

# 粘性土の強度回復に関する 2, 3 の検討

齋藤二郎 平間邦興  
木村薫 土屋幸三郎

## Studies on Thixotropic Strength Increase

Jiro Saito Kunioki Hirama  
Kaoru Kimura Kozaburo Tsuchiya

### Abstract

The phenomenon called thixotropy, or thixotropic strength increase, is a factor which controls execution of earthwork. Recently, some of the factors governing thixotropic strength increase have been explained in a few papers, but there still remains much that is unknown.

This paper reports the effect of temperature on the rate of thixotropic strength increase which has been strongly called for to be investigated especially from the field. Tests were conducted assuming the two cases of summer and winter temperatures. As a result of the tests, the difference between the two was clearly revealed and, in particular, this was prominent at the initial stage of curing. In spite of the testing water content being markedly under the liquid limit, a high absolute value of thixotropic strength increase was found indicating the great influence there would be on execution of work.

### 概要

一般にシキソトロピーと呼ばれている現象、すなわち粘性土の強度回復特性は土工事において、施工性を大きく支配する要因となっている。この強度回復特性を支配する要因は、現在までいくつかの報文などにより、その一部は明らかにされているが、いまだ不明な点がきわめて多い。この報文は、特に現場施工においてその性状の究明を要求されている養生温度の強度回復特性への影響を明らかにしたものであり、夏期および冬期の養生温度を想定して実験を試みたものである。実験の結果、両者の差異は明確に現われ、特に養生初期において顕著である。また実験時の含水比が液性限界を大きく下回っている低含水比にもかかわらず、強度回復量の絶対値も大きな値を示し、施工への影響のきわめて大きい様子が明らかとなった。

### 1. まえがき

粘性土の強度回復現象の一つに、シキソトロピーとよばれる現象があるが、この特性は建設工事の内でも特に土工事の施工性に大きな影響をあたえる。例えば夏期の施工と冬期の施工とでは土の強度回復特性に著しい違いのあることは、既に経験的に広く知られているところである。しかしながら、この現象は非常に数多くの要因によって支配されており、徐々に解明されつつはあるが、いまだ不明な点がきわめて多いといえる。

筆者等は、この強度回復特性を支配すると考えられる要因のうちから、特に温度と時間に着目し、2, 3

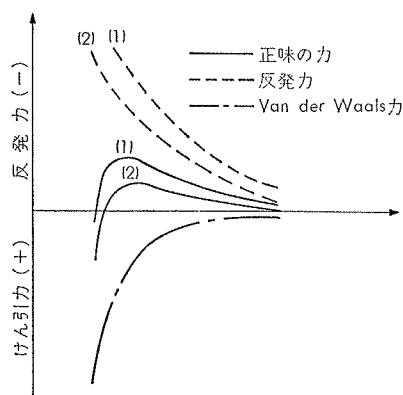
の現場試料について簡単な実験をおこなった。

この報文は、それらの実験結果と若干の考察を述べたものであり、今後の研究の一つの布石とするものである。

### 2. シキソトロピーの発生機構と養生温度

シキソトロピー現象による強度回復効果の性状は、粒子の配列と粒子間の力の変化、あるいは吸着水中の変化のどちらかによって説明される。すなわち粒子の配列は粒子間の最大けん引力によって最小エネルギーの位置をとろうとし、吸着水もまた準結晶の形を得て降伏値をもつ程度に十分な剛性をもつことが知られている。

また、かく乱前の土粒子構造の違いによって強度回復には差異が生じ、綿毛化構造においてはかく乱後粒子の再配向という変化が生じる。この変化がシキソトロピー現象による強度回復をもたらすものと考えられ、強度回復の程度は粘土粒子の再配向できる割合に依存するところが大きいと考えられる。また、再配合できる割合は、粘土粒子間のけん引力と反発力に起因するものであるから、シキソトロピー現象による強度回復はこの2つの力のバランスによって表示することが可能となる。



