# セメント浸透注入工法による改良地盤の温度・酸の環境下における 力学挙動に関する研究

Study on mechanical behavior of improved soil with cement infiltration method under temperature and acid environment

岩田朋也1,大原一哲2,彭鵬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 address: cho.ho@nitech.ac.jp

2 日建設計シビル(株)

# 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 評価は十分ではない。そこで本研究では,深層風化を受けた強風化花崗岩をセメント系固化材で浸透注入 工法により改良し,その長期安定性を検証した。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成分 への影響を三軸圧縮・クリープ試験および蛍光 X 線分析により調べた。その結果,酸の影響によりピーク 強度や限界応力比に影響を与えることが確認された。さらに,実験結果を踏まえ,温度や酸の環境が改良 土の力学挙動に及ぼす影響を定量的に考慮した弾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。

キーワード:地盤改良 深層風化 セメント安定処理 構成式

# 1. はじめに

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く,強度が著しく 低下する。この性質により,平成 26 年 8 月豪雨による広 島市土砂災害に代表されるような大規模の災害が起きて いる<sup>1)</sup>。強風化花崗岩 (マサ土とも呼ばれる)のような軟 弱地盤に対する地盤改良工法の一つにセメント系固化材 を注入する浸透注入工法がある。浸透注入工法による地盤 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 工法であるが,浸透注入工法は主に仮設構造物に利用され ており,長期安定性に関する定量的な評価はまだ十分では ない。

そこで本研究では、深層風化を受けた風化花崗岩におい 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 盤の長期安定性の把握を目的として、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

本論文ではセメント改良土に対して化学の影響と地熱 の影響を与えるためにpHを4,5,7の3種類,環境温度 を20℃と50℃の2種類の条件で水中曝露を実施した。そ の後,一軸圧縮試験と三軸圧縮試験により力学特性の把握 を行った。

#### 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3週間の気中モールド養生を経た 後,H10cm× ø5cm 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,ばらつきの大きさや目 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 Wopt (%)	14.7
土粒子密度 ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	2.641



# 図1 マサ土の粒度分布

図2 脱気水槽と恒温槽

# 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ーにした。表 2 に水中曝露条件を示す。 水温を一定に保つために, 図 2 に示すように水を張った恒 温槽の中に脱気水槽を入れた。

表 2 水中曝露条件

公 2 八十% 昭八日				
pН	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	2000	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	20 C	三軸圧縮試験	
7	リン酸塩緩衝液(0.25mol/L)と 酢酸(0.1mol/L)を5:2で配合	50 C	三軸クリープ試験 1 週間	

# 3. 試験条件

# 3.1 一軸圧縮試験

表 2 の曝露条件下での水中曝露を経た後に一軸圧縮試 験を実施した。一軸圧縮試験の試験条件を表 3 に示す。一 軸圧縮試験を行なう目的としては曝露条件による力学特 性の違いの把握,セメント改良土の材料としてのばらつき の確認するためである。さらには気中モールド養生のみの 強度を把握するべく,練り混ぜ日から1週間ごとに一軸圧 縮試験を実施した。このことにより,水中曝露の影響の有 無による力学特性を比較し,練り混ぜからの経過日数と強 度の増減関係を評価する。

## 3.2 三軸圧縮試験・クリープ試験

提案する構成式の改良と要素シミュレーションで使用 するパラメータを決定するために、図3に示す圧力セル内 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を実施した。三軸圧縮・ クリープ試験の試験条件を表4に示す。図4に示す圧力セ ル内に2枚の底付きメンブレンで供試体を密閉し、インナ ーチャンバーを用いることで、供試体が水に触れることな く積変化を計測できる。三軸クリープ試験における載荷は 応力制御であり、せん断中の載荷速度が、ひずみ制御で実 施した三軸圧縮試験と同様に設定した。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。

表 3 一軸圧縮試験条件

pH	温度 (℃)	気中モールド養生期間	水中曝露期間
		1, 2, 3, 4週間	
4	20		
4	50	3週間	
-	20		1、田田子> トマドつ、田田
5	50		1週间わよい 3 週间
7	20		
/	50		



