

練り土のクリープテストの特徴について

小林種雄・鈴木 傑・河地千尋

無機材料工学教室

(1972年9月11日受理)

Characteristic Creep Behaviour of Plastic Clay Body

Taneo KOBAYASHI, Suguru SUZUKI and Chihiro KAWACHI

Department of Ceramics

(Received Sept. 11, 1972)

Our new mechanical model which expresses the rheological properties of plastic clay bodies precisely describes the creep behaviour of them.

Following our new model, we studied in this paper the static behaviour, accompanying with creep test of the plastic clay bodies. Our experiments were done by the torsional test method. The results are as follows:

1. The first yield point by Geuze and others has no theoretical meaning.
2. It is not necessary to add any slider or ratchet element to the mechanical model of the plastic clay body.
3. When a stress above the third yield point by Geuze and others acts on a plastic clay body, a rather large deformation leading to the collapse of the body arises. If the stress is removed while the fracture is in progress, the recovery of the strain takes place by the instantaneous and delayed elasticity. This recovery is naturally expected by our new model.

1. 緒 言

陶磁器の成形に関する基礎理論はまだ十分に確立しているとは言いが切れない。製造工程上重要なこの成形の工学は経験に依存する所が大きい。ところで近時長尺陶管(L・S)や直径数mの大口径陶管の製造が建設関係の業界から強く要望されているが、窯業界の現状はその成形技術に関してただ従来の装置を経験的に改造する以外に何ら基礎的な知識を持ち合わせない現状である。そこでこれらの情報を提供するために練り土のレオロジー特性をさらに詳細に究明することが、この方面の基礎的研究に従事する者にとってさしせまった重要な問題になっている。

練り土のレオロジー特性に関する文献については著者が先の報文¹⁾で概要を紹介した。練り土の挙動は定性的な説明について多くの報文があるが、まだ十分定量的な取扱いがなされていない。練り土の周期的ねじり試

験における応力-ひずみ関係(S-S曲線)は近年Astburyら²⁾³⁾が独自の力学モデルを用いて、数学的な記述を行ない、かなりの成功を収めた。しかしこのモデルは練り土の静的挙動を全く説明しないし、またいくつかの欠点があることを前報⁴⁾で指摘した。

そこで著者らは全く新しい力学モデルを提出し、⁵⁾これが練り土のクリープ特性によく適合し、数学的な表現として十分満足できることを証明した。⁶⁾

本報では先にふれなかったクリープ以外の静的特性について述べることにする。

2. 実 験

2.1 試 料

前報⁷⁾と全く同一の試料を用い、かつ全く同様な成形方法で調製した試料を数日間ねかしてから試験に供した。

2.2 実験装置

実験装置も前回のものを少し改良したが、大要はそのままである。試験片にかかるトルクの検出には前回はピアノ線のねじれ角を差動変圧器を応用した回転角度測定器（市販品）によったのであるが、今回は試験片の上端をつかむチャックに直径 5 mmφ のステンレス丸棒を接続し、ここにストレンゲージをはりつけ、4 ゲージ法でトルクを検出し、増巾器をかいし、レコーダで記録した。ゲージの定格出力は 3kg・m に対し 200×10^{-6} ストレンであった。このトルク検出部の写真を図一に示

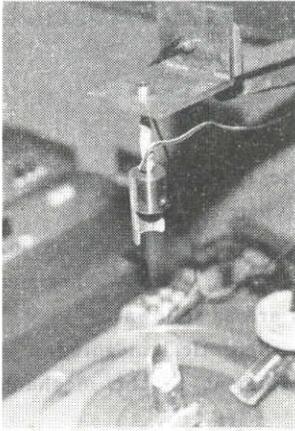


Fig. 1 Photograph of Torque Detector.

