

和泉層群における切土のり面の崩壊特性と土質力学的検討

内田純二¹・矢田部龍一²・横田公忠³・高田修三⁴

¹正会員 日本道路公団 四国支社高松技術事務所 (〒760-0065 香川県高松市朝日町 4-1-3)

²正会員 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番)

³正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 愛媛県松山市文京町 3 番)

⁴正会員 工修 復建調査設計株式会社 交通技術部道路技術課 (〒732-0052 広島県広島市東区光町 2-10-11)

中央構造線と併走している四国縦貫自動車道の北側には和泉層群が、南側には三波川帯が分布している。頁岩と砂岩の互層から形成される和泉層群は、層理面が発達しており、流れ盤斜面において層理面に沿った崩壊や地すべりが発生しやすい。四国縦貫自動車道の建設工事に際しての切土工事によって、層理面の境界で変状・崩壊する、直線的な平面すべりが数多く確認された。そこで、和泉層群の切土のり面における崩壊・非崩壊を整理し、崩壊特性を検討した。また、直線的な平面すべりの安定は、摩擦角に支配されることから層理面でのすべりを想定して、頁岩同士の摩擦実験、粘性土のせん断試験、X線回折試験を行った。その結果、土砂化したのり面より、岩構造の残る流れ盤のり面での崩壊が多発することが明らかになった。

Key Words : Izumi group, cut slope, slope failure, x-ray analysis, shear strength

1. はじめに

四国縦貫自動車道は中央構造線と併走している。中央構造線の北側には和泉層群が、南側には三波川帯が分布しているが、両地質帯の岩体とも中央構造線近傍のものは断層運動により揉まれており、かなり脆弱化している。和泉層群は白亜紀後期の堆積岩で、岩石としての固結度は強く、硬岩に分類される。しかし、層理面が発達しており、流れ盤斜面において層理面に沿った崩壊や地すべりが発生しやすい。実際、四国縦貫自動車道の建設工事に際して、切土によるのり面崩壊や地すべり性崩壊が多数発生した。

四国縦貫自動車道の建設工事が始まるまでは、和泉層群における大規模な切土工事はあまり行われていない。したがって、過去において和泉層群の切土のり面の崩壊機構や対策に関する研究はほとんどなされていない。本報告では、四国縦貫自動車道の 100 箇所近い切土のり面を対象として崩壊特性を検討するとともに、崩壊機構検討のために和泉層群の頁岩や土砂状試料に対する土質試験を行い強度特性を調べた結果を述べる。

2. 和泉層群の地質特性と切土によるのり面崩壊事例

(1) 和泉層群の地質特性¹⁾

和泉層群とは、紀伊半島から四国西部まで中央構造線の北側に分布する白亜紀後期(約1億~6400万年前)の堆積岩である。四国地方では、図-1に示すように中央構造線の北側に沿って阿讃山脈から高縄半島基部、

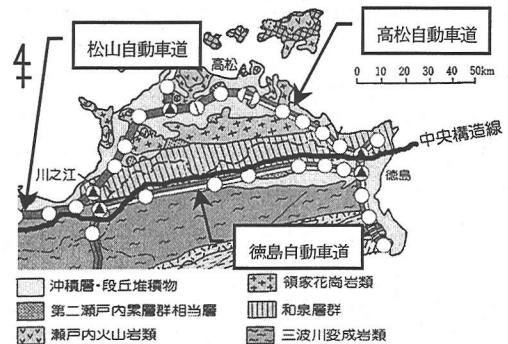


図-1 四国の地質分布と高速道路

さらに愛媛県長浜町沖の伊予灘に浮かぶ青島まで分布し、東西方向に細長く分布している。和泉層群は頷家変成岩類や花崗岩類を不整合に覆う基底礫岩に始まり、主に砂岩と頁岩の互層からなり、数層の酸性凝灰岩層を挟んでいる。砂岩は新鮮な部分は灰緑色であるが、風化が進むと黄土色を呈し、容易に破砕することができる。頁岩は黒色から黒灰色を呈しているが、風化すると灰色から茶褐色となる。風化した頁岩はスレーキングを起こしやすく、貝殻状に割れる。凝灰岩はガラス質で、白色から灰緑色を呈している。層厚は高々数十cmであり、硬い岩石である。

(2) 和泉層群の切土によるのり面崩壊事例²⁾

松山自動車道（香川県境～三島川之江）と徳島自動車道（藍住～脇町）の和泉層群における全切土のり面は70箇所、そのうち崩壊のり面は15箇所（崩壊率21%）、15箇所の崩壊のり面の中で流れ盤のり面が11箇所（同73%）、それ以外が4箇所（同27%）である。なお、この整理では、ブロック積み対策をあらかじめ施工したのり面の崩壊例は省いてある。

