

化学的地盤改良を施した沖積粘土地盤の酸性化に伴う

強度低下に関する研究

根上武仁

佐賀大学大学院工学系研究科

概要：本研究では、化学的地盤改良後の強度発現と、どのような条件で強度低下を生じるのかを明らかにすることを目的とした。固化材で改良した有明粘土試料を、蒸留水、塩水および希硫酸中に水浸させた試料について、水浸溶液への溶出特性と一軸圧縮強さの変化を調べた。得られた結果から、水浸する水溶液の性質によっては、改良強度が低下することを明らかにした。

1. はじめに

有明海沿岸域には軟弱な沖積粘土が広く堆積している。このため、この地域での建設工事の際には生石灰やセメント等の固化材を用いた化学的地盤改良がこれまでに多く施工されてきている。生石灰やセメントなどを用いた軟弱地盤改良の際には、固化材を軟弱な高含水比粘性土と混合するとポズラン反応が長期にわたって進行し、CSH や CAH などの化合物を生成して地盤改良強度を増強・維持できると考えられている。しかし、このような化学的地盤改良が施された区域の一部で、改良強度が低減している事例が近年報告されている^{1),2)}。また、還元的環境で堆積していると考えられてきた沖積粘土地盤で、酸化が進んだ層が見いだされ、深層混合処理工法やセメント杭などの軟弱地盤対策に及ぼす影響の究明が課題であることが示唆されている³⁾。

本研究では、化学的地盤改良後、改良体周辺の地盤環境が変化した場合に改良強度はどのように発現するのか、また、どのような条件で強度低下を生じるのかを明らかにすることを目的とする。生石灰やセメント系固化材で改良した有明粘土試料を、蒸留水、塩水および希硫酸中に水浸させた試料について、水浸溶液への溶出特性と一軸圧縮強さの変化を調べた結果について報告する。

2. 軟弱粘土試料と試験方法

本研究では、有明海沿岸道路（佐賀福富道路）の 8m 級試験盛土施工現場⁴⁾付近の地表面から 2m の部分の海成粘土（有明粘土）を使用した。

表-1 試料土の物理化学的性質

自然含水比 w_n (%)	141.5	
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.562	
粒度組成	砂分 S (%)	22
	シルト M (%)	29
	粘土分 C (%)	48
液性限界 w_L (%)	109.7	
塑性限界 w_p (%)	45.2	
塑性指数 I_p	64.5	
酸化還元電位 ORP (5 分)	-340	
pH	9.1	
塩濃度 NaCl (g/L)	1.14	
強熱減量 Li (%)	8.2	

表-1 に試料の物理化学的性質を示す。

使用した改良材は、生石灰（以後 CaO と呼ぶ）およびセメント系固化材（以後セメントと呼ぶ）である。固化材の配合条件は、現場条件に照らして CaO は 30kg/m³ および 60kg/m³、セメントについては 140kg/m³ とした。

供試体の作製は JGS 0821-2000 に準拠した。養生条件については、恒温恒湿室での気中養生に加え、蒸留水、塩水 20g/l 溶液（人工海水、以後塩水と呼ぶ）の水溶液²⁾ および酸（希硫酸 0.01N 溶液、以後希硫酸と呼ぶ）に期中養生 7 日後の供試体を水浸した。所定の期間養生後、タンクリーチング試験による溶出成分分析と一軸圧縮試験を実施した。浸水後 7、28 日経過したものについて各浸水液を採取し、pH 測定と ICP による溶存イオン分析を行った。

