

マグネシウム塩を含有する粘性土のセメント改良効果

Effects of Cement Stabilization of Clayey Soil Containing Magnesium Salts

藤江佑大 Yudai FUJIE (山口大学大学院創成科学研究科)
原 弘行 Hiroyuki HARA (山口大学大学院創成科学研究科)

セメントを混合した地盤の強度発現には種々の要因が関係しており、粘土鉱物や間隙水の性質によっては著しく強度発現が阻害される場合がある。本研究では、海成粘土の改良効果に及ぼすマグネシウム塩の影響について基礎的な検討を実施するため、普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種の 2 種のセメントで固化処理した粘性土に対して一軸圧縮試験と pH 試験を実施した。その結果、土中のマグネシウム塩の濃度が増加するとセメント処理土の pH が低下して、一軸圧縮強さが減少する傾向が示された。しかし、固化材に高炉セメント B 種を用いた場合、一部のケースでは強度増加するものも確認された。

キーワード：セメント安定処理、海成粘土、マグネシウム塩、一軸圧縮強さ
(IGC : D-10)

1. はじめに

軟弱な地盤が広く分布する我が国において、石灰やセメントなどの固化材を用いた固化処理工法は多くの地盤改良工事に積極的に導入されている。セメントを土に混合すると、含水比の低下や団粒化などの物性の改善に加えて、セメントの水和硬化とポズラン反応によって長期的に強度が増進する。セメント処理土の強度や耐久性は、この反応によって生成されるケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)等の水和生成物に大きく左右される¹⁾。また、セメント処理によって得られる改良効果は対象地盤の土質等によって大きく異なることも知られている。例えば、火山灰質粘性土に多く含まれるアロフェンの影響について報告されている²⁾。アロフェンは陽イオン交換容量(CEC)が非常に大きくCa²⁺を多量に取り込む性質を持つ。それによって、固化材本来の水和反応が著しく抑制され、セメント水和物が十分に生成されず強度発現が阻害される。また、それ以外にもフミン酸やフルボ酸に代表される腐植酸による影響^{例えば 3)}についてもこれまでに議論されている。腐植酸は、間隙水の pH の低下を招き、水和反応の主体となるCa(OH)₂と反応して不溶性の物質を生成する。そのため、セメント水和物が多く得られず強度低下が生じる。

一方で、近年セメントと比して低 pH 域で土を固化することができ⁴⁾、ヒ素やフッ素等の自然由来重金属やシアンや六価クロム等を含む複合汚染土壌に対する優れた不溶化効果⁵⁾や自然生態系への配慮⁶⁾が期待できる酸化マグネシウム(MgO)を主原料とした地盤改良用固化材(Mg系固化材)の開発が進められている。しかしながら、沖積粘土のような軟弱地盤を対象としたとき、セメントに比べて改良効果が期待できない場合も確認されており

⁴⁾ Mg系固化材と石灰・セメント系固化材を併用する技術開発も検討されているが、このとき強度発現が著しく抑制される場合が指摘されている⁷⁾。さらに、セメント処理土は海水と接触すると、処理土中のCa(OH)₂と海水中のマグネシウム(Mg)塩が式(1)、(2)の反応を起こす⁸⁾。



この反応は、不溶性の水酸化マグネシウム(Mg(OH)₂)の生成によって pH が低下するとともに、Ca(OH)₂が形態を変えることを示すものである。したがって、海成粘土のように間隙水に Mg 塩が含まれる場合、アロフェンや腐植酸と同様にセメント処理工法による改良効果を阻害する可能性がある。

以上の背景から本研究では、海成粘土の強度特性に及ぼす Mg 塩の影響に関する基礎的な検討を実施するため、Mg 濃度を変化させた粘性土を母材とするセメント処理土に対して一軸圧縮試験と pH 試験を実施した。得られた結果より、Mg 塩を含有する海成粘土のセメント混合による改良効果について考察した。

2. 実験概要

2.1 供試体作製方法

2.1.1 実験に用いた材料

試料土には、カオリン粘土を用いた。試料土の物理的性質および粒径加積曲線を表-1、図-1に示す。この粒径加積曲線は微粒子を分散媒に分散させて粒径が測定できるレーザー回折粒度分布測定装置(HORIBA LA-300)を用いて求めた。固化材には普通ポルトランドセメント(OPC)

