

## 火山灰質粘性土のセメント改良体における強度発現に関する検討 《アロフェンの影響について》

(社)セメント協会 セメント系固化材技術専門委員会\*

### 1. はじめに

火山灰質粘性土をセメント系固化材により固化処理すると、他の粘性土を対象にした場合に比べて強度発現が劣ることが多い<sup>1)</sup>。この理由は、火山灰質粘性土に多量に含まれる非晶質の珪酸アルミニウム粘土鉱物のアロフェンが、セメント系固化材(以下、固化材と略)から生じるカルシウムイオンを多量に取り込み、固化を阻害するためと言われているが、これを定量的に調査した報告は少ない<sup>2, 3)</sup>。

本委員会では、まず、アロフェン量の異なる試料土を数種類集め、固化処理後の強度発現を比較した。さらに、アロフェン量の多い火山灰質粘性土とアロフェン量の少ない粘性土を対象とし、土のカルシウムイオン取込み量の面からを評価した。本稿では、土のアロフェン量と改良体の強さ、土の水酸化カル

シウム(以下、Ca(OH)<sub>2</sub>と略)吸着量との関係を報告する。

### 2. 実験概要

#### 2-1. 使用材料

実験で使用した試料土とその物理特性を表1に示す。各物理特性はJISに準拠し測定した。ただし、アロフェン量は、次節で述べる北川が提案する8N HCl-0.5N NaOH交互溶解法<sup>4)</sup>(以下、北川法と略)により測定した。アロフェン量の定量的結果、火山灰質粘性土のアロフェン量は50~60%程度、大宮粘性土のアロフェン量は10.6%と、火山灰質の試料土のアロフェン量は著しく多かった。

固化材は、特殊土用固化材(以下、特殊土用と略)と高炉セメントB種(以下、BBと略)を用いた。

#### 2-2. 土のアロフェン量の定量方法

土のアロフェンの測定には、一般的に図1に示す北川法が採用されている。この方法は、アロフェン等の非晶質成分が、結晶成分より酸やアルカリへの溶解速度が速いことを利用したものである。ただし、溶解されるものがアロフェンだけとは限らず、その他の非晶質無機成分も同時に溶解されることに注意する必要がある。本報告では、アロフェン以外の非晶質成分も含めてアロフェン量と称することと

\*【委員長】近藤秀貴【住友大阪セメント(株)】(2010年4月新任)、  
守屋政彦【太平洋セメント(株)】(2010年3月退任)【委員】金城  
徳一【宇部三菱セメント(株)】、了道 久【日鐵セメント(株)】(2011  
年4月新任)、藤村恵一【日鐵セメント(株)】(2011年3月退任)、  
柳原勝也【(株)トクヤマ】、松山祐介【太平洋セメント(株)】、田坂行雄  
【宇部興産(株)】、田中篤史【(株)デイ・シイ】(2011年4月新任)、高  
橋章市【(株)デイ・シイ】(2011年3月退任)、飯田達郎【電気化学  
工業(株)】、佐々木慎一【麻生ラファージュセメント(株)】、岸本幸尚  
【三菱マテリアル(株)】(2010年9月新任)、清田正人【三菱マテ  
リアル(株)】(2010年8月退任)、本田欽也【新日鐵高炉セメント(株)】、  
根本佳則【日立セメント(株)】、吉原正博【住友大阪セメント(株)】  
A STUDY OF STRENGTH DEVELOPMENT OF VOLCANIC COHESIVE  
SOIL USING GEOCEMENT: INFLUENCE OF ALLOPHANE (by  
COMITTEE ON CEMENTIOUS SOIL STABILIZER)

表1 試料土の物理特性

試料土	産地	含水比 (%)	土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	湿潤密度 (g/cm <sup>3</sup> )	粒度 (%)				コンシステンシー (%)		強熱減量 (%)	アロフェン量 (%)
					礫	砂	シルト	粘土	液性限界	塑性限界		
佐倉ローム	千葉県佐倉市	106.1	2.669	1.435	0	45	31	24	129.0	59.8	15.9	49.9
つるローム	埼玉県鶴ヶ島市	125.6	2.646	1.360	0	14	32	54	124.1	51.5	17.9	52.9
久里浜ローム	神奈川県横浜市	88.5	2.769	1.423	6	16	16	62	149.1	38.2	14.4	62.5
ふじみのローム	埼玉県ふじみ野市	118.3	2.718	1.360	0	13	24	63	145.5	39.9	17.9	63.0
大宮粘性土	埼玉県さいたま市	62.7	2.555	1.622	1	17	33	49	87.6	47.7	13.4	10.6

