

平成 22 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20760316

研究課題名 (和文) 感潮河川水の浸透による石灰処理土の劣化機構

研究課題名 (英文) Deterioration mechanism of lime treated soil due to infiltration of tidal river water

研究代表者

末次 大輔 (SUETSUGU DAISUKE)

佐賀大学・低平地研究センター・准教授

研究者番号：30423619

研究成果の概要(和文):河川水や地下水に塩分を含んでいる感潮河川周辺の軟弱地盤地帯では、石灰を添加して固化した地盤が軟化する現象が確認されている。本研究では塩分を含む感潮河川水の浸透による石灰処理土の劣化メカニズムを調べた。その結果、感潮河川水の接触・浸透によって石灰処理土は劣化する。そして、劣化の進行は海水濃度が高いときほど、また、石灰添加量が少ないときほど速いことがわかった。さらに、劣化を引き起こす主要な物質は海水に含まれるマグネシウムであることを明らかにした。

研究成果の概要(英文): Deterioration of lime treated soil appears in soft clayey ground area around tidal rivers. In this study, deterioration mechanism which is caused by salty water infiltration such as tidal river water was investigated. The lime treated soil had been deteriorated by contacting and infiltrating of salty water. Deterioration rate increased with increasing salinity and with decreasing lime content of the treated soil. The reason which causes deterioration was found to be magnesium contained in sea or tidal river water.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,000,000	600,000	2,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：地盤改良，石灰処理土，劣化，感潮河川，浸透

1. 研究開始当初の背景

最近、海水が遡上する河川感潮域の堤防基礎部において、約 20 年前に施工された石灰処理土層の軟化・泥濘化が確認されている。堤防基礎部は河床浚渫土や現地発生土に生

石灰を 30~40kg/m³ の割合で添加し、混合した処理土で構築されている。築堤から約 20 年が経過した現在では、河口に近い程多くの箇所でも漏水が発生し、石灰処理土層の著しい軟化が見られる。基礎部等に用いられた化学

的安定処理土の軟化は漏水問題にとどまらず、堤体の安定性を低下させる要因となる。特異な環境における化学的安定処理土の性質変化についての報告はいくつかあるが、このような海水を含む感潮河川水の接触や浸透を受ける石灰処理土の性状変化についての報告は極めて少ない。しかも、それらの多くは海水=塩水(NaCl 溶液)として研究・検討されている。さらには、このような環境下における石灰処理土の長期的な性質の変化、あるいは劣化機構や耐久性についてはほとんど未解明である。感潮河川域において、化学的安定処理土を合理的に供用していくためには、NaCl 溶液ではなく、真の海水を用いた実験データや調査結果の蓄積が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、石灰で固化処理された粘性土の感潮河川水の浸透に対する長期的な耐久性の評価手法ならびに固化処理地盤のメンテナンス技術の確立に寄与できる知見を得るため、感潮河川水の浸水下条件下における劣化機構の解明を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 実験の構成

本研究では石灰処理土供試体の海水浸漬による劣化促進試験ならびに破砕した石灰処理土の溶出試験を実施した。劣化促進試験では、人工海水に浸漬した石灰処理土供試体に対して、コーン貫入試験、含水比試験、および元素分析を実施した。海水を用いた破砕処理土の溶出試験においては、生石灰の添加量が異なる処理土と濃度を変化させた人工海水を使用し、処理土からのCaイオンの溶出に及ぼす海水の影響について検討した。これらの実験より、石灰処理土の物理的、化学的性質ならびに力学的性質の時間的・空間的変化を明らかにし、石灰処理土の劣化機構について考察した。

(2) 実験に用いた試料

天然の海水ならびに感潮河川水は、採取する時期や場所、深度等によって、その塩分が大きく変化するため、本実験では人工海水を使用した。本実験に用いた人工海水は、海水の組成を模して人工的に調整された粉末をイオン交換水で溶解したものである。人工海水と有明海の海水の主要な化学成分を比較しても、大きな差異は見られないため、使用した人工海水が石灰処理土の諸性質に与える影響は、実海水を使用した場合と類似したものであると考えられる。溶出試験および海水浸漬試験では、人工海水中のNaCl濃度を0(イオン交換水)、5、10、20、40g/Lに調整したものを使用した。また、本文中に表示す

る海水濃度は、その海水のNaCl濃度(g/L)で表示する。

試料土は、佐賀県小城市の感潮河川の河口域に堆積した有明粘土(浚渫泥)である。それぞれの実験で使用した有明粘土の物性を表-1に示す。固化材は粉末状生石灰(粒径:1.0mm以下、CaO含有量:93.0%以上)を使用した。