表-1 試料土の物理的性質

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.59
液性限界 w_L (%)	72.0
塑性限界 w_p (%)	34.0

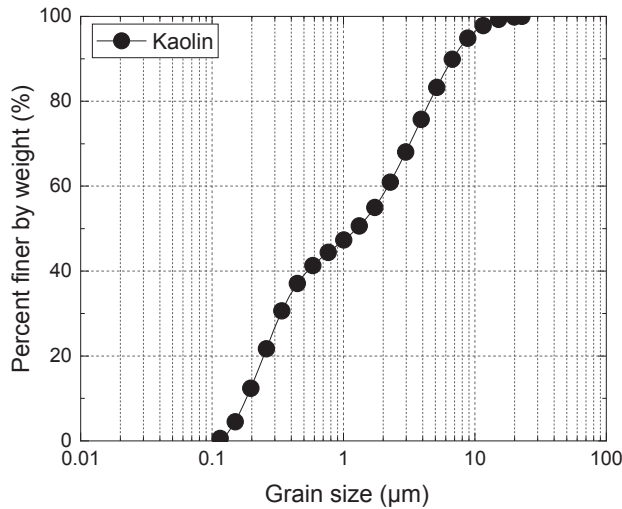
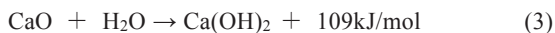


図-1 試料土の粒径加積曲線

と高炉セメント B 種(BB)を用いた。

海水には、塩化マグネシウム(MgCl₂)と硫酸マグネシウム(MgSO₄)の 2 種の Mg 塩が含まれている⁹⁾。これらは海水中でおよそ 7:3 の割合で含まれており、式(1)、(2)に示すようにどちらも同じ比率で処理土中の Ca(OH)₂ と反応し、かつ同様な反応が生じる。そこで、本研究では MgCl₂ と MgSO₄ が 7 : 3 となるように塩化マグネシウム 6 水和物(MgCl₂・6H₂O)の試薬と硫酸マグネシウム 7 水和物(MgSO₄・7H₂O)の試薬をブレンドした混合試薬(以下 Mg 試薬)を使用して試料土の Mg 塩の濃度を調整した。

OPC, BB の両固化材に含まれる酸化カルシウム(CaO)は土中の水と反応し、式(3)に示す消化反応によって Ca(OH)₂ が生成される。



さらに、Ca(OH)₂ は Mg 塩と式(1)、(2)で示した化学反応を起こし、Mg(OH)₂ と塩化カルシウム(CaCl₂)もしくは硫酸カルシウム 2 水和物(CaSO₄・2H₂O)が生成される。したがって、土中の CaO と MgCl₂ および MgSO₄ は 1 対 1 の比率で反応する。

ここで、表-2 に示す本研究で用いた固化材(OPC, BB)の CaO 含有率と固化材添加量によって、式(4)から単位体積当たりの CaO の物質質量 N_{CaO} を算出する。

$$N_{\text{CaO}} = \frac{\alpha \cdot C_{\text{CaO}} / 100}{M_{\text{CaO}}} \times 1000 \quad (4)$$

ここに、 N_{CaO} は単位体積当たりの CaO の物質質量(mol/m³)、 α は固化材添加量(kg/m³)、 C_{CaO} は固化材の CaO 含有率(%), M_{CaO} は CaO のモル比(56.08 g/mol)を表す。

先に述べたように、MgCl₂ と MgSO₄ は 7 : 3 の割合で

表-2 各固化材の CaO 含有率

固化材	CaO 含有率 C_{CaO} (%)
普通ポルトランドセメント (OPC)	64.30
高炉セメント B 種 (BB)	54.49

表-3 供試体作製条件

試料土の含水比 w (%)	108.0 (=1.5 w_L)
固化材添加量 α (kg/m ³)	50, 70, 100, 150
供試体寸法 (mm)	$\phi=50, H=100$
CaO と MgSO ₄ , MgCl ₂ のモル比 M/C	0, 5, 10, 20, 50
養生時間 t_c (days)	7, 28

