

いわゆるヘドロのチキソトロピーについて*

正員 工学博士 松尾 春雄**
准員 山内 豊聰***

EXPERIMENTAL STUDIES OF FUNDAMENTAL PHENOMENA ON THE THIXOTROPY OF MARINE CLAY

(JSCE Nov. 1953)

Dr. Eng., Haruo Matuo, C.E. Member, Toyotoshi Yamanouchi,
C.E. Assoc. Member

Synopsis A kind of natural clay shows occasionally the phenomenon of isothermal, reversible sol-gel-transformation, namely, "thixotropy". The authors emphasize that soil mechanics, especially on foundation, should be investigated also from such a point of view. They performed some experiments on the thixotropy of the reclaimed marine clay at Hakata Harbour both statically and dynamically in laboratory. This paper reports the fundamental phenomena of thixotropy of the clay, that were manifested in the experimental studies.

要旨 土にもチキソトロピーと称せられる等温可逆ゾル・ゲル変換(isothermal, reversible sol-gel-transformation)の性質をもつものがあつて、これがとくに基礎の安定に関し、土質力学的に問題となることが考えられる。本文はヘドロといわれる海底粘土を、博多港における浚渫埋立地から採取し、静的及び動的に室内実験を行つて得た、チキソトロピーに関する基礎的な現象について報告する。

I. まえがき

一般にチキソトロピー現象は、いまだ圧密の十分進行しない岸壁埋立土及び埋立地が、とくに地震動をうける場合の土圧及び地盤の支持力、また交通機関、動力等の振動に対する地下粘土層の支持力及び安定を考慮する場合、また粘土層中の杭打施工に関しても重要な問題である。なおこのほか、斜面の安定やアースダムのコアの安定にも関係することがある。

ゲル(膠化体)状を呈しているある種の膠質系が、振動、衝撃あるいは攪拌等の機械的な外力をうけると、等温的にゾル(膠質溶液)状に変化し、放置すると再びもとのゲル状にもどるといふ現象に対して、T. Peterfi (1927) が to change by touch の意義をあたえて、"チキソトロピー (thixotropy)" と名づけた。化学の分野では"揺変"なる訳語をあたえている。その現象のきわめて顕著なものに、ベンゼンを媒質とした酸化亜鉛があり、このほか種々の膠質系においても、この現象が確認されている。これら膠質系の

中には粘土があり、粘土層に対する杭打の場合については、現場においてしばしば経験されることである。機械的な外力として、地震動が考慮されることは、すでに早く寺田博士¹⁾が指摘されており、また千谷教授等²⁾は、大阪市築港附近の地下粘土層のチキソトロピー性に着目せられた。このような土に対しては、前述の諸問題に関して土質力学的に、従来と異なる見地からも、究明されねばならないと考える。

チキソトロピーは、膠質懸濁液における2粒子間の牽引力と反撥力から説明した H. Freundlich の理論³⁾をはじめ、その他二、三の説明があるが、いづれの説明にも欠陥がみとめられるにしても、この現象はある局限した時間内で可逆的である場合をいつているのであるから、正確には粘土のリモールド効果 (remold effect) とは区別されるべきである。

チキソトロピーは、必ずしも粒子の大きさが全部膠質物である場合とはかぎらない。活性粘土 (active clays) といわれるような粘土は、たとえその混合比率が小さくても、全体の性質に影響することがいじめるしいので、多量の砂の中にあつても一つの膠質系として振舞う場合がある。しかしまた、すべての膠質系がチキソトロピー性でないものはもちろんであり、たいていの場合に、電解質の種類と濃度を重要な条件とし、また粒子が非球形である場合に限られるようである。これらのことはチキソトロピーが、ゾル中の粒子の互いに粗な詰合せに関することを示しちようどシルト質においてみられる正のダイラタンシー (positive dilatancy) とは反対の関係にある。

