

粘性土の強度回復に関する 2, 3 の検討 (その 3)

齋藤 二郎 平間 邦興
木村 薫 鳥井原 誠

Studies on Thixotropic Strength Increase (Part 3)

Jiro Saito Kunioki Hirama
Kaoru Kimura Makoto Toriihara

Abstract

Generally, shear strengths of clays decrease on remolding, but later when left standing, they indicate a property called thixotropy and recover strength. To investigate this phenomenon, the authors conducted a series of vane shear tests on the influences of temperatures (Temp.), water contents (I_L), time (t), physico-chemical properties of soil (plasticity index (I_p), specific surface (A_f), hydrogen-ion activity (pH)) which have been reported previously. 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.

In the present paper, the authors discuss statistically all test results from another point of view, and compare test results with regression curves of thixotropic strength ratio (R) which are obtained by a stepwise regression procedure. The equation of regression curves is as follows:

$$R = \alpha + \beta_1 \frac{t}{t+1/I_L} + \beta_2 \cdot 10^{I_L} + \beta_3 \cdot I_p + \beta_4 \cdot A_f + \beta_5 \cdot \text{pH}$$

(α, β : constants)

概 要

一般に粘性土は、カク乱作用を受けると強度が低下するが、静置することで再び強度が回復するシキソトロピー現象と呼ばれる性状を示す。この現象を究明するために、筆者らはこれまでに、温度 (Temp), 含水比 (I_L), 養生時間 (t), 土の物性 (塑性指数 (I_p), 比表面積 (A_f), 水素イオン濃度 (pH)) などをパラメーターとしてベンゼン断試験による一連の実験を実施し、研究を進めてきた。しかし、この現象は数多くの要因に複雑に支配されているため、その機構にはいまだ明らかにできない点も多い。

そこで、今般の研究では、少し趣を変えて、統計学的な見地より、今般新たに得られた実験結果とこれまでに得られているデータの一部について整理をおこない、階段的回帰分析の手法により、強度回復比 (R) に関する一般式を求め実験結果との対応を検討した。

1. 序

水を含んだ粘性土の多くはカク乱作用を受けると強度が低下するが、この土を含水比一定のまま静置すると強度が回復してくる。この現象はシキソトロピー現象による強度回復とよばれているが、実際の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ようになる。

- (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) クイの支持力

- (5) 表層地盤および盛土体のトラフィカビリティー
- (6) クイのネガティブ・スキンプリクシオン
- (7) サンドパイル打設による周辺地盤のカク乱

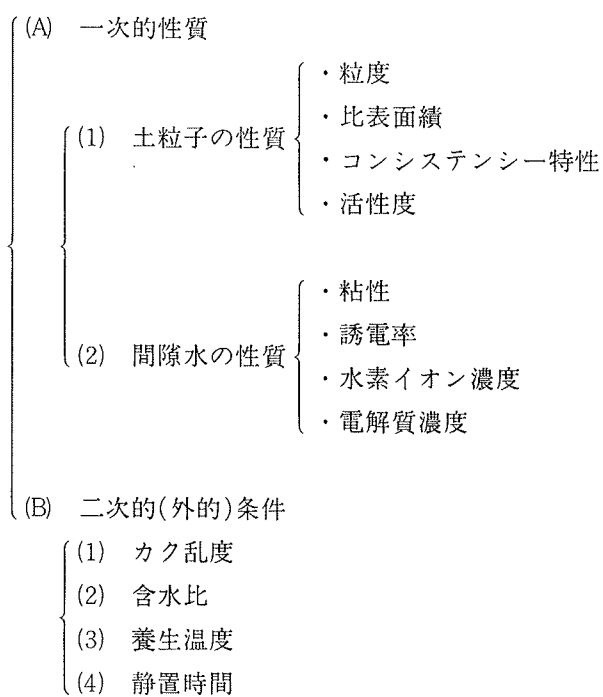
特に最近のように大型機械による大規模土工がますます増加する傾向を考えれば、カク乱した粘性土の強度回復現象を土質工学的立場から解析することは大いに意義があると思われる。この強度回復現象については、これまでも粘土の物理化学的性質や粒子構造に着目して種々の研究がなされ報告されてきているが、その機構にはいまだ不明な点がきわめて多い。

筆者らはこれまでに、温度、含水比、養生時間、土の物性（塑性指数、比表面積、水素イオン濃度 etc.）などをパラメーターとし、主としてベーンセン断試験による一連の実験を実施し、この現象の究明を試みてきた¹⁾。