図-2に流れ盤のり面におけるのり面勾配と崩壊実績を岩盤区別に示す。また、図-3に受け盤のり面における同様な調査結果を示す。これらの図には、本四橋の鳴門ルートデータの並びにブロック積み箇所も併せて示してあり、流れ盤のり面でのデータは86箇所、受け盤のり面で65箇所の変状の有無をプロットしてある。なお、図中には、JH（日本道路公団）設計要領に定められたのり面勾配を示している。

図-2と図-3から和泉層群の切土のり面では比較的多くの崩壊が起きていること、受け盤より流れ盤で崩壊が発生しやすいことが分かる。受け盤でも7箇所の崩壊事例があるが、図中に記してあるように、6箇所は地すべり性の大規模な変状に伴うものであり、破砕帯や熱水変質他の地質要因が大きく影響している。破砕帯や熱水変質に伴う粘土シームは面的な連続性があり、のり面に沿って分布していると崩壊を引き起こしやすい。時にはボーリング調査では確認しにくい非常に薄いシームも存在するので切土時に入念な観察が要求される。

流れ盤で多くの崩壊が発生するといった結果は予想された通りであるが、土砂状のり面より軟岩に区分されるD~CL級以上の岩盤からなるのり面で崩壊が多く発生しているのは興味深い結果である。N値が50以下ののり面が1:1.5の切土勾配で安定しているのに対して、岩構造が残っているD~CL級からCL~CM級の岩盤からなるのり面では同じ切土勾配でも崩壊が多発している。

図-2より崩壊が集中しているD~CL級以上の岩盤

について、図-4に不安定のり面と安定のり面を整理した。図中にはJH設計要領に既に表示されている安定側と不安定側の境界線を波線で示してある。和泉層群の切土のり面では1:1.8の切土勾配でも多くの崩壊が

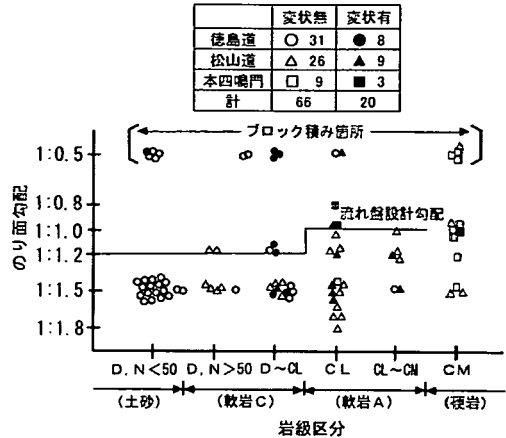


図-2 流れ盤のり面におけるのり面勾配と崩壊実績

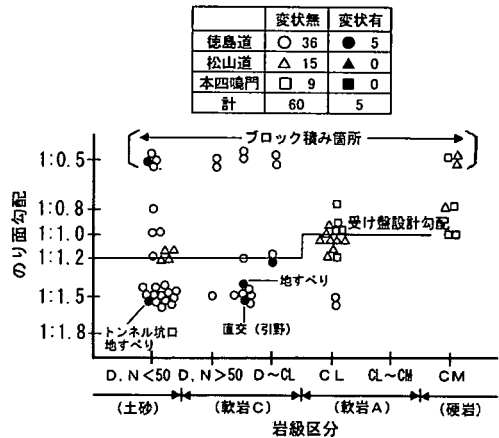


図-3 受け盤のり面におけるのり面勾配と崩壊実績

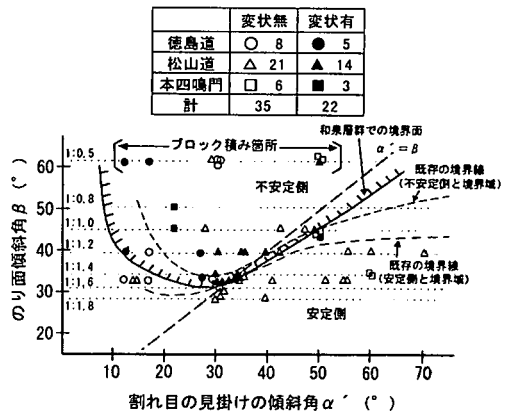


図-4 のり面傾斜角と層理面の見かけの傾斜角の関係 (D~CL級以上)

起こっている。これらのデータの多くは既往の図でみれば境界域から安定域に位置している。これから和泉層群の流れ盤の切土では既往の境界域を少し変更する必要があることがわかる。

以上のことから和泉層群の切土のり面の設計・施工に際して以下のことが指摘できる。

- ・受け盤構造であれば、岩級に関係なく、四国横断自動車道で採用している設計のり面勾配で切土可能と考えられる。なお、破碎帯や熱水変質などの影響がある地質では、この限りではない。
- ・流れ盤を呈しているのり面では、土砂化していれば1割5分の切土勾配で安定が確保できる。しかし、D~CL級の軟岩ではのり面が非常に不安定化しやすい。なお、50°を超える急な流れ盤は、のり面勾配1:1.2を確保すれば安定が確保できると考えられる。
- ・流れ盤のり面において層理面(割れ目)の見かけの傾斜角に対する安定のり面勾配を検討するためには、JHの設計要領に示されている「流れ盤のり面における割れ目傾斜角と限界の関係図」³⁾がほぼ適用できるが、1:1.5のり面で崩壊が多く起こったことから境界線を少し変更する必要がある。

