

新設永久基礎構造物に用いられた浸透固化工法による補強地盤の長期安定性に関する 実験的研究

Experimental study on long term stability of reinforced soil by infiltration grouting used for new permanent foundation structure

大原一哲¹, 井谷優介², 大根瑛志¹, 岩井裕正¹, 張鋒¹

1 名古屋工業大学・大学院・工学研究科・社会工学専攻・E-mail: cho.ho@nitech.ac.jp

2 JR 東日本コンサルタンツ㈱

概 要

わが国に広く分布する花崗岩は、構造物の基礎地盤としてよく用いられる一方で風化を受けやすい。地盤改良工法の一つである浸透固化工法は、従来仮設構造物に多く利用されているが、永久構造物に利用されるケースが少なく、長期安定性に関する定量的な評価はまだ十分ではない。そこで本研究では、深層風化を受けた地盤におけるセメント系固化材を用いた浸透固化工法による改良地盤の長期安定性を把握することを目的として、化学的風化の要因である酸の強さ、および周辺環境における地熱の影響に着目し、異なる pH と温度条件下で水中曝露したセメント改良土の力学特性を一軸圧縮試験により調べた。また、強度変化の原因を考察するため、水中曝露前後の供試体片から採取した試料の含有元素を蛍光 X 線分析により調べた。

キーワード：深層風化，地盤改良，セメント安定処理

1. はじめに

花崗岩は日本の国土の約 13%にあたる 49300 km²の面積を占めており、地域的にも花崗岩類が分布しないところがあるほとんどない。新鮮な花崗岩は硬く、石材として切り出されて墓や石垣に用いられるほか、基礎地盤としてよく用いられる。

ところが花崗岩は風化を受けやすく、ひとたび風化を受けるともろくなる。花崗岩は熱膨張率などの物理的性質の異なる造岩鉱物によって形成されていること、緻密さに欠ける構造を持つことから粒子間の結合が弱く、割れ目が発達しやすい。その割れ目に大気中の二酸化炭素や地中の腐食酸により酸性化された地下水が浸透することで化学的風化が進む。花崗岩の造岩鉱物である長石や雲母は化学的風化作用により粘土鉱物に変化し、粘土化した部分が崩れやすくなる。花崗岩の風化は地表付近のみならず、深さ 20～30m まで風化が見られたという例が多くあり、神戸の六甲山で数百メートルまで風化していた例もある²⁾。このように地下深くまで風化が進行する深層風化の原因とその過程についてはまだ分からない点が多く残されているが、たとえば北川³⁾は熱水変質作用先行説を唱えている。これは地下深部において花崗岩が形成されて間もない時期に、広域応力場の影響で生じた割れ目に熱水が侵入する

ことで変質を受けるというものである。すなわち、地表や地表付近での風化作用を受ける以前に既に花崗岩の破壊や変質が進んでいることを示している。

基礎地盤と考えていた花崗岩が深層風化を受けていた場合、変形剛性の不足により基礎構造物に沈下が生じうる。そのような軟弱地盤に対する地盤改良の工法の一つとしてセメント系固化材を用いた浸透固化工法がある。浸透固化工法による地盤改良は工期が短縮され、コストを抑えることが可能であるという利点がある一方、仮設構造物に利用されることがほとんどであり、長期安定性に関する定量的な評価はまだ十分ではない。セメント改良土の長期安定性に関する研究成果は限られており、セメント協会が行った調査により改良土の長期安定性が確保されたという報告⁴⁾はあるものの、曝露条件によっては改良土表面から劣化が進むという報告⁵⁾もある。そのため、長期にわたって運用が見込まれる新設永久基礎構造物の長期安定性を把握するためにも、様々な曝露環境下における劣化の進行状況などに関するデータの備蓄が強く望まれる。

そのような背景のもと、深層風化が著しく見られる地質条件下において、セメント改良地盤の長期安定性を把握することを本研究の目的とする。化学的風化の要因である酸の強さ、および周辺環境における地熱の影響に着目し、それらがセメント改良土の力学特性に及ぼす影響を検討し