浸水液に希硫酸を用いたのは、有明粘土中には写真-1 に示すような生物起源パイライトが

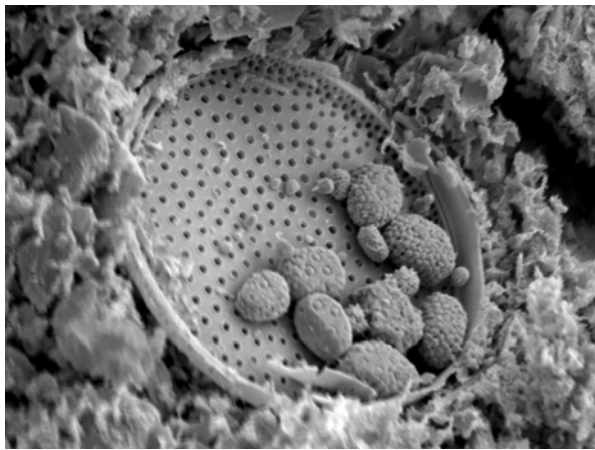


写真-1 有明粘土中の珪藻遺骸とパイライト
(─── 10 μ m)

表-2 硫酸イオンの濃度変化

	粘土抽出水 (mg/l)	粘土 (mg/kg)
酸化前	2300	3400
酸化後	3700	6600

含まれており、酸化によって硫酸が生成されることによる⁵⁾。希硫酸濃度の決定については、pHが2~3となるような濃度を考慮した。

表-2は、実際に使用した粘土の酸化前後での硫酸イオンの変化を示したものである。酸化の前後で、粘土抽出水および粘土中の硫酸イオンが増加していることがわかる。また、浸水液に塩水を用いたのは、感潮河川の堤防においては堤体への塩水の浸透も考えられることによる。

3. 試験結果と考察

3-1. タンクリーチング試験による pH の経時変化

タンクリーチング試験結果 (pH) を図-1 に示す。浸水液が蒸留水の場合、Ca030kg/m³のケースでは、pHは11.4から約10へと減少したが、Ca060kg/m³やセメント140kg/m³の場合はほとんど変化が見られなかった。浸水液が塩水の場合では、全てのケースにおいてpHはほとんど変化していないことがわかる。

これは、塩水中に含まれる各種塩類の緩衝作用によるものと考えられる。浸水液が希硫酸の場合、28日水浸後のpHは10以上に増加した。これは、固化材が強アルカリ性であり、この一部が溶出して浸水液のpHを増加させたためと考えられる。

浸水液が塩水の場合と希硫酸の場合を比較

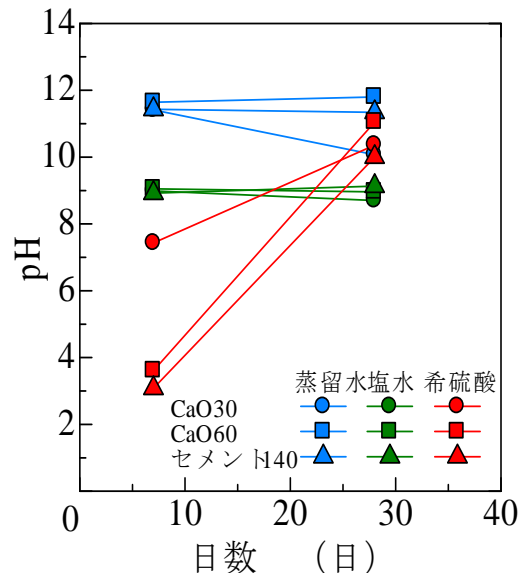


図-1 pHの経時変化

すると、塩水の場合は28日経過後もほぼpHの変化が生じていないことから、各種塩類の緩衝作用は比較的大きいと考えられる。

3-2. 固化主成分の溶出特性と経時変化

水浸液が蒸留水の場合のタンクリーチング試験結果を図-2に示す。Ca060kg/m³のケースでは、浸水日数の経過に伴ってCa²⁺の溶出濃度は高くなった。しかし、Ca030kg/m³およびセメント140kg/m³については、水浸日数の経過とともに溶出量はやや低下した。Na⁺については、水浸7日目ではCa030kg/m³の場合の溶出濃度が高くなったが、水浸28日目ではいずれのケースも同程度の溶出濃度となった。