表-2 試料土の物性

	促進劣化試験	溶出試験
自然含水比 (%)	195.2	239.4
土粒子密度 (g/cm ³)	2.7	2.6
液性限界 (%)	163.1	171.2
塑性限界 (%)	47.1	58.7
粒度組成 (%)		
砂	0.2	0.4
シルト	24.7	29.6
粘土	75.1	70.0

(3) 石灰処理土の供試体の作製方法

石灰処理土作製時には、試料土の含水比を液性限界の1.5倍となるように調整した。固化材の添加量は、溶出試験では0(未処理土)、35、50、70kg/m³、海水浸漬試験では35、50、70、100kg/m³とした。試料土に固化材を添加し、ハンドミキサーで十分に混合した。作製した石灰処理土(石灰添加量:35kg/m³)、φ=50mm、h=100mmのプラスチックモールドに空気が入らないように詰めた後、上部をラップで覆い、室温20°C(±1°C)で静置して養生した。養生期間は7日および28日とした。

(4) 劣化促進試験の方法

脱型した供試体(φ=50mm、h=100mm)をNaCl濃度0、5、10、20、40g/Lに調整した人工海水に浸漬させた。海水への浸漬条件は、プラスチック容器に人工海水2Lを加えて、供試体(V=196.3cm³)を2本浸漬させた。このとき、供試体にはゴムスリーブを被せた。なお、ゴムスリーブの下部は密閉し、海水との接触は供試体上面のみとなるようにした。海水に浸漬する期間は0~168日とした。

海水浸漬による供試体の強度分布を調べるためにコーン貫入試験を実施した。試験の手順は以下のとおりである。まず、浸漬後の供試体からゴムスリーブを外し、マイターボックス(内径:50mm)を取り付けた後バンドで固定した。次に、本試験用に製作した、小型のコーン(径:6mm、先端角度:60°)を、海水との接触面から3mm/minの貫入速度で50mm程度貫入した。貫入試験実施後、供試体を5mm毎にすべて削り取り、110°Cで炉乾燥し、供試体中の含水比および元素濃度の分布を調べた。元素分析には蛍光X線分析装置(SHIMADZU Rayny EDX-800HS)を使用した。

(5) 溶出試験の方法

溶出試験には、28日養生した石灰処理土を破碎し、2mmふるいを通したものをを用いた。溶出試験に使用した溶液は人工海水と、一般的な海水中に多く含まれる塩分である塩化ナトリウムと塩化マグネシウムを溶質として使用したNaCl溶液、MgCl₂溶液の3種類である。実験で使用した人工海水は、海水の組成を模して調整された市販の粉末をイオン交換水で溶解したものである。人工海水に含まれるNa、Ca、Mgイオン濃度を表-3にまとめる。溶出試験において、人工海水とNaCl溶液は、溶液中のNaCl濃度を0、5、10、20、40g/Lに調整して使用した。MgCl₂溶液は、溶液中のMgCl₂濃度を0.00、~6.54g/Lに調整したものを使用した。溶出試験の条件は、固液比を1:10とし、振とう速度を200rpm、振とう時間を6時間とした。振とう後、懸濁液のpHを測定し、孔径0.45μmのメンブランフィルターでろ過した。ろ液を溶出液とし、その中に含まれるCaイオン、Mgイオン濃度を測定した。本実験におけるイオン濃度の測定にはICP-AES(Optima 5300DV)を使用した。

4. 研究成果

(1) 石灰処理土の劣化に及ぼす塩分の影響

28日間養生した後、NaCl濃度を0、5、10、20、40g/Lに調整した人工海水に14、28、42、168日間浸漬させた供試体の貫入抵抗 F と貫入深さ d の関係を図-1に示す。NaCl濃度0g/Lの場合、浸漬時間が42日以前の供試体の $F-d$ 関係はほぼ一致しており、42日程度の真水浸漬では軟化しないと考えられる。しかし、168日間浸漬させた供試体は、貫入抵抗が増加し始める貫入深さが42日以前のものよりも深く、供試体表層部の軟化がみられた。NaCl濃度5、10、20、40g/Lの人工海水に浸漬させた場合、浸漬時間の増加に伴い、貫入抵抗が増加し始める深さは浸漬前のものより深くなる。また、同じ浸漬時間において、浸漬する人工海水中のNaCl濃度が高いもの程、貫入抵抗が増加し始める深さが深いことがわかる。

