

三郡変成岩風化土の土工上の問題とその改良

山本 哲朗 (社会建設工学科)
 鈴木 素之 (社会建設工学科)
 植野 泰史 (社会建設工学専攻)
 原田 博 (日特建設㈱)

Compaction and CBR characteristics of weathered soil of Sangun metamorphic rock

Tetsuro YAMAMOTO (Department of civil engineering)
 Motoyuki SUZUKI (Department of civil engineering)
 Hirofumi UENO (Faculty of engineering, graduate school of science and engineering)
 Hiroshi HARADA (Nittoku Construction Co, Ltd.)

In Yamaguchi prefecture, recently weathered soils of Sangun metamorphic rock have been used as an earthwork material in cases of reclamation and back-fill. Physical properties, compaction and CBR tests were performed on 14 these weathered soils. From the test results, it was shown that these soils could not be used as the earthwork material for reclamation without any soil improvement. Therefore, cement stabilization was proposed as a soil improvement method. On the basis of compaction and CBR test results regarding the cement-treated soil, the maximum dry density and optimum water content did not change, but the CBR value increased remarkably.

Key Words : Metamorphic rock, Physical property, Compaction, CBR, Stabilization, Micro-structure

1. はじめに

山口県内には三郡変成岩（狭義には周防変成岩）が県北東部から西部にかけて分布している。この岩石類は明瞭な片理や節理を有するものが多く、きわめて風化しやすい性質がある。そのため三郡変成岩およびその風化土からなる斜面の表層部は脆く、豪雨時に斜面崩壊がたびたび発生している^{1),2)}。このように三郡変成岩風化土は問題土としてとらえられるが、最近では道路工事や宅地造成における盛土材料など様々な土工材料として使用されつつある³⁾。

本文では、まず、三郡変成岩風化土の物理的性質と締固め特性および CBR 特性について調べ、三郡変成岩風化土が路床・路盤材料としての品質が不良であることを示した。その上で、土質改良の一つとしてセメント安定処理する方法を提案し、その改良効果を比較・検討した。さらに、走査型電子顕微鏡により締固め試験時の含