図 3 高温中容量三軸試験機

図 4 圧力セルの詳細

表 4 三軸圧縮・クリープ試験条件

р Н	水温 [℃]	曝露期間	拘束圧 [MPa]	載荷速度	クリープ 応力 (三軸クリ ープ試験)
4	20		0.1	三軸圧縮試験	
4	50		0.1	0.1 %/min (ひずみ制御)	
~	20	1 ) 10 11 1			ピーク
5	50	I迴间	01.02	三軸クリーン試験 三軸圧縮試験時の応	强度の 90%
7	20		0.1, 0.3	力ひずみ曲線と一致 するように載荷速度	
/	50			を設定(応力制御)	

#### 3.3 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5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蛍光X線分析を行っ た。



図 5 蛍光 X 線分析試料採取位置

### 4. 試験結果

#### 4.1 一軸圧縮試験

ー軸圧縮試験結果を図 6(a), (b)に示す。図 6(a)の 20℃の 条件において, pH7 では曝露後の一軸圧縮強さが曝露直前 の 3 週間強度と同程度だったが, pH4, 5 ではいずれも 3 週間強度を下回った。これは酸の影響により供試体中のカ ルシウムが溶脱し,強度が低下したと考えられる。

図 6(b)の 50℃の条件では, pH4 の曝露 1 週目における 強度が 3 週間強度より低下したものの, pH5 の曝露 1 週目 では 3 週間強度からの低下はみられなかった。河野の既往 の研究<sup>2)</sup>より高温環境下はセメントの水和反応が早く進む ことが言われている。そのため, pH5 では酸によるカルシ ウム溶脱の影響よりも,水和反応による強度増進の影響が 卓越したことで水中曝露 1 週間での強度低下がみられな かったと考えられる。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。



#### 4.2 三軸圧縮試験

三軸圧縮試験結果を図 7(a)~(d),図 8(a),(b)に示す。図 7(a)~(d)より拘束圧や温度に関わらず、全てのケースにつ いて pH 値が小さくなるにつれてピーク強度も小さくなる 傾向が確認できる。これは図 6(a), (b)の一軸圧縮試験結果 と同じ傾向であり,酸によるカルシウム溶脱が強度低下に 起因していると考えられる。温度による影響に着目すると, 図 7(a), (b)よりピーク強度は 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。これも図 6(a), (b)の一軸圧縮 試験と同じ傾向であり, pH4 の条件ではセメントの水和反 応と酸によるカルシウム溶脱反応が同等に行われたため だと考えられる。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 の方が大きくなり、より延 性的な破壊挙動を示している。体積ひずみは、pH 値が小 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。

図 8(a), (b)の軸ひずみ - 応力比関係について, 応力比が 一定となるときの限界応力比に着目すると, pH 値が 7 か ら 4 へと小さくなるほど, 環境温度が 50℃から 20℃へと 低くなるほど, そして拘束圧が 0.1MPa から 0.3MPa へと 大きくなるほど限界応力比が低下する傾向が全体的に確 認された。

## 4.3 三軸クリープ試験

三軸クリープ試験結果を図 9(a)~(d)に示す。クリープ破 壊に至ったケースとしては,図 9(a)の pH5 の条件,図 9(d) の pH5,7の条件のみであり,他の条件については設定し たクリープ時間の中ではクリープ破壊には至らなかった。 ここで張らの既往の研究<sup>2</sup>によると,クリープ応力が高い ほどクリープ破壊時間が短縮されると言われている。三軸 圧縮試験結果より,拘束圧が大きいほど,そして環境温度 が高いほど,ピーク強度が大きくなるためにクリープ応力 も大きくなり,クリープ破壊時間が短縮されることが見込 まれる。その傾向を踏まえると,今回の実施条件において 拘束圧が最も大きく,温度が最も高いケース図 9(d)の条件 のクリープ破壊時間が最も短く,妥当な結果であると言え る。しかし,図 9(a)の環境温度 20℃,拘束圧 0.1MPa では pH5 のケースで pH7 より早くクリープ破壊が起きている ため,再現性をとり実験の傾向を確かめる必要がある。

