

令和2年4月10日

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
受託者 三菱UFJ信託銀行株式会社 御中

研究概要書

研究課題：高速道路の「新設永久基礎構造物支持地盤の浸透固化工法による変形剛性の補強効果とその長期安定性」に関する研究

研究代表者：名古屋工業大学工学部 教授 張 鋒

共同研究者：名古屋工業大学工学部 助教 岩井裕正

1. 研究の背景と目的

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注入工法は仮設構造物に多く利用されているが、長期安定性に関する定量的な評価はまだ十分ではない。本研究では、2017、2018年度の研究に続き、深層風化を受けた地盤において、セメント系固化材を用いた浸透注入工法による改良地盤の長期安定性を把握するため、さらに検討ケースを増やして、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や含有元素濃度への影響を力学試験および蛍光X線分析により調べた。さらに試験結果を踏まえて、温度・酸の影響を統一的に考慮する熱弾粘塑性構成式を提案し、要素シミュレーションによりその妥当性を評価した。

2. 試験概要

2.1 試験試料概要

本試験で用いるマサ土の物理特性を表1および図1に示す。固化材である高炉セメントB種と水をマサ土と練り混ぜ、恒温湿潤環境下で21日間の気中モールド養生を経た後、H10cm×φ5cmに成型することで供試体を作製する。含水比は24時間後のブリーディングの様子を踏まえ、27.1%とした。セメント添加率は、ばらつきの大きさと目標とする強度600kPaを得られているかどうかを踏まえて5%と決定した。

表1 マサ土の物理特性

最適含水比 W_{opt} [%]	14.7
土粒子密度 ρ_s [g/cm ³]	2.641

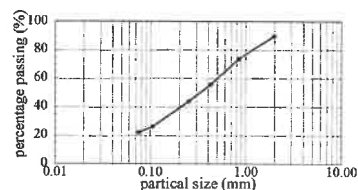


図1 マサ土の粒度分布

2.2 水中曝露概要

本試験でセメント改良土供試体を、pH、温度、曝露期間を変えて水中曝露を実施する。水中曝露中のpHの変動を抑えるため、曝露溶液をバッファにした。表2に水中曝露条件を示す。図2に示すように水温を一定に保つために、水を張った恒温槽の中に脱気水槽を入れた。



図2 脱気水槽と恒温槽



図3 高温中容量三軸試験機

表2 水中曝露条件

pH	曝露溶液の成分	水温	水中曝露期間
4	酢酸 (0.3mol/L) と酢酸ナトリウムを3:1で配合	20℃	一軸圧縮試験：1週間、3週間
5	酢酸 (0.3mol/L) と酢酸ナトリウムを1:1で配合	および	
7	リン酸塩緩衝液 (0.25mol/L) と酢酸 (0.1mol/L) を5:2で配合	50℃	三軸圧縮・クリープ試験：1週間

表3 三軸圧縮・クリープ試験条件

pH	水温 [℃]	曝露期間	拘束圧 [MPa]	载荷速度	クリープ応力
4	20	1週間	0.1	三軸圧縮試験：0.1%/min	ピーク強度の90%
5	50		0.1、0.3	三軸クリープ試験：三軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線と一致するように载荷速度を設定（応力制御）	
7	20	1週間	0.1、0.3	三軸クリープ試験：三軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線と一致するように载荷速度を設定（応力制御）	
	50		0.1、0.3	三軸クリープ試験：三軸圧縮試験時の応力ひずみ曲線と一致するように载荷速度を設定（応力制御）	

3. 試験条件

3.1 力学载荷試験

表2の曝露条件下での水中曝露を経た後に一軸圧縮試験を実施し、曝露条件による力学特性の違いを調べた。また、図3に示すセル内の温度制御が可能な高温中容量三軸試験機を用いて、三軸圧縮試験および三軸クリープ試験も実施した。三軸圧縮・クリープ試験の試験条件を表3に示す。クリープ応力は三軸圧縮試験により得られたピーク強度の90%とした。

3.2 蛍光X線分析

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、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、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。

4. 試験結果

4.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験結果を図4に示す。20℃において、pH7では曝露後の一軸圧縮強さが曝露直前の21日強度と同程度だったが、pH4, 5ではいずれも21日強度を下回った。50℃では20℃に比べてセメントの水和反応が早く進むため、pH5では酸によるカルシウム溶脱の影響よりも強度増進の影響が卓越したことで水中曝露1週間での強度低下がみられず、一方のpH4では酸によるカルシウム溶脱の方が強度増進より影響が大きかったため、水中曝露1週間で強度が低下したと考えられる。