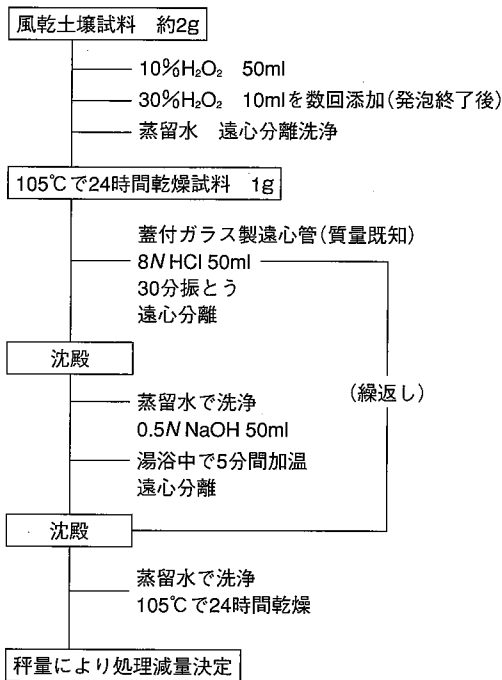


図1 8N HCl-0.5N NaOH交互溶解法によるアロフェン量の測定手順<sup>1)</sup>

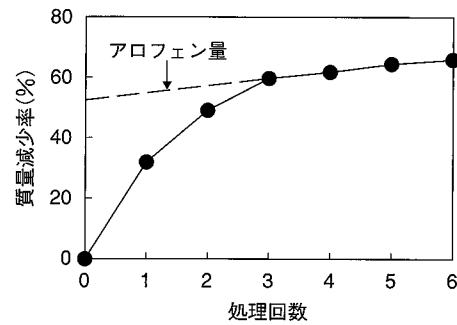


図2 アロフェン量の定量方法

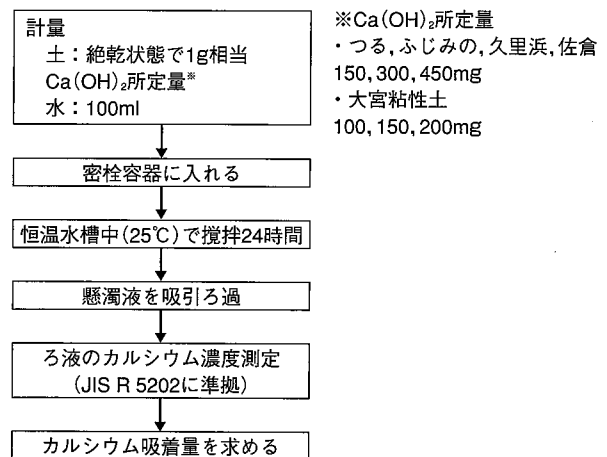


図3 土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量の測定方法

した。北川法による実験結果の概念図を図2に示す。アロフェン量は、質量減少率(溶解量)が安定した部分の回帰直線の切片として求めた。

なお、土のアロフェン量の測定は複雑かつ時間を要する。このため、アロフェン量の工学的指標として、土の液性限界と200℃加熱減量<sup>5)</sup>の検討や200℃加熱減量法をさらに簡便化した簡易型200℃加熱減量法<sup>6)</sup>の検討が行われており、アロフェン量と相関があることが報告されている。

### 2-3. 改良体の配合

固化材添加量は、200、300および400kg/m<sup>3</sup>の3

水準とし、水固化材比は、100%のスラリー混合とした。なお、大宮粘性土は、含水比が62.7%と他の試料土より低いため、事前に加水し、含水比を100%に調整してから成型した。