軸ひずみ速度勾配である二次圧密係数 Caについては, クリープ開始初期は勾配にばらつきはあるものの,全体と しては曝露条件によらず勾配が 1.10 程度であり,酸や温 度の影響はみられなかった。





#### 4.4 蛍光 X 線分析

本研究では酸によるカルシウムの変動がみられ, 強度に も大きく関わることから、供試体に含まれる元素の中でカ ルシウムの原子数濃度のみに着目して、 蛍光 X 線分析結 果を整理した。ここに、曝露前のカルシウム原子数濃度 cmi に対する曝露後のカルシウム原子数濃度 ccur の比として, カルシウム相対濃度 C を定義した。図 10(a), (b)に曝露条 件別のカルシウム相対濃度 C 変動をまとめた。pH7 では表 面,内部のどちらもC値は1.0からの変動が小さく,水中 曝露によるカルシウム溶脱への影響が極めて小さいと言 える。pH4, 50℃の環境下で曝露3週間後のカルシウム濃 度の低下が最も著しく, セメント添加前と同程度の値とな ったことから、セメンテーション効果が大きく失われてい ると考えられる。pH4 と pH5 の表面におけるカルシウム 溶脱の程度に大きな違いはみられなかったが、内部におけ るカルシウム相対濃度は pH4 より pH5 の方が大きく, 溶 脱はより内部へ浸透していたことが窺える。pH4の強度が pH5 より小さくなったのもその結果であると言える。

ここで,表面と内部のカルシウム相対濃度が線形的に変化していると仮定し,両者の平均値をとり,図 11(a),(b)のように pH と平均化した C をプロットした。同じ温度・曝露期間の結果のプロットの回帰線を引くと,4本の回帰

線はいずれも相関の極めて高い結果となった。よって,カ ルシウム相対濃度 C は pH を的確に表現するパラメータで あるといえ,C を酸の影響を表す状態変数として,本研究 で提案する熱弾粘塑性構成式の中に取り込むこととする。

# 5. 新しい熱弾粘塑性式の提案

#### 5.1 用いる熱弾粘塑性構成式

本研究では、式(1)~(7)に示すような構造・密度効果を考慮した軟岩の弾粘塑性構成式をベースとして構成式の修正を行った。ベースとする従来の熱弾粘塑性構成式は、土の過圧密<sup>4)</sup> や構造<sup>5)</sup>、中間主応力<sup>6)</sup>、時間依存性<sup>7)</sup>の他に、温度変化に起因する等価応力<sup>8)</sup>の概念を統一的に取り組んだものである。式(2)は降伏関数であり、 $\tilde{R}$ ,  $\tilde{R}$ <sup>\*</sup>はそれぞれ過圧密、構造に関する状態変数、 $\tilde{t}_{N}$ 、 $\tilde{t}_{NIS}$ はそれぞれ温度効果を考慮した初期の圧密降伏応力、高位構造の降伏応力である。また、( $\theta - \theta_0$ )は参考温度(15°C)からの温度変化であり、塑性体積ひずみ $\epsilon_{P}^{P}$ は圧縮指数 $\lambda$ と膨潤指数 $\kappa$ を用いて式(8)のように表せる。その他のパラメータについては次章の表7に示す。





$$f = \ln \frac{t_N}{t_{N_0}} + \frac{1}{\beta} \left( \frac{X}{M_c^*} \right)^{\beta} - \frac{1}{c_p} \left( \varepsilon_v^p + C_p \ln \tilde{R} - C_p \ln R^* \right) = 0$$
(1)

$$\Lambda = \left(\frac{\partial f_{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} d\varepsilon_{kl} + \frac{h(t)}{c_p}\right) / \left(\frac{h_p}{c_p} + \frac{\partial f_{\sigma}}{\partial \sigma_{ij}} E_{ijkl} \frac{\partial f}{\partial t_{kl}}\right)$$
(2)

$$h(t) = \dot{\varepsilon}_0 (1 + t/t_1)^{-C_{\alpha}}$$
(3)

