

セメント安定処理土の強度変形特性

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

Strength deformation characteristics 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

In construction work on soft soil, the design and evaluation of the soil improvement effect are important. This paper describes the strength deformation characteristics 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). The effects of mix proportion conditions and curing time on stress-strain behavior of cement stabilized soils are shown quantitatively. The unconfined compressive strength of cement stabilized soils can be represented as a hyperbolic relationship between unconfined compressive strength and curing time. Increasing S/C ratio and decreasing W/C ratio lead to increases in strength and stiffness. Several empirical relationships between unconfined compressive strength and curing time have been also developed.

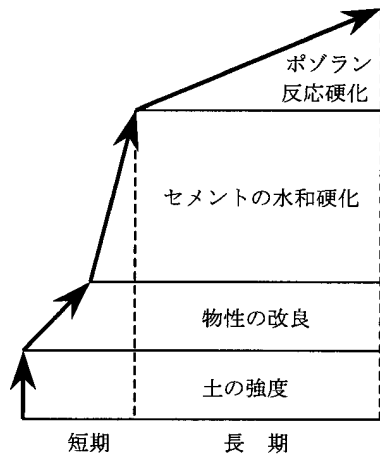
1. はじめに

世界各地には、圧縮性が高く、強度が弱い、いわゆる“軟弱地盤”が多く分布している。このような軟弱地盤は、含水比が高い粘土質の地盤や緩い砂地盤で構成されていることが多く、沖積平野、沼沢地、山間の谷部などに堆積した沖積地などに広く分布している。とくに、我が国では、海、川、湖に沿った沖積平野に多くの都市が形成されており、このような軟弱地盤上に多くの構造物が建設されている。以上のような背景には、我が国の国土の約7割が山地であり、安定した平地が少ないという地形的な特徴や人口が産業や商業に比較的便利な平地に集中しやすいことがある。また、都市部での人口過密化による生活の場の拡大に伴って、ウォーターフロント開発や都市の再開発が盛んになっており、埋立てや盛土などによって造成された人工地盤においても、実用上十分な対策を施さなければ、改良されたといえない場合もある。

一般に軟弱地盤上に構造物を建設する際には、構造物

の安定問題や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）の変形問題に注意する必要がある。これらの問題を解決するためには、軟弱地盤上に構造物を建設することを回避することが最善の策であるが、前述したように我が国の土地利用の現状から、軟弱地盤上に構造物を建設せざるを得ない場合も多くみられる。構造物を建設する場合の対策としては、大別して建造物に対策を施しておく場合と地盤自体に改良を施す場合が考えられる。建造物への対策として典型的なものに、杭基礎やケーソン基礎がある。しかし、一般にこれらの基礎は高価であることや、建設する建造物の重量がそれほど大きくない場合には、地盤改良工法を用いることにより、工費を抑えることができる。また、地盤がとくに軟弱な場合には、ネガティブフリクションや偏土圧の問題も考えなければならないため、基礎単独では対処できなくなる。このような場合には、地盤改良を併用することも多い。

地盤改良には、数多くの改良工法があり、最適な工法の選定の際には、その目的、対象土質、改良効果、施工

図-1 土とセメントの強度増加モデル¹⁾

工期, 工費, 規模を考慮した上で, 安全性および環境への影響に配慮し, 地盤に最適な工法が選定される。

本研究では, 建設発生土の利用, 良質な砂質材料の枯渇, 工期の短縮化および工費の削減などの地盤改良に求められている社会的ニーズの中から, とくに工期の短縮化が重要であると考え, 化学的固化による地盤改良工法の一つであるセメント安定処理工法を取り上げる。セメント安定処理は, 土にセメントを添加・混合し, セメントの化学的固化作用により土の安定化をはかるもので, 他の置換, 圧密, 締固めによる工法に比べて, 比較的早く地盤の強度増加が得られる。

図-1 は, 土とセメントの強度増加モデル¹⁾を示している。土にセメントを添加・混合すると, まず土粒子の強度をベースとしてセメントの水和反応による含水比の低下, イオン交換, 団粒化などによって, 土の物理的特性が改善される。つぎに, セメントの水和反応が進むのに伴い強度が増加し, さらに長期の養生日数の経過に伴ってポゾラン反応が起こり, 安定的な強度の改善が行われる。したがって, セメント安定処理土の強度増加には, セメントの水和反応が大きく寄与している。

