、熱水、風化の4つに大別され、変質ごとの特徴として鉱物組合せおよび粘土鉱物の組み合わせが異なることを報告している。このように関門層群には堆積岩～火成岩まで様々な地質が分布していることに加えて、火山活動が活発だった時期に周辺に分布していた地層は風化や変質を受けていることがわかっている。

土質工学的性質の検討は山本ら<sup>9)</sup>や Kochi et al.<sup>10)</sup>によってなされている。不連続面のすべりに着目した研究として黒色薄層土および白色粘土層に起因するものが報告されている。とくに、黒色薄層土に関しては、山本ら<sup>5, 11)</sup>が、すべり面に認められた黒色土について鉱物学・化学・物理的性質を調べ、黒色土中の黒色は微細で非晶質なマンガンあるいは鉄の酸化物ないし水酸化物によってもたらされたことを報告した。なお、山本ら<sup>5)</sup>は、黒色薄層土が事前に不連続面に沈殿していることが分かった場合、それに起因する斜面崩壊に対する安定性の検討においては黒色土間の設計強度定数として粘着力  $c_d=7.7\text{kPa}$ 、内部摩擦角  $\phi_i=23.1^\circ$  を用いることを提案している。

一方、関門層群が分布する地域の道路法面の崩壊や地すべり事例が数多く報告されており、以下の論文で言及されてきた。Kochi et al.<sup>10)</sup>は、山口県萩三隅道路沿いで切土後に幅50mの規模で地すべりが発生した例を報告している。また、河内ら<sup>2)</sup>は、山口県豊浦郡豊田町(現在、下関市豊田町)で発生した切土法面(法長12m、幅約60m)の斜面崩壊と土質工学的性質を報告している。

本研究に先行する研究として神谷ら<sup>4)</sup>は稲見地区でベンチカットして採取した試料を用いて、土質試験、ボーリングコアを用いたスレーキング試験およびXRD試験を実施しており、色調および土質試験の結果から調査地における強風化層は3つに大別されることを突き止めた。また、強風化層は水浸させると数分～1時間程度で完全にスレーキングするケースが多く、急速にスレーキングを起こしやすい特性を有していることを指摘している。

この他に、切土法面を約40年間にわたり弾性波探査や目視点検により観測した事例を藤原ら<sup>12)</sup>が報告している。約40年経過した切土法面のうち、現場で見られる岩種の中では凝灰岩が長期的に不安定側に近づいたこと、上段に近づくほど時間経過に伴い風化帯の走時が大きくなり、不安定側に近づく傾向が認められたこと等が報告されている。切土法面の長期的な安定性の検討はまだ少

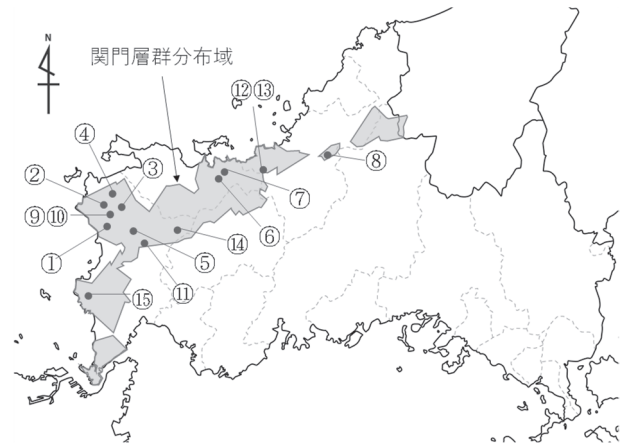


図-2 地すべり性崩壊地位置図

表-1 関門層群風化部における地すべり性崩壊の因子<sup>2)</sup>

No.	強風化	黒色薄層土	15m以上の切土	褶曲	頭部に断層	豪雨
①二見	×	×	○	×	○	○
②田代	○	△	○	○	×	○
③滝部中村	○	○	○	○	×	○
④赤沼田	○	○	○	○	×	○
⑤大庭	○	○	×	×	○	×
⑥畠田	○	×	○	×	○	△
⑦野波瀬	○	○	○	×	○	×
⑧平藤	○	×	×	×	○	○
⑨滝部城山南	○	○	○	○	×	○
⑩滝部城山北	○	○	○	○	×	○
⑪豊田浮石	○	○	×	○	△	×
⑫萩三隅明石	○	○	○	×	○	×
⑬萩三隅蔵本	○	○	○	×	○	×
⑭長門俵山大寧寺第1トンネル	○	○	○	×	○	×
⑮今養	○	○	○	×	○	×

なく、山陰道建設予定地の関門層群に対しても検討が必要となる。

## 3. 調査箇所・試験方法

### 3.1 調査箇所の概況

本研究の調査箇所は山陰道豊田・俵山道路建設予定地に切土された場所である。図-3に示したように、切土は高さ8.3m、法面勾配1:1.5で高さ7m地点に小段が設けられている。サンプリングは小段(以下、法肩)と法尻で実施した。

