

セメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす 配合条件の影響

亀井 健史^{*}, 大本 和樹^{**}, 志比 利秀^{*}, 松尾 和俊^{***}

^{*}島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

^{**}中国木材(株)

^{***}島根大学大学院総合理工学研究科 地球資源環境学専攻

Effects of mix proportion conditions on unconfined compressive strength of cement stabilized soils

Takeshi KAMEI^{*}, Kazuki OHMOTO^{**}, Toshihide SHIBI^{*} and Kazutoshi MATSUO^{***}

^{*}Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

^{**}Chugoku Lumber Co., Ltd.

^{***}Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering,
Graduate School of Shimane University

Abstract

Cement-treated dredged soil can be used in various structures. Predicting the compressive behavior of cement stabilized soil is of major interest in designing soil stabilization. This paper presents the effects of mix proportion conditions on unconfined compressive strength of cement stabilized soils with a wide range of water to cement weight ratios (W/C ratio) and soil to cement weight ratios (S/C ratio). We found that the extent and rate of unconfined compressive strength development is related to the W/C and S/C ratios. In addition, some empirical correlations, which are simple but very useful in practice, are presented to predict the unconfined compressive strength on the basis of W/C and S/C ratios. These findings permit proper selection of mix proportion conditions for cement stabilized soils.

1. はじめに

軟らかい粘土, シルト, 有機質土, あるいは緩い砂質土などの土層で構成されており, 圧縮性が高く, 強度が弱いといった特徴を持つ地盤のことを, 一般的に軟弱地盤と呼んでいる. このような軟弱地盤は, 沖積低地などに多く分布しており, 地下水位の高い高含水比の地盤や沖積層のように堆積してから十分な圧密を受けていない地盤であることが多い. とくに, 我が国では, 軟弱地盤が多く分布する沖積平野に多くの都市が形成されており, 世界でも有数の軟弱地盤国となっている. このような背景には, 国土に占める山地の割合が大きく, 安定した平地が少ないことや, 交通や物流の面で有利となる平地に人口が集中しやすいことなどが考えられる. そのため, 軟弱地盤上に構造物を建設する機会が多くなっている.

このような軟弱地盤上に盛土などの土構造物を築造する場合には, 盛土の安定問題のみならず, 軟弱地盤の鉛直方向の変位(沈下)および水平方向の変位(側方流動)の変形問題にも注意をする必要がある. これらの問題に対する最善の策は, 軟弱地盤上への構造物の建設を避けることであるが, 我が国の土地利用の現状を考えた場合には極めて困難である. したがって, 軟弱地盤上に構造物を建設する機会が多くなるが, その対策としては, 構造物に改良を加えて現状の地盤で対応できる構造物を建設する方法と地盤自体を改良して構造物を十分支持できる地盤に改良する方法がある.

地盤改良には数多くの改良工法があり, 最適な工法の選定には, その目的, 対象土質, 改良効果, 施工工期, 工費, 施工の規模, 安全性および環境への影響などの種々の要因を考慮して, その地盤に最適な工法が選定される.

本研究では、工学的に必要な性質を満たしていない地盤を構造物の基礎地盤として利用するために、土に安定材を混合し、安定材の化学的固化作用を利用して、土の性質を改良する安定処理工法に着目した。安定処理工法は、安定材と土との混合後に、締固めを行うものと、締固めを行わないものに大別される。前者の工法は、路盤、路床および盛土などの安定を目的とした浅層地盤を対象としている。一方、後者の工法は、高含水比であり、かつ多量の安定材の添加を必要とする粘性土の改良を目的として、浅層・深層地盤の両方を対象にしており¹⁾、安定材そのものの硬化反応あるいは土と安定材との硬化反応を利用して土を改良する。この工法には、浅層混合処理工法、深層混合処理工法、ソイルセメント柱列壁工法、事前混合処理工法などがある²⁾。これらの工法の特徴としては、適用可能な土質が粘性土地盤、有機質地盤、砂地盤と幅広く、非常に軟弱な地盤からかなり硬質な地盤まで施工が可能であり、改良効果が比較的早く現れることなどが挙げられる。また、安定材の種類や量の選定が重要であること、十分に土を乱した上であるいは乱しながら土と安定材を混合しそのまま現地で養生することなども特徴である。