した。またクリープテストでブリーをかいして試験片にねじりトルクをかける重錘には前回の分銅をやめて、鎖に変え、これを減速したモーターの回転軸に糸を巻きつけたり、巻き戻すことで上下する台の上に鎖を乗せた

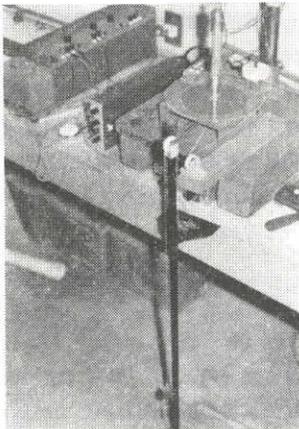


Fig. 2 Photograph of Chain-Weight before and after Loading.

り、下ろしたりすることによって、一定の荷重を除き、又はかけたりした。このようにして最初に荷重によりねじりトルクをかける時、試験片に加わる恐れのある衝撃を除いた。鎖による荷重のない時と、荷重をかけた時との様子を写真で図一、二、三に示した。

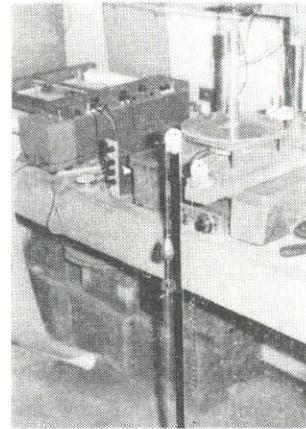


Fig. 3 Photograph of Chain-Weight on Loading.

3. 結果と考察

3.1 クリープテストに現われる降伏について

クリープテストにおける試験片の変形には“突然の変形”と“遅延”と“流動”という3段階が見られる。Geuze ら⁸⁾はこれらの巨視的な現象を観察し、大変すぐれた論文を発表している。降伏現象については第1、第2、第3降伏点 (f_1 , f_2 , f_3) の存在を提唱している。第1降伏点とはそれに対応する応力 f_1 以下の応力が材料に作用している時、材料の変形が事実上認められない点であり、第2降伏点とはそれに対応する応力 f_2 以下で、 f_1 以上の応力に対し、材料が可逆的な瞬間弾性変形を行なう点である。また第3降伏点はそれに対応する応力 f_3 以下で、先の f_2 以上の応力が働らく時、材料は瞬間弾性変形に続いて遅延弾性変形をも示すが、これには必ず永久変形が伴って生じる。一方 f_3 以上では材料に構造破壊が起こり、変形が著しく増加し、遂に巨視的破壊に至るのである。

含水量 23.1% の試料について時間をパラメーターにして応力-ひずみをプロットし図一四にかかげた。著者らの値はクリープの測定時間が180秒ときわめて短い時間のクリープテストによる結果であるにもかかわらず、Geuze らの十数分の「短期間」から数十時間の「長期間」テストと同様の傾向を示している。わずかに数分間のクリープテストとそれよりはるかに長いクリープテス

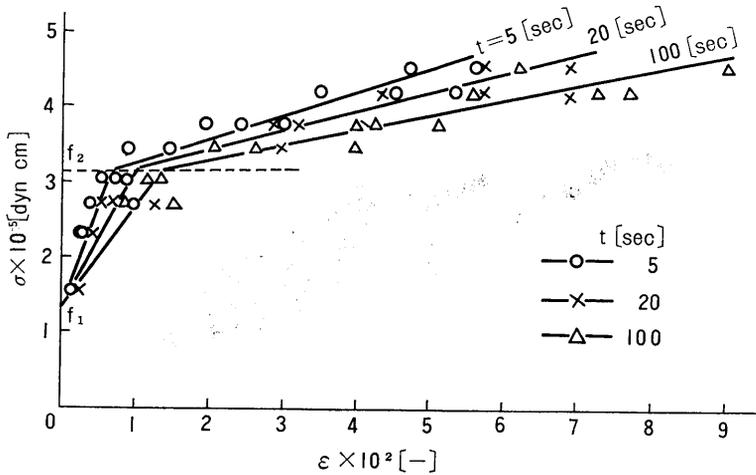


Fig. 4 Relation between stress and strain on creep test
t: Time Elapsed on Creep Test.