II. ヘドロの特性^{4), 5)}

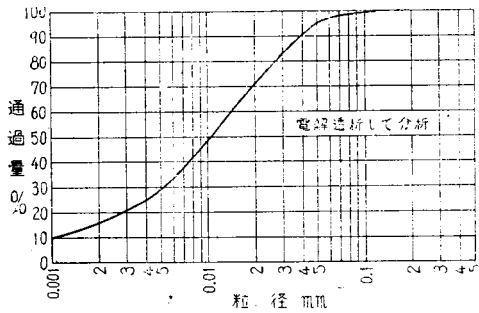
現地土のチキソトロピーについては、いまだよく

*第7回年次学術講演会にて講演したものに一部修正を加えた。

**九州大学教授、工学部土木工学教室

***同上 助教授、同上

図一 試験ヘドロの粒度



究明されていない。本研究の実験に使用した土は、博多港博多地先埋立地（昭和 12 年竣工）の浚渫土による埋立ヘドロである。このヘドロは実際問題として、岸壁の安定に関係がある。ただしこの試験のための試料は、地表面下 1~2m 附近で採取した。その粒度は図一に、物理及び化学試験の結果は表一に示した。

表一

| 物理試験 | | 化学試験 | |
|--------|--------|--|--------|
| 粒子の比重 | 2.63 | SiO ₂ /Al ₂ O ₃ | 2.54 |
| 液性限界 | * 110% | SiO ₂ /R ₂ O ₃ | 2.46 |
| 塑性指数 | * 74% | 灼熱減量 | 16.98% |
| 収縮限界 | * 25% | 有機物 | 3.3% |
| 遠心含水当量 | 50% | pH 値 | * 7.5 |

* 乾燥しないで測定

また現場における深さと含水比の関係は明らかにしていないが、浚渫地でしらべた海面下のヘドロについては 135% であつた。この種のヘドロがもっている種々の複雑な特性は、次の諸点に起因すると考える。

- (1) 微粒子が多量である。
- (2) 粒子が多く扁平である。
- (3) 媒質に多量の塩分を含む。
- (4) 腐植が粒子に吸着している。

これらは結局、粒子の界面現象にいちじるしく影響する。その一つの現象として、粒子が粗な詰合せを呈し、チキソトロピーを示すことが予想される。

このヘドロが独特の暗緑色であること、顕微鏡の観察によれば多く半透明の不規則形状の扁平粒子であること、並びに電子顕微鏡、化学分析、熱分析及び X 線試験の結果を総合して、その粘土鉱物は、緑泥石、イライトあるいは海緑石の夾雑物であると判断される。これらに関する詳細は引用文献を参照せられたい。

なお以下すべての実験において、ヘドロの膠質性をかえないために、試料に対する一切の乾燥、加熱を避けた。

III. 乱したゾルの塑性流動

扁平粒子のゾルが塑性を示すことは、粒子の界面現

象から考えて当然のことである。この塑性をしらべるため著者は毛細管による流動試験を行った。この試験における塑性は正の降伏値 (yield value) をもつて表現される。

塑性流動の特異な粘性を、チキソトロピーと結びつけて考えることは、早く流動学者によって行われており Goodeve (1938) は $\dot{\gamma}$ を S とし、見掛けの粘性係数を η 、残留粘性係数を η_0 として、

$$\eta - \eta_0 = \theta (1/S)$$

をみちびき、 θ をチキソトロピーの係数とした。 F を単位面積当りの剪断力とすれば、 $F/S = \eta$ であるから、

$$F = \eta_0 S + \theta$$

となる。

次に層流における速度勾配を D 、単位面積当りの剪断力を τ として、

$$D = 1/\eta(\tau - f)$$

が、Bingham の式として知られている。ここに f は Bingham の降伏値である。Goodeve の式は $S=0$ のとき $F=\theta$ であり、 θ は正確に Bingham の降伏値 f として定義され、 θ と f とは一致する。従つて、降伏値によつてチキソトロピーか否かを決定できると思う。このことを疑問とする説もあるが、著者の考えではチキソトロピーの共存なくしてゾルの塑性はあり得ないと信ずる。

毛細管流動試験では、 D 及び τ の一尺度として、それぞれ単位時間の流動量 Q 及び適用圧力差 P との関係を図にあらわし、その曲線から降伏値を決定できる。毛細管による塑性流動に対して流動学の立場から Reiner 及び Buckingham が、Poissuille の式を修正してみちびいた次の式⁶⁾がある。

$$Q = (\pi R^4 / 8 l \eta) (P - 4 p / 3 + p^4 / 3 P^3) \\ \approx (\pi R^4 \mu / 8 l) (P - 4 p / 3)$$