各種の改良材には、対象となる土に対して適・不適があり、それぞれの地盤に適合する改良材を選択することが重要であると報告されている³⁾。安定処理土の強度は、攪拌時間や攪拌速度の違いの影響を受け、対象とする土質により、最適な攪拌時間や攪拌速度が異なることが報告されている⁴⁾。また、安定処理土が浸水すると強度は

表-1 MC クレーの物理的特性

ρ_d (g/cm ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	砂分 (%)	シルト (%)	粘土分 (%)
2.679	73.1	36.7	36.4	0.0	35.3	64.7

表-2 MC クレーの化学成分⁶⁾

化 学 成 分 (%)								
Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O
4.54	68.1	24.8	0.14	0.15	0.02	0.02	1.54	0.56

表-3 普通ポルトランドセメントの品質⁷⁾

比表面積 (cm ² /g)	凝結		安定性	圧縮強さ (MN/m ²)			酸化マグネシウム (%)	三酸化硫黄 (%)	強熱減量 (%)	全アルカリ (%)	塩化物イオン (%)
	始発 (min)	終結 (h)		3日	7日	28日					
2500 以上	60 以上	10 以下	良	12.5 以上	22.5 以上	42.5 以上	5.0 以下	3.0 以下	3.0 以下	0.75 以下	0.02 以下

低下するが、安定材の混合比が大きい場合には、以後水中で養生することにより強度増加が望める⁵⁾。さらに、安定処理土の含水比が大きいほど凍上量が增大するが、安定材の混合比を増加させることで凍上を防止できる可能性が示唆されている⁵⁾。

これまでに安定処理土の工学的特性に関して、種々の研究例が報告されている。しかし、セメント安定処理土における広範囲な配合条件（水セメント比 (W/C)、土セメント比 (S/C)）の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響については、不十分な点が多い。

本研究では、試料が流動性を有するすべての範囲内の配合条件 (W/C, S/C) に対して供試体を作製した。養生日数としては、1, 2, 4, 7, 14, 21, 28, 56 日を考え、それらすべての供試体において精度の高い一軸圧縮試験を行った。その結果、配合条件・養生条件の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにしている。また、上記試験条件と一軸圧縮強さとの相関関係についても検討した。

2. 試料および実験方法

2.1 試料

2.1.1 母材 (MC クレー)

本研究ではセメント安定処理土の粘土試料として、工業製品である MC クレーを使用した。MC クレーの物理的特性を表-1 に示す。

MC クレーは、天然のろう石を精製して得られる鉱物の粉末であり、鉱物学的名称はパイロフィライトである。構成鉱物はセリサイト、石英、パイロフィライト、カオリナイトを主成分としている。表-2 は、MC クレーの化学成分を示している⁶⁾。

表-4 普通ポルトランドセメントの化学成分の一例⁸⁾

化 学 成 分 (%)															
Ig.loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	R ₂ O	TiO	P ₂ O	MnO	Cl	
0.8	0.1	21.8	5.1	3.0	63.8	1.7	2.0	0.32	0.50	0.65	0.34	0.11	0.16	0.007	

表-5 本研究で作製した配合

S/C \ W/C	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1.5	○				
2.0	○				
2.5	○	○	○	○	
3.0	○	○	○	○	○
3.5	○	○	○	○	○
4.0		○	○	○	○

表-6 普通ポルトランドセメントを用いたセメント安定処理土の土粒子密度

S/C	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
ρ_s (g/cm ³)	2.920	2.871	2.839	2.816	2.799

MCクレー : $\rho_s = 2.679$ (g/cm³)普通ポルトランドセメント : $\rho_s = 3.160$ (g/cm³)

2.1.2 安定材 (セメント)

