

山口県内に分布する三郡変成岩風化土の 化学・物理的性質と盛土材としての適用性

山本 哲朗¹・鈴木 素之²・原田 博³・植野 泰史⁴・小山 泰正⁵

¹正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
tyamamot@jim2.civil.yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
msuzuki@jim2.civil.yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 日特建設(株) 山口営業所所長 (〒753-0011 山口市大字宮野下字平野 1940-16)
es.yamaguchi@nittoc.co.jp

⁴正会員 修(工) 常盤地下工業(株) (〒755-0151 宇部市大字西岐波 4374-1)
u-hirofumi@tokiwack.co.jp

⁵学生会員 山口大学大学院理工学研究科博士前期課程 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
x029fd@stu.sv.cc.yamaguchi-u.ac.jp

三郡変成岩はその内部に潜在する片理や節理が弱面となって斜面崩壊を誘発する問題土である。本文では、山口県内における三郡変成岩風化土のうち、泥質片岩、塩基性片岩、蛇紋岩などの化学・物理的性質と締固め・CBR特性を検討した。その結果、泥質片岩風化土の化学・物理定数は広範に変化し、塩基性片岩、蛇紋岩風化土は細粒分・粘土分を多く含有することが分かった。泥質片岩風化土の締固め特性は塩基性片岩、蛇紋岩の風化土に比較して良好であり、岩種によらず、これら風化土の最大乾燥密度とSiO₂含有率、Fe₂O₃含有率、細粒分含有率、強熱減量との間に良好な相関が認められた。三郡変成岩風化土の多くは修正CBR値が約7.5%以下であり、盛土材に転用するためのセメント安定処理による土質改良を検討した。

Key Words : special soil, problematic soil, Sangun metamorphic rock, weathering, chemical property, physical property, compaction, CBR, microstructure, fill material, cement stabilization

1. はじめに

特殊土とは在来の土質工学の手法では設計施工ができないような土を意味する^{1,2)}。我が国における代表的な特殊土として高有機質土、関東ローム、まさ土およびしらすが挙げられる³⁾。なかでも中国地方に広く分布するまさ土の力学的性質は乱した状態および乱さない状態の両方において詳細に解明されている⁴⁾。

山口県内では、まさ土分布地域と隣接するように、県北東部から西部にかけて、いわゆる三郡変成岩が分布している。また、三郡変成岩中にはまさ土の母岩となる花崗岩が貫入する場合が多くみられる^{5,6)}。三郡変成岩は広域変成岩の一種であり、地質学的には三郡-蓮華変成岩、周防変成岩および智頭変成岩に分類され、変成岩に特有な片理を有するとともに節理が非常に発達している点の特徴である。現場で多くみられる三郡変成岩は著しく風化しており、土砂化している。

三郡変成岩の風化土からなる斜面では、まさ土斜面と同様に、降雨時に頻繁に崩壊が発生する⁷⁻¹⁰⁾。まさ

土斜面と大きく異なる点は片理あるいは節理に沿って崩壊が発生し、降雨がほとんどないときでも崩壊が発生することである。これより、乱さない三郡変成岩風化土は、土塊内部に潜在する片理や節理など斜面崩壊に関する支配的な因子を有し、まさ土と並んで、中国地方における特有の問題土として位置づけられる。一方、最近、三郡変成岩風化土は、宅地造成や沿岸部の埋立てなどの土工材料として利用されつつあるが¹⁰⁾、乱した状態においては降雨により泥濘化して現場の施工性をおとす非常に扱いにくい材料になる。

著者らは、1991年から現在にいたるまで、降雨時に崩壊した斜面から採取した三郡変成岩風化土の物理的性質と強度特性を調べ、土質は概略シルトに分類され、内部摩擦角 ϕ_d は26~28°程度、粘着力 c_d は2 kPa程度の強度定数を有し、水浸に伴って粘着力が消失することを明らかにしている。上述したように、三郡変成岩風化土も土工材料へ転用され始めている点を考慮すれば、その化学・物理的性質を把握すること、さらには締固め・CBR特性を明らかにすることは工学的に重要である。

本文では、乱した三郡変成岩風化土の土質工学的性質を系統的に整理することを目的として、まず中国地方における三郡変成岩の分布域と岩石学的特徴を述べる。ついで、山口県内において集中豪雨によって崩壊した切土斜面および道路敷設工事・宅地造成時に開削された山腹から採取した三郡変成岩風化土(合計 15 試料)に対して、土工上の工学的指針を得るため、鉱物組成および化学・物理的性質と締固め・CBR 特性の相関性を検討する。なお、三郡変成岩の近傍に貫入している花崗岩類の強風化岩(まさ土)の性質と比較し、三郡変成岩風化土の地盤工学上の位置付けを試みる。最後に、三郡変成岩風化土を路床・路盤材料として用いた現場施工事例を紹介し、セメント安定処理による土質改良の方法と適用性について検討する。

2. 山口県内の三郡変成岩の分布とその岩石学上の特徴

火成岩、堆積岩および変成岩の生成時に温度・圧力の変化を受けると、鉱物組成やその組織、化学組成が変化し(変成作用)、新しい変成岩が生成される。わが国には中生代変成岩類として三波川、領家、飛騨、三郡といった広域変成帯が分布する^{17), 18)}。三波川変成帯はその分布面積が最大であり、全長 800 km 余りにわたる。低温高圧の変成作用を受けたと考えられ、変成作用の最盛期は約 1.1 億年前(110~116 Ma)と推定されている。

一方、九州北部から中国地方を経て中部地方にかけて三郡変成岩が点在する。三郡変成岩という名称は、1941 年に福岡市東方の三郡山塊に分布する変成岩にちなんで命名された¹⁹⁾。三郡変成帯は、その生成過程や生成時期の違いにより、三つの変成帯すなわち①三郡-蓮華変成帯、②周防変成帯、③智頭変成帯に区分される。西日本における各変成帯を図-1 に示すとともに、その

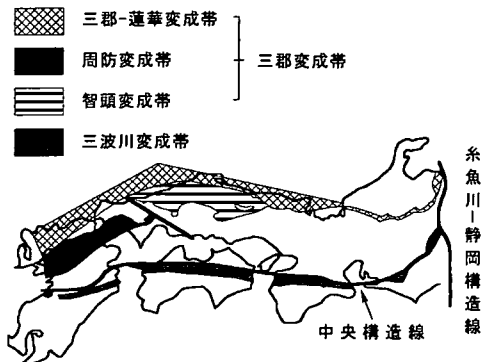


図-1 九州北部・中国・中部地方に分布する三郡変成帯
(文献 17)に加筆)

概要を以下に述べる^{15), 16)}。

- ①三郡-蓮華変成帯：約 3 億年前(280~310 Ma:古生代石炭紀)に形成された最も古い地帯であり、“三郡変成帯”の最北端部に位置し、福岡県北部~山口県西部~山陰地方日本海沿い~飛騨外帯まで連続する。
- ②周防変成岩：約 2.2 億年前(210~230 Ma:中生代トリアス紀)に形成された中間の年代を示す地帯で、“三郡変成帯”の西部地域に限定され、山口県中南部~福岡県南部に分布する。
- ③智頭変成岩：約 1.8 億年前(170~200 Ma:中生代ジュラ紀)に形成された最も新しい地帯で、“三郡変成帯”の東部地域に限定され、島根県~鳥取県に分布する。

本文で議論する山口県内の三郡変成岩は周防変成岩に相当し、その分布域および土試料の採取地点を図-2 に示す。なお、島根県浜田市で採取した三郡変成岩(2 試料)は智頭変成岩に相当するが、これらを特に区別せず、全試料を三郡変成岩と総称する。

山口県内の三郡変成岩の特徴は泥質片岩、砂質片岩、塩基性片岩といった千枚岩あるいは片岩類を主としており、蛇紋岩などの超苦鉄質岩を伴うことである。これらの多くは中生代白亜紀後期(65~97 Ma)に貫入した花崗岩類による接触変成作用を被ってホルンフェルス化しているのが岩石学上の大きな特徴である。

3. 三郡変成岩風化土の化学・物理的性質

(1) 試料採取地点

三郡変成岩風化土の試料採取地点を図-2 に示している。山口県宇部市 9 地点、山口県山口市 2 地点、山口県徳地町 2 地点、島根県浜田市 2 地点である。表-1 に示すように、三郡変成岩の種類ごとにみると、15 土試料

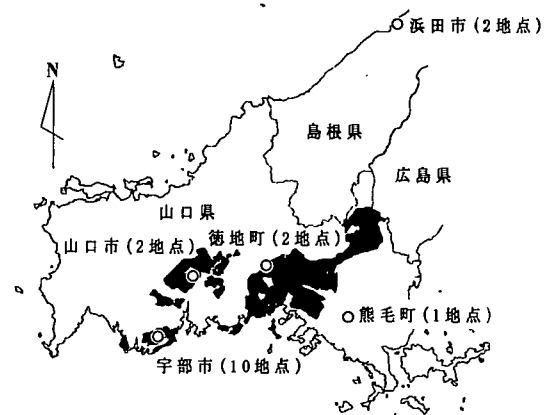
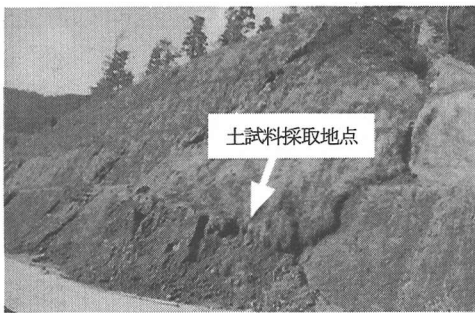


