

微粉体層の時間依存型力学特性に関する研究

1986年2月

神 谷 秀 博

微粉体層の時間依存型力学特性に関する研究

名古屋大学図書	
和	960750

1986年2月

神谷秀博

報告番号	甲第 1854 号
------	-----------

< 目 次 >

序章	- 1 -
(1) 本研究の背景と目的および論文の項目	- 1 -
(2) 粉体層、土質力学における時間依存型現象に関する既往の研究	- 2 -
(2)-1 現象論的アプローチ	- 2 -
(2)-1-1 クリープ、疲労破断現象	- 2 -
(2)-1-2 一次元圧密試験などでの時間依存型現象	- 4 -
(2)-1-3 動的特性	- 6 -
(2)-2 モデル論的アプローチ	- 6 -
(2)-2-1 微視的挙動を考慮に入れたモデル	- 6 -
(2)-2-2 連続体モデル	- 11 -
使用記号	- 13 -
引用文献	- 13 -
第1章 粉体層のクリープ、疲労破断現象の統計的解析	- 17 -
1-1 実験	- 17 -
1-1-1 動的疲労試験 (実験1, 2)	- 17 -
1-1-2 クリープ引っ張り試験 (実験3)	- 19 -
1-2 疲労、クリープ破断試験による負荷応力-寿命関係	- 21 -
1-3 疲労、クリープ破断現象の統計的解析	- 23 -
1-3-1 統計的解析方法	- 23 -
1-3-2 統計的解析結果	- 26 -
1-4 考察	- 29 -
結言	- 32 -
使用記号	- 32 -
引用文献	- 33 -
第2章 疲労、クリープ破断現象における塑性変位量増加過程	- 34 -
2-1 実験	- 34 -
2-2 繰り返し、およびクリープ引っ張り負荷による変形挙動の概略	- 34 -
2-3 変形挙動からの寿命推定と変位量の増加過程の三区間の区分に関する考察	- 37 -

2-4	各区間での塑性変位量の累積過程	-	39	-
	結言	-	46	-
	使用記号	-	46	-
	引用文献	-	46	-

第3章 引っ張り応力履歴を受けた粉体層の強度変化 - 47 -

3-1	クリープ破断過程での引っ張り強度低下過程	-	47	-
	3-1-1 実験および実験方法	-	47	-
	3-1-2 結果および考察	-	47	-
3-2	耐久限以下のクリープ引っ張り応力履歴を受けた粉体層強度変化	-	50	-
	3-2-1 実験	-	50	-
	3-2-2 実験結果と考察	-	50	-
3-3	引っ張り応力による強度低下開始条件	-	52	-
	3-3-1 準静的繰り返し負荷試験	-	55	-
	3-3-2 低い負荷応力速度での引っ張り破断試験	-	57	-
3-4	比較的高速負荷領域での粉体層の強度及び疲労	-	57	-
	3-4-1 比較的高速負荷領域での強度測定試験	-	57	-
	3-4-2 比較的快速な応力負荷速度での繰り返し負荷試験	-	59	-
	結言	-	59	-
	使用記号	-	61	-
	引用文献	-	61	-

第4章 粉体層の圧密操作に関するレオロジ—挙動と粉体層の強度増加現象 - 62 -

4-1	強度増加現象に関する予備的考察	-	62	-
4-2	圧密操作に関する種々の時間依存型履歴を受けた粉体層強度変化の測定	-	65	-
	4-2-1 粉体層の一次元圧縮過程	-	65	-
	4-2-2 クリープ圧密, クリープ回復による粉体層強度増加現象	-	67	-
	4-2-2,1 クリープ圧密による空隙率低下過程と強度増加現象	-	67	-
	4-2-2,2 クリープ回復による強度増加過程	-	71	-
	4-2-3 圧縮応力緩和を受けた粉体層の強度変化過程	-	71	-
4-3	強度増加現象に関する考察	-	74	-
	結言	-	80	-
	使用記号	-	80	-
	引用文献	-	81	-

第5章 粉体層強度の時間依存型変化と変形挙動	- 82 -
5-1 クリープ破断現象における強度低下過程と塑性変形挙動	- 82 -
5-2 準静的繰り返し負荷試験より得られる可逆変位量に関する考察	- 89 -
5-3 強度増加現象が現われる条件での応力-変位関係	- 91 -
結言	- 93 -
使用記号	- 96 -
引用文献	- 96 -
終 章	- 98 -
1, 本研究で得られた結論から	- 98 -
2, 今後の課題	- 100 -
使用記号	- 101 -
引用文献	- 101 -
謝辞	- 103 -
文献目録	- 104 -
口頭発表目録	- 105 -

序 章

(1) 本研究の背景と目的および論文の項目

一次粒径が数 μm から数 $10\mu\text{m}$ 程度の付着性のある微粉体層の力学的特性の研究は、従来から工業プロセスにおいて、粉体のハンドリングが極めて困難であることから重視されてきた。そして、近年、セラミックス等、微粉を原料とした素材が注目される中で、その重要性が増してきている。

粉体層の力学試験法は、従来Jenike[1,2,3]の一面せん断試験に代表されるように静力学的な破壊試験や圧密試験を主に用いてきた。また、モデル論的には、微視的粒子間相互作用と巨視的な粉体層の力学挙動の関連を、考察した研究[4 - 8]などが行なわれて来ているが、これらも、静力学的な破壊、圧密現象を主な対象としている。しかし、実際の粉体層にはこれらの静力学的アプローチだけでは解明できない現象が存在する。その一つとして注目されたのが、内藤らの捕集粉塵層の払い落としの研究[9,10]から求められた”疲労破壊”現象の存在である。内藤らはろ布上に集塵、捕集された粉塵層に、くり返し衝撃力を加える実験をおこない、1回の負荷では払い落としが開始しない小さな衝撃力でも繰り返し加えることにより払い落としが開始し、進行する現象の存在を確認した。そしてこの現象を”疲労破壊”の概念を用いて説明し[10]、その後、椿ら[11]によって実際に粉体層に疲労破壊現象が存在することが確認された。さらに椿ら[12]は従来の研究では、あまり着目されてこなかった粉体層圧縮に関する応力緩和現象と圧密特性の関連を考察している。

本論文は、これまでの研究の中で存在が確認された疲労、応力緩和現象等を、時間が関与する粉体の力学現象、すなわち時間依存型力学現象としてとらえなおし、対象を拡大して定量的考察を試みるとともに、各現象間の相互関連を考察することを目的とした研究である。

粉体層力学の分野ではこの時間依存型力学特性に着目した研究は、静力学的扱いに比べて極めて少ない。しかし、粉体層の力学を体系化する上で、この時間依存型現象は極めて重要であると考えられる。実際に、粉体と関連の深い土質力学の分野では、時間依存型現象に関する研究が、土質力学を体系化する上での重要な柱として位置付けられており、次節で述べるように多くの研究が行なわれている。ただ、土質力学の場合、粒子の間げきに水が存在する系が中心で土のレオロジー挙動は、この間隙水の粘性が大きな要因となっている。

本論文では、この土質力学や、さらに古くから時間依存型現象に着目してきている材料力学の分野での研究に検討を加えながら、数 μm 程度の乾燥した付着性粉体を対象とし、粉体層自身が持つ時間依存性について研究を進めたものである。

本論文の構成としては、以下のものである。

疲労破断現象に続きクリーブ破断現象の存在を確認したことから、第1章では、粉体層の疲労、およびクリーブ破断現象を定量的に考察するため、負荷回数および負荷時間の範囲を拡大して実験を行ない、負荷応力と、破断するまでの繰り返し負荷回数または負荷時間、すなわち寿命の関係を求め、寿命分布の統計的解析を行なう。

1章が、疲労、クリーブ破断現象の最終状態である寿命値に着目したことから、第2

章では負荷開始から破断に至るまでの破断過程を考察するため、繰り返し負荷や、クリープ負荷によって粉体層に蓄えられる不可逆変位量の増加過程について解析をおこなった。

そして、第3章では、破断過程を、さらに考察するため、クリープ応力による粉体層強度低下過程を測定するとともに、内藤ら[13]の指摘に基づいてクリープ破断の起きない小さな応力範囲のクリープ応力を受けた粉体層の強度変化を測定し、クリープ破断条件について考察をおこなった。そして、得られた知見に基づいて疲労とクリープの比較、および応力負荷速度依存性など、他の時間依存型現象について考察を加えた。

また、3章の結果は、破断条件が、引っ張り応力による強度低下作用だけでなく、粉体層成形時の圧密操作に関連するレオロジー挙動に伴って発生する強度増加現象も因子として存在することを求めた。そこで第4章では、この粉体層圧密に関するレオロジー挙動を整理した上で、レオロジー挙動の時間的進行に伴う強度増加現象について定量的整理を試みた。

そして、最後に、第5章において、3, 4章で得られた種々の応力履歴による粉体層の時間の経過に伴う強度変化過程と、3章等で得られた変形挙動の関連をレオロジーモデルを用いて解析し強度変化、変形挙動のメカニズムについて考察を行なった。

以上が論文の構成である。本論に入る前に、前述した粉体層、土質力学における時間依存性に関する既往の研究について述べる。

(2) 粉体層、土質力学における時間依存型現象に関する既往の研究

本節では、粉体工学、土質力学、および薬学の分野で行なわれている、時間依存型現象の概略について述べる。対象とした学問領域が広いため、すべてを網羅しきれていないと思われるが、ここでは最初に、現象論的アプローチとして、(1) 主に三軸圧縮試験を中心としたクリープおよび疲労破断試験 (2) 一次元圧密および等方圧密によるレオロジー挙動 (3) 動的特性、等について述べた後に、モデル論的研究として (1) 微視的構造を考慮したレオロジー挙動の記述および (2) 粘塑弾性理論を用いた連続体モデルによる研究等について報告する。

まず、現象論的アプローチについてのべる。

(2) - 1 現象論的アプローチ

(2) - 1 - 1 クリープ、疲労破断現象

最初に、三軸圧密試験等の粉体層、土の破壊強度を求める試験において、クリープおよび繰り返し応力を作用させた場合のレオロジー挙動について述べる。土質力学の分野でのクリープ、疲労破壊に関する研究は、三軸圧密試験によるものがほとんどで、おもに変形挙動に着目した研究が多いようである。土の三軸圧密クリープ試験によるクリープ変形挙動は、Fig.1 に示したように、定性的にはクリープ応力 (D) により、次の三つのカーブに分類される。

1), 変形速度が、ある程度のクリープ時間で0になる。($D < 0.3 \tau_s$)

2), クリープ変形が続き、無限時間で破断すると考えられる ($0.2 - 0.3 \tau_s < D < 0.8 - 0.9 \tau_s$)

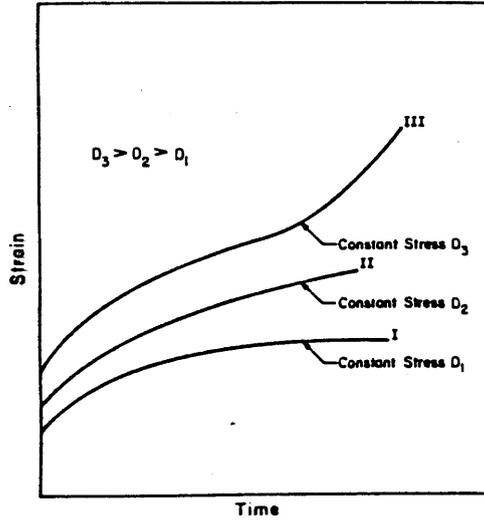


Fig.1 三軸圧縮クリープ試験における歪量の経時変化[17]

