

# 土のシキソトロピーと路床支持力

正 員 森

麟\*

## SIGNIFICANCE OF THIXOTROPY IN BEARING VALUE OF COMPACTED CLAYEY SUBGRADE

By Akira Mori, C.E. Member

**Synopsis :** The reduction in strength of clayey subgrade soils under pavement was observed, when the subgrade soil was remolded at the equal water content. This result means that the strength of compacted clayey subgrade increases with time. It is due to thixotropy of clayey soil. The thixotropic effect should be considered when strength of subgrade or specimen immediately after compacting is used for deciding the design strength of the clayey soil. This paper deals with the increment of strength on remolded clayey soil for determination of design strength.

**要 旨** シキソトロピーとはゲル状のものが外力によりゾル状になり、また静置しておけばゲル状にかえる等温可逆的な現象であるが、粘土質の土では含水量が多くなるとこのような現象が生ずる。地盤の安定を論ずる場合、その地盤が現在いわゆるゲル状になっているとすればそれはある程度以上の外力の作用によつて軟弱なゾル状になり得るのである。それゆえ実際に加わる外力によつて、地盤がゲル状からゾル状になるか否かを調査することは大切なことである。また現在の地盤がいわゆるゾル状であった場合、この地盤がそのままの状態で静置される期間があればゲル状になつて強度が増加する。締固めた舗装道路路床の場合は後者に属し、締固めた当時より漸次強度が増加してゆくことを路床設計支持力を決定する際考えねばならない。この研究はこのことについて調査したものである。

### 1. 緒 言

従来舗装道路路床の設計支持力の算定の際、試験時における路床状態の規定に多くの不合理な点があつた。最近設計支持力としては路床が舗装後到達する平衡状態についての支持力をとる方法が研究され、試験時の路床のサクシヨンのとり方についての基本概念が合理化された。しかしサクシヨン以外の路床状態についての合理化は未だ解決されていない。

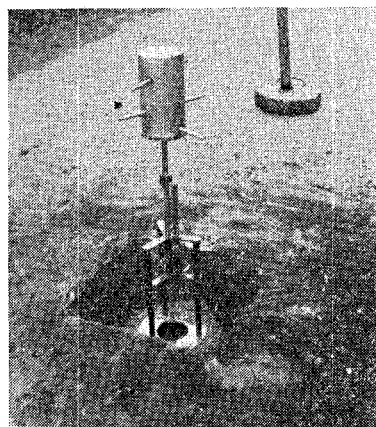
路床が盛土路床（土を締固めて作つた路床）の場合には支持力の決定は締固め土について行うべきことは当然である。また切り取り路床の場合にも路床面は一般にその道路を建設するための自動車交通等のために、乱され締固め路床に近い状態になるのが普通のことと思われる。それゆえ切り取り路床と言へどもこの締固め作用を無視した自然状態のままの土について支持力を決定することは不合理である。従つて盛土路床および乱された切り取り路床では設計支持力の算定は平衡状態のサクシヨンにおいて予想される締固め密度について行うべきであろう。

路床土が粘土質である場合には締固め土の強度は含水量が不変であつても締固め後の静置時間とともに増加する性質と自動車等のくり返し荷重によつて低下する性質がある。このような現象をシキソトロピーと称するが、この現象を考慮しなければ合理的な設計支持力の決定はできない。粘土質土は普通支持力が小さいので、この支持力の少しの差は舗装厚にかなりの影響をするから、適切な支持力を求めることが必要である。

### 2. 実際の路床とその路床土の締固め直後の貫入試験の比較

実際の路床と締固め直後の強度差を調べるためまず構築後数年以上たつて平衡状態に達した舗装道路路床においてノースダゴタ貫入試験機（写真-1）により 80 Lb 荷重の貫入量を測定した。次にその路床土をそのままの含水量でモールドに JIS の標準締固めを行い、モールド底面の貫入量（モールド底面の貫入量はモールド上面のものより少ない）を同一方法で測定し実際の路床の貫入量と比較した。この結果を

