

養生時の上載圧載荷に伴うセメント安定処理土の強度増進効果

Strength Enhancement Effect on Cement Stabilized Soil Due to Loading during Curing

大塚悠貴 Yuki OHTSUKA (広島県西部建設事務所)
志比利秀 Toshihide SHIBI (島根大学大学院総合理工学研究科)

本研究では、養生時に上載圧を載荷した場合のセメント安定処理土の強度増進効果を明らかにするために、養生途中に載荷開始日を種々に変えて荷重を載荷したセメント安定処理土供試体に対して一軸圧縮試験を実施し、その強度変形特性を調査した。その結果、一軸圧縮強さは載荷開始日が早くなるのに伴って直線的に増加することが明らかとなった。また、養生途中載荷した供試体の養生 28 日強度が載荷しない供試体の何日目かの強度に相当するかを示す相当養生日数を求め、養生時途中載荷に伴う強度増進効果を定量的に示した。さらに、強度増加の要因として、含水比の低下が大きいことを示唆している。

キーワード：安定処理土，一軸圧縮強さ，養生日数 (IGC : D-06, D-10)

1. はじめに

日本の大部分は山地・丘陵で占められ、平野部は海岸近くの河川流域に発達している。これらの平野部の多くは第四紀の沖積世に堆積した未固結の緩い地層から成り、支持力が小さく構造物を建設するのに適さない軟弱地盤である。このような軟弱地盤の改良方法の一つとして固結工法があり、主に浅層混合処理（安定処理）工法、深層混合処理工法がある。

現在、安定処理土の強度に及ぼす土の状態、種類、改良材の種類や添加量、材齢などの因子の影響についてはかなり把握されている。例えば、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し、初期含水比を一定にした場合には土セメント比 (C/S) が大きいものほど、一軸圧縮強さが増加することが報告¹⁾されている。しかし安定処理土に及ぼす応力の影響について考慮された研究が少ないのが現状である。安定処理地盤は施工後応力を受けた状態であり、養生時の応力を考慮した安定処理土の研究は現場の状態を理解する上で非常に重要である。

上載圧を考慮した研究として、例えば山本ら²⁾は安定処理土を上載圧下で圧密・養生を行う装置（モールド型圧密養生装置）を開発し、安定処理土の圧密沈下特性と一軸圧縮特性を調べている。この研究では、山口県宇部市の粘性土に普通ポルトランドセメントを添加して作製したセメント安定処理土に対して上載圧下で圧密・養生後に一軸圧縮試験を行っており、その結果、安定処理土の一軸圧縮強さは養生時の上載圧の増加に対して直線的に増加すること、上載圧による一軸圧縮強さの増加の程度は改良材の種類および添加量によって異なり、とくに砂質土を母材とする場合には安定処理時の含水比の影響も受けることなどを報告している。その研究で用いられたモールド型圧密養生装置を利用してセメント安定処理土

に対する種々の土質の養生中の上載圧による圧密に伴う強度特性を調査した報告³⁾もある。しかしながら、これらの上載圧を考慮した研究では大部分の安定処理土の養生期間を 7 日間としており比較的短い期間での強度発現特性しか考察していない。安定処理土は施工後長期間道路の基盤などに利用されることから、7 日間以上の載荷実験の場合も考察する必要があると考えられる。現場にて安定処理土を施工した場合、設計強度としては養生 28 日目の強度が用いられることから、養生 28 日間の載荷実験を試み、載荷の影響による強度発現特性を確認する必要がある。

そこで、本研究では、固結工法を用いた軟弱地盤に対して養生途中に盛土を施工した（荷重を加えた）場合の強度発現特性を明らかにするために、室内実験を実施した。具体的には、5.0～9.0%の種々のセメント添加率で混合したセメント安定処理土に、養生途中に種々の載荷開始日のもと荷重を与え、28 日間養生して作製した供試体に対して、一軸圧縮試験を実施している。その結果、養生途中載荷がセメント安定処理土の強度変形特性に及ぼす影響を明らかにするために養生途中載荷をしないものと比較を行い、その強度増進効果を定量的に評価している。その際、相当養生日数の概念を導入し、養生日数（材齢）による強度の定量的な評価を試みた。

