

山口県下の三郡変成帯における切土斜面に見られる豪雨時崩壊の特徴

Characteristics of Cut Slopes Failed by Heavy Rainfall in
Sangun Metamorphic Region in Yamaguchi Prefecture

山 本 哲 朗*	(Tetsuro Yamamoto)
大 原 資 生**	(Sukeo Ohara)
西 村 祐二郎***	(Yujiro Nishimura)
島 敏 史****	(Hiromi Shima)
高 本 直 邦*****	(Naokuni Takamoto)
瀬 原 洋 一*****	(Yoichi Sehara)

山口県中東部の美東-山口-徳山-錦にかけて分布する三郡変成帯（狭義には周防変成帯）における風化の著しい片岩類からなる切土斜面には豪雨の際に、比較的規模の小さい崩壊が繰返し発生している。特に、1993年の集中豪雨の際には、各地でいくつかの切土斜面が崩壊した。著者らはそれらの斜面を中心として、美東、宇部（A）および（B）、徳山、新南陽の5地点での総数19箇所崩壊した切土斜面に対して土質工学、岩石学および防災工学の立場から現地調査を行った。本文では最初に個々の斜面の崩壊状況、復旧工が記載され、その後で斜面のすべり崩壊の型とその特徴が述べられている。最後に、斜面の岩石および表層土の諸特性が記載されている。

キーワード：斜面安定、変成岩、降雨、地質学、事例、風化（IGC:H9/E6）

1. まえがき

山口県中東部の美東-山口-徳山-錦町にかけて、中生代トリアス紀に形成された千枚岩ないし片岩類を主体とする三郡変成岩類からなる三郡変成帯（狭義には2.2億年前に形成された周防変成帯）が分布し、これらの岩石の多くは白亜紀後期（6500～9700万年前）に花崗岩類の貫入に伴う接触変成作用を被ってホルンフェルス化していることが知られている^{1)・2)}。

片岩は片理面を有し、風化し易い性質をもっているため、三郡変成帯における丘陵地の片岩岩盤は、一般に脆くて土粒子構造が緩い地盤に変質しているのが大きな特徴である。そのため、この三郡変成帯には7箇所が地すべり地に指定されている。

また、三郡変成帯における切土斜面（人工斜面）では、従来から、豪雨時には必ずと言ってよいほどに比較的規模の小さい崩壊が繰返して発生している。特に、1993年の長雨と強い降雨強度を持った集中豪雨の際に各地で見られた多くの切土斜面の崩壊は、その典型例として特筆される。

道路の敷設工事、あるいは公共構造物および住宅の敷地の整地工事に伴い、三郡変成帯に切土斜面が造成される機会が今後、ますます増加するものと予想される。さらに、昨年の豪雨時の斜面崩壊を教訓として、このような切土斜面の安定性に対して地質学を初め、土質工学および防災工学の立場に立って調査を行い、その結果に基づいて切土斜面の豪雨に

*山口大学工学部社会建設工学科 助教授

***山口大学教養部地学教室 教授

*****山口大学工学部社会建設工学科 学生

**宇部工業高等専門学校 校長

****山口大学工学部機能材料工学科 教授

*****常盤地下工業株式会社 課長

対する対策を検討することが肝要であると考えられる。著者らは1993年の事例を中心として、三郡変成帯内で豪雨時に崩壊した5地点での総数19箇所の切土斜面について、その観点から現地調査を行った。

本文では、まず、その事例調査に基づいて明かにされた県下に分布する三郡変成帯の切土斜面に見られる豪雨時の崩壊の特徴を述べ、その後で斜面を構成する岩石および表層土の特性を記述した。また、この種の調査で看過されがちな斜面の復旧工法について言及した。

2. 山口県下での三郡変成帯の分布と調査地点

三郡変成帯は、北九州から中国地方を経て、中部地方西部にかけて延長650km、最大幅100kmにも及ぶ広い範囲に散在する変成岩地域を包括する名称である。「三郡変成岩」という呼称は福岡市東部の三郡山塊に分布する変成岩に由来する¹⁾。

三郡変成帯は、古生代末期から中生代初期にかけて起こった一連の高圧型変成作用によって形成された一つの大きな高圧型の変成帯であると長い間考えられてきた。しかし、最近の研究²⁾によって、それは形成の条件や年代の相違に基づいて、3つのタイ

プに分類されることが分かった。すなわち、それらは形成の古い順から列挙すれば、1) 三郡一連華変成帯(約3億年前の古生代)、2) 周防変成帯(約2.2億年前の中生代トリアス紀) および3) 智頭変成帯(約1.8億年前の中生代ジュラ紀) の3つである。

このうち、従来、山口県下で三郡変成帯と命名されていたものは、その分布面積が県全体の約11%を占める周防変成帯に相当する(図-1)。本研究では、この周防変成帯において豪雨の際に崩壊した5地点での総数19箇所の切土斜面を調査の対象にした。その地点は図-1に示すように、宇部(A)および(B)、美東、徳山、新南陽である。これらの地点における斜面のほとんどは、1993年の長期にわたり、かつ降雨強度のきわめて大きい豪雨時に発生したものであるが、崩壊履歴の顕著に見られる新南陽における斜面も含まれる。

三郡変成岩類は泥質片岩、砂質片岩、塩基性片岩といった千枚岩ないし片岩類と超苦鉄質岩(蛇紋岩類)からなるが、これらは白亜紀花崗岩類による接触変成作用を受けてホルンフェルス化しているものが多い。三郡変成岩類の生成とその記述の詳細については成書「山口県の地質」¹⁾を参照されたい。

3. 崩壊した斜面の事例

図-1の各地点で崩壊した斜面の規模およびタイプ、当日雨量および崩壊までの累積雨量(2週間雨量)、復旧対策工は、表-1にまとめて示す。

個々の斜面が崩壊に至った経緯、崩壊状況および復旧対策工を個々の地点ごとに以下に少し詳しく述べる。その後で三郡変成帯における切土斜面に見られる豪雨時の崩壊の特徴をまとめる。

(1) 宇部(A)