図一 粒子間距離とポテンシャル

図一は、一般的な2つの粘土粒子間の距離とポテンシャルの関係を示したものである。ここで粒子間の反発力は粒子の表面電荷、液の誘電率、カチオン濃度、イオン価、および温度などの要因に大きく影響されることが知られているが、これらの要因と粒子間のけん引力と反発力がバランスする距離、すなわち拡散二重層の厚さ  $t$  との関係は次式のように表わすことができる<sup>1)</sup>。

$$t = \sqrt{\frac{EkT}{8ne^2v^2}} \quad \dots\dots\dots ①$$

- E : 流動体の誘電率
- k : ボルツマン係数
- T : 絶対温度
- n : 電解質濃度
- e : イオン価
- v : 交換性カチオン価

①式について検討すれば、絶対温度  $T$  の増加は拡散二重層の厚さ  $t$  の増加を導き、ひいては高い養生温度での強度回復を小さなものにすると考えられるが、今般の実験のように他の諸条件を固定して養生温度のみをパラメータとした場合、絶対温度  $T$  の変化に対応し

て必然的に誘電率  $E$  にも変化が生じてくる。ここで誘電率以外の要因は定数、もしくは固有値と考えられるので絶対温度  $T$  の変化の影響は無視してよいと考えられる。

誘電率  $E$  と絶対温度  $T$  との関係を示す一つの実験式として②式があげられる<sup>2)</sup>。

$$E = E_0 e^{-T/\theta} \quad \dots\dots\dots ②$$

$E_0, \theta$  はそれぞれ各溶媒に固有な定数

ここで①式、②式を使用して概略検討を試みる。

②式を①式に代入すると

$$t = \sqrt{\frac{E_0 e^{-T/\theta} \cdot T}{8ne^2v^2}} = M \cdot \sqrt{e^{-T/\theta} \cdot T} \quad \dots\dots\dots ③$$

ここで  $M = \sqrt{\frac{E_0}{8ne^2v^2}}$

③式を  $T$  で微分すると

$$\frac{dt}{dT} = M \cdot \left( -\frac{e^{-T/\theta} \cdot T^{1/2}}{2\theta} + \frac{e^{-T/\theta} \cdot T^{-1/2}}{2} \right) = \frac{Me^{-T/\theta}}{2} \cdot \left( -\frac{T^{1/2}}{\theta} + T^{-1/2} \right)$$

境界条件は

$$-\frac{\sqrt{T}}{\theta} + \frac{1}{\sqrt{T}} = 0 \quad \dots\dots\dots ④$$

すなわち

$$T > \theta \quad \text{ならば} \quad \frac{dt}{dT} < 0 \quad \dots\dots\dots ⑤$$

$$T = \theta \quad \text{ならば} \quad \frac{dt}{dT} = 0 \quad \dots\dots\dots ⑥$$

$$T < \theta \quad \text{ならば} \quad \frac{dt}{dT} > 0 \quad \dots\dots\dots ⑦$$

$\theta$  は水の場合、一般に 220 程度の値を示すので、今般の実験のように、絶対温度  $T$  が  $278^\circ \sim 303^\circ$  の範囲においては⑥の境界条件が適応され、拡散二重層の厚さ  $t$  は温度の上昇とともに減少すると考えられる。

したがって、養生温度のみをパラメータとして準備された粘土試料への適応を検討すれば、高い養生温度においては、粒子間のけん引力が強調され、かく乱状態から綿毛構造への構造変換のための大きな力になると考えることができる。

### 3. 試料および実験方法

実験に使用した土試料は、モンモリロナイトを主要粘土鉱物とする自然粘土 (Sample A) と、アロフェンを主要粘土鉱物とする関東ローム (Sample B) の2種であり、その性状は表一に示す通りである。