存在するため、試料土に添加する MgCl₂ および MgSO₄ の単位体積当たりの物質質量 N_{MgCl_2} , N_{MgSO_4} は次式より求めた。

$$N_{\text{MgCl}_2} = \frac{\beta}{M_{\text{MgCl}_2}} \times \frac{7}{10} \times 1000 \quad (5)$$

$$N_{\text{MgSO}_4} = \frac{\gamma}{M_{\text{MgSO}_4}} \times \frac{3}{10} \times 1000 \quad (6)$$

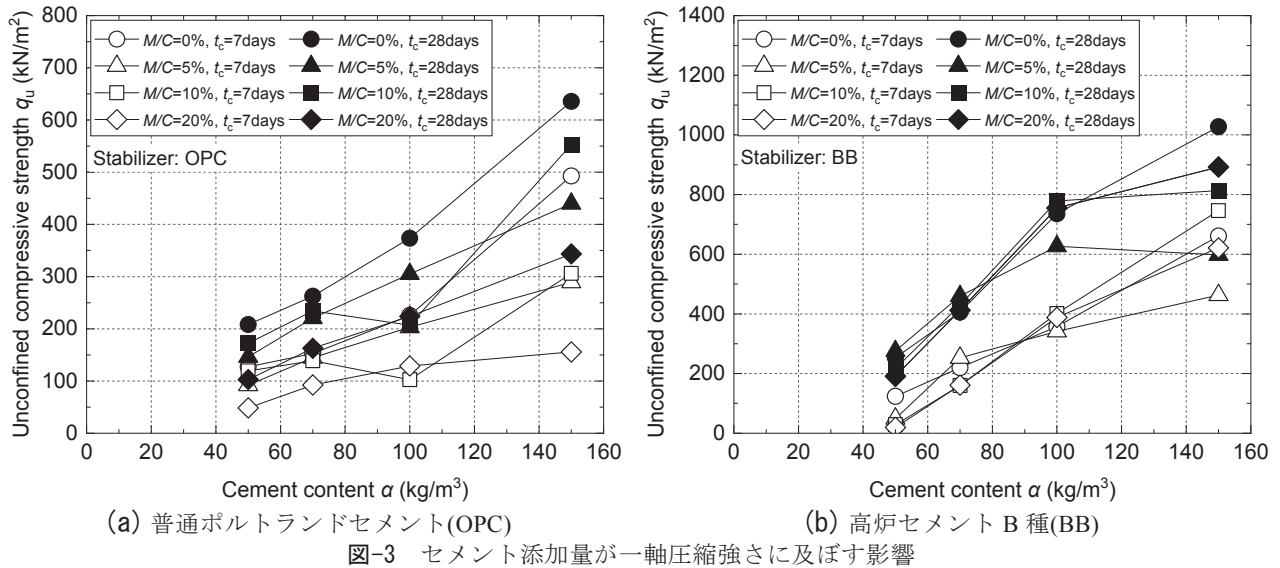
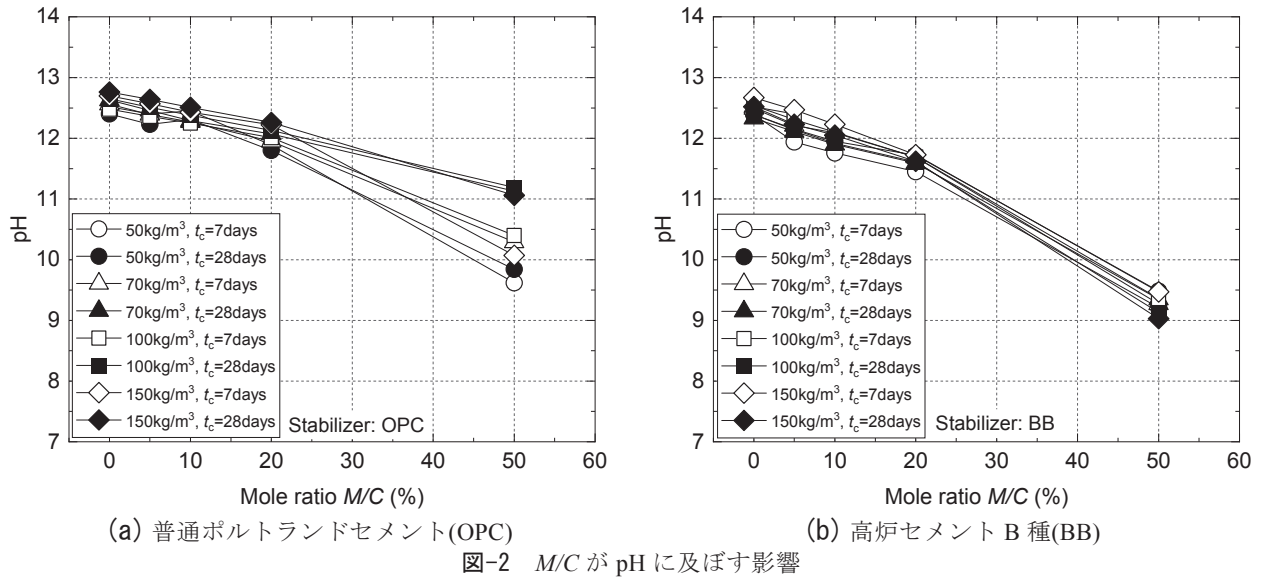
ここに、 N_{MgCl_2} は単位体積あたりの MgCl₂ の物質質量 (mol/m³)、 N_{MgSO_4} は単位体積当たりの MgSO₄ の物質質量 (mol/m³)、 β は MgCl₂ の添加量(kg/m³)、 γ は MgSO₄ の添加量(kg/m³)、 M_{MgCl_2} は MgCl₂ のモル質量(95.22g/mol)、 M_{MgSO_4} は MgSO₄ のモル質量(120.38g/mol)を表す。試料土の Mg 塩の濃度は上記 N_{MgCl_2} と N_{MgSO_4} の和に対する N_{CaO} の比、すなわち試料土に添加する CaO に対する Mg 塩のモル比を M/C と定義し、これが目標の値となるように式(5)、(6)中の β と γ を求め、Mg 試薬の添加量を決定した。