この地点で崩壊した6箇所の斜面I~VIの位置と崩壊の様子を図-2に示す。写真-1はすでに復旧

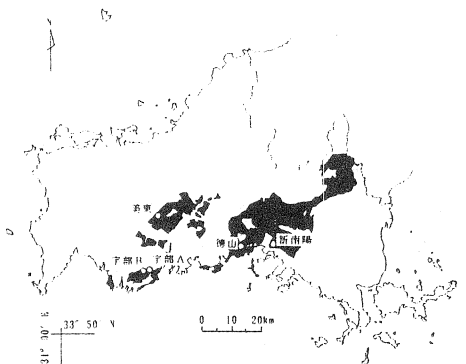


図-1 山口県下における三郡変成帯の分布および調査地点

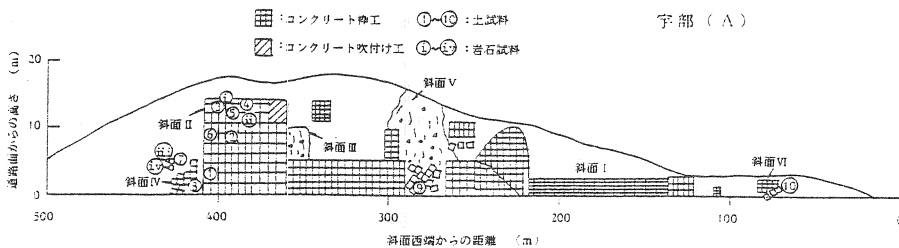


図-2 宇部(A)で崩壊した斜面の位置および岩石、土試料の採取位置

表-1 各地点における崩壊斜面の規模と対策工等のまとめ

地 点	斜面番号	崩 壊 規 模				崩 壊 の 型	降 雨 量 (mm)		対 策 工	発 生 日
		勾配α度	長さL (m)	幅W (m)	深さD (m)		1日雨量	2週間雨量		
宇部(A)	I	49-52	22.3	49.5	3.1	円弧すべり	—	—	井桁擁壁、涵管抑止坑	1985. 7
	II	46	18.7	50.4	2.5	平面すべり	25	298	コンクリート枠	1991. 7. 5
	III	44	7.3	11.8	1.2	"	3	247	プレキャストコンクリート枠	1993. 7. 29
	IV	46	17.7	16.1	0.6	"	51	188	"	1993. 3. 2
	V	40	13.4	42.3	1.8	"	"	"	"	"
	VI	49	6.4	5.0	3.7	"	"	"	"	"
宇部(B)	I	47	3.0	12.0	2.0	平面すべり	51	188	未定	1993. 3. 2
	II	45	20.5	15.0	2.7	"	157	156	"	1993. 7. 27
	III	46	13.0	25.0	2.5	"	51	188	"	1993. 3. 2
	IV	45	13.0	22.0	1.0	"	"	"	"	"
	V	45	18.5	30.0	?	"	—	—	コンクリート枠	1991. 6
	VI	42	41.0	20.6	5.0	円弧すべり	4	126	切り直し、大型ブロック	1990. 6. 15
美 東	I	47	22.4	37.4	9.2	円弧すべり	123	200	コンクリート枠、擁壁、涵管抑止坑	1993. 7. 2
	II	47	17.2	12.1	3.3	平面すべり	"	"	"	"
防 府	I	14	22.7	13.4	3.6	平面すべり	0)	(124)	市団簡	1993. 11. 25
徳 山	I	45	30.0	20.0	1.4	平面すべり	143	504	コンクリート枠	1993. 7. 17
新南陽	I	44	崩 壊 土 量 30m³			平面すべり	190	225	コンクリート枠	1990. 6. 15
	II	46	" 10m³			"	29	453	市団簡	1993. 7. 28



写真-1 宇部(A)での斜面の崩壊状況の一部

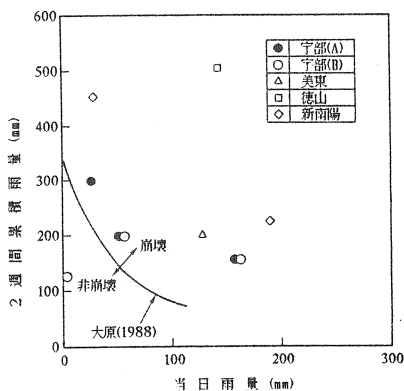


図-3 斜面崩壊が発生するまでの累積雨量

した斜面IIの方から見た当地点の斜面崩壊のほぼ全貌を示す。これらの崩壊は延長500mの三郡変成帯内で発生しているが、斜面IVはこの変成帯と白亜紀後期に貫入した花崗岩帯の境界部に位置する。図-2に示すように、崩壊した斜面の切土斜面全体に占める面積の比率は50%にも及んでいることが分かる。

道路敷設工事によって勾配1割3分(37.6°)から1割5分(33.7°)程度の標高125mの山腹が切取られて、この地点の切土斜面が作られた。軟岩状の片岩が露出していることから、斜面の勾配は通常のように1割(45°)に採られた。高さは20m程度である。斜面の表層土の崩壊に対する対策として、金網張芝工および水路工が講じられた。

斜面を整備した直後から斜面Iには小規模な地すべりのような動きが観測された。また、表-1に示すように、豪雨の際には種々の規模のすべり崩壊が繰返して発生した。

過去に崩壊した斜面に対して復旧工としてプレキャストコンクリート枠(図-2中に基盤目状の印で示す)を施工したものの、ほとんどには1993年の7月中旬～8月中旬にわたる梅雨およびその末期の集中豪雨の際に再度、崩壊が発生して、その復旧工が壊滅的な被害を受けた。その豪雨は、近年まれにみる長雨と強い降雨強度をもつものであり、図-3に示すように、その降雨量は従来の結果(大原(1988))と比較してみても、斜面の崩壊を誘発するのに十分なものであった。この図には他の斜面に対する降雨量データも示されているが、宇部(B)の斜面VIの場

合を除いて、いずれも降雨量も斜面の崩壊を発生するに十分なものであることが分かる。

それぞれの斜面の崩壊状況および復旧工について以下に記述する。

〔斜面Ⅰ〕昭和63年(1988年)に開始された斜面切取り直後から、地盤の動きが観測されたので、円弧すべりに対する対策工として平成3年(1991年)に鋼管抑止杭工(φ=350mm)および排水ボーリング工(φ=66mm)が施工された。この斜面は、地形上は山腹の裾野にあり、集水し易い場所に当たっており、塩基性片岩の岩盤が著しく風化した厚いシルトないし粘土層内にすべり面を有する円弧すべりが発生した。このタイプの崩壊は三郡変成帯における切土斜面の豪雨による崩壊の一つである。

〔斜面Ⅱ〕当地点の斜面の中で最も規模の大きい崩壊〔長さ(L)×幅(W)×深さ(D)はそれぞれ18.7m、50.4m、2.5m〕であり、3つの平面すべりが発生した。すなわち、塩基性片岩、花崗岩および塩基性片岩のホルンフェルスがそれぞれが風化した軟岩状の基盤岩とそれらがさらに風化した表層土層との境界で平面すべりが発生した。

このような軟岩状の片岩岩盤上での表層土層の平面すべりによる崩壊は、斜面Ⅰを除いた他の斜面にも見られ、このタイプの崩壊は片岩からなる斜面に見られる豪雨の際の崩壊の特徴的なものである。