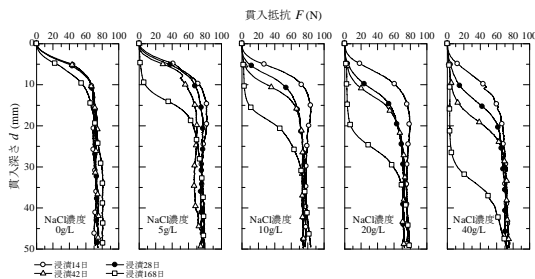


図-1 貫入抵抗の深度分布

図-1で示したように、人工海水に浸漬した供試体の $F-d$ 関係は浸漬時間とともに、下方へ移動するような挙動を示す。ここで、供試体表層部から貫入抵抗が著しく低下してい

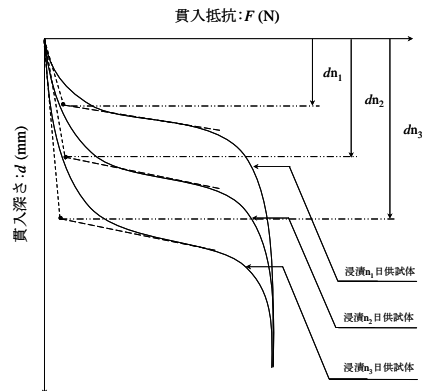


図-2 劣化深度の定義

る領域を劣化深度とし、図-2に示す方法で定義する。軟化がみられる供試体の $F-d$ 関係では、貫入抵抗の発現がほとんどみられない範囲と、貫入抵抗が急激に増加する範囲が観察される。前者と後者の部分をそれぞれ直線近似し、それら2直線の交点を劣化深度 d_n と定義する。添え字の n は浸漬時間(日数)を意味する。

28日養生供試体の劣化深度と浸漬時間の関係を図-3に示す。NaCl濃度0、5、10、20、40g/Lの人工海水に168日間浸漬させた場合、劣化深度はそれぞれ $d_{168}=2.9、10.7、15.0、21.1、28.9$ mmとなり、劣化深度は海水濃度が高いときほど深くなることわかる。

通常、NaCl濃度30~35g/Lを示す海洋の海水に比べて、閉鎖湾海である有明海の海水の濃度は薄い(NaCl濃度:20g/L程度)。その薄い海水環境においてさえ約半年足らずで、劣化深度が約20mmに達しており、劣化速度は既往の研究で報告されているCaの溶脱劣化に比べて極めて大きい。

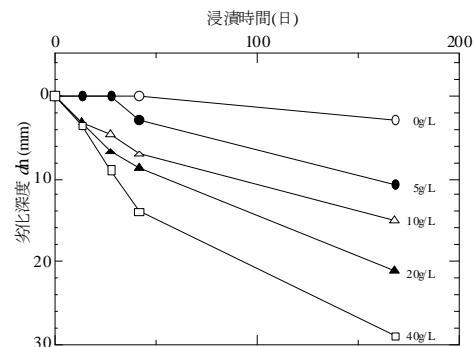


図-3 劣化深度と浸漬時間の関係

NaCl濃度0、5、10、20、40g/Lの人工海水に42日間浸漬させた供試体の含水比の深度分布を図-4に示す。供試体の含水比は深さ方向に若干低くなる傾向がある。また、図には生石灰の消化・発熱反応について化学反応式から求めた計算値を記している。NaCl濃度0g/Lの場合、ブリーディングの影響が大きいと考えられる供試体表層部の含水比は、計算

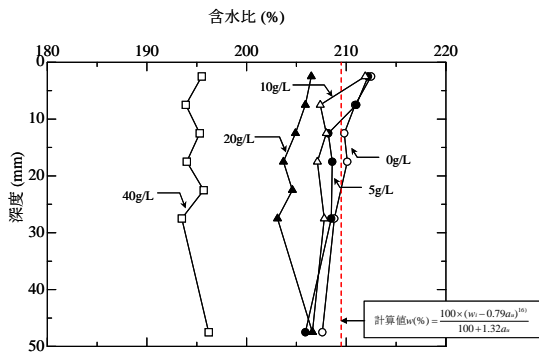


図-4 含水比の深度分布

値よりも7%程度高い値を示したが、深部では計算値に近い値を示した。NaCl濃度5～40g/Lの場合、供試体の含水比は計算値よりも低い値を示した。NaCl濃度0, 5, 10, 20, 40g/Lの人工海水に浸漬させた供試体表層部の含水比は浸漬する人工海水の濃度が高いときほど低い傾向がみられる。