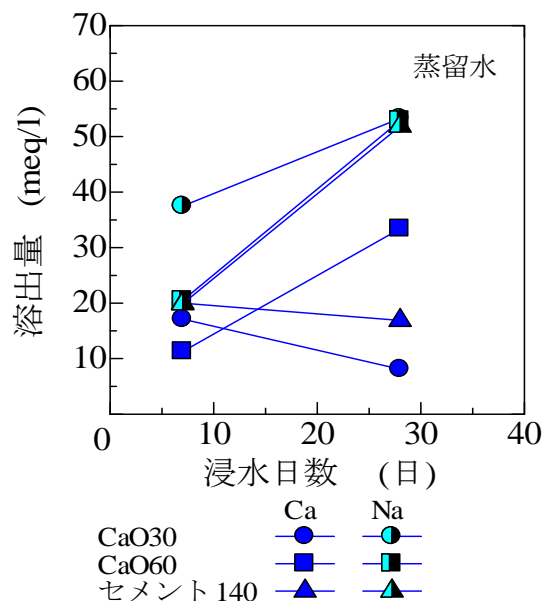


図-2 Ca²⁺とNa⁺の溶出濃度の経時変化 (蒸留水)

水浸液が塩水の場合のタンクリーチング試験結果を図-3に示す。固化材添加量と固化材の種類に関係なくほぼ同じ溶出量となった。水浸液が蒸留水の場合と比較すると Ca^{2+} および Na^+ 濃度がかなり高いが、これは水浸液が人工海水であり、供試体水浸前から多くの Ca^{2+} および Na^+ を含むためである。

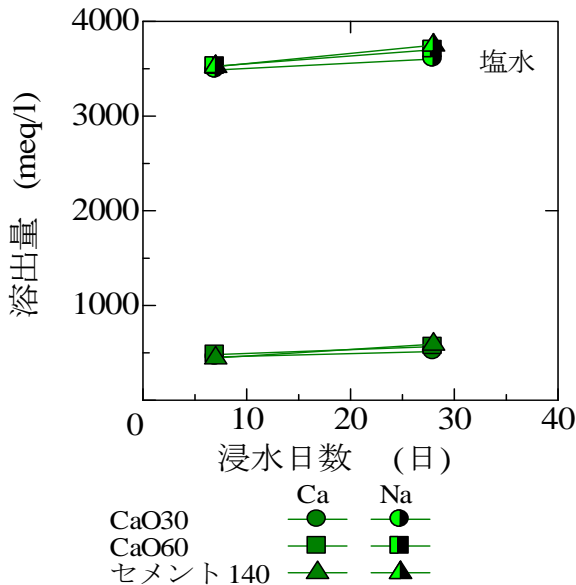


図-3 Ca^{2+} と Na^+ の溶出濃度の経時変化 (塩水)

水浸液が希硫酸の場合のタンクリーチング試験結果を図-4に示す。蒸留水や塩水の場合とは異なり、 Na^+ よりも Ca^{2+} の溶出量が多い。また、 $\text{CaO}30\text{kg/m}^3$ の Ca^{2+} の溶出量は、 $\text{CaO}60\text{kg/m}^3$ やセメント 140kg/m^3 と比較するとかなり低くなった。 Na^+ の溶出量は、蒸留水の場合とほぼ同じ値となった。

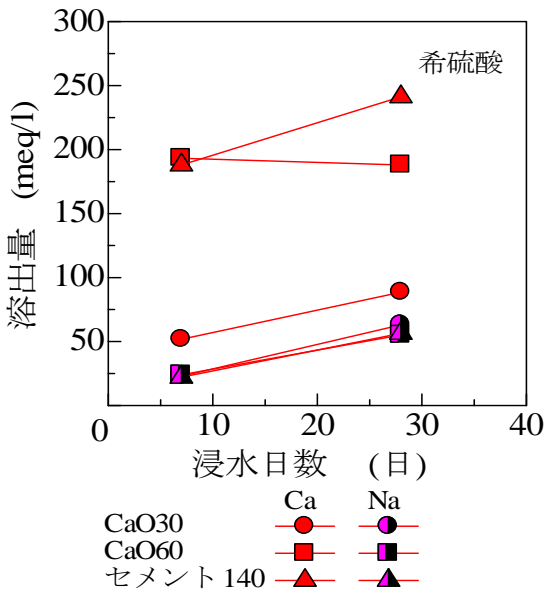


図-4 Ca^{2+} と Na^+ の溶出濃度の経時変化 (希硫酸)