2. 実験試料および実験方法

2.1 実験試料

今回用いた試料は DL クレー、MC クレー、高炉セメント B 種、蒸留水である。

安定処理土では現地の土が使われることも多いが、地域差を排除するために土試料として、人工的に精製された DL クレー、MC クレーを用いることとした。なお、

DL クレーは、主にシルト分からなり、農薬のキャリアなどに利用される。一方、MC クレーは、粘土分に富んでおり、蠟石から生成されて、主に塗料、建材、樹脂、製紙などに利用される。表-1 に土試料の物理的性質（土粒子の密度試験は JIS A 1202, 土の液性限界試験は JIS A 1205 に準拠）を示す。また、土試料の成分規格の概要を表-2 に示す^{4), 5)}。MC クレーは天然材料から精製されているため概要数値を、DL クレーは分析例を示している。図-1 は土試料の粒径加積曲線である（土の粒度試験は JIS A 1204 に準拠）。本研究では、広範な粒度組成を有する自然地盤を想定し、DL クレーと MC クレーを質量比 1:1 に配合した試料を用いることとする。なお、DL クレーと MC クレーを質量比 1:1 に配合した際の液性限界は 34.0% であった。

セメントは経済性を考慮し高炉セメント B 種を用いている。表-3 に高炉セメント B 種の化学成分を、表-4 に高炉セメント B 種の主な品質を示す⁶⁾。

不純物が強度発現に及ぼす影響を少なくするため蒸留水を使用する。

2.2 供試体の作製方法

まず、質量比 1:1 に計量した DL クレーと MC クレーを準備した。蒸留水は、含水比が液性限界の 2 倍である 68.0%（土試料に対する蒸留水の質量の比を百分率で表しており、セメントの質量を考慮しない）となるように、高炉セメント B 種は、C/S=5.0, 7.0, 9.0%（C/S：土試料の乾燥質量に対する乾燥したセメントの質量の比の百分率）のいずれかとなるように計量し用意した。次に、ミキサーに備え付けの攪拌容器内でセメントの全量と先ほど計量した水の適量とを混ぜ合わせてセメントスラリーを作製した後、容器内に土試料をそっと投入し、残りの水を流し入れた。その後ミキサーで 10 分程度攪拌した。

攪拌後、試料が様に混合されていることを確認の上、試料を二つ割りモールド（φ=50mm, H=100mm）に十層程度に分け入れた。その際、各層を入れる毎にモールドに打撃を加え、試料内に封入されがちな気泡を可能な限り除去した。モールド上部に余盛りができるまでその作業を行い、直ナイフを用いて供試体の上端面の余盛り部分を平らにした。試料の水分が蒸発しないようにするためモールド全体をビニール袋に入れその口を閉じて密封し、試料を温度 20±2℃の恒温室に静置した。攪拌容器内の余った試料を使って含水比試験（土の含水比試験 JIS A 1203 に準拠）を行いその結果を初期含水比とした。

2.3 養生中に荷重載荷しない場合の供試体の養生方法

養生日数を各 C/S 毎に 7 日, 14 日, 28 日, 56 日, 90 日, 180 日, 360 (C/S=9.0%では試験日の都合がつかず 361 日とした) 日としている。供試体は、養生開始後約 1 週間はモールド内で上述したように、その後はモールドから外してビニール袋に入れて密封して養生した。

表-1 土試料の物理的性質

	ρ_s (kg/m ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p
MC クレー	2.634×10 ³	59.4	25.4	34.0
DL クレー	2.627×10 ³	NP	NP	-
配合試料	*2.630×10 ³	34.0	15.2	18.8

*両試料の ρ_s およびその配合質量比 1:1 に基づいて算出

表-2 2 種類の土試料の成分規格の概要^{4), 5)}

	MC クレー	DL クレー
SiO ₂	70%程度	93.5%
Al ₂ O ₃	25%程度	2.7%
結晶水	4%程度	-
Fe ₂ O ₃	-	0.4%
その他不純物	1%程度	3.4%