水比変動に伴う土粒子構造および安定処理土の土粒子構造を観察した。

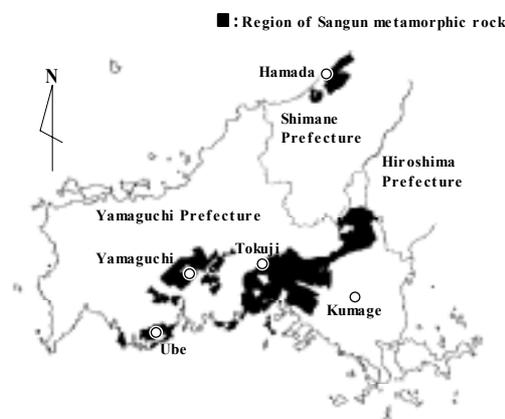


Fig.1 Distribution map of Sangun metamorphic rock and sampling point

Table 1 Physical properties of soil samples

Name of sample	Type of rocks	w_n (%)	ρ_s (g/cm ³)	U_c	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	F_c (%)	F_{clay} (%)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	I_L	Classification of soil	Symbols	
Ube-A	Pelitic schist	21.0	2.703	9.8	9.5	0.058	52.0	6.8	37.9	26.0	11.9	-0.42	ML	○	
Ube-B		16.0	2.683	30.7	15.1	0.120	50.2	6.8	34.6	27.1	7.5	-1.48	ML	●	
Ube-C		20.2	2.674	2.9	7.3	0.038	71.0	8.0	32.7	27.0	5.7	-1.19	ML	◇	
Ube-D		17.9	2.706	128.2	19.0	0.420	32.0	7.0	36.0	25.8	10.2	-0.77	SM	◆	
Ube-E		11.5	2.662	21.2	12.0	0.095	44.8	6.0	33.6	27.9	5.7	-2.88	SM	△	
Yamaguchi-A		21.1	2.688	25.0	16.7	0.040	58.3	14.5	34.4	25.6	8.8	-0.51	ML	□	
Yamaguchi-B		13.2	2.685	30.2	7.5	0.085	50.4	9.8	31.7	25.8	5.9	-2.14	ML	■	
Tokuji-A		20.8	2.706	18.5	11.1	0.061	53.6	8.0	29.8	25.2	4.6	-0.96	ML	▲	
Tokuji-B		19.8	2.700	15.0	10.3	0.065	71.8	3.6	29.1	23.5	5.6	-0.66	ML	▽	
Hamada-A		16.8	2.679	23.1	11.5	0.650	31.8	4.2	43.7	37.0	6.7	-3.01	SM	▼	
Hamada-B		12.5	2.638	36.7	11.6	0.550	36.0	6.4	43.1	27.3	15.8	-0.94	SM	◎	
Ube-F		Basic schist	26.2	2.667	24.5	4.8	0.075	53.1	9.5	37.5	27.5	10.0	-0.13	ML	☆
Ube-G			42.0	2.728	4.6	13.0	0.035	80.7	10.8	52.0	44.0	8.0	-0.25	MH	★
Ube-H		Serpentinite	35.5	2.615	13.1	5.1	0.038	84.8	20.8	47.7	32.8	14.9	0.18	ML	×
Kumage	Biotite granodiorite	12.5	2.639	12.1	6.4	0.280	16.0	4.0	—	—	—	—	SM	◎	

2. 三郡変成岩の分布と試料採取地点

Fig.1 に山口県および一部島根県における三郡変成岩の分布図を示す。三郡変成岩は九州北部から中国地方を経て中部地方西部にかけて広く分布する高圧型の変成岩類であり、1941年に福岡市東方の三郡山塊にちなんで命名された。

しかし、最近の研究では三郡変成岩は形成年代や形成条件の違いによって3つのタイプに区分されている⁴⁾。それらは、1)三郡-蓮華変成岩(約3億年前:古生代石炭紀)、2)周防変成岩(約2.2億年前:中生代トリアス紀)、3)智頭変成岩(約1.8億年前:中生代ジュラ紀)である。

山口県の中部から東部にかけて分布する三郡変成岩は周防変成岩に相当するが、本研究では従来の三郡変成岩と呼称する。山口県内の三郡変成岩は泥質片岩、塩基性片岩、砂質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。それらは白亜紀後期に貫入した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ことが多い。

3. 三郡変成岩風化土の物理的性質

Table 1 に各地点で採取した土試料の諸物理定数および土の分類を示す。試料は全部で15試料用いた。その内訳は、泥質片岩風化土11試料、塩基性片岩風化土2試料、および、蛇紋岩風化土1試料である。熊毛の試料はまさ土であり、三郡変成岩風化土との比較のために用いた。Fig.1 に試料採取地点を示す。Table 1 から分かるように、三郡変成岩

風化土の物理的性質は土粒子密度 $\rho_s=2.6\sim 2.7$ g/cm³、液性限界 $w_L=29\sim 52$ %、塑性限界 $w_p=23\sim 44$ %、塑性指数 $I_p=4\sim 16$ であり、多くは ML および SM に分類された。Fig.2 に塑性図を示す。ほとんどの試料が A 線より下方、B 線の左側に分布している。