崩壊後に斜面を削り直して整地した際に見られた斜面の地質断面を写真-2に示す。塩基性片岩のホルンフェルスは、塩基性片岩が花崗岩の貫入によ

って接触変成作用を受けて生成した直閃石を主要鉱物にする岩石である。その厚さは最大で8m程度であった。

復旧工としてコンクリート枠が施工された。

〔斜面Ⅲ〕過去に崩壊した斜面の直上部において表層土層が軟岩上で平面すべりを発生して崩壊した斜面である。すべり面には軟岩状の塩基性片岩(岩盤分類でC_L、土工区分で軟岩Ⅰ)が露出し、勾配40°の片理面は流れ盤の向きと一致していた。また、すべり面の側面には風化した花崗岩が露出していた。

〔斜面Ⅳ〕軟岩状の塩基性片岩のホルンフェルスと



写真-2 宇部(A)での斜面Ⅱの整地後に見られた岩石の分布状況



写真-3 宇部(A)での斜面Ⅴの崩壊状況

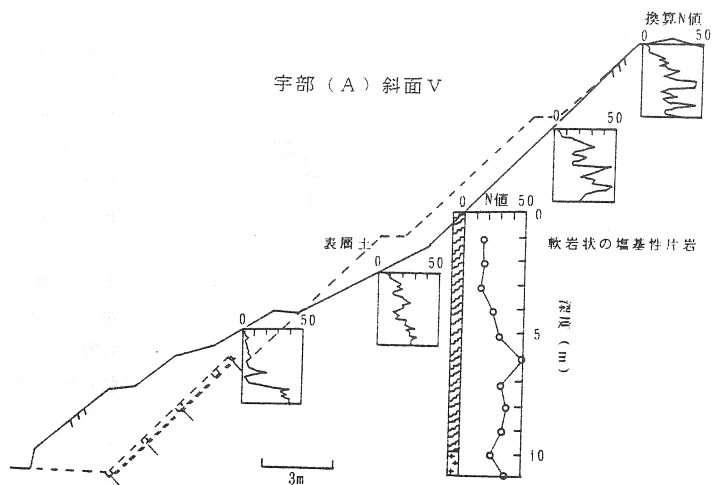


図-4 宇部(A)での斜面Ⅴの平面すべり

まさ土の境界で発生した表層土層の平面すべりによる崩壊であり、その規模は小さい。

〔斜面Ⅴ〕以前に崩壊しプレキャストコンクリート枠（一つの大きさは100cm四方で厚み15cm）を施工した以前に崩壊した斜面の上方部が1993年8月2日の豪雨の際に比較的大きな崩壊を発生した斜面である。これに伴い、小規模のアンカーを併用したプレキャストコンクリート枠が破壊した。その状況を写真－3に示す。

図－4の斜面横断面図に示すように、塩基性片岩の著しく風化した厚さ1.8mの表層土層が、表面のつるつるした軟岩状の塩基性片岩岩盤（岩盤分類でC_L、土工区分で軟岩Ⅱ）の片理面上において平面すべりを起こして斜面が崩壊した。その片理面の勾配は50～58°の範囲にあり、その向きは流れ盤のそれと一致する。また、すべり面には、表層土層のすべった痕跡である線状に引っかいた溝が随所に観察された。

〔斜面Ⅵ〕プレキャストコンクリート枠の背面で、塩基性片岩の風化土層と軟岩状の基盤岩との間で発生した平面すべりによる崩壊であり、その規模は小さい。

（２）宇部（Ｂ）

この地点は宇部（Ａ）から南西方向に1.8kmほど隔たった場所にあり、道路敷設工事に伴い、標高95mの丘陵地を開削して総延長600m程度の切土斜面が作られた。その勾配は1割程度、高さは最大でも10m程度である。

図－5に示すように、この地点では斜面Ⅰ～Ⅵの6箇所が崩壊が発生している。表－1および図－5に見られるように、当地点の斜面は宇部（Ａ）の場合と同様に、豪雨時を中心にして崩壊が繰返して発生しており、復旧工も既に2箇所（斜面Ⅴ、Ⅵ）で実施されている。他の4箇所の斜面は、すべて1993年

7月中旬～8月中旬にわたる梅雨時およびその末期の集中豪雨時に崩壊したものである。

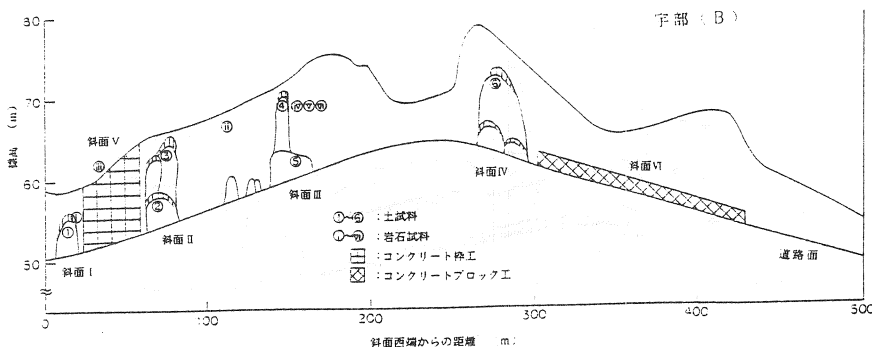
以下に、各斜面の崩壊の状況とその復旧工について述べる。

〔斜面Ⅰ〕勾配77°の片理面をもつ軟岩状の泥質片岩の岩盤上で、そのさらに風化した表層土層が平面すべりを発生して崩壊した斜面である。その状況は写真－4に示す。崩壊規模は小さいが、宇部（Ａ）での斜面Ⅴと同様に、平面すべりによって崩壊した代表的な斜面である。

〔斜面Ⅱ〕1993年7月27日に斜面先の近傍で偏平状に破碎した表面のつるつるした滑石岩を含む表層土層が小規模の崩壊（L=7.3m、W=9.3mおよびD=1.7m）を発生した。こうして斜面全体が不安定な状態となり、それ以降の豪雨の際に2回目の大規模な平面すべりによる崩壊が発生した。その規模はL=20.5m、W=15mに



写真－4 宇部（Ｂ）での斜面Ⅰの崩壊状況



図－5 宇部（Ｂ）で崩壊した斜面の位置および岩石、土試料の採取位置

も達し、滑落崖の高さは3mであった。

写真-5は最初の崩壊からほぼ10ヶ月経過した当斜面の崩壊の様子を示す。

〔斜面Ⅲ〕斜面Ⅱと同様に、偏平状のやや風化した滑石岩が、風化土層と一緒に比べて比較的新鮮な滑石岩の基盤岩（C_H級、中硬岩）上で、平面すべりを発生して崩壊した斜面である。