この結果より海水の影響により、石灰処理土の含水比が低下することが明らかになった。海水に浸漬させた石灰処理土の含水比が低下した原因は、海水中のNaClによって、新たな反応物質が生成されたため、それらに含まれる結晶水が110℃では蒸発しなかったためと考えられる。そして、浸漬水の海水濃度が高い供試体ほど含水比の低下量は大きいことから、石灰処理土の軟化は、必ずしも試料土の高含水比化によって引き起こされるものではないことが示された。

NaCl濃度0g/Lおよび20g/Lの人工海水に浸漬させた供試体の劣化深度と、元素濃度分布を併記した図をそれぞれ、図-5、図-6に示す。NaCl濃度0g/Lの場合、浸漬時間168日において劣化がみられる。Ca濃度は浸漬時間42日の供試体において低下がみられ、浸漬168日供試体ではその範囲が大きくなっている。0g/Lの場合でも、表層部で若干の劣化の進行が確認された。Mg濃度は浸漬時間による変化はほとんどみられなかった。Na濃度は表層部において1wt%程度を示した。供試体深部では1～2wt%の値を示し、深さ方向に若干高くなる傾向がみられたが、浸漬時間との明確な関連性はみられなかった。NaCl濃度20g/Lの場合、浸漬時間とともに劣化深度が深くなっていることが確認できる。Ca濃度は劣化深度以浅では10wt%以下の値を示した。特に、浸漬時間が最も長い浸漬168日供試体における劣化深度以浅のCa濃度は5wt%付近であり、著しいCa濃度の低下がみられる。他方、Mg濃度は劣化深度以浅では浸漬時間にかかわらず5～6wt%まで増加した。また、劣化深度以深においてもCa濃度の低下、Mg濃度の増加がみられた。

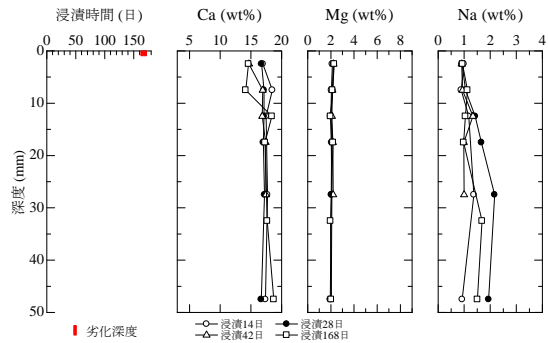


図-5 供試体の状態評価と元素濃度分布 (28日養生, NaCl濃度: 0 g/L)

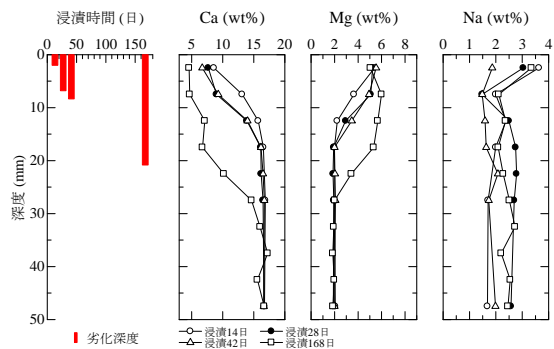


図-6 供試体の状態評価と元素濃度分布 (28日養生, NaCl濃度: 20 g/L)

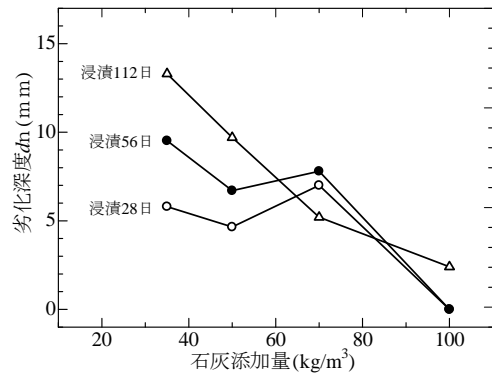


図-6 石灰添加量と劣化深度の関係

(2) 劣化に及ぼす石灰添加量の影響

図-6には石灰添加量と劣化深度の関係を示す。浸漬時間が同じものでは、石灰添加量が多いものほど劣化深度は小さくなる傾向がある。また、石灰添加量100kg/m³の供試体においては、浸漬時間56日以下の供試体では劣化深度はゼロであるが、浸漬時間112日の供試体では2mm程度の劣化がみられた。このことより、石灰添加量は劣化速度に影響を及ぼすことがわかる。