ていく。そのために、pH と温度の異なる条件下でセメント改良土を水中曝露し、改良土の強度変化を一軸圧縮試験により調べた。さらには改良土内の化学成分変化にも着目し、蛍光 X 線分析を実施することにより曝露前後での改良土に含まれる元素濃度の変化の把握に努めた。

2. 試験概要

2.1 試験試料概要

本試験の試験試料として、花崗岩が風化することにより生成されるマサ土を用いる。マサ土の物理特性を求めするために含水比試験、土粒子密度試験、およびふるい分け試験を行った。物理試験結果を表 1 に、マサ土の粒度分布を図 1 に示す。

使用するマサ土は供試体の成形をやすくするため、また試験結果のばらつきを小さくするために 2mm ふるいにかけて粒径 2mm 以下とした。固化材として使用するセメントについては、一般に広く使用されており、かつ普通ポルトランドセメントと比べて六価クロム溶出の懸念が少ないことから高炉セメント B 種を採用した。

まず、改良土の含水比を決定するためにブリーディング試験を実施した。初期含水比のマサ土 400g に対する加水量を変えてモールドに詰め、湿潤環境下で 24 時間経過した後のブリーディングの様子から最適含水比を求めた。マサ土 400g に対する加水量 45g, 50g, 55g とした試料の 24 時間経過後の様子を図 2 に示す。その結果、全体に水が行き渡っており、かつブリーディングが生じていない加水量 50g を採用し、このときの含水比 $w = 21.8\%$ となるようにマサ土と水を配合することとした。

次にセメントの添加率を決定するために配合試験を実施した。マサ土の乾燥重量に対する高炉セメント B 種の添加率を 3%, 4%, 5% と変えて供試体を作製し、7 日間の気中モールド養生を経て一軸圧縮試験により一軸圧縮強さを調べた。供試体の 7 日強度が 600kPa を得るかどうか、同一ケースでのばらつきの大きさを踏まえてセメント添加率を決めた。なお、セメントが完全水和するために必要な理論水量としてセメント 100g あたり水 42.4g⁶⁾ を、ブリーディング試験により求めた水量に加えて配合した。各添加率の供試体の配合および一軸圧縮試験結果を図 3, 表 2 に示す。セメント添加率 5% の供試体において目標とした一軸圧縮強さ 600kPa を上回り、ばらつきが他の添加率に比べて小さかったことから、本試験のセメント添加率を 5% と決定した。なお、添加率 5% の一軸圧縮試験後の供試体断片を用い、六価クロム溶出試験を実施した。その結果、検出された六価クロムは土壤環境基準値である 0.05mg/L を下回る 0.01mg/L であることが確認された。よって、この配合により作成したセメント改良土を曝露した溶液の処理する際、重金属による周辺環境への影響は極めて小さいと言える。

表 1 マサ土の物理特性

初期含水比 w_0 (%)	8.24
土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.641

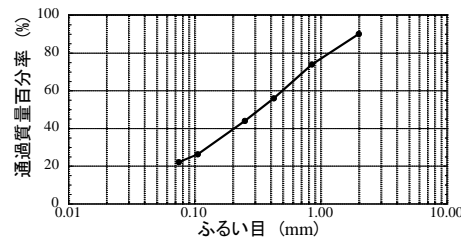


図 1 マサ土の粒度分布

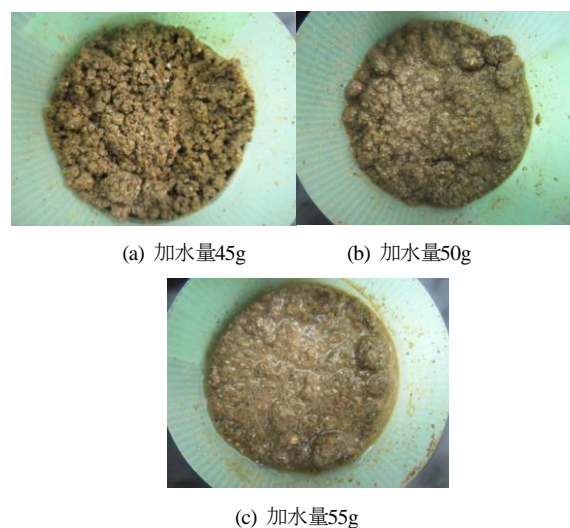


図 2 ブリーディングの様子 (24時間経過後)