写真-1 ノースダゴタ貫入試験機



\* 早稲田大学助教授，理工学部土木教室

図-1 実際路床とその路床土を実験室で締固めた場合の貫入量の比較

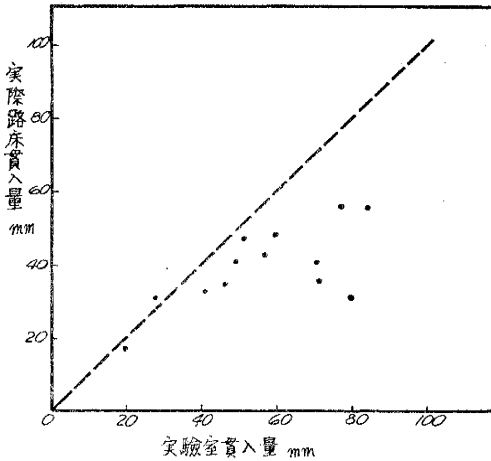


図-2 実際路床とその路床土を実験室で締固めた場合の乾燥密度の比較

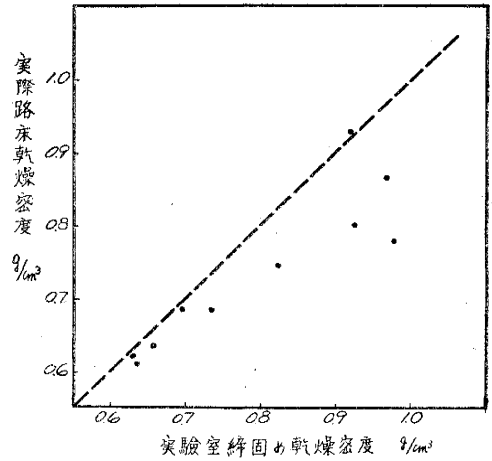


図-1 に示す。なお、ノースダコタ貫入試験機を用いたのは実際路床と実験室において同一の試験機により比較ができて試験機による誤差を除くためである。図-1 から明らかなように、実際路床の貫入量の方が締固め直後の実験室貫入量より一つの例外を除いていずれも小さい。この比較は路床が JIS 標準締固めをされたものとして行つたのであるが、実際路床の密度は図-2 に示すように JIS 標準締固めのものよりかなり小さい。もしも標準締固めのかわりに実際路床の密度に締固めたならば、締固め直後の貫入量は図-1 の標準締固めの土についての実験室貫入量より大きくなる。従つて両者の差はさらに大きくなるわけである。

以上のことは実際路床は締固め直後よりかなり強度が増加していることを意味し、締固め後の時間経過による強度増加現象の方が自動車くり返し荷重による強度低下よりも勝つてゐることを示している。これをシキソトロピー現象から言えばゾルを静置することによりゲルになる現象の方が振動等によりゲルがゾル化する現象よりいちじるしいわけである。

それゆゑ、路床の設計支持力はシキソトロピーによる強度増加を見込んだものをとる必要がある。しかし例外としてシキソトロピーの大きい粘土の切り取り路床がほとんど乱されていない場合には輪荷重等によりゲルがゾル化する現象を生じ得ることが予想され、設計支持力にはこのことを考える必要がある。

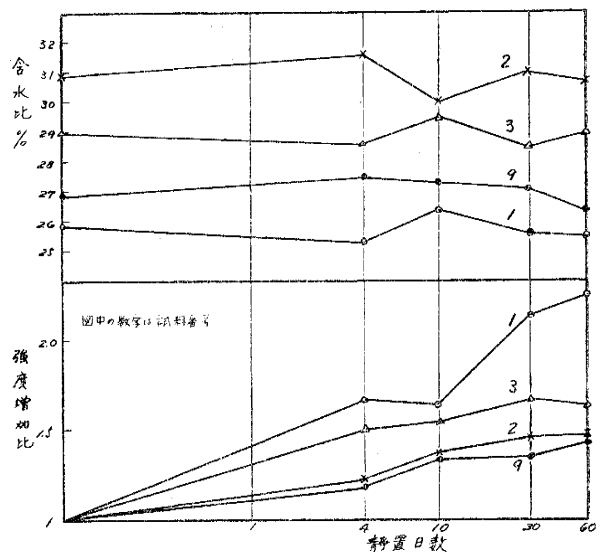
以下本文ではシキソトロピーはいわゆるゾルが時間とともにゲル化して強度が増加する現象のみを意味する。

3. 土のシキソトロピーの測定

締固め路床の設計支持力は締固め直後の支持力にシキソトロピーによる強度増加を見込む必要があることが明らかになつたが、この強度増加の程度を知る必要がある。このために土を締固めて含水量不変のまま保存し、時間経過による一軸圧縮強度の変化を測定した。

締固めに使用したモールドは直径 33 mm、高さ 71 mm のウイilson型のもので、締固め程度はウイilsonモールド付属の 20 Lb 圧力のランマーで5層各 15 回締固めとし、JIS 標準締固めに近いようにした。締固め含水量は路床の平衡状態に近い塑性限界付近とした。供試体はごく薄いビニール膜で完全に包み、これをガラス管に密閉し水中に沈めて蒸発が全然ないように保存した。供試体は一つの土につき同等なものを 10 コ作製し、2 コずつ一組として5組に分け、それぞれ締固め直後、4日、10日、30