トとでは、テスト中に変形に基づく材料の構造上の変化が起らないか、またはそれがあるかの相違によって、クリーブの特性を支配する要因が異なっている。それにもかかわらず、図-4は Geuze らの場合と同一の傾向を与えていることは注意すべき事からである。彼らと全く同様の考え方で、応力-ひずみ曲線のひずみの小さい範囲がほぼ直線をなし、かつ縦軸上の一点に集まり、先の f_2 の定義から、この点の縦軸の値が f_2 を与えることになる。この直線の他端はいずれの直線もほぼ同じ高さの位置に屈曲点を持ち、それ以後は非常になだらかな曲線をなし、勾配は次第に減って水平に近づく。すなわちこの屈曲点以後は材料の構造に変化を生じて、クリーブ特性が前と異なる因子の影響をも受け始めたことを示唆している。これらの屈曲点がほぼ同一の高さの位置に列んでいることを考え合わせ、この高さに相当する縦軸の値を f_3 とすることができる。

図-4から $f_2 = 1.30 \times 10^5$ [dyn cm⁻²], $f_3 = 3.14 \times 10^5$ [dyn · cm⁻²] をうる。一方時間が経過してもひずみが0である応力を実測して、 $f_1 \leq 0.30 \times 10^5$ [dyn cm⁻²] をえた。ただしこの f_1 の値はここで用いた実験装置における重錘をかけるプーリーの空転トルクに匹敵する値である。このようにして得た値を表-1にあげた。

著者らが先に提出した練り土の力学モデルを図-5に再録した。⁹⁾ 図-5.1は練り土に応力加わる以前の状態を示している。これによると練り土試験片に f_1 以下の応力が作用しても、そのモデル中の瞬間弾性部分 (I) によって瞬間弾性変形が起り、かつ遅延弾性部分 (Re) によって遅延弾性変形を生じるはずである。しかしその報文中に記載してあるように、たとえば試験

Table 1 Yield Stress at Various Moisture Content.

moisture content (%)	yield stress		
	1st. (dyne cm ⁻²)	2nd. (dyne cm ⁻²)	3rd. (dyne cm ⁻²)
22.4	$\leq 0.30 \times 10^5$	2.85×10^5	4.55×10^5
23.1	〃	$1.30 \times \text{〃}$	$3.14 \times \text{〃}$
23.5	〃	$1.00 \times \text{〃}$	$1.75 \times \text{〃}$
25.1	〃	$0.50 \times \text{〃}$	$1.30 \times \text{〃}$

の含水率が23.6%の時、部分-Iによる総合瞬間弾性率 (G_1) は 18.0×10^7 [dyn cm⁻²] で、部分 Re の総合瞬間弾性率は 7.46×10^7 [dyn cm⁻²] である。従って $f_1 (\leq 0.30 \times 10^5$ [dyn cm⁻²]) 以下の応力による系のひずみは 1.7×10^{-4} [-], および 4.0×10^{-4} [-] の大きさにすぎない。これは実際上試験片が変形しないことを意味する。従来提出された練り土の力学モデルではこの第一降伏点に相当する応力 f_1 に対応してスライダモデルまたはラチェットモデルをモデル本体に付加し、 f_1 以下の応力では練り土は変形を起さないことを表わしている。しかし上に述べた理由によって、モデルにスライダなどをことさらつけ加える必要がないことは明らかである。さらにまた f_1 の値は、その値の前後で試験片のひずみが測定できない程小さな値の範囲を連続的に微小な変化をすることから、実用上の便宜はいざ知らず、理論的にはその値を確定することに意味がないことになる。

