

光沢質黒色薄層土に起因した斜面崩壊とそのせん断強度測定

Slope failures resulting from glossy thin black soil and its measurement of shear strength

山本哲朗	Tetsuro YAMAMOTO	(山口大学工学部)
鈴木素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学工学部)
原田 博	Hiroshi HARADA	(日特建設(株))
寺山 崇	Takashi TERAYAMA	(山口大学大学院)

著者らは山口県内において梅雨や台風時期の集中豪雨によって発生した斜面崩壊を調査してきた。風化地山内でよくみかけるのは、節理面あるいは片理面に沈積した光沢のある黒色を呈した土層に沿ったすべり破壊である。そこで、この黒色土層の強度定数を求めるために従来よりも格段に小型・軽量化した「超簡易現場せん断試験機」を開発した。本論文では、まず黒色土層に沿ってすべりが発生した斜面の概要を述べる。次いで、黒色土の鉱物学的、化学的および物理的性質を述べるとともに、超簡易現場せん断試験の結果および黒色土を含む不攪乱試料に対する一面せん断試験の結果に基づいて、黒色土層で発揮されるせん断強度特性について考察した。

キーワード：黒色土、現場せん断試験、一面せん断試験、節理面、片理面、斜面崩壊、元素分析 IGC : E06

1. はじめに

著者らは、地質学、岩石学および地盤工学の観点から、山口県内で梅雨や台風時期の集中豪雨によって発生した三郡変成岩（狭義には周防変成岩）からなる山腹斜面の数多くの崩壊について調査してきた^{1)~8)}。

山口県下の三郡変成岩は、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を主とし、蛇紋岩などの超苦鉄質岩類を伴う¹⁾。これらの多くに共通する特徴として①片理構造が発達していること、②風化が非常に進んでいること、③片理面で容易に剥離することが挙げられる。これらがいくつかの事例において斜面崩壊の素因となっており、三郡変成岩の風化土は“問題土”として扱わねばならない⁷⁾。

ところで、塩基性片岩の風化土からなる切り取り斜面において降雨がほとんどないときに、その崩壊形態がきわめて特異な鋸状の崩壊が発生した²⁾。片理面には光沢質で黒色の薄層土が厚さ約 1mm で沈積しており、その面上ですべりが発生していた。この他、泥質片岩、砂岩、花崗岩からなる切り取り斜面においても片理面や節理面に薄層の光沢質黒色薄層土（以下、本文では単に“黒色土”と称す）が沈積して、それが崩壊の原因になったケースがあった⁹⁾。黒色土の鉱物学的、化学的および物理的性質を調べたところ、黒色を呈するのは土中に存在する微細で非晶質なマンガーンあるいは鉄の酸化物ないし水酸化物によると報告されている¹⁰⁾。これらは節理面や片理面といった不連続部に浸透した表面水あるいは地下水により酸素供給下において生成されたと考えられる。

以上のことを踏まえて、黒色土層に沿ったすべりに対する斜面の安定性を検討する場合には黒色土層の強度定数を求めておく必要があることから、著者らは超簡易現

場せん断試験機¹¹⁾を新たに開発し、黒色土層のせん断強度を直接測定することを試みた。また、比較のために現場から採取した黒色土層を含む不攪乱試料に対して一面せん断試験も実施した。

本論文では、まず黒色土層に沿ってすべりが発生した4斜面の地形、地質、岩質の概要と黒色土の沈積状況を記述する。次いで、黒色土の鉱物学的、化学的および物理的性質を調べた結果を述べるとともに、超簡易現場せん断試験および一面せん断試験の結果に基づいて、黒色土層のせん断強度特性について考察する。

2. 黒色土層がみられた自然斜面の概要

今回調査した山口県内の4箇所の切り取り斜面、「山口」、「宇部A」、「宇部B」および「山陽」の所在を図-1に示す。いずれも黒色土は丘陵地あるいは山地における山腹を開削して造成された切り取り斜面の不連続面いわゆる