安定材には、最も一般的に建設工事に用いられており、セメント安定処理でも用いられている普通ポルトランドセメントを使用した。普通ポルトランドセメントの品質は、JIS R 5210 で表-3 のように定められている⁷⁾。また、普通ポルトランドセメントの化学成分の一例を表-4 に示す⁸⁾。

2.1.3 水

セメント安定処理を行なう際には、混練水として水が必要となる。また、混練水中に含まれている不純物が、強度発現に影響を及ぼす可能性があるため、本研究では混練水に蒸留水を用いた。

2.2 供試体の作製方法

本研究で用いた配合条件を表-5 に示す。なお、配合条件は、土セメント比 (S/C) が 1.0 から 3.0 の範囲の 5 通りに対して土とセメントが均質に混合できる水セメント比 (W/C) を選定した。セメント安定処理土供試体の土

粒子密度は、セメントおよび母材の土粒子密度と、配合条件から求めることができる。表-6 は、本研究で作製した配合条件のセメント安定処理土の土粒子密度を示している。

また、供試体の作製方法は以下のとおりとなる。まず、母材 (MC クレー)、安定材 (普通ポルトランドセメント)、水 (蒸留水) を配合条件にしたがって用意する。水は、母材に加えるものと、セメントスラリー作製用とに二分しておく。母材、セメントにそれぞれ水を加え、母材は 5 分間、セメントは 3 分間よく混ぜ合わせる。その後両者を混合して、ソイルミキサーにより 10 分間よく混ぜ合わせる。攪拌後に、安定処理土の含水比を測定し、試料をモールド ($\phi = 50$ mm, $H = 100$ mm) に三層程度に分けて入れ、各層ごとに気泡の除去を行いながら均等に打設する。試料を打設したモールドの口をラップシートで密閉し、恒温室 (20°C) で所定の日数まで気中養生し保管した。養生日数は、1, 2, 4, 7, 14, 21, 28, 56 日の 8 種類を設定した。所定の養生日数を経た供試体は、両端面を成形し、実験に用いた。

2.3 実験方法

本研究では、土の最も基本的な強度、変形特性を評価する手段として一軸圧縮試験を行った。一軸圧縮試験は、ひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は 1%/min とした。また、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、一軸圧縮試験装置の上下加圧板の表面にシリコングリスを薄く塗布した。また、試験終了後の供試体の含水比を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 水セメント比およびセメント土比の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響

図-1 は、各配合条件から得られたセメント安定処理土の養生 28 日の一軸圧縮強さ ($q_{u(28)}$) の大きさを色の濃淡を用いて表したものである。色が濃い部分に対応する配合条件ほど、 $q_{u(28)}$ 値が大きな値であることを示している。白い部分は、本研究で作製しなかった配合条件に対応する。図より、水セメント比 (W/C) を一定とした場合には、土セメント比 (S/C) が増加するのに伴い $q_{u(28)}$ 値が大きくなるのがわかる。一方、S/C 一定の下では、W/C

