

◇研究報告◇

山口県内における三郡変成岩風化土の 化学的・物理的性質および締固め特性

山本哲朗*・鈴木素之*・小山泰正**・植野泰史***

Chemical and physical properties, and compaction characteristics of weathered soil of Sangun metamorphic rock in Yamaguchi prefecture

Tetsuro Yamamoto*, Motoyuki Suzuki*, Yasumasa Koyama**, Hirohumi Ueno***

Sangun metamorphic rock is widely distributed in Yamaguchi prefecture. Slopes consisting of the weathered soil of Sangun metamorphic rock with schistosity, frequently failed during heavy rainfalls. Therefore the weathered soils may be regarded as one of problematic soils. Chemical and physical properties of 15 samples were examined using a X-ray fluorescence spectrometer and some soil test apparatuses, respectively. Furthermore compaction test were performed on the samples. The tests showed that compaction index had a good correlation to SiO_2 , Fe_2O_3 contents.

1. はじめに

山口県内には中生代トリアス紀の三郡変成岩（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、きわめて風化し易い性質がある。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、梅雨およびその末期における豪雨時に斜面崩壊もたびたび発生し^{1)~5)}、問題土として認識されてきた。その一方で、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注目されつつある⁶⁾。しかしながら三郡変成岩風化土は土質工学的観点からみれば未だ不明な点が多い。

本研究では、まず三郡変成岩の鉱物・化学組成および諸物理的性質を、また土質工学的性質のうち締固め特性を調べた。さらに締固め特性と化学的性質との関係について分析を試みた。

2. 三郡変成岩の分布と試料採取地点

図1に山口県における三郡変成岩（狭義には周防変成岩）の分布図を示す⁷⁾。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散在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、その後の研究により三郡変成岩は形成年代や形成条件から以下の3つのタイプ、1)三郡一蓮華変成岩(約300Ma：古生代石炭紀)、2)周防変成岩(約220Ma：中生代トリアス紀)、3)智頭変成岩(約180Ma：中生代ジュラ紀)に区分される⁷⁾。

このうち山口県内に広く分布するのは周防変成

■：三郡変成岩分布域（周防変成岩）

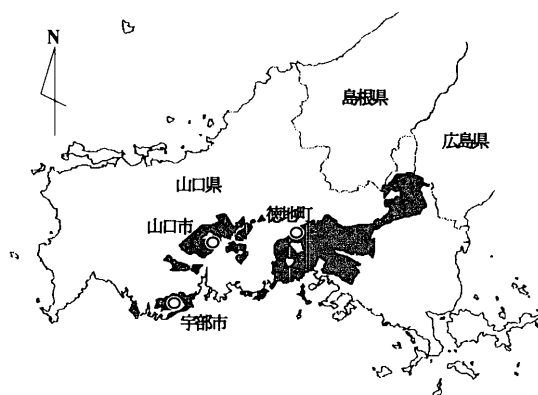


図1. 山口県における三郡変成岩分布図

* 工学部社会建設工学科 Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering

** 大学院 Graduate School of Science and Engineering

*** 常盤地下工業株 Tokiwa Tika Kogyo Co., Ltd

岩であり、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体とし、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（アプライト）ことが多い。

以下に本研究で用いた三郡変成岩の風化した土試料の内訳を示す。宇部市、山口市、徳地町および島根県浜田市から採取した泥質片岩風化土（12試料）、宇部市から採取した塩基性片岩風化土（1試料）、および宇部市から採取した蛇紋岩風化土（2試料）の計15試料、さらに比較のための試料として、熊毛町から採取したまさ土（1試料）、および宇部市から採取したアプライト（1試料）である。

3. 物理的性質

三郡変成岩風化土の物理的性質を土質試験法⁸⁾にもとづいて調べ、表1に示す結果を得た。三郡変成岩風化土の物理的性質は土粒子密度 ρ_s 2.6～2.7g/cm³、液性限界 w_L =29～52%、塑性限界 w_P =23～44%、塑性指数 I_P =4～16である。試料採取時の三郡変成岩風化土の自然含水比 w_n は11～45%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、三郡変成岩風化土は相対的に固い状態で存在していることがわかる。強熱減量 L_i は土の風化の度合いを知るための指標である。三郡変成岩風化土のほとんどが10%近い値をとっており、各試料とも比較的風化の進んだ土であることがいえる。

工学的分類について記す。泥質片岩はほとんどの試料が低液性限界シルト(ML)であり、一部、砂質土(SF)であった。塩基性片岩については高液性限界シルト(MH)、蛇紋岩においてはML、粘土(CH)であった。