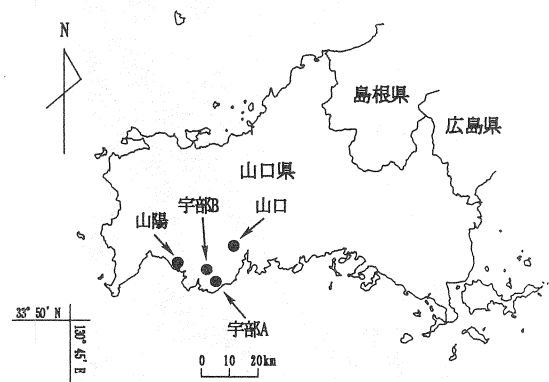


図-1 調査を実施した山口県内における斜面箇所

節理面や片理面に沈積していた。以下に、地点ごとに地形、地質、岩質の概要、黒色土の沈積状況を記述する。

(1) 山口

写真-1 に「山口」における現場の全体状況を示す。当該斜面の地質は中生代白亜紀前期の下関亜層群に属する地層で、岩種は砂岩であるが、花崗岩の貫入による変成作用を受けて、ホルンフェルス化している。節理面は間隔 6~8cm で縦横にみられ、それに沿ったすべりが発生していた。節理面は走向 N33° W、傾斜 88° E と走向 N57° E、傾斜 63° N が優勢である。写真-2 に砂岩斜面における節理面上の黒色土（厚さ約 0.1mm）の沈積状況を示す。これは道路敷設工事の際に、砂岩が分布する切取り斜面においてみられたものである。風化した砂岩とそれほど風化していない砂岩が幅 8m 程度で互層をなして堆積していた。その色彩は赤褐色から濃茶色であった。すり鉢状の崩壊部の斜面では全長 130.4m、幅 82.5m で、勾配は 28~34° を示し、比較的緩い。黒色薄層土のみられた面は走向 N3° W、傾斜 79° E であり、上述の節理面とは位置的に異なる。



写真-1 現場の遠景（山口）



写真-2 砂岩斜面節理面上の黒色土（山口）

(2) 宇部 A

写真-3 に「宇部 A」における現場の全体状況を示す。丘陵地における宅地造成に伴い、塩基性片岩からなる山腹が開削された。斜面下方部において石積み作業をしている際に、高さ 4.0m の切取り斜面において節理面（間隔 6cm 程度）に沿った小規模な斜面崩壊が発生した。写真-4 に節理面に沈積していた黒色土（厚さ約 0.2m~1.0mm）を示す。節理面は走向 N2° E、傾斜 67° S である。風化土の色彩は赤紫色、黄土色、黒色、青灰色と多様である。当該現場から南側約 300m の位置にある塩基性片岩からなる切取り斜面で片理面が鋸状に切り立った形態の崩壊が発生していた²⁾。

(3) 宇部 B

現場は、宇部インターの施工工事に伴って、山腹が開削された。蛇紋岩がアプライトの貫入による変成作用を受けて、ホルンフェルス化している。写真-5 に現場でみられた黒色土の沈積状況を示す。この現場の風化土も「宇部 A」の現場と同様に色彩が多様であった。