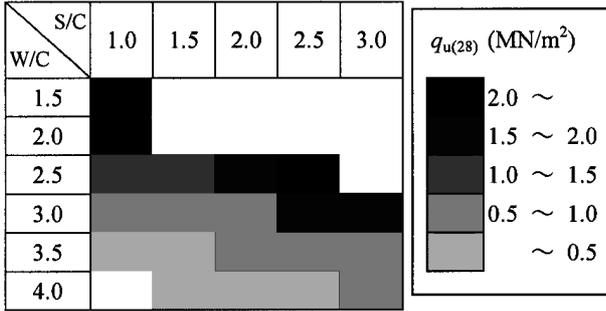


図-1 各配合条件より得られた養生 28 日の一軸圧縮強さ

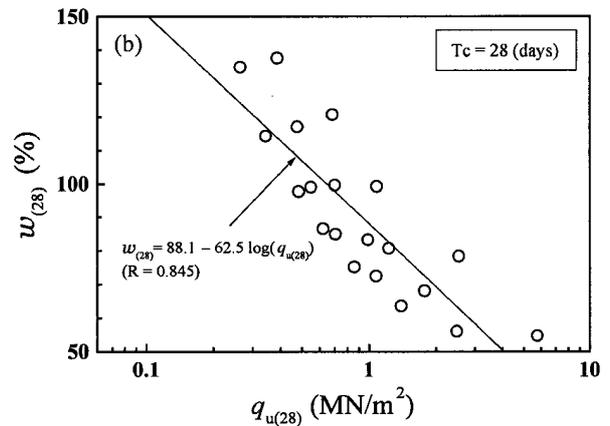
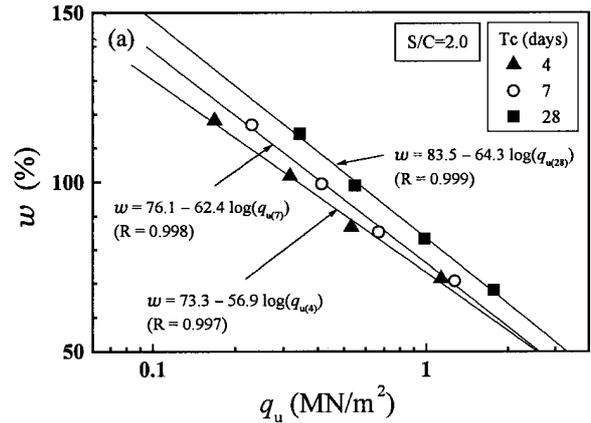


図-4 一軸圧縮強さに及ぼす含水比の影響

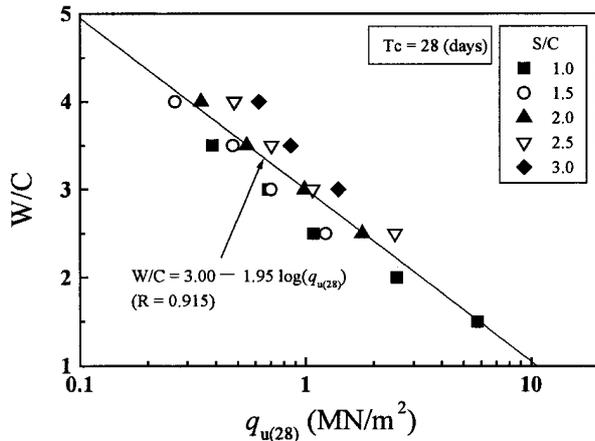


図-2 水セメント比と一軸圧縮強さの関係

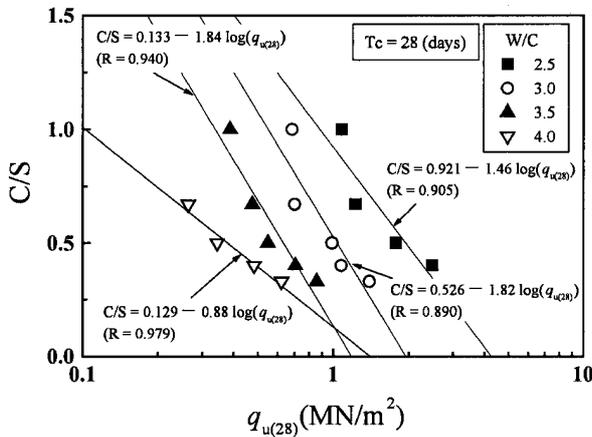


図-3 セメント土比と一軸圧縮強さの関係

の減少に伴って $q_{u(28)}$ 値は増加する傾向を示す。

W/C と $q_{u(28)}$ 値の関係を図-2 に示す。なお、 $q_{u(28)}$ 値に関しては、対数軸を用いて整理している。この場合、S/C の違いによらず、W/C の減少に伴い $\log(q_{u(28)})$ 値は直線的に増加する傾向が認められる。また、W/C を一定とした場合には、S/C の増加に伴う $\log(q_{u(28)})$ 値の増加量は W/C の増加に伴うそれよりも小さい。したがって、 $q_{u(28)}$ 値は、W/C を決定することにより、概略値を捉えることできる。