### 3.2 乱さない試料のサンプリング

本研究で用いた乱さない試料はネイルサンプリングにより直径約10cm、高さ約20cmのブロックサンプルを水平および鉛直方向にそれぞれ採取したものである。採

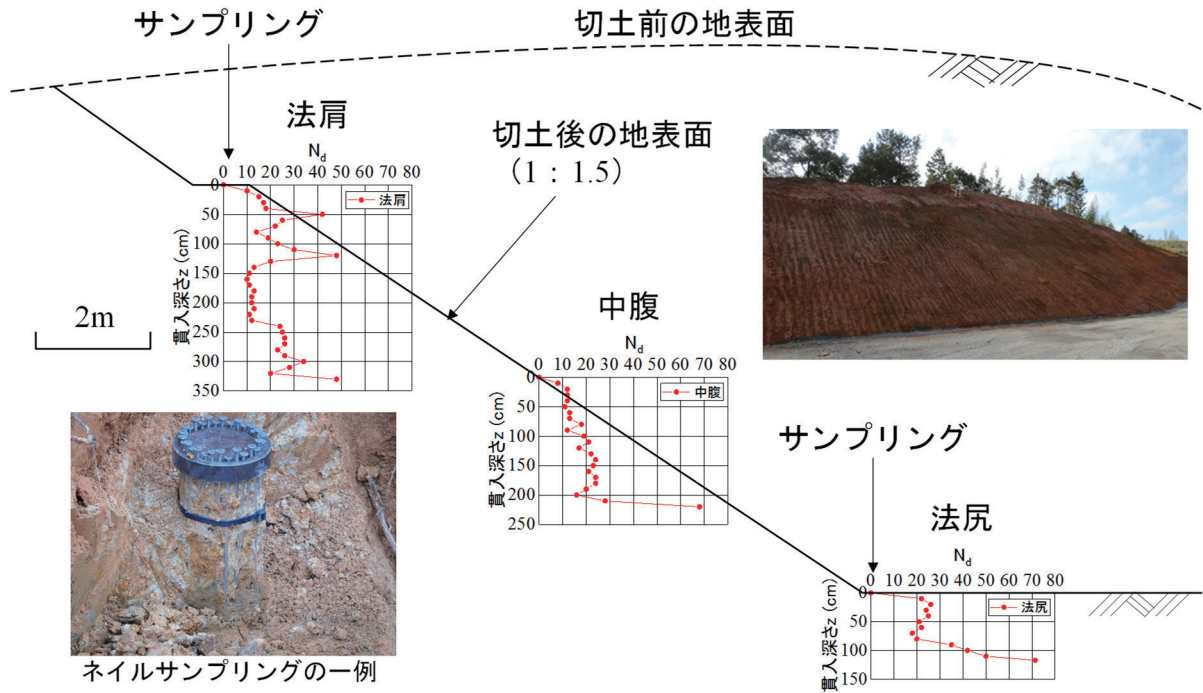







図-3 暫定切土断面図

表-2 スレーキング区分<sup>13)</sup>

区分	0	1	2	3	4
試料状態	 変化なし.	 割れ目が少しできるが供試体の原形を保っている.	 全体に割れ目が多数でき、幾つかの岩片にわかれる。供試体の原形はおおむね判別できる.	 全体が細粒化し、供試体の原形は判別できない。泥状化の進行は顕著でない.	 全体が泥状化.

取した土試料は冷凍庫で凍結した後、直径約 5cm、高さ約 10cm の供試体に成形できるサイズまでコアカッターで削った。しかし、コアカッターで切削時に、供試体に潜在する黒色薄層土沿いで断裂が発生したため、供試体の成形前に供試体への影響を軽減する目的としてまず内径 15cm のコアカッターで削り、その後に内径 5cm のコアカッターで削った。これにより断裂は減ったものの、十分な供試体数の確保ができなかったため、不十分な試験数となった。特に法肩で採取した試料の破壊が多かった。

### 3.3 物理試験

本研究で実施した物理試験は、土粒子の密度試験、粒度試験、液性限界・塑性限界試験である。また、スレーキング試験を地盤工学会の岩石のスレーキング試験<sup>13)</sup>に従って実施した。40±5℃で 48 時間炉乾燥させた試料

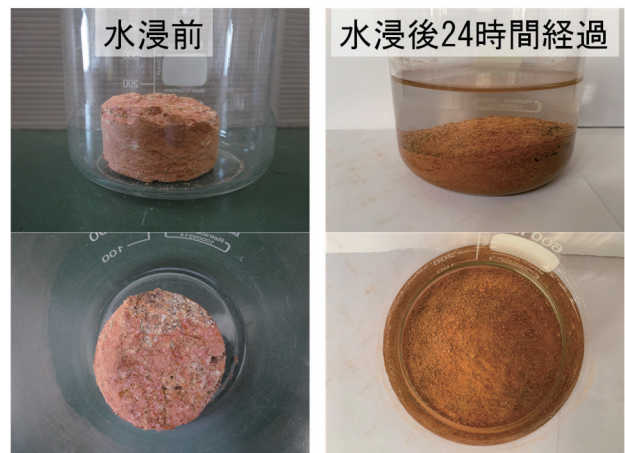


写真-2 スレーキング状況写真

を 24 時間吸水させ、水浸直後、30 分、1、2、4、6 および 24 時間経過時点でそれぞれスレーキング区分を判定し、24 時間経過時点の区分をスレーキング指数とした。