ただし $p = 2 l f / R$

ここに、 R : 管の内半径、 l : 管の長さ、 $\mu = \frac{1}{\eta}$: 流動係数、 p : 常数である。この式によつて、降伏値は P_0 を $Q=0$ における圧力差として、近似的に $f = (R/2l) (3 P_0/4)$ から、また直線部の傾斜から $(\pi R^4 \mu) / (8 l)$ を、従つて流動係数 μ を計算できる。

著者は、内径 1.72 mm、長さ 39.3 cm のガラス毛細管の両端に内径 6.71 mm、長さ 50 cm の細管を接続し、これに試料のゾルをみだし、空気溜りを経て両端に種々の圧力差をあたえて流動せしめ、圧力差と流動の割合との関係を見出した (図一2)。この図にもとづいて降伏値を計算し、含水量との関係を図一3 に示した。このように降伏値が非常に大きくなるのは含水量比 200% 附近であり、また降伏値がほとんど無視できる

図-2 毛細管流動による圧力差と流動量の関係
Relation between Pressure Difference and Flow Rate in Flow Test through Capillary Tube

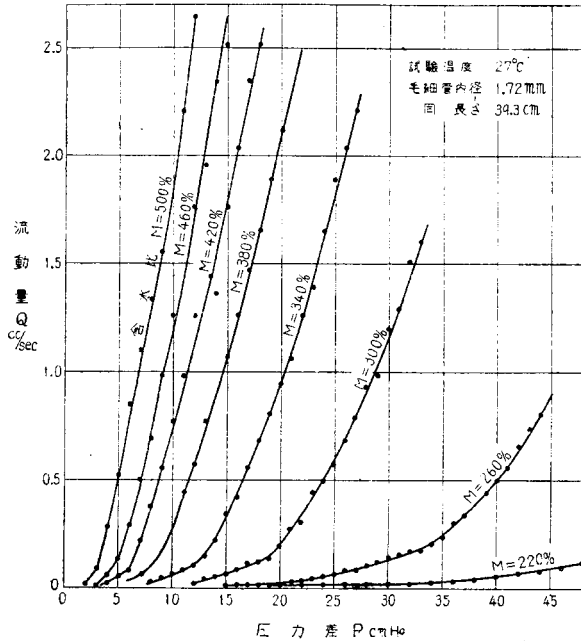


図-3 含水量と降伏値の関係

Moisture Content/Yield Value Relationship

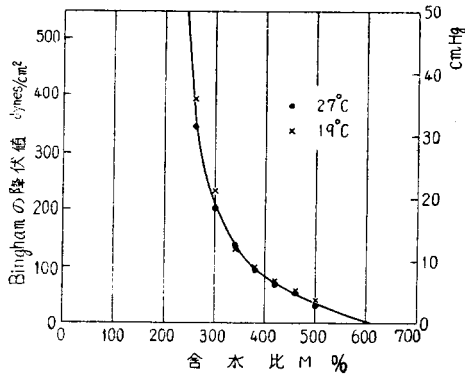
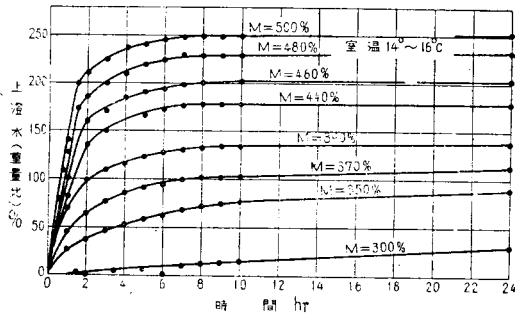