セメント安定処理の効果に影響を及ぼす要因としては, セメントの性質, 対象土の性質と状態, 配合条件および養生条件に大別される。一般的にセメント安定処理の添加率が高いほど, そして養生日数が長いほど, 強度増加するといわれている。セメントの種類には, 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セメントを選択することが重要である²⁾。また, 対象土の性質と状態に関しては, 含水比, 有機物の含有量が高くなる, あるいは pH が低くなるほど改良効果は小さくなることが明らかとなっている³⁾。さらに, 攪拌時間や攪拌速度の違いが安定処理土の強度に影響を及ぼし, 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⁾。一方, 養生条件に関しては, 養生温度が高いほど改良効果の発現が早くなることが報

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

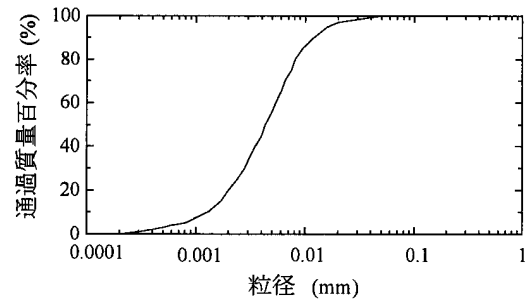


図-2 MC クレーの粒径加積曲線

告されている³⁾。その他の研究として石田⁵⁾は, セメント安定処理土が浸水を受けると, その強度が低下するが, セメントの添加率が高い場合には, 浸水後水中で養生することにより強度の増加が望めることや, セメント安定処理土の含水比が大きいほど凍上量が増大するが, セメントの添加率を増加させることで凍上を防止できる可能性を示唆している。

これまでに安定処理土の土質工学的特性に及ぼす影響因子は, 上述したような研究により種々の角度から報告されている。しかし, 広範囲の配合条件 (W/C, S/C) のもとでのセメント安定処理土の強度変形特性は, 定量的には十分に明らかにされていない。

以上のような点に基づいて, 本研究では供試体作製条件として, 流動性を有している範囲内の W/C, S/C の配合条件すべてに対して供試体を作製した。その後, 養生日数 (Tc) を種々変化させて一軸圧縮試験を行った。その結果, セメント安定処理土の強度変形特性と配合条件および Tc との関係を定量的な観点から明らかにすることを試みた。

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に工業製品である MC クレーを使用した。MC クレーの物理的特性を表-1, 粒径加積曲線を図-2 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, 鉱物学的にパイロフィライトと呼ばれている。原料のろう石の産地は, 岡山県備前市三石である。鉱山の地質の大部分は, 白亜紀火山岩類の酸性火砕流堆

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

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

積物であるが、岩相により上位層と下位層に大別される。ろう石鉱床は、流紋岩質凝灰岩などが熱水変質作用を受けることにより形成され、塊状、脈状、パイプ状、層状などの形態を示す。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⁾。

2.1.2 安定材 (セメント)

本研究では、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。本研究では、混練水の影響が、強度発現に影響が最も少ないと考えられる蒸留水を用いた。

2.2 供試体の作製方法

セメント安定処理は、セメントと土との混合後に、締固めを行なうものと、締固めを行なわないものに大別される。締固めを行なう工法は、路盤、路床および盛土な

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)

どの安定を目的とした浅層地盤を対象としている。一方、締固めを行なわない工法は、高含水比であり、かつ多量のセメントの添加を必要とする粘性土の改良を目的としており、浅層・深層地盤の両方を対象としている⁹⁾。

配合条件は、広い範囲の W/C, S/C で検討するため、まず S/C が 1.0 から 3.0 の範囲の 5 通りを設定し、種々

のS/Cに対して土とセメントが均質に混合でき、流動性を有することができるW/Cを選定した。選定した配合条件を表-5に示す。セメント安定処理土供試体の土粒子密度は、セメントおよび土粒子密度と、配合条件から求めることができる。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表-6に示す。

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。10分後、安定処理土の含水比を測定し、試料をモールド（φ=50mm, H=100mm）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℃)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。

