練土の荷重と変形の間の履歴現象

粘土—水系の研究 (第 II 編—2)

素 木 洋 一

(東京工業大学)

Studies on Clay-Water System, (II-2)

Stress-Strain Hysteresis of Clay-Water Mass

By Yoichi SHIRAKI

(Tokyo Institute of Technology)

Experiments with alternating torsional stresses on clay bars are described. The stress-strain hysteresis loops so obtained show that repeated cycles produce not only a softening but also a hardening of them which are apparently analogous to the thixotropy, dilatancy, and rheopexy which occur in clay slips. The "backlash" phenomenon is also discussed in detail, and some notices in working on jiggering are mentioned.

緒 言

ロクロ成形で練土を引き伸ばしたり、圧縮したりすると可塑性が変化したり、あるいはその間に受ける抵抗が急に変化することは、われわれのよく経験することである。この原因を Stephenson¹⁾ は粘土の Thixotropy で説明し、Norton²⁾ は金属と同様に Strain Hardening (歪硬化) の現象と見た。Macey³⁾⁴⁾ は水簸した耐火粘土と原土とについて Stress-strain Hysteresis を比較し、前者は荷重の割合に小さな部分で変形が急に増大し、それ以上の外力に対してはかえって変形の割合が小さくなり、外力を前者と逆方向に加えた場合も変形は同じ状態を示し、Hysteresis の loop が出来ることを発表し、この性質を backlash なる名称で呼び、この原因としては水膜によって粘土の偏平な粒子がすべるためであると見た。それで水簸しない原土、あるいは大多数の粘土は "つまり方" (Packing) が微粒子のために改良されるので backlash を示さないと説明した。

筆者は先の実験で、微細粒子の多い粘土でも含水量が多くなるとこの backlash の現象を示す粘土が多数存在することを見たので、本問題についてさらに詳細に研究した。

実験方法と実験結果の考察

この研究では振りによる可塑性の測定装置と同一のものを使用し、荷重を反対方向に加えるために滑車に受皿を2個つけた。

実験方法、試験体の作り方その他はすべて先の場合と同一である。試料は土岐口蛙目粘土、村上粘土、天草陶石とベントナイトの4種類で、含水量を変えた試験体について荷重の大きさ等を変えて実験した。

実験 I: 土岐口蛙目粘土、含水量 32.8% と 33.1

%の両者について第1象限と第4象限の間だけで Stress-Strain の関係を見た。Fig. 1 (a) に見られるように、荷重を加えて得られた変形と、荷重を取り去りさらに逆方向に荷重を加えて変形が丁度0に戻った

Fig. 1 Stress-Strain hysteresis loops in torsion of Tokiguchi Gaerome clay. ("Plastic")

時の状態を見ると、荷重にして約 150 g の差が見られる。すなわち弾性変形 (elastic deformation) と弾性余効 (elastic after effect) の両者の残留歪がかなり大きく残り、一度変形を降伏点以上に生ぜしめた後にはその変形を元にもどすのに要する力は約半分てよいことを示している。次に荷重をさらに逆方向に、すなわち最初と同様に加えてゆくと弾性変形が最初よりやや大きくなってから backlash が現われる。荷重を前よりもいくらか少くして次に逆方向に加えてゆくと、変形が 0 になるに要する stress の大きさは増加する。Fig. 1 (b) ではこれらの状態が一層明瞭に見られ、特にいちじるしい差異は backlash が第4象限に現われる点と、第4象限で弾性変形を行う範囲が極めて大きくなっている点である。また連続変形を行うと

strain の大きさが増加することと backlash が一層大きく現われること、および strain を 0 にするに要する stress が増加してゆくことである。両者共に同じ状態を示す部分は、荷重を取り去り次に逆方向に加えたときに変形が急激に進む点である。これらの事実から見ると変形の状態が変化するのは水分の移動によって生ずる thixotropy が原因すると考えた方がよいようである。また、backlash を示す傾向としては、ある stress までは strain が連続的に変化し、この終局の点で粒子の packing が新たに別の状態となり、そのために dilatancy が現われ、水分の移動がある部分に到着くと見た方がよいように思われる。この考