ここで両試料とも試験時含水比は液性限界を大きく下回って低い値を示しているが、これは現位置の施工時含水比に合わせたものである。

所要の含水比に均質に調整した試料は、2日間養生した後、ソイルミキサーで十分練り返しをおこない、径10cm モールドに、重量 2.5kg ランマーを使用して3層25回の突き固めを行い、含水比の変化を防ぐために、モールドごとパラフィンシールを施した後、養生温度を夏期および冬期に対応して5°C、30°Cにそれぞれ設定した恒温恒湿槽で養生をおこなった。

また養生日数は、2、4、7、10、13、16、50日と定め、所定の日数を経過後、常温で成形し一軸圧縮試験を実施した。

### 4. 実験結果とその検討

一軸圧縮試験の結果、一般に Sample A では小さなヒズミでせん断抵抗に明確なピークが認められたのに対して、Sample B にはピークが認められず、応力-ヒズミ曲線に大きな相違があるため、ここでは試料別にまず Sample A の性状について検討する。

一軸圧縮強さについては図一2に示す如く、いずれも圧縮強さにかなりの量の回復が認められ、50日間養生では養生温度30°Cで初期強度に対して約90%、5°Cでは60%の増加を示している。

また、養生日数2日目からすでに養生温度による差異が明確であるが、7日以後の差異の幅は、養生日数の経過に対して、大略一定値を保っているようである。

破壊時ヒズミについての傾向を示したのが図一3であるが、養生日数の経過に伴ない破壊時ヒズミは減少し、その傾向は特に養生初期において顕著であり、養生中に粘土粒子の再編成などによる強度回復がおこなわれた様子が理解できる。また養生温度による差異も明確に現われている。

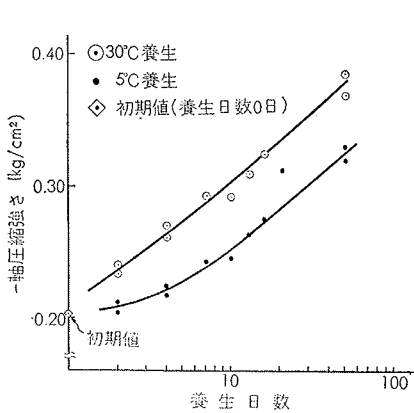
回復特性に最も顕著な傾向の認められるのが図一4に示す変形係数  $E_{50}$  であり、50日間養生では、養生温度30°Cで初期値に対して約650%、5°Cで約560%の増加を示しているが、両者を比べると5°C養生の試料の立上りの遅い様子がうかがわれる。

図一5~7は軸ヒズミ  $\epsilon$ 、0.5、1、4%時の圧縮抵抗をプロットしたものである。いずれも養生日数に対して直線的な増加の傾向を示しているが、ヒズミ量の増大にともなって養生温度による圧縮抵抗の差は減少している。

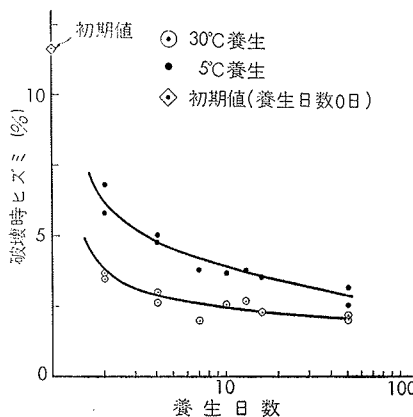
この傾向は、これらの強度回復がせん断初期においてもっとも著しく現われ、ヒズミの進行とともにせん断面で再びかく乱作用が現れる結果、回復した強度を

	土の組成			コンシステンシー			試験時 含水比%	比重 $G_s$	湿潤密度 $\gamma_t$ g/cm <sup>3</sup>	活性度 $A_c$	採取地	主要粘土鉱物
	砂%	シルト%	粘土%	LL%	PL%	PI%						
Sample A	4	35	61	91.1	27.0	64.1	48.8	2.640	1.652	1.23	神奈川県南葉山	モンモリロナイト
Sample B	4	43	53	128.1	58.7	70.1	74.7	2.701	1.502	2.92	東京都清瀬	アロフェン