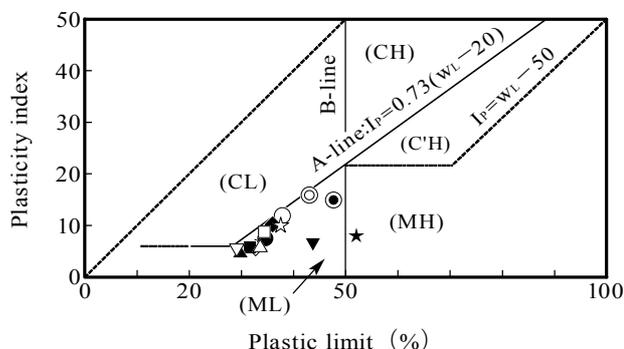


Fig.2 Plasticity chart

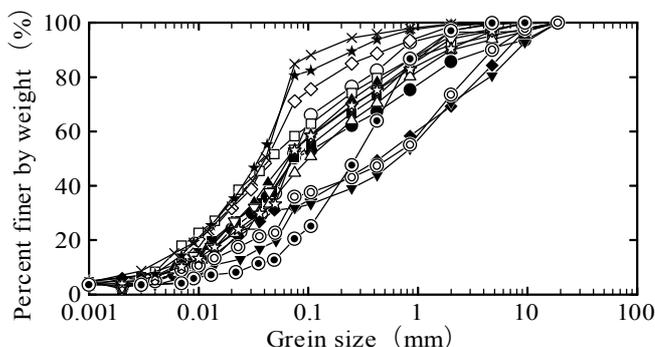
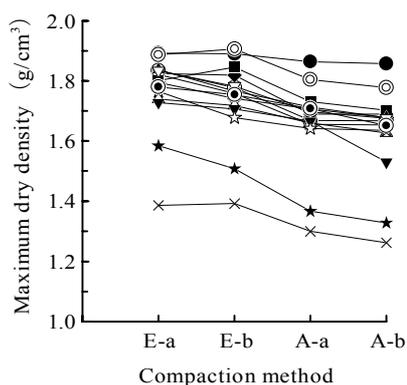
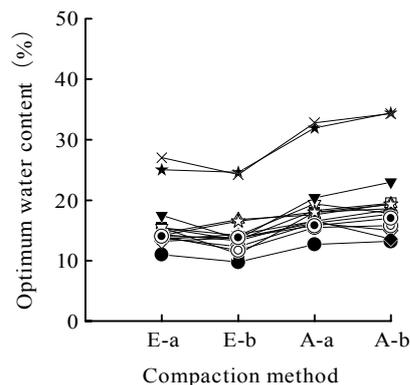


Fig.3 Grain size distribution curves of soil samples



(a) Relationship between compaction method and maximum dry density



(b) Relationship between compaction method and optimum water content

Fig.4 Relationship between compaction method and characteristics of compaction

試料採取時の三郡変成岩風化土の自然含水比は $w_n=11\sim45\%$ であり，全試料の I_L は 0.2 以下である．液性指数 I_L は細粒土の自然状態における相対的な硬軟の度合いを示す量であり， I_L の値が 0 に近いほど土は硬くなる．したがって，自然状態において，三郡変成岩風化土は相対的に硬い状態で存在している．

Fig.3 に粒径加積曲線を示す．泥質片岩風化土の粒度特性は，均等係数 $U_c=10\sim128$ ，細粒分含有率 $F_c=32\sim72\%$ と広範囲に分布する．また，含まれている土粒子の粒径範囲が広く，粒度分布が良い．塩基性片岩風化土および蛇紋岩風化土は細粒分を多く含んで階段状粒度を呈しており，粒度分布が悪い．一般に粒度分布が良い土は締め固めたときに大きい粒子の間に小さい粒子が入りこんで締まりやすくなる⁵⁾．

4. 締め固め特性

締め固め方法の違いが締め固め特性に及ぼす影響を調べるために，全試料を A-a 法，A-b 法，E-a 法，E-b 法でそれぞれ締め固め試験を行った．E 法は A 法より高い締め固めエネルギーで締め固める．a 法は繰返し法および b 法は非繰返し法である．

Figs.4(a), (b) にそれぞれの試験結果を示す．A-b 法，A-a 法，E-b 法，E-a 法の順に最大乾燥密度は増加し，最適含水比は減少した．すなわち，三郡変成岩風化土は一般の土と同様に，締め固めエネルギーを高くし，繰返し締め固めることにより最大乾燥密度は増加し，最適含水比は減少することが分かった．