図-2 山口県における三郡変成岩(周防変成岩)と土試料の採取地点

表-1 土試料採取地点およびその状況

土試料名	岩種	試料採取地点	標高 (m)	試料採取時の状況
宇部-A (U-A)	泥質片岩	宇部市川上	115	宇部 I.C. 造成工事に伴い、山腹を開削した斜面
宇部-B (U-B)		宇部市川上	78	宇部 I.C. 造成工事に伴い、山腹を開削した斜面
宇部-C (U-C)		宇部市川上	65	道路造成工事に伴い、山腹を開削
宇部-D (U-D)		宇部市西岐波下請川	28	集中豪雨により崩壊した斜面
宇部-E (U-E)		宇部市常盤台	47	建物建設基礎の平地から掘り返された攪乱土
山口-A' (Y-A)		山口市吉敷畑	185	集中豪雨により崩壊した斜面
山口-B (Y-B)		山口市吉敷畑	185	集中豪雨により崩壊した斜面
徳地-A (T-A)		佐波郡徳地町	290	集中豪雨により切土施工中に崩壊した斜面
徳地-B (T-B)		佐波郡徳地町	290	集中豪雨により切土施工中に崩壊した斜面
浜田-A (H-A)		島根県浜田市江津	67	江津道路工事に伴い、山腹を開削した斜面
浜田-B (H-B)		島根県浜	67	江津道路工事に伴い、山腹を開削した斜面
宇部-F (U-F)		宇部市小羽山	58	敷地造成により山腹を開削した斜面
宇部-G (U-G)		塩基性片岩	宇部市西岐波新都市	90
宇部-H (U-H)	蛇紋岩	宇部市川上	115	宇部 I.C. 造成工事に伴い、山腹を開削した斜面
宇部-I (U-I)		宇部市川上	65	道路造成工事に伴い、山腹を開削した斜面
熊毛-A (K-A)	花崗岩緑岩	熊毛郡熊毛町	350	集中豪雨により崩壊した山腹を開削して造った斜面
宇部-J (U-J)	アブライト	宇部市小羽山	58	敷地造成により山腹を開削した斜面



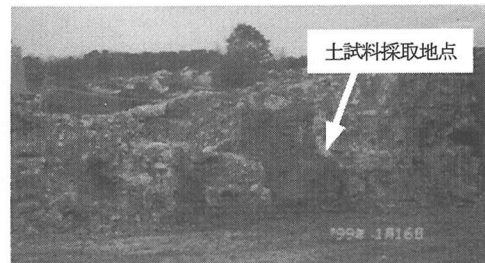
(a) 泥質片岩 (T-A)



(c) 蛇紋岩 (U-H)



(b) 塩基性片岩 (U-G)



(d) 蛇紋岩 (U-I)

写真-1 土試料採取地点の状況

のうち泥質片岩風化土 12 試料、塩基性片岩風化土 1 試料および蛇紋岩風化土 2 試料である。泥質片岩風化土はその分布面積が広いので、結果として試料数が多くなった。さらに、熊毛町 1 地点および宇部市 1 地点でそれぞれ花崗岩類風化土を採取した。このうち、土試料 K-A は黒雲母花崗閃緑岩の風化土、土試料 U-J はほとんどがアルカリ長石、石英、長石からなる優白質のアブライトの

風化土である。宇部市の三郡変成岩の周辺には、ほとんどの場合、このアブライトが貫入している。土試料 K-A および U-J はまさ土であるが、三郡変成岩風化土の諸性質との比較のために土試料として選定したことは既に述べた。

以下の説明で用いる土試料の略記号および各土試料を採取した地点の標高と状況を表-1 にまとめた。表-1 に示すように、土試料の多くは道路敷設工事に伴い、開

削した山腹から採取したものである。その他、集中豪雨時に崩壊した切土斜面から採取したものもある。いずれの土試料も岩石分類²⁰⁾よりD級に分類される。写真-1に各岩種ごとに代表的な土試料採取地点の状況を示す。

写真-2に花崗岩が貫入した泥質片岩(宇部市川上)を示す。縞状の片理構造がみられ、斜面崩壊はこのような片理面に沿って発生することが多い。

(2) 鉱物組成

まさ土の場合、有色鉱物が多い試料の締固め特性は良好ではない²⁰⁾。このことが三郡変成岩風化土の場合にも成り立つのかどうかを検討するため、X線回折試験により土試料の含有鉱物を同定した。X線管球電圧および電

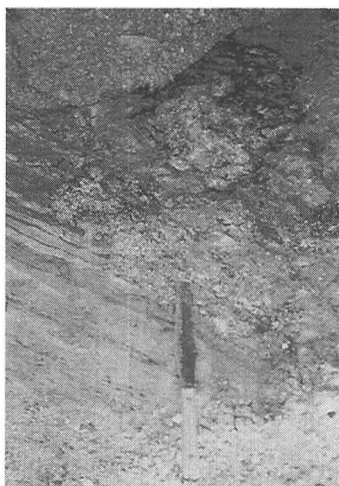


写真-2 花崗岩が貫入した泥質片岩 (U-A)

流はそれぞれ100 kVおよび40 mAである。表-2に各土試料の鉱物組成を示す。三郡変成岩風化土試料には粘土鉱物としてハロイサイト、メタハロイサイト、パーミキュライト等、また一次鉱物として石英、長石が含まれている。一方、U-I(蛇紋岩風化土試料)の母岩は、蛇紋岩のホルンフェルス化した滑石岩であるため、他の土試料にはみられない滑石(タルク)および透角閃石(トレモライト)が含まれている点が鉱物組成上の大きな特徴である。この土試料には熱水変質作用を受けて生成されたカオリナイトが含まれている。このように、三郡変成岩風化土であっても、原岩の鉱物組成および風化過程の差異により、含有されている粘土鉱物の種類は多種にわたるが、岩種の違いによる粘土鉱物の相違は認められない。

(3) 化学組成

化学組成は全自動蛍光X線分析装置を用いて実施した。X線管電圧および電流はそれぞれ50 kVおよび50 mAである。表-3に各土試料の化学組成の質量百分率を10元素の酸化物として示す。表-3中のSiO₂含有率についてみると、U-G(塩基性片岩風化土試料)、U-HおよびU-I(蛇紋岩風化土試料)は42.12~51.25%であるのに対して、すべての泥質片岩風化土は57.37~65.38%であり、前二者は後者よりも少ない。また、塩基性片岩、蛇紋岩風化土のFe₂O₃の含有率は泥質片岩風化土の場合より大きい。U-IのMgO含有率は13.17%であり、他の三郡変成岩風化土よりも1桁ほど大きい。なお、三郡変成岩風化土は花崗岩類風化土のK-AおよびU-JよりもSiO₂含有量が小さく、またFe₂O₃含有量が大きいことが化学組成上の特徴である。

各三郡変成岩風化土の化学組成と鉱物組成の関係や

表-2 土試料の主要構成鉱物

土試料名	岩種	主要構成鉱物
U-A	泥質片岩	石英, ハロイサイト, メタハロイサイト
U-B		石英, ハロイサイト
U-C		石英, カオリナイト
U-D		石英, メタハロイサイト
U-E		石英, 長石, メタハロイサイト
Y-A		石英, カオリナイト
Y-B		石英, カオリナイト
T-A		石英, カオリナイト
T-B		石英, カオリナイト
H-A		石英, 長石, カオリナイト
H-B		石英, 長石, メタハロイサイト, カオリナイト, イライト
U-F		石英, メタハロイサイト
U-G		塩基性片岩
U-H	蛇紋岩	石英, メタハロイサイト, 白雲母
U-I		石英, タルク, トレモライト, カオリナイト
K-A	花崗岩類	石英, 長石, メタハロイサイト, カオリナイト
U-J	アプライト	石英, 長石, カオリナイト

表-3 土試料の化学組成

土試料名	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Ig loss	Total
U-A	64.52	0.82	16.84	6.94	0.14	2.00	0.16	0.26	3.05	0.04	5.4	100.2
U-B	63.69	0.72	15.29	6.56	0.14	4.04	0.99	1.40	2.92	0.04	4.5	100.3
U-C	63.68	0.82	17.02	6.85	0.17	2.05	0.14	0.76	3.37	0.04	5.6	100.5
U-D	58.26	1.01	20.34	7.92	0.09	1.79	0.16	0.55	3.14	0.06	7.1	100.4
U-E	62.46	1.16	17.17	8.98	0.19	2.01	0.15	0.49	1.91	0.05	4.9	99.5
Y-A	61.11	0.95	17.96	7.07	0.11	2.29	0.07	0.42	3.33	0.02	6.7	100.0
Y-B	65.17	0.83	18.20	5.24	0.05	1.17	0.14	1.28	3.03	0.04	5.6	100.8
T-A	61.58	0.88	18.35	7.06	0.13	2.18	0.14	0.99	3.39	0.03	5.6	100.3
T-B	61.55	0.91	18.82	7.20	0.12	2.06	0.07	0.14	3.41	0.02	6.2	100.5
H-A	57.37	0.90	22.16	7.18	0.10	1.00	0.06	0.33	3.35	0.06	7.4	99.9
H-B	65.38	0.76	17.47	5.37	0.12	1.20	0.18	2.23	3.21	0.04	4.2	100.2
U-F	60.92	0.94	19.31	7.86	0.13	2.04	0.06	0.15	2.28	0.04	6.6	100.3
U-G	45.53	2.27	21.62	18.83	0.11	0.99	0.12	0.06	0.80	0.05	9.7	100.1
U-H	51.25	1.14	23.71	10.33	0.07	1.04	0.04	0.00	1.92	0.07	9.8	99.3
U-I	42.12	0.35	9.81	16.36	0.24	13.10	1.73	0.07	0.47	0.07	7.5	91.9
K-A	68.98	0.51	16.10	3.65	0.06	0.73	0.95	1.55	3.80	0.05	3.6	100.0
U-J	75.82	0.05	14.56	0.29	0.00	0.05	0.11	0.87	5.51	0.01	3.6	100.9

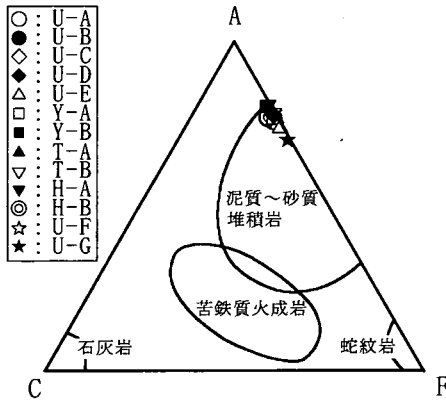


図-3 三郡変成岩風化土の ACF 三角図表からみた岩石分類²²⁾

造岩鉱物の化学組成上の特徴を知るため、岩石分類の三角図表の頂点に A $\{=(Al_2O_3+Fe_2O_3) - (Na_2O+K_2O)\}$, C(=CaO) および F(=FeO+MgO) に取った ACF 図²²⁾ に各土試料の結果を示した。この場合、今回得られていない土試料の FeO 値は文献^{23), 24)}に記載されている変成岩に対する Fe₂O₃ と FeO の比率から決定した。図-3 から、泥質片岩、塩基性片岩風化土は化学組成上、泥質～砂質堆積岩の範疇に入ることが示された。