S/C の逆数を示したセメント土比 (C/S) に着目し、C/S と $\log(q_{u(28)})$ 値との関係を図-3 に示す。図より、W/C 一定の下では、C/S の減少に伴い $\log(q_{u(28)})$ 値には増加する傾向が認められる。このような傾向は、W/C の違いによらず認められた。これは、W/C 一定では、母材 (土) の量が増加するのに伴い、すなわち安定材 (セメント) の量が減少するのに伴い、得られる強度が僅かに大きくなることを示している。なお、C/S と $\log(q_{u(28)})$ 値の関係は一次関数によって表現することができる。

3.2 一軸圧縮強さに及ぼす含水比の影響

図-4 は、含水比 (w) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係を示している。まず、養生日数 (T_c) が 4, 7 および 28 日の w 値と $\log(q_u)$ 値の関係を図-4 (a) に示す。ここでは、土セメント比 (S/C) が 2.0、水セメント比 (W/C) が 2.5 ~ 4.0 の配合条件のセメント安定処理土を対象とした。いずれの T_c においても w 値が小さいものほど q_u 値が大きくなっており、 w 値が減少するのに伴い $\log(q_u)$ 値は直線的に増加することがわかる。また、その傾きは、 T_c の違いによらず、ほぼ一定となった。このような傾向は、他の S/C の場合も同様に認められた。つぎに、本研究で作製したすべての配合条件を対象として、 $T_c = 28$ 日の含

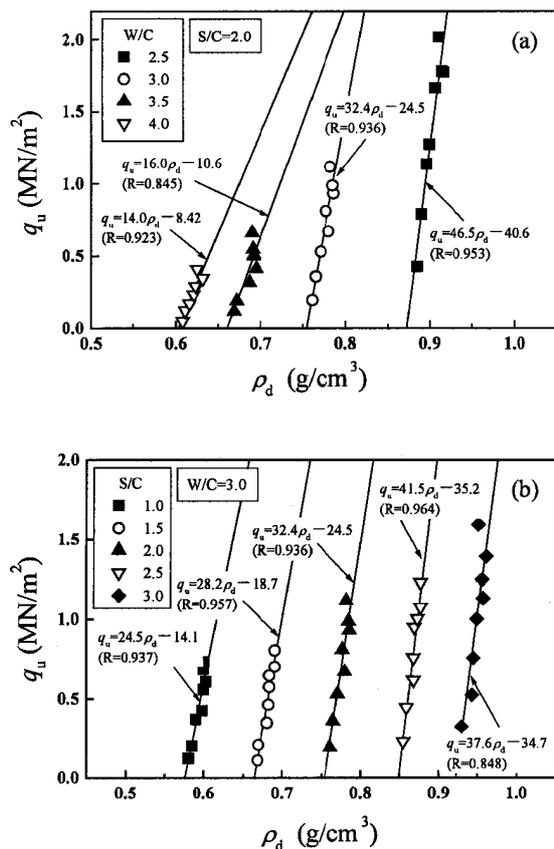


図-5 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

水比 ($w_{(28)}$) と一軸圧縮強さ ($q_{u(28)}$) の関係を図-4 (b) に示す。図より、 $w_{(28)}$ 値が小さいものほど、 $q_{u(28)}$ 値が増大する傾向が認められた。また、 $w_{(28)}$ 値と $\log(q_{u(28)})$ 値の関係は、配合条件の違いによらず、一次関数によって表すことができる。

3.3 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

養生日数 (T_c) の経過に伴う一軸圧縮強さ (q_u) と乾燥密度 (ρ_d) の関係を図-5 に示す。図-5 (a) は、水セメント比 (W/C) の違いが ρ_d 値と q_u 値に及ぼす影響を示している。ここでは、土セメント比 (S/C) が 2.0 のものを対象とした。なお、 ρ_d 値と q_u 値は、各 W/C に対して、 T_c の経過に伴い単調増加する。図より、 q_u 値は、 ρ_d 値の増加に伴い直線的に増加することがわかる。その関係は、一次関数で表現可能であった。また、その増加傾向は、W/C が小さいほど大きくなることが明らかとなった。