2.1.2 供試体作製手順

供試体を作製するときには、固化材と均一に混合するために試料土の含水比を液性限界の 1.5 倍($w=108.0\%$)に調整して使用した。含水比の調整にはイオン交換水を用いた。固化材の添加量は、OPC, BB とともに 50, 70, 100, 150kg/m³ とし、 M/C は 0, 5, 10, 20, 50%となるようにした。

含水比調整前の試料土に対して、イオン交換水を用いて Mg 試薬を添加し、その後固化材を加えてゴムへら等を用いて混合した後、遊星運動するソイルミキサーで 10 分間攪拌混合した。このとき、攪拌用の容器と試料の接触面付近で混合のムラが生じないように、1 分おきにミキサーを止めてからへら等でかき混ぜる作業を行った。その後、混合試料を直径 50mm、高さ 100mm のプラスチックモールドに空気が入らないようにタッピングしながら充填した。このとき、養生期間中の酸化を防ぐために余盛してフィルムを被せた。供試体は、温度 20℃に調整した室内で養生を行った。供試体の作製条件を表-3 にまとめて示す。

マグネシウム塩を含有する粘性土のセメント改良効果



2.2 実験条件と手順

7, 28 日間養生した各 M/C の OPC・BB 供試体に対して一軸圧縮試験を実施した。試験は JISA 1216「土の一軸圧縮試験方法」に準拠して行った。また、圧縮試験を行った供試体から試料を分取し、pH の測定を行った。pH の測定にはガラス電極式の pH 計を用い、測定方法は土懸濁液の pH 試験(JGS 0211)に準拠した。

なお、供試体は表-3 に示したとおり、M/C=0~50% の条件で作製したが、M/C=50%についてはいずれの固化材添加量および養生時間の場合でも脱型の際に大きく変形して自立できず、一軸圧縮試験を行うことができなかった。そのため、次章では、基本的には一軸圧縮強さが得られた M/C=0, 5, 10, 20% の 4 パターンのみで議論する。ただし、一部 M/C=50%の結果を利用して議論する場合もあり、そのときは一軸圧縮強さをゼロとして取り扱っている。