3. 実験結果および考察

3.1 応力-ひずみ曲線

3.1.1 養生日数の経過が応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

養生日数 (Tc) の経過に伴う応力-ひずみ曲線の変化について検討するために、種々の配合条件（水セメント比 (W/C), 土セメント比 (S/C)）の中から代表的な3種類の供試体の応力-ひずみ曲線を図-3に示す。図-3 (a) は、W/C=2.5, S/C=1.0 の場合、図-3 (b) は、W/C=3.0, S/C=2.0 の場合、および図-3 (c) は、W/C=4.0, S/C=3.0 の場合である。図より、応力-ひずみ曲線は、軸ひずみの増加に伴い、顕著な立ち上がりを示し、0.5~2.5%程度においてピークに達する。応力-ひずみ曲線にピークが認められた後、応力値は荷重の継続に伴い、徐々に減少していく。このような傾向は、図-3に示した配合条件以外においても認められた。図-3 (a) に着目すると、Tc =

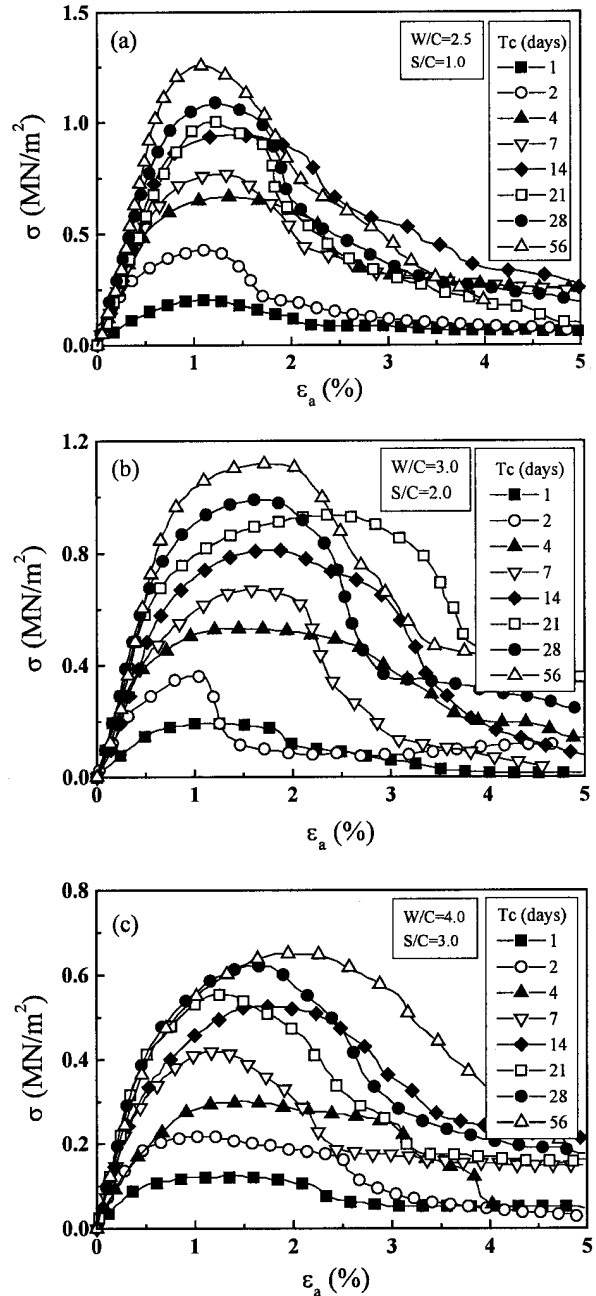


図-3 代表的な応力-ひずみ曲線（養生日数の違い）

1日の一軸圧縮強さ (q_u) は、0.201 MN/m²であるが、Tcの増加に伴い徐々に増加してゆき、Tc = 56日には、 q_u = 1.250 MN/m²まで増加している。Tcの経過に伴う q_u 値の増加は、図-3 (b), (c) でも認められ、また、図-3に示した以外の配合条件でも認められた。破壊ひずみ (ϵ_f) は、いずれの配合条件においても0.5~2.5%の範囲でばらついており、 ϵ_f 値とTcの間に明瞭な関係は認められなかった。つぎに、応力-ひずみ曲線の初期勾配を示す変形係数 (E_{50})に着目する。図-3 (a)において、Tc = 1日の E_{50} 値は、28.8 MN/m²であるのに対して、Tc = 56日の E_{50} 値は、205.8 MN/m²まで増加している。 q_u 値と同様に E_{50} 値が、Tcの長期化に伴い増加する傾向は、図-3 (b), (c)

