

# 粘性土の強度回復に関する 2,3 の検討 (その 2)

斎藤 二郎 平間 邦興  
木村 薫 土屋 幸三郎

## Studies on Thixotropic Strength Increase (Part 2)

Jiro Saito Kunioki Hiramata  
Kaoru Kimura Kozaburo Tsuchiya

### Abstract

Thixotropic strength increase of cohesive soil depends much on the thixotropy phenomenon, and in particular, it is known that this strength increase governs ease of execution of earthwork in construction. However, as thixotropic strength increase is controlled by many complicated factors, the present state is that very little explanation has been made of the mechanism.

The authors have reported before the results of tests on the influences of clay minerals and curing temperatures from among the factors thought to govern thixotropic strength increase. In this report, the influences further of parameters such as water content at time of testing are clarified along with the influences previously studied. As a result of the tests, a clear difference is revealed between curing at 5°C and at 30°C similarly to the cases in the last report, and in particular, this is prominent at the initial stage of curing. The influence also of water content at time of testing is distinctly recognized, and the interesting result was obtained of the great influences on the strength characteristics of cohesive soil and on execution of work with this soil.

### 概 要

粘性土の強度回復は、シキソトロピー現象に依存するところがおおく、この特性が建設工事の内、特に土工の施工性を大きく支配することはすでに知られている。しかし、この症状は数多くの要因に複雑に支配されているため、いまだに機構解明はほとんどなされていないのが現状である。

筆者らは、これまでもこの性状を支配すると考えられる要因の内から、粘土鉱物、養生温度の影響についての実験結果を報告してきたが、この報告では、これらの影響とともに、さらに試験時含水比などのパラメーターの影響について明らかにしている。実験の結果、養生温度による影響は前回の報告と同様に、5°C 養生と 30°C 養生の差が明確に現われ、特に養生初期において顕著である。試験時含水比による影響も明確に認められ、興味深い結果が得られて粘性土の強度特性および施工への影響の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呼ばれる現象がある。施工にあたってこの現象を考慮すべき具体的な例を挙げれば、次の通りとなろう。

- (1) 盛土体の安定 (2) 盛土材の締固め性状
- (3) 盛土体の支持力 (4) 表層地盤および盛土体の  
ト ラ フ ィ カ ビ リ テ ィ ー
- (5) クイの支持力 (特に打込みグイ)
- (6) クイのネガティブフリクション

しかし、この現象は非常に多くの要因に支配されており、いまだ不明な点がきわめて多く、その機構解明は殆んどなされていないのが現状である。

筆者らは、この現象の普遍的傾向を把握して現場への応用を図るために、これまでも工学的および物性的要因について室内実験を実施してきた。

既報<sup>1)</sup>では粘土鉱物、養生温度および養生日数をパラメーターとし、その影響を明らかにしたが、この報告では、おのおののパラメーターの内容をさらに充実させるとともに、新たに試験時含水比をパラメーターに加え、その影響を明らかにするとともに、一般式の提案を試みた。

### 2. 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) とカオリナイトを主要粘土鉱物とする自然粘土 (Sample B) の 2 種類であり、その性状は表 1 に示す通りである。

実験方法は、まず所定の含水比に均質に調整した試料を 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、空隙の除去および試料の均一化を図る。その後、径 10cm、高さ 10cm のモールドに、重量 2.5kg

		Sample A	Sample B
主要粘土鉱物		モンモリロナイト	カオリナイト
採取地		神奈川県南葉山	京都府信楽山
土の組成	砂分	7	8
	シルト分	35	51
	粘土分	58	41
コンシステンシー特性	液性限界 LL (%)	74.8	44.5
	塑性限界 PL (%)	17.5	19.3
	塑性指数 IP (%)	57.3	25.2
	統一土質分類	CH	SC
	土粒子の比重 Gs	2.561	2.644
自然状態	含水比 W (%)	32.8	22.6
	湿潤単位体積重量 $\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.67	1.89
	間ゲキ比 e	1.076	0.715
	飽和度 Sr (%)	87.8	83.6
力学的特性	圧密試験		
	圧密最終圧力 Py (kg/cm <sup>2</sup> )	0.88	3.40
	圧密指数 Cc	0.333	0.177
	活性指数 Ac	1.25	0.788
	比表面積 (m <sup>2</sup> /g)	900	20
	pH	8.13	6.57
	最適含水比 (%)	26.5	22.4
最大乾燥密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.344	1.668	