図-4 静置時間と上澄水量の関係
Elapsed Time/Coagulation Water Contents Relationship for Sol

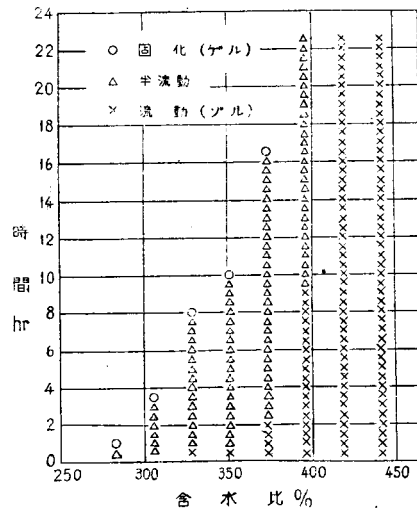


のは大体含水比600%である。流動曲線は、実際には正しい直線を示さず彎曲するから、その延長による切片及びその勾配はあまり正確には決定できない。この試験で得た降伏値とチキソトロピーとの関係は次節でのべる。

IV. ゾル→ゲル変換の性質

現地のヘドロを乾燥しないまままで内径約15mmのガラス試験管にとり、海水を加えて完全に分散し、凝結沈降の進行状態を試料の実質部分の重量に対する上澄水の重量比でしらべたのが図-4である。一方、これらのゾル→ゲル変換を観察したのが図-5である。この試験は、最初 Freundlich が用い、現在でも化学の分野で普通行われる方法にしたがい、試験管を逆にしても試料が流れなくなるまでの時間を固化時間とするもので、ここでもかりに示した固化、半流動、流動の間には、もちろんはつきりとした区別はない。とくに固化時間が長くなるほど正確さを低下する。また観察のための動作によって試料が乱されることをまぬかれないので、何度も試験をくりかえすことを必要とした。

図-5 試験管観察による固化時間
Solidification Time Observed by Test Tube for Sol



分散媒は海水であり、土粒子が凝結するのはもちろんであるが、図-4と5の結果を比較すると、含水比350%以上では含水比が増大するにしたがつて凝結沈降は固化に先立っていちじるしく進行することがわかる。従つてかかる高い含水比でのゲルは存在しないから結局含水比350~250%という比較的狭い範囲において厳密な意味のチキソトロピーが問題になる。そ

の範囲の含水量でも、なお凝結とチキソトロピーとはある程度平行現象としてあらわれている。Freundlich は両現象の相違を粒子間隔から考えたのであるが、実際にはすべての粒子の大きさと間隔が一樣ではないのであるから、両現象が平行して起ることは当然である。含水比 300% 以下の試料における上澄水は、凝結というよりはむしろシネレシス(syneresis)*として考えられる。なお、電解透析した試料についても、試験管によつてゾル⇌ゲル変換が実際にみとめられたが、このことはこのヘドロのチキソトロピーは、粒子の扁平に起因するものが少なくないことを示していると思う。

チキソトロピーを定量的に測定するため、著者は特別の貫入量試験器**を使用した(図-6)。これは落下部分にとりつけた対称な2本の脚を水銀槽にひたし、浮力をあてて落下に対する抵抗を加えたものである。測定にあたっては、試料の表面に貫入円筒の下面を接し、Aをおさえる。この実験では実際に微小時間で貫入は停止するので、この値を貫入量として貫入時間は無視することにした。また上部の皿にのせた分銅によつて適宜貫入量を調節することができる。最初試料表面にかかる荷重を 3.1g として試験を行った。このときのヘドロの各含水比に対する流動度 μ と貫入量との関係を、図-7 に示した。