表-3 試験ケース及び試験結果

試料状態	採取位置	採取方向	拘束圧 (kN/m <sup>2</sup> )	試験ケース名	試験結果		
					応力-軸ひずみパターン	間隙水圧-軸ひずみパターン	破壊モード
乱した試料	法肩	-	50	法肩 (50kN/m <sup>2</sup> )	(2)	(A)	(b)
			100	法肩 (100kN/m <sup>2</sup> )	(2)	(A)	(b)
			150	法肩 (150kN/m <sup>2</sup> )	(2)	(A)	(b)
	法尻		50	法尻 (50kN/m <sup>2</sup> )	(2)	(A)	(b)
			100	法尻 (100kN/m <sup>2</sup> )	(2)	(A)	(b)
			150	法尻 (150kN/m <sup>2</sup> )	(2)	(A)	(b)
乱さない試料	法肩	鉛直	150	法肩-鉛直 (150kN/m <sup>2</sup> ) ①	(2)	(B)	(b)
			150	【水浸】 法肩-鉛直 (150kN/m <sup>2</sup> ) ①	(3)	(C)	(b)
	法尻		50	法尻-鉛直 (50kN/m <sup>2</sup> ) ①	(3)	(A)	(c)
			100	法尻-鉛直 (100kN/m <sup>2</sup> ) ①	(1)	(A)	(a)
			100	法尻-鉛直 (100kN/m <sup>2</sup> ) ②	(1)	(A)	(a)
			100	法尻-鉛直 (100kN/m <sup>2</sup> ) ③	(1)	(A)	(a)
			150	法尻-鉛直 (150kN/m <sup>2</sup> ) ①	(2)	(B)	(b)
			水平	120	法尻-水平 (120kN/m <sup>2</sup> ) ①	(1)	(B)

なお、スレーキング区分ごとの供試体のスレーキング状況の目安を表-2<sup>13)</sup>に示す。各区分における詳細は以下の通りである。スレーキング区分0は変化なし。スレーキング区分1は割れ目が少しできるが供試体の原形を保っている。スレーキング区分2は全体に割れ目が多数でき幾つかの岩片に別れるが、供試体の原形はおおむね判別できる。スレーキング区分3は全体が細粒化し、供試体の原形は判別できない。スレーキング区分4(写真2)は全体が泥状化した状態である。スレーキング試験は、現場で採取した試料および三軸圧縮試験後の乱さない試料の供試体を用いて行った。後者の試料を使用したスレーキング試験では、せん断後に24時間炉乾燥させ、24時間吸水させた。

### 3.4 圧密非排水三軸圧縮試験 (C $\bar{U}$ )

本試験はJGS-0523に従って実施した<sup>14)</sup>。供試体は乱した試料および乱さない試料のそれぞれから成形した。乱さない試料から高さ10cm、幅5cmで成形した供試体は凍結したまま供試体を三軸圧縮試験装置のペDESTALにセットし、有効拘束圧 $\sigma'_v=20\text{kN/m}^2$ の状態に24時間かけて解凍した。その後の飽和過程において、供試体は細粒分を多く含むことから通水が困難と判断したため、二重負圧法を用いた。供試体に $u_b=-90\text{kN/m}^2$ 、三軸圧力室内に $\sigma_c=-70\text{kN/m}^2$ を加えて1時間放置後、脱気水の通水を開始した。続いて背圧 $u_b=200\text{kN/m}^2$ の载荷を行い、 $B$ 値が0.95になることを確認した。その後、原位置の土被り圧が法肩で26kN/m<sup>2</sup>、法尻で131kN/m<sup>2</sup>であるのに対

表-4 金道地区の土質試験結果一覧

	法肩	法尻
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.759	2.748
均等係数 $U_c$	53	227
曲率係数 $U_c'$	2.3	6.1
細粒分含有率 (%)	74.1	47.0
液性限界 $w_L$ (%)	64.0	56.0
塑性限界 $w_p$ (%)	35.8	24.8
塑性指数 $I_p$	28.2	31.2
土質分類	(MH)	(SF)
最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.16	1.36
最適含水比 $w_{opt}$ (%)	44.5	32.5
スレーキング指数	3~4	1~3

して、有効拘束圧 50, 100, 120, 150 kN/m<sup>2</sup> で等方圧密を行った。圧密の打切り時間  $t_c$  は 3t 法の値を参考に、それを超える一律 120 分間とした。圧密後、直ちにひずみ速度 0.2%/min で非排水せん断を行った。

一方、乱した試料は、道路土工盛土工指針に示されている締固め度  $D_c$  の管理基準値 90%以上<sup>15)</sup> になるように突き固め、供試体をワイヤーソーにより直径約 5cm、高さ約 10cm に成形した。なお、道路土工盛土工指針には粘性土に対して締固め度の管理基準は通常設けていないが、締固め管理が可能な場合において砂質土の基準値を適用することができるため、これを採用した。試験手順は、飽和過程から前述の乱さない試料のものと同様である。

乱した試料および乱さない試料の試験ケースおよび試験結果を表-3 に示す。試験は、乱した試料が、採取位置 2 種類、拘束圧 50, 100, 150 kN/m<sup>2</sup> の組み合わせで計 6 ケース、乱さない試料が、採取位置 2 種類、採取方向 2 種類、拘束圧 50, 100, 120, 150 kN/m<sup>2</sup> の組み合わせで計 8 ケースを行った。乱さない試料は、同じ条件の試験を複数回行ったため、試験ケース名の最後に試験回数を示した番号をつけている。なお、【水浸】法肩-鉛直 150 kN/m<sup>2</sup> ①は、供試体のスレーキング後のせん断挙動を把握するため、凍結された供試体にメンブレンおよびモールドを装着した状態で 24 時間水槽に水浸させた後に三軸圧縮試験を行ったケースである。また、法尻-水平(120kN/m<sup>2</sup>) ①は黒色薄層土沿いにせん断破壊したケースである。試験結果の応力-軸ひずみパターンおよび過剰間隙水圧-軸ひずみパターンは 4.3 で、破壊モードは 4.4 で述べる。