表一 試料の土質性状

のランマーを使用し、3層25回の突固めをおこない含水比の変化を防ぐため、モールドごとに供試体に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湿恒温槽で養生をおこなった。

また、養生日数は、0、1、4、8、16、30、60日と定め、所定の日数を経過後、常温でベーンセン断強さを求めた。使用した室内精密ベーンセン断試験機を図一1に示す。

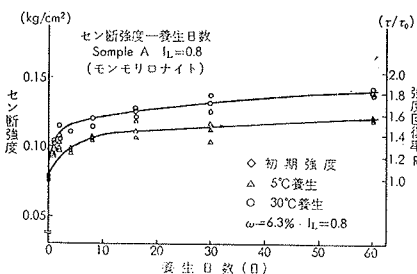
したがって Sample A、B についての試験条件を一括して示したのが表一2である。

### 3. 試験結果の概要

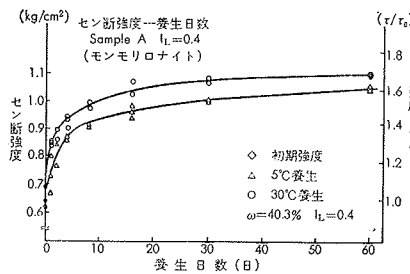
ベーンセン断強さ  $\tau$  と養生日数の関係を示したものが図一2～図一11である。

Sample A と Sample Bのいずれの Sample とも強度回復は養生初期(10日以内)に著しく、60日養生時の回復の5割に達し、その後、日数の経過に伴い回復の速度が減少している。

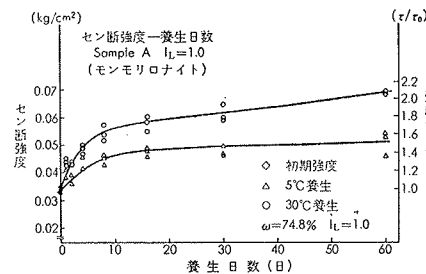
また、いずれの Sample についても30°Cの高温養生の方が、5°C養生に比べて大きな強度回復性状を示し、



図一4 セン断強さ Sample A  $I_L=0.8$



図一2 セン断強さ Sample A  $I_L=0.4$



図一5 セン断強さ Sample A  $I_L=1.0$

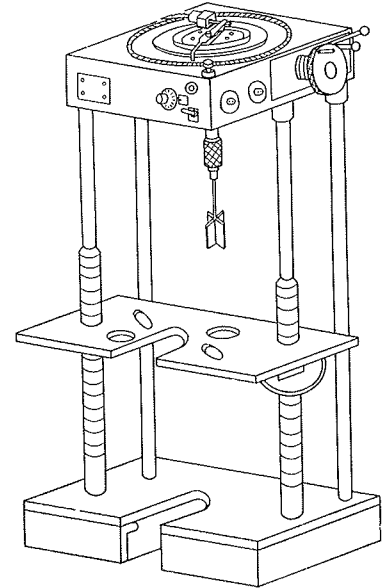
養生温度 (°C)	試験時含水比 液性指数 $I_L$	養生日数 (日)
5, 30	0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2	0, 1, 2, 3, 4, 8, 16, 30, 60

表一2 試験条件

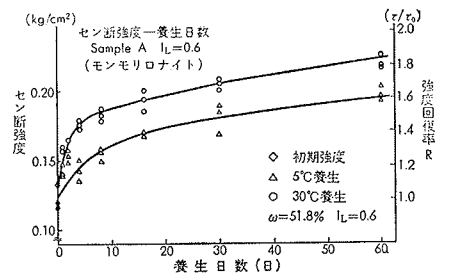
しかも養生日数1日目からすでにその差異は明確であり、前回の報告と同様の結果が得られている。

強度回復量についても、回復率 R (回復強さ/初期強さ) で示せば、30°C養生について Sample A で1.7~2.0 Sample Bで1.3~1.4に、5°C養生については、Sample A で1.4~1.7、Sample B で1.1~1.4に分布している様子が解かる。