3. 実験結果と考察

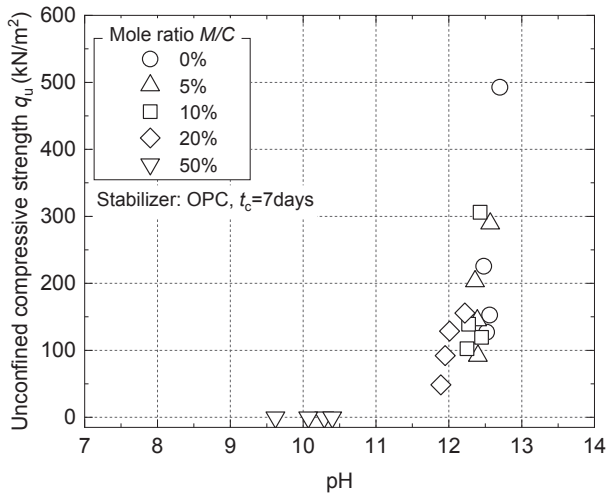
3.1 Mg 塩を含有するセメント処理土の pH 変化

OPC, BB で固化処理した供試体の pH と M/C の関係を図-2 に示す。OPC, BB 両処理土とも M/C が大きいときほど pH が低下していることがわかる。これは、式(1), (2)で示したように、MgCl₂ や MgSO₄ との反応によって、不溶性の Mg(OH)₂ が生成されると同時に電離して高 pH を呈する Ca(OH)₂ が失われたことに起因したものと考えられる。

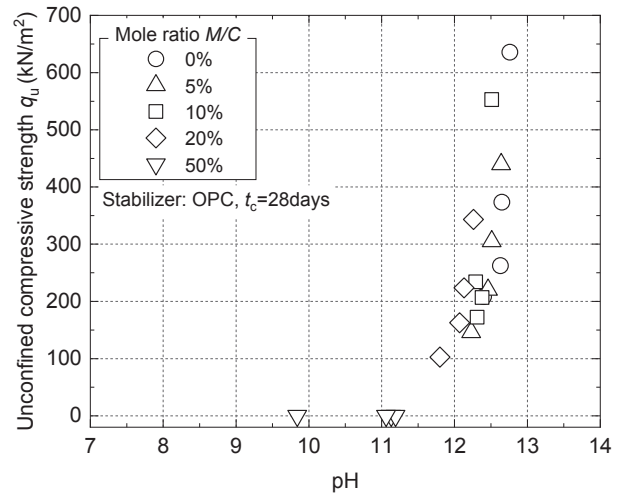
3.2 Mg 塩を含有するセメント処理土の強度発現特性

3.2.1 固化材添加量の影響

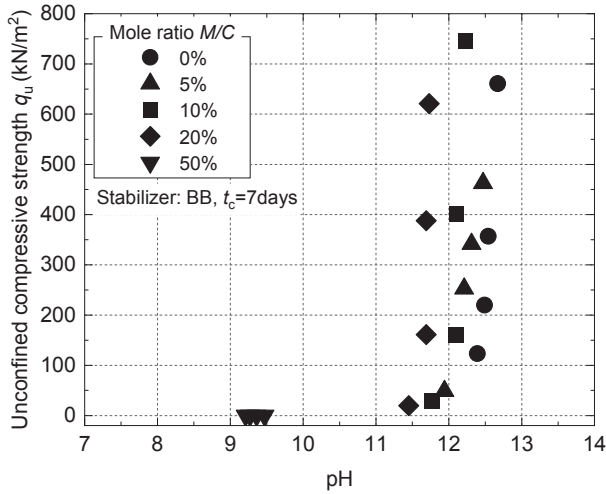
固化材添加量と一軸圧縮強さの関係を図-3 に示す。この図から、固化材の種類や M/C にかかわらず、添加量が増えるにつれ強度が増加する傾向が確認できる。また、同じ M/C で比較すると 7 日養生供試体よりも 28 日養生供試体の方が一軸圧縮強さは大きく、材齢とともにその強度が増加している。これは、長期間に及ぶセメントの