Fig.5 に代表的な締め固め曲線として E-a 法による締め固め曲線を示す．泥質片岩風化土は最大乾

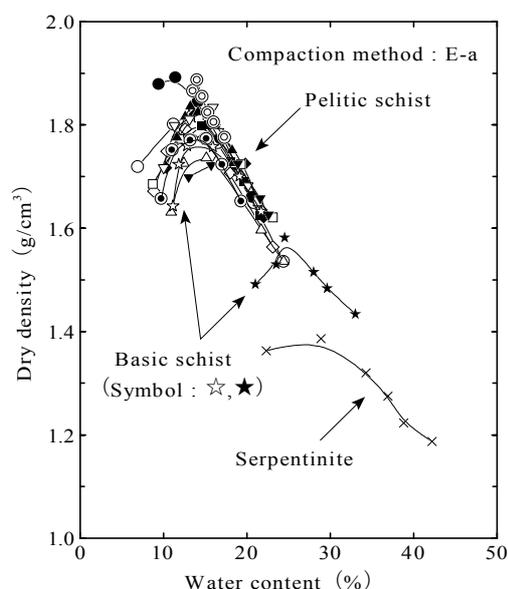


Fig.5 Relationship between water content and dry density

燥密度 $\rho_{dmax}=1.73\sim1.89\text{ g/cm}^3$ および最適含水比 $w_{opt}=11.0\sim17.5\%$ であり締め固め特性としては悪くなかったが，細粒分を多く含む塩基性片岩風化土および蛇紋岩風化土は最大乾燥密度が低く，最適含水比が高い．Figs.6(a), (b) にそれぞれ細粒分含有率と最大乾燥密度，最適含水比との関係を示す．細粒分含有率が 70% 以下の範囲では最大乾燥密度および最適含水比はほぼ一定であるが，70% 以上の範囲では最大乾燥密度は減少し，最適含水比は増加する．