各水浸液における Si^{4+} の溶出量を図-5に示す。蒸留水に水浸した場合の溶出量は、固化材による差はあるものの増加傾向にある。塩水に水浸した場合の溶出量は、やや増加傾向である。希硫酸に水浸した場合は固化材による差はあまり無く、溶出量は増加傾向である。いずれの水浸液の場合も、水浸することで Si^{4+} が溶出していることがわかる。

生石灰による地盤改良のメカニズムは、第1期の水和反応、第2期のイオン交換反応、第3期のポズラン反応に分かれることが報告されている⁶⁾が、図-2~図-5を併せて考察すると、 $\text{CaO}30\text{kg/m}^3$ のケースは Ca^{2+} の溶出量は少ないが Si^{4+} の溶出量は他のケースと比較しても少なくないこと、固化材の種類は異なるが、セメント 140kg/m^3 の場合の Ca^{2+} と Si^{4+} の溶出の傾向がほぼ同じであることから、第2期までの反応が終了したものと考えられる。また、水浸液が塩水の場合は、pHがほとんど変化せず、固化材の種類や量にかかわらず Si^{4+} の溶出量は他の水浸液と比較すると少ないことから、塩水中の溶存イオンによる置換反応が生じていると考えられる。

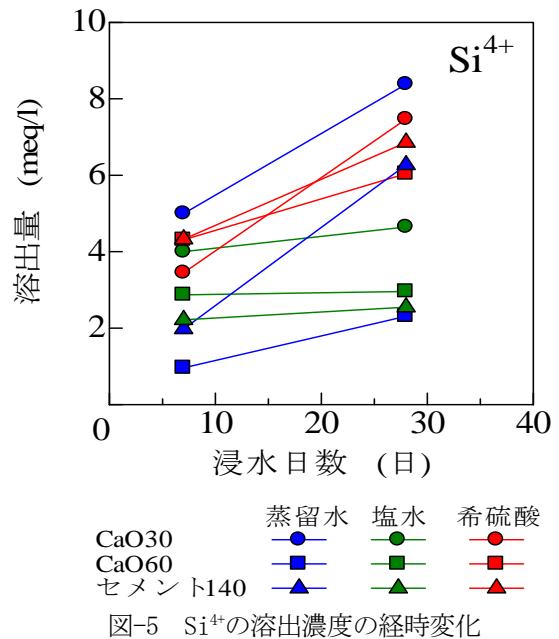


図-5 Si^{4+} の溶出濃度の経時変化

3-2. 含水比と乾燥密度の経時変化

養生日数と含水比の関係を図-6に示す。非水浸条件で養生した供試体の含水比は、水浸液の種類によらず、水浸させて養生した場合の含水比よりも低い結果となった。また固化材に着目すると、非水浸・水浸 (蒸留水・塩水・希硫酸)

のいずれの場合も、Ca030kg/m³、Ca060kg/m³、セメント 140kg/m³の順に含水比が低下した。Ca030kg/m³では水浸溶液の種類によらず、含水比の変化はほぼ同じ傾向である。Ca060kg/m³では、塩水の場合が含水比が高くなり、蒸留水と希硫酸の場合は 91 日養生を除けば含水比はほぼ同じである。セメント 140kg/m³の場合は、蒸留と塩水に浸水させた場合の含水比はほぼ同じであり、希硫酸の場合がやや高くなった。また、水浸と非水浸を比較すると、Ca030kg/m³で最大で約 9%、Ca060kg/m³で最大で約 15%、セメント 140kg/m³では最大で約 7%の含水比の差が見られた。