え方は第 4 象限に示される降伏点のいちじるしい増加と、変形量が増えることから引出すことが出来る。

実験 2: 土岐口蛙目粘土、含水量 32.5% の練土について変形の少い範囲内で Stress-strain 曲線の hysteresis を調べた。Fig. 2 (a) に見られるように、荷重を少くして変形をある程度に止めた場合には、荷重を逆に加えて生ずる変形は連続的であり、急激な変位は見られないが、変形が 0 となった点 A からさらに荷重を加えると逆の変形は急激に小さくなってゆく。A 点をこえて逆に荷重を最初と同じだけ加えると、変形は第 1 象限に比較して 4° だけ小さくなる。さらに

荷重を除いてゆくと荷重 0 で弾性変形は -8° だけ生じ、最初の 13° に比して 5° だけ少くなる。さらに荷重を加えると変形 0 の B 点で再び変形が急激に減少する。1 回の hysteresis loop を画かせると最後の変形量を最初の時よりも小さくなる。連続繰返した場合にも、第 1 回の hysteresis と傾向は同じになるが、一定荷重に対する変形量はいくらか変化する。しかし、第 3 象限の変位点は同じである。

含水量 33.2% の試料について変形量を大きくした場合の状態を Fig. 2 (b) に示す。この試験体では荷重 180 g の点で backlash を示す。荷重 250 g を加えて変形を起させ、次に荷重を除いてゆくと最初のわずかな所では弾性変形がほとんど生じないことが明瞭に現われる。荷重を 0 とした場合の弾性変形は (a) 場の合よりもはるかに大きくなる。次に、逆に荷重を加えていった場合には backlash は見られない。この点は (a) の場合と全く異なっている。このときは、荷重に対する粒子のすべりが水によってかえって阻止され、荷重に対して粒子群が連続的に移動すると見なければならぬ。第 2 象限では backlash が最初の場合よりもなめらかである。2 回目の hysteresis loop では第 3 象限にわずかに backlash が見られるに至り逆に第 1 象限ではほとんど現われなくなる。本実験から明らかなように、一定荷重に対する変形量は回数によっていちじるしく変化し、(+) の変形量も (-) の変形量もいちじるしく変化し、backlash の状態も異なってくる。さらに弾性変形の大きさは繰返しの回数が多くなる程大きくなる。

含水量 34.0% の試料については荷重を種々変えた場合の hysteresis の状態を調べた。

Fig. 2 Hysteresis loops in torsion of Tokiguchi Gaerome clay. ("plastic")

Fig. 2 (c) では荷重を最高 120 g とした場合で、繰返し変形による hysteresis loop の差は小さいが、最高荷重のところで受ける変形量は異なっていて、しかもその大きさの変化には一定の規則性は認められない。また最初の場合には backlash が認められないが、その後は第 1 象限に見られるに至る。しかし第 4 象限には全く現われない。また第 1 象限と第 3 象限における変形量もかなり異なる。Fig. 2 (d) では荷重を 180 g かけた場合で、第 4 象限では荷重に対する変形量がほとんど直線的になっている。そして、第 1 象限と第 3 象限の変形量は極端に異なり約 1/3 となっている。これはおそらく粒子の配列が限界を距えてしまい、粒子群間に micro-crack が生じ、そこを附着するに要する凝集力または粘着力が破壊されてしまい、一度生じた間隙が逆方向に振ることによっても粘着せず、かえって変形に対する摩擦抵抗が大きくなるためと思われる。したがって、hysteresis loop は異常を示し、わずかな外力によって破壊するに至るわけである。この場合も最初荷重を加えた時には backlash を示すが、その後は認められない。Fig. 2(e) では荷重を 150 g まで加えた場合で、この時の状態は Fig. 2 (d) の場合と全く逆の関係になる。すなわち、第 1 象限における変形量は 4 回目までは大体同じ大きさを示すが、第 3 象限における変形量は回数が増すたびに増加してゆく。また backlash も第 1 象限と第 3 象限に現われるが、最後にはこれが現われずに切断されるに至る。以上の実験で同一含水量でも加える荷重の大きさが異なると変形の大きさが変化するばかりでなく、hysteresis loop の形態も異なり、さらに backlash を起す荷重や、弾性変形の大きさも変形する。