$$h^{p} = \frac{\partial f_{\sigma}}{\partial t_{ii}} - \frac{m_{R}^{\frac{\ln R}{R}} \tilde{r}^{C_{n}\ln(1+t/t_{1})} + m_{R^{*}}(1-R^{*})}{\tilde{t}_{N}}$$
(4)

$$\tilde{R} = \frac{\tilde{t}_{N1}}{\tilde{t}_{N1S}}, \quad \tilde{R}^* = \frac{\tilde{t}_{N1e}}{\tilde{t}_{N1S}} = R^*$$
(5)

$$\tilde{t}_{N1e} = t_{N1e} \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right]$$
(6)

$$\tilde{t}_{N1s} = t_{N1s} \exp\left[\frac{3\alpha_t(\theta - \theta_0)(1 + e_0)}{\kappa}\right]$$
(7)

$$\varepsilon_{v}^{p} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_{0}} \ln \frac{t_{N1e}}{t_{N0}} = C_{p} \ln \frac{t_{N1e}}{t_{N0}} \qquad \left(C_{p} = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_{0}}\right) \tag{8}$$

温度・酸の影響を考慮した修正熱弾粘塑性構成式の提案 について、図 12 に示す三軸圧縮試験結果に基づき、限界 応力比 M 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に着目し、それらを状態変数とする 回帰分析を行い、関数 Mc = M(C, T, p)として定式化した。 また、酸の影響を表す状態変数であるカルシウム相対濃度 C は、限界応力比 M のみに影響を与えるものと仮定した。



図 12 カルシウム相対濃度 C-限界応力比 M 関係

# 5.2 回帰分析による Mcの定式化

まずは拘束圧 p ごとに異なる関数  $M_C = M(C, T)$ を式(9) のように定式化した。各状態変数の係数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ は三軸圧 縮試験および蛍光 X 線分析による試験結果(表 5)を用いて 最小二乗法により算出した。

$$M_{c} = \alpha C + \beta T / T_{0} + \gamma , T_{0} = 15^{\circ} C$$
(9)  
$$M_{c} = (\alpha_{c} C + \beta_{c} T / T_{0} + \gamma_{c}) p_{c} / p_{0} + \xi_{c}, p_{0} = 0.1 \text{MPa}$$
(10)

表 6 に拘束圧別に算出した各係数値を,図 13 に拘束圧 別 *C-T-M* 関係を示す。当てはまりの良さの尺度である決定 係数は拘束圧 0.1MPa, 0.3MPa でそれぞれ 0.7878, 0.9926 となり,式(9)が実際の試験結果を表現できていると言える。 また,図 13 にある 2 平面は平行でなく,*C,T* の係数が拘 束圧 *p* の影響を受けていることが考えられる。

表 5 実験結果に基づくパラメータ値一覧

曝露条件	р	Т	С	М
pH4-20			0.544	2.09
pH5-20		20	0.679	2.25
pH7-20	0.1		0.954	2.26
pH4-50			0.506	2.15
pH5-50		50	0.661	2.29
pH7-50			0.950	2.36
pH5-20		20	0.679	1.54
pH7-20	0.3	20	0.954	1.92
pH5-50		-	0.661	1.72
pH7-50		50	0.950	2.05

次に、式(10)のように拘束圧 pを含めた形で  $M_c$ を定式 化した。 $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ ,  $\gamma_c$ ,  $\xi_c$ , は上記と同様に試験結果を踏まえ て最小二乗法により算出し、それらの値を表 6 中に示す。 決定係数は 0.9814 となったことから、式(10)は実際の試験 結果を十分に表していると言える。このことから、本研究 で行った熱弾粘塑性構成式の改良において、 $M_c$ は式(10)の 形で従来の構成式に組み込むものとした。

# 6. 要素シミュレーション

要素シミュレーションで使用するパラメータを表 7 に 示す。また、三軸圧縮試験結果と要素シミュレーションに よる解析結果との比較を図 14(a)~(d)に示す。解析結果はそ れぞれ pH や環境温度、拘束圧の違いによる改良土の力学 挙動を十分に表現できている。ただし図 14(a)、(b)に示す 拘束圧 0.1MPa、pH7 の条件下では、要素シミュレーショ ンは実験値より早い段階で限界状態に達し、せん断応力と ダイレイタンシーの変化が停止した。今回提案した構成式 ではピーク強度を上手く表現できているが、体積ひずみを 上手く表現することができなかった。今後は限界応力比だ けではなく他のパラメータについても酸や温度が影響を 与えていると考え、構成式の改良を行っていく。