(4) 物理的性質

採取したすべての土試料に対して地盤工学会の土質試験法³⁾に従い、①土粒子の密度試験 (JIS A 1202), ②含水比試験 (JIS A 1203), ③液・塑性限界試験 (JIS A 1205), ④粒度試験 (JIS A 1204), ⑤強熱減量試験 (JIS A 1226) を行った。

表-4 に各試料の物理的性質および土質分類、図-4 に各試料の粒度曲線を示す。

- 泥質片岩風化土は、土粒子密度 $\rho_s = 2.638 \sim 2.706$ g/cm³, 均等係数 $U_c = 8.6 \sim 128.2$, 最大粒径 $D_{max} = 4.8 \sim 19.0$ mm, 平均粒径 $D_{50} = 0.042 \sim 0.650$ mm, 細粒分含有率 $F_c = 31.8 \sim 71.8$ %, 粘土分含有率 $F_{clay} = 3.6 \sim 15.5$ %, 液性限界 $w_L = 29.1 \sim 43.7$ %, 塑性指数 $I_p = 4.6 \sim 15.8$, 強熱減量 $L_1 = 4.2 \sim 7.4$ % であり、土質分類は多くの場合 ML (シルト (低液性限界)), その他は SFG (細粒分質礫質砂) や SF-G (細粒分まじり礫質砂) の範疇にある。集中豪雨時に崩壊した泥質片岩からなる斜面の土質調査により、泥質片岩風化土の多くは ML に分類されることが明らかにされている⁹⁾。今回の結果もそれと同様である。
 - 塩基性片岩風化土は $\rho_s = 2.728$ g/cm³, $U_c = 5.7$, $D_{max} = 13.0$ mm, $D_{50} = 0.022$ mm, $F_c = 77.0$ %, $F_{clay} = 9.2$ %, $w_L = 52.0$ %, $I_p = 8.0$, $L_1 = 9.7$ % であり、土質分類は MH (シルト (高液性限界)) である。
 - 蛇紋岩風化土は $\rho_s = 2.615 \sim 2.903$ g/cm³, $U_c = 5.4 \sim 14.0$, $D_{max} = 2.0 \sim 5.1$ mm, $D_{50} = 0.012 \sim 0.017$ mm, $F_c = 84.5 \sim 93.4$ %, $F_{clay} = 13.1 \sim 19.0$ %, $w_L = 47.7 \sim 90.7$ %, $I_p = 14.9 \sim 52.3$, $L_1 = 7.5 \sim 9.8$ % であり、土質分類は ML および CH (粘土) である。
 - 花崗岩類風化土は $\rho_s = 2.594 \sim 2.639$ g/cm³, $U_c = 12.1 \sim 17.1$, $D_{max} = 6.4 \sim 12.4$ mm, $D_{50} = 0.280 \sim 0.650$ mm, $F_c = 13.9 \sim 20.4$ %, $F_{clay} = 3.0 \sim 4.0$ %, $w_L = NP$, $I_p = NP$, $L_1 = 3.6$ % であり、土質分類は SF (細粒分質砂) および SF-G である。
- 以上から、同じ岩種に分類された三郡変成岩風化土、とりわけその試験数の多い泥質片岩風化土においては、本来の鉱物組成の違い、さらには風化による鉱物組成の変化によって物理定数は大きく異なることが明らかにな

表-4 土試料の物理的性質

土試料名	岩種	w_L %	ρ_s (g/cm^3)	U	U_{eq} (mm)	U_0 (mm)	F_c %	F_{dev} %	μ %	μ_0 %	I_p	I_L	L_L %	土質分類
U-A	泥質片岩	21.0	2.703	9.8	9.5	0.068	52.0	6.8	37.9	26.0	11.9	-0.42	5.4	ML
U-B		16.0	2.683	30.7	15.1	0.120	50.2	6.8	34.6	27.1	7.5	-1.48	4.5	ML
U-C		20.2	2.674	8.6	7.3	0.042	71.0	8.0	32.7	27.0	5.7	-1.19	5.6	ML
U-D		17.9	2.706	128.2	19.0	0.420	32.0	7.0	36.0	25.8	10.2	-0.77	7.1	SFG
U-E		11.5	2.662	21.2	12.0	0.066	44.8	6.0	33.6	27.9	5.7	-2.88	4.9	SF-G
Y-A		21.1	2.688	25.0	16.7	0.040	58.3	14.5	34.4	25.6	8.8	-0.51	6.7	ML
Y-B		13.2	2.685	30.2	7.5	0.065	50.4	9.8	31.7	25.8	5.9	-2.14	5.6	ML
T-A		20.8	2.706	18.5	11.1	0.061	53.6	8.0	29.8	25.2	4.6	-0.96	5.6	ML
T-B		19.8	2.700	15.0	10.3	0.065	71.8	3.6	29.1	23.5	5.6	-0.66	6.2	ML
H-A		16.8	2.679	23.1	11.5	0.660	31.8	4.2	43.7	37.0	6.7	-3.01	7.4	SFG
H-B		12.5	2.638	36.7	11.6	0.550	36.0	6.4	43.1	27.3	15.8	-0.94	4.2	SFG
U-F		26.2	2.667	24.5	4.8	0.075	53.1	9.5	37.5	27.5	10.0	-0.13	6.6	ML
U-G	塩基性片岩	42.0	2.728	5.7	13.0	0.022	77.0	9.2	52.0	44.0	8.0	-0.25	9.7	MH
U-H	蛇紋岩	35.5	2.615	5.4	5.1	0.017	84.5	13.1	47.7	32.8	14.9	0.18	9.8	ML
U-I		80.7	2.903	14.0	2.0	0.012	93.4	19.0	90.7	38.4	52.3	0.81	7.5	CH
K-A	花崗閃緑岩	12.5	2.639	12.1	6.4	0.280	20.4	4.0	-	N.P.	N.P.	-	3.6	SF
U-J	アプライト	-	2.594	17.1	12.4	0.660	13.9	3.0	-	N.P.	N.P.	-	3.6	SF-G

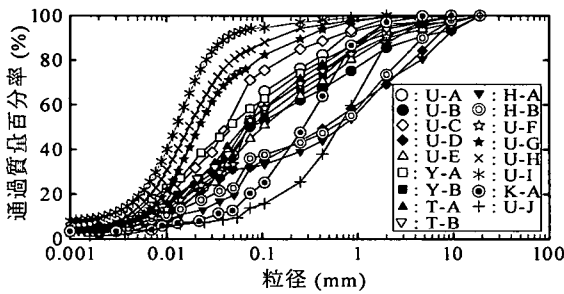


図-4 各土試料の粒度曲線

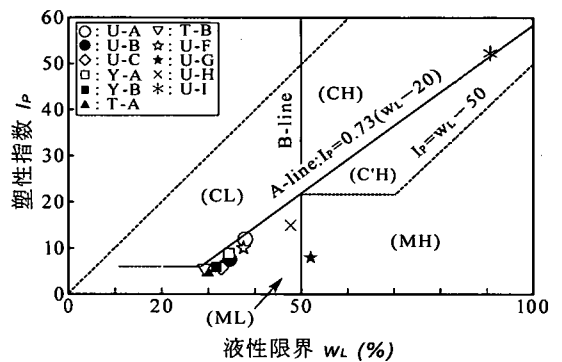


図-5 各土試料の塑性図

った。U-I は熱水変質作用を受けており、すべての土試料の中で粘土分含有率が最も大きく、土質分類上、唯一CHに分類された。K-A およびU-J はNPである。図-5に塑性図を示す。ほとんどの土試料はB線の左側でA線の近傍に分布している。U-G がA-line から大きく離れている理由として、活性度の低い白雲母やパーミキュライトが含まれているためと考えられる。

U_0 は風化土の風化度の指標に使われることがあるが²⁹、三郡変成岩風化土の U_0 (ほとんどの場合、約 5~10 %) は、本研究で用いた花崗岩風化土 ($U_0=3.6$ %) や阿武隈高地の花崗岩類風化土 (ほとんどの場合、 U_0 約 2~4 %) よりも大きい²⁹。

さらに、表-4 の粒度に関する指標と図-4 の粒度曲線を総合して次のことがわかる。細粒分含有率は蛇紋岩風化土、次いで塩基性片岩風化土、泥質片岩風化土の順に大きくなっている。すべての三郡変成岩風化土は花崗岩類風化土よりも細粒分含有率、粘土分含有率とも大きいという粒度特性を有することが明らかになった。

4. 三郡変成岩風化土の締固め特性

(1) 締固め特性

1. で述べたように、山腹を開削した際の“ずり”としての三郡変成岩風化土を有効利用して宅地造成・道路用盛土工事が進められていることから、三郡変成岩風化土の締固め特性を調べることにした。これに際して、締固め方法の違いが締固め特性に及ぼす影響を明らかにするために、すべての土試料に対して土質試験に規定された突固めによる締固め試験 (JIS A 1210)³⁾ に従い、A-a 法、A-b 法、E-a 法および E-b 法の 4 通りにより締固め試験を行った。各試験の突固め方法の種類および土試料の準備方法は表-5 に示す。

表-5 本研究で行った締固め試験

突固め方法	ランマー質量 (kg)	内径 (cm)	突固め層数 (層)	突固め総数 (回)	締固めエネルギー E_c (kJ/m ²)	試料の準備方法及び使用方法
A-a	2.5	10	3	25	550	乾燥法, 繰返し法
A-b	2.5	10	3	25	550	乾燥法, 非繰返し法
E-a	4.5	15	3	92	2500	乾燥法, 繰返し法
E-b	4.5	15	3	92	2500	乾燥法, 非繰返し法