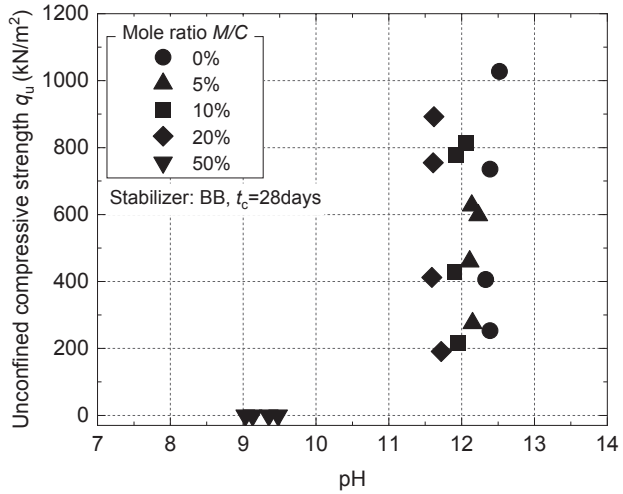
(a) 普通ポルトランドセメント(OPC), $t_c=7$ days



(b) 普通ポルトランドセメント(OPC), $t_c=28$ days



(c) 高炉セメント B 種(BB), $t_c=7$ days



(d) 高炉セメント B 種(BB), $t_c=28$ days

図-4 pH と一軸圧縮強さの関係

水和反応 によるものと推察される。また、7 日から 28 日にかけての強度増加量に注目すると、OPC の場合は、添加量が 150kg/m^3 、 $M/C=10\%$ のときは一軸圧縮強さが 250kN/m^2 増加しているが、他のケースはいずれも 100kN/m^2 の増加にとどまっていることがわかる。他方、BB の場合は、一軸圧縮強さの増加量が $70\sim 380\text{kN/m}^2$ の間で変化している。既往の研究報告¹⁰⁾によると、長期材齢における高炉スラグ処理土は、高炉水砕スラグの潜在水硬性による土粒子固結作用が強度発現に影響を及ぼすことが明らかとなっており、本実験においても養生時間の増加に伴い、固化材に BB を用いた供試体の方が高い強度を發揮したと推察される。

3.2.2 pH の影響

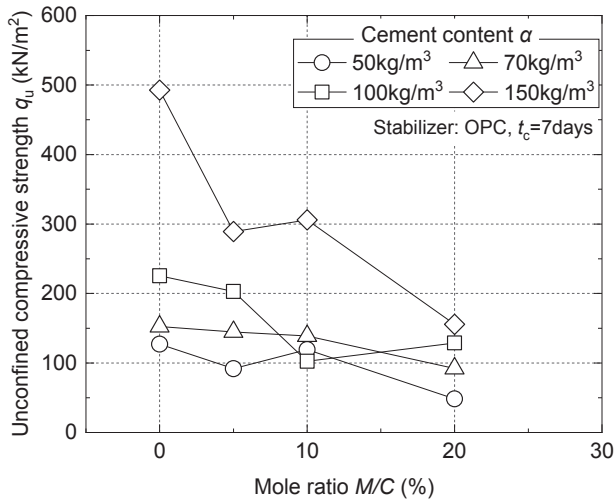
pH と一軸圧縮強さの関係を図-4 に示す。ここでは、先に述べたとおり脱型の際に変形して自立せず一軸圧縮試験を行うことができなかった $M/C=50\%$ の供試体の一軸圧縮強さを便宜的に 0kN/m^2 としてプロットしている。いずれの実験ケースの場合も pH が高いときほど一軸圧縮強さは大きくなる傾向が確認できる。また、 $M/C=50\%$ の自立しない供試体は、ほとんどのケースで $\text{pH}=11$ 以下を呈している。これは、多量に含まれる Mg 塩によって

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ の減少量が大きくなり、pH が大幅に低下したため、C-S-H 等の水和物の生成もほとんど期待できなかったためと推察される。固化材の種類・添加量にかかわらず、地盤中の Mg 塩の物質量が添加したセメントに含まれる CaO の物質量の約半分程度となり、 $\text{pH}=11$ に達しないような条件で強度発現が期待できなくなることが示唆された。さらに、OPC に比べて BB は同じ pH の範囲でも一軸圧縮強さに差異が生じやすいこともわかる。