3. 和泉層群におけるのり面崩壊に関する土質学的検討

現地崩壊資料の解析から、風化が進んで土砂化した土からなる切土のり面よりも、岩構造が残っている流れ盤を呈している風化岩からなるのり面の方に崩壊が多発していることが明らかになった。一般論としては、風化が進んで土砂化した土より、岩構造が残っている風化岩の方が強度は大きい。しかし、斜面崩壊の実例からみれば逆の傾向が認められる。この理由としては、和泉層群の浸透の問題とスレーキングの問題ならびに強度の問題等が考えられる。

浸透問題としては、一つは透水係数の問題が、もう一つは飽和帯の発生のしやすさの問題があげられる。一般的にいえば、透水係数は土砂状の方が大きいようにも思えるが、和泉層群の風化岩にはクラックが入っており、クラックへの浸透は早い。実際、和泉層群ののり面における降雨と地下水位上昇に関する現地観測を行った。紙面の都合上結果は参考文献⁴⁾に示すが、比較的少量の降雨で地下水位が上昇している。

和泉層群の頁岩は切土に伴う応力解放によりスレーキングを起こす。実際、切土後、裸地のまま放置されたのり面では表層がスレーキングにより徐々に崩落していくことが多い。和泉層群の頁岩のスレーキングに

関する研究は多くない。和泉層群の頁岩にスメクタイトは殆ど含まれておらず、第三紀層の泥岩のようなスメクタイトの膨張によるスレーキングとは機構が異なっている。和泉層群の頁岩が切土による応力解放によりどの程度の深さまでスレーキングする可能性があるのか今後検討する必要がある。

強度的には、当然、風化岩の方が強いようにも思えるが、和泉層群は層理面の発達した堆積岩である。頁岩層と砂岩層がきれいに互層をなしており、それらの境界部は弱面となりえる。即ち、和泉層群の風化岩の強度を求める場合に、最も弱い部分としては、鏡肌状を呈した頁岩層面の強度を考える必要がある。和泉層群の土砂化した土と風化岩に関して、このような観点から強度特性を求めた例はない。そこで、本研究では、和泉層群の風化岩の強度として最も弱い部分、即ち鏡肌状を呈した頁岩層面の強度を求める。また、土砂化した土のせん断強度を求めて、崩壊機構に関する考察を加える。

(1) 試料および試験方法

今回使用した試料は、愛媛県双海町(粒野)・同伊豫市(三秋)・同伊予三島市(的之尾)・香川県引田町(西・IC・東)徳島県池田町(佐野上浦)・同土成町(高尾)・同板野町(IC西・IC)・同鳴門市(池谷・大谷・IC)の13箇所から採取したものである。

試料の母岩と物性値を表-1に示す。今回の試料の

表-1 試料の母岩と物性値

試料名	母岩	I _p	ρ _s (g/cc)	粒度(%)				
				粘土 <5μm	シルト 5-75	砂 75-2	礫 2mm<	
粒野	頁岩	①	24.5	2.58	-	-	-	-
		②	27.3	2.68	-	-	-	-
		③	25.0	2.63	-	-	-	-
三秋	頁岩	①	19.0	2.68	15.3	32.8	18.1	0
		②	17.1	2.67	16.0	40.9	23.6	0
		③	15.0	2.72	29.3	33.7	23.0	0
		④	17.2	2.74	15.5	40.1	18.9	0
		⑤	21.4	2.67	16.7	50.8	32.5	0
		⑥	21.9	2.71	15.7	44.0	40.3	0
		⑦	19.5	2.74	22.6	41.6	35.8	0
引田西	砂岩	①	19.0	2.56	23.6	50.0	26.0	0
		②	15.3	2.55	39.7	58.8	12.2	0
	頁岩	③	19.9	2.62	36.0	43.8	21.2	0
		④	17.4	2.62	22.3	42.2	35.4	0
引田IC	砂岩	①	11.0	2.53	30.4	44.0	25.0	0
	頁岩	②	12.5	2.58	26.8	33.7	44.3	0
引田東	砂岩	①	14.9	2.73	13.3	56.5	28.5	0
	頁岩	②	14.8	2.77	15.5	57.5	28.5	0
佐野上浦	砂岩	①	19.9	2.72	-	-	-	-
	頁岩	②	38.2	2.72	-	-	-	-
高尾	砂岩	①	15.1	2.66	17.5	18.0	64.5	0
	頁岩	②	NP	2.70	15.3	43.8	40.8	0
板野IC西	頁岩	①	7.2	2.71	13.7	30.1	56.2	0
		②	22.4	2.71	36.1	44.2	19.7	0
		③	21.9	2.70	33.0	44.0	23.0	0
		④	19.6	2.70	28.0	40.4	31.6	0
池谷	頁岩	①	13.1	2.70	27.9	40.7	31.4	0
		②	15.0	2.72	15.2	35.5	49.3	0
		③	29.6	2.67	34.4	31.7	33.9	0
		④	24.1	2.68	36.0	32.7	31.3	0
大谷	砂岩	①	11.6	2.69	25.9	56.1	18.0	0
		②	14.3	2.70	25.8	35.9	38.3	0
		③	14.7	2.75	23.9	32.9	43.2	0
鳴門IC	頁岩	①	8.0	2.68	22.3	28.8	49.0	0