図2は、工学的性質の指標の一つである液性限界および塑性指数を示した塑性図である。これは土の塑性や圧縮性など工学的性質を定性的に知るためのものである。

三郡変成岩風化土の粒度特性を調べ、図3の粒径加積曲線を得た。泥質片岩風化土の粒度特性は、均等係数 U_c =10～128、細粒分含有率 F_c =32～72%と広範に分布する。また含有されている土粒子の粒径範囲が広く、粒度分布がよい。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。

4. 化学組成

本研究で用いた試料の化学組成を調べるため、

表1. 土試料の物理的性質

試料採取地点	試料名	岩種	w_n (%)	ρ_s (g/cm ³)	U_c	D_{max} (mm)	D_{50} (mm)	F_c (%)	F_{60} (%)	w_L (%)	w_P (%)	I_P	I_L	L_i (%)	土質分類	
宇部市	U-A	泥質片岩	21.0	2.703	9.8	9.5	0.058	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	0.095	44.8	6.0	33.6	27.9	5.7	-2.88	4.9	SF-G	
山口市	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	0.085	50.4	9.8	31.7	25.8	5.9	-2.14	5.6	ML	
徳地町	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	
浜田市(島根県)	H-A		16.8	2.679	23.1	11.5	0.650	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	
宇部市	U-F		塩基性片岩	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	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
熊毛町	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
宇部市	U-J	アプライト		-	2.594	17.1	12.4	0.650	13.9	3.0	-	N.P.	N.P.	-	3.6	SF-G

全自動蛍光X線分析装置（理学電機工業株；RIX3000）による試験を行った。X線管電圧および管電流はそれぞれ50kV、50mAである。表2に試験結果を示す。泥質片岩、および比較のための試料K-A、U-JはSiO₂が多く、石英が多く含まれていることによると考えられる。また、泥質片岩はAl₂O₃に富み、MgOに乏しいことがわかる。一方の塩基性片岩U-G、および蛇紋岩U-H、U-IはSiO₂に乏しく、MgO、Fe₂O₃に富んでいる。

5. 三郡変成岩の土質工学的性質

三郡変成岩風化土の土質工学的性質を知るため、「突き固めによる土の締固め試験(JIAA1210)」⁹⁾を行った。以下に試験方法および試験結果を示す。

締固め試験は、土を締め固めたときの乾燥密度と含水比の関係を知ることができ、これにより土を最も安定な状態に締め固められる最適含水比を予測することができる。試験方法は、所定のモールドに試料を3層あるいは5層に分けて入れ、いずれかのランマーで所定の突き固め回数で突き固める。このとき試料の含水比を6種程度に変え、それぞれの含水比に対応する乾燥密度を求め、含水比と乾燥密度の関係を示す曲線を描いた。乾燥密度が最大となる点を最大乾燥密度 ρ_{dmax} とし、そのときの含水比を最適含水比 w_{opt} とする。さらに、試料の乾燥処理から乾燥法と湿潤法に分けられ、

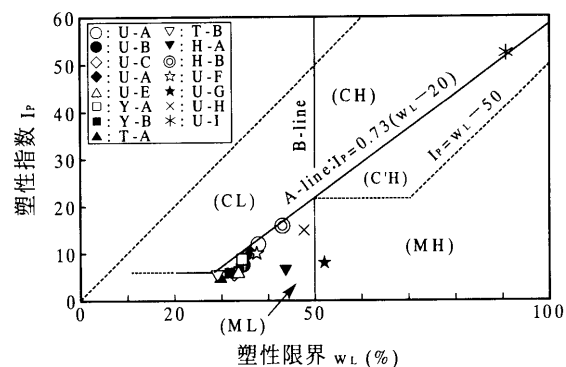


図2. 塑性図

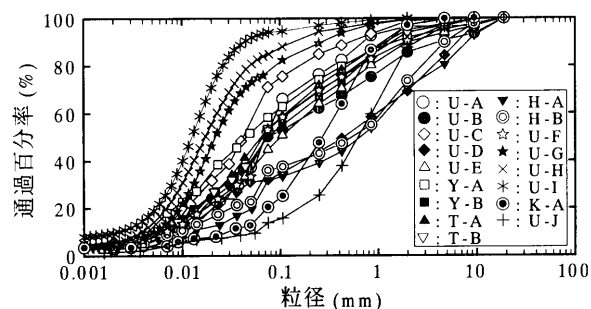


図3. 土試料の粒径加積曲線

前者に関しては、含水比を変えて突き固める際、同一試料を全試験中繰り返して用いる繰り返し法(a法)と、常に新しい試料を用いる比繰り返し法(b法)とがある。表3(a),(b)に各試験の突き固め方法の種類および土試料の準備方法を示す。今回はE-a法により実験を行った。