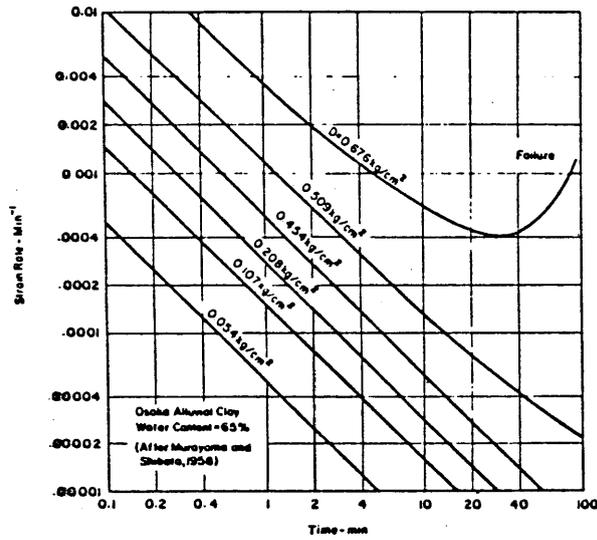


Fig.2 三軸圧縮クリープ試験におけるクリープ歪速度の経時変化の一例[17]

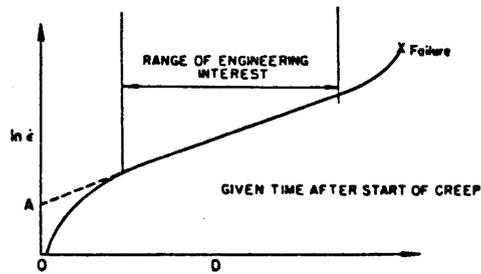


Fig.3 あるクリープ時間における負荷応力と歪速度の関係[19]

3), クリープ破断が起こる。($D > 0.8 - 0.9 \tau_s$)

ここで τ_s は、静的破壊強度である。

ただ、この変形挙動を全応力範囲に亘って整理した研究は見当たらず、各応力範囲に分けて検討を行なっているようである。

まず、クリープ変形が継続するカーブ 2) については、クリープ変形速度 ($\dot{\epsilon}$) が、時間とともに減少し、Fig.2 に示したように両対数紙上で負の直線関係にあることが種々の条件下で確認されている[14 - 16]。Singh and Mitchell[17]は、この関係を整理して次式を得た。

$$\log\{\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}(t_1, D)\} = -m \log(t/t_1) \quad (1)$$

同様な関係は、繰り返し負荷試験でも得られている[16]。また、この関係式より疲労とクリープの比較研究も行なわれている[18]。

続いてSingh and Mitchell[19]は、あるクリープ時間 (t) における $\dot{\epsilon}$ と D の関係を整理しFig.3 の関係を得た。そして、カーブ 2) の領域では、直線関係が得られることから次式が得られ

$$\log\{\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}(t, D_0)\} = \alpha D \quad (2)$$

Eqs.(1,2) より $\dot{\epsilon}$, D , t , に関する次式を導いた。

$$\dot{\epsilon} = A e^{\alpha D} (t_1/t)^m \quad (3)$$

Eq.(3)は、カーブ 2) のクリープ変形曲線を記述した基本的な式である。しかし、カーブ 1), 3) については記述できない。

次にクリープ破断の起こる負荷応力範囲 ($D > 0.75 - 0.8 \tau_s$) では、クリープ変形曲線は、1), $\dot{\epsilon}$ が、時間とともに減少する区間 2), $\dot{\epsilon}$ が、ほぼ一定となる定常変形区間 3), $\dot{\epsilon}$ が増加し最終破断を起こす区間、の三区間に区分される複雑な変形挙動を示すため、現象論的整理もあまり進んでいない。わずかに、斎藤、上沢ら[20]が、区間 2) での歪速度 $\dot{\epsilon}$ とクリープ寿命値 (t_f) の間に次式の関係が成立することをもとめている。

$$\log t_f = 2.33 - 0.916 \log \epsilon_{\min} \pm 0.59 \quad (4)$$

しかし1)-3)の全過程に亘る整理は、ほとんどなされていない。

一方、変形挙動以外に着目した整理としては、動的負荷による負荷応力と寿命の関係を整理した研究もいくつか行なわれているが[21,22]、定性的整理に停まっているようである。

ここで、これら三軸圧密試験の場合のクリープ試験では、Fig.4 に示すように、偏差応力 ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) を一定に保つと、変形に伴って、静水圧応力 ($p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$) が低下し、破壊条件に到達するという応力経路で破壊する。この点が、金属などの一般的な材料での試験とは異なり注意が必要である。

(2) - 1 - 2 一次元圧密試験などでの時間依存型現象

破壊を目的としないで粉体層の体積を減少させる圧密試験として金型内での圧密や等方圧密などが行なわれている。これらの圧密試験でのレオロジー挙動としてクリープ圧

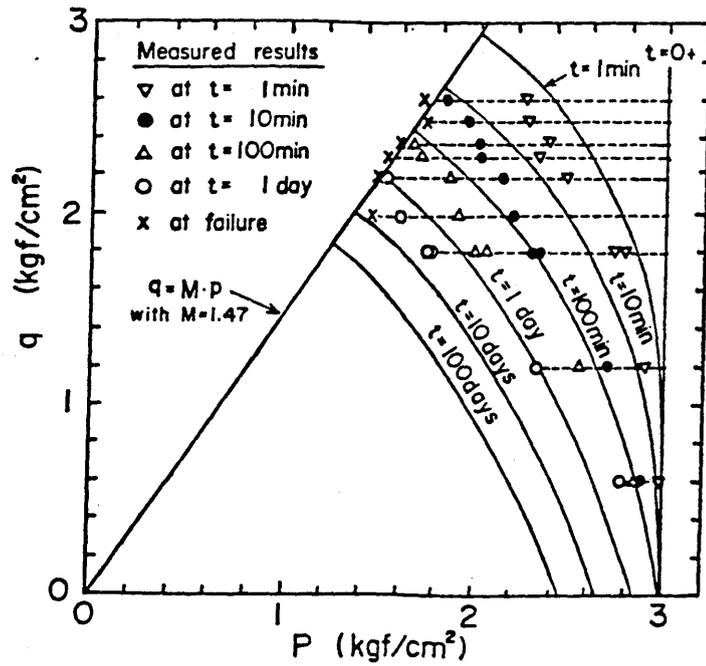


Fig.4 三軸圧縮クリープ試験での破壊するまでの静水圧応力と偏差応力の変化[75]

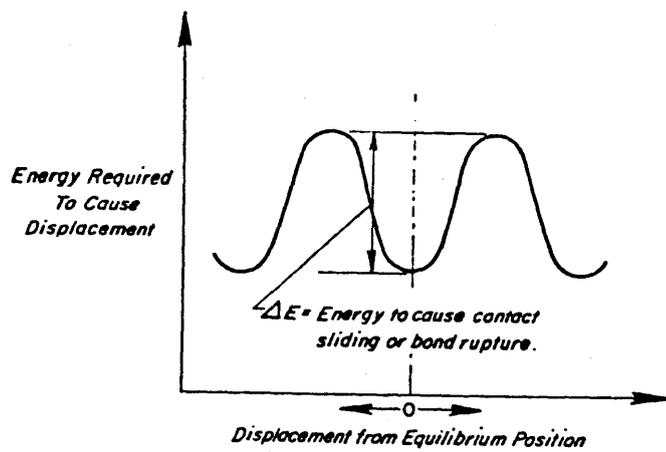


Fig.5 レートプロセス理論における平衡位置からの距離と変形に必要なエネルギー [52]

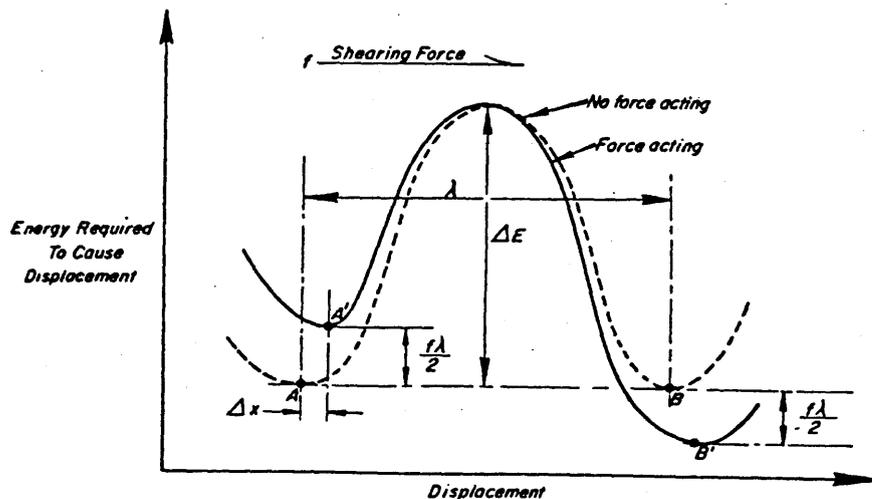


Fig.6 せん断力が加わった場合のエネルギー障壁の変化[53]

密、クリープ回復、応力緩和などの諸現象が、いくつか研究されている。

土質力学の分野では、クリープ圧密現象について、間隙水圧に着目したTerzaghi [25] の一次元圧密理論があるが、間隙水圧が一定値に達した以後も、土の沈下が続く現象を二次圧密と定義して、Taylor[26]やBjerrum [27]らが、二次圧密における、圧密応力-間隙比-時間関係を整理している。

また、粉体工学や薬学の分野でも、クリープ圧密試験[28]や圧密した粉体層を金型から取り出した後の、クリープ回復現象[29]や応力緩和現象[30]についても、種々の研究があるが、現象の非線形性を、レオロジーモデルなどを用いての記述などが主目的であり、各現象間の比較など、体系的な研究は、少ないようである。ただ、注目すべき点として、金型内での粉体層の圧密においては、バスカル圧のように金型内には一様には伝わらず、一部にしか伝わらない。そのため、ピストンに加わる圧力だけでなく、底圧や側圧の測定が重要であることが、指摘されている[31,32]。特に、側圧については、圧密、除荷後、垂直圧が0になっても、側圧は、0にならず残留応力として残る現象の存在が確認されており[31,33]、この残留応力が原因と考えられる圧縮成形体の金型から取り出し時のクラック発生による強度低下現象（キャッピング現象）に関する研究も行なわれている[34]。

同様な点について土質力学では、二次圧密が開始した土の強度や、応力-変位関係の変化をAging 効果と定義して部分的ではあるが、研究が始まっている[35 - 37]。粉体工学においても、Jenike[1 - 3] が、この効果に着目しており、長時間の圧密により拡大する破壊崩壊線（T. Y. L.）の存在を定義している。最近では、粒子界面の化学的变化を伴う系での強度増加現象が取り組まれている[38]。

また応力緩和現象については、金型内での一次元圧密だけでなく三軸圧縮試験においても、破断条件に達しない応力範囲で行なわれている。村山、柴田[39]は三軸圧縮試験での応力緩和過程で、主応力差 q が $\log t$ に比例して現象することを求めた。同様の関係は、金型内での軸応力と緩和時間 $\log t$ の関係でも得られている。そこで、応力緩和の程度を示すパラメータ $\beta(\varepsilon_1)$ 、 $(=dq/d\log t)$ を与え、三軸試験では、軸歪 ε による $\beta(\varepsilon_1)$ の変化からクリープ破断現象との関連を考察した研究などが行なわれている。[40 - 42] また、飽和土の三軸試験での応力緩和過程では、間隙水圧が、時間とともに一定になる現象が確認されており興味深い。[39]