図-6 貫入量試験機
Penetrometer for Gel
= Sol Measurement

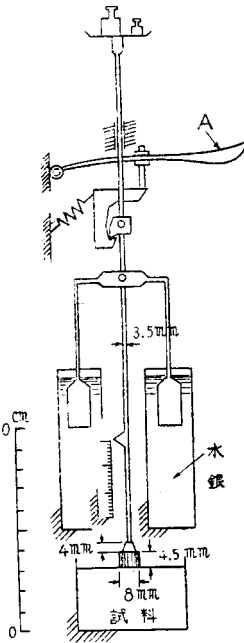


図-7 流動係数と貫入量の関係
Fluidity/Penetration Length Relationship

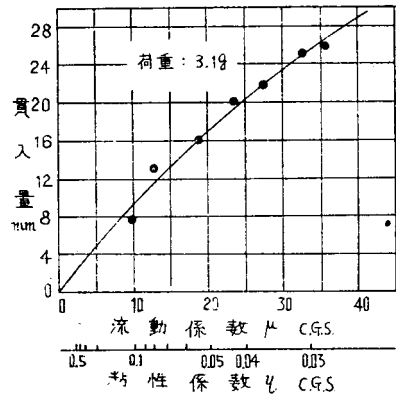
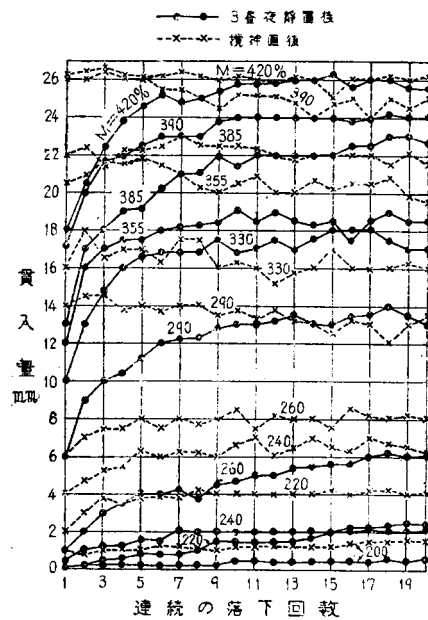


図-8 ゲル攪拌前後における連続の貫入回数にともなう貫入量の変化
Relation between Continuous Penetration Number and Penetration Length for Gel and Sol



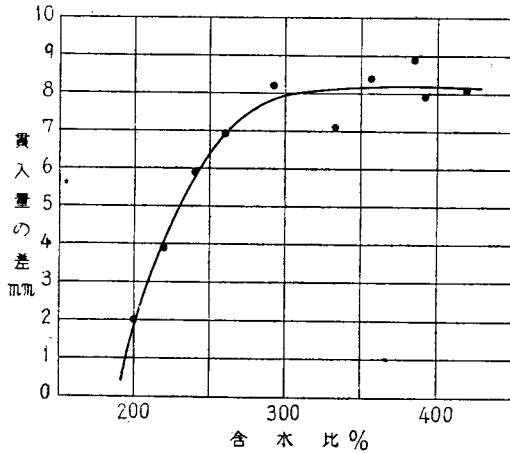
内径 5.5 cm、深さ 3.5 cm の小容器に、海水を媒質として含水比を異にする試料を 3 昼夜静置した後、大体 10 sec 間隔の連続落下により表面からの貫入量を測定し、次に試料を完全に攪拌して同様の測定を行うと、図-8 のようになり、前者が次第に貫入量を増加するのに対し、後者では貫入量はほぼ一定である。この相違は試料のチキソトロピーを示したものである。

含水比が小さいほど、一定の貫入量となるまでの落下回数は多い。この結果の攪拌前後の貫入量の差(落下回数 1 のとき)を図-9 に示した。

その結果、含水比 260% 以上では大体その差は一定であり、それ以下では急速に減少し、含水比 200% 附近でその差はほとんどなくなる。ハワイにおけるチキソトロピー性火山灰質粘土も含水比 200% 以上で盛土がとくに困難になると報告されている。図-9 の関係を、さきの含水比-降伏値(図-3)及び含水比-固

*ゲルを放置するとき、結合していた水の一部を放出して容積を減少する現象をいう。
**高橋式精密硬度計といわれるもの。

図-9 ゲル攪拌前後の貫入量の差
Relation between Moisture Content and
Difference of Penetration Length for Gel
and Sol