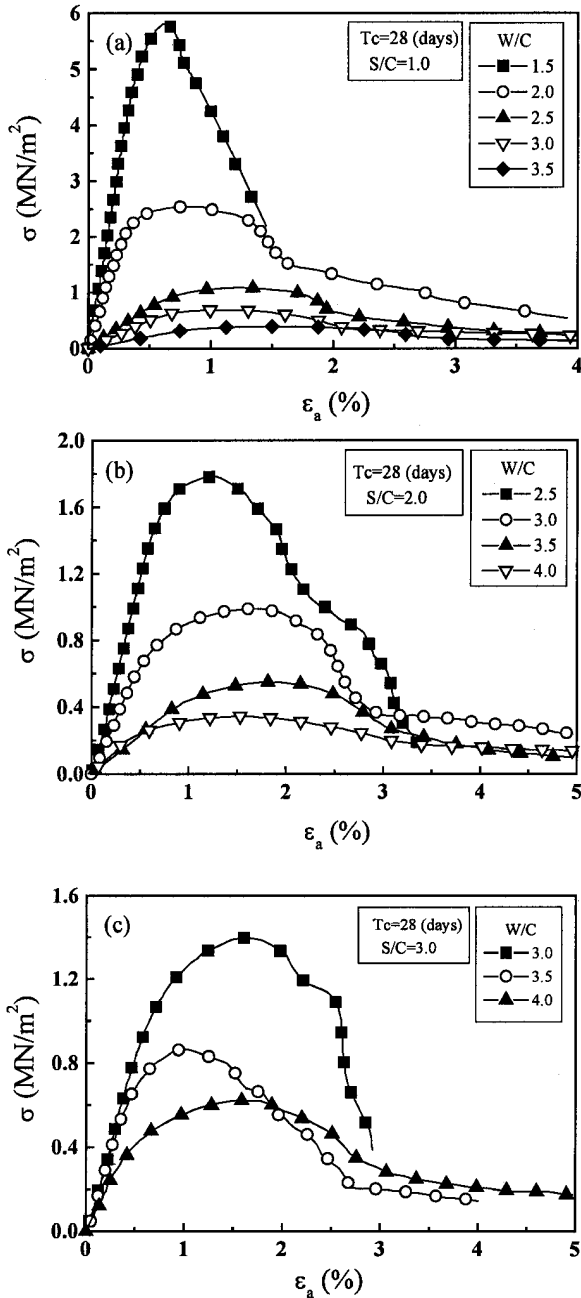


図-4 水セメント比の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

でも認められた。また、このような傾向は、図-3 に示した以外の配合条件でも認められた。

一方、応力ピークの後の強度低下は、 T_c が長期化するほど急勾配となる傾向が認められた。このような傾向は、本研究で作製した全ての配合条件において認められた。

3.1.2 水セメント比の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

水セメント比 (W/C) の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を検討するために、図-4 に土セメント比を一定としたときの養生日数 (T_c) 28 日の応力-ひずみ曲線を