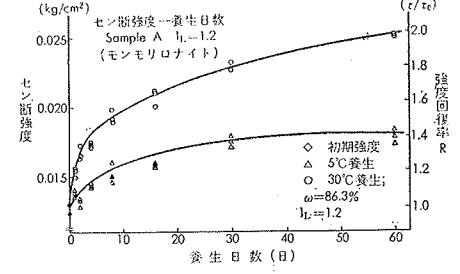
次に、試験時含水比が強度回復性状に及ぼす影響を知るため、試験時含水比(液性指数  $I_L$ )を養生日数1、8、16、30日の強度回復率 R に対応させてプロットしたのが図一12~図一15である。



図一1 室内精密ベーン試験機



図一3 セン断強さ Sample A  $I_L=0.6$



図一6 セン断強さ Sample A  $I_L=1.2$

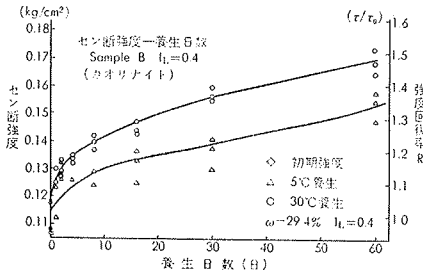


図-7 Sample B  $I_L=0.4$

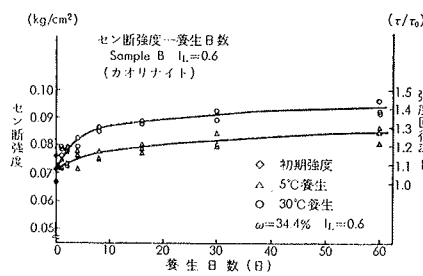


図-8 Sample B  $I_L=0.6$

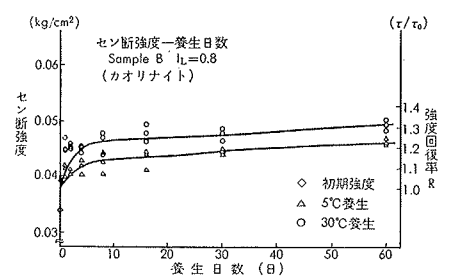


図-9 Sample B  $I_L=0.8$

Sample A については、養生期間が長くなるとともに、強度回復率Rは試験時含水比の高いほど30°Cの高温養生では増大するが、5°C養生では、逆に減少する傾向を示し、また、ある含水量の範囲で回復率Rにピークが認められるようである。また Sample B については、測定値にバラツキが多く、明確ではないが、ほぼ同様の傾向が認められるといえよう。

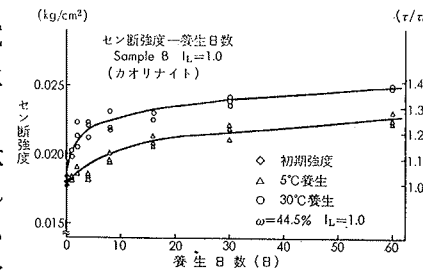


図-10 Sample B  $I_L=1.0$

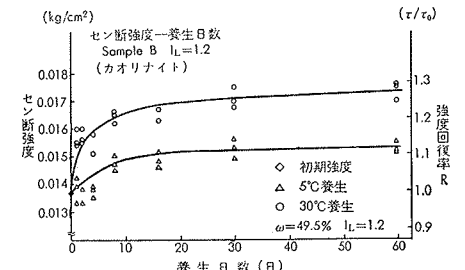


図-11 Sample B  $I_L=1.2$

図-16~図-19は、試験時含水比とセン断強さの関係を、養生日数0, 8, 60日について片対数紙上にプロットしたものである。いずれについても、明確な直線関係が認められているが、その勾配と切片は養生日数により変化してくる様子が解かる。

また、一般に、含水比が液性限界付近にある試料のセン断強さは、大略 20~70gr/cm<sup>2</sup> の間にあるとされているが、今般の実験結果によると、液性限界 ( $I_L=1.0$ ) の試料のセン断強さは、養生日数0日について、Sample A で 33gr/cm<sup>2</sup>, Sample B で 18gr/cm<sup>2</sup> を示し、ほぼこの範囲にあると解釈できよう。

Sample A と Sample B の強度回復率を比較すると、Sample A についての回復性状の顕著な様子が容易に理解できる。これらの性状の違いは、以下に示すような意味を含めて、その主要粘土鉱物の性状に起因する割合が、きわめて大きいと考えることができる。