母岩は頁岩と砂岩である。塑性指数 I_p は、8.0~38.2 と比較的 low 塑性性である。

行った試験は、土砂化した土に対しては一面せん断試験を、風化岩に関しては頁岩を破碎し練り返した試料に対する圧密非排水三軸圧縮試験とリングせん断試験、現地での頁岩の一面せん断試験、それと頁岩同士の摩擦実験である。

土砂化した試料の強度定数は、一面せん断試験により求めた。試料としては、三秋・引田 IC・引田東の3試料で、2000 μm ふるい通過分を用いた。一面せん断試験の変位速度は 0.04mm/min で、上載荷重は 49,98,147kN/m² の3段階である。試料は所定の間隙比になるように突き固め、上載荷重を載荷した後、水浸させて湿潤状態で試験を行った。

頁岩の破碎試料に対する圧密非排水三軸圧縮試験およびリングせん断試験は次のように行った。試料は、表-1 に示した全 34 試料を用いた。供試体はいずれも 420 μm ふるい通過分を脱イオン水で練り返し再圧密させたものである。三軸圧縮試験では、供試体を軸変位速度 0.055mm/min でせん断し、有効応力基準でのせん断抵抗角 ϕ' を求めた。リングせん断試験は、せん断速度は 0.44°/min (試料の中心部 0.5mm/min) で行い、残留状態でのせん断抵抗角 ϕ_r を求めた。ちなみに、見かけの粘着力 c' および残留状態での粘着力 c_r はともにほぼゼロであった。

現地一面せん断試験は、徳島県板野町の板野 IC の切土工事現場で行った。試験法の概要を図-5 に示す。せん断箱は 30cm×30cm の方形で、高さは 10cm である。試験は砂岩と頁岩がほぼ水平に堆積している地盤を深さ 10cm 程度掘削して、頁岩層でせん断されるようにせん断箱をセットした後、掘削壁面を反力として油圧ジャッキでせん断箱に載荷することで行った。上載荷重は 10,20,30 kN/m² の3段階とし、一つの供試体を用いて段階的に上載荷重を変えてせん断試験を行った。なお、頁岩層は飽和度が 80% 前後と若干不飽和であった。

摩擦試験は、在来型の一面せん断試験機を使用し、0.4mm/min のせん断変位速度で試験を行った。摩擦試験の概要を図-6 に示す。使用した岩石は、三秋地区の比較的新鮮なものである。X線回折の結果、含有鉱物は、主に、長石・石英・雲母である。風化作用により生成されるクォーツ等の二次生成鉱物が含有されていないため、比較的新鮮な岩石であると判断された。この岩石をコアカッターで切断し、表面を研磨した後、試験に供した。

なお、リングせん断試験により残留状態でのせん断抵抗角を求めたのは、次の理由による。リングせん断試験により求められる残留状態でのせん断強度は、そ

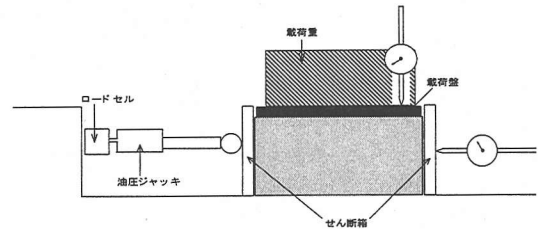


図-5 現地一面せん断試験概要

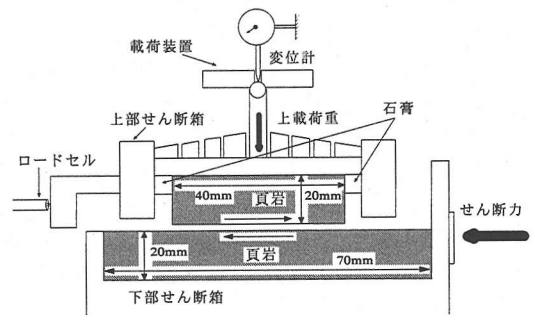


図-6 摩擦実験概要

の応力下で最も小さなせん断強度である。すなわち、大変形状態では土粒子同士が配向構造を呈して、面々摩擦となる。この状態ではダイレイタンスも起こらず、最終的には鉱物摩擦に近いものとなる。和泉層群は層理面が非常に発達しており、層理面は鏡肌状を呈している。層理面に凸凹さえなければ、残留状態のせん断抵抗角ですべてと思われる。また、岩石同士の摩擦実験を行ったのも同様の理由によるが、今回の摩擦実験に用いた頁岩の表面は鏡肌状には仕上げていない。