図-6 は各土試料の締固め曲線の一例として、E-a 法により得られた結果を示す。この図から泥質片岩風化土試料は塩基性片岩、蛇紋岩風化土試料に比べて最大乾燥密度 ρ_{dmax} は非常に大きく、最適含水比 w_{opt} は著しく小さいことが分かる。換言すると、本実験で対象にした三郡変成岩風化土のなかで、泥質片岩風化土試料は締固め特性が最も良好であるといえることができる。また同じ泥質片岩風化土試料でも、 $\rho_{dmax} = 1.728 \sim 1.892 \text{ g/cm}^3$, $w_{opt} = 11.0 \sim 17.5 \%$ であって、両者の値ともかなり幅があることが分かる。

このように、同じ泥質片岩あるいは蛇紋岩風化土であっても、その土粒子の密度や粒度をはじめとする物理的性質が異なるため、締固め特性にかなりの差異がみられる。同じ泥質片岩風化土である U-B および H-B のように、その細粒分含有率が小さいほど最大乾燥密度は増加し、最適含水比は減少する傾向がみられる。ここで、図-6 に示すように、花崗岩類風化土である U-J の締固め曲線は典型的なまき土のものと同様である。より詳細にみると、この締固め曲線は三郡変成岩風化土の中で最も良好な締固め特性の泥質片岩風化土の U-B のものと酷似している。黒雲母閃緑花崗岩風化土 (K-A) の締固め曲線は泥質片岩風化土のそれと比較すると、締固めの悪い部類に相当する。図-4 に示すように、これは黒雲母閃緑花崗岩風化土の粒度分布が悪いためである。

試料の締固めに伴う土粒子の微細構造の変化を走査型電子顕微鏡 (SEM, 電圧 20 kV, 電流 53 μA) により観察した。泥質片岩風化土として U-A, 塩基性片岩風化土として U-G, および蛇紋岩風化土として U-H の土粒子構造をそれぞれ写真-3~5 に示す。締固めは E-a 法によるものである。図-7 に示すように、これらの写真において (a) は締固め前の土粒子構造, (b)~(d) はそれぞれ最適含水比より乾燥側の含水比, 最適含水比付近の含水比および最適含水比より湿潤側の含水比で締固めた時の土粒子構造を示す。観察断面は締固め方向に鉛直な断面 (H 断面) である。写真-3~5 に見られるように、試験前にはすべての土試料は団粒化構造を有している。特に締固め特性の悪い U-H では、団粒化により見掛け上、土粒子の大きさが約 $200 \times 200 \mu\text{m}$ になっている。泥質片岩風化土 (U-A) の場合、扁平な土粒子が観察面、言い変える

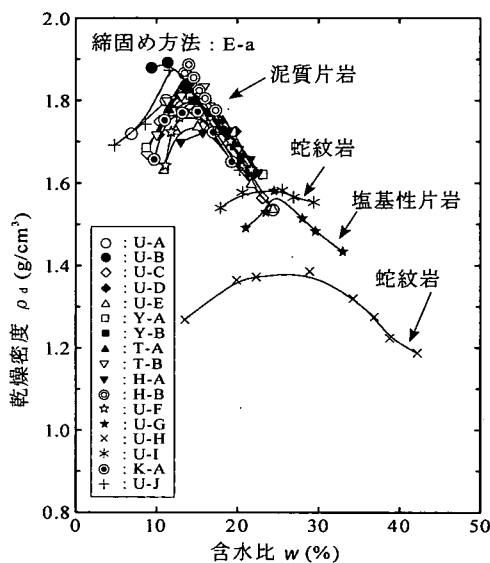
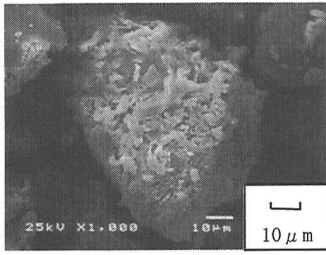


図-6 各土試料の締固め曲線の一例

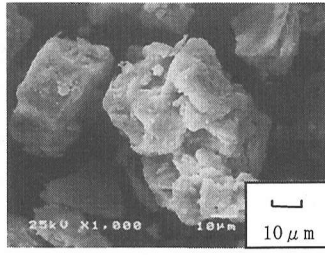
と締固め方向に垂直な方向に堆積し、また最適含水比付近において大小の土粒子がよくかみ合っただけで最も密な土粒子構造を呈している。一方、塩基性片岩風化土 (U-G) および蛇紋岩風化土 (U-H) では、含水比の増加に伴い、細粒の土粒子が団粒化するようになるが、最適含水比を境にして、その前後で土粒子構造に顕著な差は現れていない。これは塩基性片岩、蛇紋岩風化土では、含水比の変化に伴う乾燥密度の変化が泥質片岩風化土の場合と比較して小さいことに関連する (図-6 参照)。

(2) 締固め方法の影響

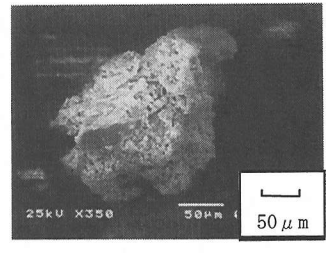
図-8(a) および (b) にそれぞれすべての土試料に対して締固め方法の相違による最大乾燥密度および最適含水比の変化を示す。両図の横軸の目盛を A-b 法, A-a 法, E-b 法, E-a 法の順に取っている。両図から黒雲母閃緑花崗岩風化土 (K-A, U-J) と同様に、この締固め方法の順序ですべての三郡変成岩風化土試料は最大乾燥密度は増加し、最適含水比はほぼ減少する傾向にある。すなわち、三郡変成岩風化土は、花崗岩類風化土と同様に、締固めエネルギーが大きく、土試料を繰り返して使用した場合に最大乾燥密度は大きく、最適含水比は小さくなる。



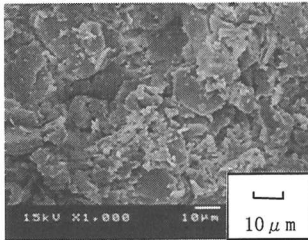
(a) 締固め前



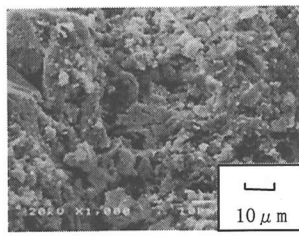
(a) 締固め前



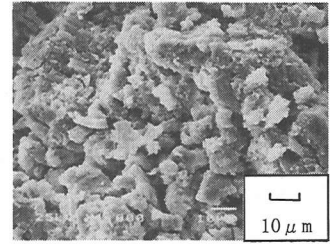
(a) 締固め前



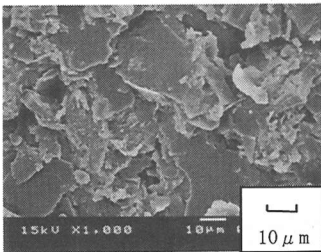
(b) 乾燥側
 $\rho_d=1.719 \text{ g/cm}^3$, $w=6.9\%$



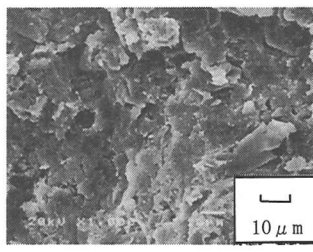
(b) 乾燥側
 $\rho_d=1.492 \text{ g/cm}^3$, $w=21.0\%$



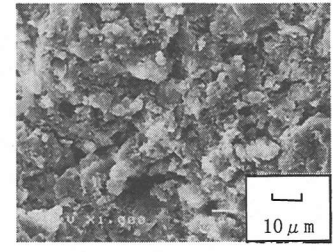
(b) 乾燥側
 $\rho_d=1.363 \text{ g/cm}^3$, $w=22.3\%$



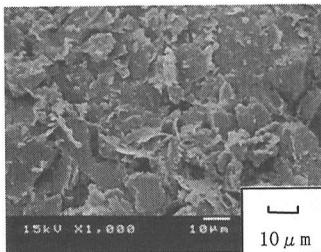
(c) 最適含水比
 $\rho_d=1.834 \text{ g/cm}^3$, $w=13.7\%$



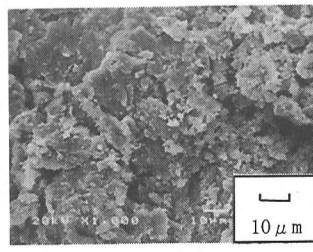
(c) 最適含水比
 $\rho_d=1.582 \text{ g/cm}^3$, $w=24.5\%$



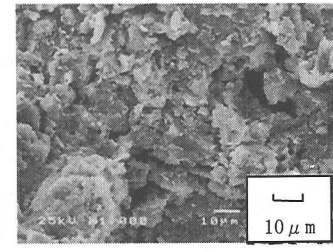
(c) 最適含水比
 $\rho_d=1.386 \text{ g/cm}^3$, $w=28.9\%$



(d) 湿潤側
 $\rho_d=1.535 \text{ g/cm}^3$, $w=23.4\%$



(d) 湿潤側
 $\rho_d=1.484 \text{ g/cm}^3$, $w=29.6\%$



(d) 湿潤側
 $\rho_d=1.187 \text{ g/cm}^3$, $w=42.2\%$

写真-3 締固め時の泥質片岩風化土 (U-A) の土粒子構造

写真-4 締固め時の塩基性片岩風化土 (U-G) の土粒子構造

写真-5 締固め時の蛇紋岩風化土 (U-H) の土粒子構造

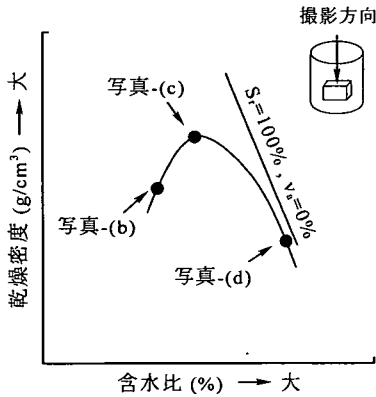
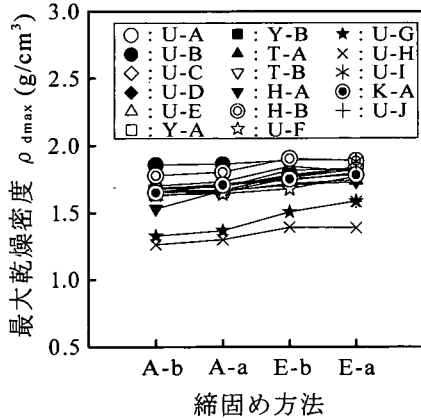
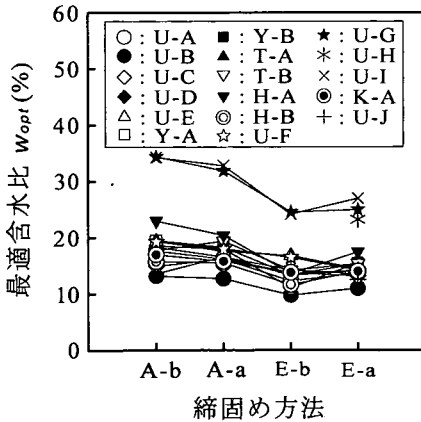