図-3 静置日数と強度増加比



口、60日のちの一軸圧縮強度の測定用供試体とした。一軸圧縮強度は2コの平均値をとった。

時間経過による強度増加を表示するため強度増加比を使用した。

$$\text{強度増加比} = \frac{\text{各静置日数の一軸圧縮強度}}{\text{締固め直後の一軸圧縮強度}}$$

静置日数と強度増加比の関係を表-1に示す12種の土について調査した。この結果を図-3, 4.5に示す。なおこの図には強度試験をした際の供試体含水量も示してある。

表-1

試料番号	試料名称	組成			LL %	PL %	PI
		砂分	シルト分	粘土分			
1	南吉見土	7.1	50.7	41.2	41.9	25.4	16.5
2	荒木田土	2.9	68.6	28.5	47.3	32.4	14.9
3	蒲生土	2.3	40.5	57.2	53.1	30.9	22.2
4	松山粘土	5.7	52.3	42.0	85.2	34.3	50.9
5	横浜港土	3.9	60.0	36.1	86.3	47.2	39.1
6	赤羽土*	4.2	76.3	19.5	158.2	115.7	42.5
7	松山土**	29.3	54.2	16.5	71.3	58.1	13.2
8	飛鳥山土**	11.8	70.9	17.3	83.5	66.8	15.7
9	カオリン	0	56.5	43.5	39.8	27.1	12.7
10	ケイ藻土	2.1	53.4	44.5	132.3	104.1	28.2
11	市販粘土	4.3	70.4	25.3	90.7	49.4	41.3
12	ベントナイト	0	3.0	97.0	361.0	45.2	315.8

\* 自然状態のままの関東ローム

\*\* 気乾した関東ローム

強度増加比は土によって異なるが30日もの強度増加比は図-3, 4, 5から1.3~2.4の範囲にあることがわかる。強度増加比と土の性質との関係を種々の面より検討してみたが、モンモリロナイト系粘土を含有するベントナイト、松山粘土の強度増加比が小さいのが目立つた他には両者の間に明瞭な関係はないようである。

シキソトロピー現象は粘土粒子の界面化学的な現象なので主として吸着水の性質に変化を与えることが予想される。従つてシキソトロピーによる強度増加は主に粘着力の増加によるものと考えられる(例えば Terzaghi, Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice 参照)。

#### 4. 保存中乾燥および吸湿をさせた場合の強度増加比

前節で述べたのは締固めた土を含水量不変に保存した場合であるが、実際の路床では含水量が平衡状態になるまでは乾燥、吸湿が起る。それゆえ乾燥、吸湿させて元の含水量にした場合の強度増加比を知る必要がある。

実験方法として前節と同様に作製した供試体を7日間ガラス容器に密閉して含水量不変の状態に保存した後、ガラス管のフタを開放して10日室内で乾燥し、その後13日間にわたり徐々に吸湿させて最初の含水量にした。この時が30日目になるので、一軸圧縮強度を測定して強度増加比を求めた。ここでは供試体4コの平均値をとつて一軸圧縮強度として強度増加比を計算した。この実験は4種類の土につき図-6, 7に示すような途中の乾燥、吸湿の程度を変えた2組につき行ったものである。各土の強度増加比と含水量不変のまま保存した場合の強度増加比と比較したものを表-2に示す。表-2によれば乾燥吸湿させた場合の30日もの強度増加比は含水量不変に保存した場合よりいずれも小さい。しかも乾燥吸湿の程度の大い方の強度増加比が小さ