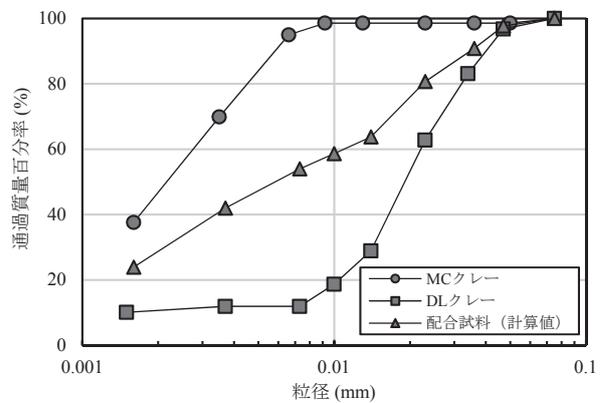


図-1 土試料の粒径加積曲線

表-3 高炉セメント B 種の化学成分の一例(%)⁶⁾

ig.loss	insol.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
1.52	0.16	25.50	8.90	55.16	3.24	2.00

表-4 高炉セメント B 種の主な品質⁶⁾

比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (N/mm ²)		
	3 日	7 日	28 日
3.000 以上	10.0 以上	17.5 以上	42.5 以上

2.4 養生中に荷重載荷する場合の供試体の養生方法

養生時に上載圧を加えるために用いるおもりは、荷重を調整するために砂を入れたペットボトルからなる上部とモールド上面を丁度覆うように円柱状に成形した多孔質な園芸用セメントブロックからなる下部から構成されている。おもりの質量は 3.0kg であり供試体に作用する上載圧に換算すると 15kPa 程度であり、この圧力は地盤の湿潤単位体積重量を 19kN/m³ と仮定すると 0.8m 程度の土被り圧に相当する。本実験ではこのように上載圧が比較的低い。しかしながらセメント安定処理土による盛土施工を考える場合には、一般にマスコンクリートの問題として知られるセメント水和熱の発生にも注意を払う必要がある。本実験は、段階的な施工をも想定し、このような比較的低い圧力によってセメント安定処理土の強

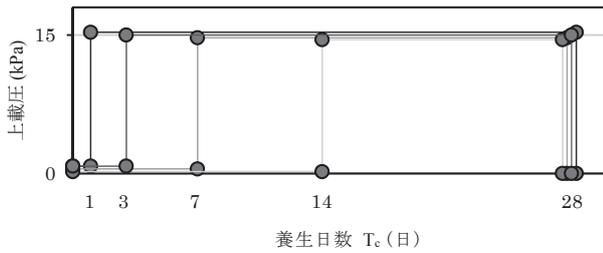


図-2 荷重載荷する供試体の上載圧と養生日数の関係

表-5 載荷日と載荷期間の関係

	載荷日 T_s (日)				
	1	3	7	14	上載圧無し
載荷期間 (日)	27	25	21	14	0



写真-1 供試体におもりを載せた様子

度変化がどの程度生じるのかに着目して調査する。荷重載荷する供試体の養生日数はすべて 28 日間である。養生中の載荷過程を図-2 の上載圧と養生日数の関係によって示す。表-5 に載荷日と載荷期間の関係を示す。養生 1 日目、3 日目、7 日目もしくは 14 日目に供試体の上面に偏心がかからないように静かに載せる(写真-1)。その後、ビニール袋にモールド全体を収め、その口をおもり下部のコンクリート部分で輪ゴムを用いて留め、試料を密封した上で、養生 28 日目まで載荷を継続させた。おもりを載せる際、試料上面に直径 50mm 程度の円形ろ紙を置いて、試料がおもりに付着するのを防いだ。ブロックには微細な隙間があるため供試体上部から排水が可能である。なお養生時に二つ割りモールドの組み合わせ箇所からの水漏れなどは確認されておらず、養生時の排水条件は片面排水が担保されていると考えている。

2.5 一軸圧縮試験方法

養生後における供試体の強度調査は、土の一軸圧縮試験 (JIS A 1216 に準拠) によって行った。一軸圧縮試験直後に供試体の含水比試験を行った。以下、養生中に荷重載荷しない供試体に対して一軸圧縮試験を行ったものを「上載圧無し (の試験)」と、養生中に荷重載荷する供試体に対して一軸圧縮試験を行ったものを「上載圧有り (の試験)」と呼ぶ。