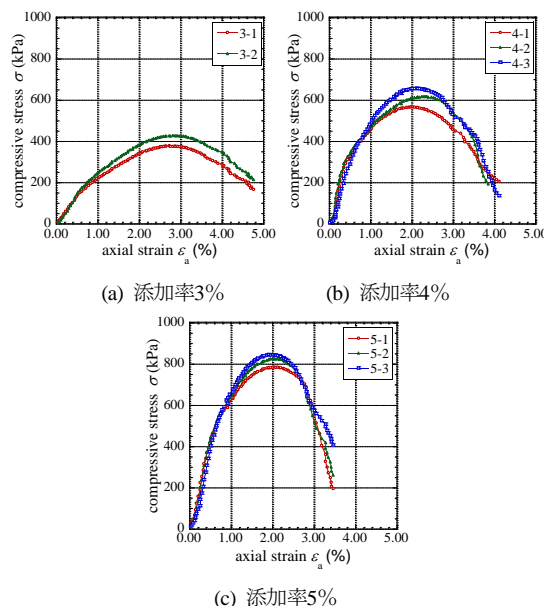


図 3 配合試験における一軸圧縮試験結果

表 2 配合試験結果

添加率 (%)	含水比 w (%)	養生方法	平均一軸圧縮強さ q_u (kPa)
3	19.5	気中モールド養生 7 日間	404
4	19.6		615
5	19.9		820

2.2 水中曝露概要

本試験では気中モールド養生を 21 日間行ったセメント改良土供試体を、pH と水温の異なる条件下で 7 日間水中曝露を実施する。pH は 5, 7 の 2 ケース、水温は 20°C, 50°C の 2 ケースの合計 4 ケースを実施した。曝露中、セメント中の強アルカリの流出による pH の変動を抑えるため、曝露溶液をバッファーにした。使用するバッファーを選定する際には以下の 3 点を考慮した。

- ① 酸の電離定数 pK_a が安定させたい pH 値付近であること。
- ② pK_a の温度依存性が小さく、温度を上昇させても pH 値がほとんど変わらないこと。
- ③ 試験機への酸の影響が小さいこと

pH5 のバッファーでは、 pK_a 値が 4.76 であり、温度が上昇しても pK_a 値がほぼ変わらず、弱酸であり金属などへの影響が小さい、という理由から酢酸と酢酸ナトリウムの混合溶液である酢酸バッファーを適用した。酢酸バッファー中の酢酸と酢酸ナトリウムの濃度および配合比を決定するために、濃度と配合比の異なるバッファーが入ったビーカーそれぞれにセメント改良土供試体を入れ、pH 変動を調べた。その結果、酢酸のモル濃度が 0.3mol/L、酢酸と酢酸ナトリウムの物質質量比が 1:1 のとき、7 日間経過しても pH の変動が 0.2 以内と十分な緩衝作用があったため、この配合で水中曝露試験を実施することとした。

pH7 のバッファーでは pK_a 値が 7.12 であり、温度依存性や金属への影響が小さいことからリン酸二水素カリウムを含むリン酸塩緩衝液を用いることとした。バッファーの配合を pH5 のときと同様にして決定したところ、リン酸塩緩衝液の原液 (0.25mol/L) を用いても 7 日後の pH が 8.0 となり、十分な緩衝作用が得られなかった。そこで、リン酸塩緩衝液原液に酢酸を加えて緩衝作用をさらに高めることにした。その結果、リン酸塩緩衝液原液 50mL に対して 0.1mol/L 酢酸 20mL の割合で配合したとき、7 日間経過した後も pH が 7.0 のままであったため、この配合で水中曝露試験を実施することとした。