(2) - 1 - 3 動的特性

動的特性として、特に注目すべき点は、破壊強度の歪速度依存性[21,43,44]にある。土質力学では、歪速度を $10^{-4} \sim 10^4$ %/minで変化させると、特に湿潤した粘性土では、速度の早い領域で強度が大きくなる現象を観察している。乾燥粉体層でも、速度依存性を、実験的に検討しているが、速度範囲が狭く、顕著な速度依存性は、確認していないようである。[45]

また、土や粉体層の著しい応力-変位関係の非線形性を評価するため、動的振動波による応答解析から、土の粘塑弾性を考察する研究も多数行なわれている[46]。同様な応答解析は、準静的繰り返し試験でのヒステリシスループの解析からも行なわれている[47]。どの場合でも、負荷応力が大きく、歪が大きい場合ほど粘弾性係数が、低下する傾向を示している。土質力学の場合、地震との関連で応答解析は意味を持ち、充填状態の影響などを評価した研究[48]もあるが、測定結果を示すのに停まっているようである。

その他、動的特性としては、繰り返し負荷による間隙水圧の上昇によって引き起こされる土の液状化の研究[49]や、動的繰り返しせん断に伴う体積減少（沈下、締め固め特性）[50]に関する研究が、土質力学の分野では行なわれている。また、粉体層力学でも、Stick-slip現象[51]や動的振動波を重畳した場合のせん断強度や変形挙動の変化を観察した研究[52]など、種々の現象に着目した研究が行なわれており、今後メカニズムの解明や粉体操作への応用の開発が期待される。

(2) - 2 モデル論的アプローチ

前述したように、土、粉体層の時間依存型現象は、著しい非線形性を示すために、種々の関数の組み合わせや、レオロジーモデルにより各々の現象の記述が試みられている。しかし、多くの研究がクリープ、応力緩和など一つの現象に限定して、しかも応力範囲などの条件も狭い範囲でしか成立しないものが多いようである。さらに、レオロジーモデル自身が、ばね要素やダッシュポット要素の組み合わせ方に過度の任意性があり、モデルを組み立てる際に土の変形機構を必ずしも反映させていない恐れがある点に問題がある[53]。

これらの点を克服することを目的としたアプローチとして次の二点がある。

(1) 微視的な粒子挙動に関してモデルを立てるか、またはモデル的な実験を行なうことによって巨視的なレオロジー挙動を記述する試み

(2) 種々の時間依存型現象を考慮して、総合的な現象把握を行ない、可能な限り幅広く現象を記述できる連続体モデルを提出する試み

まず、(1) について述べる。

(2) - 2 - 1 微視的挙動を考慮に入れたモデル

微視的挙動を考慮に入れた研究の代表例として、Eyring[54]のレートプロセス理論を適用した研究があげられる。Eyringは、量子力学、統計力学の手法を用いて、化学反応速度を反応分子の配列、大きさ、原子間の力などの基本的性質だけから計算する”絶対反応速度論”の手法を、”物質の再配列の関与する全ての過程” = ”速度過程 (rate process)” に適用することを提唱した。

粘性流動についてもFig.5 に流動単位 (flow unit ; 原子, 分子, 粒子あるいは、その凝集体など流動の基本単位をなすもの) が、一つの平衡位置から、他の平衡位置へ移動するには、活性化エネルギー障壁 (ΔE) 以上のエネルギーをflow unit が持たねばならないと考えた。

flow unit の持つエネルギーの分布がMaxwell-Boltzman分布に従うとして単位時間当たり (ΔE) を乗り越えるflow unit の数 (速度; rate) (ν) は次式で与えられる。

$$\nu = kT/h \cdot \exp(-\Delta E/kT) \quad (5)$$

そして外力 (f) が作用した場合 (ΔE) は ($f\lambda/2$) だけ変化し、その結果、左から右への flow unit の移動速度 (ν) は、

$$\bar{\nu} = \bar{\nu} - \bar{\nu} = 2 \frac{kT}{h} \exp(-\Delta E/kT) \sinh(f\lambda/2kT) \quad (6)$$

で示される。そして土の変形速度 ($\dot{\epsilon}$) は、パラメータ (x) を用いて次式で与えられ

る。

$$\dot{\epsilon} = x\bar{u} = x(\bar{v} - \bar{v}_0) \quad (7)$$

この理論の土への適用は、特にクリープ変形挙動に着目し、(1) 粒子の挙動に何の仮定も設けず粒子接点付近の原子、分子レベルの機構変化を代表するものとして適用する場合 (2) ミクロな粒子間挙動にモデル的構造を仮定する場合、の二種類のアプローチに分けられるようである。最初に(1) のアプローチについて述べる。

Michell and Singh[55,56] は、マクロな測定値(強度, $\dot{\epsilon}$ 等)と層構造, 吸着水構造, 付着力, 摩擦力などの基本的な因子との関係が未知であるという立場から flow unit にモデルを仮定せず、 ΔE は flow unit の結合力を total に代表したものと考えた。彼らは土の活性化エネルギー (ΔE) を求めるため、以下のようなアプローチを行なった。

Eqs.(6,7) を変形し、温度で偏微分すると次式が得られる。

$$\partial \log(\dot{\epsilon}/T) / \partial(1/T) = -E/R \quad (8)$$

したがって、クリープ試験途上で温度を変えれば ($\dot{\epsilon}$) の変化から活性化エネルギーが求まると考えた。Fig.7 に示すように、実際、温度を変えることで ($\dot{\epsilon}$) が変化することを確認した。そこで種々の土で変化させる温度幅を変えて同様な実験を行ない Fig.8 に示すように $1/T - \log(\dot{\epsilon}/T)$ の関係は直線関係を示し Eq.(8) より E が求められた。同様なアプローチで、Andersland[57], 松井、伊藤[58,59] らが、サスペンション状態も含む広い濃度範囲で、また粒子表面に Li, Na, K イオンなどを吸着させ dE を求めている。

ただ、この方法では、温度変化に伴って試料体積や間隙水圧の変化が発生し複雑な現象となっている点、および Fig.1 のカーブ2)の応力範囲でしか適用できない点などに問題を含んでいる。

一方、(2) の粒子挙動にモデル的構造を仮定した場合の研究として、村山、柴田[16], Christensen Wu[60], Ter-Stepanian [61] らの研究がある。村山らは、Fig.9 に示すような粘土骨格構造を考え、粒子の結合部は弾性ジョイント(a)と粘弾性ジョイント(b; 滑動降伏値を持つ)の二種類あると考えた。(a) は接触角が変わるのみ、(b) では吸着水を保ちながら接触点が滑動をおこし、この挙動は Fig.10 で示したレオロジーモデルで表現された。そして粘性抵抗の算定にレートプロセス理論が適用された。

また、Ter-Stepanian [61] は、土構造の変化と併せて粒子結合点での寿命が層構造の変化と応力履歴により変化すると考え層構造が規則的になる場合には、Eq.(9)、層構造が不規則になる場合には Eq.(10)で結合点での寿命 (L) の履歴による変化が示されると考えた。

$$L' = k_3 t \quad (9)$$

$$L'' = k_3 t_0^2 / t \quad (10)$$

彼のモデルでは、歪速度は次式で示されることから

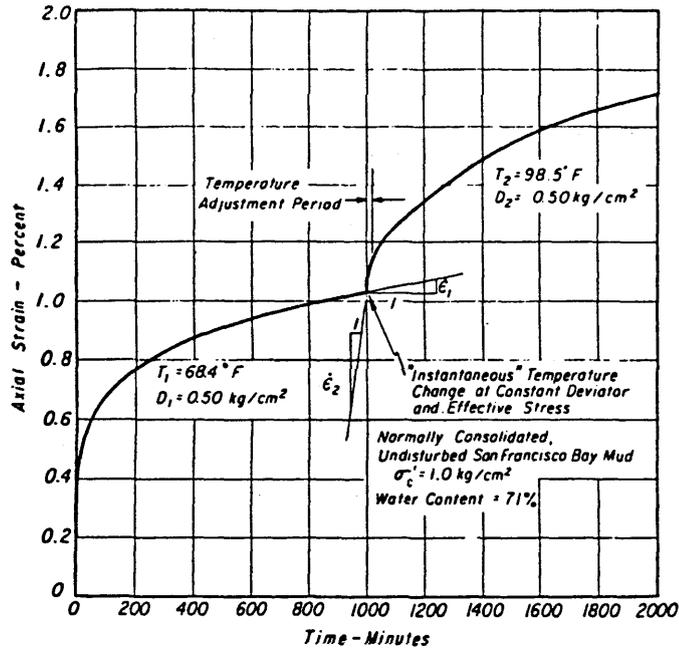


Fig.7 三軸圧縮クリープ試験途上で温度を変化させた場合のクリープ歪の変化[53]

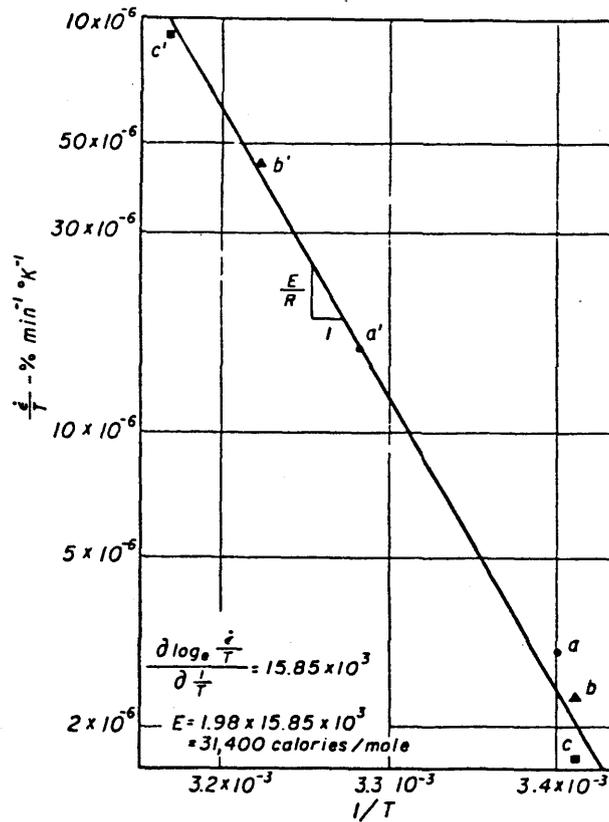


Fig.8 温度変化によるクリープ歪速度の変化[53]

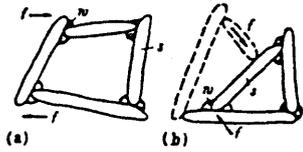


Fig.9 村山, 柴田による粒子構造モデル[16]

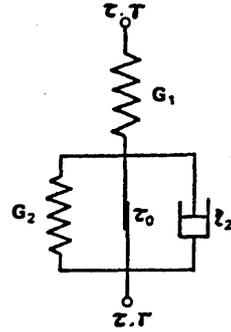


Fig.10 粒子構造モデルから巨視的挙動を記述したレオロジーモデル[16]