### 2-4. 供試体の作製方法

供試体(φ5×10cm)は、「安定処理土の締め固めをしない供試体作製方法(JGS 0821-2000)」に準拠し、作製した。

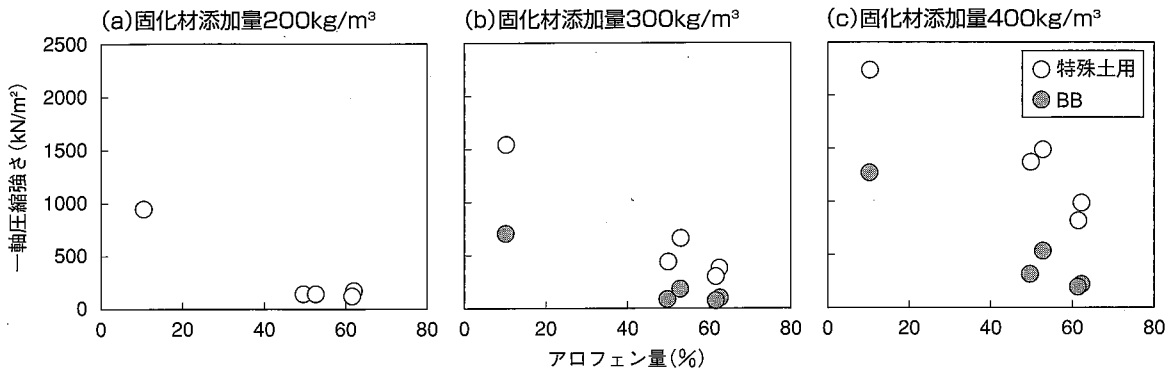


図4 土のアロフェン量と改良体の一軸圧縮強さの関係(材齢28日)

## 2-5. 試験項目

試験項目は、改良体の強度試験と土のカルシウムイオン取込み量の測定とした。

強度試験は、作製した供試体を用い、土の一軸圧縮強さ試験(JIS A 1216)に準拠して測定した。土のカルシウムイオン取込み量は、図3に示す独自の試験方法で測定し、土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量として評価した。

## 3. 実験結果

### 3-1. 改良体の一軸圧縮強さ

図4に、土のアロフェン量と改良体の材齢28日強さを示す。固化材添加量に関わらず、改良体の強さは、アロフェン量の多い試料土ほど低かった。固化材の種類で比較すると、特殊土用の方が、BBよりも高かった。

図5に、固化材添加量と改良体の材齢28日強さの関係を示す。固化材添加量と強さの関係に着目すると、アロフェン量の多い火山灰質粘性土は、固化材添加量が200~300kg/m<sup>3</sup>の範囲の強度増加量(傾き)よりも固化材添加量が300~400kg/m<sup>3</sup>の範囲の強度増加量の方が大きかった。一方、アロフェン量の少ない大宮粘性土は、固化材添加量によらず同等の強度増加量であった。これより、アロフェン量が50~60%程度の試料土は、固化材添加量300kg/m<sup>3</sup>以下では、固化材により生成したカルシウムイオンが土

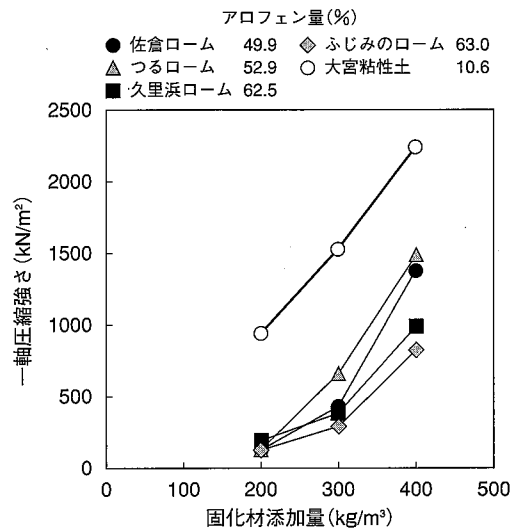


図5 固化材添加量と改良体の一軸圧縮強さの関係(材齢28日)

に吸着される割合が多いため、強度増加量が小さかったと推察できる。また、固化材添加量300kg/m<sup>3</sup>以上では、アロフェン量が多くても強度発現に寄与するカルシウムイオンも増加するので、強度増加量は大きくなる。

### 3-2. アロフェン試薬を用いた模擬土の一軸圧縮強さ

アロフェン量20~40%の試料土が入手できなかったため、その範囲のデータを補間するため、品川化成社製アロフェン試薬(微粒末吸着剤:北川法によるアロフェン量92.9%)を大宮粘性土に置換し、その置換率を変化させた模擬土を作製した。模擬土の

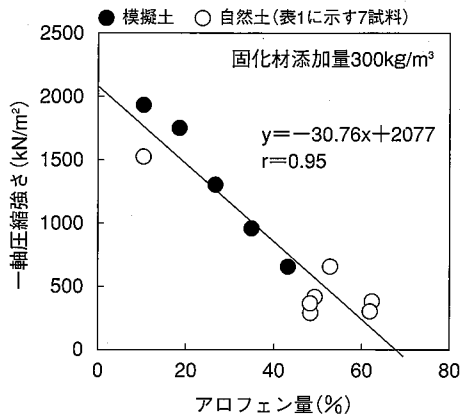


図6 模擬土の改良体の一軸圧縮強さ(材齢28日)