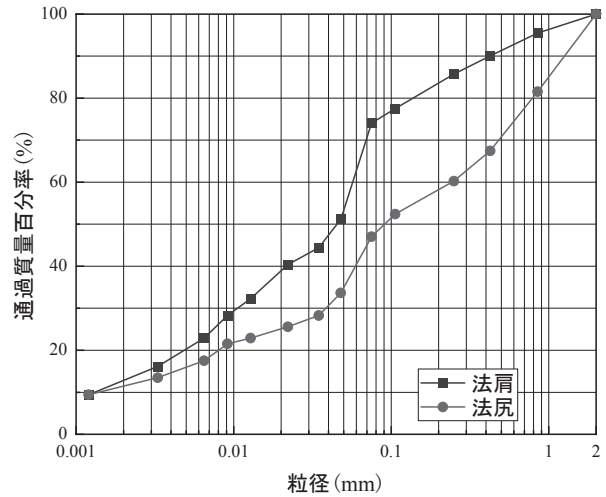


図-4 土試料の粒径加積曲線

## 4. 試験結果

### 4.1 物理試験結果

表-4 に物理試験およびスレーキング試験の結果の一覧を示す。スレーキング試験は法肩および法尻で採取した試料を用いて、それぞれ 4 回ずつ試験を行った。その結果、スレーキング指数は法肩が 3~4、法尻が 1~3 となった。法肩の液性限界は 64.0%、塑性限界は 35.8%で塑性指数は 28.2 であることから、分類としてはシルト（高液性限界）の (MH) に分類された。法尻は細粒分含有率が 50%未満であることから、地盤材料の工学的分類としては細粒分まじり砂 (SF) に分類された。また、締固め試験より、スレーキングが発生しやすい法肩の最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  は 1.164 g/cm<sup>3</sup>、最適含水比  $w_{opt}$  が 44.5%、スレーキングが発生しにくい法尻の最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  は 1.360 g/cm<sup>3</sup>、最適含水比  $w_{opt}$  が 32.5%であった。スレーキングが発生しにくい法尻において最大乾燥密度が大きく、最適含水比が低い結果となった。

図-4 に示す粒径加積曲線より、細粒分含有率はそれぞれ法肩で 74%、法尻で 47%となり、スレーキングが発生しやすい法肩の方が高くなった。菊本ら<sup>16)</sup> は、土試料によるが、乾湿の繰返しにより細粒分含有率が増加することを報告している。このことから、法尻に比べ法肩はより乾湿の繰返しが行われていたと考えられる。

### 4.2 乱した試料のせん断挙動

図-5 に乱した試料の応力-軸ひずみ関係、図-6 に過剰間隙水圧-軸ひずみ関係図を示す。有効拘束圧ごとに応力-軸ひずみ曲線の最大値  $(\sigma_a - \sigma_r)_{max}$  (ピーク強度と呼ぶ) を比較すると、法尻の方が法肩よりも高くなった。また、過剰間隙水圧と軸ひずみの関係は法肩の方が高くなった。これは法尻の方が細粒分含有率が低く、最大乾燥密度が高いという点はこの結果の裏付けとなっている。また、図-7、図-8 に乱した試料の法尻および法肩それぞれの有

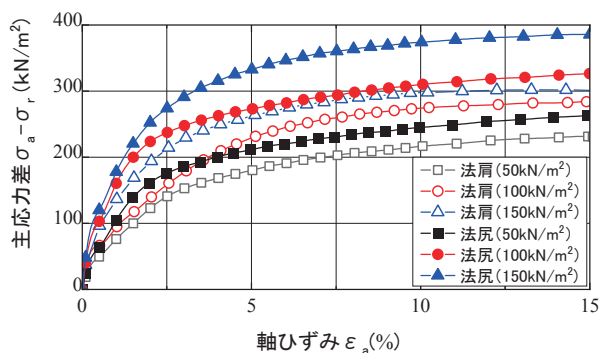


図-5 乱した試料（法肩，法尻）の応力-軸ひずみ関係

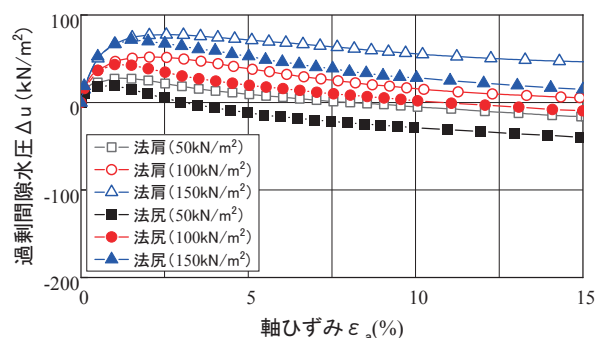


図-6 乱した試料（法肩，法尻）の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

有効応力経路を示す。試験結果を最小二乗法により直線近似すると、その直線の勾配が  $m_1$ 、切片が  $f_1$  であるとき、強度定数は次式で与えられる。

$$\text{内部摩擦角 } \phi' = \sin^{-1} m_1 \quad (1)$$

$$\text{粘着力 } c' = \frac{f_1}{\sqrt{1-m_1^2}} \quad (2)$$

これにより、乱した試料の法肩の強度定数は  $c'$  が 28.7 kN/m<sup>2</sup>、 $\phi'$  は 30.0°、法尻は  $c'$  が 20.1kN/m<sup>2</sup>、 $\phi'$  は 33.4° であることが分かった。道路土工擁壁工指針では、高さ 8m 以下の擁壁で土質試験を行うことが困難な場合は、経験的に推定した強度定数を用いてよいとなっており、粘性土（ただし  $w_L < 50\%$ ）は  $\phi=25^\circ$ 、砂質土は  $\phi=30^\circ$  と定められている<sup>17)</sup>。内部摩擦角については、法肩および法尻どちらも道路土工指針に示されている粘性土の推定強度を越えており、強度が比較的高いといえる。