(2) せん断試験結果と考察

a) 土砂化した土の一面せん断試験

一面せん断試験は種々の初期間隙比(0.5 強から 0.9 弱まで)で行った。せん断抵抗角 ϕ_d と初期間隙比 e の関係を図-7 に、 ϕ_d と粘着力 c_d の関係を図-8 に示す。これから、初期間隙比により ϕ_d は 42°~27° 程度であることがわかる。また、今回の試験は不飽和状態でやっているのを見掛けの粘着力があるが、飽和状態ではほぼゼロになると思われる。なお、三秋地区の地表で採取した試料の間隙比は 0.69 である。

これらの試験結果から、表層の完全に緩んだ地盤は別として 35° 程度以上のせん断抵抗角を有していること、また不飽和状態では若干の粘着力を有していることなどがわかった。降雨時にも斜面は完全に飽和することはないので、この僅かの粘着力は斜面安定に大きく寄与する。

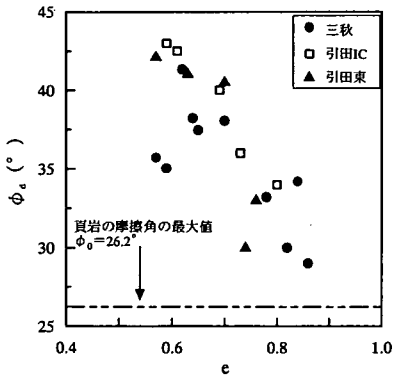


図-7 ϕ_d と c の関係

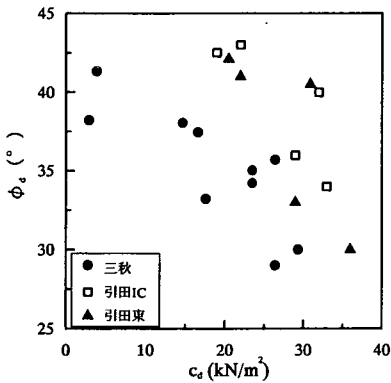


図-8 ϕ_d と c_d の関係

b) 頁岩の風化試料および破碎試料の三軸及びリングせん断試験結果

各試料のせん断抵抗角および含有粘土鉱物を表-2に、せん断抵抗角 ϕ' と ϕ_r の関係を図-9に示す。図上の点は、砂岩(○), 頁岩(●)を示している。今回試験を行った試料の ϕ' は、12.7~28.0°と試料によって15°近くも異なっている。 ϕ_r は8.0~21.2°と試料によって10°近くの開きがある。 ϕ' から ϕ_r への強度低下は、各試料によって異なっている。母岩とせん断抵抗角の関係を検討してみると、砂岩は $\phi' = 23 \sim 26^\circ$, 頁岩は $\phi' = 16 \sim 22^\circ$ の中にほとんどの試料が収まっている。図を見てもわかるように、頁岩を主体とする層の強度が低いことがいえる。しかし、砂岩で ϕ' の小さい試料がみられるが、膨張性粘土鉱物を含有しているからと考えられる。

c) 現地一面せん断試験結果

せん断強度と上載荷重の関係を図-10に示す。不飽和状態で試験しているので、32~61 kN/m²とかなり大きな見かけの粘着力が現れている。せん断抵抗角は30°強と繰り返し試料を用いた三軸試験によるものよりも若干大きく、土砂化した土のせん断抵抗角よりも

表-2 試料のせん断抵抗角と含有鉱物

試料名	母岩	三軸 ϕ' (°)	リング ϕ_r (°)	含有鉱物				
				石英	長石	雲母	燧石	膨張性
拉野	頁岩	① 28.0	17.5	○	○	○	○	○
		② 20.8	17.5	○	○	○	○	○
		③ 25.5	17.1	○	○	○	○	○
三秋	頁岩	① 17.6	14.9	○	○	○	○	○
		② 18.0	16.6	○	○	○	○	○
		③ 22.1	14.7	○	○	○	○	○
		④ 19.3	17.2	△	○	○	○	○
		⑤ 19.8	16.5	○	○	○	○	○
		⑥ 18.7	17.7	○	○	○	○	○
		⑦ 22.0	21.2	○	○	○	○	○
引田西	砂岩	① 23.7	16.9	○	○	○	△	▼
		② 24.5	18.7	○	○	○	△	▼
	頁岩	③ 21.7	17.2	○	○	○	△	▼
		④ 18.4	16.4	○	○	○	○	▲
引田IC	① 砂岩	25.8	17.2	○	○	○	△	▼
	② 頁岩	19.5	18.0	○	×	○	△	▼
引田東	① 砂岩	23.9	20.6	○	○	○	△	▼
	② 頁岩	20.5	19.5	○	○	○	△	▼
佐野上浦	① 砂岩	25.2	10.4	○	○	○	○	●
	② 頁岩	17.6	8.0	○	○	○	○	●
高尾	① 砂岩	16.4	13.9	○	○	△	△	●
	② 頁岩	21.1	19.0	○	○	○	△	▼
板野IC西	頁岩	① 21.1	19.2	○	○	○	△	▼
		② 20.6	16.8	○	○	○	△	▼
		③ 21.3	19.6	○	○	○	△	▼
		④ 16.7	13.9	○	○	○	△	●
池谷	頁岩	① 21.3	17.5	○	○	○	△	▼
		② 12.7	10.7	○	△	○	○	●
JH大谷	砂岩	① 15.9	12.3	○	○	○	○	●
		② 19.8	18.9	○	○	○	△	▼
大谷	砂岩	① 16.2	13.6	○	○	○	△	▼
		② 24.7	21.1	○	○	○	△	▼
		③ 23.9	19.2	○	○	○	△	▼
鳴門IC	① 頁岩	23.9	19.2	○	○	○	△	▼