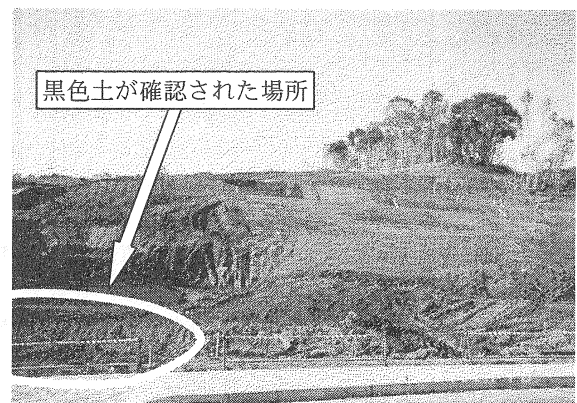


写真-3 現場の遠景（宇部 A）

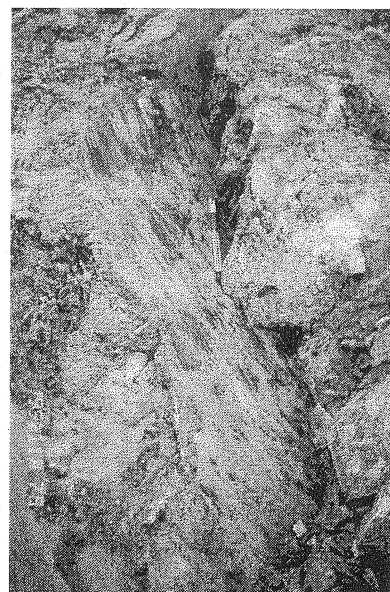


写真-4 三郡変成岩風化土斜面節理面上の黒色土（宇部 A）

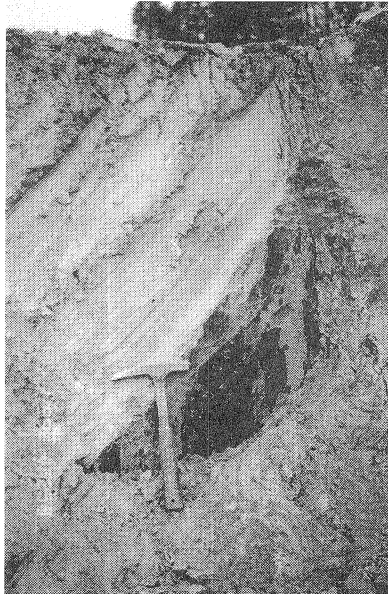


写真-5 黒色土の沈積状況 (宇部 B)

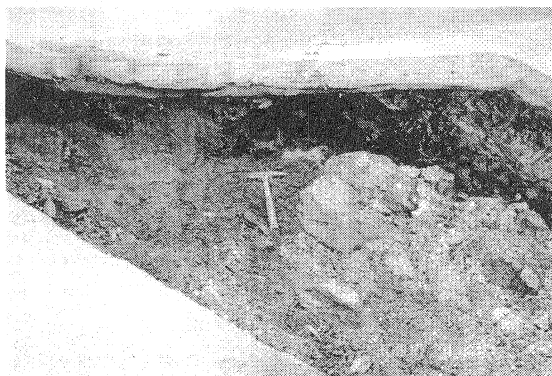


写真-6 頁岩斜面節理面上の黒色土 (山陽)

(4) 山陽

当該斜面の地質は美祢層群 (中生代トリアス紀) であり、岩種は頁岩が優勢である。頁岩には非常に多くの節理面が発達していた。この現場は標高 125m の山岳地内にあり、地形が起伏に富んでいるのが大きな特徴である。道路敷設に伴い、山腹が傾斜角 45° で切り取られたが、その一部において幅 69.0m、深さ 3.5m に及ぶ大規模な斜面崩壊が発生した。滑落崖および側方滑落崖の頁岩節理面には厚さ 0.5~1.0mm の黒色土が沈積していた。写真-6 に滑落崖でみられた黒色土を示す。側方滑落崖の黒色土は全長 11.0m、幅 0.6m の範囲で沈積していた。この黒色土面は走向 $N72^\circ W \sim N83^\circ W$ 、傾斜 $53^\circ N \sim 78^\circ N$ である。黒色土には 0.5~1.0mm 間隔で条線が認められ、直径 1~2mm の木の根が入っていた。