表2. 土試料の化学組成

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	13.17	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	0.002	0.05	0.11	0.87	5.51	0.01	3.6	100.9

図4に各試料の締固め曲線 (E-a法) を示す。泥質片岩風化土は最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.73\sim 1.89$ g/cm³ 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はなかったが、細粒分を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。

6. 三郡変成岩における化学組成と工学的性質との相関

化学組成等の土の諸物性が工学的性質に与える影響としてここでは締固め特性を取り上げ、両者の相関性をみる。

図5(a)~(c)に最大乾燥密度とSiO₂、Al₂O₃およびFe₂O₃含有率の関係を示す。図5(a)から分かるように、三郡変成岩、花崗岩類の種類に関わらず、SiO₂含有率が増加するほど、最大乾燥密度が増加する傾向にある。このことから、同じ三郡変成岩でも、SiO₂すなわち石英が多く含まれる泥質片岩は締固め特性が良いといえる。また、逆にSiO₂に乏しい超苦鉄質の変成岩である蛇紋岩については最大乾燥密度が低い。図5(c)から、Fe₂O₃含有率が増加するほど最大乾燥密度は減少しており、すなわちFeを多く含む苦鉄質の変成岩である塩基性片岩の締固め特性が悪いことを示している。

図6(a), (b)に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6(a)より三郡変成岩、花崗岩類に関わらず、細粒分含有率60%を境に、それ以上の範囲で最大乾燥密度は減少傾向にある。また同様に、図6(b)より、強熱減量の増加に伴い最大乾燥密度は減少している。このことから、土の風化が締固め特性に影響している

ことが考えられる。

7. まとめ

山口県内を中心として15種類の三郡変成岩風化土の化学的・物理的性質および締固め特性を調べて以下の点が明らかになった。

- 1) 三郡変成岩風化土のうち泥質片岩風化土および比較のための花崗岩類の試料はSiO₂に富む。蛇紋岩および塩基性片岩の風化土は逆にSiO₂に乏しく、MgO、Fe₂O₃に富む。
- 2) 三郡変成岩風化土は比較的風化の進んだ土であり、細粒分を多く含む。とくに塩基性片岩および蛇紋岩の風化土に関してはその傾向が強い。
- 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 $\rho_{dmax}=1.73\sim 1.89$ g/cm³ 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

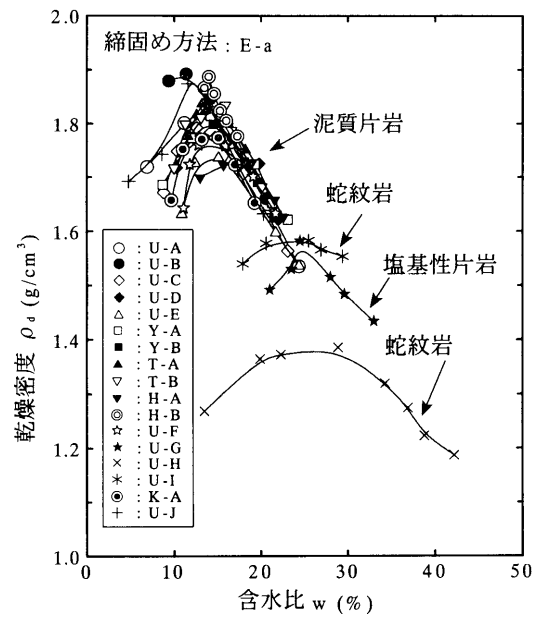


図4. 土試料の締固め曲線

表3(a). 突固め方法の種類

呼称	ランマー 質量 (kg)	締固め エネルギー (kJ/m ³)	モールド 内径 (cm)	突き固め 層数	1層当たり の突き固め 回数
A	25	550	10	3	25
B	25	550	15	3	55
C	45	2500	10	5	25
D	45	2500	15	5	55
E	45	2500	15	3	92