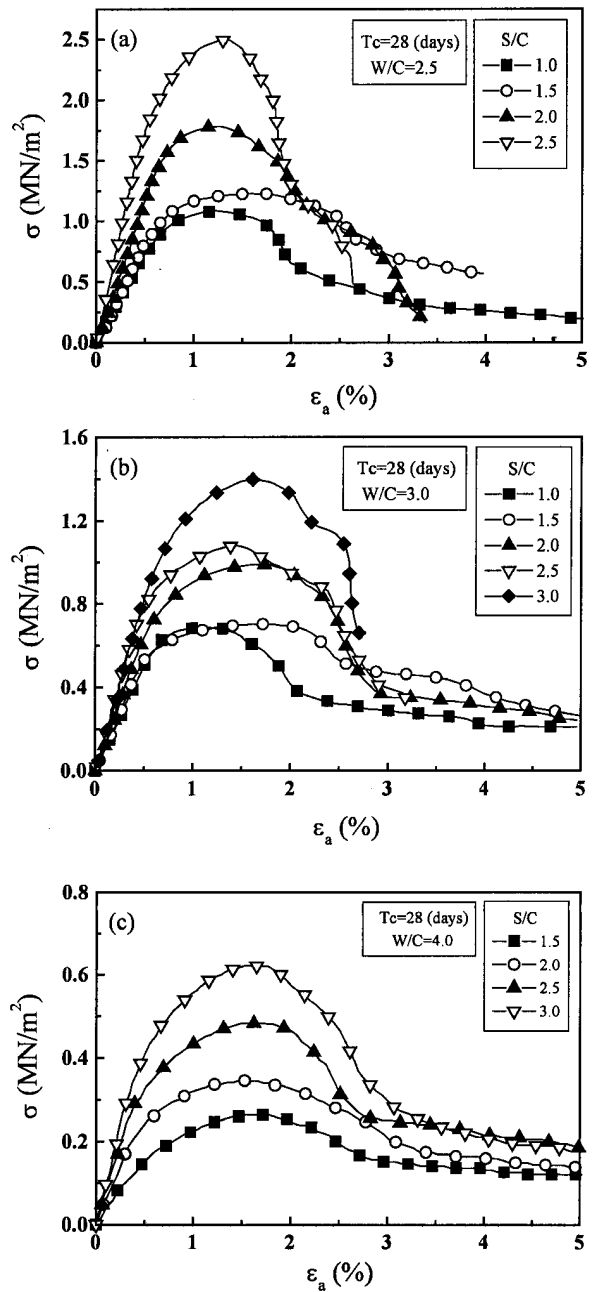


図-5 土セメント比の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

示す。図-4 (a), (b), (c) は、それぞれ $S/C=1.0$, $S/C=2.0$, および $S/C=3.0$ の場合である。図-4 (a) に着目すると、一軸圧縮強さ (q_u) は、 $W/C=3.5$ の場合に 0.387 MN/m^2 であったものが、 W/C の減少に伴い徐々に増加してゆき、 $W/C=1.5$ の場合には 5.772 MN/m^2 となった。また、 W/C の減少に伴う q_u 値の増加量は、 W/C が小さいほど大きくなる傾向が認められた。上記のような傾向は、 S/C の違いによらず、図-4 (b), (c) および本研究で取り上げた全ての配合条件でも認められた。

つぎに、変形係数 (E_{50}) について検討するため、図-4 (a) に着目した。 E_{50} 値は、 $W/C=3.5$ の場合に 42.8 MN/m^2 であったものが、 W/C の減少に伴い徐々に増加してゆき、