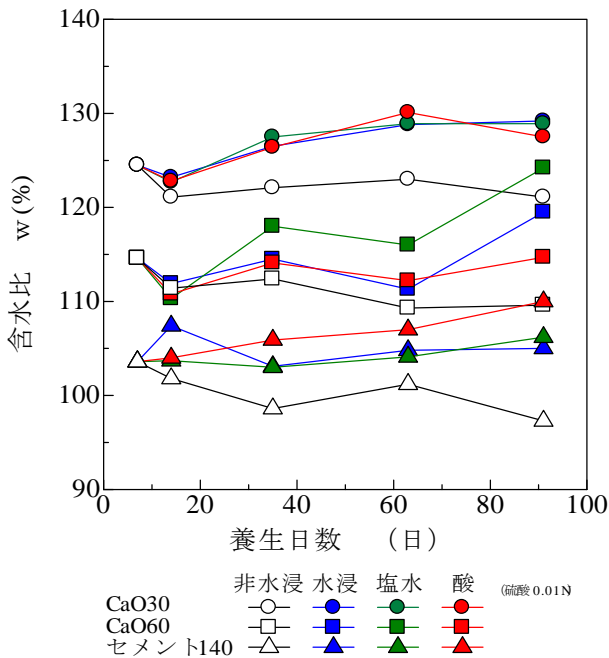


図-6 養生日数と含水比の関係

養生日数と一軸圧縮試験用供試体の乾燥密度の関係を図-7 に示す。非水浸条件と水浸条件に着目すると、Ca030kg/m³、Ca060kg/m³、セメント 140kg/m³のいずれの場合も、水浸と非水浸の違いによると考えられる大きな差は見られない。また、固化材に着目すると、セメント 140kg/m³、Ca060kg/m³、Ca030kg/m³の順に乾燥密度は高くなった。

3-3. 一軸圧縮強さの経時変化

一軸圧縮試験結果を図-8 に示す。固化材別に見ると、Ca030kg/m³の場合が最も改良強度が低く、次に Ca060kg/m³となった。セメント 140kg/m³の場合が最も改良強度は高い結果となった。Ca030kg/m³の場合は、非水浸・水浸条