また,本研究では供試体全体で均一なカルシウム相対濃 度であると仮定した上で要素シミュレーションを実施し た。ただ,実際には表面と内部でのカルシウム溶脱の程度 に違いがあるため,今後は境界値問題としてこの問題を考 慮し,供試体中でのカルシウム相対濃度勾配があることを 前提として,提案する構成式に基づいた有限要素解析を実 施し,この不均一さを有する実験結果を表現できるように していく。

表 6 式(9)における p ごとの各係数値

	., 1	
р	0.1MPa	0.3MPa
α	0.405	1.257
β	0.030	0.080
γ	1.857	0.591



# 図 13 拘束圧別 C-T-M 関係 (プロットは実験値) 上面:0.1MPa 下面:0.3MPa

表 7 解析パラメータ一覧

パラス	メータ	値
ポアソ	ン比 v	0.29
参考間隔	₿比 e <sub>N</sub>	0.542
ヤング係数	E [MPa]	137
塑性剛性	$Ep=\lambda-\kappa$	0.081
ポテンシャル形	状パラメータ β	1.10
過圧密消散パ	ラメータ m <sub>R</sub>	2.30
構造喪失パラメータ m <sub>R</sub> *		3.00
初期過圧密比 Ro		0.120
初期構造 Ro*		0.700
二次圧密係数 Ca		1.10
時間依存性パラメータ Cn		0.086
	$\alpha_{c}$	4.158
限界応力比 Mc	$\beta_{C}$	0.020
における係数	γc	-6.387
	ξς	2.506
線膨張率 a <sub>T</sub> [/℃]		8.0×10 <sup>-6</sup>



図 14 三軸圧縮試験とシミュレーションの比較

# 7. 結論

- ① ピーク強度や限界応力比は、pH 値が大きく、温度が高く、拘束圧が大きいほど大きくなる。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 温度上昇とともに強度増加だけではなく、カルシウム溶脱も促進されることが確認された。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,限界応力比が酸の影響を顕著に 受け,その定式化が必要となる。そこで,限界応力比 を酸や温度,拘束圧を含む関数として回帰分析により定式化し,弾粘塑性構成式の改良を行った。
- ④ 改良構成式を用いて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。その結果,pHや 環境温度,拘束圧の違いが力学特性に与える影響を 表現できた部分とできていない部分があるため,今 後さらに提案した修正弾塑性構成式の改良を行う。
- ⑤ 今後は供試体内部と表面部でのカルシウム溶脱の違いに着目し境界値問題として捉えた上で、提案する構成式に基づいた有限要素解析を実施し、実験結果を表現できるようにしていく。

# 参考文献

- 志岐,常正:"開発災害"の要因と今後の展開--2014年広島土 石流災害にみる,2015
- 河野清:コンクリート製品の促進養生,コンクリートジャー ナル,Vol.4No.3~4,1996
- 張鋒,八嶋厚:地積軟岩の力学挙動とモデル化:地盤工学会 誌,Vol.59,No.8,pp.88-95,2011
- Hashiguchi, K.: Constitutive equation of elastoplastic materials with elastoplastic transition, Jour. of Applied Mechanics, ASME, 102(2), pp.226-272, 1980.
- 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 Engineerung-NUMGE98, pp.232-242. (1998)
- Nakai, T. and Hinokio, M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, Vol.44, No.2, pp.53-70, 2004.
- Zhang, F., Xiong, Y. L., Itani, Y. and One, E., 2019: Thermoelasto-viscoplastic mechanical behavior of manmade rock and its numerical modeling, Underground Space Vol.4, 121–132.
- Zhang, S. and Zhang, F.: A thermo-elasto-viscoplastic model for soft sedimentary rock, Soils and Foundations, Vol.49, No.4, pp.583-596, 2009.