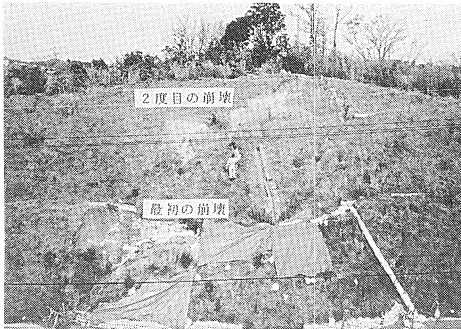


写真-5 宇部（B）での斜面Ⅱの崩壊状況



写真-6 宇部（B）での斜面Ⅲの滑落崖近傍のすべり面に見られる滑石岩

写真-6は滑落崖近傍のすべり面の状況を示す。

なお、斜面ⅡとⅢの間にあり、やや風化したボルダー状の片理面のない蛇紋岩のホルンフェルスが露出している斜面があるが、そこでは崩壊は発生していない。

〔斜面Ⅳ〕泥質片岩の風化した表層土層が、軟岩状岩盤上で平面すべりを発生して崩壊した斜面である。

〔斜面Ⅴ〕1991年6月に平面すべり崩壊が発生した斜面であり、復旧工にはコンクリート枠が施工された。

〔斜面Ⅵ〕当地点において最も早い時期（1990年6月）に崩壊した規模のもっとも大きい斜面である。その規模は、L×B×Dがそれぞれ41.0m、20.6mおよび5.0mである。この斜面はそれより以前の崩壊後に、1割2分の勾配に切り直された。

斜面のすべりの状況およびボーリング調査から判断して、今回の崩壊は円弧すべりによるものと推定された。この斜面は山腹の裾野部に位置し、集水が行われ易い場所に当たっているため、泥質片岩が著しく風化して生成した粘土層（N値は10程度）内にすべり面をもつ厚さ5m程度の円弧すべりが発生したものと考えられた。この崩壊のタイプは、宇部（A）における斜面Ⅰのそれと同じものである。なお、片岩の片理面は流れ盤となり、その傾斜角は60°であった。

この大規模な崩壊後に、斜面はさらに2割5分（38.7°）に切り直し、さらに斜面先には大型コンクリートブロック工が併用されたために、現在のように斜面の安定が維持されている。

（3）美東

土地の拡張整備に伴って、標高131mの丘陵地を開

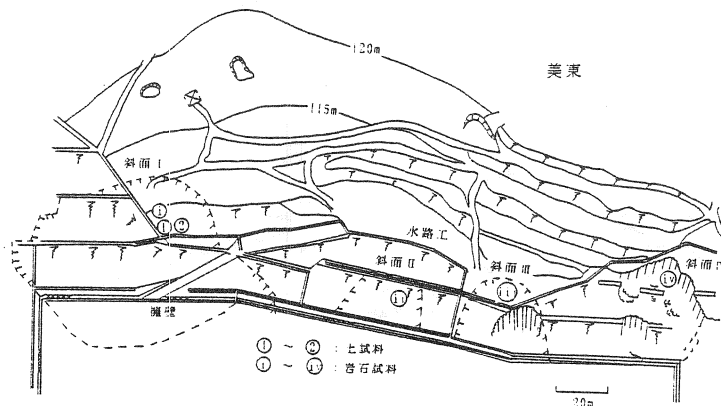


図-6 美東で崩壊した斜面の位置および岩石、土試料の採取位置

削して造成した全長240m、高さ約30m、勾配33°の切土斜面において、1993年7月2日の豪雨時に4つのブロックで崩壊が発生した（図-6）。崩壊当日の雨量は128mmであって、きわめて多い。以下に、各斜面の崩壊の概要を述べる。

〔斜面Ⅰ〕崩壊は円弧すべり状に発生し、その規模は $L \times W \times D$ がそれぞれ22.4m、37.4mおよび9.2mである。斜面には2～3段にわたって亀裂が発生し、これに伴い、既設の排水路工が破損したり、高さ2mのコンクリート擁壁に亀裂が入るなどの被害が発生した。擁壁の破損の様子を写真-7に示す。

この斜面は地形的に集水し易い場所に当たり、斜面内の地下水位は平常時でも高い状態にあった。こ

のような条件の下で滑石岩は著しく風化して含水比の高いシルト、一部は粘土に変質しており、それが豪雨時の崩壊の原因になったと考えられた。

図-7はこの斜面における推定すべり面を示すが、このシルト層（ N 値=10～13）と泥質片岩（黒色片岩）のホルンフェルス基盤岩との境界付近で円弧状のすべりが生じて、斜面は崩壊したものと推定された。このすべり面の位置は、孔内傾斜計による地盤のひずみ量および比抵抗値の測定値を加味して決定された。

〔斜面Ⅱ〕斜面Ⅰの場合と同様に円弧すべりが発生した斜面であり、崩壊の規模は $L \times W \times D$ がそれぞれ12.1m、13.5m、4.2mである。

〔斜面Ⅲ〕全体としては斜面Ⅰ、Ⅱの場合と同様な円弧すべりが発生しているが、一部には斜面Ⅳの場合と同様な平面すべりが発生しており、地質の異なる境界部に崩壊が発生した斜面である。崩壊の規模は、 $L \times W$ がそれぞれ14.3m、15.7mである。

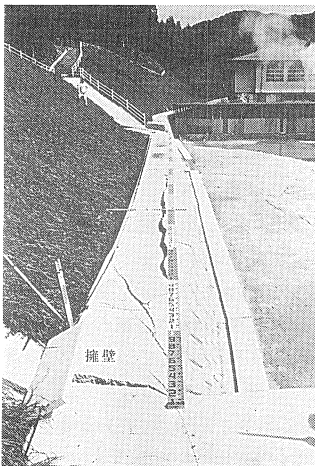


写真-7 美東での斜面Ⅰの崩壊による擁壁の被害



写真-8 美東での斜面Ⅰの復旧対策工

美東斜面Ⅰ

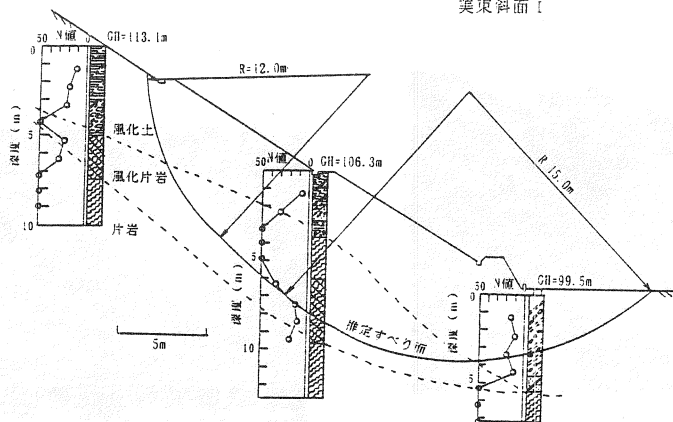


図-7 美東における斜面Ⅰの円弧すべり

〔斜面Ⅳ〕この斜面の崩壊は、偏平状の滑石岩の破砕片を含む表層土層が比較的新鮮な滑石岩岩盤上で平面すべりを起こして発生したものである。これと同じ崩壊は、宇部（Ａ）および宇部（Ｂ）の斜面でも見られた。