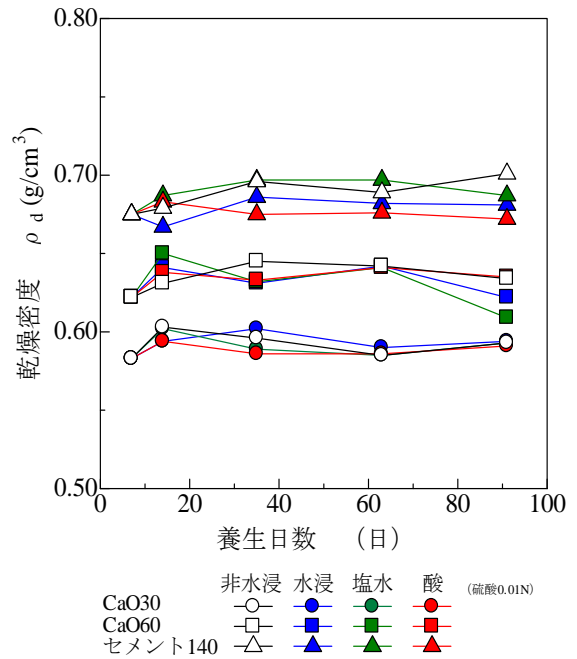


図-7 養生日数と乾燥密度の関係

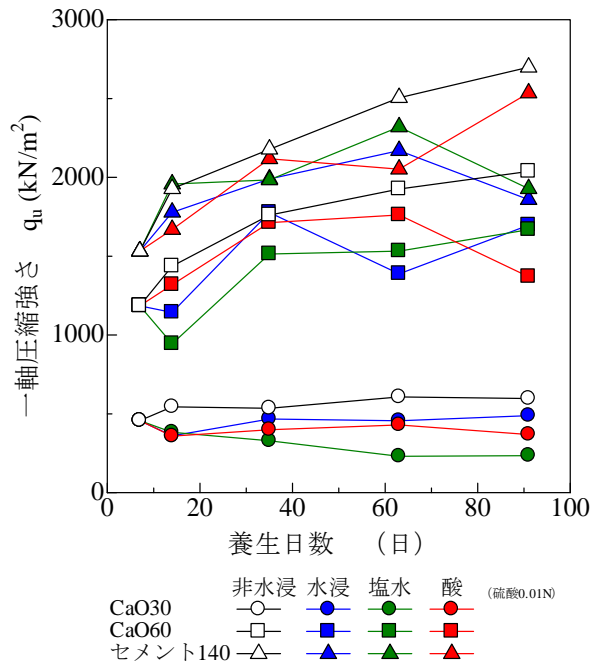


図-8 一軸圧縮試験結果

件にかかわらず、養生日数の増加に伴う強度発現はあまり大きくない。また、水浸させると非水浸の場合よりも一軸圧縮強さは低くなった。養生 91 日では、塩水に水浸させたものの一軸圧縮強さが最も低く、その差は約 400 kN/m²である。

Ca060kg/m³の場合は、非水浸の場合は養生日数の経過に伴って Ca030kg/m³のケースよりも大きな強度増加が見られた。水浸させた場合は、Ca030kg/m³の場合と同様にいずれのケースも非水浸の場合に比べ強度は低くなった。蒸留水

に水浸した場合は、養生 63 日の時に一軸圧縮強さが低下したが、養生 35 日と養生 91 日の場合の一軸圧縮強さはほぼ等しい。塩水に水浸した場合は、養生 35 日から 91 日にかけての強度増加は非水浸の場合に比べて低くなった。希硫酸に水浸させた場合は、養生 61 日までは改良強度は増加するが、養生 91 日では低下した。養生 91 日では、一軸圧縮強さが最も大きいのは非水浸の場合で、最も低いのは希硫酸に水浸した場合であり、その差は約 700 kN/m²である。

セメント 140kg/m³の場合、養生日数の経過に伴う改良強度の変化は、蒸留水と塩水に水浸した場合では同じ傾向を示し、養生 63 日までは改良強度は増加したが、養生 91 日で改良強度は低下した。養生 91 日では、非水浸の場合が最も一軸圧縮強さが高く、蒸留水に水浸させた場合が最も強度が低くなった。この強度差は約 800 kN/m²であり、Ca030kg/m³や Ca060kg/m³のケースよりも大きい結果となった。

含水比と一軸圧縮強さの関係を図-9 に示す。含水比が低下すると、改良一軸圧縮強さが高くなる傾向が伺える。

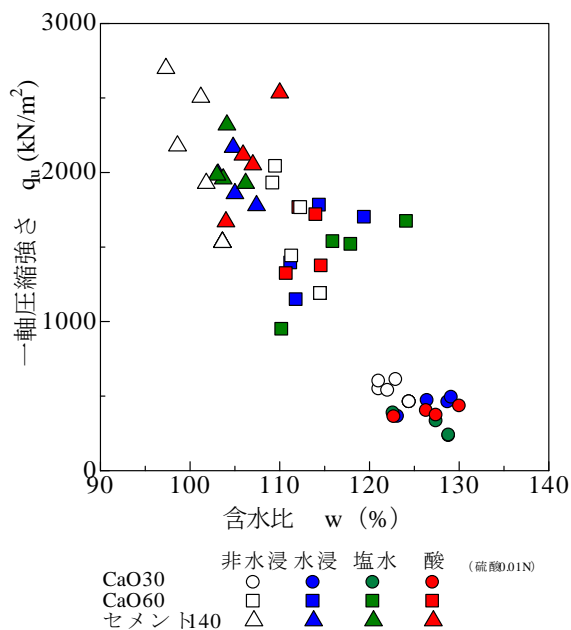


図-9 含水比と一軸圧縮強さの関係

前節で示した Ca²⁺ と Na⁺ および Si⁴⁺ の溶出特性と、図-8 に示した一軸圧縮強さと養生日数の関係を併せて考察すると、Ca030kg/m³ の場合は、養生 35 日（水浸 28 日）までで混合した CaO の大半が使用され、第 2 期のイオン交換反応まで進んだと考えられる。比較的貧配合であるため、