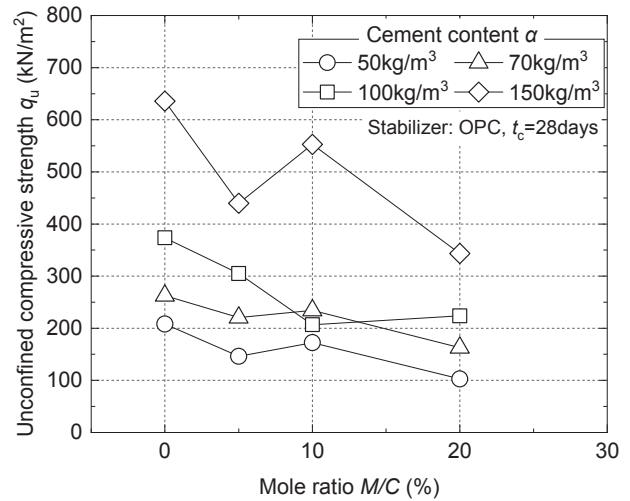
3.2.3 粘性土地盤中の Mg が強度発現に及ぼす影響

M/C と一軸圧縮強さの関係を図-5 に示す。まず OPC では、添加量 150kg/m^3 の $M/C=0\%$ の時が最も一軸圧縮強さが高いことがわかる。一部の実験ケースでは、 M/C が増加すると強度増加している場合もみられるが、全体の傾向としては M/C の増加に伴って強度低下していることがわかる。次に、BB の場合は、添加量 150kg/m^3 で $M/C=0\sim 10\%$ の範囲では大きな一軸圧縮強さの増減がみられる。その他のケースでは M/C の増加に対する一軸圧縮強さの変化は、OPC に比べると小さいことが確認できる。また、添加量 50kg/m^3 は 7 日養生のときは大きく強度低下しているが、28 日養生供試体ではその傾向が緩やかとなっている。それ以外の添加量では、 M/C に対する強度変化の