### 4.3 乱さない試料のせん断挙動

図-9 に乱さない試料の応力-軸ひずみ関係、図-10 に過剰間隙水圧-軸ひずみ関係を示す。凡例は採取位置-採取方向（有効拘束圧）試験番号を示している。応力-軸ひずみ曲線において、(1) 軸ひずみ  $\epsilon_a$  が 3% までに主応力差の最大値  $(\sigma_a - \sigma_r)_{\max}$ （ピーク強度と呼ぶ）を迎えたあとに、一旦  $(\sigma_a - \sigma_r)$  が下がるが再度増加する、(2)  $(\sigma_a - \sigma_r)$  がピークを迎えたあとと変化が少ない、(3)  $\epsilon_a$  の増加とともに  $(\sigma_a - \sigma_r)$  が単調に増加する、3つのパターンがみら

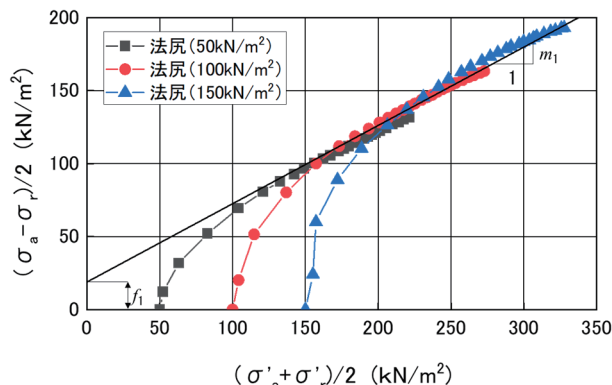


図-7 乱した試料（法尻）の有効応力経路

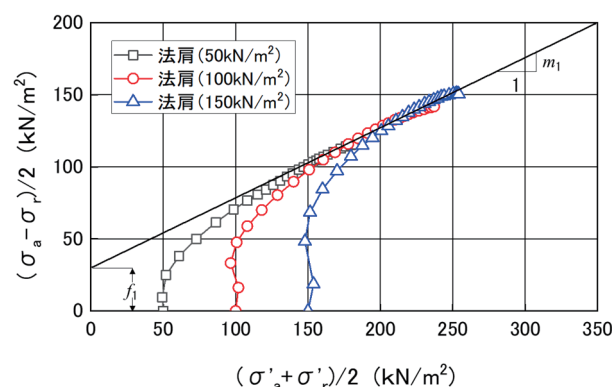


図-8 乱した試料（法肩）の有効応力経路

れた。

図-11 に乱さない試料の各供試体のピーク強度と乾燥密度の関係を示す。この結果より、乾燥密度が高い方がピーク強度が高くなる傾向にあることがわかった。また、法尻および法肩の鉛直供試体のピーク強度を比較すると、法尻の方が高くなることが分かった。

乱さない試料の過剰間隙水圧の挙動は、(A)  $\epsilon_a$  が 2.5% 程度のピークから減少する、(B)  $\epsilon_a$  が 2.5% 程度のピークから変化が少ない、(C)  $\epsilon_a$  とともに徐々に増加する、3つのパターンがみられた。ピーク強度が高い供試体ほどパターン (A) の傾向を示した。また、この結果と図-11 の乾燥密度より、乾燥密度が高い供試体ほどパターン (A) の傾向を示し、過剰間隙水圧の減少がより顕著になった。一方で、乱した試料の乾燥密度は、法肩で 1.165 g/cm<sup>3</sup>、法尻で 1.316 g/cm<sup>3</sup> を示し、過剰間隙水圧の挙動はいずれもパターン (A) となった。

図-12 に乱さない試料の有効応力経路を示す。乱した試料に比べて各供試体により傾向が異なったため、強度定数を求めることは困難となった。過剰間隙水圧の挙動のパターン (B) に該当する法肩-鉛直 (150 kN/m<sup>2</sup>) ①および法尻-鉛直 (120 kN/m<sup>2</sup>) ①の有効応力経路は、せん断中に軸方向応力と側方向応力の平均値が減少することに対して、パターン (A) および (C) は増加した。

本試験では、法肩および法尻の土被り圧に対して、法尻-鉛直 (150 kN/m<sup>2</sup>) ①、法肩-鉛直 (150 kN/m<sup>2</sup>) ①、【水