ポズラン反応による強度増加が得られなかったと考えられる。Ca060kg/m³ の場合は、Ca030kg/m³ の場合と比較すると、Ca²⁺ との溶出量は大きく Si⁴⁺ の溶出量は少ない。改良一軸圧縮強さは Ca060kg/m³ の場合が大きい。これより、養生 35 日（水浸後 28 日）以降の長期改良強度は、ポズラン反応が進行したことによるものと考えられる。

セメント 140kg/m³ の場合は、養生 35 日（水浸後 28 日）まで Si⁴⁺ の溶出が確認でき、非水浸の場合の改良一軸圧縮強さはその後も増加していることから、Ca060kg/m³ の場合と同様に、養生 35 日（水浸後 28 日）以降の長期改良強度は、ポズラン反応の進行によるものと考えられる。

図-5 および図-6 を併せて考察すると、供試体含水比は非水浸・水浸条件で差があっても、乾燥密度ではほとんど差が生じていないことがわかる。また、図-7 および図-8 から、乾燥密度がほぼ同じであっても、一軸圧縮強さには大きな差が生じていることがわかる。図-8 および図-9 から、一軸圧縮強さは供試体含水比が高いと低いことがわかる。

ここで、図-6 と図-8 のセメント 140kg/m³ に着目する。蒸留水と塩水に水浸した場合の含水比と非水浸の場合の含水比の差は約 10%で、蒸留水と塩水に水浸した場合の含水比と希硫酸に水浸した場合の含水比の差は約 4%である。非水浸状態の供試体含水比と希硫酸に水浸した場合の供試体含水比は 10%以上の差があるが強度差は 170 kN/m²程度で、非水浸状態の供試体含水比と蒸留水および塩水に水浸した場合の供試体含水比は約 4%の差で強度差は約 800 kN/m²である。つまり、水浸液の性質が、改良一軸圧縮強さに影響をおよぼしていることがわかる。

これは、地盤環境が長期に渡って安定していれば改良強度が維持されるが、地盤環境に変化がある場合には強度低下が生じる可能性があることを示しており、既往の研究や報告に見られる強度低下の一因を示唆するものと考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を要約すると、次のとおりである。

(1) タンクリーチング試験結果は、固化材の種

類や量にかかわらず、pH の値はアルカリ性を示した。水浸液が塩水の場合は pH の大きな変化は見られないが、人工海中の各種イオンによる緩衝作用のためと考えられる。また、水浸液が希硫酸の場合でも、28 日経過後の pH はアルカリ性を示す。

- (2) 改良一軸圧縮強さは、固化材の混合率に関わらず通常の養生を行った場合が最も高く、水浸液の種類によらず水浸させて養生した場合は改良強度が低下する。
- (3) 地盤環境が長期に渡って安定している場合は、固化材による改良強度が維持されるが、地盤環境に変化がある場合には強度低下が生じる可能性がある。

なお、本研究の内容の一部については、平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会で発表している。また、第 45 回地盤工学会研究発表会に投稿しており、発表予定である。

参考文献

- (1) 国土交通省九州地方整備局佐賀国道事務所：地盤調査結果概要と軟弱地盤対策工の選定，大川佐賀道路軟弱地盤対策技術基準検討委員会・軟弱地盤 WG 資料，pp. 27-30，2009.
- (2) 原弘行，末次大輔，林重徳，水城正博：海水浸漬下における石灰処理土の強度低下に関する実験的検討，第 8 回地盤改良シンポジウム論文集，(社)日本材料学会，pp. 65-70，2008.
- (3) 日野剛徳，下山正一，松浦浩久，根上武仁，田口岳志：福岡県柳川地区における地盤の堆積環境，第 44 回地盤工学研究発表会講演概要集 CD-ROM，2009.
- (4) 佐賀県有明海沿岸道路整備事務所：みちしるべ，佐賀県有明海沿岸道路広報誌，第 4 号，2009.
- (5) (社)地盤工学会：土質試験の方法と解説-第一回改訂版-，p. 902，2000.
- (6) 南里勝，鬼塚克忠：軟弱な建設残土の生石灰による改良とそのメカニズム，土と基礎，Vol. 43, No. 8, pp. 27-30, 1995.