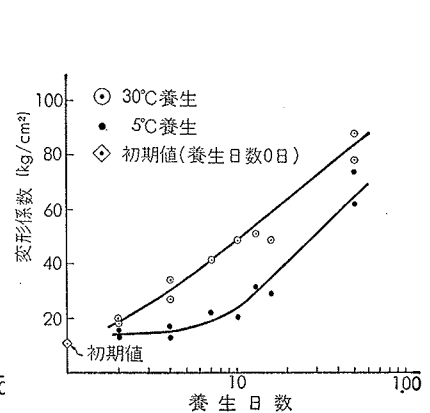
表一 試料の土質性状



図一2 Sample A 一軸圧縮強さ  $q_u$



図一3 Sample A 破壊時ヒズミ  $\epsilon_f$



図一4 Sample A 変形係数  $E_{50}$

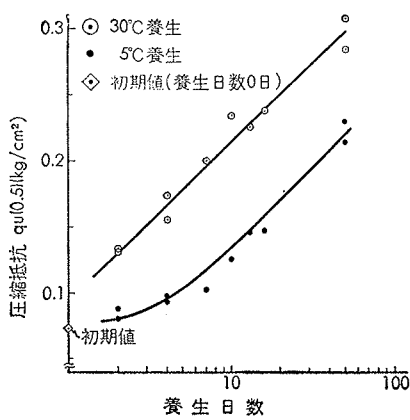


図-5 Sample A ヒズミ0.5%時  
圧縮抵抗  $q_u(0.5)$

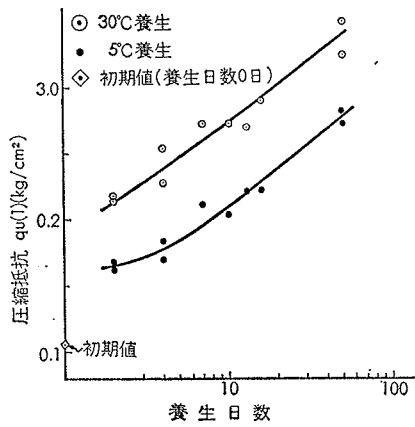


図-6 Sample A ヒズミ1%時  
圧縮抵抗  $q_u(1)$

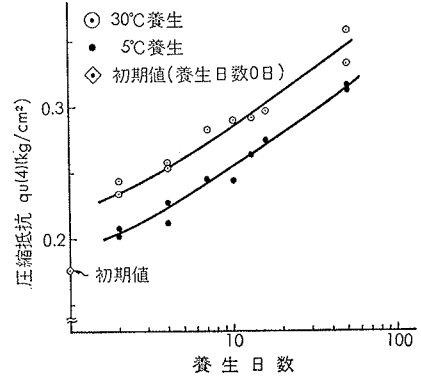


図-7 Sample A ヒズミ4%時  
圧縮抵抗  $q_u(4)$

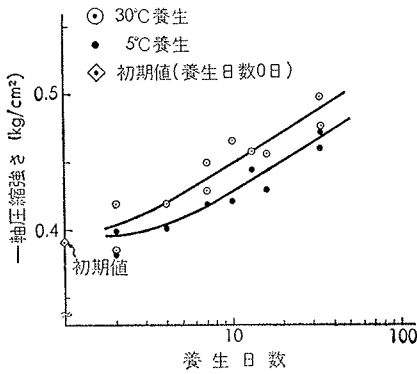


図-8 Sample B 一軸圧縮強さ  $q_u$   
( $\epsilon_r=15\%$ )