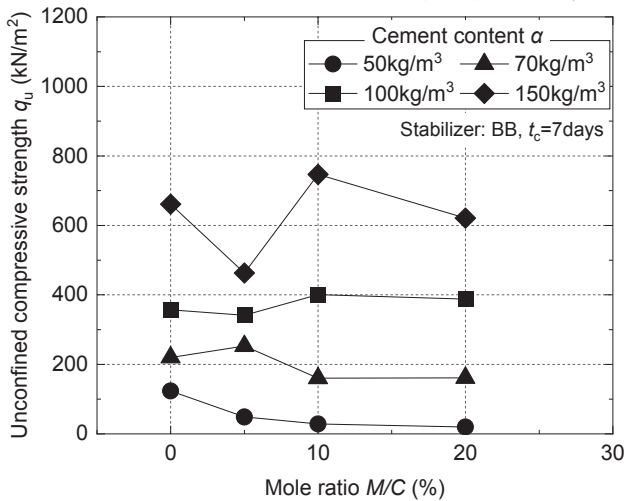
マグネシウム塩を含有する粘性土のセメント改良効果



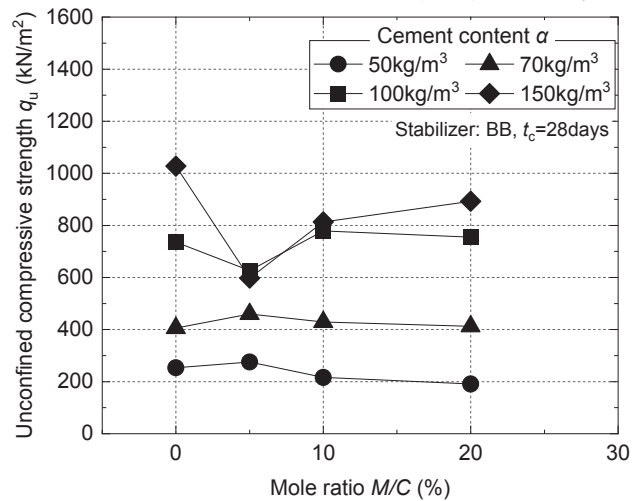
(a) 普通ポルトランドセメント(OPC), $t_c=7$ days



(b) 普通ポルトランドセメント(OPC), $t_c=28$ days



(c) 高炉セメント B 種(BB), $t_c=7$ days



(d) 高炉セメント B 種(BB), $t_c=28$ days

図-5 M/C と一軸圧縮強さの関係

傾向は養生時間によってほとんど変化していないことがわかる。

Mg 系固化材の地盤工学的有効利用法についての報告¹⁾によると, Mg 系固化材による改良土の強度増加は, 水和反応によって生じた Mg(OH)₂ のセメンテーション効果によるとされている。したがって, 本実験においても式(1), (2)によって Mg(OH)₂ が多量に生成されると強度低下するが, Ca(OH)₂ の減少による強度低下よりも生成された Mg(OH)₂ のセメンテーション効果が大きいときに強度増加したものと推察される。また, BB 処理土の方が OPC 処理土に比べて M/C の増加に伴う強度低下が小さかった。詳細なメカニズムは不明であるが, 高炉スラグ微粉末による潜在水硬性は土中の Mg 塩によって阻害されにくかったことなどが原因として考えられる。そのため, 海成粘土地盤を対象とした地盤改良工事では, BB を用いると強度低下が生じにくい可能性がある。

4. 結論

本研究では, 普通ポルトランドセメントと高炉セメン

ト B 種を固化材とし, Mg 塩を含有する粘性土試料を母材とするセメント処理土に対して一軸圧縮試験を実施した。得られた結果より, Mg 塩を含有する海成粘土のセメントによる改良効果について考察した。本研究より得られた主な知見は以下のとおりである。

- (1) 試料土に含まれる Mg 塩濃度の増加に伴い, 不溶性の Mg(OH)₂ が生成され, Ca(OH)₂ が減少することによって, セメント処理土の pH が低下する。
- (2) 試料土のマグネシウム濃度にかかわらず, 固化材添加量が増えるにつれ強度が増加する傾向がある。また, いずれの供試体作製条件においても材齢とともにその強度は増加する。
- (3) 固化材の種類・添加量にかかわらず, 地盤中の Mg 塩のモル比が固化材中の CaO のモル比の約半分程度となり, pH が約 11 に達しないような条件で強度発現が期待できなくなる。
- (4) 試料土に含まれる Mg 塩濃度の増加に伴ってセメント処理土の一軸圧縮強さは減少する傾向がある。しかし, 高炉セメント B 種の場合, マグネシウム無添加の場合よりも強度増加するケースも確認された。

参考文献

- 1) 一般社団法人セメント協会:セメント系固化材による地盤改良マニュアル第4版, 技報堂出版(株), pp.24-35, 2012.
- 2) (社)セメント協会 セメント系固化材技術専門委員会:火山灰質粘性土のセメント改良体における強度発現に関する検討《アロフェンの影響について》, セメント・コンクリート, No.780, pp.3-8, 2012.
- 3) Zhu, W., Chiu, C. F., Zhang, C.-L. and Zeng, D.-L.: Effect of humic acid on the behavior of solidified dredged material, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46, No. 9, pp. 1093-1099, 2009.
- 4) 西形達明, 山田哲司, 西田一彦, 松田豊:酸化マグネシウムの地盤改良への適用について, 土と基礎, Vol.54, No.7, pp.19-21, 2006.
- 5) 大山将, 奥村正孝, 保賀康史, 西村良平:酸化マグネシウム系材料による固化・不溶化技術, 地盤工学会誌, Vol.57, No.7, pp.20-23, 2009.
- 6) 藤平雅巳, 小西武, 大沢一実, 熊田弘:環境対応型固化材の海産生物に及ぼす影響について, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, pp.137-138, 2003.
- 7) 田口岳志, 日野剛徳, 西野伸幸, 三浦有規子, 柴錦春:2段階処理施工パターンにおけるハイブリット式安定処理土の強度・間隙構造・溶出特性, 第44回地盤工学研究発表会, pp.619-620, 2009.
- 8) Buenfield, N. R. and Newman, J. B.: The permeability of concrete in a marine environment, Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No. 127, pp.67-80, 1984.
- 9) 吉田彰:海水マグネシア, Journal of the Society of Inorganic Materials, Japan, Vol. 9, No. 300, pp.294-303, 2002.
- 10) 亀川恵子, 中村恵子, 吉田信之:微視的観察に基づく水砕スラグの一軸圧縮強度発現に関する一考察, 第37回地盤工学研究発表会, pp.687-688, 2002.
- 11) 山田哲司, 西形達明:水酸化マグネシウムが酸化マグネシウム改良土の硬化反応に及ぼす影響, 第45回地盤工学研究発表会, pp.543-544, 2010.

(2021年6月14日 受付)