図7 走査型電子顕微鏡写真(SEM)の撮影条件(模式図)



(a) 最大乾燥密度



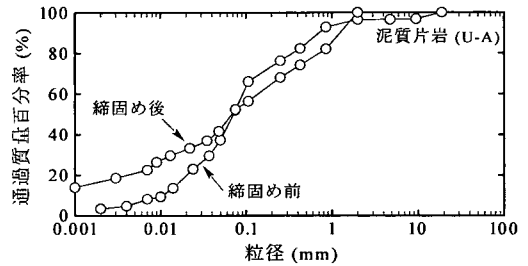
(b) 最適含水比

図8 締固め方法と最大乾燥密度および最適含水比の関係

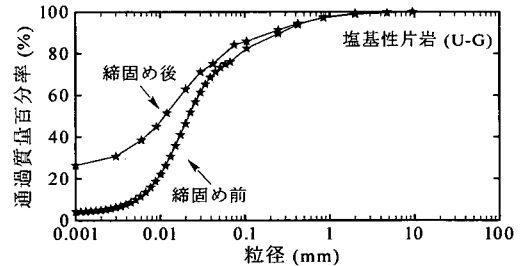
図9(a)~(c)にそれぞれ三郡変成岩風化土(U-A), 塩基性片岩風化土(U-G)および蛇紋岩風化土(U-H)の締固め試験(E-a法)前後の粒度曲線を示す. 3土試料とも締固め後の粒度曲線は, 締固め前のそれよりも概ね上位にあり, 特に F_{clay} が著しく増加している. なお, 締固め前後の粘土含有量 F_{clay} は, U-Aの場合6.8%から20.2%に, U-Gの場合9.2%から36.1%に, U-Hの場合13.1%から29.8%にそれぞれ増加している. このことは, いずれの試料も石英を含んでいるので, 石英分を多く含むまさ土と同様に, 締固め時に粒子破砕が起きたためと考えられる²⁰.

(3) 締固め特性と土の化学・物理定数との相関

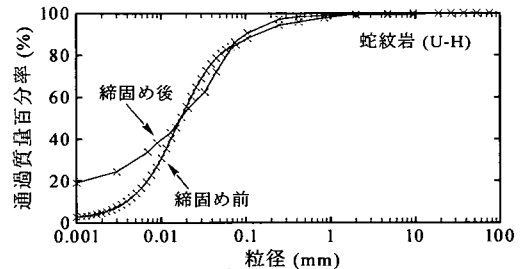
締固め特性として最大乾燥密度をとりあげ, それと土の化学・物理定数との相関を調べた. その内, 両者間に比較的良い相関が得られた結果を以下に示す. 図10(a)および(b)にそれぞれ最大乾燥密度と SiO_2 含有率お



(a) 泥質片岩風化土

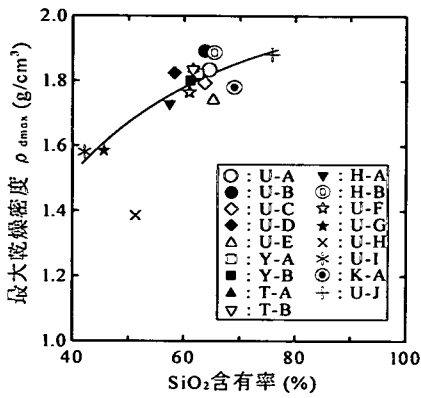


(b) 塩基性片岩風化土



(c) 蛇紋岩風化土

図9 締固め前後の土試料の粒度曲線



(a) SiO₂含有率

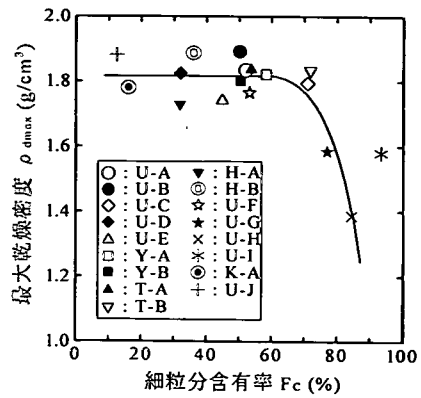
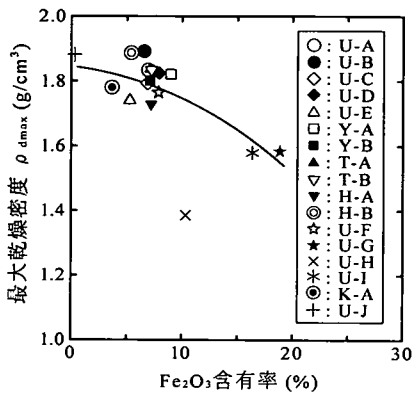


図-11 最大乾燥密度と細粒分含有率の関係



(b) Fe₂O₃含有率

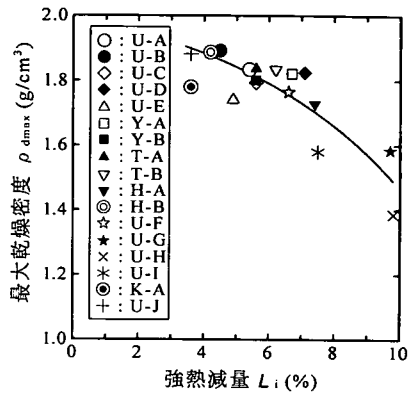


図-12 最大乾燥密度と強熱減量の関係

図-10 最大乾燥密度と SiO₂および Fe₂O₃含有率の関係

および Fe₂O₃ 含有率の関係を示す。SiO₂ 含有率が増加するほど、あるいは Fe₂O₃ 含有率が減少するほど、三郡変成岩風化土は花崗岩類風化土の場合と同様に、その岩種に関わらず、最大乾燥密度がほぼ増加していることが分かる。

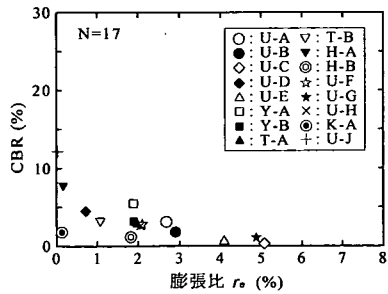
図-11 および 12 にはそれぞれ最大乾燥密度と細粒分含有率および強熱減量の関係を示す。図-11 から三郡変成岩および花崗岩類の種類に関わらず、それらの風化土試料の最大乾燥密度は細粒分含有率が約 60 %を境にして、それ以下の範囲ではほぼ一定であるが、それ以上では減少しているのが分かる。また、図-12 から三郡変成岩および花崗岩類の種類によらず、それら風化土試料の最大乾燥密度は強熱減量の増加に伴い減少している。

図-10~12 において、土の化学・物理定数は土の風化度に密接に関係したものであり、それが締固め特性に影響するということが示された。ここで、風化とは、石英や長石などが雲母やカオリナイトなどの粘土鉱物へと変化することであると考える。一般に、風化が進行すると、

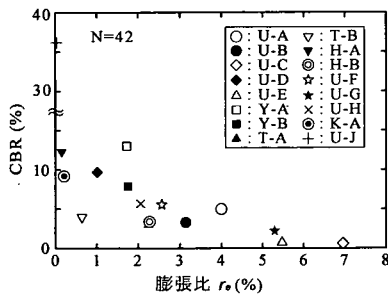
細粒分や粘土分が増加することから、本文では、風化の度合いを表す工学的指標として細粒分含有率 F_c および強熱減量 L_i を用いた。風化の度合いが小さいときには F_c および L_i は小さく、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は大きくなる。他方、SiO₂ 含有率が大きいときは、試料は珪質であるので風化される鉱物量が少なくなるため、また Fe₂O₃ 含有率が小さいときは、鉱物の酸化の進行程度が小さいため、風化の度合いは小さくなり、最大乾燥密度 ρ_{dmax} は大きくなる。当然ではあるが、これら指標が風化度の小さいことを示す場合、最適含水比は小さくなる。

5. 三郡変成岩風化土の CBR 特性

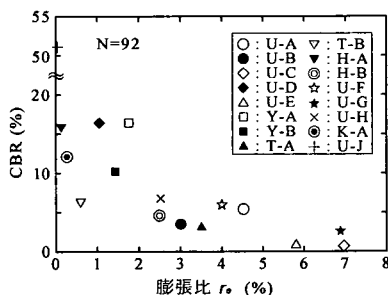
三郡変成岩風化土からなる山腹を開削した際に搬出される三郡変成岩風化土を道路路盤材料に用いることがある。そこで、乱した三郡変成岩風化土の路盤材料とし



(a) N=17



(b) N=42



(c) N=92

図-13 各供試体の CBR 値と膨張比 r_s の関係

ての品質を検討するために修正 CBR 値を土質試験法にある CBR 試験 (JIS A 1211)³⁾ に従って求めた。すなわち、土試料を自然乾燥した後、最適含水比となるように含水比を調整し、CBR モールドに詰めて 4.5 kg ランマーで 3 層をそれぞれ 17, 42, 92 回突き固めた供試体を作製し、4 日間水浸させた。その後、各供試体について貫入試験を実施し、CBR 値を求めた。