例えば、二つの Sample の活性度  $A_e$  比表面積  $A_f$  を比較してみれば、モンモリロナイトを主要粘土鉱物とする Sample A では、活性度  $A_e=1.25$ , 比表面積  $A_f=900\text{m}^2/\text{g}$  であり、カオリナイトを主要粘土鉱物とする Sample B は、活性度  $A_e=0.79$ , 比表面積  $A_f=20\text{m}^2/\text{g}$  である。

ここで、活性度や比表面積は、土粒子表面および、三相系として土塊における物理化学的性質を支配する指数として、広く知られているところであり<sup>2)</sup>、今般の実験結果からも、活性度および比表面積をパラメーターと考えると、これらの値の大きい方が、繰り返

#### 4. 実験結果についての検討

##### 4.1. 実験条件による強度回復に与える影響

###### (1) 主要粘土鉱物による影響

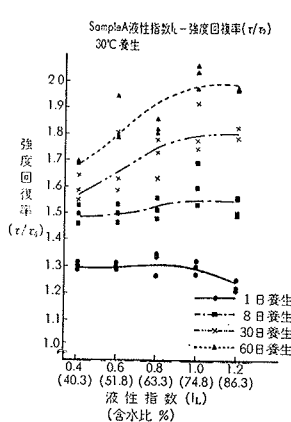


図-12 Sample A (30°C)

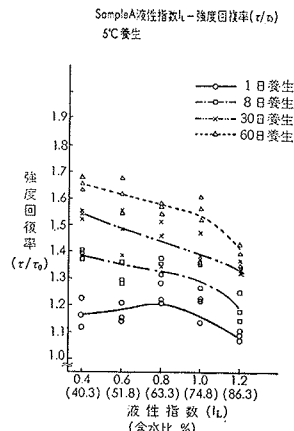


図-13 Sample A (5°C)

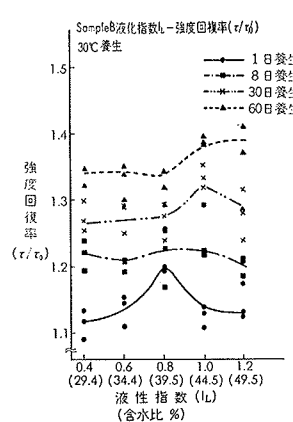


図-14 Sample B (30°C)

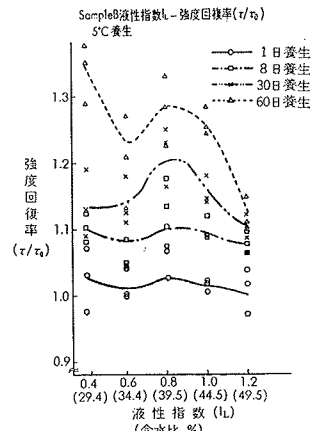
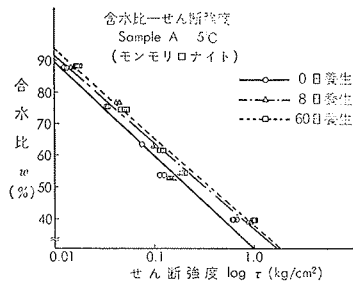
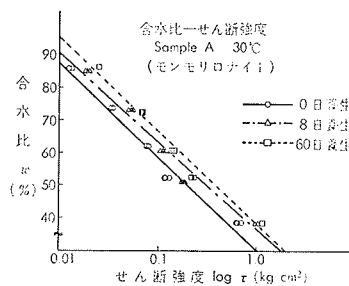


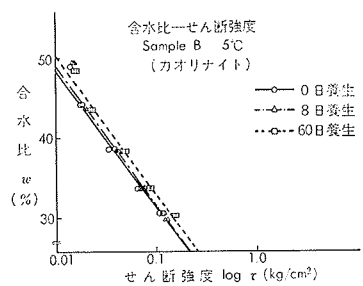
図-15 Sample B (5°C)



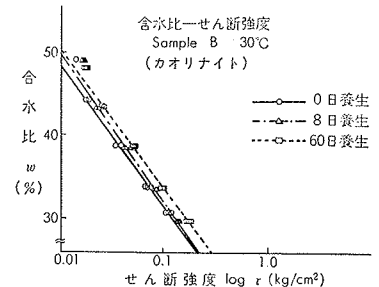
図一16 初期含水比とせん断強度  
Sample A (5°C)