3. 実験結果および考察

3.1 上載圧無しの強度発現特性

ここでは上載圧無しの実験の応力-ひずみ関係やそれ

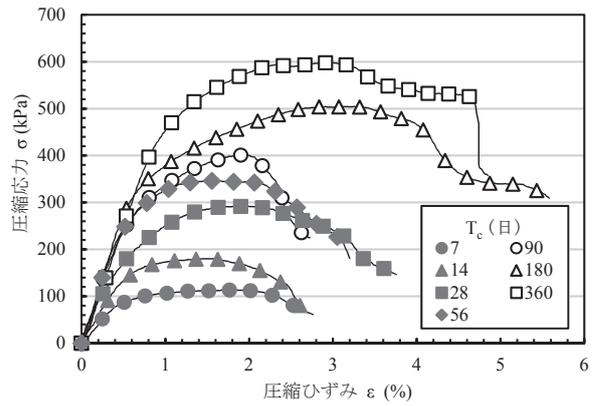


図-3 応力-ひずみ曲線の代表例 (C/S=7.0%, 上載圧無しの実験)

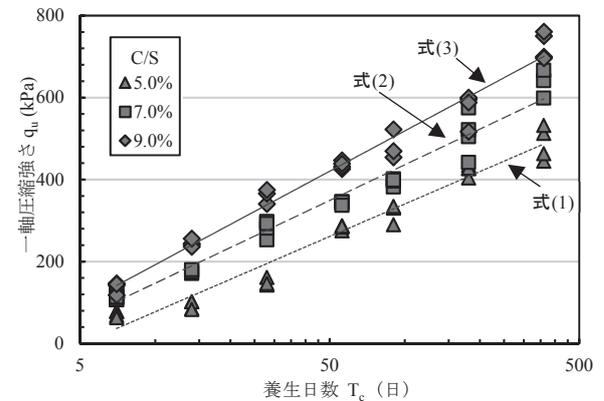


図-4 養生日数の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響 (上載圧無しの実験)

に関係する一軸圧縮強さについて示す。図-3 に C/S=7.0% の代表的な応力-ひずみ曲線を示す。養生日数が 28 日までの結果では実験開始後、緩やかに圧縮応力が増加している。一方、養生 56 日以上でのデータでは初期の圧縮ひずみにおける圧縮応力の急激な増加が見られる。養生日数増加により一軸圧縮強さは増加し、破壊ひずみも増加傾向にある。

次に養生日数の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響を明らかにするために、対数表示した養生日数と一軸圧縮強さの関係を図-4 に示す。いずれの C/S においても対数表示した養生日数の増加に伴って、一軸圧縮強さは直線的に増加する傾向が認められており、セメント水和反応による強度発現を確認できる。また各 C/S に対する近似式は、次のようになった。

$$C/S=5.0\% : q_u = 114 \ln(T_c/7) + 37 \quad (R^2=0.964) \quad (1)$$

$$C/S=7.0\% : q_u = 125 \ln(T_c/7) + 101 \quad (R^2=0.972) \quad (2)$$

$$C/S=9.0\% : q_u = 142 \ln(T_c/7) + 142 \quad (R^2=0.978) \quad (3)$$

なお、近似式の範囲は $7 \leq T_c \leq 360$ (C/S=9.0%では $7 \leq T_c \leq 361$) である。

3.2 上載圧有りの強度発現特性

ここでは上載圧無有りの実験の応力-ひずみ関係やそれに関係する一軸圧縮強さについて示す。

図-5 に C/S=5.0%の代表的な応力-ひずみ曲線を示す。比較のため $T_c=28$ (日)の上載圧無しの場合も併せて示す。荷重初期の圧縮ひずみが小さな範囲では、いずれの養生時荷重条件でも圧縮応力は同様に増加している。し

かしながら上載圧無しは上載圧有りよりも圧縮応力のピークが低い。したがって、養生時に上載圧を加えることによって、一軸圧縮強さは増加することがわかった。また養生時荷重によって、破壊ひずみも増加傾向にある。一方、養生時に上載圧を加えることによって、セメント安定処理土の破壊ひずみが減少するとの報告例^{2), 3), 7)}もあるが、この挙動の違いは実験条件の違い、例えば初期含水比が影響しているものと思われる。すなわち初期含水比が土試料の液性限界と比較してより大きくなると試料の流動性が高まり、その硬化にも時間を要する。その結果延性的な性質が残存しているのではないかと推察される。

図-6 に種々の荷重開始日に対する平均一軸圧縮強さとセメント土比の関係を示す。まず、上載圧無しの場合に着目すると一軸圧縮強さは C/S の増加に伴って直線的に増加していることがわかる。このような直線関係は上載圧有りの場合にも認められ、荷重日を早くするのに伴ってその直線関係は上にシフトしていることが明らかとなった。すなわち、荷重期間の長い1日目荷重や3日目荷重の一軸圧縮強さには顕著な増加が見られ、荷重により強度的に安定することが示された。