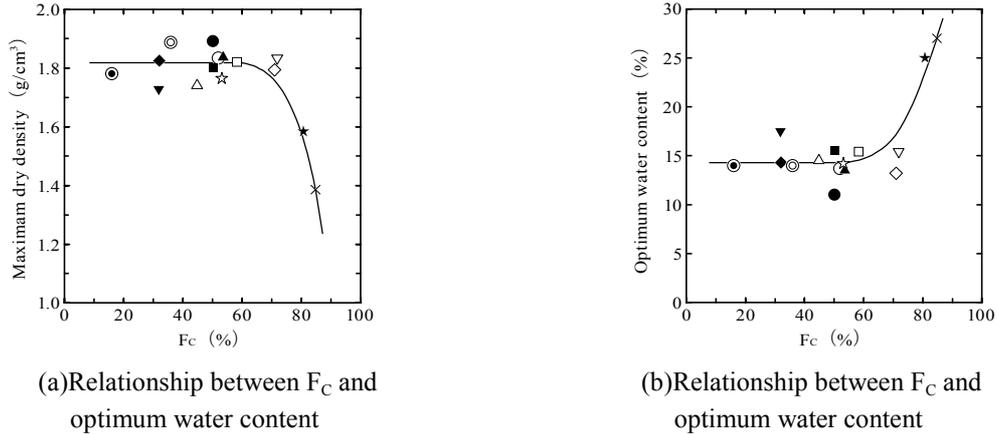


Fig.6 Relationship between F_c and characteristics of compaction

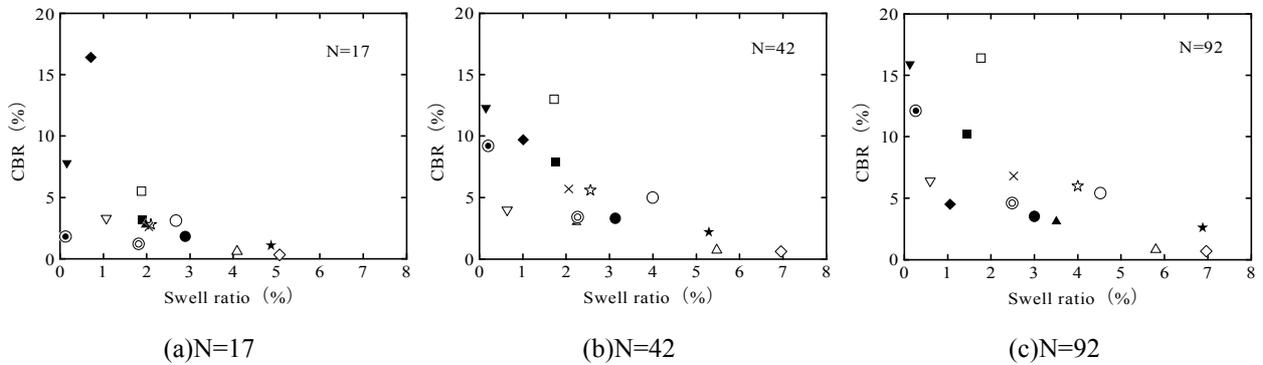


Fig.7 Relationship between swell ratio and modified CBR

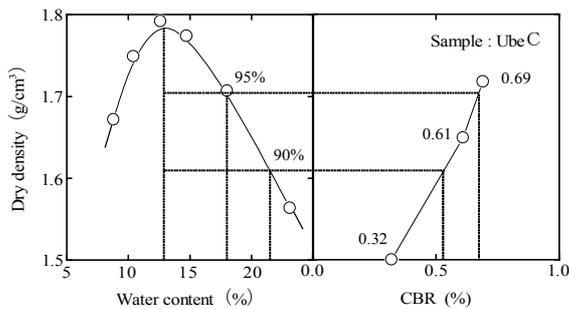


Fig.8 Result of CBR test (Ube C)

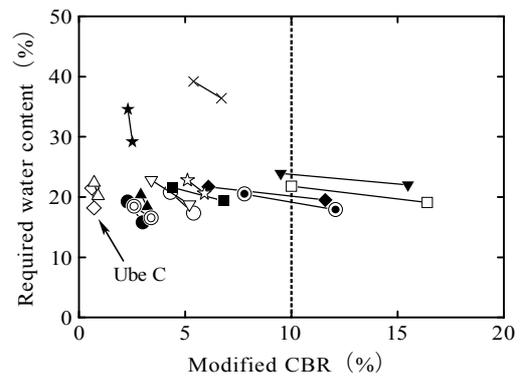


Fig.9 Relationship between modified CBR and required water content

5. CBR 特性

山口県内における三郡変成岩の分布域において、道路工事などに盛土材料として三郡変成岩風化土が用いられている³⁾。本研究では、乱した三郡変成岩風化土の路盤材料としての品質を検討することを目的として修正 CBR を求めた。

供試体は一度自然乾燥した後、最適含水比に調整し CBR モールドに詰めて 4.5kg ランマーで 3 層 17, 42, 92 回突き固めたものを 4 日間水浸

させて作製した。そして、それぞれの貫入抵抗値を測定し、CBR を求めた。

Figs.7(a)~(c)に吸水膨張比と CBR の関係を示す。図中の N は突き固め回数である。いずれの突き固め回数に対しても吸水膨張比が増加すると CBR が減少する。吸水膨張比が増加する原因として膨張性粘土による吸水膨張や飽和度の上

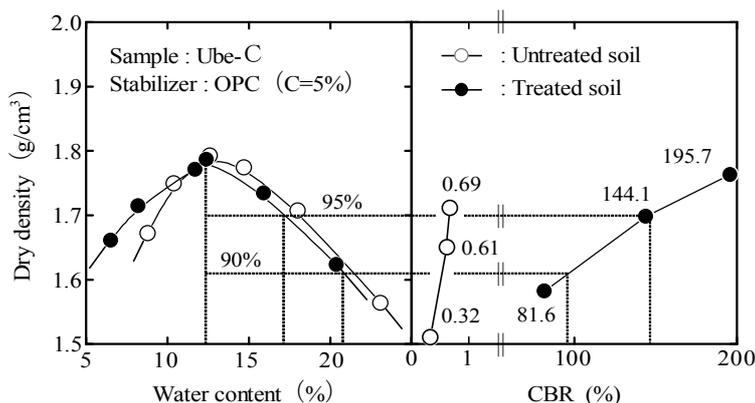


Fig.10 Relationship between water content, CBR and dry density (Treated soil and untreated soil)

昇によるサクシジョンの消失などが考えられる。
Fig.8 に代表的な試料として Ube C の含水比および CBR と乾燥密度の関係を示す。修正 CBR は、所要の締固め度を最大乾燥密度の 90～95% に設定して、それに対応する CBR から決定した。また、施工含水比は最適含水比より湿潤側にある所要の締固め度に対応する含水比とした。**Fig.9** に修正 CBR と施工含水比の関係を示す。三郡変成岩風化土のほとんどは、修正 CBR が 10% 以下、もしくは締固め度が 90% になると、修正 CBR が 10% を下回る。ちなみに、修正 CBR 10% という値は、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条件である⁹⁾。