○>○>△>×
●: スメクタイト
▲: パーミキュライト
▼: 混合層鉱物

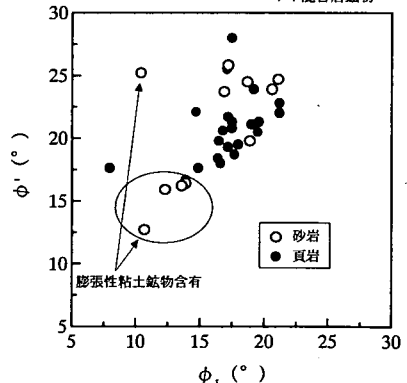


図-9 ϕ' と ϕ_r の関係 (母岩)

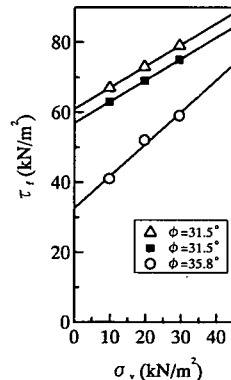


図-10 現地一面せん断試験結果

表-3 試料のせん断抵抗角と含有鉱物

	摩擦角 ϕ_0 (°)	含有鉱物			
		石英	長石	雲母	緑泥石
①	26.2	◎	○	○	—
②	21.3	◎	○	○	—
頁岩 ③	24.3	◎	○	○	—
④	25.3	◎	○	○	—
⑤	24.2	◎	○	○	—

◎>○>△>×

小さい。現地での一面せん断試験は試料のばらつきがあり詳細な比較は出来ないが、土砂化した土のせん断抵抗角より小さなせん断抵抗角が得られたことは興味深い。

d) 摩擦実験結果

三秋地区の頁岩の摩擦試験結果および含有鉱物を表-3に示す。摩擦角 $\phi_0=21.3\sim 26.2^\circ$ である。前述した土砂化した土のせん断抵抗角と比べると $10\sim 15^\circ$ 程度小さい。なお、頁岩を粉碎した、或いは風化した粘性土の残留状態でのせん断抵抗角は、頁岩の岩同士の摩擦角よりも更に小さい。これは頁岩の摩擦実験に用いた供試体をコアカッターでカットして作成したことも影響していると考えられる。

以上、行った各種のせん断試験の結果、岩構造を残した和泉層群の頁岩の方が土砂化したものよりせん断抵抗角が小さいことが明らかになった。これが、前述した和泉層群の切土のり面の崩壊に影響していると考えられる。

(3) 和泉層群の鉱物学特性

和泉層群の鉱物学特性ならびに鉱物の立場からみた和泉層群のせん断強度について考察を加えておく。X線回折試験での含有鉱物分析の結果、主な鉱物として、石英・長石・雲母・クロライトが含有されていることがわかった。堆積岩である和泉層群から採取した試料であることを考えると、これらの鉱物が含まれているのも納得できる。ここで注目すべき点が、膨張性を有する、スメクタイト・パーミキュライト・混合層鉱物を含有する試料が12試料あることである。特にスメクタイトは、長石と雲母の風化作用によって生成され、極端な膨張性をもち、せん断強度が小さい性質を持つ粘土鉱物である。そのスメクタイトを含む試料は、 ϕ の値が小さいことが表-2から明らかである。中には、 ϕ' から ϕ への強度低下が約 15° という試料もみられる。

ϕ' と ϕ の関係を図-11に示す。白いポイントは膨張性粘土鉱物を含有しない試料、黒いポイントは含

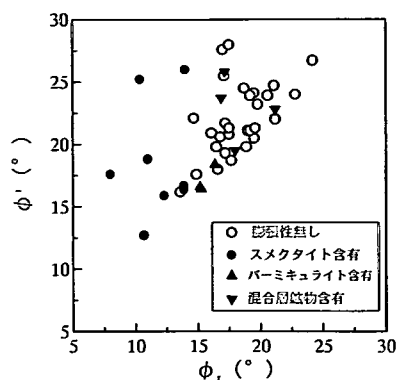


図-11 ϕ' と ϕ の関係(膨張性有無)