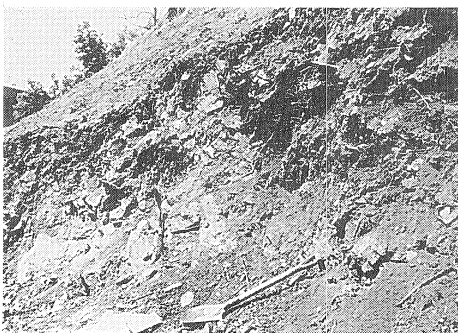
復旧工として、斜面全体を切り直した後に、コンクリート枠を施工する（写真－８）とともに、抑止杭工および横穴ボーリング工が併用された。

（４）徳山

1993年7月17日の集中豪雨の際に国道2号線沿いの標高283mの山腹の裾野にある切土斜面（勾配1割）が崩壊した。崩壊時の斜面の全景を写真－9に示す。当日雨量143mm、累積雨量504mmであり、近年まれに見る豪雨であった。崩壊の規模は $L \times W \times D$ がそれぞれ30m、20m、1.4m程度である。砂質片岩のホルンフェルスの風化した基盤岩（ N 値 ≥ 15 ）上でその著しく風化した表層土層が平面すべりを起こして崩壊が発生した。斜面先部におけるその状況を写真－10に示す。砂質片岩のホルンフェルスには縦横に節理面



写真－9 徳山での斜面Ⅰの崩壊状況



写真－10 徳山での斜面Ⅰの斜面先部に見られる砂質片岩のホルンフェルス

が観察される。

復旧工にはアンカー工を併用したコンクリート枠が施工された。

1984年3月26日の豪雨時には、この斜面と近接して同じ岩種からなる斜面において表層土層の平面すべり（ $L=10m$ 、 $W=3m$ ）が発生している。

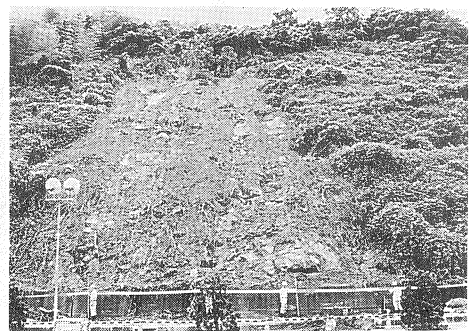
（５）新南陽

国道2号線沿いの切土斜面（勾配1割程度）においては、豪雨の際にときどき泥質片岩のホルンフェルスの軟岩状の基盤岩上で表層土層が平面すべりを起こして崩壊が発生している。表－1に示した斜面Ⅰの崩壊（1990年6月15日に発生）は最近10年間において当地点で発生した代表的な崩壊であるが、表層土層の厚さは小さく、崩壊土量は $30m^3$ 程度の小規模の崩壊である。その時の崩壊の様子を写真－11に示す。その復旧対策にはコンクリート枠が用いられた。

1993年7月28日に、この斜面Ⅰに近接する斜面3箇所（その内の1つが表－1での斜面Ⅱ）において同様に、小規模の平面すべり（崩壊土量 $10m^3$ ）が発生した。その復旧には、布団籠工あるいはコンクリート吹き付け工が採用された。

以上に述べてきたように、三郡変成帯における切土斜面に見られる豪雨時の崩壊の型は、1）平面すべり、2）円弧すべりによるものに大別される。その発生の割合は表－2に示すように、平面すべりの場合は8割強であり、円弧すべりの場合の2割弱を大きく上回っているのが特記される。なお、山口県内で1978～1985年間に豪雨によって崩壊した48箇所の砂質土自然斜面を対象にした資料調査では、平面すべりと円弧すべりの発生の割合はちょうど半々であるという結果が得られている³⁾。

一般に片理構造を有する片岩類や滑石岩は、水の



写真－11 新南陽斜面Ⅰの崩壊全景

表-2 斜面崩壊のタイプごとの発生比率

崩壊の型	件数	比率
平面すべり	16	0.84
円弧すべり	3	0.16

存在下で風化が一段と促進されるものと考えられる。したがって、この種の岩石からなる斜面が山腹の裾野のように集水し易い場所にある場合には、これらの岩石は著しく風化して含水比の高いシルト層あるいは一部は粘土層に変質する。そして豪雨時にはこれらの表層土層が基盤岩との近傍で円弧すべりを発生して斜面が崩壊する場合がある。表層土層の厚さは約5~9mにも達し、崩壊の規模が大きい点が特徴である。この代表例は宇部(A)の斜面Ⅰ、宇部(B)の斜面Ⅵ、および美東の斜面Ⅰ、Ⅱで見られた崩壊である。

一方、集水場所に位置しない斜面では、豪雨時に軟岩状の片岩類の基盤岩上で、その風化したシルトないし砂質土からなる表層土層が平面すべりを発生して崩壊する場合がある。この例は宇部(A)の斜面Ⅴ、宇部(B)の斜面Ⅰ、徳山の斜面Ⅰおよび新南陽の斜面Ⅰに見られた崩壊である。もう一つは、滑石岩の扁平状の破砕片が風化土層と一緒にその比較的新鮮な基盤岩上で平面すべりを発生して崩壊する場合である。この代表例として宇部(B)の斜面Ⅲが挙げられる。両方の平面すべりとも表層土の厚さは2.5m程度以下のものがほとんどであり、崩壊の規模は小さいのが特徴である。

このように、三郡変成帯における切土斜面の豪雨時の崩壊は、平面すべりに起因して発生する場合がきわめて多いことが明かにされたので、次に、この崩壊の発生機構について検討してみる。

4. 平面すべり崩壊の機構に対する検討

平面すべりの代表例である宇部(A)の斜面Ⅴについて、その発生機構を簡単な実験を行って検討した。

当斜面で採取した軟岩状態の塩基性片岩(27cm×60cm×6cm程度の大きさ)と崩落した表層土を用いて、両試料間のせん断強度を一面せん断試験から求めた。実験では下部せん断箱に軟岩を、上部に表層土を詰めて供試体(直径6cm、高さ2cm)を作製した。その含水比は自然状態および飽和状態の2とおりに変え