図一17 初期含水比とせん断強度  
Sample A (30°C)



図一18 初期含水比とせん断強度  
Sample B (5°C)



図一19 初期含水比とせん断強度  
Sample B (30°C)

しによって破壊された粘土粒子の構造が速やかに再配向し、また、吸着水の固化（拘束化）が、再び速やかにおこなわれて、卓越した強度回復性状を示すと解釈することができる。

(2) 養生温度による影響

今般の実験結果からは、いずれの試料についても、30°Cの高温養生における強度回復率は5°C養生のそれを上回っており、例えば、Sample A について、液性指数  $I_L=1.2$  の場合、養生温度30°Cの60日養生における回復率は、養生温度5°Cの回復率に比較して1.4倍もの値を示している。

この機構および原因の検討については、既報<sup>3)</sup>でも詳述しているが、高い養生温度では、たとえば拡散二重層が薄くなることから、粘土粒子間の反発力が減少し、一方、Van der Waals力によるけん引力は増加して、攪拌状態から再配向する構造変換のための大きな力が生じ、強度回復をもたらすと考えられている<sup>4)</sup>。

(3) 含水比による影響

いずれの試料についても、養生日数にかかわらず、図一16～図一19に示すように、含水比とせん断抵抗（対数）のプロットには明確な直線関係が認められている。この傾向から試験時含水比に対応して強度回復性状も規則的な変化をしていると解釈することができる。

ここで、液性限界の持つ意義を考えてみると、液性限界とは、土試料が可塑状から液性を示す限界の含水比であり、高含水比の粘性土のせん断抵抗には、間隙水と土粒子=周囲の吸着水層との間の粘着力の割合が大きくなり、低含水比の粘土では、隣接する吸着水どうしの粘着力と粒子間の力が主となると考えることができる。

したがって、高含水比を有する粘性土では、いわゆるカク乱によって吸着水層のいくらかが自由水化し、その結果、せん断抵抗は減少するが、静置しておくとも再び自由水の幾分かが拘束され、吸着水層となり、せん断抵抗が増加してくると考えられる。

また、低含水比の粘性土のせん断抵抗は、吸着水どうしの粘着力ばかりでなく、粘土粒子間の力が大きな

要素であると考えられ、静置後、カク乱により自由水化された吸着水が再び速やかに拘束され、しかる後破壊された粒子構造が除々に再構成されると推定することができる。

以上の考察過程より、高含水比の試料の強度回復性状は低含水比の粘性土と比較して、短期間に卓越した変化を示すと考えることができるが、その性状は複雑であり、単一のパラメーターで論ずるのは早計であると思われ、次項で、その相互影響について検討する。

(4) 実験条件の相互影響

代表的な例として、Sample A について養生日数をパラメーターとし、試験時含水比と強度回復率の関係を示したのが図一12～図一15であるが、興味深い傾向が認められる。すなわち、養生期間が長くなるとともに強度回復率は、試験時含水比の高いほど、30°Cの高温養生では増加傾向を示し、5°C 養生では減少する傾向が認められ、含水比が高い（液性限界を越える）ほど強度回復は大きいとされているこれまでの一般的な考え方に対して、今般の実験結果では、一部に相反する傾向が得られている。

養生温度による影響が養生日数、試験時含水比によってどのように変化するかを確認するために示したのが図一20であり、30°C養生における強度回復率  $R_{30}$  と5°Cにおける強度回復率  $R_5$  の比を養生日数に対してプロットしたものである。養生初期においては、いずれの試験時含水比についても  $(R_{30}/R_5)$  の値が、1.0程度を示すが養生期間が長くなると、低含水比の試料では  $(R_{30}/R_5)$  の値が、1.0口に近づいて減少し、一方、高含水の試料では、増加の傾向を示し1.4にも達している。

すなわち、低含水比の粘性土の強度回復性状は、養

生温度によってあまり影響を受けず、高含水比なものほど養生温度の影響を敏感に受け、試験時含水比、養生温度および養生日数とは互いに関連をもって強度回復性状に影響を及ぼすと解釈される。