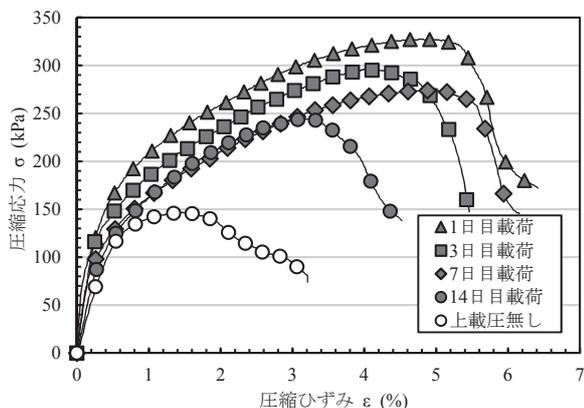


図-5 応力-ひずみ曲線の代表例 (C/S=5.0%, $T_c=28$ (日), 上載圧 15kPa)

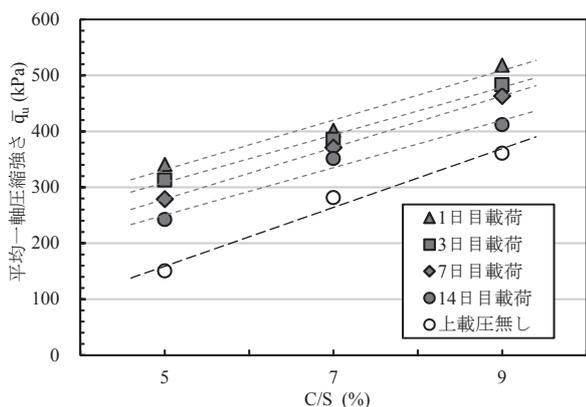


図-6 荷重条件の違いが一軸圧縮強さに及ぼす影響 ($T_c=28$ (日), 上載圧 15kPa)

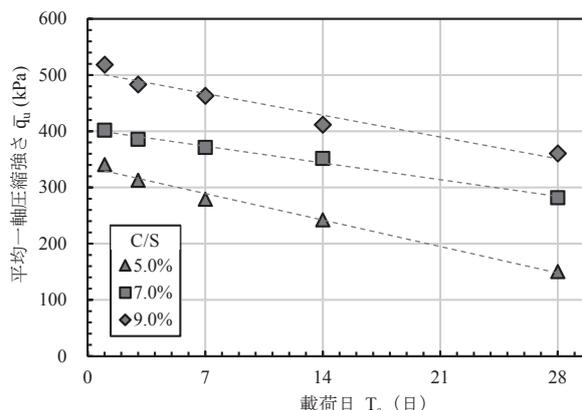


図-7 一軸圧縮強さと荷重日の関係 ($T_c=28$ (日), 上載圧 15kPa)