含水量 35.2% になるとさらにこれらの状態が変化し、例えば Fig. 2 (f) に示したように backlash がほとんど現われず、Fig. 2 (d) と似た曲線を示す。しかし Fig. 2 (g) になると、これがまた Fig. 2 (f) と全く異なった状態となり、第 1 象限の変形量が変化し第 3 象限の変形量がほとんど一定となる。そして、繰返し変形を行うと変形量が 2 回目で最大となる。

このように Stress-strain 曲線における hysteresis の状態は含水量によって異なるばかりでなく、加えるべき荷重の大きさ、回数等によっていちじるしく変化を受け、一定の規則性は認められない。また、backlash も現われる状態が異なり、その位置も形態も異なる。すなわち、練土の thixotropy ばかりでなく dilatancy 現象も同時に加わり、さらに荷重が大きいつきには micro-crack が内部に生じ、それを附着するための粘着力が dilatancy による水分の不均衡のために減少したり、摩擦抵抗が同時に変化したりすることのためにこのような変化が起ると見るべきであ

る。さらに rheopexy 現象*も部分的に現われると考えられる。これがいわゆる Norton の strain-hardening 現象と見た原因であろうと思われる。しかし、練土のように、水というものが backlash に大きな影響をおよぼすものであるところから金属の strain-hardening と同じく考えることは同来ないだろう。

* ある種の thixotropy を示すゾルの固化がゆるやかな機械的処理によって促進される現象を云う。

—S. Miall: A New Dictionary of Chemistry, Longmans, New York, 1940, P. 436

実験 3: 村上粘土を試料として同様な研究を行った。本試料は成形による方向性を示しやすい絹雲母と少量の石英との混合物から成るもので、弾性変形が荷重によって大きく変化するものである。

Fig. 3 (a) に示すように、含水量 16.45%, 最高荷重 400 g を用いた場合には最初は backlash が認められないが、第 3 象限に至って、わずかにこれが現われ、第 2 象限から第 1 象限にかけて明白に現われてくる。すなわち、含水量が少い場合でも本試料では backlash が現われ、しかも変形量が (+) 方向に対して (-) 方向では大体 1/2 となっている。村上粘土は種々の実験の結果、比較的わずかな外力で粒子が容易にある配列を取ることが分っているので、この場合の backlash は主として偏平な和湿度の極めて小さな絹雲母粒子が一定方向に並ぶためと考えられる。Williamson⁵⁾ はカオリナイト 60, イライト 30, 石英 10% から出来ているイギリス産 “blue ball” clay が機械的変形を用いずに成形すると、カオリナイトが一定方向に並ぶことを見ていることからこの考え方は妥当であろう。練土の含水量が 18.0% になるとこの関係がさらに明白となる。すなわち、破壊に至るまでには土岐口蛙目粘土と異なり backlash が一層明瞭に現われる。この場合はまた (+) 方向の変形量と (-) 方向の変形量とはほとんど同じ大きさを示している。含水量が 20.1% になると backlash を示す部分が第 3 象限に限られてくる。(Fig. 3 (c)). さらに含水量 21.9% になると (Fig. 3 (e)) 第 1 象限と第 3 象限にわずかにこれが現われ、破壊に至る前の backlash がほとんど認められなくなる。すなわち、dilatancy による水分の移動が偏平でしかも動き易い粒子に対して一様に分布されないわけである。Fig. 3 (e) に示した含水量 24.6% の練土になると、この間の関係がさらに複雑で、一定荷重に対する変形量が、繰返し変形を行うたびに小さくなってゆき、しかも 3 回目になると (-) の変形量がわずかに 4° となってしまう。すなわち hysteresis loop 内の面積が小さくなってくる。このように、粒子のすべりの大きい原料では hysteresis の状態が一層複雑になるが、それらの原因につ