3. 黒色土の微視的構造および化学的・鉱物学的性質

黒色土表面の土粒子の微細構造を走査型電子顕微鏡 (以下“SEM”と略す) を用いて観察した。写真-7 にそ

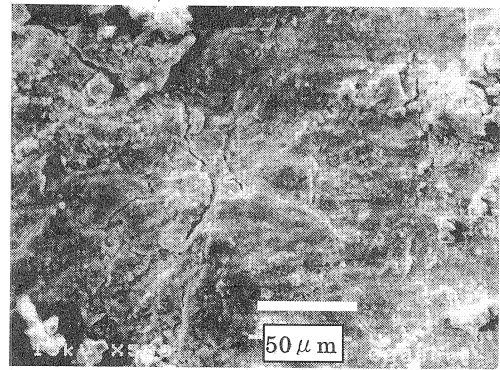


写真-7 山口における黒色土の SEM 写真

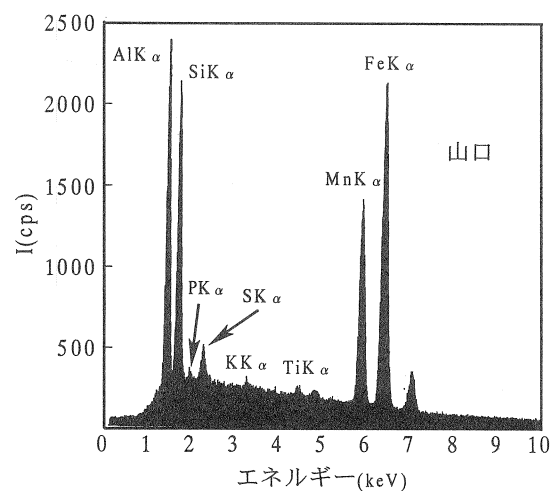


図-2 山口における黒色土のエネルギー分散型 X 線分析スペクトル

の代表例として「山口」の SEM 写真を示す。この写真は黒色土の水平面における土粒子構造を示しており、黒色土の表面は比較的滑らかである。なお、本試料以外の黒色土ではその表面が粗いものから滑らかなものまであった。

次に、走査型電子顕微鏡装置にエネルギー分散型 X 線検出器を装着して黒色土表面に含まれる元素を分析した。その代表例として「山口」の黒色土の結果を図-2 に示す。黒色土には珪酸塩鉱物を構成する代表的な元素である珪素、アルミニウムの他にマンガン、鉄が含有されていた。このことはこれまでの研究結果¹⁰⁾と同様であった。マンガン・鉄の酸化物や水酸化物の成因は 1. で述べたとおりである。この他、微生物の関与¹²⁾の可能性もあるが、水循環が活発であったことがこれらの生成にとって重要であったと考えられる。

また、黒色土の鉱物組成を把握する目的で、「山陽」の黒色土試料に対して X 線回折試験を実施した。黒色土に含まれる粘土鉱物はカオリナイト、スメクタイトであった。この他に、石英が存在することは確認できたが、マンガンおよび鉄を含む鉱物を検出することはできなかった。

表-1 黒色土下位に存在する土試料の諸物理定数（山陽）

土粒子の 密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	均等 係数 U_c	最大粒径 $D_{\max}$ (mm)	平均粒径 D_{50} (mm)	細粒分 含有率 $F_c(\%)$	粘土 含有量 $F_{\text{clay}}(\%)$	液性 限界 $w_L(\%)$	塑性 限界 $w_P(\%)$	塑性 指数 I_P	土質分類
2.712	47.5	4.7	0.050	79.1	19.0	56.8	39.2	17.6	MH