一方、S/C の違いが ρ_d 値と q_u 値に及ぼす影響に着目すると図-5 (b) が得られる。 q_u 値は、 ρ_d 値の増加に伴い直線的に増加しており、その傾きは S/C によらずほぼ一定値であった。なお、 q_u 値と ρ_d 値の関係は、一次関数で表現できる。

他の配合条件においても、同様な結果が得られ、W/C および S/C の違いによらず、 q_u 値は、 ρ_d 値の増加に伴い

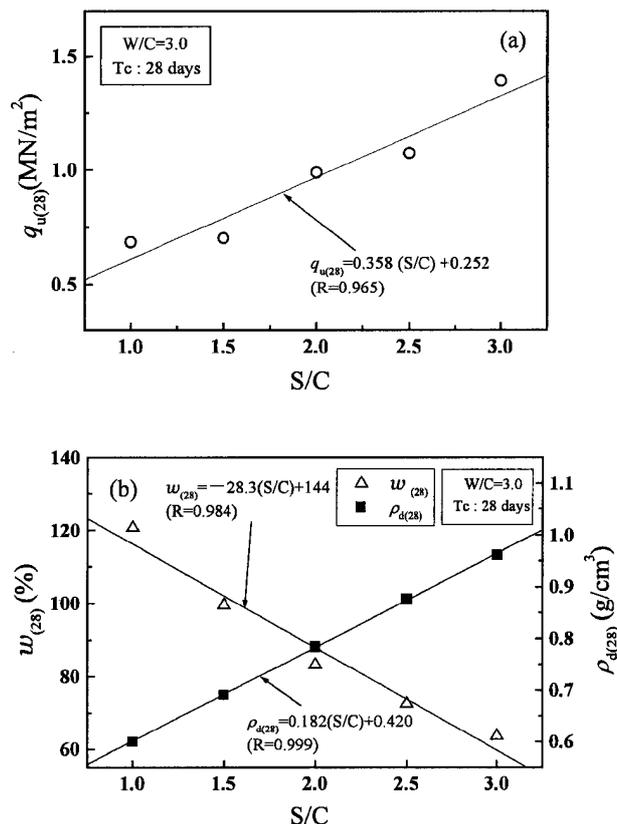


図-6 土セメント比の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響

直線的に増加する傾向を示した。これは、 T_c の経過に伴いセメント水和物が形成されることにより、 ρ_d 値が増加し、その結果 q_u 値も増加するためと考えられる。

3.4 土セメント比の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響

図-6 (a) は、養生 28 日の一軸圧縮強さ ($q_{u(28)}$) と土セメント比 (S/C) の関係を示している。ここでは、水セメント比 (W/C) が 3.0 のものを取り上げる。図より、S/C が大きくなるのに伴い、 $q_{u(28)}$ 値はほぼ直線的に増加していることがわかる。このような傾向は、他の W/C の場合においても認められた。しかし、S/C が大きくなるということは、土に対するセメントの量が減少することになり、セメントの量が少ないほど、強度が増加することになる。一般的には、セメントの量が多いほど強度は大きくなるとされており、このような現象は相反する結果となる。このような現象が認められた原因としては、各 S/C に対する養生 28 日の含水比 ($w_{(28)}$) および乾燥密度 ($\rho_{d(28)}$) の違いによる影響が考えられる。W/C 一定の場合に S/C の違いが、 $w_{(28)}$ 値と $\rho_{d(28)}$ 値に及ぼす影響を図-6 (b) に示す。 $w_{(28)}$ 値の変化に着目すると、S/C が増加するに伴い、 $w_{(28)}$ 値は直線的に減少していることがわかる。前述したように、含水比 (w) の減少に伴い一軸

表-7 各配合条件の W/(C+S)