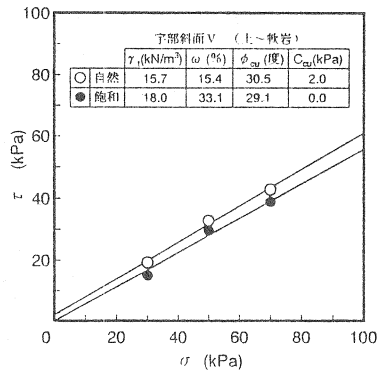


図-8 表層土と軟岩状の片岩間のせん断強度の測定結果(宇部(A)の斜面Ⅴ)

た。せん断速度は1mm/minとした。

実験から得られた各供試体の破壊線は、図-8に示す。同図には粘着力 c_{30} およびせん断抵抗角 ϕ_{30} の値も示されている。図中、○印は自然含水比状態の供試体の実験結果である。●印は自然含水比状態で作製した供試体を、せん断箱の中で1日間水浸させて作製した飽和状態の供試体の実験結果である。この図から、軟岩と表層土との間の ϕ_{30} は、自然状態および飽和状態ともほぼ30度であり、両者間には有意な差異は認められない。これに対して、 c_{30} については、自然状態では2kPa程度の見かけの粘着力が存在するが、飽和状態ではそれは消失しているのが分かる。

このことから、自然状態で表層土と軟岩間に存在する見かけの粘着力によってせん断抵抗角よりも大きな傾斜でもって安定を維持していた斜面が、今回のような豪雨の際にはこの見かけの粘着力がゼロとなるため、平面すべりが発生したものと解釈できよう。なお、土の飽和度をいろいろに変えての一面せん断試験の結果に基づいて、降雨による斜面の表層崩壊は、表層土が飽和した時に見かけの粘着力を消失して発生するという説明がなされている⁴⁾。

5. 斜面の岩石および表層土の記載

5.1 岩石

各斜面において採取した代表的な岩石およびその造岩鉱物を表-3に示す。その同定は顕微鏡観察およびX線回折試験によった。そのうちの代表的な岩石については、その偏光顕微鏡写真を写真-12~17に、またX線回折図を図-9~14に示した。

三郡変成帯の地質調査の結果¹⁾と同様に、表-3から今回の広範囲にわたる調査地点で採取された三

表-3 各斜面で採取した岩石名とその造岩鉱物

地 点	斜面 番号	試料 番号	岩 石	造 岩 鉱 物	顕微鏡写真 番号	X線回折図 番号
宇部(A)	II	i	塩基性片岩	緑泥石、白雲母、曹長石、石英、電気石、 不透明鉱物	12	9
		ii	塩基性片岩の ホルンフェルス	直閃石、滑石、不透明鉱物	13	10
宇部(B)	III	i	泥質片岩	白雲母、緑泥石、曹長石、石英、炭質物	—	11
		iv	滑石岩	滑石、不透明鉱物	14	12
		v	滑石岩	滑石、透角閃石、不透明鉱物	—	—
		vi	透角閃石岩	透角閃石、緑泥石、不透明鉱物	—	—
美 東	I	iii	蛇紋岩の ホルンフェルス	かんらん石、単斜輝石、蛇紋石、透角閃石、 白雲母、炭酸塩鉱物、不透明鉱物	15	13
		—	—	—	—	—
美 東	IV	i	泥質片岩の ホルンフェルス	黒雲母、白雲母、緑泥石、斜長石、石英、 りんかい石、炭質物、不透明鉱物	16	—
		ii	滑石岩	滑石、透角閃石、不透明鉱物	—	—
徳 山	I	i	砂質片岩の ホルンフェルス	黒雲母、白雲母、緑泥石、ざくろ石、斜長石、 石英、チタン石、不透明鉱物	17	14
新 開 場	I	i	砂質片岩の ホルンフェルス	黒雲母、白雲母、緑泥石、ざくろ石、斜長石、 石英、チタン石、不透明鉱物	—	—

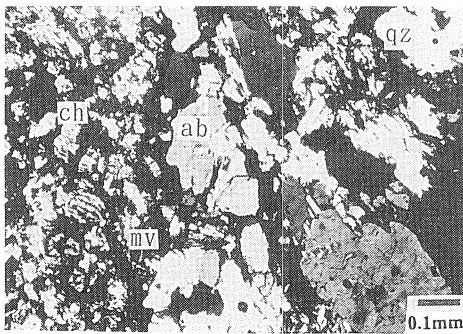


写真-12 宇部(A)での斜面IIで採取した塩基性片岩(No. i)の偏光顕微鏡写真(直交ポラーラ)
(ch, 緑泥石; mv, 白雲母; ab, 曹長石; qz, 石英)

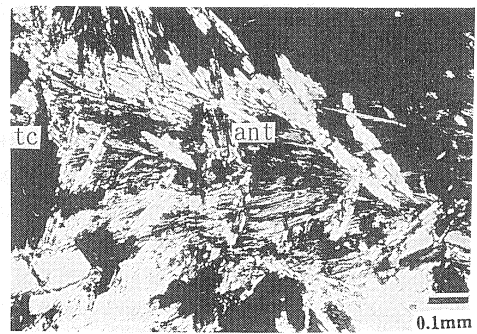


写真-13 宇部(A)での斜面IIで採取した塩基性片岩のホルンフェルス(No. ii)の偏光顕微鏡写真(直交ポラーラ)
(ant, 直閃石; tc, 滑石)

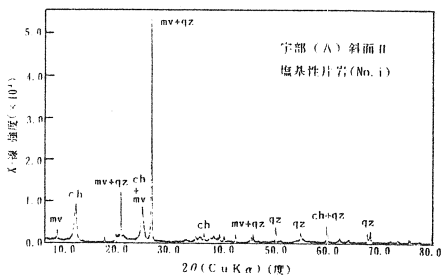


図-9 宇部(A)での斜面IIで採取した塩基性片岩(No. i)のX線回折図
(ch, 緑泥石; mv, 白雲母; qz, 石英)

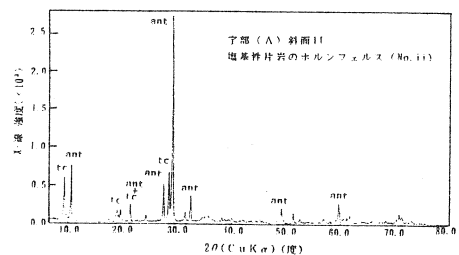


図-10 宇部(A)での斜面IIで採取した塩基性片岩のホルンフェルス(No. ii)のX線回折図
(ant, 直閃石; tc, 滑石)

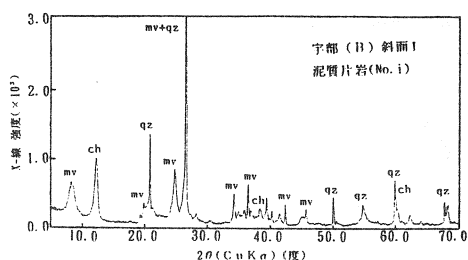


図-1 1 宇部 (B) での斜面 I で採取した泥質片岩 (No. i) の X 線回折図
(mv, 白雲母; ch, 緑泥石; qz, 石英)