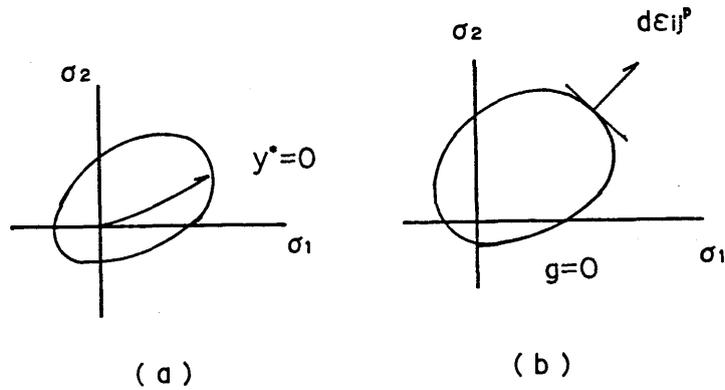


Fig.11 弾塑性論における基本曲面の一例[61]
 (a) 降伏曲面 (y^*)
 (b) 塑性ポテンシャル曲面 (g)

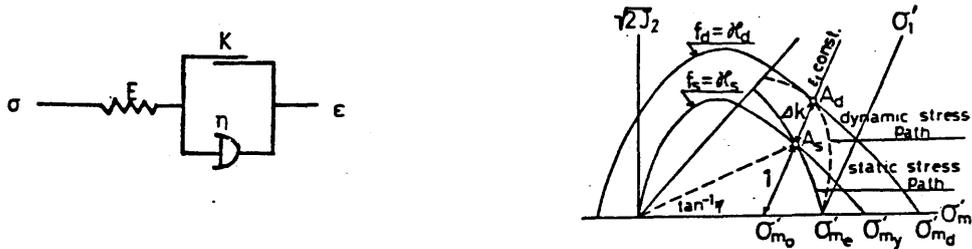


Fig.12(a) 材料強度の時間依存性を表わしたMalvern のモデル[68]
 (b) Perzyna の超過応力理論より導いた動的負荷曲面[69]

$$\dot{\epsilon} = a(\tau - \tau_p) / L\zeta \quad (11)$$

クリープ歪曲線は、L' 支配の場合、対数曲線で減少、L'' 支配の場合、二次曲線で増加すると考えた。そして、このモデルからカーブの全過程の記述を試みた。

ただ、これらのモデルは、レートプロセス理論の適用というより、ミクロな粒子構造やクリープ機構のモデル化を中心に議論している。このモデルが実際の土粒子の機構を反映できているかは未知である。

レートプロセス理論を用いた研究以外には、粉体層の微視的挙動を考慮して時間依存型現象の解明を試みた研究は少ない。梅屋ら[62]が、ポリスチレン粒子の粉体層での応力緩和現象を考察するため、射出成形によって製作したポリスチレン球の応力緩和特性との比較を行ない、粒子自身の緩和が支配的な圧密条件と、粒子の再配列による緩和が支配的な条件を求めている研究などがあるが、静的な圧密、あるいは破壊現象について行なわれているような粒状体としての取り扱いなど微視的挙動に着目した研究手法を用いて、今後、時間依存型現象について解明していくことが必要であり、そのためにも巨視的な挙動の整理を急がねばならない。

そこで次に、粉体層、土を連続体として扱ったアプローチの中で、ひとつの現象の記述に留まらず、種々の現象間の考察が可能であり、かつ複雑な時間依存性を体系化していく上で重要であると思われるアプローチについて報告する。こうしたアプローチは、多くが連続体力学における、弾塑性理論[63,64]を応用している。

弾塑性理論では、一般に応力空間内に次の4つの基本曲面の存在を仮定する。説明に用いる図(Fig.11)は簡単のため二次元で記述した。

- 1)降伏曲面——Fig.11(a)に示した応力空間において、原点を含む弾性域とその外側の塑性域を区分する閉曲面。
- 2)負荷曲面——塑性降伏後、継続して塑性変形が生じるのに必要な応力状態を規定する曲面。
- 3)塑性ポテンシャル曲面——塑性歪増分ベクトルの方向を規定する閉曲面で、この閉曲面の外向き法線方向が、塑性歪増分ベクトルとなる。(Fig.11(b))
- 4)破壊曲面——弾塑性体の破壊条件を規定する曲面。

土、粉体層の三軸圧縮試験や繰り返し負荷試験での構成関係(応力-変位関係)は、これらの基本曲面に種々の関数を与えて記述が試みられている。例えば、繰り返し負荷における塑性変形の進行に伴う歪硬化などを記述するため、負荷関数を繰り返し負荷に伴って移動、拡大する関数とした、移動、拡大硬化則を適用した研究などがある [65]。

さて、塑性論における構成関係は負荷関数 (y) と塑性ポテンシャル関数 (g) により、歪増分ベクトル ($\dot{\epsilon}_{ij}$) が、次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = \lambda \partial g / \partial \sigma_{ij} \quad (12)$$

ここで、 $\partial g / \partial \sigma_{ij}$ は塑性ポテンシャル関数の法線方向を示し、 λ は、塑性変形過程にある応力点は常に負荷関数上にあるという仮定より、負荷関数 (y) の関数として与えられる。単調負荷における応力-変位関係は、この負荷関数 (y) と塑性ポテンシャル関数 (g) の相互関係や形状に種々の仮定を設けている[66]。一方、繰り返し負荷以外の時間依存型現象の構成関係、すなわち応力-変位-時間関係の記述を塑性論の応用から試みた研究は単調負荷などと比べるとあまり多くない。その場合の基本的考え方は、

Eq.(11) 中の負荷関数 (y)、塑性ポテンシャル関数 (g) に、時間依存性を与えた粘弾性理論を適用したものが多くある。

このアプローチの代表的なものが材料強度の歪速度依存性を超過応力の概念により記述したPerzyna の粘弾性論[67 - 69] を用いた一連の研究がある。Perzyna は、一次元引っ張りでの材料強度の歪速度依存性を、Fig.12(a) に示したレオロジーモデルにより記述したMalvern [70]らの研究を三次元に拡張し、Fig.12(b) に示した静的負荷関数 y_s に対し動的負荷関数 y_d を定義した。そして、Eq.(12) で定義した超過応力 F によって、歪増分ベクトルを与えたEq.(11) 中の λ を $\gamma \Phi(F)$ で表わし、構成関係を求める基本式としてEq.(13) を与えている。ここで、この式は、負荷関数と塑性ポテンシャル関数が一致する ($g = y$) と仮定した関連流れ則を適用している。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = \partial \phi(F) \partial f_d / \partial \sigma_{ij} \quad (13)$$

このモデルを土に適用した研究としてAdachi、Okano [71], Akai、Oka [72], Zienkiewicz[73]らの研究がある。Adachi らは、静的負荷関数としてRoscoe[66]の消散エネルギー論によるCam-clayモデルを利用し、歪速度を変えた三軸圧縮試験により動的負荷関数が、Fig.13で示したような y_s の相似変換により記述できるとし、これらの仮定、結果をEq.(13) に代入して最終的に動的負荷における構成式としてEq.(14) を得ている。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \partial \phi(F) [S_{ij} / (M \sqrt{2J_2}) + \{1 - \sqrt{2J_2} / MP\} S \frac{\delta_{ij}}{3}] P_y / (P)_s + \dot{\epsilon}_{ij}^E \quad (14)$$

Adachi らは、変形速度が低下していくクリープ変形過程を記述したSingh, Mitchell [17] や、Murayamaら [40]の式についても、超過応力の概念を拡張し、 $\Phi(F)$ を書きかえることにより導出できると考えているが、動的負荷による強度増加、負荷曲面の変化、拡大と、静的なクリープ変形挙動は、機構が異なることも予測され、同じ概念で評価できるのか検討が今後必要であると思われる。

Perzyna の超過応力理論を用いた研究と全く異なったアプローチとして、Sekiguchi [74, 75] は、一次元圧縮試験で得られる土の二次圧縮や、ダイレイタンシー挙動の時間依存性を整理して、体積歪を基準として時間項をいれた塑性ポテンシャル関数 (G) をEq.(15) で与えている。また構成関係を与える、Eq.(12) の λ についても、塑性変形の継続条件より、 $\dot{G} = \dot{v}_p$ を仮定し、Gの関数として最終的にEq.(16) を得ている。

$$G = \alpha \ln [1 + (v_0 - t/\alpha) \exp (f/\alpha)] = v_p \quad (15)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^P = \{ \partial F / \partial \sigma_{mn} \cdot \dot{\sigma}_{mn} + \dot{v}_0 \exp \{ (f - v^P) / \alpha \} (\partial F / \partial \sigma_{ij}^P) / (\partial F / \partial P) \} \quad (16)$$

時間項が入った一次元圧密における構成関係から求めたこの基本式は、非排水三軸圧縮試験でのクリープ破断にいたるまでの変形過程や歪速度効果、応力緩和挙動の定性的特徴をよく表現している点は注目される。ただ、非排水三軸圧縮クリープ、応力緩和試験の場合、間隙水圧の影響が大きく、また応力状態も複雑に変化することから粉体層に適用する場合には検討が必要である。さらに、これらの研究は、変形挙動にのみ着目しており、破壊曲面など他の基本曲面や、力学挙動との関連はあまり検討されていない。またこれは弾塑性論を粉体層に適用する上での問題点であるが、厳密な意味での弾性域

はほとんど存在せず、かなり小さな応力でも塑性変形は存在している。したがって、材料力学で用いられている弾塑性論を、様々な時間依存型現象に適用すること自体に検討が必要であるように思われる。この点は、本論文の4,5章で検討を行なう。なお、Sekiguchiのような構成関係を表わす基本変数に時間依存性を入れた研究として他にMatui、Abe [76]らの非関連流れ則 ($\dot{\gamma} \neq \dot{g}$) を適用して負荷関数と塑性ポテンシャル関数を別個に求めたものや、土の異方性を加味したモデル[77]などもある。

< 使用記号 >

D = 負荷応力	[Pa]
F = 超過応力関数	[-]
f = ダイレイタンスーと二次圧密に関する時間依存性を記述した関数	[-]
g = 塑性ポテンシャル関数	[-]
h = Planck定数	[J s]
k = Boltzmann 定数	[J/K]
p = 静水圧応力	[Pa]
q = 偏差応力	[Pa]
R = 気体定数	[J / (K·mol)]
T = 絶対温度	[K]
t = クリープ時間	[s]
t _f = クリープ破断寿命	[s]
v = 体積歪	[-]
y = 負荷関数	[-]
$\beta (\epsilon_1)$ = 応力緩和パラメータ	[-]
ΔE = 活性化エネルギー障壁	[J]
δ_{ij} = クロネッカーのデルタ	[-]
$\dot{\epsilon}$ = クリープ歪速度	[-]
ϵ_{ij} = 歪テンソル	[-]
ν = 単位時間当たりに ΔE をこえる flow unit 数, rate	[-]
σ_i = 主応力	[Pa]
σ'_{ij} = 有効応力テンソル	[Pa]
τ_s = せん断強度	[Pa]

< 引用文献 >

- 1) Jenike A.W. , P.J.Elsey and R.H.Wooley : Proceeding Am. Soc. Test. Mat. , 60 , 1168 (1960)
- 2) Jenike A.W. : Trans. Inst. Chem. Engrs. , 40 , 264 (1962)
- 3) Jenike A.W. : Trans. Soc. Min. Eng. , 267 (1966)
- 4) 長尾 : 日本機械学会論文集 , 33 , 229 (1967) : 34 , 100 (1968) : 43 ,