4.2. 実験式の検討

ここで、Sample A を例にとって、実験式の検討を試みる。

既に検討したように、前掲の図-14~図-17における試験時含水比とせん断抵抗 (対数) の関係に、いずれの Sample においても明確な直線性が認められることから、含水比 (液性指数  $I_L$ ) とせん断強さ  $\tau$  は、式①で表わすことができる。

$$\tau = 10^k \cdot B \quad \text{①}$$

ただし、 $k = a(I_L - b)$

a : 直線の勾配

b : 基準となる液性指数  $I_L$

B :  $I_L = b$  におけるせん断強さ  $\tau_b$

ここで強度回復率 R は②式で示される。

$$R = \frac{\tau}{\tau_0} = 10^{(k-k_0)} \cdot \frac{B}{B_0} \quad \text{②}$$

ただし、 $\tau_0$  : 養生日数 0 日におけるベーンせん断強さ

$k_0$  : 養生日数 0 日における式の定数

$B_0$  : 養生日数 0 日における式の定数

今般の実験結果から Sample A について  $b = 0.4$  とした場合の、 $a \cdot B$  の値を養生日数に対応させてプロットしたのが図-21、図-22 である。

ここで、養生日数  $t$  と  $a$ ,  $B$  の関係は、 $t \geq 2$  の条件において式③で表わすことができる。

$$a = c \log t + d \quad \text{③}$$

$$B = e \left( \log \frac{t}{2} \right)^2 + f \quad \text{④}$$

ただし、 $c, d, e, f$  は定数

③, ④式を②式に代入すれば

$$R = 10^{(c \log t + d)(I_L - b) - k_0} \cdot \frac{e \left( \log \frac{t}{2} \right)^2 + f}{B_0} \quad \text{⑤}$$

$$= (h \cdot t)^{c(I_L - b)} \cdot \left( n \left( \log \frac{t}{2} \right)^2 + l \right)$$

ただし、 $h = 10^{\frac{d}{c}}$

$$n = \frac{e}{B_0 \cdot 10^{k_0}}$$

$$l = \frac{f}{B_0 \cdot 10^{k_0}}$$

したがって、今般の実験結果から Sample A については、次の通りに示すことができる。

30°C 養生  $h = \frac{1}{50}, c = 0.121$

$n = 0.138, l = 1.569$

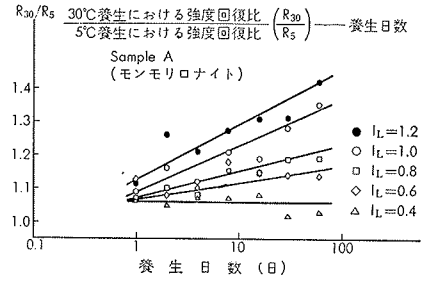


図-20  $R_{30}/R_5$  と養生日数

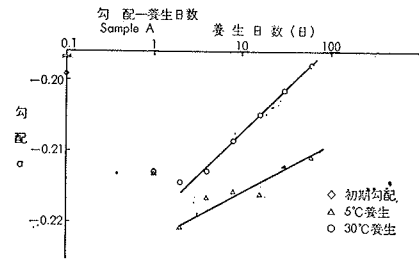


図-21 勾配 a と養生日数

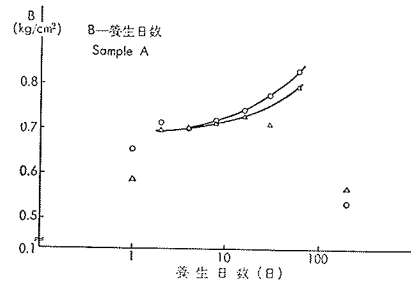


図-22 B と養生日数

5°C 養生  $h = \frac{1}{2400}, c = 0.068$

$n = 0.099, l = 1.579$

5. あとがき

今般の実験は、粘土鉱物、試験含水比、養生温度、養生日数と 4 つのパラメーターを設定して実施した。実験結果より明らかなように、各々のパラメーターは互いに複雑な相関性をもって、強度回復現象に影響を及ぼしていることが明らかとなり、今後の機構解明に一つの示唆が得られたと解釈している。

参考文献

- 1) 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 回土木学会講演概要集
- 2) 最上武雄編「土質力学叢書」技報堂
- 3) 齋藤, 木村, 平間: 粘性土の強度回復に関する 2, 3 の検討, 大村組技術研究所報 Vol. 10 (1975)
- 4) Jounes K. Mitchell; Soil Mechanics and Foundation Divison 1960