図-13(a)~(c)に吸水膨張比 r_s と CBR の関係を示す。 r_s は $r_s = d_s/d_0 \times 100$ で与えられる³⁾。ここに、 d_s は供試体の吸水膨張試験時の膨張量、 d_0 は供試体の初期高さである。また、図中の N は 1 層当たりの突き固め回数である。なお、U-I は十分な量が採取できず、CBR 試験は実施できなかった。図-13 から分かるように、いずれの突き固め

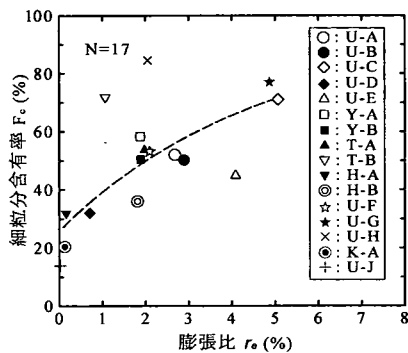


図-14 膨張比 r_s と細粒分含有率の関係

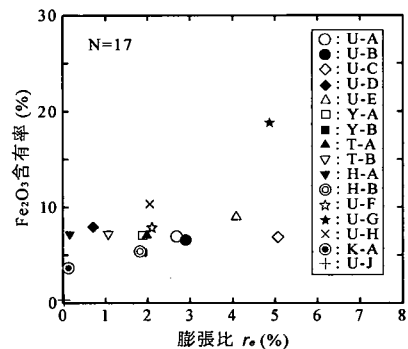


図-15 膨張比 r_s と Fe_2O_3 含有率の関係

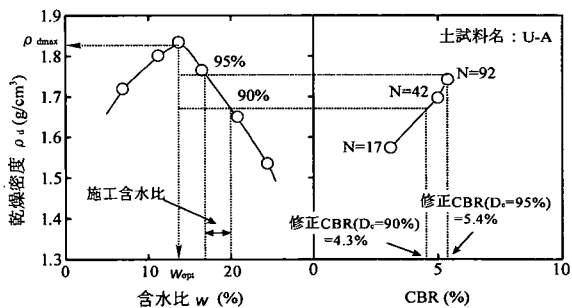


図-16 土試料(U-A)の含水比および修正 CBR と乾燥密度の関係

回数の場合も、泥質片岩風化土は各試料で修正 CBR 値が相違している。また当然のことではあるが、各土試料とも吸水膨張比 r_s が増加すると修正 CBR 値が減少している。さらに N の値によらず泥質片岩風化土のうち、U-C の場合に r_s が最も大きく、N=92 回のときに最大値 $r_s=7$ %程度になっている。膨張比の面から不良な路床土と判断されている島尻層泥岩土は膨張比 2~3 %であることから²⁸⁾、三郡変成岩風化土には膨張比のかなり大きなものが存在するといえる。さらに、風化花崗岩の K-A, U-J に関して、膨張比 r_s はそれぞれ 0.130 および 0.026 %

であり、いずれもまさ土としては標準的な値を示している。これより、三郡変成岩風化土の膨張比は花崗岩類風化土のそれよりも著しく大きい。

前節の締固め特性の場合と同様に、膨張比と土の化学・物理的定数との関係を調べた。その結果、図-14 にその一例として N=17 回の場合を示すように、データにバラツキはあるものの、細粒分含有率が増加すると、膨張比が増大するようである。なお、膨張比とこれ以外の指標との間には良い相関は見られなかった。その一例を図-15 に示しておく。U-C、U-G および U-E の膨張比は 5 %程度と他材料に比べて高い。その理由として、これらの試料の細粒分含有率 F_c は 70 %以上と非常に高いことが考えられる。

図-16 に代表的な例として U-A の含水比、CBR および乾燥密度の三者の関係を示す。また、図中に締固め度 $D_c=90, 95$ %から得られた修正 CBR 値を示している。 D_c は $D_c = \rho_d / \rho_{d_{max}} \times 100$ で与えられる²⁰⁾。ここに、 ρ_d は所要の締固め時の供試体の乾燥密度である。このようにして求めた CBR と土試料の物理・化学的定数との関係を調べた。その結果、図-17 にその一例を示した $D_c=90$ %の場合のように、細粒分含有率が減少すると、CBR は増加するという傾向が認められた。CBR と他の定数の間には良い相関は得られなかった。 $D_c=95$ %の場合にも、このことは同様であった。

図-18 に各土試料の修正 CBR と施工含水比の関係を示す。左、右端の点がそれぞれ $D_c=90$ %、 95 %の結果である。この図から以下のことが分かる。①U-D、H-A および Y-A を除いた泥質片岩風化土、塩基性片岩風化土および蛇紋岩風化土の修正 CBR 値は $D_c=95$ %の場合でも約 7.5 %以下である。②塩基性片岩風化土 U-G および蛇紋岩風化土 U-H の施工含水比は約 30~40 %であり、他の土試料よりかなり大きい。③三郡変成岩風化土のうち、U-D、Y-A および H-A の修正 CBR 値は、黒雲母閃緑花崗岩風化土 K-A のそれとほぼ同じである。④同じ花崗岩類風化土であっても $D_c=90$ %の場合、細粒分含有率の小さいアプライト風化土 U-J の修正 CBR 値は約 20 %であるのに対し、黒雲母閃緑花崗岩風化土の修正 CBR 値は約 7.5 %であり、後者は修正 CBR=10 %を下回っている。修正 CBR=10 %は日本道路協会が規定する盛土材料の品質基準のうち、簡易舗装道路の下層路盤に必要な CBR 値である²⁰⁾。

修正 CBR と土試料の化学・物理的定数との関係を調べた。その一例として、修正 CBR と F_c の関係を図-19 に示す。各土試料で左側の点が $D_c=90$ %の結果、右側の点が $D_c=95$ %の結果を示す。図-19 から分かるように、Y-A のように、 $F_c=58.3$ %であっても修正 CBR 値が 10 %以上となる例外はあるものの、全体的には、 F_c の増加に伴い、修正 CBR 値は減少している。この他の定数と修正 CBR との間には良い相関はみられなかった。

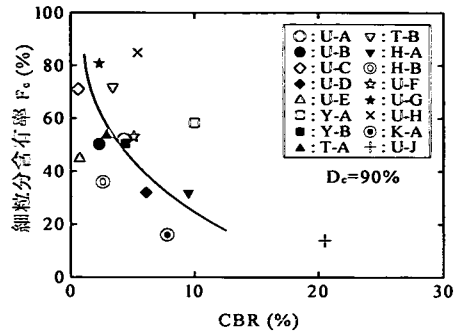


図-17 CBR ($D_c=90$ %) と細粒分含有率の関係

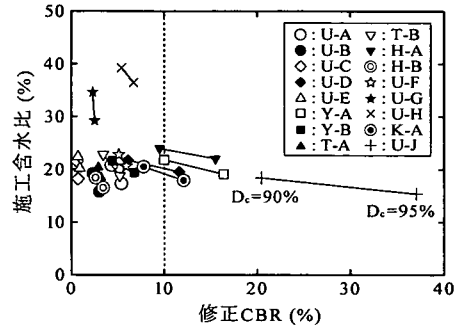


図-18 修正 CBR と施工含水比の関係

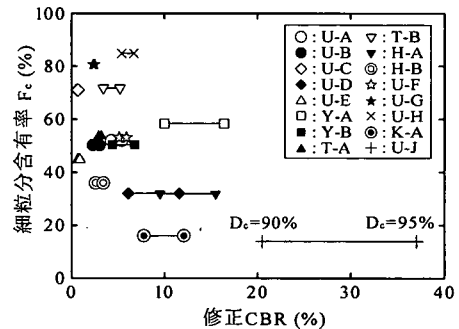
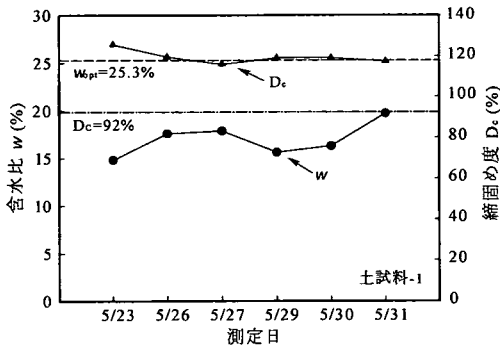
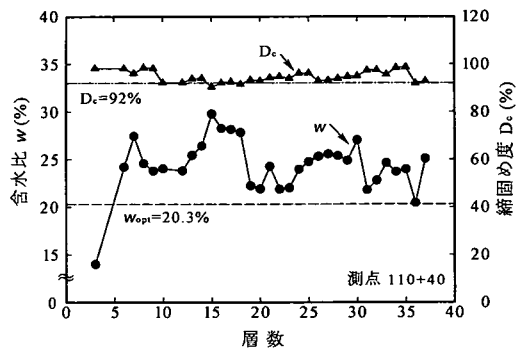


図-19 修正 CBR と細粒分含有率の関係

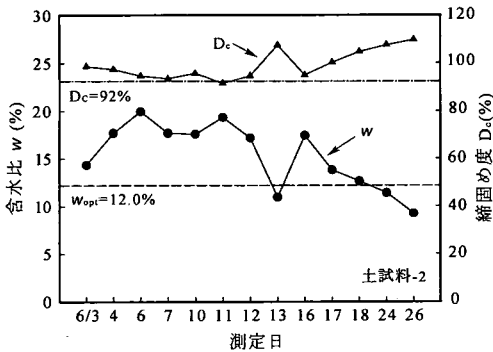
以上のように、ほとんどの三郡変成岩風化土の修正 CBR 値は 10 %を下回っており、このままでは土工材料として使用できないことが示された。したがって、路盤材料として用いるためには適切な固化材を用いた土質改良を考える必要がある。



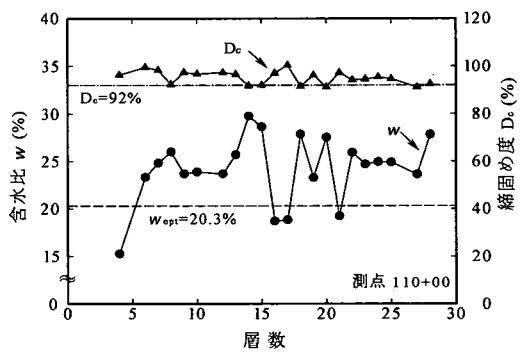
(a) 土試料-1 (第1盛土期間)