- 4038 (1977) : 44 , 1912 (1978) : 44 , 2967 (1978)
- 5) 長尾, 片山 : *ibid* , 46 , 355 (1980)
 - 6) Rumpf H. : *Chem. Ing. Tech.* , 42 , 538 (1970)
 - 7) 牧野, 幸, 鈴木, 玉村, 井伊谷 : *化学工学論文集* , 4 , 439 (1978)
 - 8) 原, 宇都宮, 梅屋 : *材料* , 32 , 492 (1983)
 - 9) 椿, 内藤, 田上, 向阪, 神保 : *化学工学論文集* , 8 , 481 (1982)
 - 10) 内藤, 椿, 神保 : *ibid* , 10 , 744 (1984)
 - 11) 椿, 加藤, 竹山, 神保 : *ibid* , 10 , 402 (1984)
 - 12) Tsubaki J. , G.Jimbo , K.Takagi : *Preprints of 3.European Symposium on Particle Characterization* , p.487 (1984)
 - 13) 内藤, 椿 : *粉体工学会誌* , 22 , 17 (1985)
 - 14) Bishop A.W. : *Proc. 7th ICSMFE* , 29 (1969)
 - 15) Campanella R.G. , Y.P.Vaid : *Canadian Geotechnical Journal* , 11 , 1 (1974)
 - 16) Murayama S. , T.Shibata : *Proc. 5th ICSMFE* , 269 (1961)
 - 17) Singh A. , K.Mitchell : *Proc. ASCE* , SM1 , 94 , 21 (1968)
 - 18) Hyde A.F.L. , S.F.Brown : *Geotechnique* , 26 , 173 (1976)
 - 19) Mitchell J.K. , P.G.Campanella and A.Singh : *Proc. ASCE* , 94 , SM1 , 231 (1968)
 - 20) Saito M. , H.Uezawa : *Proc. 5th ICSMFE* , vol 1 , 315 (1961)
 - 21) 石原 : "土質動力学の基礎" p.225 鹿島出版会 (1976)
 - 22) Sangray D.A. , D.J.Henkel : *Canadian Geotechnical Journal* , 6 , 241 (1969)
 - 23) Shibata T. , D.Taube : *Proc. 7th ICSMFE* , 361(1969)
 - 24) Walker L.K. : *Geotechnique* , 19 , 515 (1969)
 - 25) Terzaghi K. : translated by Bjerrum from *Die Bautechnik* , from Theory to Practice in Soil Mechanics , 1960 , John Wiley and Sons , p.174 (1938)
 - 26) Taylor D.W. , W. Merchant : *J. Math. Phys.* , 19 , 167 (1940)
 - 27) Bjerrum L. : *Geotechnique* , 17 , 82 (1967)
 - 28) 例えば Shlanta S. , G.Miloslivich : *J. Pharm. Sci.* , 53 , 562 (1964)
 - 29) 例えば York P. : *J. Pharm. Pharmac.* , 30 , 6 (1978)
 - 30) 例えば David S.T. , L.L.Angsburger : *J. Pharm. Sci.* , 66 , 155 (1977)
 - 31) 原, 梅屋 : *粉体工学会誌* , 19 , 18 (1982)
 - 32) 梅屋, 原, 木村 : *材料* , 25 , 632 (1975)
 - 33) 梅屋, 原 : "セラミックデータブック'79" p.70 , 工業製品技術協会 (1979)
 - 34) 船越, 梶浦, 生川 : *材料* , 25 , 632 (1969)
 - 35) Bjerrum L. , K.Y.Lo : *Geotechnique* , 13 , 147 (1963)
 - 36) Ladd C.C. : *J. Soil Mech. Found. Div. ASCE* , 90 , SM5 , 103 (1964)
 - 37) Anderson D.G. , R.D. Wood : *J. Geo. Eng. Div. , ASCE* , 102 , GT5 , 525 (1976)
 - 38) 例えば 寺下, 古林, 小西, 宮南 : *材料* , 34 , 1249 (1985)

- 39) Murayama S. , T.Shibata : Proc. 5th ICSMFE , 269 (1961)
- 40) Murayama S. , H.Sekiguchi , T.Ueda : Soils and Foundations ,14 , 19 (1974)
- 41) 赤井, 足立, 安藤 : 土木学会論文報告集 ,225 , 53 (1974)
- 42) Akai K. , T.Adachi , N.Ando : Soils and Foundations , 15 , 1 (1975)
- 43) 大崎 : 日本建築学会論文報告集 , No.56 , 357 (1957)
- 44) Casagrande A. , W.L.Shannone : Harrard University Soil Mechanics Serrice No.31 (1948)
- 45) 例えば Shinohara K. , T.Tanaka : J. of Chem. Eng. of Japan ,8 , 46 (1975)
- 46) 例えば Hardin B.O. , V.P.Drnevich : Proc. ASCE ,98 , SM6 , 603 (1972)
- 47) 例えば Teylor G.R. , H.B.Seed : Vibration Effects of Earthquankes on Soils and Foundations ASTM , STP450 , 3 (1968)
- 48) Tatuoka F.T.Iwasaki , S.Yoshida , S.Fukushima and H.Sudo : Soils and Foundations ,19 , 39 (1979)
- 49) Mogami T. , K.Kubo : Proc. 3rd International Conference on Soil Mech. and Found. Eng. , 1 , 152 (1958)
- 50) Silver L. , H.Bolton : Proc. ASCE SM9 , 1711 (1973)
- 51) 日高, 三輪 : 化学工学論文集 ,7 , 184 (1981)
- 52) Robert A.W. , O.J.Scott : Powder Technology , 21 , 45 (1978)
- 53) 関口 : 土質力学論文報告集 ,18 , 85 (1978)
- 54) Glasstone S. , K. Laidler and H.Eyring : "The Theory of Rate Process" McGraw Hill (1941)
- 55) Mitchell J.K. : Proc. ASCE ,90 , SM1 , 29 (1964)
- 56) Mitchell J.K. , A.Singh and R.G.Campanera : Proc. ASCE ,95 SM5 , 1219 (1969)
- 57) Andersland O.B. , A.G.Douglas : Geotechnique ,20 , 1 (1970)
- 58) 伊藤、松井 : 土木学会論文報告集 ,236 , 109 (1975)
- 59) 松井, 伊藤 : ibid ,242 , 41(1975)
- 60) Christeusen R.W. , P.L.Wu : Proc. ASCE ,90 , SM6 , 125 (1964)
- 61) Ter-Stepanian : Geotechnique ,25 , 299 (1957)
- 62) Umeya K. , R.Hara : Polymer Eng. Sci. , 18 , 366 (1978)
- 63) 国尾 : " 固体力学の基礎" , 培風館 (1977)
- 64) 松井, 阿部 : 土と基礎 ,31 , No.11 ,97(1983) :31 , No.12 , 73 (1983) :32 , No.1 , 71 (1984)
- 65) 例えば Greenstreet W.L. , A.Phillips : Acta. Mechanica ,16 , 143 (1973)
- 66) 例えば Roscoe K.H. , A.H.Shofield and A.Thurairajah : Geotechnique ,13 , 211 (1963)
- 67) Perzyna P. : Proc. of Vib. Pro. , 3 , 281 (1963)

- 68) Perzyna P. : Quart. Appl. Math. 20 , 321 (1963)
- 69) Perzyna P. : Advan. in Appl. Mecha. , 9 , 243 (1966)
- 70) Malvern L.E. : J. Appl. Mech. , 18 , 203 (1951)
- 71) Adachi T. , M.Okano , Soils and Foundations , 14 , 55 (1974)
- 72) Akai K. , F. Oka : Pro. of JSCE , 253 ,109 (1976)
- 73) Zienkiewicz O.Z. , C.Humpheson , R.W.Rewis : Geotechnique , 25 , 671 (1975)
- 74) Sekiguchi H. , H.Ohta : Preprints of Speciality Session 9 , 9th , ICSMFE ,299 (1977)
- 75) Sekiguchi H. : Soils and Foundations ,24 , 129 (1984)

第 1 章 粉体層のクリープ， 疲労破断現象の統計的解析[1-3]

乾燥した微粉体層にも疲労破断現象が存在することを確認したことから[4]、クリープ破断現象も存在することが、土質力学における結果からも当然予測される。材料力学の分野ではこれらの時間依存型破断現象は、負荷応力と破断するまでの負荷回数または負荷時間、すなわち寿命の関係で整理を行なうが、土質の場合を含め、粉体層の疲労破断試験での応力-寿命関係は、 10^3 秒程度の比較的狭い負荷範囲で定性的傾向が求められているにすぎない。

そこで本章では、定量的考察をこれらの現象に対して行なうため、応力負荷回数および負荷時間を拡大して疲労およびクリープ試験を行ない材料力学の分野で用いられている統計的手法により応力-寿命関係の解析を行なう。また、既報[4]では準静的な繰り返し負荷により疲労試験を行なったが、ここでは振動を用いた動的繰り返し負荷試験を採用し、負荷回数を拡大すると共に、動的特性を含め考察を行なっている。

まず、実験方法について報告する。

1-1 実 験

実験は、振動を用いた二種類の動的繰り返し引っ張り試験およびクリープ引っ張り試験をおこなった。まず、動的疲労試験について述べる。

1-1-1 動的疲労試験

動的繰り返し負荷試験としては、高周波振動加速度により粉体層に繰り返し引っ張り力を負荷する実験、および振動振幅を用いた低周波数での繰り返し試験の2種類を行なった。前者は破断するまでに多くの負荷回数を要する場合、後者は、比較的少ない負荷回数で破断の起こる場合の現象を解明することを主目的とした。

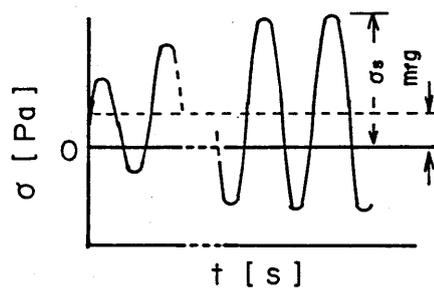
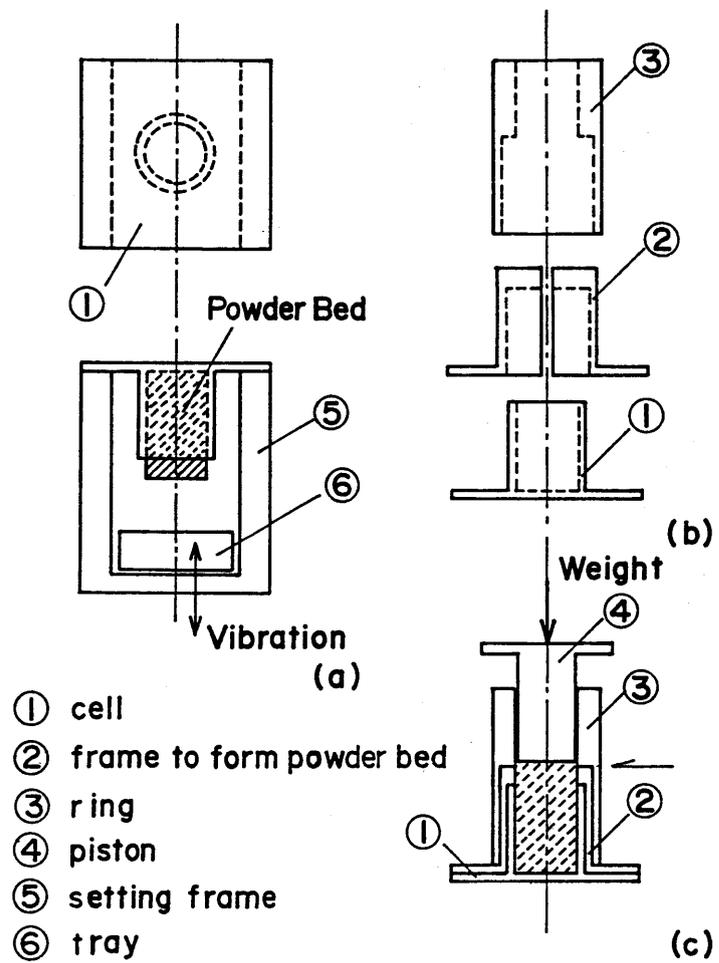
1-1-1, 1 振動加速度による繰り返し負荷試験 (実験1)