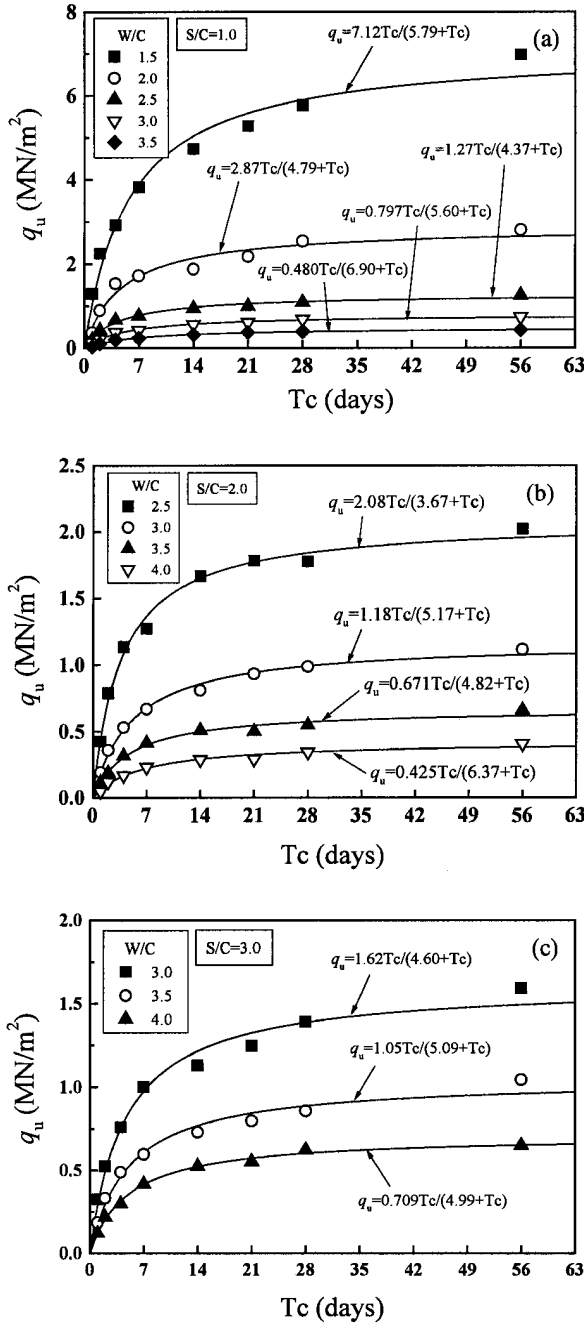


図-6 一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす水セメント比の影響

W/C=1.5 の場合に 1454.0 MN/m^2 となった。よって、 E_{50} 値も q_u 値同様に、W/C の減少に伴い増大している。 E_{50} 値のこのような傾向は、S/C の違いによらず、図-4 (b), (c) および図-4 に示した以外の配合条件でも認められた。しかし、破壊ひずみ (ϵ_p) と W/C の間に明瞭な関係は認められなかった。

応力ピークの後の強度低下は、W/C が小さいものほど急勾配であり、W/C が大きくなるのに伴い緩やかになっている。このような傾向は、S/C の違いによらず認められた。

表-7 実験から得られた関係式

配合条件	関係式	相関係数
	$q_u=A(Tc) / (B+Tc)$	
S/C=2.0	$A=-1.09(W/C)+4.65$	0.966
	$B=1.55(W/C)-0.03$	0.900
S/C=3.0	$A=-0.911(W/C)+4.31$	0.990
	$B=0.390(W/C)+3.53$	0.753
W/C=2.5	$A=-1.08(S/C)+3.78$	0.966
	$B=0.724(S/C)+2.73$	0.900
W/C=3.0	$A=-0.407(S/C)+1.96$	0.974
	$B=0.842(S/C)+3.56$	0.762
W/C=3.5	$A=-0.244(S/C)+1.06$	0.991
	$B=1.43(S/C)+2.79$	0.998

3.1.3 土セメント比の違いが応力-ひずみ曲線に及ぼす影響

図-5 は、水セメント比 (W/C) を一定とした場合の、養生日数 (T_c) 28 日の応力-ひずみ曲線を示している。図-5 (a), (b), (c) は、それぞれ W/C=2.5, W/C=3.0, および W/C=3.5 の場合を示している。いずれの図からも q_u 値は、S/C の増加に伴い大きくなるのがわかる。また E_{50} 値も S/C が増加するのに伴い大きくなっている。一方、破壊ひずみ (ϵ_p) と S/C の間には明瞭な関係が認められなかった。

応力ピークの後の強度低下は、S/C が高いものほど急勾配であり、S/C が低くなるのに伴い緩やかになっている。このような傾向は、いずれの W/C の場合においても認められた。

3.2 一軸圧縮強さと養生日数の関係

3.2.1 一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす水セメント比の影響

水セメント比 (W/C) の違いが、一軸圧縮強さ (q_u) と養生日数 (T_c) の関係に及ぼす影響を明らかにするために、図-6 に土セメント比 (S/C) が一定の場合の一軸圧縮強さ (q_u) と養生日数 (T_c) の関係を示す。図-6 (a),

(b), (c) は、それぞれ S/C=1.0, S/C=2.0, および S/C=3.0 の場合である。図-6 (a) に着目すると、W/C の違いによらず q_u 値は、 $T_c=7$ 日までは急激かつ直線的に増加している。しかし、 T_c が長期化するのに伴い、 q_u 値の増加傾向は緩やかになっている。また、W/C が小さいほど T_c の増加に伴う初期の q_u 値の増加が急勾配であり、 q_u 値の増加量も大きくなる傾向が認められた。上記のような傾向は、S/C の違いによらず、図-6 (b), (c) および図-6 に示した以外の S/C でも認められた。また、 q_u 値と T_c