いずれの三郡変成岩風化土の修正 CBR 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。したがって、路盤材料として用いるためには何らかの地盤改良を行う必要がある。そこで、安定処理をした三郡変成岩風化土の締固め・CBR 特性について次章で述べる。

6. 安定処理した土の締固め・CBR 特性

6.1 安定処理の目的と安定材

最近、施工コストの削減や環境保全の立場から道路建設の際に発生する建設残土に安定処理を施して適当な支持力を持つように土質改良し、最適な設計をするようになってきている⁷⁾。そこで、修正 CBR が 1% 以下の試料 Ube-C に対して安定処理をし、その土質改良効果について検討した。安定材は普通ポルトランドセメント (OPC) を用いた。また、安定材の添加率は土の乾燥重量に対して 5% とした。

6.2 供試体作製方法

試料の含水比を最適含水比に調整した後、所定量の安定材を加え、よくかき混ぜて直ちに試料を CBR モールドに詰める。そして、4.5kg ランマーで各所定の回数 3 層 17, 42, 92 回ずつ突き固める。それらを 3 日間密封して室内養生し、さらに 4 日間水浸させてから貫入抵抗値の測定を行った。

6.3 締固め・CBR 特性

Fig.10 に含水比、乾燥密度および CBR の関係を示す。図中の○で表すデータは **Fig.8** で示したものと同様である。**Fig.10** の左側の含水比と乾燥密度の関係より、安定処理を施すことで締固め曲線は若干乾燥側に移動したが、最大乾燥密度および最適含水比はほとんど変化しなかった。この理由として、試料に安定材を加えて混ぜた直後に締固めたので、セメント水和物の生成がほとんどされていないため、締固め特性に及ぼす影響が無かったと考えられる。**Fig.10** の右側に CBR と乾燥密度の関係を示す。安定処理によって、修正 CBR は 0.55～0.68% から 95.8～144.1% と、約 200 倍になった。また、**Table 2** の CBR 試験結果に示すように、安定処理によって水浸による吸水膨張比は 0% になり、水に対して強い土質改良効果が得られた。これは、締固めた後に 3 日間室内養生し、さらに 4 日間水浸している間にセメント水和物が十分に生成されたためである。

7. 走査型電子顕微鏡による土粒子構造の観察

Photos.1～3 に泥質片岩風化土、塩基性片岩風

化土，および蛇紋岩風化土の土粒子構造をそれぞれ示す。Fig.11 に示すように，(a)は締固める前の土粒子構造，(b)~(d)は，含水状態が最適含水比より乾燥側，最適含水比，最適含水比より湿潤側で締固めた後の土粒子構造の写真である。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土粒子は砂のような単粒構造ではなく，薄片状の土粒子が団粒化した構造を呈していた。観察方向は鉛直軸を垂直に切った断面(H断面)である(Fig.11 参照)。写真中の黒色部分を間隙とみなす。泥質片岩風化土は含水比が最適含水比付近になると最も密な土粒子構造を呈している。一方，塩基性片岩風化土および蛇紋岩風化土は，含水比の変化に伴う土粒子構造の変化がはっきりと表れていない。これは含水比を変えて締固めても乾燥密度があまり増加しないことを裏付けている。

Photo.4 に未処理土，Photo.5 に安定処理した土の CBR 試験後の土粒子構造を示す。安定処理した土には，未処理土には生成していない針状のセメント水和物が確認でき，これによって土