この実験は、Fig.1-1(a) に装置、セルの概略を示したように、粉体層を一部露出させて成形したセルを、振動台上に取り付け、振動加速度により繰り返し引っ張り応力を負荷し、セル上面で破断させる実験である。

セル1は、内径 25.2mm、外径 30mm、深さ 32mm で材質はステンレスである。このセルを取りつけた振動台は、電磁式振動台(ノード社製、VT-10型)で、振動周波数は、5-50000Hzまで連続的に変えることができる。

粉体層の成形は、Figs.1-1(b),(c) に示すように、測定セル(1)に二分割式の粉体層成形用の枠(2)を取り付け、(3)の円筒で固定する。これに試料を1000 μ mフルイを通して充填し、(4)のピストンに分銅をのせて圧密した。この際、圧密後の試料高さが成形用の枠(2)の上面より1mm程度上になるよう試料の充填量を調節した。10分間の予圧密後、分銅、ピストン(4)、および固定用円筒(3)を取り外し、枠(2)の上面で粉体層をすりきった。そして最後に、枠(2)をはずし成形を完了した。

実験方法は、Fig.1-1(d)に実験開始時の応力波形を示したように、振動を開始し、設



(d)

Fig.1-1 振動加速度による動的繰り返し負荷試験装置と試験時の負荷応力の経時変化の概略

定振動加速度に達した時を負荷開始時刻とし、粉体層がセル下面で破断して露出層が円柱状のまま受け皿(6)に落下するまでの時間、および受け皿(6)中の落下した粉体層の質量を測定した。振動加速度は、セル上面に加速度ピックアップ(EMIC社製,541-AT,圧電型)を垂直に取りつけ測定した。

また実験可変条件は、予圧密応力および振動周波数で前者は11.4–41.3kPaの範囲で変えた。この実験では、予圧密応力が小さいとセル内から粉体層が抜け落ちるため、予圧密応力範囲には制限がある。振動周波数については、セルの構造や振動台の装置特性によって生じる水平方向の振動加速度を、セル側面上部に加速度ピックアップを取りつけて測定し、垂直方向に対する水平方向の加速度の比が5%未満であった70,100,300Hzを実験条件として選んだ。なお、Fig.1-1(c)示したように、設定振動加速度に達するまでに要する時間は、2,3秒で、助走区間の長さが常にほぼ一定となるよう調節した。また実験データは、破断面がセル上端にほぼ一致しなだらかなもののみ採用した。

この方法は高周波数振動で行なうので、少ない負荷回数で破断する場合には極めて短時間で破断するため、破断に要する時間測定が不正確となる。そこで、低周波数の振動による繰り返し負荷試験が必要であるが、この方法では用いた振動台の振動振幅が小さいため、低周波数では十分な加速度が得られない。そこで、低周波数繰り返し負荷試験装置を用い実験を行なった。

1-1-1, 2 振動振幅による繰り返し負荷試験 (実験2)

粉体層に振動振幅を用いて動的繰り返し引っ張り応力を負荷する装置の概略をFig.1-2(a)に示す。この装置は、吊り下げ式付着力測定装置(細川粉体工学研究所製;コヒテスター)の可動セル側に振動台を接続したもので、振動振幅により粉体層に引っ張り応力を繰り返し負荷することができる。

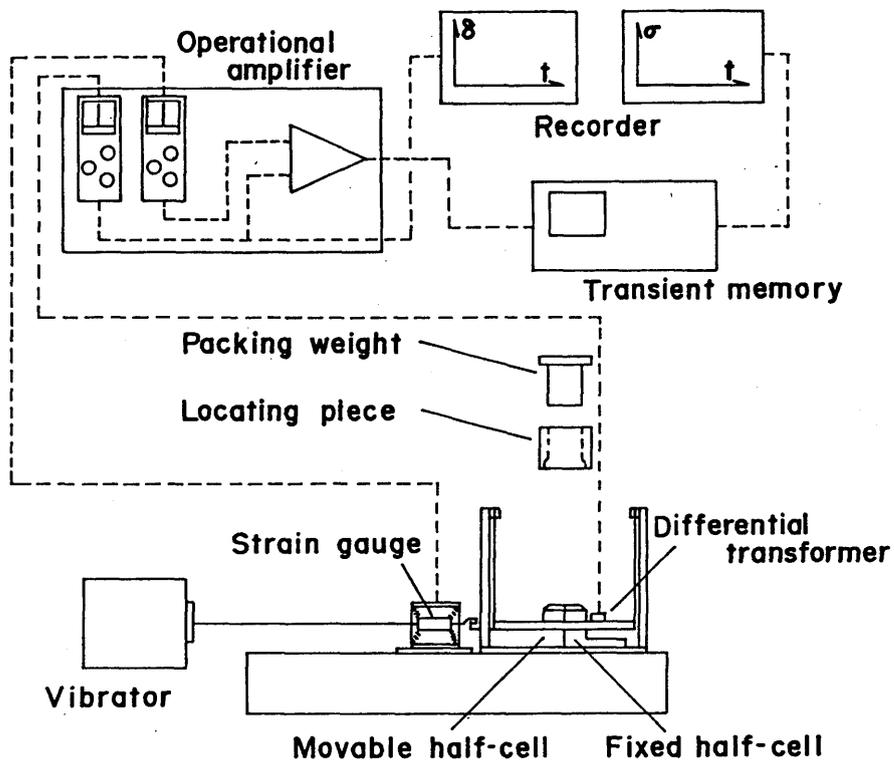
粉体試料を充填するセルは、内径50mm深さ20mmの二分割式セルで、負荷応力はストレーンゲージにより測定し、変位量は差動トランスによって測定した。粉体層の成形は、可動セル部をクランプで固定し、セルに成形用棒を取りつけ、1000 μ mフルイを通過させて充填し、10分間予圧密後、セル上面で粉体層をスリ切っを行なった。

実験は、Fig.1-2(b)に負荷応力の経時変化の概略を示したように、可動セルと振動台をつなぐワイヤーに張力を与えてからクランプを外して振動を開始し、徐々に振動振幅を増加させ、層に加わる引っ張り応力の最大値が設定した値 σ_s に達した時を負荷1回目とし、破断するまでの負荷回数を求めた。また、張力を加えてクランプをはずす時に微小な応力変動を観測したが、 σ_s に比べかなり小さい変動であることを確認している。

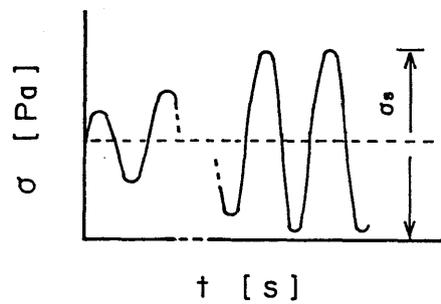
実験条件として、振動周波数は、5,20Hzの二種類を選んだ。負荷応力は、最大値 σ_s と σ_s の5–20%の最小値の間で正弦的に変動させ、常に引っ張り応力が作用している系で実験を行なった。この点が実験(1)と異なっている。なお、あらかじめ予備実験を行なって得た平均の静的引っ張り強度 $\bar{\sigma}_2$ より負荷応力が小さな値となるよう調節している。また、負荷開始から設定応力に達するまでの徐走区間は、10秒程度でほぼ一定となるよう調節した。粉体層の変形に伴い生ずる負荷応力の低下は、5%以内になるよう振動振幅を調節した。

次にクリーブ試験について述べる。

1-1-2 クリーブ引っ張り試験 (実験3)



(a)



(b)

Fig.1-2 振動振幅による動的繰り返し負荷試験装置と試験時の負荷応力の経時変化の概略

実験装置は、Fig.1-3(a)に示したように実験(2)で用いた装置の可動セルとセルを引っ張るプーリーの中に弾性係数の小さなバネを入れたもので、定応力負荷速度での応力負荷およびクリープ試験が可能である。粉体試料の充填、圧密、成形操作は、実験(2)と同様にして行なった。成形操作終了後、可動セルを固定していたクランプをはずし、Fig.1-3(b)に示したように、プーリーを回転させ粉体層に応力を負荷し、設定引っ張り応力 σ_s に達した所でプーリーを止め引っ張りクリープを行なった。そして、設定応力に達してから破断までの時間、寿命値 t_b を求めた。実験条件として、予圧密応力は、6.6kPaに固定して行なった。

実験(1-3)に共通する実験条件として、疲労、クリープ試験は、 10^4 秒までを目安に行ない、破断しないものは負荷応力を増加させて強度測定などを行なった。温度、湿度の条件は、 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 、 $50\% \pm 5\%$ の範囲でほぼ一定となるよう調節した。実験に用いた試料は、Table 1-1に一括して示した。

Sample	\bar{d}_p [μm]	$\rho_p \times 10^{-3}$ [kg/m^3]
Kanto loam (JIS 11)	2.0	3.0
fused alumina (W.A. #8000)	1.3	3.9
lactose	46.9	1.53
limestone	27.0	2.7
limestone (NS 100)	4.6	2.7

Table 1-1 試料

では、まず疲労試験結果から報告する。

1-2 疲労、クリープ破断試験による負荷応力-寿命関係

材料力学で行なわれているように、疲労破断現象を、負荷応力と負荷開始から破断するまでの負荷回数、(以下寿命と呼ぶ)の関係、すなわちS-N関係で整理してみる。結果の整理において、層に加えた応力の最大値としては、実験(1, 2)とも最大値を選んだ。したがって実験(1)では、負荷応力 σ_s は、次式で与えられる。

$$\sigma_s = m_f(g + \alpha_0 \omega^2)/A \quad (1-1)$$

ここで、 m_f は破断落下した粉体層の実測した質量、 α_0 は振動振幅、 ω は角振動数、 A は破断面の断面積である。また、寿命 N_b は負荷開始から破断するまでの負荷回数で与えた。

求めたS-N関係の一例をFig.1-4示す。この図はデータ数が多く広い実験条件範囲で行なった関東ローム粉(JIS 11種)の結果である。ここでは事前に吊り下げ式付着力測定装置を用いて得られた各空隙率における平均の静的引っ張り強度 $\bar{\sigma}_z$ が、 $N=1$ での値として与えられている。この図から明らかなように、空隙率が小さく静的強度が大きい場合程、疲労強度は大きくなっている。また実験条件の中で、実験(1, 2)のセ