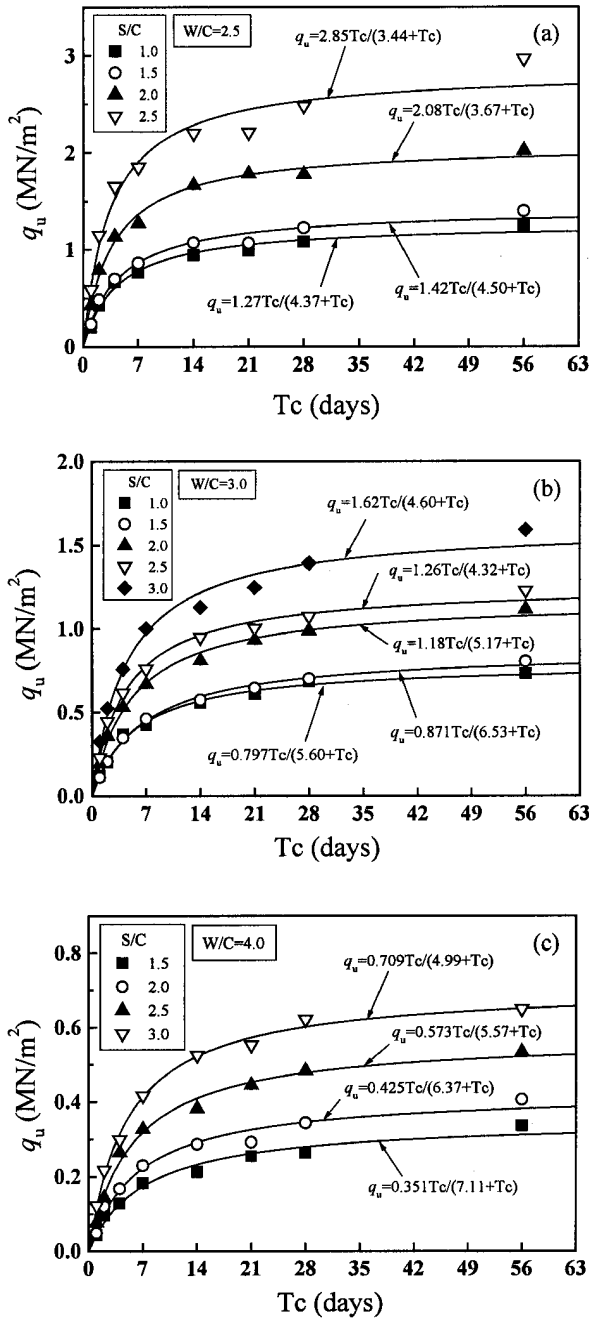


図-7 一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼすセメント比の影響

は、双曲線近似により各 S/C によって関係付けられた。その関係式を表-7 に示す。ただし、S/C=1.0 の場合のみ、W/C=1.5 の配合条件の供試体が、 $T_c = 7$ 日以降も比較的大きな強度増加を示すため、S/C=2.0 および 3.0 の場合と同様な関係式によって表現することはできなかった。