その結果、現在数多くのデータが蓄積されているのでこれらのデータの一部と、今般新たに得られた実験結果を対象としてこの報文をまとめた。特にこの報文では従来のこの現象に対する研究方法とは少し観点を交えて、統計的手段によりこれらの実験結果の分析をおこなった。すなわち、強度回復現象を支配すると考えられる前述のパラメーターを独立変数、強度回復比（回復後強度/初期強度）を従属変数として、階段的回帰分析の手法により実験式を導き、今般得られた実験結果との対応を検討した。

2. 強度回復を支配する諸要因

粘性土の強度回復の原因について、これまでに報告されている諸説を大別すると



表一1 強度回復を支配する諸要因

	主要粘土鉱物	粒度特性(%)			コンシステンシー(%)			比重 Gs	水素イオン濃度 pH	活性度 Ac	比表面積 Af m ² /g
		砂	シルト	粘土	LL	P.L.	Ip				
Sample A	モンモリロナイト	7	35	58	85.9	31.4	54.5	2.851	2.8	0.9	230
Sample B	モンモリロナイト	0	15	85	410.5	23.0	387.5	2.876	9.6	3.9	513
Sample C	パイロフィライト	—	—	—	48.8	29.2	19.6	2.603	4.0	—	49
Sample D	モンモリロナイト パイロフィライト	—	—	—	250.0	22.0	228.0	2.781	9.5	—	368

表一2 試料の土質性状

i) 粘性土の骨格構造の破壊、再成に基づくと考えられるもの

ii) カク乱後のサクシオン増加に基づくと考えられるもの。

iii) 非粘土物質のセメンテーションに基づくと考えられるもの

などを挙げることができよう。しかし、その機構は十分には解明されておらず、その現象を支配する要因も非常に多くて複雑であるが、主なものについて整理すると表一1のようになると考えられる。

3. 試料および試験方法

この報文において検討対象とした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)、主要粘土鉱物をモンモリロナイトとする市販粘土 (Sample B)、パイロフィライトを主要粘土鉱物とする市販粘土 (Sample C)、および Sample B と Sample C を乾燥重量比 1: 1 で混合した試料 (Sample D) の 4 種類である。

これらの試料の物理的性状を表一2に示す。

またすべての試料について試験条件を一括して示したのが表一3である。

養生温度(°C)	5, 30
含水比(液性指数)	0.4, 0.8, 1.0, 1.2
養生日数(日)	0, 1, 2, 4, 8, 15, 30, 60

表一3 試験条件

セン断強度の測定は室内精密ベーンセン断試験機を用いたが、その詳細や供試体の作成方法、養生方法などは既報¹⁾を参照されたい。

4. 回帰分析による実験式の検討

4.1. 階段的回帰分析 (Stepwise Regression)

種々の量の変動するシステムにおいては、ある変数が他の変数により簡単な式で表わされる場合はきわめて少なく、実際には多くの複雑な関係が存在する。

強度回復もこの例外ではなく、この現象を表わす理論式を導く過程には相当の障害があると思われる。

そこで、筆者らは、従来のこの現象に対する研究方法

を若干変えて、統計的手段により今般おこなった試験結果を含めてこれまでのデータの分析を試みた。

統計的に多変量を解析する手段にはいろいろあるが、今回用いたのは変数増減法による階段的回帰分析とよばれるものである。

これは諸変数を独立変数と従属変数に区別し、前者の后者に関する線型関係を推測するものであり、得られる線型回帰式は(1)式のように表わされる。

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad \dots\dots\dots(1)$$

y : 従属変数

x_1, x_2, \dots, x_n : 独立変数

α : 定数項

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: 回帰係数

4.2. 回帰式の検討

まず第1段階として直線回帰式を求めた。すなわち求める回帰式は、強度回復比(R)を従属変数とし、養生日数(t)、液性指数(I_L)、塑性指数(I_p)、養生温度(Temp.)、比表面積(A_f)をそれぞれ独立変数として(2)式で示すことができる。

$$R = \alpha + \beta_1 t + \beta_2 I_L + \beta_3 I_p + \beta_4 \text{Temp.} + \beta_5 A_f + \beta_6 \text{pH} \quad \dots\dots\dots(2)$$

(2)式 of 回帰直線を実測値と比較した一例が図-1であるが、かなり大きな傾向の不一致が明確である。

そこで、第2段階として(2)式の独立変数に適当な変数変換をおこなって、より残差の小さい回帰式を求めることを試みた。なお、養生温度はデータが2点しかないため、分析対象の変数とはせず、それぞれの温度で別々の回帰式を求めることとした。