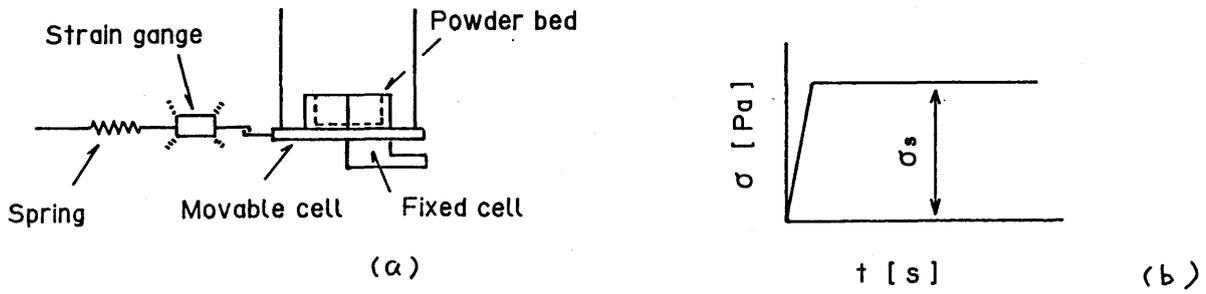


Fig.1-3 クリープ引っ張り試験装置と試験時の負荷応力の経時変化

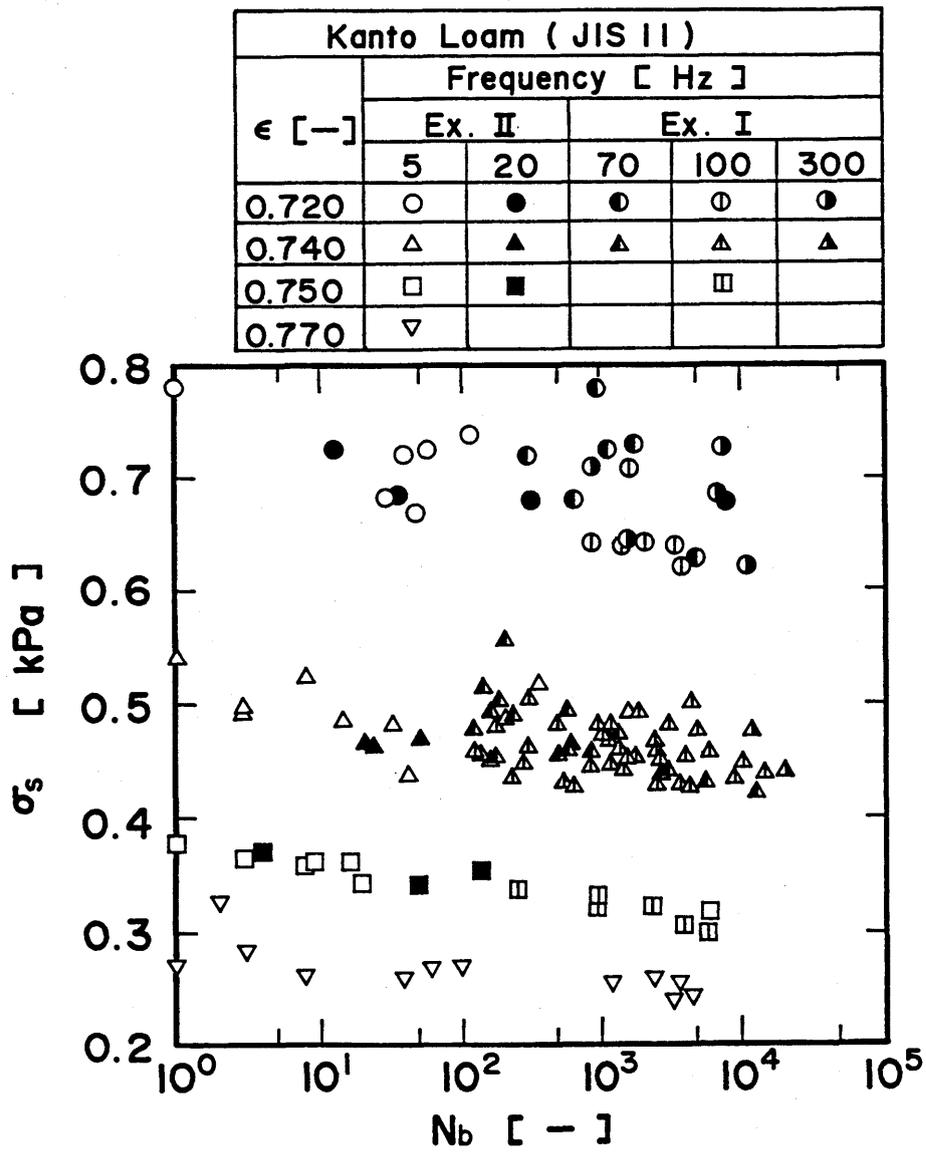


Fig.1-4 動的繰り返し負荷試験での設定負荷応力-破断寿命関係の一例

ル、装置形式の違いおよび振動周波数の影響は現在のところ顕著にみられない。ここでは示さなかったが、他の試料でもこれらの実験条件の影響は顕著に認められなかった。したがって、本章ではこれらの実験条件については特に考慮しないで解析を行なった。

さて、この結果から静的強度の違いを除いて整理を行なうために、平均の静的引っ張り強度 $\bar{\sigma}_z$ で負荷応力の無次元化を行ない、その結果をFig.1-5 に示した。この図は、本研究で行なったすべての実験結果をまとめて示したものである。設定した負荷回数まで応力を繰り返し負荷しても破断が起きなかったデータを -○- 印でしめした。

粉体層の S-N関係は、応力比をとって静的強度の違いを除くとほぼまとまる。ここで寿命値に着目すると、破断が起きたもので最も長寿命のデータは、 3×10^4 回であり、それ以上の負荷回数では破断点が存在せず興味深い。また、応力比を 0.7以下に設定した場合には、本試験で行なった負荷回数範囲 10^4 回以内では粉体層は破断していない。これは、疲労破断を起こす応力の下限值（耐久限）の存在を示唆していると考えられる。一方、応力比が1.0 よりおおきな値をとる場合でも疲労破断が起きている。これは、準静的繰り返し試験結果では表われておらず動的試験特性として注目される。この検討は3章で行なう。

同様の結果は、クリーブ破断試験においても得られる。Fig.1-6,7 は、クリーブ引っ張り応力 σ_s と、負荷応力が σ_s に達してから破断するまでの時間（クリーブ寿命） t_b の関係を示してある。縦軸の負荷応力はFig.1-5 同様に事前に求めた平均の静的引っ張り強度 $\bar{\sigma}_z$ で無次元化してある。また、クリーブ引っ張り負荷しても破断しなかったデータを黒ぬりのKey で示してある。

この図で各試料のクリーブ破断点が存在する下限応力値の比較を行なう。Fig.1-6 の3種類の試料は、ある程度の応力範囲でクリーブ破断現象が観察されるが、関東ローム粉、熔融アルミナ粉では $\bar{\sigma}_z$ の90% 程度、ラクトース粉では80% 程度で、本試験範囲である 10^4 秒以内で破断しない応力の下限值（クリーブ耐久限）が存在しているようである。一方Fig.1-7 の石灰石粉では、 $\bar{\sigma}_z$ よりわずかに負荷応力を下げただけで 10^4 秒以内にクリーブ破断が起きないデータが存在し、クリーブ破断現象自体があまり観察されない。以上の結果からクリーブ破断の起こる応力の限界値により粉体試料が分類できることが期待される。また、クリーブと動的疲労破断ではこの耐久限を示す応力比に差が存在する。この点については、次節および3章で検討を加える。

さて、疲労、およびクリーブ破断現象が、ある程度の応力範囲で存在したFig.1-5,6 について、現象をさらに考察するには、データのばらつきが大きいため、次節で統計的手法を用いた解析により詳細な検討を行なう。解析方法の説明は、Fig.1-5 の疲労破断のデータを例にとって述べる。

1-3 疲労，クリーブ破断現象の統計的解析

Fig.1-5,6 のデータのばらつきは、ある応力比に対する寿命値が分布を持っていることを示している。そこで、統計的解析をこの寿命分布に対して行ない、この現象の定量的考察を試みた。

1-3-1 統計的解析方法

Key	○	●	⊙	⦿	△	▲	▴	□	■
ϵ [-]	0.720	0.740	0.750	0.770	0.675	0.690	0.710	0.510	0.545
Sample	Kanto Loam (JIS 11)				Fused Alumina		Lactose		