次に第二降伏点における応力 f_2 について述べる。含水率 23.6% の時、 f_2 は 1.30×10^5 [dyn cm⁻²] であ

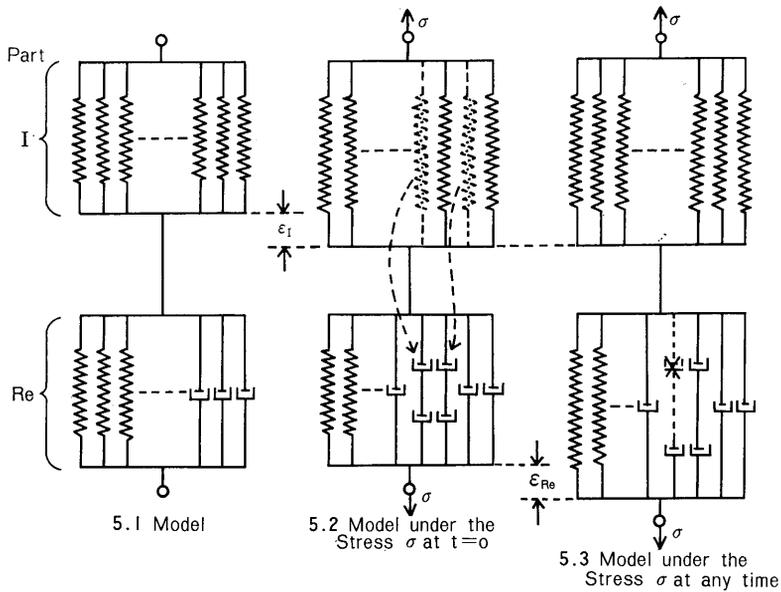


Fig. 5 Mechanical Model of Plastic Clay Body
t: Time Elapsed on Creep Test.

るから、ひずみの大きさは 7.2×10^{-4} [-] である。今回使用した装置のひずみの測定の限界は 2×10^{-4} [-] であるので、 f_2 はかろうじて実測できる程度であった。 f_2 以下の応力については純粋に可逆的な瞬間弾性変形のみが観測された。

第3降伏点における応力 f_3 以下で、先の f_2 以上の応力が試験片に生じている時、瞬間弾性変形と共に遅延弾性変形も時間効果で起こってくる。そしてこの場合には応力がなくなっても残存する永久変形を必ず伴うことを Geuze らは指摘している。著者らの提出した練り土の力学モデルで、この状態は 図-5.2, 5.3 で示されている。すなわち応力が練り土試験片内に生じた瞬間、モデルの部分 I はそれを構成する直列のスプリング群が直ちに伸びて、応力の大きさに対応した瞬間弾性変形を示すと同時に、先の報文¹⁰⁾で詳細に説明したようにこのスプリング群中の一部のものが切れて消失し、代ってダッシュポットに変換し、これらが部分 Re のダッシュポット群の中に直列の位置に、新旧のダッシュポットがそれぞれ 1 個づつ、計 2 個で 1 組を作るように入っていく。(図-5.2) このスプリング-ダッシュポットの変換がいったん起こると、この逆変換は自然には起こらないと仮定する。これが応力が消失しても永久変形が残る要因を与えるものとする。

図-6 に今回実験に用いた練り土の含水率と f_2 の値との関係を図示したが、これはほぼ直線関係を満足するようである。

3.2 クリープテストにおける破壊について

練り土のクリープテストにおいて先の f_3 以上の応力が働いていると、試験片の変形ひずみはいちじるしく増し、まもなくその破壊が起こる。この場合のひずみと

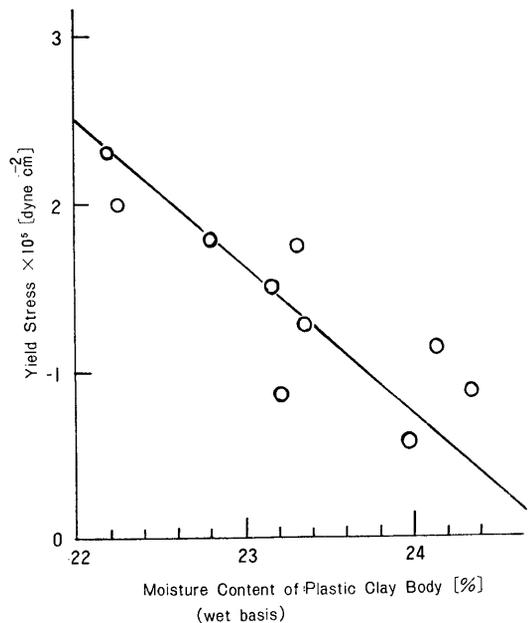


Fig. 6 Relation between Yield Stress f_2 and Moisture Content of Plastic Clay Body.