反力（試験者の自重を利用した手動操作でとる）

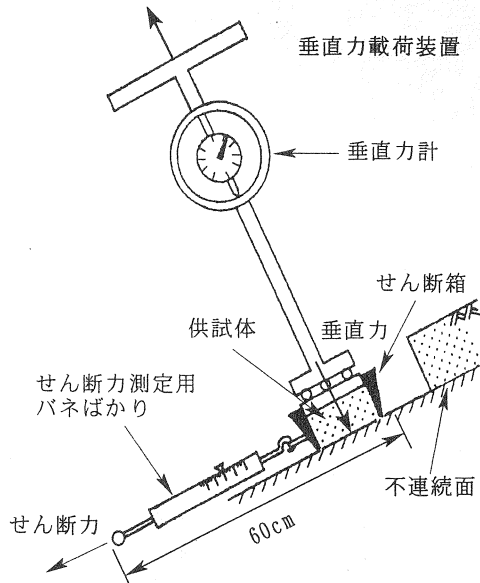


図-3 超簡易現場せん断試験機の概略

た。この理由として、マンガンおよび鉄を含む鉱物は結晶度が低いか、もしくは非結晶であることが考えられる。

4. 黒色土層下位にある土の物理的性質

黒色土自体については試験に足りる試料が得られず、物理的性質は調べることができなかった。そのため、黒色土層下位にある物理的性質を調べるために土粒子の密度試験、粒度試験、液・塑性限界試験を行った。代表例として「山陽」の土の物理的性質を表-1に示す。黒色土下位にある土は高液性限界シルト（MH）に分類される。これまでの研究においても黒色土下位の土は粘土（CH）、低液性限界シルト（ML）といった比較的細粒分の多い土で構成されることがわかっている。1.で述べたマンガンあるいは鉄の酸化物・水酸化物の生成過程を踏まえれば、水の浸透作用を受け、その結果、細粒分を多く含むようになったものと理解できる。

5. 黒色土のせん断強度測定

(1) 超簡易現場せん断試験機

斜面内に潜在する節理面・片理面等の不連続面での強度定数を求めるために、超簡易現場せん断試験機を開発

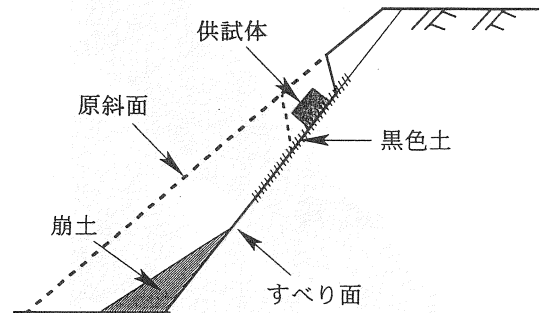


図-4 供試体作製状況の簡単なモデル

した。図-3に本試験機の概略を示す。この試験機はせん断力測定用バネばかり、垂直力载荷装置（垂直力計も含む）およびせん断箱（長さ6cm、幅6cm、高さ3cm）の3つの部分から構成されている。垂直力の反力は試験者の自重を利用した手動操作によりとっている。供試体上面の载荷板と垂直力载荷装置先端部の加圧板間には、摩擦力を低減させるためにボールベアリングが挿入されている。この試験機の長所として次のようなことが挙げられる。①従来の現場せん断試験機に比べて、装置の機構が極めて簡単である。②総質量は約3.6kgとかなり軽量であり、持ち運びが便利である。③試験現場が急斜面の場合においても比較的容易に試験を行うことができる。次に試験手順の概略について説明する。

- 1) 不連続面がせん断面と一致するように供試体をきれいに整形する（図-4参照）。
- 2) 供試体にせん断箱およびせん断測定用バネばかりを設置する。
- 3) せん断箱上面にボールベアリングを載せ、垂直力载荷装置を設置する。
- 4) 一定の垂直応力 σ_N を供試体に加えた状態でせん断する。せん断速度は1.0mm/minを標準として、せん断時間は6分である。なお、 σ_N は0～49 kPaの範囲で設定した。

試験では垂直応力の変動が±1.96 kPaの範囲内に収まるように注意している。しかし、これまでの経験では傾斜角が50°を超える急斜面においては垂直応力の保持が難しい。その他に、現場で困難な点を挙げると、実際のせん断面（黒色薄層土）とせん断面が一致するように供試体を成形することやせん断速度が一定になるようにせん断力を载荷することである。後者については、試験機のせん断力測定用バネばかりにスクリュージャッキを取りつけるなどの改良を行った。