また、水温を一定に保つために図 4 に示すように恒温槽に水を張ってポリプロピレン製の球体を浮かべ、その中に脱気水槽を入れた。溶液を供試体内部にまで十分浸透させるため、脱気水槽内に -0.07MP の負圧を与えた。



図 4 脱気水槽と恒温槽

3. 試験条件

3.1 一軸圧縮試験

図 5 に使用した一軸圧縮試験機を、表 3 に一軸圧縮試験の試験条件を示す。バッチごとに異なる水中曝露条件で水中曝露を実施した。さらに、7 日間ごとに一軸圧縮試験により気中モールド養生のみでの強度を調べるための供試体も作製した。このことにより、水中曝露の影響を受けないセメント改良土供試体自体の養生日数と強度増加との関係を知り、その強度の増え方をベースとして水中曝露による強度への影響を評価していく。



図 5 一軸圧縮試験機

表 3 一軸圧縮試験の試験条件

Batch 名	供試体名	気中モールド養生 (day)	水中曝露 (day)	pH	温度 (°C)
Batch A	A1	7	/	/	/
	A2	14			
	A3	21			
	A4	28			
	pH5,temp.20	21			
Batch B	B1	7	/	/	/
	B2	14			
	B3	21			
	B4	28			
	pH7,temp.20	21			
Batch C	C1	7	/	/	/
	C2	14			
	C3	21			
	C4	28			
	pH5,temp.50	21			
Batch D	D1	7	/	/	/
	D2	14			
	D3	21			
	D4	28			
	pH7,temp.50	21			

3.2 蛍光 X 線分析

図 6 に使用した顕微蛍光 X 線分析装置を、表 4 に蛍光 X 線分析を行った試料を示す。水中曝露直前、供試体を成形する際に生じた断片を曝露前の試料とした。また、水中曝露後に一軸圧縮試験に用いた供試体を曝露後の試料とし、図 7 に示すように供試体の表面付近と内部部分の 2 か所からそれぞれ試料を採取した。これらの採取位置から得られた試料を削り、粉末状にしてマイクロプレートに詰めてから分析を行った。粉末状の試料のために誤差が大きく表れる懸念があることから、各試料につき測定点を 10 点取り、その平均をとることで構成元素の濃度を評価した。

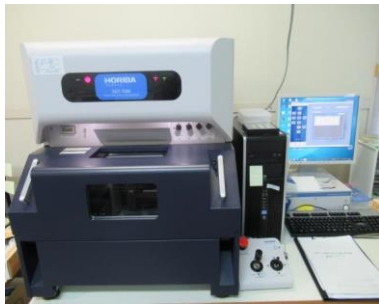


図 6 顕微蛍光 X 線分析装置とその周辺機器

表 4 蛍光 X 線分析を行う試料

Batch 名	供試体名	採取位置	試料名
Batch A	pH5,temp.20-1	曝露前	A ₀
		曝露後 表面	A _{out}
		曝露後 内部	A _{in}
Batch B	pH7,temp.20-1	曝露前	B ₀
		曝露後 表面	B _{out}
		曝露後 内部	B _{in}
Batch C	pH5,temp.50-1	曝露前	C ₀
		曝露後 表面	C _{out}
		曝露後 内部	C _{in}
Batch D	pH7,temp.50-1	曝露前	D ₀
		曝露後 表面	D _{out}
		曝露後 内部	D _{in}