写真-1 5 宇部 (B) での斜面 V で採取した蛇紋岩のホルンフェルス (No. iii) の偏光顕微鏡写真 (直交ポラー)
(ol, かんらん石; se, 蛇紋石; tr, 透角閃石)

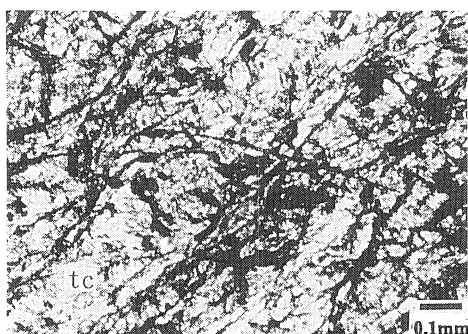


写真-1 4 宇部 (B) での斜面 III で採取した滑石岩 (No. iv) の偏光顕微鏡写真 (単ポラー)
(tc, 滑石)

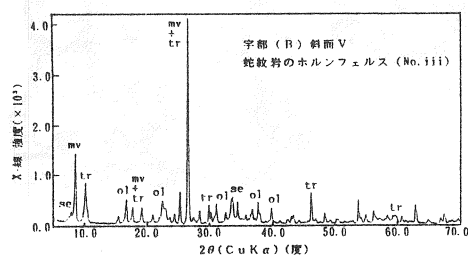


図-1 3 宇部 (B) での斜面 V で採取した蛇紋岩のホルンフェルス (No. iii) の X 線回折図
(ol, かんらん石; se, 蛇紋石; tr, 透角閃石; mv, 白雲母)

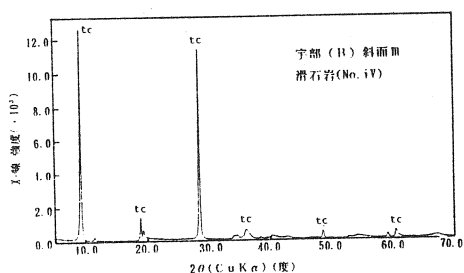
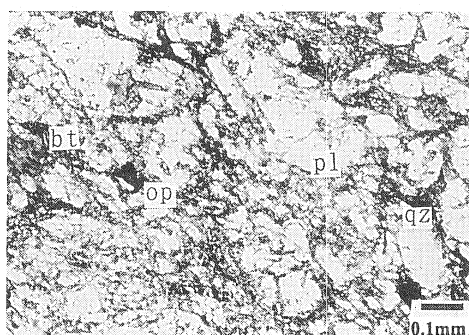


図-1 2 宇部 (B) での斜面 III で採取した滑石岩 (No. iv) の X 線回折図
(tc, 滑石)



写真-1 6 美東での斜面 I で採取した泥質片岩のホルンフェルス (No. i) の偏光顕微鏡写真 (単ポラー)
(bt, 黒雲母; pl, 斜長石; qz, 石英; op, 不透明鉱物)

郡変成岩類は、花崗岩の貫入に伴う接触変成作用を被ってホルンフェルス化しているものが多いことが分かる。たとえば、それらは宇部（A）および徳山における片岩のホルンフェルス、宇部（B）における滑石岩、透角閃石岩といった岩石である。一般に接触変成作用を強く受けたホルンフェルスほど、白雲母の含有量が減少し、黒雲母の含有量が増加することが分かっている。徳山の砂質片岩のホルンフェルス（写真－17）には他のホルンフェルスと比較して黒雲母が多く存在するので、それは他のものよ

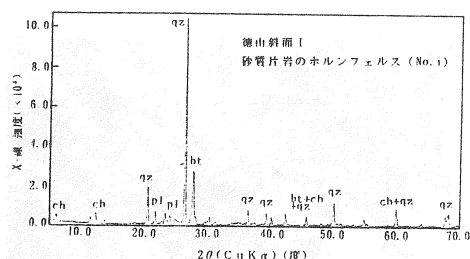


写真－17 徳山での斜面Ⅰで採取した砂質片岩のホルンフェルス（No. i）の偏光顕微鏡写真（単ポラー）
（bt, 黒雲母; pl, 斜長石; qz, 石英）

りは強い接触変成作用を受けたと言えよう。

表－3に記した岩石を風化の面から見ると次のようにまとめられよう。宇部（A）、（B）等における片岩類および徳山、新南陽における片岩類が花崗岩の貫入による接触変成作用を弱く受けて生成したホルンフェルスは、片理面の発達した風化し易い岩石である。

また、宇部（B）等の滑石岩は表面がつるつるして非常に滑らかであり、片理面が明瞭に見られる。すべり面付近ではそれは扁平状に破碎した岩片として存在する。これらの性質は、斜面のすべりを発生する重要な素因であると考えられる。



図－14 徳山での斜面Ⅰで採取した砂質片岩のホルンフェルス（No. i）のX線回折図
（bt, 黒雲母; ch, 緑泥石; pl, 斜長石; qz, 石英）

表－4 各斜面で採取した表層土の諸性質

地点	斜面番号	試料番号	G	U	D _{max} (mm)	D ₅₀ (mm)	FC(%)	P ₂₀₀ (%)	w _L (%)	w _p (%)	I _p	土質分類
宇部(A)	Ⅱ	1	2.63	31.4	9.52	0.42	25.3	7.8	29.3	N P	N P	S M
		2	2.31	119.1	26.5	1.2	14.0	3.8	66.5	30.6	35.9	S-C
		3	2.68	32.3	26.5	0.1	46.3	7.5	45.4	40.0	5.4	M L
		4	2.93	—	9.5	0.03	65.8	24.0	32.5	47.7	34.8	C H
		5	2.79	17.0	9.5	0.03	58.8	14.6	48.5	42.1	6.4	M L
		6	2.71	16.5	26.5	0.08	14.0	3.3	58.5	49.4	9.1	M L
	Ⅳ	7	2.71	26.0	19.1	0.08	49.6	9.0	45.2	36.0	9.2	M L
		8	2.61	37.3	6.0	0.31	20.5	3.0	32.3	N P	N P	S M
	Ⅴ	9	2.70	67.0	25.4	0.18	37.5	9.1	56.5	27.7	28.8	S C
	Ⅵ	10	2.82	168.0	46.5	1.3	30.2	5.6	61.3	34.3	27.0	G C
宇部(B)	Ⅰ	1	2.72	3.7	9.52	0.02	76.0	4.5	48.2	31.1	17.1	M L
		2	2.76	8.5	26.5	0.05	61.6	6.1	58.2	45.3	12.9	M H
	Ⅱ	3	2.73	6.7	26.5	0.04	76.6	6.5	46.3	33.8	12.5	M L
		4	2.79	8.7	9.5	0.03	77.7	13.0	57.1	39.5	17.6	M H
	Ⅲ	5	2.71	17.7	9.5	0.16	43.1	5.7	46.5	33.4	13.1	S M
		6	2.77	10.9	26.5	0.09	59.9	4.0	54.7	37.6	17.1	M H
	Ⅳ	1	2.59	—	22.8	0.03	68.1	33.9	56.8	29.5	27.3	C H
		2	2.77	5.91	22.3	0.05	31.9	3.0	33.2	29.1	4.1	M L
徳山	Ⅰ	1	2.64	20.5	61.1	0.06	30.1	12.0	42.5	28.5	14.0	M L
		2	2.66	5.5	58.8	0.06	16.0	5.0	35.4	26.2	9.2	M L
新南陽	Ⅰ	1	2.50	259.0	61.65	0.35	17.3	2.2	40.2	34.1	6.1	G M