表2 土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量とろ液のCa(OH)<sub>2</sub>濃度

試料名	Ca(OH) <sub>2</sub> 添加量 (mg)	ろ液のCa(OH) <sub>2</sub> 濃度 P (mg/100ml)	Ca(OH) <sub>2</sub> 吸着量 v (mg/土1g)
佐倉ローム	150	34.4	115.6
	300	89.3	211.5
	450	130.7	320.7
つるローム	150	34.0	117.2
	300	87.4	214.1
	450	126.1	325.3
久里浜ローム	150	27.3	123.0
	300	79.7	221.0
	450	122.6	327.7
ふじみのローム	150	26.6	124.4
	300	72.4	228.4
	450	127.8	323.9
大宮粘性土	100	40.5	59.7
	150	66.2	84.1
	200	93.1	107.3

アロフェン量は、アロフェン試薬の置換率に応じて計算した値とした。なお、作製した模擬土は、含水比が100%になるよう調整した後、成型した。

図6に、模擬土の改良体の材齢28日強さを示す。実線は、模擬土と自然土のプロットの回帰直線である。模擬土により補間したアロフェン量20~40%の範囲についても、アロフェン量が多いほど、改良体の強さは低くなった。

### 3-3. 土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量

表2に、各試料土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量とろ液のCa

表3 土の吸着等温式の定数

試料土	a	1/n
佐倉ローム	8.27	0.74
つるローム	8.11	0.75
久里浜ローム	14.90	0.63
ふじみのローム	16.84	0.61
大宮粘性土	4.41	0.70

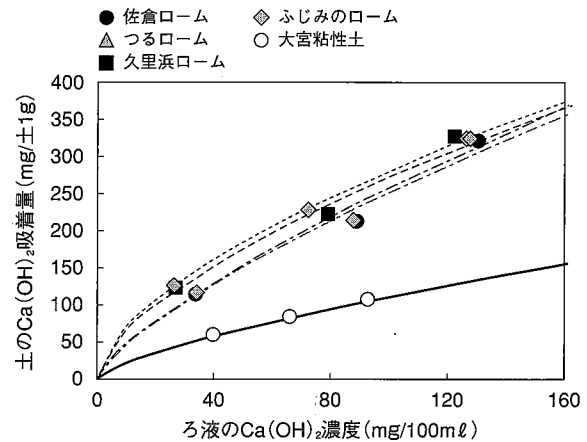


図7 各試料土の吸着等温線

(OH)<sub>2</sub>濃度の測定結果を示す。これをフロインドリッヒ型の吸着等温式(式(1), または式(2))により解析した。

$$v = aP^{1/n} \quad \dots\dots (1)$$

$$\ln v = \ln a + \frac{1}{n} \ln P \quad \dots\dots (2)$$

ここに、v: Ca(OH)<sub>2</sub>吸着量  
P: ろ液のCa(OH)<sub>2</sub>濃度  
a, n: 定数

土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量の対数とろ液のCa(OH)<sub>2</sub>濃度の対数の間には、比例関係が認められ、フロインドリッヒ型の吸着等温線をとることがわかった。表3に吸着等温式から得られた各試料土の定数a, 1/nを示す。

図7に、表3に示す定数を基に作成した吸着等温線を示す。プロットは実測値を、実線および破線は、吸着等温線を示す。吸着等温線は、火山灰質粘性土4種類の方が大宮粘性土より、上側にある。土の