(1) t の変数変換

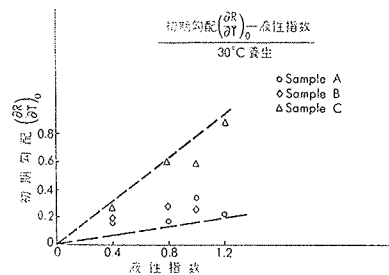


図-2 初期勾配 $(\partial R/\partial t)_0 - I_L$

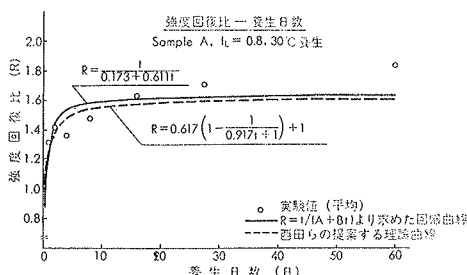


図-3 最小二乗法による回帰曲線

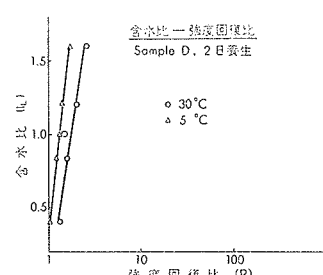


図-4 $I_L - \log R$

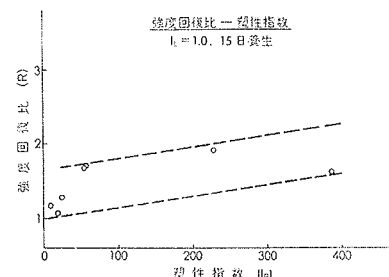


図-5 $R - I_p$

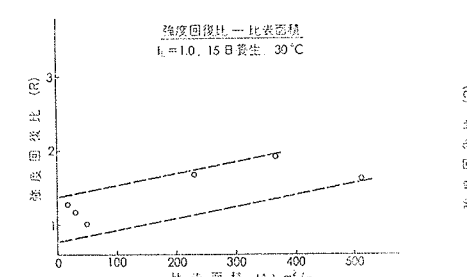


図-6 $R - A_f$

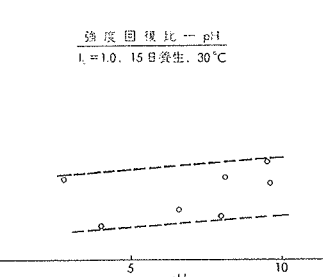


図-7 $R - \text{pH}$

実験結果より R-t の関係には次に示す定性的傾向が認められる。

- i) Rの増加は養生初期において顕著であり、次第に緩慢となる。
- ii) Rはtの増加とともに一定値に収束する。
- iii) 図-2に示すごとく高含水比のものほど、養生初期の回復速度 $(\partial R/\partial t)_0$ は大きくなる。

まず、i) ii)の傾向より R-t の関係が双曲線で近似されることが予想された。

ここで双曲線

$$R = \frac{t}{At + B} \quad \dots\dots\dots(3)$$

と西田²⁾らの提案式

$$R = A' \left(1 - \frac{1}{B't + 1} \right) + 1 \quad \dots\dots\dots(4)$$

の係数A, B, A', B'を既報¹⁾のデータを用いて最小二乗法により求め実測値との対応を調べたのが図-3である。これらの曲線は実測値とかなり一致しているの、iii)の傾向をも包含した変数変換として、

$$t \rightarrow \frac{t}{t + 1/I_L}$$

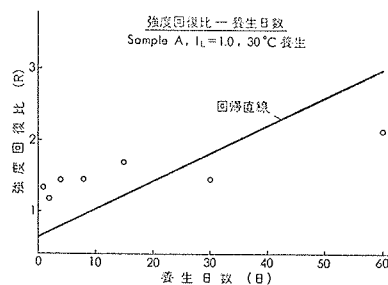


図-1 第1段階の回帰直線

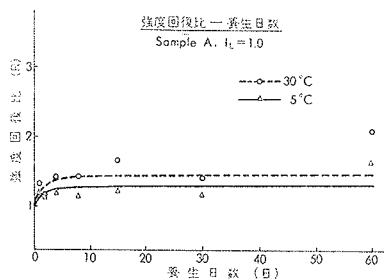


図-8 R-t (Sample A)

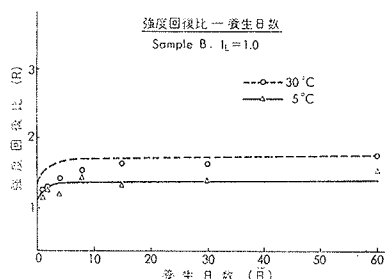


図-9 R-t (Sample B)