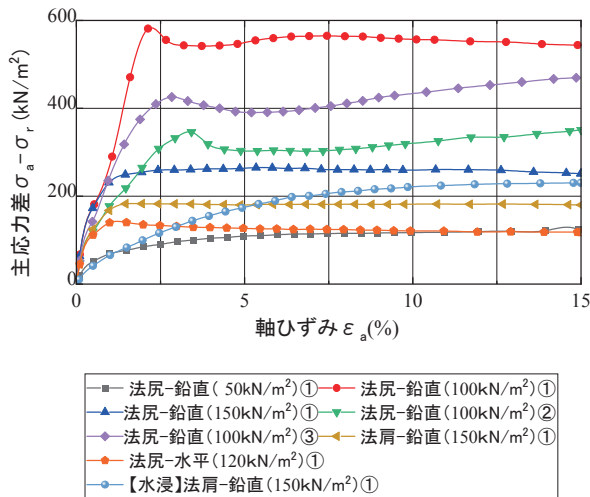


図-9 乱さない試料の応力-軸ひずみ関係

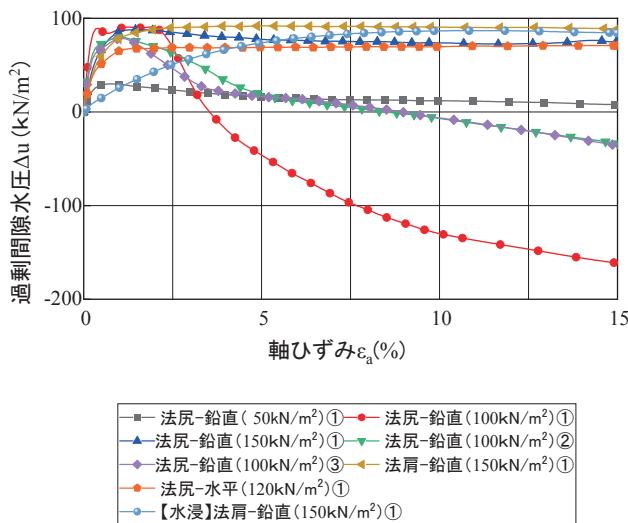


図-10 乱さない試料の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

浸】法尻-鉛直 (150kN/m<sup>2</sup>) ①が正規圧密となり、それ以外の試験ケースは過圧密となっている。正規圧密の試験ケースの過剰間隙水圧の挙動はパターン(B)および(C)を示し、正の過剰間隙水圧が発生し有効応力が低下している。そのため、一部のケースを除けば、過圧密粘土の試験ケースのピーク強度に比べて正規圧密の試験ケースは低くなっている。

三軸圧縮試験前に24時間水浸させた【水浸】法尻-鉛直 (150kN/m<sup>2</sup>) ①は、応力-軸ひずみ曲線のパターンは(3)、過剰間隙水圧の挙動はパターン(C)を示した。同採取位置および拘束圧である法尻-鉛直 (150kN/m<sup>2</sup>) ①と比較すると特異な挙動となった。一方で、ピーク強度は【水浸】法尻-鉛直 (150kN/m<sup>2</sup>) ①の方が高い値を示した。一般的にスレーキング性の材料は、スレーキングの進行により強度が低下するが、本研究の結果では確認できなかった。スレーキングによるせん断挙動や強度への影響を確認するためには、試験ケースを増やした更なる検討が必要である。

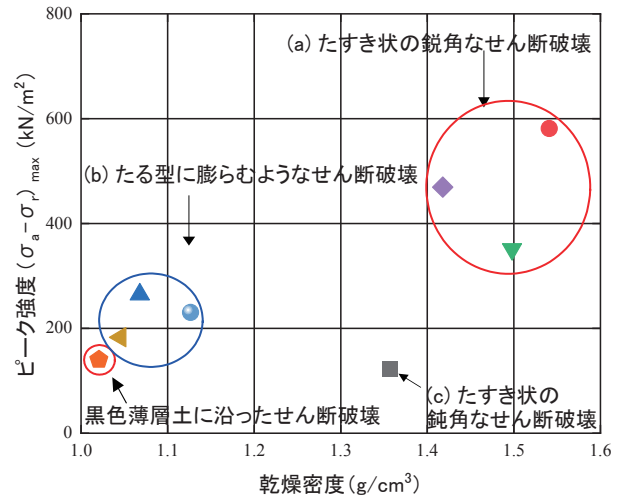


図-11 乱さない試料のピーク強度と乾燥密度の関係

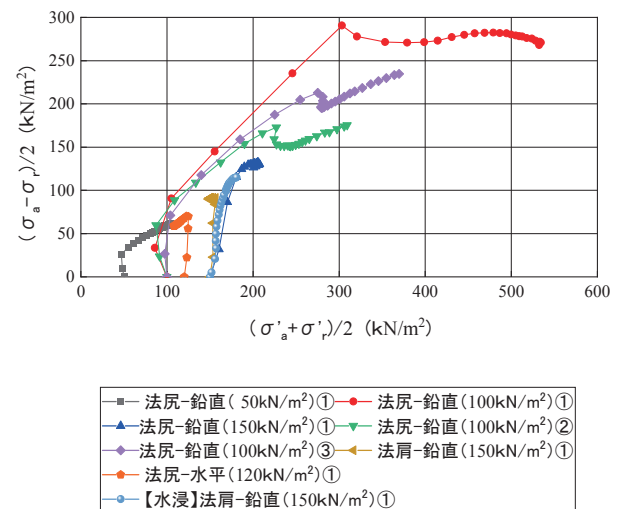


図-12 乱さない試料の有効応力経路

#### 4.4 乱さない試料の破壊モード

試験後の供試体を観察した結果、(a) たすき状の鋭角なせん断破壊、(b) 供試体がたる型に膨らむようなせん断破壊、(c) たすき状の鈍角なせん断破壊の3種類の破壊モードに識別した。それぞれの破壊モードの写真を図-13に示す。各破壊モードと応力-軸ひずみ曲線のパターンより、破壊モード(a)を示した供試体の応力-軸ひずみ曲線はパターン(1)軸ひずみ  $\varepsilon_a$  が3%までにピーク強度を迎えたあとに、1度主応力差が下がるが再度増加する傾向を示した。

また、図-11に各供試体のピーク強度と乾燥密度の関係において、3種類の破壊モードをグループ分けしたものを示す。この結果より、破壊モード(a)、(b)、(c)の順でピーク強度が高いことがわかった。また、 $\rho_d = 1.40$  g/cm<sup>3</sup>を超える破壊モードは(a)のみであるのに対して、