Fig. 3 Stress-strain hysteresis loops in torsion of Murakami clay
("semi-plastic", Sericite and minute silica)

いては蛙目粘土と同様に考えてよいだろう。

実験 4: 鉱物組成から見ると村上粘土と同様に絹雲母と石英より成る天草陶石について実験を行った。

Fig. 4 (a) に示したように含水量 21.6% では第 1 象限と第 3 象限に backlash が現われる。Fig. 4 (b) の 21.9% のものは第 1, 第 4 および第 2 象限に、

Fig. 4 Stress-strain hysteresis loops in torsion of Amakusa Pottery-stone.
("non-plastic" sericite and silica)

backlash が現われる。この点では村上粘土よりさらに複雑な内部構造を取るものと思われる。Fig. 4 (c) のように含水量 25.00% になると変形の回数が増加するにしたがい変形量が増大してゆき、第 1 象限と第 2 象限における変形量は第 4 象限と第 3 象限における場合よりも小さくなる。また最初の弾性変形と見られる部分、すなわち降伏点がほとんど認められない場合でも最高荷重から逆に荷重を除いていく際、この重さが小さい時には変形がぜんぜん認められない。これはい

ずれの場合でも認められる現象であるが、その詳細については次報に報告することにする。

実験 5: ベントナイトは既に説明したように降伏値も最大変形量もそのコロイド性から想像される程大きくない。このような試料では stress-strain hysteresis がどのように変化するかを調べた。含水量 38.6% 37.4% および 42.6% の 3 種類について実験した結果は、Fig. 5 (a), (b), (c) に示すようにいずれの場合も backlash を示さない点が異なっている。すなわ

ち、このような試料では粒子内の水の移動による dilatancy が考えられないわけで、粒子群の間には自由水が存在せず、練土として成形可能な範囲内の水はすべてが膨潤水として取られ、したがって粒子自体は膨潤圧のためにその配列が一定の状態にあると見るべきである。またベントナイトは弾性変性が極めて大きい、これもおそらく膨潤圧の影響と見るべきであろう。

結 論

4 種の代表的な試料について含水量と最大荷重を変えて振りによる stress-strain

Fig. 5 Stress-strain hysteresis loops in torsion of Aomori bentonite.

hysteresis を調べた。結果を要約すると次の通りである。

(i) Stress-strain hysteresis は回数の変化によって、その示す loop 内の面積が変化し、変化の状態には規則性はない。

(ii) backlash は偏平な粒子の多い原料に多く現われるが、粒子形態や微細度に原因を置くことは出来ない。

(iii) backlash は練土の Thixotropy, Dilatancy, Rheopexy の性質ならびに粒子のすべりに対する摩擦

抵抗が水の状態によって変化するために起る。

(iv) ベントナイトのように粒子の膨潤圧のいちじるしいものは backlash を示さないが、このために弾性変形が大きい。

これを実際の製造工程上における操作と合わせて考えると次のようになる。

(v) 粘土や坯土は単に運搬その他の操作で性質が変る。

(vi) 練ったりロクロにかけたりする時の外力や時間によって容易にその性質が変る。

(vii) ロクロで引く場合にその外力に限界があり、また任意の外力において示される弾性変形の大きさが異なる。

文 献

- 1) H.H. Stephenson, *Jour. Amer. Ceram. Soc.*, **10**, 924 (1927)

- 2) F.H. Norton, *Jour. Amer. Ceram. Soc.*, **21**, 33, (1938)
- 3) H.H. Macey, *Nature*, **147**, 146-147 (1941)
- 4) H.H. Macey, *Trans. Ceram. Soc.*, **47**, 259-67 (1948)
- 5) W.O. Williamson, *Amer. J. Sci.*, **245**, 645-62 (1947) (12/7/54 受付)

(354 頁から)