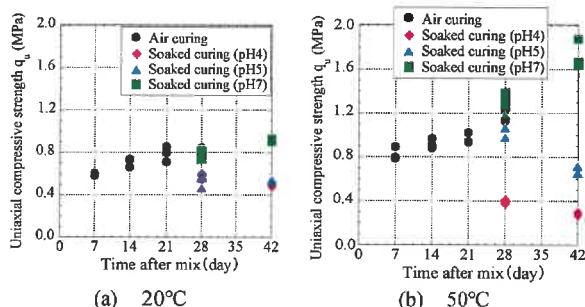


図4 練り混ぜからの日数と一軸圧縮強さの関係

4.2 三軸圧縮試験と要素シミュレーション

三軸圧縮試験結果を図5(左)に示す。拘束圧や温度に関わらず、pH値が小さくほどピーク強度も小さくなる。温度による影響に着目すると、ピーク強度はpH5, 7では20℃より50℃の方が大きくなる一方、pH4では温度が上昇してもピーク強度の増加はみられなかった。拘束圧の影響に着目すると、ピーク強度は拘束圧0.1MPaより0.3MPaの方が大きくなっており、より延性的な破壊挙動を示している。体積ひずみは、pHが小さくなるに従って圧縮側に大きく膨張量は小さくなり、その傾向は温度が高く拘束圧が大きくなるほど顕著である。

温度・酸の影響を考慮した熱弾粘塑性構成式を新たに提案するにあたり、まず三軸圧縮試験結果に基づき、限界応力比 M_c がカルシウム相対濃度 C 、温度 T 、および拘束圧 p の影響を受けることを踏まえ、それらを状態変数として式(1)のように定式化した。状態変数 C, T, p それぞれの係数 $\alpha_c, \beta_c, \gamma_c, \xi_c$ は、三軸圧縮試験結果を用いて最小二乗法により算出した。ここに、図には示していないが、pHと C 関係を同じ温度、同じ曝露期間で得られたデータをプロットし、その回帰線を引くといずれも相関の極めて高い結果となった。よって、 C を酸の影響を表す状態変数とした。

$$M_c = (\alpha_c C + \beta_c T + \gamma_c p) + \xi_c \quad (1)$$

この関係式を基に、構造・密度効果を考慮した軟岩の弾粘塑性構成式(1)を改良し、式(1)を構成式中に組み込むことで、構成式に含まれるすべての材料パラメータは一意的に決められることができた。図5(右)に新しい構成式を用いた解析結果を示す。定量的に実験結果を再現していることが見て取れる。

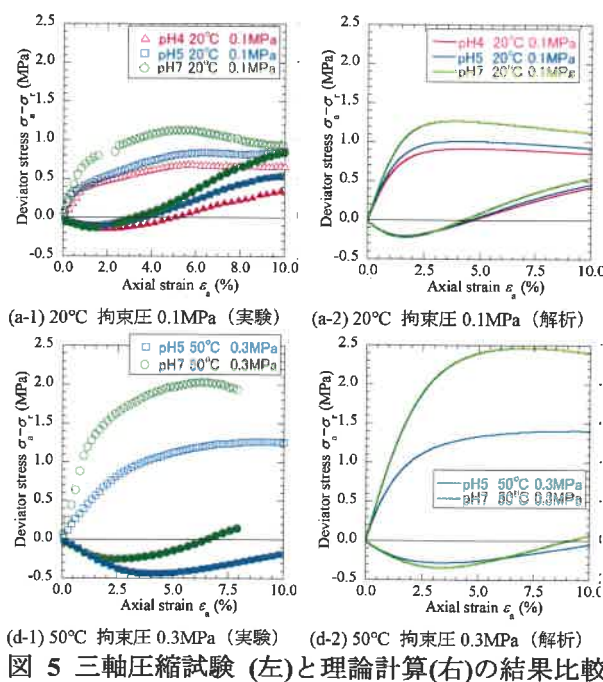


図5 三軸圧縮試験(左)と理論計算(右)の結果比較

5. 結論

- ① ピーク強度や限界応力比は、pH値が小さく、温度が高く、拘束圧が大きいくほど低くなる。体積ひずみはpH値が小さいほど圧縮側に大きく、膨張量は小さくなり、その傾向は温度が高く拘束圧が大きくなるほど顕著である。
- ② 温度上昇とともにカルシウム溶脱が促進され、強度低下との繋がりが確認された。水中曝露前後でのカルシウム原子数濃度の比をカルシウム相対濃度 C と定義し、酸の影響を表す状態変数とした。
- ③ 試験結果に基づき、限界応力比を酸や温度、拘束圧を含む関数として定式化し、新たな弾粘塑性構成式を提案した。要素シミュレーションを実施して解析結果と実験結果を比較した結果、pHや環境温度、拘束圧の違いが力学特性に与える影響を定量的に表現でき、提案した弾塑性構成式の精度が確認された。

参考文献

- 1) Zhang, F., Xiong, Y. L., Itani, Y. and One, E., 2019: Thermo-elasto-viscoplastic mechanical behavior of manmade rock and its numerical modeling, *Underground Space Vol.4*, 121-132.
- 2) Hashiguchi, K.: Constitutive equation of elastoplastic materials with elastoplastic transition, *Jour. of Applied Mechanics, ASME*, 102(2), pp.226-272, 1980.
- 3) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Super loading yield surface concept for the saturated structured soils, *Proc. Of the 4th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering-NUMGE98*, pp.232-242. (1998)