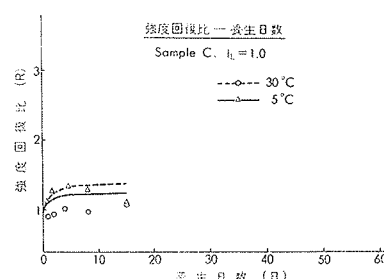


図-10 R-t (Sample C)

を採用した。

(2) I_L の変数変換

図-4 に示すように実験結果の $I_L - \log R$ はほぼ直線性を示すので変数変換として $I_L \rightarrow 10^{I_L}$ を採用した。

(3) I_p, A_f, pH の変数変換

$R - I_p, R - A_f, R - pH$ には明確な関係を見出しにくい。図-5 ~ 7 を参考にしてほぼ直線性を示すと考え、変数変換はおこなわない。したがって、以上の検討結果から求めるべき回帰式の形は(5)式ようになる。

$$R = \alpha + \beta_1 \frac{t}{t + 1/I_L} + \beta_2 10^{I_L} + \beta_3 I_p + \beta_4 A_f + \beta_5 pH \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、これまでに得られたデータを用いて電子計算機で回帰式(5)の定数 $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_5$ を計算すると、実験式(6), (7)が求まる。

$$\begin{aligned} 5^\circ\text{C} : R = & 9.71 \times 10^{-1} + 3.14 \times 10^{-1} \cdot \frac{t}{t + 1/I_L} + 3.64 \\ & \times 10^{-3} \cdot 10^{I_L} + 3.80 \times 10^{-4} \cdot I_p + 2.10 \times 10^{-4} \\ & \times A_f - 1.81 \times 10^{-2} \cdot pH \quad \dots\dots\dots(6) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 30^\circ\text{C} : R = & 7.86 \times 10^{-1} + 5.03 \times 10^{-1} \cdot \frac{t}{t + 1/I_L} + 1.54 \\ & \times 10^{-3} \cdot 10^{I_L} + 7.64 \times 10^{-3} \cdot I_p + 3.70 \times 10^{-4} \\ & \times A_f + 1.73 \times 10^{-2} \cdot pH \quad \dots\dots\dots(7) \end{aligned}$$

5. 結果とその検討

筆者らは粘性土の強度回復現象を示す基本的な原因は粘土粒子の骨格構造の再成、つまり、edge-to-face 結合による粒子相互の密な接触の生成にあると考えている。

従来いわれているサクシヨンの増大による強度回復も結局は、構造の再成による強度回復と等価なものであろう。なぜならば、Mitchell³⁾ がいうようにサクシヨンの測定値は構造の再成過程を示す一つの物理量と考えられるからである。

また、セメンテーションが粘性土の強度発現にもたらす影響は大きいと考えられるが、膠着物質の沈積には長い時間を必要とし、またそれが可逆的か否かという点についても未解決な問題が多い。従ってここではサクシオン、セメンテーションの効果については考慮しないこと

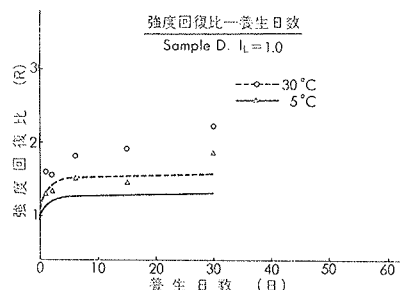


図-11 R-t (Sample D)

にした。

5.1. 実測値と回帰曲線との対応

実測値と回帰曲線の対応を示したのが図-8 ~ 11 である。これらの図は、養生温度が 5°C と 30°C の場合の強度回復性状を、試料と含水比を同じくして縦軸に強度回復比、横軸に養生日数をとって示したものである。試料によって、図-8, 9 のように比較的よく一致する場合もあるが、図-11, 12 のようになりに異なる場合も認められた。この原因について以下に考察を試みる。

i) 段階的回帰分析は、従属変数と独立変数が

$$y = \alpha + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \beta_n x_n$$

で示されるような線型関係を持つ、と仮定することが基本的条件となるが、一方強度回復現象については、各種パラメーターに相互関係が存在すると考えられ、厳密に言えば上の仮定の成立には無理がある。