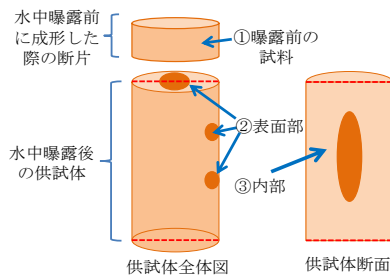


図 7 蛍光 X 線分析試料採取位置

4. 試験結果・考察

4.1 一軸圧縮試験

図 8 に曝露条件ごとの供試体の一軸圧縮強さを示す。まず、気中モールド養生のみによる供試体の強度について着目する。基本的にはどのバッチにおいても養生日数が経つにつれて強度が増加していた。一般に、7 日強度から 28 日強度への伸び率は 1.2~1.7 倍とされている⁷⁾が、どのバッチもその伸び率が 1.3~1.5 倍となっており、妥当な結果であると言える。バッチごとで強度のばらつきが見られるが、この原因として含水比の影響が考えられる。図 9 をみると、含水比が小さくなるほど一軸圧縮強さが大きくなる傾向にあることがわかる。これはセメント改良土の強度増加の要因であるセメントの水和反応に水が使われたため、強度の増加とともに含水比が低下したことを示している。

20℃での水中曝露に着目すると、pH5 の水中曝露を 7 日間受けた Batch A の供試体の強度は気中モールド養生 21 日強度よりも大幅に低下しており、7 日強度よりも下回っていた。これはセメント改良土の強度増進に寄与しているセメント水和物の金属イオンが、曝露溶液中の酸の影響に

より溶脱したことが原因として考えられる。一方で pH7 の水中曝露を受けた Batch B の供試体では、気中モールド養生 21 日強度からの強度変化がほぼ見られなかった。曝露溶液が中性であったため酸の影響がなく、セメント水和物の金属イオンが溶脱せずに強度が保たれたと考えられる。

次に 50℃の水中曝露に着目すると、Batch C が pH5 での水中曝露であるにもかかわらず、曝露後の強度が気中モールド養生 28 日強度よりも大きくなることが確認された。酸による金属イオンの溶脱はあるものの、水温が高いためセメントの水和反応が速く進み⁸⁾、強度が増進したのではないかと考えられる。pH7 の水中曝露を実施した Batch D でも同様に、水中曝露の影響を受けた供試体の強度が気中モールド養生のみの供試体強度を上回った。

以上より、本研究における 7 日間の水中曝露によるセメント改良土の強度変化についてまとめると、常温時には酸の影響が顕著に表れて強度低下をもたらすが、高温下での水中曝露では酸の影響はあるものの、それより温度の影響が大きいことから、強度増加に繋がったと言える。

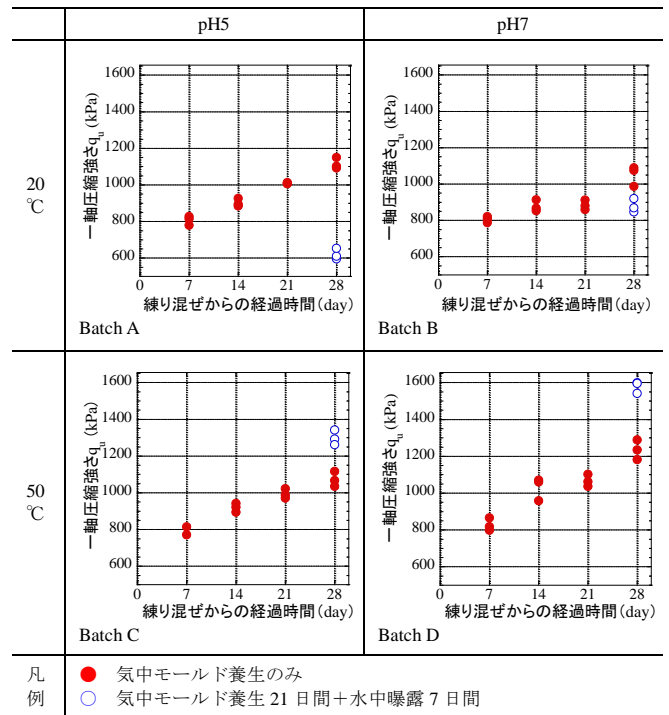


図 8 曝露条件ごとの一軸圧縮強さ

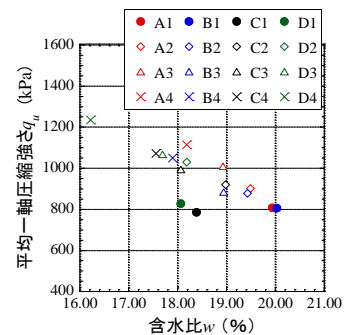


図 9 平均含水比と平均一軸圧縮強さの関係 (気中モールド養生のみ)