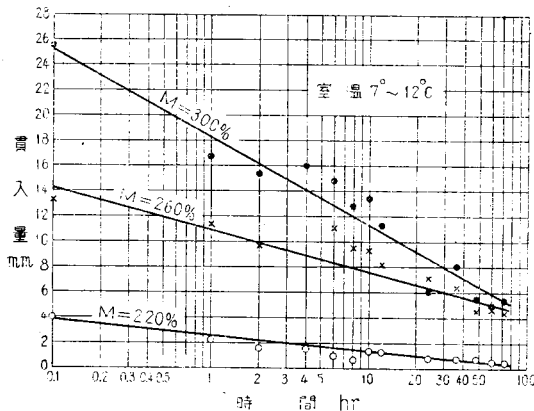


化時間(図-5)と比較すると、次のことがいえる。

- (1) 試験管で観察することのできるゾル→ゲル変換の最低の含水量は、毛細管流動試験における塑性限界の付近にあつた(図-3のM=250%附近)。
- (2) チキソトロピーのおきる範囲において、含水量が小さいほど固化時間は短かいが、流動係数の変化は小さくなる。
- (3) 含水量約250%以下では、真のゾル→ゲル変換ではないから、広い意味のチキソトロピーに属する。

次にゾル→ゲル変換と静置時間との関係を、貫入量でしらべた結果が図-10である。この場合の試料表面にかかる荷重は3.3gとした。その試験の結果、貫入量を時間の対数とは大体直線関係にあり、著者は

図-10 時間経過にともなうゾルの貫入量
の変化
Relation between Elapsed Time and
Penetration Length for Sol



その傾斜をチキソトロピー指数と名づけることとした。 d を貫入量(mm)、 t を時間(h)とすれば、各含水量における両者の関係は次式であらわされる。

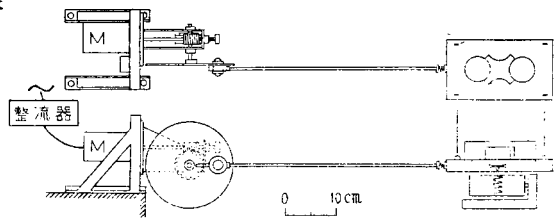
含水比 300% : $d = 18 - 7 \log t$
 " 260% : $d = 11 - 3.5 \log t$
 " 220% : $d = 2.5 - \log t$

なお、いわゆるレオベキシー (rheopexy) すなわちリズムカルな運動をあたえるとき、ゾル→ゲル変換が速くなる現象は、このヘドロについては明らかでなかつた。

V. 振動によるゲル→ゾル変換の性質

チキソトロピーにおけるゲル→ゾル変換を、振動の諸要素についてしらべることは実際問題と関連して重要である。このため、図-11のような小型の卓上振動台を設備した。この振動台は、27 volt の直流モーターを使用し、モーターの回転をウォームギヤによって減速し、これを偏心装置を経て水平運動にかえ、懸吊

図-11 振動台
Vibration Desk for Gel→Sol Experience



した台を水平振動するようにした。回転数は電圧調節により、また振巾は偏心量によって変更した。この装置の振動性能は次のごとくである。

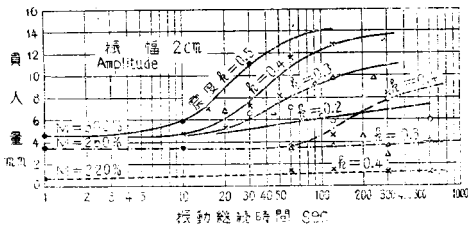
- 振巾 2~6 cm
- 週期 0.4~1.2 sec

実験では、ゾル試料をさきと同じ小容器に入れ一昼夜静置した後、容器を振動台に固着し、振動をあたえた直後貫入量を測定し、そのゾル化の程度をしらべた。

1. 振動継続時間との関係 一般構造物の振動に対する安定計算には、振動の継続時間は問題にされていないが振動によるゲル→ゾル変換は、安定した粒子及び水分子が配列を乱され、粒子間の反撥力が活潑になるためであると想像されるから、振動の継続時間と密接な関係がある。

含水量 300%、260%、220% の3種の試料について、振巾を2cmとし各震度における振動継続時間と貫入量の関係をしらべた結果が図-12である。チキソトロピー崩壊は、試料の壁面との境界面からさきにおきるので、ゲル体は徐々に揺動をおこすのであるが、

図-12 ゲルの振動継続時間と貫入量の関係
Relation between Vibration Time and Penetration Length for Gel