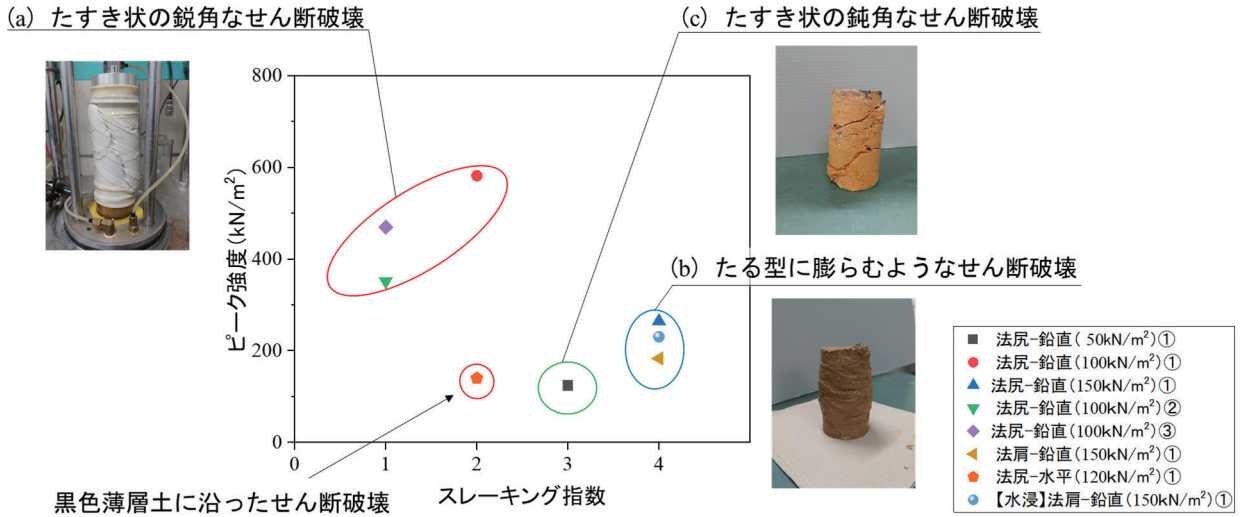


図-13 乱さない試料のピーク強度，スレーキング区分，破壊モードの関係



写真-3 黒色薄層土に沿ったせん断破壊

$\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ を下回る破壊モードは (b) および (c) になった。これより， $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$ を境として破壊モードが変化する傾向がある。ただし，法尻-水平 (120 kN/m<sup>2</sup>) ①のみが破壊モード (a) でありながら，ピーク強度は低く，乾燥密度は  $1.40 \text{ g/cm}^3$ を下回った。これについては，次節で述べる。

#### 4.5 乱さない試料の三軸圧縮試験後供試体のスレーキング指数と破壊モードの関係

三軸試験後の供試体を用いてスレーキング試験を行った。図-13 に試験結果を示す。ピーク強度が高い供試体ほどスレーキング指数が低い，すなわち，スレーキングしにくいことがわかった。スレーキング試験結果と破壊モードの相関を検討すると，スレーキング指数が2以下はモード (a)，スレーキング指数3はモード (c)，スレーキング指数4はモード (b) のように，スレーキング指数の大小によって破壊モードが変わることが分かった。

#### 4.6 乱さない試料の黒色薄層土沿いのせん断破壊

法尻-水平 (120 kN/m<sup>2</sup>) ①は破壊モード (a) ではある

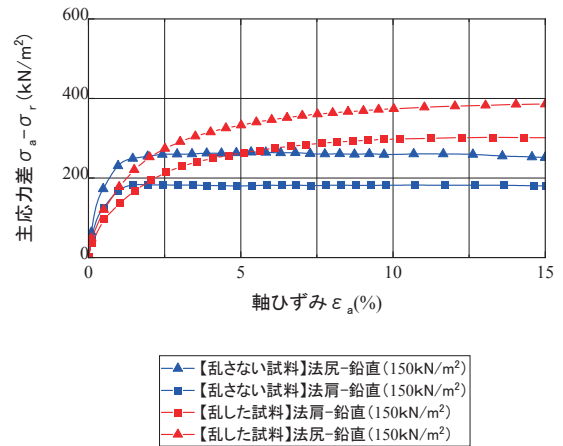


図-14 乱した試料と乱さない試料の応力-軸ひずみ関係

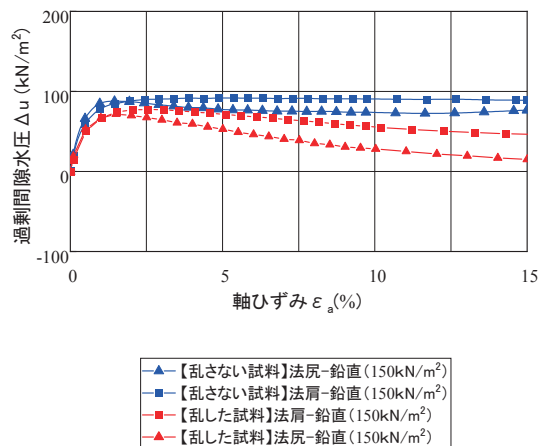


図-15 乱した試料と乱さない試料の過剰間隙水圧-軸ひずみ関係

ものの，供試体内に黒色薄層土が潜在し，それに沿ってすべり面が発生した。(写真-3)

これまでに破壊モード (a) のときピーク強度は比較的



高い値を示すとしたが、黒色薄層土を含む法尻-水平(120 kN/m<sup>2</sup>) ①は同じモードであるにもかかわらずピーク強度が140.1 kN/m<sup>2</sup>と低い値となった。これは本来高い強度を示す破壊モードでも、黒色薄層土層がすべり面となってせん断されるとせん断強度が低くなることを示唆している。