(3) Ca溶出に及ぼす塩分の影響

人工海水の濃度とpHおよびCaイオン溶出

量の関係を図-7に示す。海水濃度が高くなると pH は低下する。pH の低下の程度は固化材添加量が少ないものほど大きいことがわかる。人工海水の濃度が高くなると Ca イオン溶出量は多くなる。35~70kg/m³の範囲では固化材の添加量を変化させても Ca イオン溶出量に大きな差異はみられない。NaCl 溶液における NaCl 濃度と pH および Ca イオン溶出量の関係を図-8 に示す。NaCl 濃度が高くなると pH は若干低下し、Ca イオン溶出量は多くなる傾向がみられる。35~70kg/m³の範囲では固化材の添加量を変化させても Ca イオン溶出量に大きな差異はみられない。MgCl₂ 溶液における MgCl₂ 濃度と pH および Ca イオン溶出量の関係を図-9 に示す。MgCl₂ 濃度が高くなると pH は低下する。人工海水を使用した場合と同様に、pH の低下の程度は固化材添加量が少ないものほど大きいことがわかる。また、MgCl₂ 濃度が高くなると Ca イオン溶出量は多くなる。

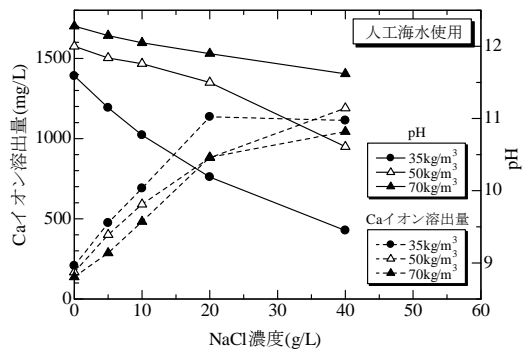


図-7 NaCl 濃度と pH, Ca イオン溶出量の関係 (人工海水)

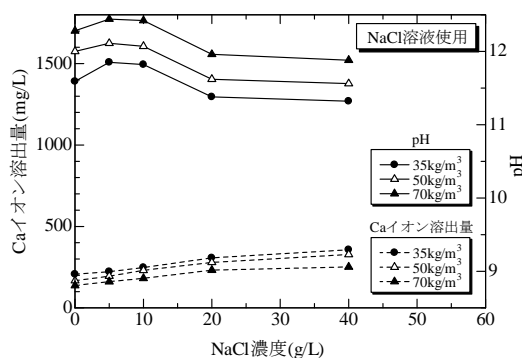


図-8 NaCl 濃度と pH, Ca イオン溶出量の関係 (NaCl 溶液)

図-7, 9 に示したように人工海水, MgCl₂ 溶液の場合, 図-8 の NaCl 溶液の場合に比べて、pH の低下量および Ca イオン溶出量が多い。人工海水と MgCl₂ 溶液を使用した溶出試験における、振とう前の溶液と振とう後の溶出液に含まれる Mg イオン濃度を表-3 に示す。振とう後の溶液中の Mg イオン濃度は、固化材の添加量にかかわらず、ゼロもしくは振と

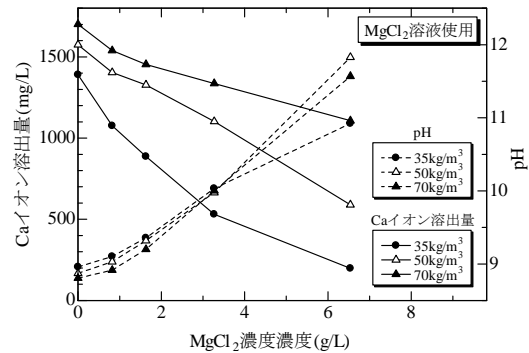


図-9 MgCl₂ 濃度と pH, Ca イオン溶出量の関係 (MgCl₂ 溶液)