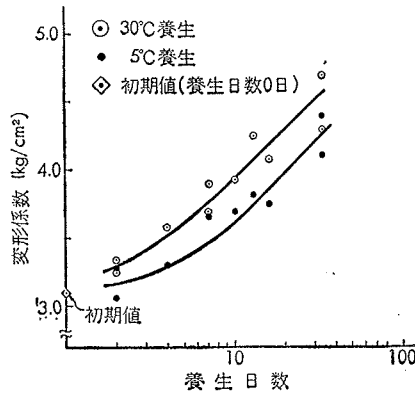


図-9 Sample B 変形係数  $E_{50}$

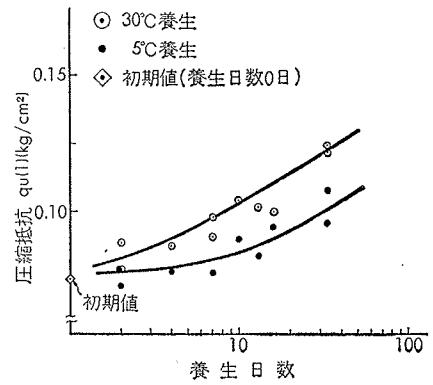


図-10 Sample B ヒズミ1%時  
圧縮抵抗  $q_u(1)$

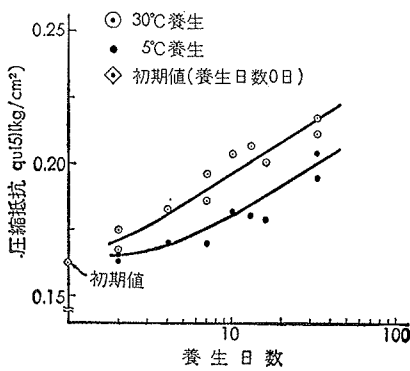


図-11 Sample B ヒズミ5%時  
圧縮抵抗  $q_u(5)$

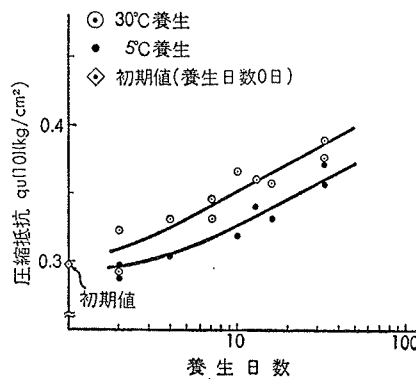


図-12 Sample B ヒズミ10%時  
圧縮抵抗  $q_u(10)$

## 5. まとめ

以上の実験の結果、かく乱粘土における強度回復特性に関する温度の影響は非常に大きく、その温度差による差異は、特に養生初期から明確であることが認められた。

又、今般の実験では、液性限界をかなり下回る低含水比の試料を使用したにもかかわらず、予想していたよりも大きな回復量が得られ、この結果が実際の設計、施工におよぼす影響はきわめて大きいと判断される。

しかし、今般の実験によって養生温度をパラメータとし、夏期と冬期を想定した条件の下での強度回復の差異は明らかにすることができたが、使用した2種の実験試料も現位置で施工中の特殊な条件にあり、設定した養生温度も2種類と少く、これらの実験結果から一般性を求めるのは早計である<sup>4)</sup>。

又、これらの実験結果については、今後さらに熱力学的な考察を加える必要があると考えられ、土の挙動

再び低減させるためと推定することができる。

Sample B についても Sample A と同様の傾向は認められるが、回復量自体も小さく、またデータのバラツキが大きくて Sample A ほど明確な傾向が現われていない。その原因は Sample B の主要粘土鉱物アロフェンの特性とも考えられるが、それよりも今般の実験で使用した試料の含水比の低さに由来するところが大きいと考えられる<sup>3)</sup>。

の研究へのこのような概念の適用は不可欠であると思われる。しかし現在、吸着水の特長など今だ未知の分野が多く、その究明には数多くの困難が予想されるところではあるが、今後、養生温度、初期含水比、練り返し程度などの要因を設定し、総括的な実験を計画している。

#### 参考文献

- 1) James K. Mitchell: Soil Mechanics and Foundation Division 1960
- 2) 藤代・和田・玉虫: 溶液の性質II 現代物理化学的講座 1968
- 3) 西田・松村・八木: かく乱粘土の強度回復に関する物理化学的考察 第8回土質工学会
- 4) 木村・平間・土屋: 粘性土の強度回復に関する2, 3の検討 第28回土木学会