表3(b). 試料の準備および使用方法の組合せ

組合せの 呼び名	試料の準備準備 および使用方法
a	乾燥法で繰返し法
b	乾燥法で比繰返し法
c	湿潤法で比繰返し法

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。

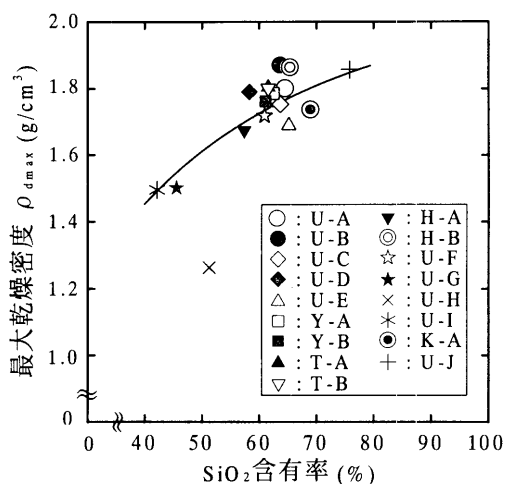


図 5(a). SiO₂と最大乾燥密度の関係

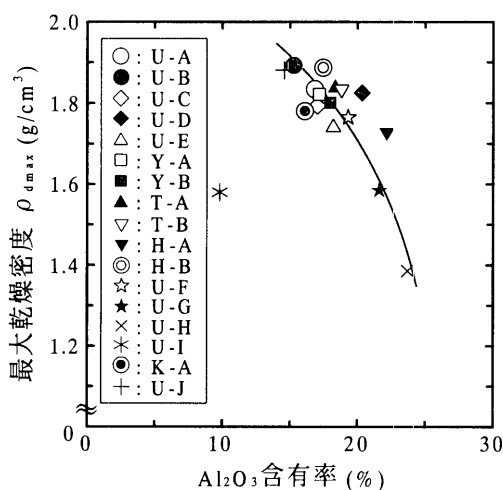


図 5(b). Al₂O₃と最大乾燥密度の関係

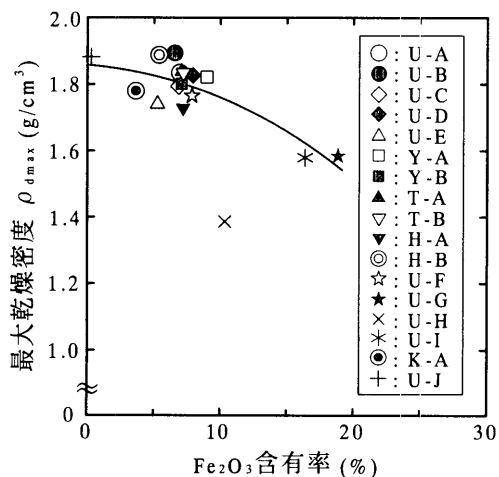


図 5(c). Fe₂O₃と最大乾燥密度の関係

4) SiO₂およびFe₂O₃の含有率の差異による三郡変成岩の締固め特性の違いが見られた。

5) 三郡変成岩における締固め特性は風化の影響を受けやすい。

謝辞 蛍光分析X線分析装置を用いた化学分析を行うにあたり多大な御協力を頂きました機器分析センターの永尾隆志助教授に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，

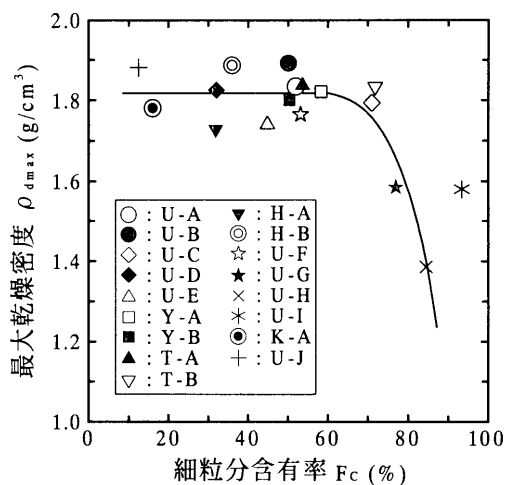


図 6(a). 細粒分含有率と最大乾燥密度の関係

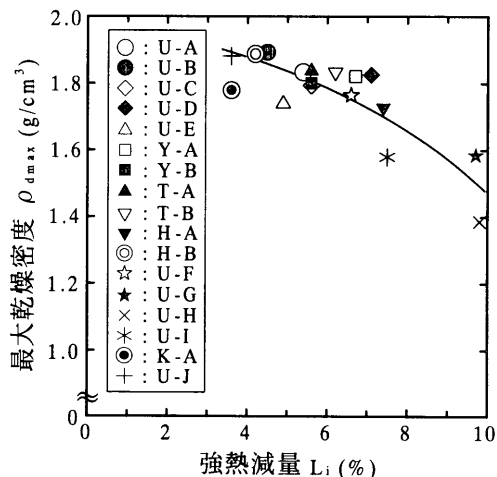


図 6(b). 強熱減量と最大乾燥密度の関係

- Vol.44, No.11, pp.9～12, 1996.
- 3) 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, 1997.
 - 4) 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.
 - 5) 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.
 - 6) 小林 健・北川俊昭・山本哲朗・上野孝弘: 三郡変成岩風化度を用いた盛土施工, 地盤と建設, vol.15, No.1, pp.75～79, 1997.
 - 7) 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.
 - 8) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), pp.51～108.
 - 9) 地盤工学会編: 土質試験の方法と解説(第一回改訂版), pp.252～265.