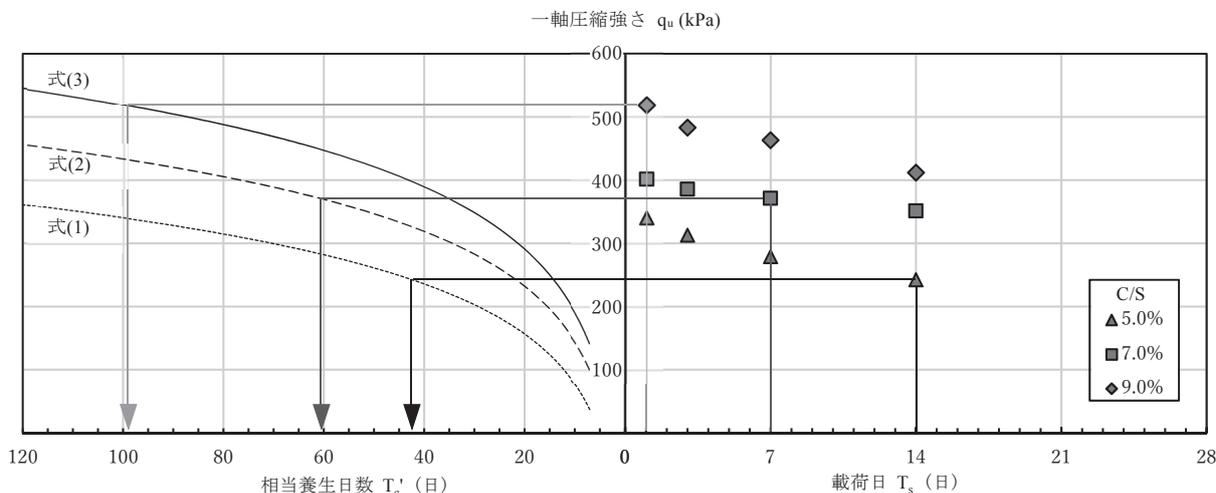


図-8 荷重日から相当養生日数に変換するイメージ

図-7 に平均一軸圧縮強さと荷重日の関係を示す。なお、荷重日が 28 日の結果には上載圧無しの実験結果をプロットしている。図より、各 C/S において 14 日目荷重と上載圧無しの結果を比較すると 50~100kPa 程度の強度差しか得られず十分な強度増加とはならなかったが、1 日目荷重と上載圧無しの結果を比較すると 120~190kPa 程度、率にして 1.4 倍から 2.2 倍の強度増加が図れることがわかる。

3.3 上載圧有無を考慮した養生日数の考察

ここでは上載圧有りの実験における養生 28 日の一軸圧縮強さが上載圧無しの実験結果の何日分の養生日数に相当するかを考察する。

図-4 において示された上載圧無しにおける各 C/S 毎の近似式(1)~(3)を用いて考察する。これらの式の q_u に上載圧有りの実験結果における平均一軸圧縮強さ(図-4 と図-7 において同じ C/S の実験結果を用いる)を代入し、養生日数を算出する。このように算出された養生日数をここでは“相当養生日数”と呼ぶこととする。図-8 は、図-4 と図-7 を組み合わせて再構築したものであり、C/S=5%の 14 日目荷重、C/S=7%の 7 日目荷重および C/S=9%の 1 日目荷重を例にとり、各荷重日から相当養生日数を得る過程を矢印によって図示している。

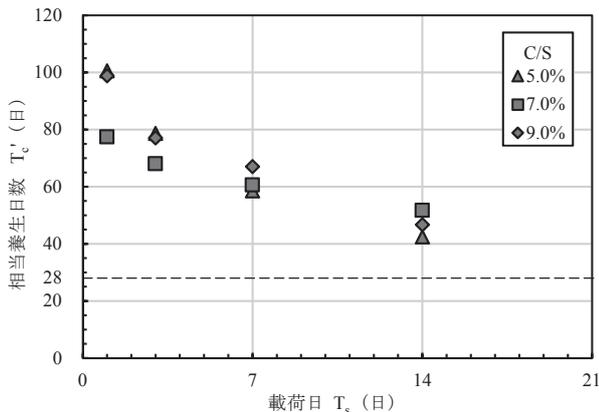


図-9 上載圧有無を考慮した養生日数の関係

図-9 に上載圧有無を考慮した養生日数の関係を示す。相当養生日数と荷重日の関係であり、実験における養生日数は 28 日であるため、相当養生日数の 28 日目において破線を引いている。どの C/S でも相当養生日数は 28 日以上であり、荷重による強度増加を日数によって明確にした。C/S=5.0, 9.0%では 1 日目荷重において相当養生日数が 100 日程度になっている。養生日数は 28 日間ではあるが 3 倍以上の相当養生日数となっているため強度増加は顕著であり、養生中の荷重は有用であると考察する。

3.4 一軸圧縮強さと含水比の関係

ここでは荷重による一軸圧縮強さ増加の原因を含水比の関係から考察する。図-10 は、一軸圧縮強さと含水比の関係を示している。C/S の違いによらず荷重によって一軸圧縮強さは増加し、含水比は減少している。いずれの C/S においても養生時の早期荷重(荷重期間が長期間の条件)ほど特に含水比低下と一軸圧縮強さの増加の程度は顕著である。したがって、含水比の低下に伴って一軸圧縮強さが増加していることが示唆される。この含水比の低下の主要因としては、養生中の荷重による試料からの排水が挙げられる。なお供試体表面からの水分蒸発なども含んでいる可能性が考えられるが、これに関しては、いずれの試料も同条件であることから、ここで得られた傾向に影響を及ぼすものではないと考える。