(a) 測点 110+40



(b) 土試料-2 (第2盛土期間)



(b) 測点 110+00

図-20 宇部市において塩基性片岩風化土を用いた盛土の締固め度・含水比の経日変化¹⁹⁾

図-21 浜田市において泥質片岩風化土を用いた盛土の各層ごとの締固め度・含水比

6. 三郡変成岩風化土を用いた盛土施工事例

(1) 未処理土の場合

4. および5. において記載したように、三郡変成岩の種類により、その風化土の締固め・修正 CBR 特性が異なる。これまで三郡変成岩風化土が様々な土工材料として利用される事例が報告されており^{16), 31)}、ここでは代表例として3つの施工事例を示す。

a) 山口県宇部市川上¹⁶⁾

土試料 U-A を採取した現場から西方約 1.8 km の谷部において路体を構築するため、岩種は塩基性片岩で $F_c=42.4\%$ の風化土(土試料-1)および $F_c=33.2\%$ の風化土(土試料-2)を用いた盛土が施工された。盛土部の底面積は 7,250 m²、高さ 2~3 m、総土量約 20,000 m³ である。10 t 振動ローラーを用いて 4 往復の合計 8 回の転圧により締固め、1 層の盛土厚さ 30 cm に仕上げられた。日本道路公団では、盛土路体の品質管理の規定値として、通常、締固め度 $D_c \geq 92\%$ 以上、施工含水比は湿潤側の含水比の範囲を満足する値が用いられている。盛土の密度・含水比を RI 水分密度計により測定した。土の最大

乾燥密度・最適含水比は締固め試験 B-b 法(乾燥・非繰返し法、各層 55 回・3 層突き固め)³⁾ によって求めた。その結果、土試料-1: $\rho_{\text{max}}=1.517 \text{ g/cm}^3$, $w_{\text{opt}}=25.3\%$ 、土試料-2: $\rho_{\text{max}}=1.887 \text{ g/cm}^3$, $w_{\text{opt}}=12.0\%$ となった。

図-20(a), (b) にそれぞれ土試料-1, 2 を盛土材料に用いたときの締固め度 D_c と含水比 w の経日変化の一例を示す。締固め度 D_c に関しては、土試料-1 および 2 とともに $D_c=92\%$ 以上を満たしている。一方、含水比 w に関しては、土試料-1 の場合、全期間を通して最適含水比より約 10 %低い乾燥側にあり、土試料-2 の場合、期間後半において最適含水比より低い乾燥側にある。膨張比が高い三郡変成岩風化土の場合、水浸に伴い含水状態が乾燥側から湿潤側へ変化するとき、せん断強度の低下などが懸念される。

b) 島根県浜田市

江津道路敷設に伴い、路体構築のために智頭変成岩の一種である泥質片岩風化土を用いて盛土施工が実施された。この風化土は $F_c=17.2\%$ 、礫分含有率は 65.3 % であり、HA および HB よりも礫分が多く含有されている。1 層当たりの盛土厚は 30 cm である。上記と同じ RI 水分

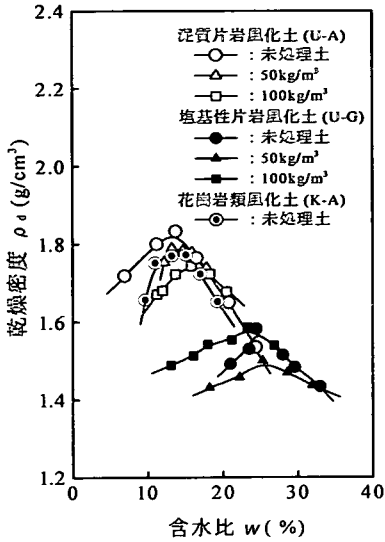
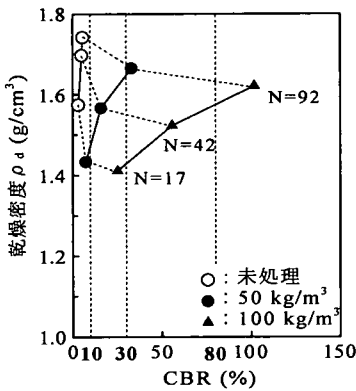
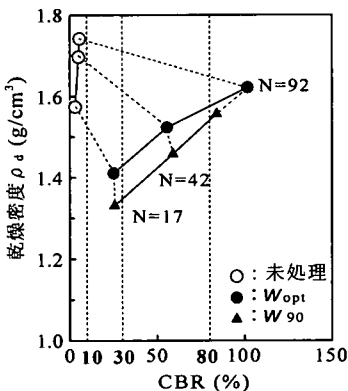


図-22 セメント安定処理土の締固め曲線



(a) 安定材添加量 Q_c



(b) 初期含水比 w_0

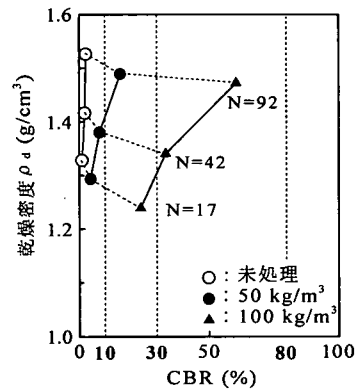
図-23 セメント安定処理した泥質片岩風化土 (U-A) の乾燥密度 ρ_d と CBR の関係

密度計を用いて4箇所盛土の密度・含水比が測定された。締固め試験 B-b 法から得られたこの風化土の最大乾燥密度は 1.597 g/cm^3 、最適含水比は 20.3% である。直接の比較はできないが、締固めエネルギーが小さいことに起因して現場で用いた本土試料の最大乾燥密度は、E-a 法で得られた土試料 H-A、H-B に比較して小さいものであった。

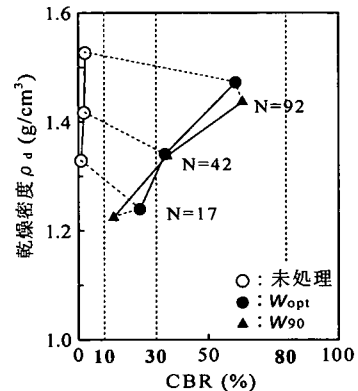
図-21 に測定結果の一例を示す。これより、各層の締固め度は目標の 92% 以上で、含水比もほぼ目標の範囲にあり、本泥質片岩風化土を用いて所要の盛土施工が実施されたことが分かる。

(2) セメント安定処理土の場合

山口県宇部市下片倉における丘陵地で切り取った塩基性片岩風化土 U-G を用いて、その下方部で盛土施工がなされた。図-6 に示すように、U-G の最大乾燥密度は 1.520 g/cm^3 、最適含水比は 22.0% であり、締固め特性は良くないことが分かっていたため、盛土材として用いる

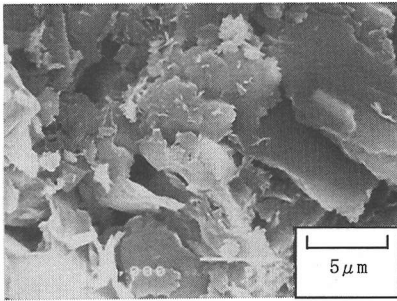


(a) 安定材添加量 Q_c

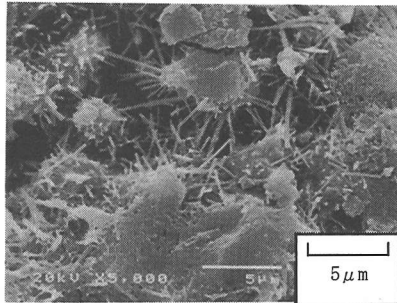


(b) 初期含水比 w_0

図-24 セメント安定処理した塩基性片岩風化土 (U-G) の乾燥密度 ρ_d と CBR の関係



(a) 未処理土



(b) 安定処理土

写真-6 未処理土, 安定処理土の土粒子構造(U-A)

ために、セメント安定処理を施すことが考えられた。今回の場合、ポルトランドセメント(OPC)を使用し、セメント添加量 Q_c は 50, 100 kg/m³ の 2 通りとした。 Q_c は乾燥土 1 m³ に対するセメントの質量で表す。セメント安定処理地盤および比較のため未処理土地盤において簡易動的貫入試験を実施した。その結果、例えば深さ 1.5 m において N_d は処理土の場合 $N_d=4.0$ 、未処理土の場合 $N_d=7.3$ であり、深さ 3.0 m においては処理土の場合 $N_d=10.0$ 、未処理土の場合 $N_d=5.0$ であり、セメント安定処理により必ずしも N_d は増加しているという結果は得られなかった。この理由として、処理土の場合、養生日数および混合度が必ずしも十分ではなかったため、処理後の乱した状態において N_d 値が低いままであったと考えられる。一方、未処理土の場合、乱さない状態で液性指数 I_L はゼロに近く相対的に硬い状態で存在している。これらのことから、処理土地盤よりも未処理土地盤の N_d 値の方が大きくなったと考えられる。

図-22 にセメント安定処理土の締固め曲線を示す。比較のために花崗岩類風化土 K-A の結果を併記している。この図から泥質片岩風化土では、OPC の添加量 Q_c が大きくなるに従って最大乾燥密度は減少、また塩基性片岩風化土では、最大乾燥密度は $Q_c=100$ kg/m³ の場合、増加しているが、 $Q_c=50$ kg/m³ の場合には、逆に減少している。このように、試験範囲内で三郡変成岩風化土の締固め特性は OPC の添加によって改善されない場合もあることが

示された。この理由として、セメント水和反応に要する水量が不足していたことが考えられるが、この場合、通常のセメント安定処理の直後に締固め試験を実施したので、強度増加をもたらすセメント水和反応自体がそれほど優勢ではなかったことが考えられる。したがって、別の固化材を用いた安定処理を考える必要がある。花崗岩強風化土の場合にも、風化度が大きくなると、OPC 安定処理によっても最大乾燥密度はそれほど増加していないこと、また消石灰安定処理の場合、その添加量が増加すると最大乾燥密度が減少することが分かっている²⁰⁾。