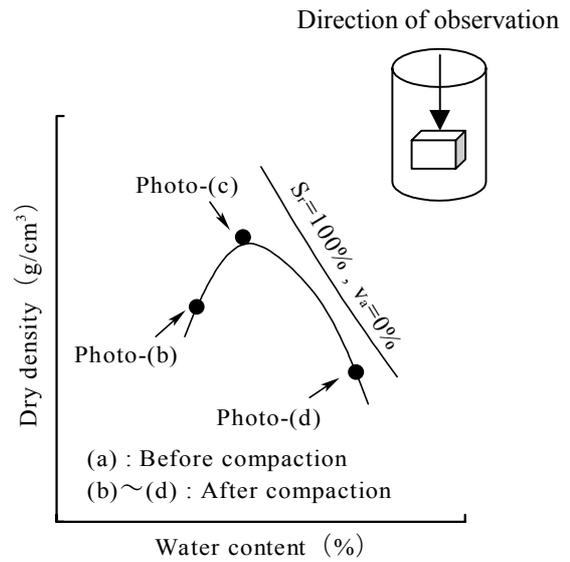
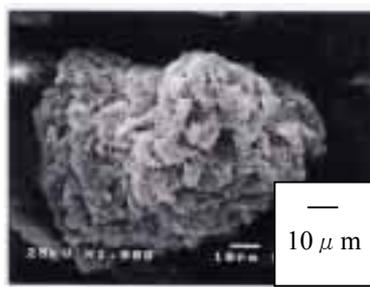
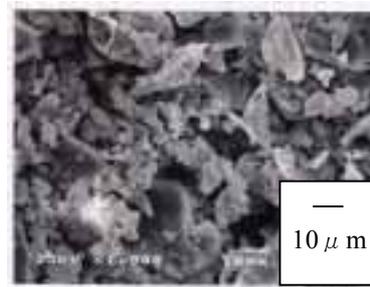