有する試料を示している。さらに、含有している試料については、スメクタイト(●)・パーミキュライト(▲)・混合層鉱物(▼)に分類している。これより、膨張性粘土鉱物を含有している試料でも、 ϕ' が大きい試料があることがわかる。 ϕ については、膨張性粘土鉱物を含有している試料は小さいことがわかる。しかし、混合層鉱物に関しては、含有していない試料と同じような ϕ を示しているため、混合層鉱物の影響はほとんど受けないと考えて良い。

次に、図-12に膨張性粘土鉱物を含有しない頁岩のX線回折試験結果の例を、図-13に砂岩の同様のものを示す。普段、のり面等で我々が見かける和泉層群の頁岩および砂岩のX線回折試験結果は、これらと同じような軌跡を示すことが多い。

先程述べたような、粘性土のせん断強度の低下に大きく寄与すると考えられる、膨張性粘土鉱物を含有する試料のX線回折試験結果を図-14~16に示す。図-14は、風化砂岩の例であるが、沈降定方位法とエチレングリコール処理の結果を比較すると、 $2\theta=8^\circ$ 付近のピークが大きな変化が確認できる。これは、典型的なスメクタイトを含有する典型的な例であり、極端に低い強度を示すため、特に注意が必要である。図-15は、パーミキュライトを含有している試料の例である。図-14ほどではないが、 $2\theta=8^\circ$ 付近のピークの変化が確認できる。この鉱物を含有する試料も、低い強度を示すことがある。スメクタイト同様に注意が必要である。図-16は混合層鉱物を含有する試料の例だが、前述したようにあまりせん断強度にはあまり影響のない試料である。

その他にも、和泉層群では膨張性を有する粘性土として、熱水変質作用により白色化したものが確認されることがある。それらについては、強度が低いことが明らかにされているが、詳しい事はわかっていない。しかし、崩壊予備軍であることは間違いないことから、注意が必要である。

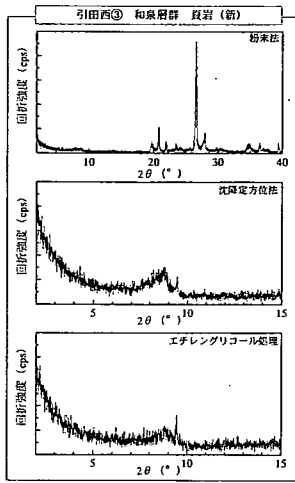


図-12 頁岩のX線回折試験結果

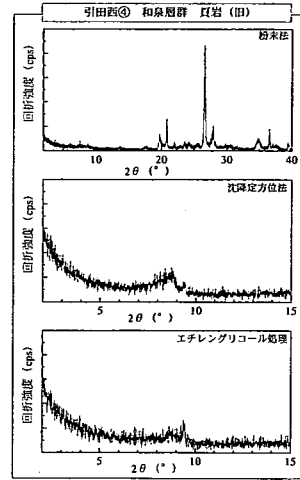


図-15 バーミキュライト含有の例

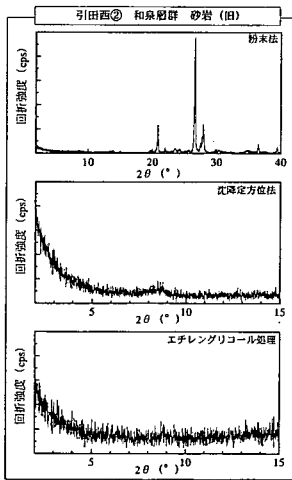


図-13 砂岩のX線回折試験結果

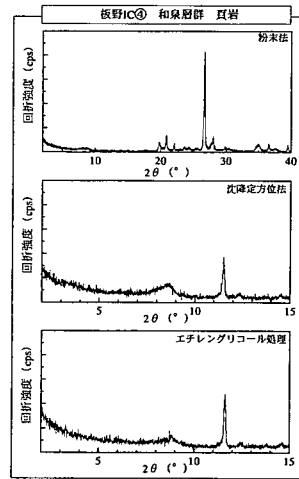


図-16 混合層鉱物含有の例

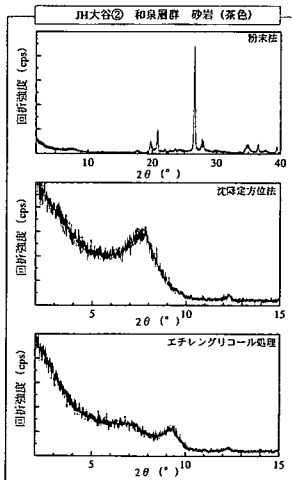


図-14 スメクタイト含有の例

何れにしろ、今回試験した頁岩の岩同士の摩擦角は 25° 程度、頁岩を破碎した、もしくは風化した粘性土の ϕ' は $20 \sim 30^\circ$ 、 ϕ_r は $8 \sim 23^\circ$ 程度である。土砂化した土のせん断抵抗角が 35° 程度であったのと比べると $10 \sim 20^\circ$ 程度も大きい。この違いが1割5分でカットした土砂状のり面と風化岩のり面の崩壊・非崩壊に大きく影響していると結論できる。