3.2.2 一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす土セメント比の影響

水セメント比 (W/C) が、2.5, 3.0, および 3.5 でそれぞれ一定とした場合の場合の一軸圧縮強さ (q_u) と養生

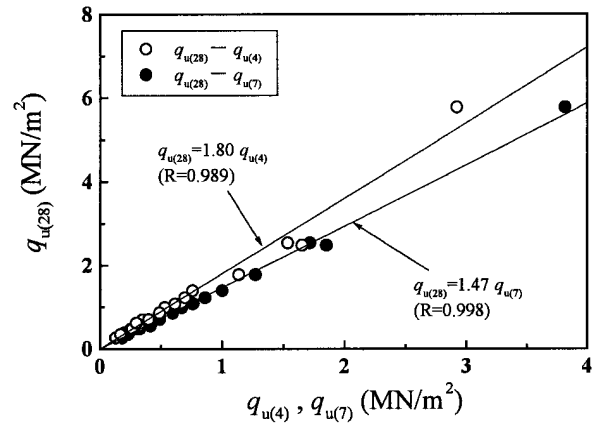


図-8 養生 28 日の一軸圧縮強さと養生 4 日および養生 7 日の一軸圧縮強さの関係

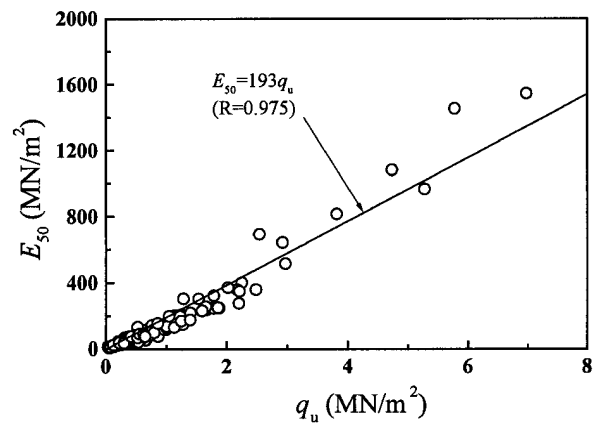


図-9 変形係数と一軸圧縮強さの関係

日数 (T_c) の関係を図-7 (a), (b), (c) に示す。S/C の違いによらず、 q_u 値は $T_c = 7$ 日までは急激に増加し、その後、 T_c の増加に伴って緩やかに増加する傾向が認められる。また、S/C が大きいほど T_c の増加に伴う初期の q_u 値の増加が急勾配となった。 q_u 値と T_c は、双曲線近似により各 W/C によって関係付けられ、表-7 に示すとおりとなった。

3.3 養生 28 日の一軸圧縮強さと養生 4 日および養生 7 日の一軸圧縮強さの関係

図-8 は、 $q_{u(28)}$ 値と養生 4 日および養生 7 日の一軸圧縮強さ ($q_{u(4)}, q_{u(7)}$) の関係を示している。図より、 $q_{u(28)}$ 値は、 $q_{u(7)}$ 値の約 1.5 倍となっていることから、本研究で作製したセメント安定処理土においても、 $q_{u(7)}$ 値から $q_{u(28)}$ 値を推定することが可能である。また、 $q_{u(4)}$ 値と $q_{u(28)}$ 値の関係に着目すると、 $q_{u(28)} = 1.8 q_{u(4)}$ となり、高い相関関係が得られた。このことから、養生 4 日および養生 7 日の一軸圧縮強さ ($q_{u(4)}, q_{u(7)}$) から $q_{u(28)}$ 値を推定することが可能となる。この結果の工学的意義としては、土工事の施工期間短縮につながっていくものと考えられる。

3.4 変形係数と一軸圧縮強さの関係

変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係を検討する。セメント安定処理土の場合には、 E_{50} 値と q_u 値の相関性は高く、 $E_{50}=640q_u^{11)}$ や $E_{50}=80\sim 250q_u^{12)}$ などの関係にあることが報告されている。本研究で行なったすべての配合条件から得られた E_{50} 値と q_u 値の関係は、図-9 に示すとおりとなった。 E_{50} 値は、配合条件および養生日数によらず、 q_u 値の増加に伴い直線的に増加しており、 E_{50} 値と q_u 値の間には、既往の報告と同様に、比例関係が認められた。

4. 結論

本研究では、供試体作製条件として、流動性を有している範囲内の W/C, S/C の配合条件すべてに対して供試体を作製した。その後、養生日数 (T_c) を種々変化させて一軸圧縮試験を行った。

その結果に基づいて、セメント安定処理土の強度変形特性と配合条件および T_c との関係を定量的に明らかにすることを試みた。一軸圧縮強さ (q_u) と T_c の関係は、配合条件 (W/C, S/C) によらず双曲線近似を示すことが明らかとなった。また、養生 28 日の q_u 値と養生 4 日の q_u 値の間には、配合条件 (W/C, S/C) によらず、直線的な高い相関関係が得られた。

参考文献

1) 藤田圭一編：実用軟弱地盤対策技術総覧，第2編 第2章，

産業技術サービスセンター，1993。

- 2) 中村六史，三浦哲彦，松田忠作：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.
- 3) 馬場崎亮一，寺師昌明，鈴木健夫，前川 淳，川村政史，深沢栄造：安定処理土の強度に及ぼす影響因子，地盤工学会，セメント系安定処理土に関するシンポジウム，pp.20-41, 1996.
- 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（第一版），p.194, 2002.
- 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.
- 9) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，安定処理土の突固めによる供試体作製，p.236, 1990.
- 10) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，安定処理土の締固めをしない供試体作製，pp.255-262, 1990.
- 11) 青木雅路，丸岡正夫，幾田悠康：山留めにおける根切り地盤の壁状改良効果—ソイルセメント改良壁—，第22回土質工学会研究発表会，pp.1305-1306, 1987.
- 12) 水野恭男，苗村康造，松本淳之介：深層混合処理工法による山砂の改良実験，第23回土質工学会研究発表会，pp.2301-2304, 1988.