5. で述べたように、ほとんどの三郡変成岩風化土の修正 CBR 値は約 7.5 % 以下であり、そのままでは上部路床材としてさえも使用できない²⁰⁾。そこで、路盤材としての使用も念頭におき、上記の 2 土試料についてセメント安定処理した際の修正 CBR 値を求めてみた。 Q_c は 50, 100 kg/m³ の 2 通りとし、 $Q_c=100$ kg/m³ の場合のみ初期含水比 w_0 の影響を調べた。

図-23(a)および(b)にそれぞれ U-A の CBR と乾燥密度の関係に及ぼす Q_c および w_0 の影響を調べた結果を示す。同様に、図-24(a)および(b)に U-G の場合を示す。 $Q_c=100$ kg/m³ の場合には、両土試料とも下層路盤材料として用いる場合の条件である CBR=30 % 以上の値が得られた。また路床材料として用いるには $Q_c=50$ kg/m³ の場合でも十分な CBR 値が得られた。安定処理土および未処理土の CBR 試験後の供試体中央部から試料片を切り出して SEM 写真を撮影した。写真-6(a), (b)に示すように、安定処理の土試料には未処理の土試料には見られないエトリンガイト(針状のセメント水和物)が生成されており、これにより土粒子間の結合力が増加し、CBR 値が増加したと考えられる。

7. 結論

山口県内に分布する三郡変成岩の風化した土試料(計 15 試料)の化学・物理的性質と締固め・CBR 特性を調べた。泥質片岩 12 試料、塩基性片岩 1 試料、蛇紋岩 2 試料、比較のため花崗岩類風化土 2 試料を用いた。得られた結果は次のとおりである。

- (1) 泥質片岩風化土については、 $\rho_s=2.638\sim2.706$ g/cm³, $U_c=8.6\sim128.2$, $D_{max}=4.8\sim19.0$ mm, $D_{50}=0.042\sim0.650$ mm, $F_c=31.8\sim71.8$ %, $F_{clay}=3.6\sim15.5$ %, $w_c=29.1\sim43.7$ %, $I_p=4.6\sim15.8$, $I_L=4.2\sim7.4$ % である。土質分類上、その多くはシルト(低液性限界)の範疇に入る。このように、同じ泥質片岩風化土であっても、その母岩の鉱物組成・風化過程等の違いにより、物理的性質はかなり相違する。試験数の少ない塩基性片岩・蛇紋岩風化土は泥質片岩風化土と比較して F_c 、

F_{clay} の含有率が高い。塩基性片岩風化土はシルト(高液性限界)に分類された。蛇紋岩風化土はシルト(低液性限界)および粘土に分類された。

- (2) 三郡変成岩風化土には、粘土鉱物としてカオリナイト、ハロイサイト、メタハロイサイト、イライト、パーミキュライト、白雲母といった多種のものが含まれているが、その種類と三郡変成岩の岩種との間には明確な関係は認められない。
- (3) 三郡変成岩風化土は、花崗岩類風化土と同様に、大きな締固めエネルギーで土試料を繰返して締固めた場合、最大乾燥密度は増加し、最適含水比は減少する。
- (4) 三郡変成岩風化土は締固め時に土粒子の破碎が顕著に起き、特に粘土分の含有率が增加する。
- (5) 締固め試験結果(E-a 法)から、泥質片岩風化土は最大乾燥密度 $\rho_{\text{dmax}}=1.728\sim 1.892 \text{ g/cm}^3$ および最適含水比 $w_{\text{opt}}=11.0\sim 17.5 \%$ が得られ、締固め特性は良好であった。一方、塩基性片岩・蛇紋岩風化土は細粒分含有率が高いため締固め特性は悪い。
- (6) 花崗岩類風化土も含めて三郡変成岩風化土の最大乾燥密度は、 SiO_2 含有率が増加するほど、また細粒分含有率、 Fe_2O_3 含有率および強熱減量が低下するほど増加するという一義的な関係が認められた。
- (7) 山口県内のいくつかの施工事例から、泥質片岩風化土の場合、締固め度が十分に満足される盛土材として用いられる。一方、塩基性片岩風化土の場合、セメント安定処理しても良好な盛土材として用いることができない施工事例があり、このことは締固め・CBR 試験の結果からも裏付けられる。
- (8) 三郡変成岩風化土の多くは、その岩種に関わらず、修正 CBR 値は 7.5 %以下であり、直接路盤材料として用いるには問題があり、適切な安定処理を行う必要がある。

謝辞：山口大学理学部西村祐二郎教授には平素から三郡変成岩の地質学・岩石学・鉱物学上の特徴について御教授を頂くとともに、本試料の岩石薄片の作製から偏光顕微鏡観察にわたり御指導を頂いた。山口大学機器分析センター永尾隆志助教授には三郡変成岩風化土の蛍光 X 線分析装置の使用にあたり懇切丁寧な御指導を頂いた。山口県および宇部市をはじめとする各関係市町村には、三郡変成岩の崩壊斜面の現地調査および土試料採取にあたり様々な御配慮を頂いた。宇部市の盛土施工現場では洋林建設坂本 修氏、浜田市の盛土現場では半田組豊田

哲史氏に便宜を図って頂いた。以上の方々に対して深甚なる謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：土質工学用語辞典，1999.
- 2) 地盤工学会編：日本の特殊土，土質基礎工学ライブラリー10，1982.
- 3) 地盤工学会編：土質試験の方法と解説(第一回改訂版)，2000.
- 4) 地盤工学会編：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用，土質基礎工学ライブラリー16，1993.
- 5) 山口地学会編：山口県の岩石図鑑(代表編集 西村祐二郎，松里英男)，第一学習社，pp.186～199，1991.
- 6) 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.
- 7) 山本哲朗：三郡変成岩の切り土のり面に見られる豪雨崩壊の特徴について—山口県宇部市の場合，山口大学工学部研究報告，Vol.44，No.2，pp.43～53，1994.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 山本哲朗，瀬原洋一，中森克己，森岡研三：三郡変成帯に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.
- 11) 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—山口県宇部市の例—，地すべり，Vol.34，No.3，pp.41～50，1997.
- 12) 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*, pp.537～540, 1998.
- 13) 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.45，No.8，pp.29～31，1997.
- 14) 山本哲朗，鈴木素之，国広清己，原田 博：三郡変成岩切土斜面の複合すべりについて，土と基礎，Vol.48，No.11，pp.21～23，2000.

- 15) 新谷 登, 佃 勝二, 河原和文, 山本哲朗, 岡 千裕, 田中克哉: 三郡変成岩山腹の切取り時の地すべり対策工および動態観測, 土と基礎, Vol. 49, No. 3, pp. 25~28, 2001.
- 16) 小林 健, 北川俊昭, 山本哲朗, 上野孝弘: 三郡変成岩風化土を用いた盛土施工, 地盤と建設, Vol. 15, No. 1, pp. 75~79, 1997.
- 17) 山口県立山口博物館編: 山口県の地質, 山口県立博物館, p. 11, 1975.
- 18) 前掲 5), pp. 158~164.
- 19) Nishimura, Y. :Geotectonic subdivision and areal extent of the Sangun belt, Inner zone of southwest Japan, *Journal of Metamorphic Geology*, Vol.16, No.1, pp.129~140, 1998.
- 20) 土木学会編: 岩盤斜面の安定解析と計測, pp. 34~55, 1994.
- 21) 松尾新一郎, 西田一彦: マサ土の組成と工学的性質について, とくに有色鉱物の影響について, 昭和 41 年度土木学会関西支部講演概要集, pp. 161~162, 1966.
- 22) 橋本光男: 日本の変成岩, p. 146, 岩波書店, 1996.
- 23) 前掲 17), p. 13.
- 24) Nishimura, Y. :Chemical composition of basic schist from the Sangun metamorphic terrain in the Nishiki-cho district, Yamaguchi Pref, Japan, *Journal Science*, Hiroshima University, Ser. C, Vol.6, pp.171~202, 1971.
- 25) 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之: 風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性, 土木学会論文集, No. 382/III-7, pp. 131~140, 1987.
- 26) 古河幸雄, 藤田龍之: 阿武隈高地に分布するまさ土の風化度の評価と盛土材料としての特性, 土質工学会論文報告集, Vol. 34, No. 4, pp. 121~133, 1994.
- 27) 松尾新一郎, 澤 孝平: マサ土粒子の選択破碎, 第 18 回土質工学シンポジウム論文集, 土質工学会, pp. 37~44, 1973.
- 28) 砂川徹男, 上原方成: 安定処理した島尻層泥岩土の CBR 特性, 土木学会論文集, No. 370/III-5, pp. 143~150, 1986.
- 29) 日本道路協会: 道路土工 土質調査指針, p. 269, 1986.
- 30) 日本道路協会: 簡易舗装アスファルト舗装要綱, pp. 11~16, 1979.
- 31) 瀬原洋一, 山本哲朗: 山口県西部地域における盛土材の土質工学特性, 地盤と建設, Vol. 13, No. 1, pp. 55~61, 1995.

(2002. 2. 18 受付)

CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF WEATHERED SOILS OF SANGUN METAMORPHIC ROCKS IN YAMAGUCHI PREFECTURE AND ITS APPLICABILITY FOR FILLING MATERIALS

Tetsuro YAMAMOTO, Motoyuki SUZUKI, Hiroshi HARADA,
Hirofumi UENO and Yasumasa KOYAMA

This paper describes chemical and physical properties of 15 weathered soils of the Sangun metamorphic rocks. Also, compaction and CBR characteristics of the soils are discussed in terms of applicability for filling material. Main conclusions are as follows. The Sangun metamorphic rocks mainly distributed in Yamaguchi prefecture are pelitic schist, basic schist and serpentinite. The finer and clay contents of the pelitic schist are lower than those of the basic schist and the serpentinite. Compaction tests on the pelitic schist showed a better result, compared with the others. There exists a good correlation between the maximum dry density, the contents of SiO₂ and Fe₂O₃, the finer content and the ignition loss, respectively. Because the modified CBR values of the soils are under about 7.5%, the cement stabilization is examined to utilize the soils as filling material.