以上のことから、一般的にピーク時のせん断抵抗角 ϕ' は、頁岩を母岩とする試料より砂岩を母岩とする試料の方が、大きい値が得られると考えられる。しかし、スメクタイトなどの膨張性粘土鉱物を含有する場合は、砂岩・頁岩に関係なく、大幅に強度低下を生じる可能性を秘めている。そのため、建設工事を行う際に、問題を引き起こす事があるかもしれない。しかしこれらの性質は、各地の試料により異なると考えられることから、試験を行って検討を加えることが必要である。

4. おわりに

和泉層群における切土のり面の健全のり面および崩壊のり面を岩級区分と崩壊のり面勾配により整理し、その結果に基づいて設計法を検討した。また、崩壊機構に関して、せん断強度試験に基づいて検討を加えた。得られた結論を以下に示す。

- 1) 土砂状のり面より岩構造の残った流れ盤を呈するのり面で崩壊が多く起こっていることが分かった。一般的には、風化が進んで土砂化した土からなるのり面の方が崩壊が起こりやすいと考えられるが、和泉層群では逆の傾向がみられる。
- 2) 受け盤構造であれば岩級区分に関係なく四国横断自動車道で採用している設計のり面勾配で切土可能と考えられる。なお、破碎帯や熱水変質などの影響がある地質ではこの限りではない。
- 3) 流れ盤構造では土砂化していれば1割5分の切土勾配で安定が確保できるが、CLやCMクラスの軟岩からなるのり面は非常に不安定化しやすい。しかし、流れ盤を呈していても急な流れ盤の場合には、安定が確保できると考えられる。
- 4) 流れ盤のり面において層理面の見かけの傾斜角に対する安定のり面勾配を検討するためには、日本道路公団の設計要領に示されている「流れ盤のり面における割れ目傾斜角と限界」の関係図がほぼ適用できるが、1:1.5 のり面で崩壊が多く起こったことから境界線を少し変更する必要がある。
- 5) 種々のせん断試験の結果、土砂化した土のせん断抵抗角の方が岩構造の残った頁岩のそれよりも大きいことが分かった。これが土砂化した土からなるの

り面よりも岩構造の残った流れ盤のり面で崩壊が多く発生する主要因の一つである。

和泉層群の切土のり面の崩壊機構に関して資料解析とせん断試験に基づいて考察を加えた。今後、和泉層群のスレーキング特性や浸透特性の面からも検討しなければならない。

謝辞：本研究を行うに際して試料採取や現地実験に際しては、JH 四国支社徳島工事事務所や松山工事事務所の担当者にお世話になった。鉱物分析には愛媛大学地域共同研究センターのX線回折装置等を使用した。また、科学研究費基盤研究(C)(2)の助成を受けた。なお、本研究の成果の一部は(財)高速道路技術センターの四国横断自動車道と和泉層群のり面対策現地検討会によるものである。以上、心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 長谷川修一、横瀬広司、斉藤実：四国の地形と地質、地盤工学会四国支部30周年記念誌、pp.7-26、1988。
- 2) 高速道路技術センター：四国横断自動車道(鳴門～板野間)和泉層群のり面対策検討報告書、1999。
- 3) 日本道路公団設計要領：第一集 土工編、pp.参3-18、2000、4。
- 4) 内田純二、山下直樹、大寺正宏、橋野直二、矢田部龍一：層理面に働く間隙水圧とのり面安定、第37回地盤工学研究発表会発表講演集、地盤工学会、pp.2155-2156、2002。

(2001.8.29 受付)

FAILURE PATTERN OF CUT-SLOPES IN IZUMI BELT AND STRENGTH EVALUATION

Junji UCHIDA, Ryuichi YATABE, Kinutada YOKOTA and Shuzo TAKATA

Many cut-slopes on the Izumi Belt in Shikoku suffered failure during the construction of Junkando expressway. Based on the orientation of rock bedding planes, these slopes are dealt in two categories: *ukeban*-rock planes with a reverse angle of dip and *nagareban*-rock planes with a dipping orientation. The number of failed slopes was greater in the *nagareban* structure than the *ukeban*, and most of the failed slopes consisted of medium hard rocks, whereas the slopes with soft rocks and ordinary soil were found stable. These observations interested the authors to investigate the causes of failure and the strength properties of the involved slope materials. As a result, it was found that the angle of friction for the medium hard rocks was comparatively small as they contain expansive clay minerals.