ii) 今回採用した各種パラメーターの変数変換の妥当性にはまだ検討の余地が残っている。

iii) セン断試験や物性試験の測定誤差は無視できない影響を持つ。

iv) 独立変数として、 t, I_L, I_p, A_f, pH の5種類を考えたが、これらの他にも強度回復に影響をもたらすものがあると考えられる。

v) 含水比が異なる試料では、同じ締め固め方法の実施が不可能であったために、骨格構造の初期状態が不確定となり同一のカク乱状態が得られなかった。

5.2. 各種パラメーターについて

回帰分析の結果を用いて、各種パラメーターの強度回復に及ぼす影響の検討を以下に試みる。

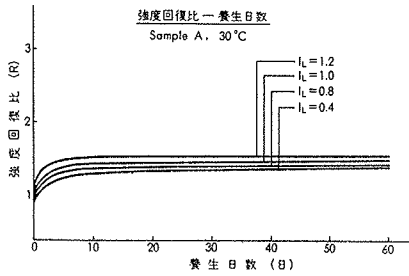


図-12 R-t (含水比の影響)

(1) 含水比

図-12に Sample A の例について $I_L=0.4, 0.8, 1.0, 1.2$ の場合の回復曲線を示しているが、含水比が高いほど、強度回復が著しくなる傾向が認められる。Mitchell はある含水比で強度回復比にピークが現われることを報告しているが、筆者らの実験結果からはそのような傾向は認められなかった。

(2) 温度

図-13は、Sample A について回復式から得られた60日養生における強度回復比と液性指数との関係を温度で対比させて示したものである。同様に、図-14は、強度回復比と塑性指数の関係を示したものである。これらの図から温度が高い程強度回復比が大きくなり、しかもその影響は高含水比、高活性な試料ほど顕著となることなどが明らかである。

(3) 土の物性

図-15に回復分析の結果から明らかになった物性の違いによる強度回復特性の傾向を示しているが、高活性な試料ほど、高い強度回復を示している傾向が明らかである。

6. 結 び

種々の要因が複雑にからみ合ったシキソトロピー現象による強度回復特性を、なんとか定量的に一般式として表現しようという目的のために、今般の研究をおこなったのであるが、実測値との対応は、いまだ充分なものとはいえない。今後、各種要因の相互作用をも含めたミクロな研究の発表が望まれる所似である。

また、自然地盤を対象とした実際の建設工事においては、鋭敏比との関連性も重要な要因として指摘されよう

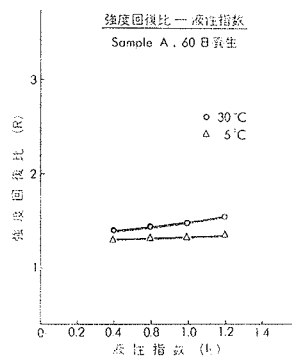


図-13 R-I_L (温度の影響)

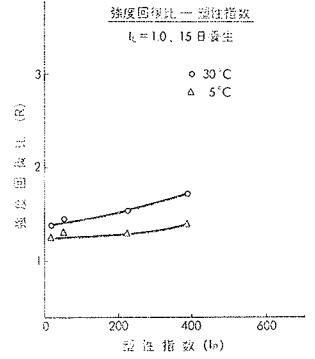


図-14 R-I_p (温度の影響)

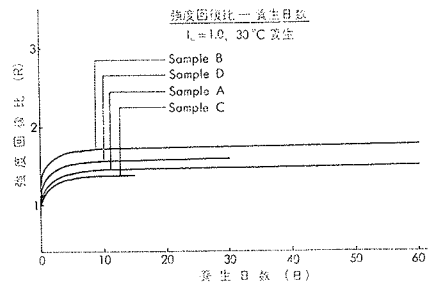


図-15 R-t (土の物性の影響)

し、実際の問題としては工事によるかく乱の程度も重要な要因となるはずである。

このように、この強度回復現象を実際の建設工事に応用するためには、まだまだ遠い道のりが予想されるが、この研究がそのひとつの道標となれば幸いである。

最後に、実験・解析にあたっては、法政大学、山門明雄教授のもとで指導を受けていた升田満穂君の助力に負うところが多いことを付記し、謝意を表します。

参考文献

- 1) 斎藤, 木村, 平間, 土屋: 粘性土の強度回復性状に関する2,3の検討 (その2), 大林組技術研究所報, No.12, (1976)
- 2) 西田, 八木, 松村: 攪乱粘土の強度回復に関する物理化学的考察, 第8回土質工学会講演概要集, (1973)
- 3) Mitchell, J. K.: Fundamental Aspects of Thixotropy in Soils, ASCE, Vol.86, SM 3, (1960)