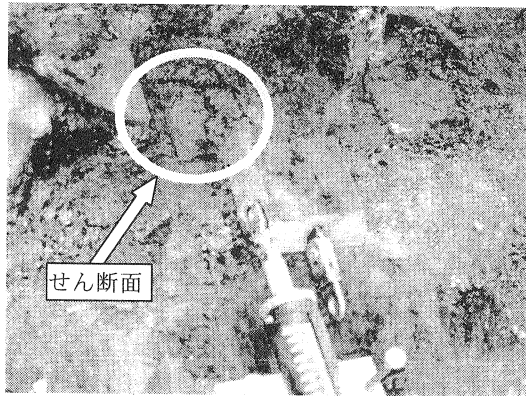


写真-8 試験終了後におけるせん断面の状況（山陽）

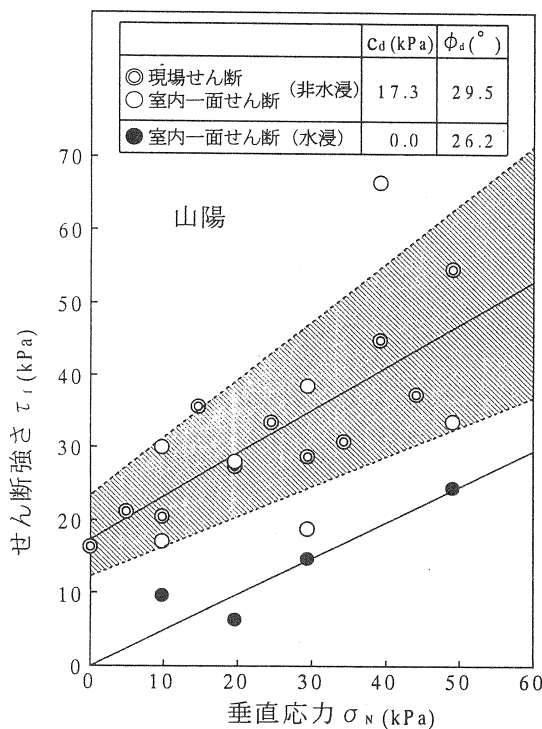


図-5 せん断強さと垂直応力の関係（山陽）

(2) 黒色土のせん断強度特性

「山口」および「宇部」の地点においてその崩壊規模は異なるが、黒色土層ですべりが発生したのは前述のとおりである。これら黒色土層のすべりによって、斜面の安定性が著しく低下するので、黒色土層のせん断強度を求めておくことは地盤の設計強度を決める上で重要である。そこで、著者らは超簡易現場せん断試験機を用いて現場での黒色土のせん断強度を測定した。写真-8に試験終了後のせん断面の観察状況を示している。いずれの試験においても黒色土面でせん断されていることを確認している。

一方、多数の釘を用いて不攪乱試料を採取するネイルサンプリングにより、黒色土試料を含む不攪乱試料の室

内一面せん断試験を行った。この試験では黒色面が実際のせん断面に一致するように供試体を作製し、せん断箱にセットした。その後、所定の垂直応力 σ_N の下で圧密した後、せん断速度 1.0 mm/min の下で定圧せん断した。試験は水浸および非水浸状態でを行い、垂直応力は 9.8～49 kPa の範囲で変化させている。なお、本論文においては「山陽」の現場で得られたデータを記載している。

図-5に超簡易現場せん断試験および室内一面せん断試験で得られたせん断強さ τ_f と垂直応力 σ_N の関係を示す。両者の結果にはかなりばらつきがみられる。この理由として、黒色土層での土の含水状態および粒度等が部分的に異なっていたことが考えられる。図中の斜線部は非水浸状態における両者の試験から得られたデータの分布域を示す。データのばらつきを考慮して引いた直線を破壊線として強度定数を求めると、粘着力 $c_d=17.3$ kPa および内部摩擦角 $\phi_d=29.5^\circ$ という結果が得られた。また、水浸状態の室内一面せん断試験から得られた強度定数は $c_d=0$ kPa, $\phi_d=26.2^\circ$ であった。このことから、得られた平均的な黒色土層の強度定数を、節理面・片理面といった不連続面に沈積した光沢質黒色薄層土に起因する斜面崩壊における安定計算に用いることを提案する。

今回、本研究で作製した超簡易現場せん断試験機を用いて黒色土層間のせん断強度を測定した。その結果、黒色土層の不均一性によって測定値はかなりばらついていたが、現場せん断強度と室内一面せん断強度は同じ範囲に分布していた。今後、超簡易現場せん断試験を別の現場で実施し、データを蓄積することにより、その有用性を示していきたい。