4.2 蛍光 X 線分析

蛍光 X 線分析によって得られた、各試料の構成元素ごとの含有濃度を図 10 から図 14 に示す。マサ土の中の主要元素である Si, Al, および高炉セメント B 種に多く含まれている Ca や Fe がセメント改良土の構成元素割合の大部分を縮めていることがわかる。

セメント改良土の強度増進に大きく寄与している Ca の濃度変化に着目する。pH5 の水中曝露を行った Batch A では、曝露後の供試体表面から採取した試料の Ca 濃度が曝露前よりも大きく低下していた。一方で、供試体内部から採取した試料では曝露前後での濃度変化は見られなかった。これは供試体表面付近のセメント水和物に含まれる Ca が酸の影響により溶脱を受けたことを示しており、一軸圧縮強さの大幅な低下を裏付けている。Batch C においても、Ca 濃度変化に関しては Batch A と同様の結果が得られたが、強度は逆に増加している。曝露溶液の酸の影響により Ca は溶脱したが、温度条件が 50℃であるためにセメント水和反応が加速されて強度が増加したと言える。pH7 の曝露条件で水中曝露を行った Batch B および Batch D では Ca の濃度低下が pH5 の条件に比べると小さく、酸の影響がない分、Ca の溶脱量も少なくなった。

Si, Al は水中曝露前後での濃度に変化は見られなかった。K においては pH5 では曝露前後での濃度変化はなかったが pH7 ではいずれの温度条件下でも曝露後の濃度が増加していた。これは、pH7 のバッファーに用いたリン酸塩緩衝液の主成分として KH_2PO_4 が含まれているため、この K^+ が供試体に浸透したことにより曝露後の濃度が上昇したと考えられる。