#### 4.7 乱した試料と乱さない試料の比較

乱した試料の破壊モードはいずれも(b)供試体がたる型に膨らむようなせん断破壊を示した。そこで、図-14および図-15において、乱さない試料で破壊モード(b)を示したもののうち、拘束圧が共通であるものを比較した。それぞれの乾燥密度は【乱した試料】法尻が1.316 g/cm<sup>3</sup>、【乱さない試料】法尻が1.068 g/cm<sup>3</sup>、【乱した試料】法肩が1.165 g/cm<sup>3</sup>、【乱さない試料】法肩が1.050 g/cm<sup>3</sup>となり、乱した試料の方が乱さない試料より乾燥密度が高くなった。また、図-14より乱した試料よりも、乱さない試料の方がピーク強度が低くなった。このことから、乾燥密度とピーク強度は比例関係にあるといえる。また、前述の乱した試料の試験結果では、ピーク強度が低い法肩は法尻に比べて内部摩擦角が低く、粘着力は高くなった。これらの傾向から、破壊モード(b)の乱さない試料は法肩の乱した試料より内部摩擦角が低くなる可能性がある。

#### 5. まとめ

乱さない試料の圧密非排水三軸試験およびスレーキング試験の結果、以下の結果が得られた。

- (1) 破壊モードは(a)たすき状の鋭角なせん断破壊、(b)供試体がたる型に膨らむようなせん断破壊、(c)たすき状の鈍角なせん断破壊の3種類の破壊モードに識別した。
- (2) 破壊モード(a)は、主応力差の最大値(ピーク強度)が高く、応力-軸ひずみ曲線は軸ひずみが3%までに主応力ピーク強度を迎えたあとに、一旦主応力差が下がるが再度増加する傾向を示した。
- (3) 軸ひずみの増加とともに主応力差が徐々に増加する供試体は破壊モード(a)の供試体に比べてピーク強度は低く、破壊モードは多様であった。
- (4) 破壊モード(a)と破壊モード(b)および(c)は乾燥密度1.40 g/cm<sup>3</sup>を境に変化する。
- (5) 黒色薄層土がすべり面となったケースでは、破壊モードがたすき状の鋭角なせん断破壊であってもピーク強度は低くなった。
- (6) 試験後の供試体のスレーキング試験により、ピーク強度が高い供試体ほど、スレーキングしにくい結果となった。また、スレーキング指数によって破壊モードの違いに傾向があった。

#### 謝辞

本研究は国土交通省中国地方整備局山陰西部国道事務所の受託研究の一環として実施したものである。関係各位に謝意を表す次第である。

#### 参考文献

- 1) 西村祐二郎, 今岡照喜, 金折裕司, 亀谷敦: 山口県地質図第3版(15万分の1)及び同説明書, 山口地質学会, 2012.
- 2) 河内義文, 竹田直樹, 鈴木素之, 山本哲朗, 田上愛仁: 関門層群頁岩風化土からなる切土法面の崩壊, 地盤工学研究発表会地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2145-2146, 2004.
- 3) 神谷知佳, 鈴木素之, 太田岳洋, 河内義文, 松下英次: 関門層群強風化土層における斜面崩壊リスクの検討, 第55回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1342-1344, 2020.
- 4) 神谷知佳, 鈴木素之, 太田岳洋, 河内義文: 関門層群における強風化安山岩のスレーキング特性と切土斜面の脆弱化に関する検討, 地盤と建設, Vol.37, No.1, pp.99-106, 2019.
- 5) 山本哲朗, 鈴木素之, 吉原和彦, 宮内俊彦: 不連続面土の光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊と設計強度定数, 地すべり vol.37, No.4, pp.49-57, 2001.
- 6) 植田芳郎: 下関市の地質-特に関門層群の層序と構造について-特に西中国地域を中心として-, 地質学雑誌, No.63, pp.26-34, 1957.
- 7) 村上允英, 今岡照喜: 西南日本内帯における後期中生代~古第三紀火山岩類の化学性, 岩石鉱物鉱床学会誌, No.2, pp.263-278, 1980.
- 8) 歌田実, 澤田臣啓: 西日本, 関門層群(白亜紀前期)の変質作用, 地質学雑誌, Vol.111, pp.206-216, 2005.
- 9) 山本哲朗, 鈴木素之, 河内義文, 原田博, 勝部安昭, 宮崎晃一: 関門層群砂岩風化土の諸土質工学的性質, 地盤工学研究発表会発表講演集, pp.2181-2182, 2002.
- 10) Kochi, Y., Yamamoto, T., Suzuki, M., Nishikawa, T.: Characteristics of Landslide and failure with their Countermeasure in Kanmon-group Slopes, Yamaguchi prefecture, Western Japan, Journal of the Japan Landslide Society, Vol.41, No.2, pp.172-181, 2004.
- 11) 山本哲朗, 鈴木素之, 福岡正人, 宮内俊彦, 岡林茂生, 瀬原洋一: すべり面上の光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊, 土と基礎, Vol.48, No.7, pp.24-27, 2000.
- 12) 藤原優, 永田政司, 佐藤尚弘, 滝口潤: 切土法面の継続的な弾性波探査の計測データに基づく長期安定性の評価, 土木学会論文集 C, Vol.74, No.4, pp.424-438, 2018.
- 13) 地盤材料試験の方法と解説【第一回改訂版】: 岩石のスレーキング試験方法, 地盤工学会, 2020.
- 14) 地盤材料試験の方法と解説【第一回改訂版】: 土の圧

密非排水(CU)三軸圧縮試験方法, 地盤工学会, 2020.

要集, Vol.68, p.III-233, 2013.

15) 日本道路協会：道路土工盛土工指針（平成 22 年度版）, p.219, 2010.

17) 日本道路協会：道路土工擁壁工指針（平成 24 年度版）, p.66, 2012.

16) 菊本統, 福田圭吾, 京川裕之, 中島伸一郎：地盤材料のスレーキング現象と物理・力学特性の変化に関する実験, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概

(2021 年 6 月 17 日 受付)