振動後の貫入量は試料の中央で測定したので、揺動の影響は比較的小さいように思う。

この試験でわかったことは次のとおりである。

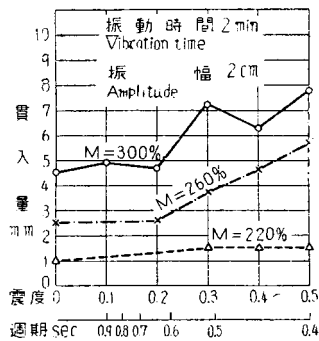
(1) 振動の作用は含水量によって相当の差違があり、含水量が高いほど短時間に影響があらわれる。この傾向は前の静的な試験の場合と同様である。

(2) 各含水比においても、週期、従つて最大加速度が問題である。

(3) 震度 0.5 (週期 0.41 sec) では、含水比 300% 形でも 10 sec 以内ではほとんど問題とならなかった。

2. 加速度との関係 振巾を前と同じく 2cm とし、振動時間を 2 min とし、週期をかえ、最大加速度と貫入度との関係を取りあげてしらべた結果は図-13 である。その結果、加速度の増大にともなつてゾル化の

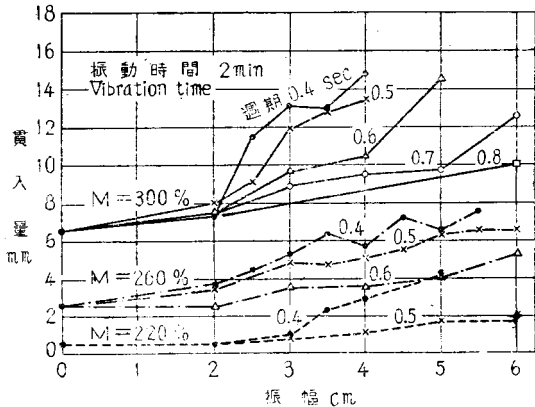
図-13 ゲルに対する震度と貫入量の関係
Relation between Degree of Seismicity and Penetration Length for Gel



効果は大きくなつてゐる。しかし震度 0.2 (週期約 0.65 sec) 以下では貫入量の変化は僅少であつた。チキソトロピー性ゲルが、超音波をうけてゾル化することが知られており、振巾を一定にしもつばら週期をかへているこの試験では、その効果が全く加速度によるものか、または週期にも関係があるのかはまだ明らかにされていない。

3. 振巾との関係 同じく振動時間を 2 min とし、

図-14 ゲルに対する振巾と貫入量の関係
Relation between Amplitude and Penetration Length for Gel



各週期について振巾の影響をしらべた結果は図-14 である。その結果同一週期においても、振巾をかへることによつて最大加速度を変化するとき、その増大にともなつて影響も大である。

ゾル→ゲル変換のきわめて顕著なものについては、ゾル化の過程にある試料が容易にゲル状としての安定な粒子及び水分の配列にかへりやすいから、自然、振動週期が問題となり得るが、本試験のヘドロ程度のものにあつては、いちじるしくはゲル状回復の猶予をあたえないので上記の結果が得られたのであると思ふ。

以上の振動実験も、振動の範囲が限られていること、試料の大きさが小さいこと等について不備な点があり、今後とくに小週期の実験を必要とする。

VI. 結言

この実験的研究から明らかにされたことは、粘土の厳密なチキソトロピーは、在来経験された地震動の範囲では、多量の含水量(このヘドロの場合、含水比大体 250%)で始めて問題になるということである。しかしさらに広い意味でのチキソトロピーは、それより低い含水量でも問題になる。振動によるゲル→ゾル変化は、500 gal 以下の水平加速度では必ずしも容易に起るものではないことがわかつたが、この実験が無載荷でしかも小さい容器で行つたものであることを考慮しなければならない。著者は、載荷重のある実際の岸壁では在来の地震時の現象から判断して、この現象が地震時の岸壁安定に大きな影響をあたえていることと信ずる。なおこの現象は、振動中の粘土の剪断抵抗力、圧密の進行及び間隙水圧の増加と関連せしめて研究しなければならない問題であつて、これについては引つづき研究を進める予定である。

本研究に關し、九州大学理学部佐々木教授及び松浦

助教授に御助言をいただいたことを附記し、深く謝意を表する。

文 献

1) T. Terada : Colloids and Seismology, 地震研究所彙報, No.13 (昭.10) p.562~568.
 2) 森田徳義・千谷利三 : 大阪市築港附近における土質の膠質学的研究 (第1報), 日本化学会誌, Vol.60, No.9 (昭.14.9) p.826-830.
 3) H. Freundlich : Thixotropy (1935) p.12-14.
 4) 山内豊聰 : いわゆるへドロの特性について, 九州大学工学集報, Vol. 26, No.1.