図-4 静置日数と強度増加比

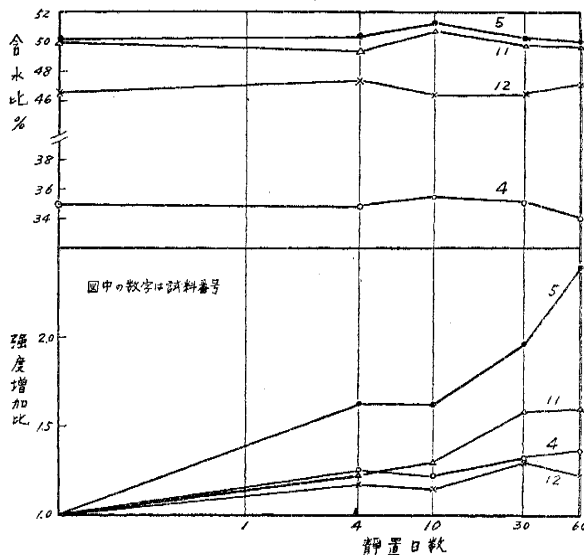


図-5 同上

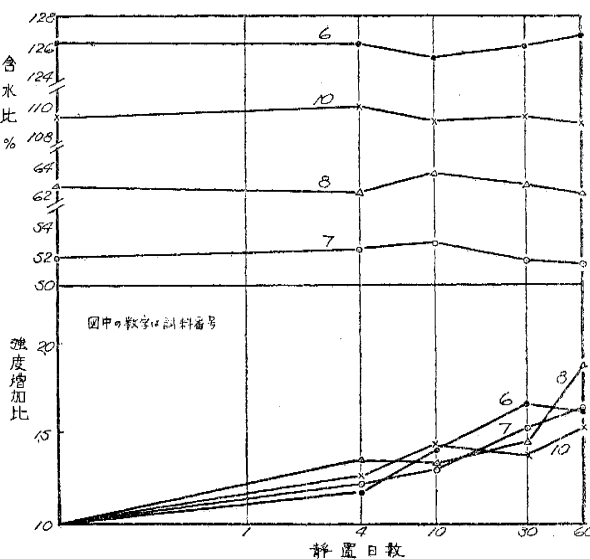


表-2 各保存条件における30日後の強度増加比

	保存中乾燥-吸湿		保存中含水量一定
	(大)	(小)	
南吉見土	1.76	1.66	2.14
荒木田土	1.43	1.28	1.43
松山粘土	1.24	1.20	1.32
カオリン	1.26	1.06	1.35

図-6 保存中の乾燥吸湿状況

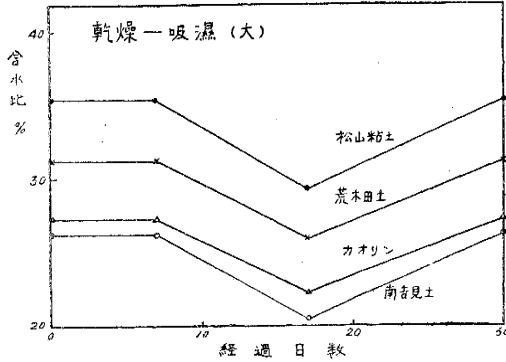
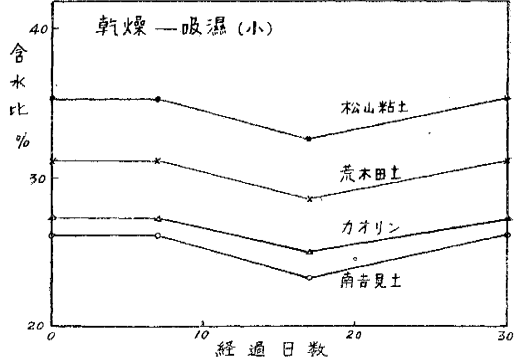


図-7 同 左



くなっている。このように乾燥吸湿より強度増加比が減少するのは強度測定をする直前まで吸湿させているので、土粒子相互間の吸着水の結合度が弱いためと思われる。

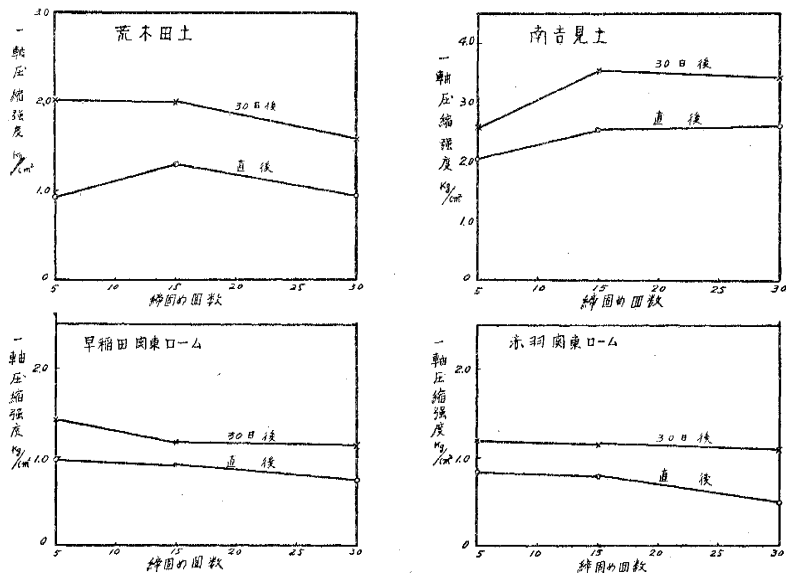
実際の舗装道路路床ではこの実験のように急激な含水量変化は起きないから表-2に示した乾燥吸湿させた場合の強度増加比よりも大きくなるであろう。