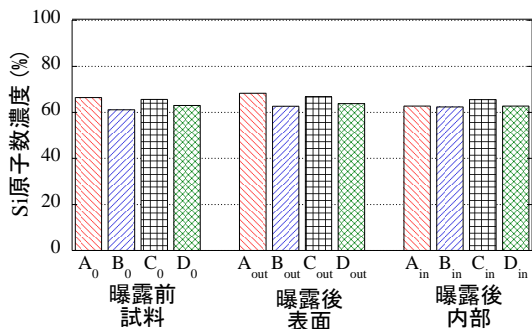


図 10 各試料における Si の平均原子濃度

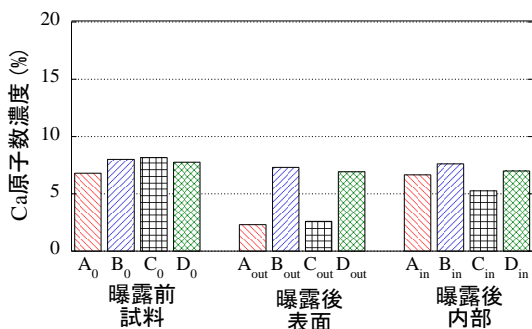


図 11 各試料における Ca の平均原子濃度

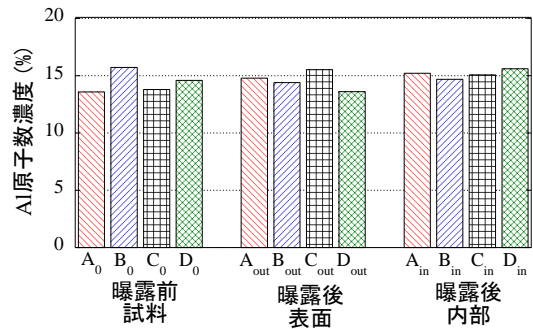


図 12 各試料における Al の平均原子濃度

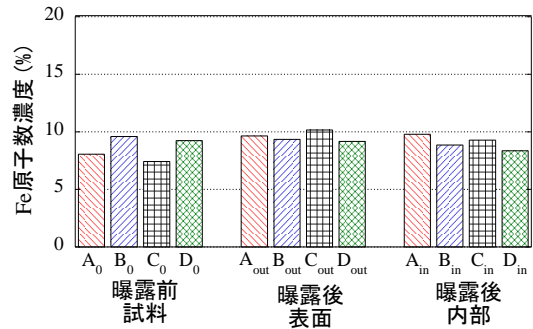


図 13 各試料における Fe の平均原子濃度

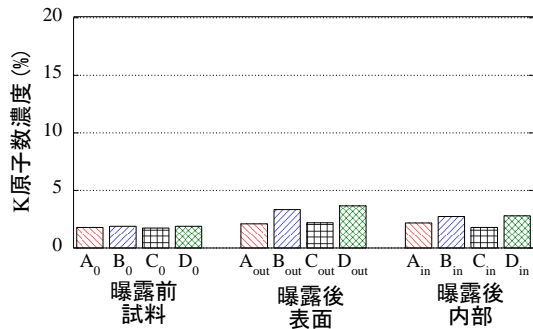


図 14 各試料における K の平均原子濃度

5. まとめ

本試験ではセメント改良土を pH と温度の異なる条件下で 7 日間水中曝露し、一軸圧縮試験と蛍光 X 線分析を実施することで、水中曝露による力学特性的変化や含有成分割合への影響を調べた。以下に得られた知見、および今後の展望をまとめる。

- ① バッファーを用いることで pH が一定の状態にセメント改良土を水中曝露することが可能となった。pH5 では酢酸と酢酸ナトリウム、pH7 ではリン酸塩緩衝液と酢酸をそれぞれ配合してバッファーを作成した。
- ② 常温である 20℃での 7 日間の水中曝露においては溶液の pH がセメント改良土の力学強度変化に大きく影響した。
- ③ 一方で、50℃の温度条件下での 7 日間水中曝露では pH の影響以上に水温が強度変化に大きく影響する結果となった。
- ④ 蛍光 X 線分析により水中曝露前後での供試体の元素濃度変化を調べた結果、曝露溶液の pH が低下すると Ca の溶脱が顕著となり、セメント改良土の強度変化

に大きく寄与することが確認された。

- ⑤ 今後はさらに酸の影響を大きくした pH3 の条件での水中曝露や、曝露期間をより長くした水中曝露を実施して、セメント改良土の力学特性への影響のデータを備蓄していく。最終的には得られたデータを用い、長期安定性の評価を目的とした解析に繋げていく。

謝辞

本研究では平成 29 年度公益信託 NEXCO 関係会社高速道路防災対策等に関する支援基金を戴いております。また、六価クロム溶出試験を委託実施して下さった株式会社環境保全コンサルタント様、研究内容に関する助言をして下さった名古屋工業大学増田理子教授、同大学吉田亮准教授に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 高橋彦治: 土木技術者のための地質学, 鹿島出版会, pp.109, 1976.
- 2) 土質工学会: 土のはなしⅡ, 技報社出版, pp.60-69, 1992.
- 3) 北川隆司: 花崗岩のマサ化のメカニズムと斜面崩壊, 粘土科学第39巻, 第1号, 日本粘土学会, 1999.
- 4) セメント協会 セメント系固化材技術専門委員会: セメント系固化材を用いた改良体の長期安定性に関する研究, 一材齢22年試験結果報告一, セメント・コンクリート, No.804, 2014.
- 5) 中村健・北詰昌樹: セメント安定処理土の耐久性に関する室内試験, 港湾空港技術研究所資料, 2006.
- 6) 藤井欽二郎: 結合水の状態と性質, セメント・コンクリート, No.469, pp.2-9, 1986.
- 7) 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3版, p38, 2003.
- 8) 山田順治・有泉昌: わかりやすいセメントとコンクリートの知識, 鹿島出版社, pp.60, 1982.