S/C \ W/C	S/C				
	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
1.5	0.75				
2.0	1.00				
2.5	1.25	1.00	0.83	0.71	
3.0	1.50	1.20	1.00	0.85	0.75
3.5	1.75	1.40	1.17	1.00	0.88
4.0		1.60	1.33	1.14	1.00

圧縮強さは増加する傾向にあることから、W/C 一定の場合には、S/C の増加に伴い w 値が減少し、その結果 q_u 値は増加するものと考えられる。一方、 $\rho_{d(28)}$ 値は、S/C の増大に伴い直線的に増加している。図-5 からわかるように、乾燥密度 (ρ_d) が増加すると q_u 値も増加する。したがって、W/C 一定では、S/C の増加に伴い ρ_d 値も増加し、得られる q_u 値も増加することがわかる。

以上の結果より、W/C 一定の場合においては、S/C が増加するのに伴い、 w 値は減少し、 ρ_d 値は増加する。その結果、 w 値の減少と ρ_d 値も増加は、互いに q_u 値を増加させる要因であるため、S/C の増加に伴い q_u 値が増加するものと考えられる。

3.5 作製時の含水比が一定の配合条件下での一軸圧縮強さ

セメント安定処理土を作製する場合、水、母材 (土)、および安定材 (セメント) が必要となる。しかしながら、配合設計を行なう場合、土セメント比 (S/C)、水セメント比 (W/C) を用いて管理を行なっている。S/C と W/C は、いずれもセメント重量を基準としているため、S/C、または W/C を一定としなければ、それらがセメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす影響を把握することは困難である。ここでは、セメント安定処理土の重量を液体部分 (水) と固体部分 (土、セメント) に分けて考え、液体部分と固体部分の比 ($W/(S+C)$) を提案する。この $W/(S+C)$ は、配合設計時の計算上の含水比 (w) を示している。本研究で作製した各配合条件の $W/(S+C)$ を表-7 に示す。表より、 $W/(S+C) = 1.0$ となる配合条件は、全ての S/C において存在していることがわかる。そこで、初期の w 値が一定の条件の下で配合条件の違いがセメント安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす影響の検討を行った (図-7)。図-7 (a) は、 $W/(S+C) = 1.0$ の配合条件における養生日数 (Tc) の経過に伴う含水比 (w) の変化を示している。いずれの配合条件においても、Tc の経過に伴い w 値は減少する傾向にある。 w 値は、養生初期に著しく減少し、Tc の経過に伴い緩やかになる。また、W/C が小さく、かつ S/C が小さい配合条件ほど、Tc の経