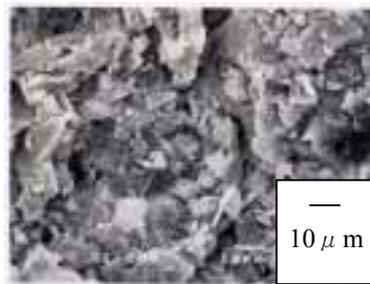
Fig.11 Photography condition



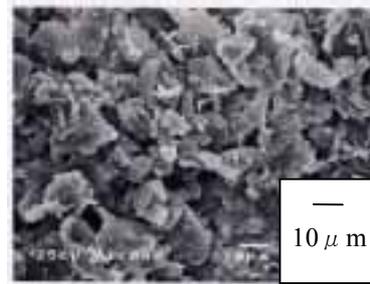
(a) Before compaction test



(b) Dry side
 $\rho_d=1.717 \text{ g}/\text{cm}^3$, $w=10.3\%$



(c) Optimum water content
 $\rho_d=1.821 \text{ g}/\text{cm}^3$, $w=13.7\%$

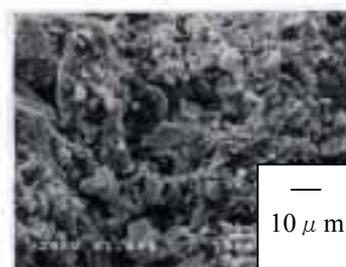


(d) Wet side
 $\rho_d=1.621 \text{ g}/\text{cm}^3$, $w=22.0\%$

Photo.1 Weathered soil of Pelitic schist



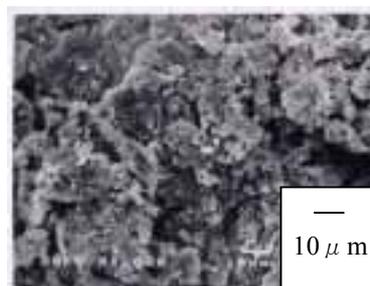
(a) Before compaction test



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



(c) Optimum water content
 $\rho_d = 1.582 \text{ g/cm}^3$, $w = 24.5 \%$

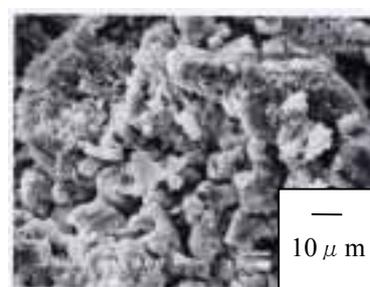


(d) Wet side
 $\rho_d = 1.484 \text{ g/cm}^3$, $w = 29.6 \%$

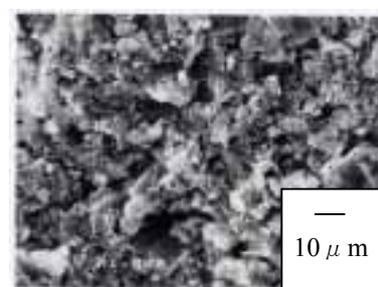
Photo.2 Weathered soil of Basic schist



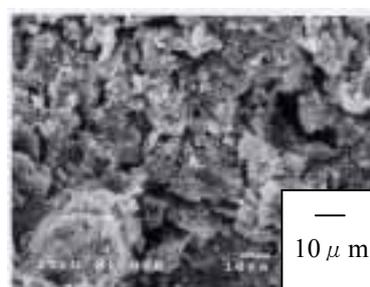
(a) Before compaction test



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



(c) Optimum water content
 $\rho_d = 1.386 \text{ g/cm}^3$, $w = 28.9 \%$



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

Photo.3 Weathered soil of Serpentine

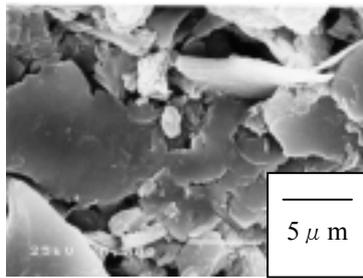


Photo.4 Structure of untreated soil

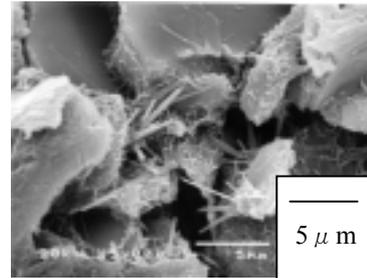


Photo.5 Structure of treated soil

粒子が拘束されて粒子間の結合を強めたために修正 CBR が著しく増加したものと考えられる。

8. まとめ

- 1)本研究で用いた三郡変成岩風化土は 14 試料である。それらの物理的性質は土粒子密度 $\rho_s=2.6 \sim 2.7\text{g/cm}^3$ 、液性限界 $w_L=29 \sim 52\%$ 、塑性限界 $w_p=23 \sim 44\%$ 、塑性指数 $I_p=4 \sim 16$ である。試料採取時の自然含水比は $w_n=11 \sim 45\%$ であり、全試料の液性指数 I_L は 1 以下であった。土質分類は砂質土ないしシルト低液性限界である。
- 2)三郡変成岩風化土の締固め特性は一般の土と同様であり、締固めエネルギーを高くして繰返し締め固めると最大乾燥密度は増加し、最適含水比は減少する。
- 3)三郡変成岩風化土のうち泥質片岩風化土は最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.73 \sim 1.89\text{g/cm}^3$ および最適含水比 $w_{opt}=11.0 \sim 17.5\%$ であり、締固め特性としては悪くなかったが、細粒分を多く含む塩基性片岩風化土および蛇紋岩風化土は最大乾燥密度が低く最適含水比が高い。
- 4)水浸による吸水膨張比が大きいほど CBR は低下した。三郡変成岩風化土のほとんどは修正 CBR が 10%以下であり路盤材料として用いるには安定処理をする必要がある。
- 5)安定材として普通ポルトランドセメントを添加率 5%程度で安定処理した。水浸による吸水膨張比はほぼ 0%であり、修正 CBR が 0.55～0.68%から 95.8～144.1%へと約 200 倍もの改良効果が得られた。
- 6)三郡変成岩風化土の土粒子は砂のような単粒構造ではなく、薄片状の土粒子が団粒化した構造を呈していた。また、安定処理を施した土にはセメント水和物の生成が確認できた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、土の安定処理および走査型電子顕微鏡撮影に関して多大なご助力を頂いた(株)宇部三菱セメント研究所セメントグループリーダー岡林茂生氏および同グループ研究員藤野秀利氏に深く感謝いたします。また、締固め試験および CBR 試験の実施に協力して頂いた鶴田泰徳氏をはじめとする常盤地下工業(株)の皆様にも深く感謝いたします。

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) 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。
- 4) 山口地学会編（代表編集西村祐二郎，松里英男）：山口県の岩石図鑑，第一学習社，pp.158～164，1991。
- 5) 河野伊一郎・八木則男・吉国 洋編著：土の力学，技報堂出版，pp.198～199，1990。
- 6) 日本道路協会：簡易舗装アスファルト舗装要綱，pp.11～16，1979。
- 7) 西 勝・井奥哲夫・K. T. Hye・西野日出樹：セメント系固化材および生石灰を用いた路床安定処理に関する研究，第 31 回地盤工学研究発表会，pp.2359～2360，1996。

(平成12年8月31日受理)