5. 締固め程度とシキソトロピー

土は締固め程度を増すと密度が上り強度も大きくなるが、締固め程度がある程度以上になると粒子が接近することによる強度増加分より間ゲキ水圧が増加による強度低下の方が大きくなり、密度が増しても強度は逆に減少するようになる。これは Over compaction と言う現象として知られ、締固めの際に避けるべきこととされている。しかし、これは締固め直後の強度についてのことであつてシキソトロピーを考えた強度についてはない。シキソトロピー現象で強度が増加するのは土粒子相互間の吸着水膜の結合度が高くなるためであることから考えて、Over compaction 現象を起した土は密度が大きく土粒子が接近しているためシキソトロピー現象がいちじるしく生じ強度が他より大きくなるようにも思われる。もしこのような事実があれば路床の締固めの際に考えねばならない問題である。

このために締固め度を種々に変えて Over compaction を起させた土のシキソトロピーを調査した。供試体は塑性限界付近の含水量においてウイソソモールドに 20 Lb 圧カランマーで 5 層各 5 回、15 回、30 回の 3 種の締固めを行つて作製した。この供試体を締固め直後と 30 日保存後において一軸圧縮強度を求め、締固め回数と一軸圧縮強度の関係を調査した。この結果を図-8に示す。図中の各点は 2 コの供試体の強度の平均値である。試料土

図-8 締固め回数と一軸圧縮強度



は4種類であるが30日のちの強度は締固め直後の強度曲線に大体平行した形となり Over compaction をした土は30日のちでも最高値のものより小さい。このことから Over Compaction はシキソトロピー現象を考えてもやはり好ましくないことが明らかになった。

6. 結 論

締固めをした粘土質の土は含水量を減少させず、単にそのままの含水量で静置させるだけで強度が増加する。この強度増加現象は O. Moretto の研究<sup>2)</sup>にもあるように30日以後においても引きつづいて生じ最終的には30日の強度増加比よりも大きくなる。従つて4節で述べたような乾燥吸湿が起つたり、自動車のくり返し荷重の影響を受けても舗装道路路床の一軸圧縮強度としては締固め直後の少なくとも1.3倍にはなると考えてよい。

それゆえ粘土質の盛土路床および乱された切取路床の設計支持力を求めるには、舗装後に到達する平衡状態のサクションにおける供試体の支持力にこのシキソトロピーによる強度増加を見込む必要がある。

本研究は路床調査に御協力下さつた東京都建設局の片野 洋および有山勇次郎の両氏と卒論として実験を担当した学生諸君に負うところが多い。ここに深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) C.R. Foster: Reduction in soil strength with increase in density. Proc. A.S.C.E., Vol. 79, No. 228
- 2) O. Moretto: Effect of natural hardening on the unconfined compression strength of remold clays. Proc. Ind I.C.S. M.F.E. Vol. 1, p. 137

(昭.32.7.15)

正 誤 表

土木学会論文集第54号(昭和33.2.)登載

正員 菅内 敏：水面上に浮動する無限に広い板の振動——一般式の誘導——

ページ	行	誤	正
64	11 行 目	$\leq$	$\leq$
65	下から2行 目	$\left[ \frac{L_2 \mathcal{E}}{p^2 + 2 \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{G}} p + \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}}} \right]$	$\left[ \frac{L_2 \mathcal{E}}{p^2 + 2 \frac{\mathcal{E}}{\mathcal{G}} p + \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}}} \right]$
67	15 行 目	$\frac{g}{4\pi^2 \gamma} \iint_{-\infty}^{\infty} d\alpha d\beta \iint_{-\infty}^{\infty} d\xi d\eta \int_0^t \dots \dots \dots$	$\frac{g}{4\pi^2 \gamma} \iint_{-\infty}^{\infty} d\alpha d\beta \iint_{-\infty}^{\infty} d\xi d\eta \int_0^t \dots \dots \dots$
68	下から8行 目	$f(\xi, \eta) \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}} g \cdot \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \tanh(H\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}) \cdot \{1 \dots$	$f(\xi, \eta) \frac{\mathcal{G}}{\mathcal{G}} g \cdot \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} \tanh(H\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}) \cdot \{1 \dots$