6. まとめ

山口県内で地質状況が異なる光沢質黒色薄層土がみられた4斜面を調査した。また、黒色土の化学的、鉱物学的および物理的性質を調べるとともに強度特性を検討した。その結果として以下の知見が得られた。

- (1) 黒色土中の物質が黒色を呈するのはマンガンおよび鉄の酸化物・水酸化物のためである。これらは節理面や片理面といった不連続部に浸透した表面水あるいは地下水の影響を受けて生成されたものである。
- (2) 黒色土を構成する代表的な元素は珪素、アルミニウム、マンガンおよび鉄であるが、結晶度が低い、あるいは非晶質なため、X線回折試験ではこれらを含む鉱物を検出することができなかった。
- (3) 黒色土の物理的性質は不明であるが、黒色土下位の土層は比較的細粒分の多い土から構成される。これより、表面水および酸素による風化作用を受けたことが考えられる。
- (4) 超簡易現場せん断試験および室内一面せん断試験から得られた非水浸時の黒色土層の強度定数は $c_d=17.3$ kPa, $\phi_d=29.5^\circ$ 、室内一面せん断試験から得られた水浸時の黒色土層の強度定数は $c_d=0$ kPa, $\phi_d=26.2^\circ$ で

あった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、試験機の製作で御世話を頂いた(有)中原鉄工所 中原 信氏、試験の実施で協力頂いた常盤地下工業(株) 瀬原洋一氏、吉原和彦氏ならびに山口大学工学部地盤環境工学研究室大学院生松下英次氏、宮内俊彦氏、植野泰史氏、村上俊秀氏、松尾 晃氏に心から感謝いたします。

参考文献

- 1)山本哲朗・大原資生・西村祐二郎・瀬原洋一：山口県下の三郡変成岩からなる切土斜面に見られる豪雨崩壊の特徴，地盤工学会論文報告集，Vol.36，No.1，pp.123～132，1996.
- 2)山本哲朗・高本直邦・西村祐二郎・瀬原洋一：三郡変成帯における鋸状斜面崩壊，土と基礎，Vol.44，No.11，pp.9～12，1996.
- 3)山本哲朗・瀬原洋一・中森克己・森岡研三：三郡変成帯で発生した地すべりの特徴と対策，土と基礎，Vol.45，No.6，pp.17～19，1997.
- 4)山本哲朗・瀬原洋一・中森克己・森岡研三：三郡変成帯で発生した地すべりについてー山口県宇部市の例ー，地すべり，Vol.34，No.3，pp.41～50，1997.
- 5)山本哲朗・鈴木素之・松本 直・国広清己：花崗岩の貫入を受けた三郡変成岩からなる切土斜面の崩壊，土と基礎，Vol.47，No.4，pp.27～29，1999.
- 6)Yamamoto, T.: Some geotechnical engineering properties of weathered soils on failed slope in the Sangun metamorphic region, Proc. of the International Symposium on Problematic Soils, IS-TOHOKU '98, Vol.1, pp.537～540, 1998.
- 7)山本哲朗・鈴木素之・宮内俊彦・植野泰史：三郡変成岩からなる切土斜面の豪雨時崩壊，土と基礎，Vol.47，No.8，pp.29～31，1999.
- 8)山本哲朗・鈴木素之・原田 博・植野泰史・国広清己：三郡変成岩斜面の複合すべり，自然災害科学研究西部地区部会報，No.24，2000（印刷中）.
- 9)山本哲朗・鈴木素之・福岡正人・瀬原洋一・原田 博：風化地山の不連続面に見られる光沢のある黒色薄層土の2,3の性質，第38回地すべり学会研究発表講演集，pp.323～326，1999.
- 10)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.
- 11)山本哲朗・鈴木素之・原田 博・宮内俊彦・寺山 崇：超簡易現場せん断試験による不連続面のせん断強度，第39回地すべり学会研究発表講演集，pp.365～

366,2000.

- 12)吉津 研・田崎和江：鉄，マンガン鉱物形成における微生物のはたらき，鉱物学雑誌，Vol.26，No.2，pp.69～72，1997.