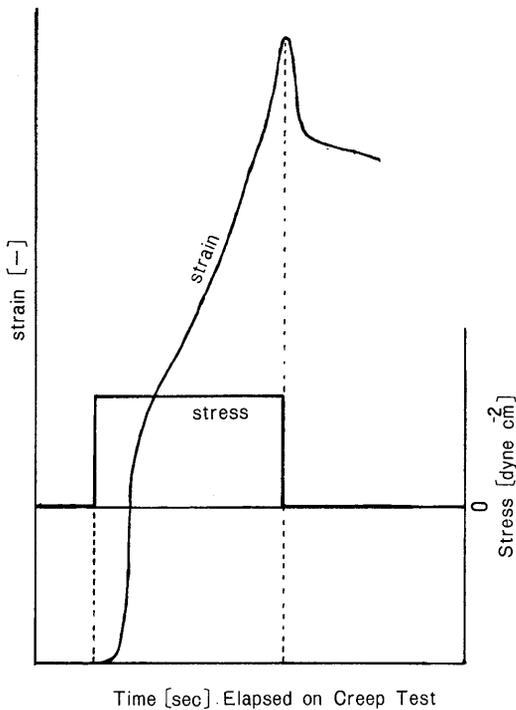


Fig.7 Instantaneous and Delayed Elastic Creep Recovery after Creep Fracture.

時間との関係は図-7に例を示した。この図で大きな応力のため一度破壊状態に入っても、応力を取り除かれると、瞬間および遅延弾性による不完全なひずみ回復が明らかに見られる。普通の力学モデルでは練り土試験片が応力で破壊始めると、その中のスプリングは切れて消失してしまうとする。従ってここに述べたひずみ回復を説明できない。しかし著者らの図-5.1のモデルでは大きな応力が作用しても、すでに先の報文に記したように、部分IでもReでもスプリング群がことごとくは切れてしまうことはなく、応力の大きさとそれが作用している時間とに応じて、切れずに残存しているスプリング

群により図-6のような挙動を示すことが説明できる。なお応力の大きさと残存するスプリング群との関係は先の報文に述べてある。

4. 結 論

1. 練り土における Geuze らの第一降伏点は理論的な意味を持たない。
2. 練り土の力学モデルにスライダーやラチェットを付け加える必要はない。
3. Geuze らの第三降伏点の応力以上の応力が練り土に加わって、大変形に基づく破壊が発生している段階で、応力を取り去る時、瞬間および遅延弾性によるひずみ回復は著者らの提出したモデルでは当然予期される現象である。

参 考 文 献

- 1) 小林種雄・鈴木傑・河地千尋・西山哲司, 窯協, 80 [2]64-74 (1972)
- 2) N.F.Astbury, Trans. Brit. Ceram. Soc. 62, 1-18 (1963)
- 3) N.F.Astbury, F.Moore and J.A.Lockett, Trans, Brit. Ceram. Soc. 65, 453-62 (1966)
- 4) 前出 1)
- 5) 小林種雄・鈴木傑・河地千尋・森川茂幸・大野千枝子・竹田憲一, 窯業協会東海支部, 研究発表会, 1971.10.28.
- 6) Taneo Kobayashi, Suguru Suzuki, Chihiro Kawachi, Bull. Chem. Soc. Japan (1973)
- 7) 前出 1); 小林種雄・鈴木傑・河地千尋・西山哲司・川本孝次, 名工大学報, 23,467-480 (1971)
- 8) E.C.W.A.Geuze and tan Tjong-Kie, Proc. 2nd Congress on Rheol. 26-July 1953, 247-259
- 9), 10) 前出 6)