同社の創業の目的は優秀かつ低廉な釉薬を珐瑯業界に供給して、輸出珐瑯鉄器の国際競争力を高めようとする点にあるが、釉薬原価は現在の月 200 t 生産では限界があるのでさらに量産の必要があり、第 2 次月産目標を 400 t として珐瑯釉薬、耐酸耐熱珐瑯の釉薬、さらに陶磁器釉薬を製造するため、新たにアメリカフェロー社で発明した植物性栄養源たる FTE の製造を行い量産化しようと努力しており、これが完成すれば面目を一新するものと期待されている。

セメント

年昨度のセメント販売高 セメント協会ではこのほど 29 年度のセメント需要部門別販売高をまとめたが、これによると全販売高は合計約 1,030 万 t で前年度より約 93 万 t ふえている。

部門別販売高を前年度に比べると、ふえたものは道路橋梁、土木、官公需建築、輸出、駐留軍、セメント製品、その他の 8 部門、減ったものは鉄道、電力、港湾民需建築、鋁業、自家用の 6 部門となっており、①セメントの重要な需要先である民需建築、電力部門向けなどの販売が少しずつ減り反対に土木、道路関係部門の販売がふえたこと、②官公需関係へのセメントの依存度が一般に前年度に比べ高くなったことなどが昨年度の特徴である。

セメント生産ふたたび活発 セメントの生産は昨年末から本年初めにかけて、国内需要が伸悩んだのを反映してかなり不調になっていたが、4 月に入り、各社が春の需要を見込んで増産した結果、再び活発になった。セメント協会の調べによれば、4 月のセメント生産は約 97.8 万 t で、4 月より約 17 万 t と大きくふえ、好調だった前年 5 月に比べても約 3 万 t ふえた。

これは①昨年から本年初めにかけて、各社の増設が盛んであったため、生産能力が昨年同期に比べかなり大きくなったこと、②このふくれた設備の操業率をあげるために、各社が春の需要増を見込んだ増産をしたことなどが原因とされている。

セメント創業 80 周年記念式 明治 8 年、わが国ではじめてセメントが生産されてから今年で 80 年を迎えるので、セメント協会ではこれを記念して、5 月 19 日午後 3 時半から丸の内工業倶楽部 2 階大講堂でセメント創業 80 周年記念式典を開いた。

セメント協会会長井上英熙氏、セメント技術協会会長藤井光蔵氏からセメント創業 80 周年を迎えたことは喜ばしい旨の挨拶があったのち、通産、建設、農林各大臣から祝辞があり、最後にセメント業界の長老、元日本セメント取締役金子喜代太氏が業界 80 年の懐旧談を披露しカクテルパーティに移り 6 時盛会裡に散会

壇上に起ては井上セメント協会会長

井上セメント協会会長の挨拶要旨 今日のセメントの生産高は年間 1000 万 t を超えて世界の第 4 位、品質も世界の一流品としての折紙つきである。日本のセメント界の発展は豊富な原料という自然的な条件と創業当時の先輩の努力の集積といえる。またこれが裏付となった技術の研鑽、特にいち早く国家規格の制定など、さらに企業経営に対する合理化の精神である。もちろん、社会の発展・文化の向上・国土開発・輸出等の社会的環境に恵まれたことも事実である。こんごとも国家と業界の発展のために誓を新たに努力したい。

日本セメント埼玉工場完成 埼玉県日高町に建設中の日本セメント埼玉工場は 9 分通り完成、ロングキルン 2 基の据付を終り、5 月 3 日火入れ式を行った。

富士セメント創業披露 富士製鉄ではかねて磐城セメントと提携して富士セメントを創立、北海道室蘭製鉄所に高炉セメント工場を建設中であつたが、この程竣工したので、5 月 6 日東京から永野富士製鉄社長、香春富士セメント社長（富士鉄常務）らが出席して創業披露式を挙行。5 月の生産計画は一応 6000 t を予定し、6 月 8000 t、7 月 1 万 t と漸次生産量を引上げ、8 月以降 1.2 万 t のフル操業を行う予定。なお富士製鉄では広畑製鉄所でも高炉セメントの生産を計画しているが、まだ具体化するに至っていない。

(328 頁へつづく)