5) 山内・田中信也 : 特種試験によるへドロの研究, 土と基礎に発表予定。
 6) E. Buckingham : Proc. Amer. Soc. Test. Mat., 21, 1154 (1921), M.Reiner : Koll. Z., 39, 80 (1926).
 7) K.B. Hirashima : Highway Experience with Thixotropic Volcanic Clay, Highway Research Board Proc. of the 28 Annual Meeting (1948) p.488.
 8) 前出 3) p.26.

(昭.28.7.6)

堰上流の堆砂現象に関する実験¹⁾

正 員 杉尾捨三郎*

EXPERIMENTS ON THE SEDIMENTATION ABOVE A WEIR

(JSCE Nov. 1953)

Sutesaburō Sugio, C.E. Member

Synopsis Fastening a low weir across a rectangular experimental flume and supplying unigranular sand and water from upstream, the author observed the process of sedimentation and the variations in profile of water surface. In this paper the results of the experiments are described chiefly.

要旨 矩形水路の途中に低い堰を設け、上流から水と均一粒径の砂とを流して、堆砂の進行状況と水形縦断面の変化を実測した。本文は主としてその実験結果を記述したものである。

1. 緒 言

土砂の流出量の多いわが国の河川では、土砂による堰堤の埋没はきわめて重大な問題であるにもかかわらず、従来土砂の堆積現象を水理学的に検討した例をあまり見ない。本研究はこの問題をもつとも基礎的に検討するため、浮遊土砂のない、掃流物質 (bed load) のみによつて堰が埋没される場合について、次のような努めて単純な条件のもとで実験を行つた。すなわち、水路床勾配が一定の矩形断面水路を用い、流量を一定にして上流から粒径がほぼ一様な砂をほぼ一定速度で補給したときの砂の堆積状況と水面変化を 30 分ないし 1 時間ごとに測定した。その結果、二、三のいちじるしい堆砂の特色を明らかにすることができた。

2. 実験装置と実験方法

[A] 実験装置 (図-1)

場所 : 京都大学工学研究所水理実験室

水路 : 巾 40 cm, 有効長 10 m の檜製矩形鉋げづり水路

静圧管 : 径 2 mm の銅製ピトー管 9 箇

水面測定器 : 1/10 mm よみのポイントゲージ 3 台

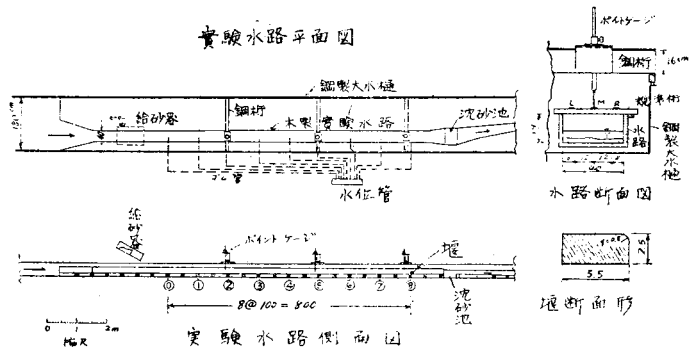
給砂器 : 京都大学で使用中的のもので、4 箇の gate を通して乾燥砂を投下する装置。gate の開度と motor の回転速度を変えることにより給砂量を調節できる。

堰 : 木製, 高さ 2.5 cm, 天巾 5.5 cm

[B] 測定方法

使用砂 : 木津川産の砂で、ほぼ一様粒径のものを選

図-1



*信州大学助教授, 工学部土木教室