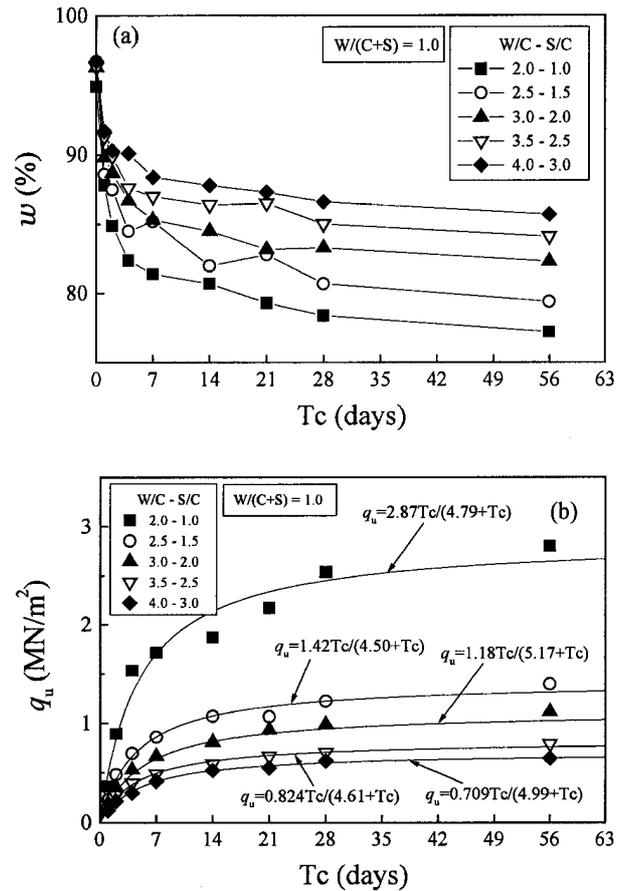


図-7 W/(C+S)値が一定の配合条件における含水比および一軸圧縮強さと養生日数の関係

過に伴う w 値の減少量は大きくなることが明らかとなった。この結果から、打設時の供試体中に含まれる水の量は、いずれの配合条件でも一定であるが、S/C の小さな配合条件ほどセメント量が多くなり、水和反応による強度増加が大きくなる。さらに、W/C が小さいものほどセメントに対する水の量が少なくなることから、強度が増加する結果につながっているものと考えられる。その影響は、一軸圧縮強さ (q_u) と Tc の関係からも明らかである (図-7 (b))。いずれの配合条件でも、Tc の経過に伴い q_u 値は Tc = 7 日までは大きな増加を示し、その後、Tc の増加に伴って緩やかに増加している。また、W/C が小さく、かつ S/C が小さい配合条件ほど、得られる q_u 値は大きくなっている。

以上より、 $W/(S+C)$ を一定とした場合には、S/C が小さな、すなわちセメント量が多い配合条件ほど、得られる q_u 値は大きくなるのがわかる。

4. 結論

本研究では、試料が流動性を有するすべての範囲内の配合条件 (W/C, S/C) に対して供試体を作製した。養生

日数としては、1, 2, 4, 7, 14, 21, 28, 56 日を考え、それらすべての供試体において精度の高い一軸圧縮試験を行った。以下に、本研究から得られた主要な結論を列記する。

(1) 水セメント比 (W/C) は、セメント安定処理土の一軸圧縮特性に最も大きな影響を及ぼす。また、対数表示した一軸圧縮強さ (q_u) は、土セメント比 (S/C) の違いによらず W/C の減少に伴い直線的に増加する傾向が認められた。

(2) W/C 一定の条件下では、S/C が大きなもの、すなわちセメント土比 (C/S) が小さなものほど、 q_u 値が大きくなった。一方、初期の含水比 (w) を一定とした場合には、S/C が小さいもの、すなわち C/S が大きなものほど、 q_u 値が増加することが明らかとなった。

(3) q_u 値は、乾燥密度 (ρ_d) の増大に伴い直線的に増加することが明らかとなった。また、 q_u 値を対数表示することにより、 w 値の減少に伴い、直線的に増加することを示した。

q_u 値に及ぼす影響は、各試験条件が単独の影響因子ではなく、例えば W/C の減少により供試体の w 値も変化し、水和反応による q_u 値の増加量にも違いが現れる。そのため、施工に用いる配合条件を選定する場合には、

それぞれの影響に十分配慮する必要がある。

参考文献

- 1) 地盤工学会:土質試験の方法と解説,第5編 安定化試験,安定処理土の突固めによる供試体作製,pp.236-245,1990.
- 2) 地盤工学会:土質試験の方法と解説,第5編 安定化試験,安定処理土の締固めをしない供試体作製,pp.255-262,1990.
- 3) 中村六史,三浦哲彦,松田応作:有明粘土に対する地盤改良材の適用上の問題と地盤改良についての現地調査,土と基礎,Vol.35, No.5, pp.9-14, 1987.
- 4) 三浦哲彦,古賀良治,西田耕一:有明粘性土に対する生石灰を用いた深層混合処理工法の適用,土と基礎,Vol.34, No.4, pp.5-11, 1986.
- 5) 石田 宏:低含水比火山灰質粘性土の石灰及びセメントによる土質安定処理と凍害防止,土と基礎,Vol.43, No.8, pp.15-18. 1995.
- 6) 山陽クレー工業株式会社:MCクレー分析データ表,2000.
- 7) 財団法人 日本企画協会:JISハンドブック 10 生コンクリート(第1版),p.102,1987.
- 8) セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル(第二版),pp1-48,1985.