一方、宇部（B）の蛇紋岩のホルンフェルスには片理面は見られなく、非常に硬くて風化し難い岩石である。

5.2 表層土

各斜面で採取した表層土試料に対して一連の物理試験を行った。表-4は、その結果および土の分類を取りまとめたものである。このうち、宇部（A）におけるNo.1およびNo.8の土試料は花崗岩が風化したまき土であり、他はすべて三郡変成岩およびそのホルンフェルスの風化した土である。

表-4から、表層土のほとんどは土の分類上、シルト（MLないしMH）および砂質土（SMないしSC）の範ちゅうにあり、このことは三郡変成岩類の風化土の土質面からの大きな特徴として挙げられる。

粘土（CH）は宇部（A）および美東の斜面に局所的に存在しているに過ぎず、それは集水し易い場所でとくに風化し易い片岩の風化が促進されて生成したものである。このように、三郡変成岩の風化土が粘土化している場合が少ないのは、表-3に示すように、粘土鉱物の代表であるカオリナイトを生成する長石、雲母といった鉱物がもともと三郡変成岩にほとんど含有されていないためと考えられる。

なお、カオリナイトは宇部（A）における塩基性片岩の風化した赤褐色の粘土（No.3）や宇部（B）における滑石岩が風化した茶色のシルトの他に、他の地点の斜面でもその存在は確認されてはいるが、その含有量は非常に僅かである。

宇部（A）における塩基性片岩および宇部（B）における滑石の風化した土の土粒子比重は2.7以上のものがほとんどであり、通常の土の場合の2.65~2.70よりも少し大きいようである。一方、徳山における砂質片岩のホルンフェルスの風化した土の比重は、

通常の土に近い値である。

図-15はすべての表層土試料の塑性図を示す。この図から、ほとんどの試料土のデータはA線より下位でB線の周囲に集まっていることが分かる。すでに述べたように、集水し易い場所で原岩が著しく風化されて生成された粘土、すなわち●印で示す宇部（A）での4つの土試料および△印で示す美東の1つの土試料のデータは液性限界および塑性指数の値は大きい。

6. まとめ

山口県内に分布する三郡変成帯における5地点での総数19箇所の切土斜面において見られた豪雨時の崩壊に対して地質学、土質工学および防災工学の立場から調査を行った。これらの斜面は高さ30m以下で、勾配1割（45°）のものがほとんどである。本調査によって得られた結論は、次のようにまとめることができる。

（1）斜面の崩壊はその8割強が平面すべり、2割弱が円弧すべりによって発生しており、前者の崩壊が圧倒的に多い。平面すべりは厚さ2.5m程度以下の表層土層が軟岩状の片岩岩盤の片理面（勾配は40~77°）に沿ってすべったり、あるいは滑石岩の偏平状の破砕片を含む表層土が比較的新鮮な滑石岩岩盤上ですべることで発生する。

一方、円弧すべりは斜面が集水し易い場所において、片岩あるいは滑石岩の著しく風化した厚さ5~9mの表層土層が基盤岩との境界付近ですべることで発生する。

（2）平面すべりによる崩壊は、最大級のもので長さ（L）×幅（W）×深さ（D）がそれぞれ30m、20mおよび1.4mである。一方、円弧すべりによる崩壊は、それはそれぞれ22.4m、37.4mおよび9.2mである。このように、後者のすべり面の深さは前者よりもかなり大きくて、一般には崩壊の規模も大きい。

（3）斜面の崩壊を起こし易い岩石は、片岩類およびそれが花崗岩の貫入による弱い接触変成作用を被って生成したホルンフェルスのように片理面を有する岩石である。一方、崩壊を起こし難い岩石は、蛇紋岩のホルンフェルスのように片理面を有しない岩石である。

（4）斜面の表層土はシルトおよび砂質土に分類されるものが主体であり、粘土はほとんど存在しない。これは代表的な粘土鉱物であるカオリナイトに

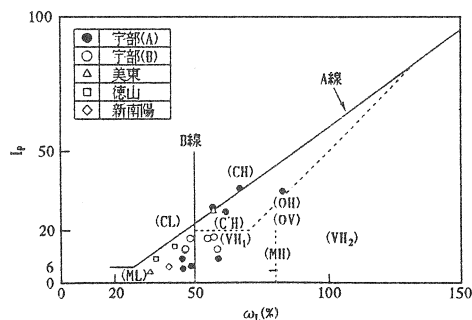


図-15 採取した表層土試料の塑性図

変質するところの長石や黒雲母がもともと三郡変成岩にきわめて僅かしか含まれないためである。粘土は集水し易い場所において局所的に存在するに過ぎない。

(5) 復旧対策としてはコンクリート砕工が頻用されているが、場合によっては斜面を2割5分に切り直すこともある。

(6) 上述したように、片岩の片理面(流れ盤)に沿って平面すべりの発生するケースが数多く見られる。このことから山腹斜面の切取りに際しては、事前にその地形および地質はもちろん、片理面の向きも含めた綿密な地盤調査を行うことが必要である。さらに、その結果に基づいてその現場に最適な対策工を予め実施しておくことは、三郡変成帯における切土斜面の防災対策を考える上で不可欠である。

謝辞

本調査を実施する当たり、(株)字部セントラルコンサルタントの永田洋文氏および建設省山口工事事務所の諸氏に種々の御世話を頂いた。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 高橋英太郎他：山口県の地質、山口県立山口博物館、1975
- 2) 山口地学会編：山口県の岩石図鑑、第一学習社、1991
- 3) 山本哲朗・大原資生：山口県下で発生した豪雨による急斜面地の崩壊の予測のためのデータベース化、山口大学工学部研究報告、Vol. 40、No. 2、pp. 71~79、1990
- 4) 渡 正亮・小橋澄治：地すべり・斜面崩壊の予知と対策、山海堂、1987