3.5 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

ここでは荷重による一軸圧縮強さ増加の原因として乾燥密度に着目してみた。一軸圧縮強さと乾燥密度の関係を図-11 に示す。ばらつきはあるが荷重によって乾燥密度も一軸圧縮強さも増加していることがわかる。これは荷重に伴う排水によって供試体内の間隙が減少し供試体が密実化したためと考えられる。

4. まとめ

養生中に上載圧を加えたセメント安定処理土の一軸圧

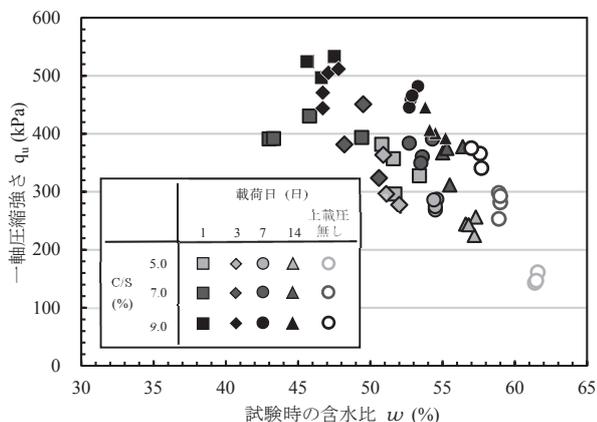


図-10 一軸圧縮強さと含水比の関係 (Tc=28(日), 上載圧 15kPa)

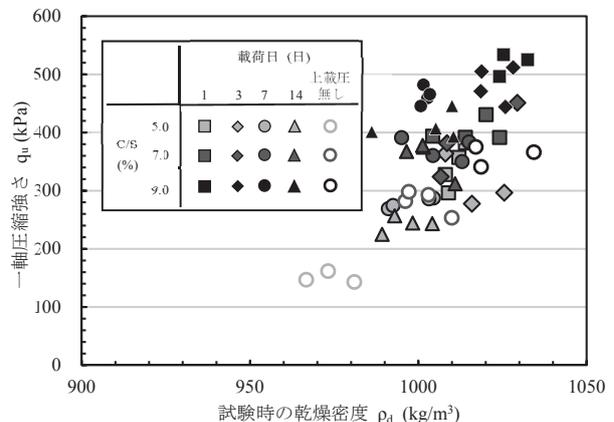


図-11 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係 (Tc=28(日), 上載圧 15kPa)

縮特性について検討した。以下に本研究で得られた知見を列記する。

- (1) 各 C/S に対して、養生時荷重を行わない場合の一軸圧縮強さと養生日数の関係を示し、その近似式を求めた。
- (2) 養生時荷重を行うことによって一軸圧縮強さは増加する。特に早期に荷重するほど強度増加が顕著であることが示された。また、相当養生日数の概念を導入し、養生中荷重を行うことによって荷重を行わない場合の養生何日目の強度が得られるかを定量的に示した。
- (3) 養生時荷重による強度増加は、含水比低下と密接に関わっていることが示唆された。

以上の知見よりセメント安定処理地盤への盛土の早期施工は有益であると判断する。今後は、強度発現特性の結果に加え詳しい沈下量の測定を行う必要がある。

安定処理土の一軸圧縮強さに及ぼす配合条件の影響、島根大学総合理工学部紀要、シリーズ A 36, pp.9-15, 2002.

- 2) 山本哲朗, 鈴木素之, 岡林茂生, 藤野秀利, 田口岳志, 藤本哲生: 上載圧下で養生したセメント安定処理土の一軸圧縮特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.387-399, 2002.
- 3) 藤本哲生, 鈴木素之, 山本哲朗, 岡林茂生: セメント安定処理した種々の土質の圧密に伴う強度・変形特性, 地盤と建設, Vol.21, No.1, pp.55-61, 2003.
- 4) カナヤ興産有限会社: 内部資料, 2017.
- 5) 昭和 KDE 株式会社: 内部資料, 2017.
- 6) 一般社団法人セメント協会: セメントの常識, 一般社団法人セメント協会, pp.19-20, 2017.
- 7) 福島信二, 北島明, 谷茂: ため池やフィルダムの堤体改修用の固化処理底泥土の強度に及ぼす加圧養生の影響, 地盤工学ジャーナル, Vol.4, No.1, pp.107-116, 2009.

参考文献

- 1) 亀井健史, 大本和樹, 志比利秀, 松尾和俊: セメント

(2019年6月17日 受付)