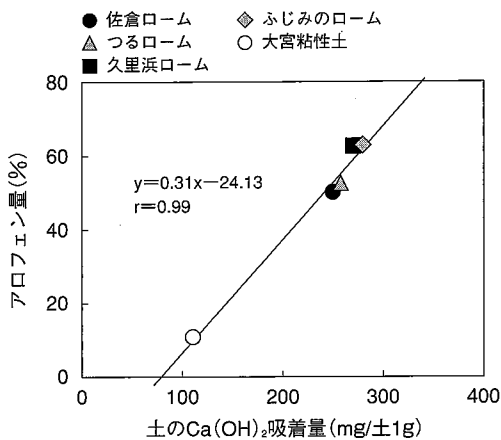


図8 土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量とアロフェン量の関係

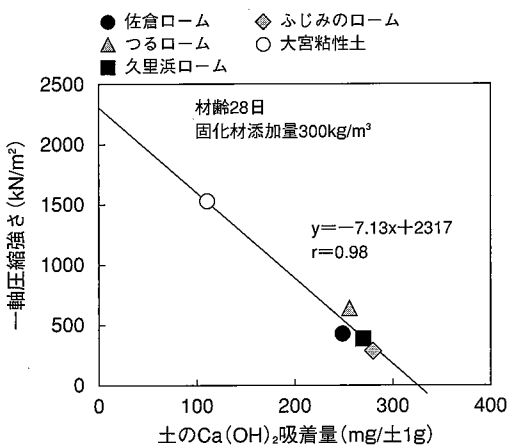


図9 土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量と改良体の一軸圧縮強さの関係

Ca(OH)<sub>2</sub>吸着量は、ろ液のCa(OH)<sub>2</sub>濃度の影響を受けるものの、アロフェン量の多い試料土ほど多かった。

### 3-4. 土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量とアロフェン量および改良体の強度の関係

図8に、土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量と土のアロフェン量の関係、図9に、土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量と改良体の強さの関係を示す。土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量は、図7に示すとおり、ろ液のCa(OH)<sub>2</sub>濃度に依存するので、図8、9には、100mg/100mlの時の吸着量をプロットした。

両図より、土のアロフェン量が多ければ、土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量が多くなり、その結果、改良体の強

度が低くなる関係が確認できた。Ca(OH)<sub>2</sub>は強度にあまり寄与する水和物ではないが、Ca(OH)<sub>2</sub>が土に多量に吸着するということは、C-S-Hやエトリンガイト等の水和物についても健全に生成していないと考えられるため、強度発現を阻害する理由として有力である。

## 4. まとめ

火山灰質粘性土のようなアロフェン量が多い試料土は、他の粘性土に比べ強度発現が劣ることが多く、それは固化材の水和過程で生成するカルシウムイオンを多量に取り込むためといわれている。本報告では、実験的に土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量を調べ確認した。今回の実験範囲において、得られた知見を以下に示す。

- (1) アロフェン量の多い火山灰質粘性土は、アロフェン量の少ない粘性土と比べ、強度発現が低かった。固化材の種類では、特殊土用固化材の方が、高炉セメントB種よりも強度発現が高かった。
- (2) 固化材添加量が200~400kg/m<sup>3</sup>の範囲において、アロフェン量の少ない粘性土では、固化材添加量と強さは比例関係にあった。一方、アロフェン量の多い火山灰質粘性土では、固化材添加量300kg/m<sup>3</sup>以下の範囲で、添加量に応じた強度増加量が小さかった。
- (3) (2)から、アロフェン量50~60%の試料土は、固化材添加量300kg/m<sup>3</sup>以下では、固化材の水和過程で生成するカルシウムイオンの多くが、土に吸着されたと考えられる。
- (4) 土のカルシウムイオン取込み量を、土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量として評価した結果、土のアロフェン量が多いものほど、土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量が多くなり、改良体の強さが低くなる現象を説明できることがわかった。

今回の検討から、火山灰質粘性土の改良体の強度が低くなる現象を、土のアロフェン量と土のCa(OH)<sub>2</sub>吸着量の関係で説明できた。

火山灰質粘性土を十分に固化するためには、ある一定以上の固化材を添加することが重要であり、今回の実験範囲(特殊土用固化材、水固化材比100%)から考えると、固化材添加量300kg/m<sup>3</sup>以上であった。

また、火山灰質粘性土の改良体は、六価クロムが溶出しやすいため、これに留意し、適切な固化材お

よび固化材添加量を選定することも肝要である。

#### [参考文献]

- 1) 土質工学会/土質工学における化学の基礎と応用, 1978
- 2) 清水, 荒木, 山本/関東ロームと固化材の相互作用に関する一考察
- 3) 清水, 荒木, 山本/関東ロームの改良強度に及ぼす固化材中のエラーライト量の影響
- 4) 北川/土壌中のアロフェンおよび非晶質無機成分の定量に関する研究, 農技研報告, No.29, pp.1~48, 1977
- 5) 宋, 藤巻, 岡田/関東ロームのアロフェン含有量と工学的性質の関係, 第23回土質工学研究発表会, pp.211~212, 1988
- 6) 奥村, 斉藤, 藤田, 鎌尾/セメントによる関東ロームの改良(その1: 土中のアロフェンおよび非晶質無機成分の簡易定量法), 第41回地盤工学研究発表会, pp.767~768, 2006