表-3 Mg イオン濃度の分析結果

溶液名	溶液濃度 (g/L)	振とう前の溶液 (mg/L)	振とう後の溶液 (mg/L)		
			35kg/m ³	50kg/m ³	70kg/m ³
人工海水	0	0.0	0.0	0.2	0.4
	5	149.4	0.0	0.0	0.0
	10	298.7	0.6	0.0	0.0
	20	597.5	5.2	0.0	0.0
	40	1195.0	120.1	0.7	0.0
MgCl ₂	0.00	0.0	0.0	0.2	0.4
	0.82	208.6	0.0	0.0	0.0
	1.63	417.2	0.0	0.0	0.0
	3.27	834.4	4.4	0.0	0.0
	6.54	1668.8	97.3	2.0	0.0

う前に比べて極めて小さい値を示した。この結果は、石灰処理土中の劣化部分で Mg が検出されたこと (図-6) と定性的に整合するとともに、Ca イオン溶出に Mg イオンが大きく関与していることを示唆するものである。

(3) 感潮河川水の浸透を受ける石灰処理土の劣化機構

以上の一連の実験により、石灰処理土の劣化は次のようにして起こると考えられる。石灰処理土の劣化は、感潮河川水との接触面から処理土内部に向かって徐々に進行する。劣化の進行はまず化学的な劣化、すなわち固化成分である Ca の溶脱が先行して起こり、そして、Ca の溶脱量がある量をこえると、今度は力学的な劣化、すなわち強度低下が生じる。

石灰処理土の固化成分である Ca の溶脱は次のようにして起こると考えられる。まず、海水中の Mg イオンが石灰処理土供試体内部に移動する。次に、供試体内部の pH は非常に高いため、Mg イオンは水酸化マグネシウム等の不溶性の物質となって、供試体内部の pH を低下させる。その結果、低 pH 条件下において溶解度が高い Ca の溶出が促される。したがって、Mg イオンが供給される環境でこのサイクルが繰り返されて、接触面から内部に向かって徐々に Ca が溶脱がされていくものと考えられる。

本研究以外に感潮河川水の浸透に石灰処理土の性質変化に関する報告は極めて少なく、それらほとんどは NaCl 溶液を使用して

研究されており，“真の海水”を用いた研究は他に例を見ない。本研究では、石灰処理土は塩分を含む感潮河川水の接触・浸透によって劣化すること、さらには塩分中に 15%程度しか含まれていない Mg が固化処理土の劣化の支配的な物質であることを明らかにした。本研究で得られた成果は、現在、感潮河川流域で約 20 年前に構築された石灰処理地盤が泥寧化している原因を説明できる一つの重要な知見であるとともに、今後、同地域で必要となる固化処理地盤の耐久性評価等のメンテナンス技術の開発に大きく貢献できるものであると考える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① 原弘行, 林 重徳, 末次大輔, 水城正博 : 海水環境下における石灰処理土の性状変化に関する基礎的検討, 土木学会論文集 C, 査読有, Vol. 66, 2010, 21-33
- ② H. Hara, D. Suetsugu, S. Hayashi, Characteristics of the lime-treated soil immersed in seawater, 査読有, Proc. of International Lowland Technology, 2008, 289-292
- ③ 原 弘行, 末次大輔, 林 重徳, 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, 地盤改良シンポジウム論文集, 査読有, 2008, 65-70

[学会発表] (計 7 件)

- ① 原 弘行, 海水に浸漬したセメント処理土の物性変化, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 熊本市
- ② 水城正博, 海水に浸漬させ軟化した固化処理土の圧密特性について, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 熊本市
- ③ 中村遼太郎, 海水環境下における石灰処理土の含水比の変化, 平成 21 年度土木学会西部支部研究発表会, 2010 年 3 月 6 日, 崇城大学, 熊本市
- ④ 水城正博, 海水に浸漬した石灰処理土の力学特性に及ぼす石灰添加量と含水比の影響第 44 回地盤工学研究発表会, 2009 年 8 月 20 日, 横浜市
- ⑤ 原 弘行, 石灰処理土のカルシウム溶出特性に及ぼす海水中の塩分の影響, 第 44 回地盤工学研究発表会, 2009 年 8 月 20 日, 横浜市
- ⑥ 原 弘行, 海水浸漬下における石灰処理土の Ca 溶出特性に及ぼす塩分の影響, 平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会,

2009 年 3 月 7 日, 福岡市

- ⑦ 水城正博, 海水に浸漬させた石灰処理土の劣化に及ぼす石灰添加量の影響, 平成 20 年度土木学会西部支部研究発表会, 2009 年 3 月 7 日, 福岡市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

末次 大輔 (SUETSUGU DAISUKE)

佐賀大学・低平地研究センター・准教授

研究者番号 : 3 0 4 2 3 6 1 9