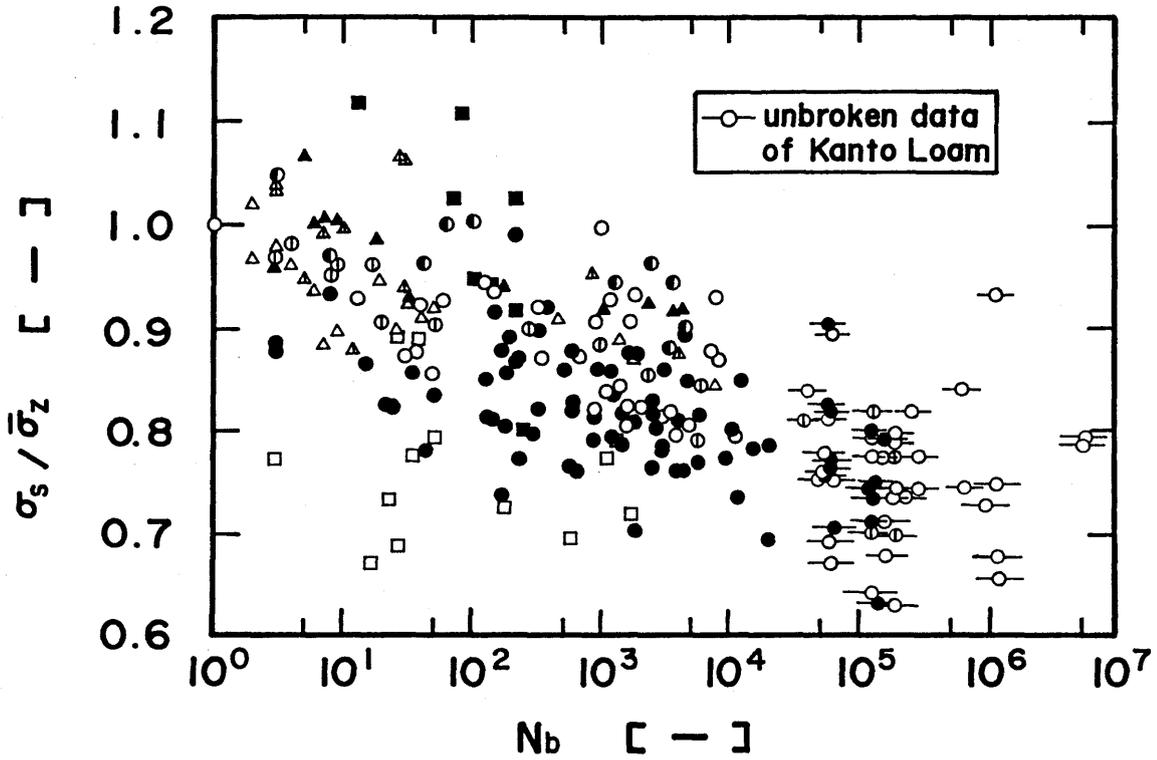


Fig.1-5 動的繰り返し負荷試験での設定負荷応力比-破断寿命関係

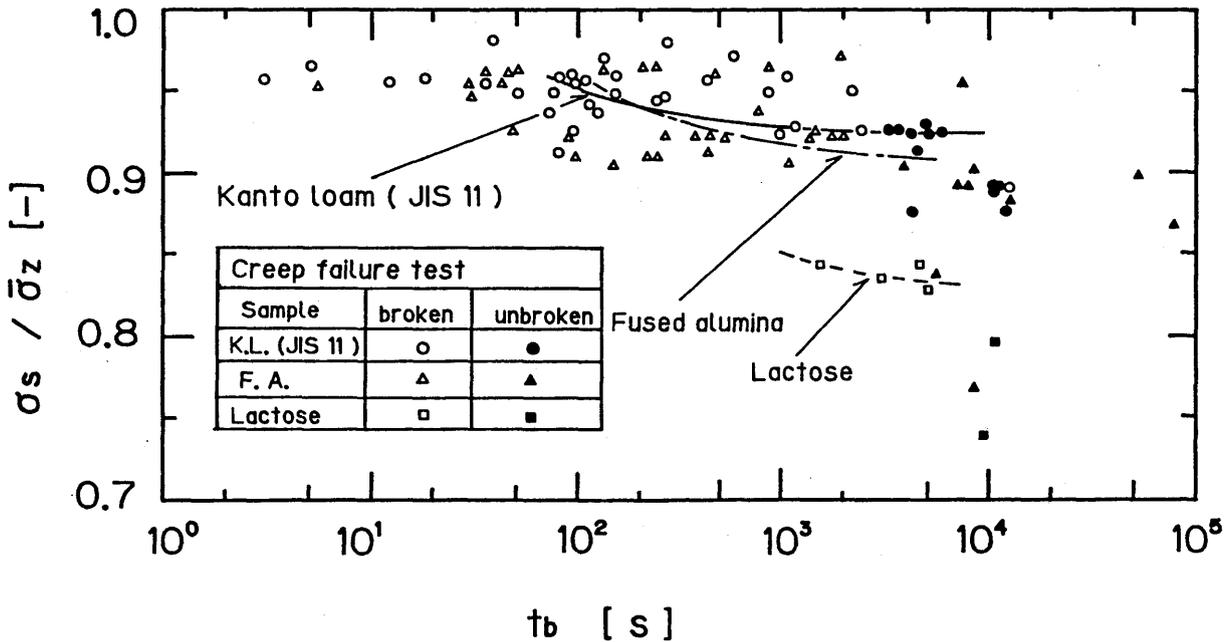


Fig.1-6 クリープ引っ張り試験における設定負荷応力比-寿命関係
(関東ローム、熔融アルミナ、ラクトース粉)

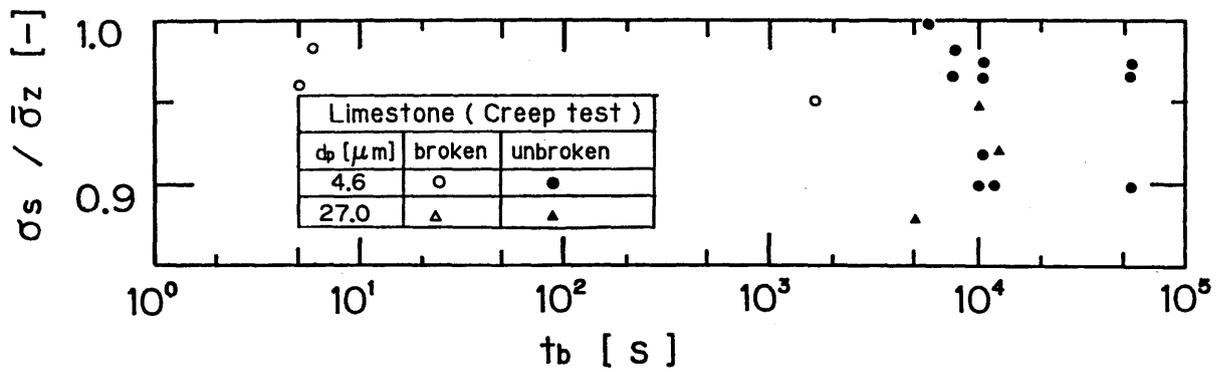


Fig.1-7 クリープ引っ張り試験における設定負荷応力比-寿命関係 (石灰石粉)

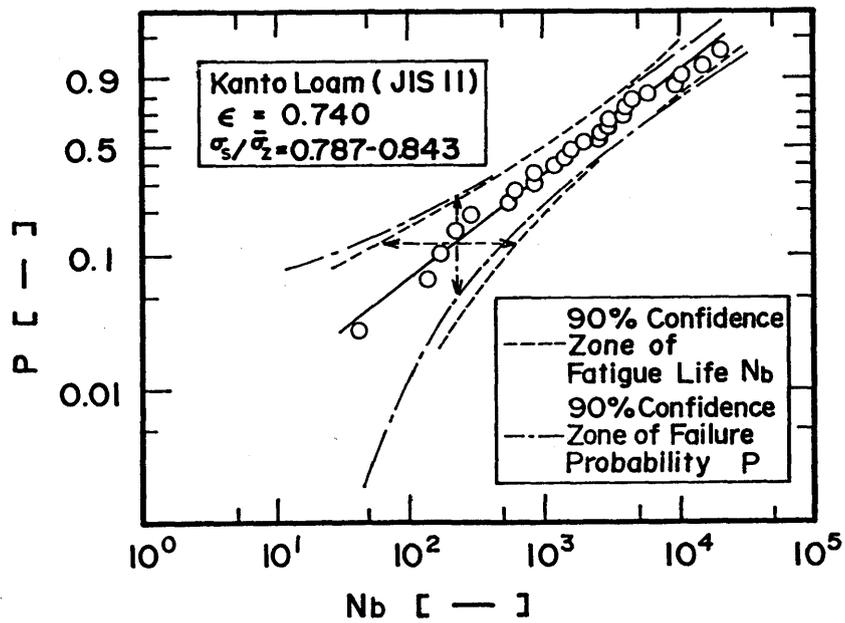


Fig.1-8 疲労破断寿命分布の Weibull 分布関数による評価 (関東ローム粉)

解析方法は、”統計的疲労試験法（日本機械学会基準）” [5] に準拠して次のように行なった。

まず、最初に、負荷応力比をデータ数に応じて2-7個の範囲に分け、各応力比範囲内での寿命値に、順序統計量として整理するために、寿命の小さい方から並べ順位番号をつけた。各々の順位番号に対して母集団の分布形状が未知であるので、メジアンランク[6]を用いて各寿命値に達しないで破断する粉体層の割合、すなわち破断確率を与えた。この際、非破断点を含む応力範囲では、非破断点も含め解析を行なった。

この方法で得られた寿命分布は、次式で与えられる二母数Weibull分布によって最もよく表現された。このWeibull分布は、2つの母数（ m_r , N_p ）をパラメータにして累積分布関数 $P(N)$ が次式で示される。

$$P(N_b) = 1 - \exp \left\{ - \left(N/N_p \right)^{m_r} \right\} \quad (1-2)$$

また、頻度分布関数 $p(N)$ が次式で示される。

$$p(N_b) = \left(1/N_p \right)^{m_r} m_r N^{m_r-1} \exp \left\{ - \left(N/N_p \right)^{m_r} \right\} \quad (1-3)$$

Eqs.(1-2,3)で、特性寿命 N_p は、63.2%での寿命値である。また、形状母数 m_r は、寿命のばらつきを表わす指標となり、Weibull確率紙上で傾きを表わす。同様にクリーブ破断試験による寿命分布も次式で表わされる。

$$P(t_b) = 1 - \exp \left\{ - \left(t/t_p \right)^{m_c} \right\} \quad (1-4)$$

$$p(t_b) = \left(1/t_p \right)^{m_c} m_c t^{m_c-1} \exp \left\{ - \left(t/t_p \right)^{m_c} \right\} \quad (1-5)$$

1-3-2 統計的解析結果

Weibull分布を用いた疲労破断寿命分布の統計的解析結果を示す。Fig.1-8は、その一例で、データ数の最も多い関東ローソ粉（JIS 11種）、空隙率0.74の結果である。分布を求めた応力範囲を図中に示してある。この図で実線は、寿命値とメジアンランクから求めた破断確率のデータから最小二乗法によって求めたものである。そして、破線は寿命値の、一点鎖線は破断確率の90%信頼区間を示したものである。さらに、溶融アルミナ粉の結果の一例をFig.1-9に示す。この図では、異なる負荷応力範囲で分布を求めた結果を示してある。負荷応力を変えると特性寿命 N_p は大きく変化し、形状母数 m_r も多少変化する。

次に、クリーブ破断寿命分布の統計的解析結果をFig.1-10に示す。疲労破断試験結果と同様にほぼ直線関係が得られている。以上の結果から疲労、およびクリーブ破断寿命分布がEqs. (1-2-5)中の母数で表現できることが示された。そこで次に、各母数値に着目して検討を行なう。

まず、疲労破断試験により得られた特性寿命 N_p と形状母数 m_r の最小二乗法による推定値、および90%信頼区間を求めた応力範囲内の全測定点の応力比データの平均値に対して示したのが、Figs.1-11,12である。この図で明らかなように特性寿命 N_p は応力比の増加に伴い減少する傾向を持つが、データ数の多い関東ローソ粉の $\varepsilon=0.72, 0.74$ 結果をみると、 N_p の減少傾向は、図中の傾きの異なる二本の実線で示したように応力範囲により異なる。この傾向の変化は、90%信頼区間でも現われており、統計的解析で

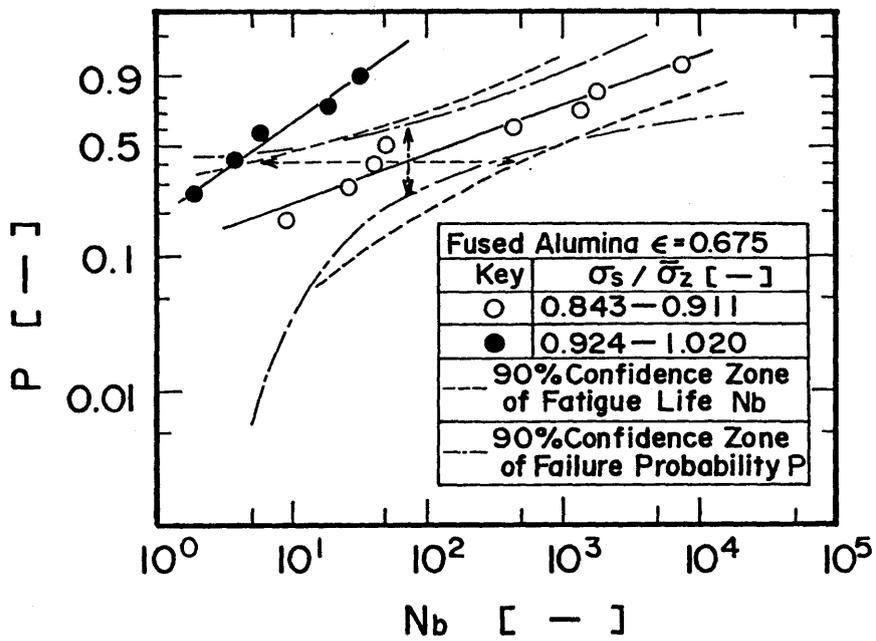


Fig.1-9 疲労破断寿命分布の Weibull分布関数による評価 (溶融アルミナ粉)

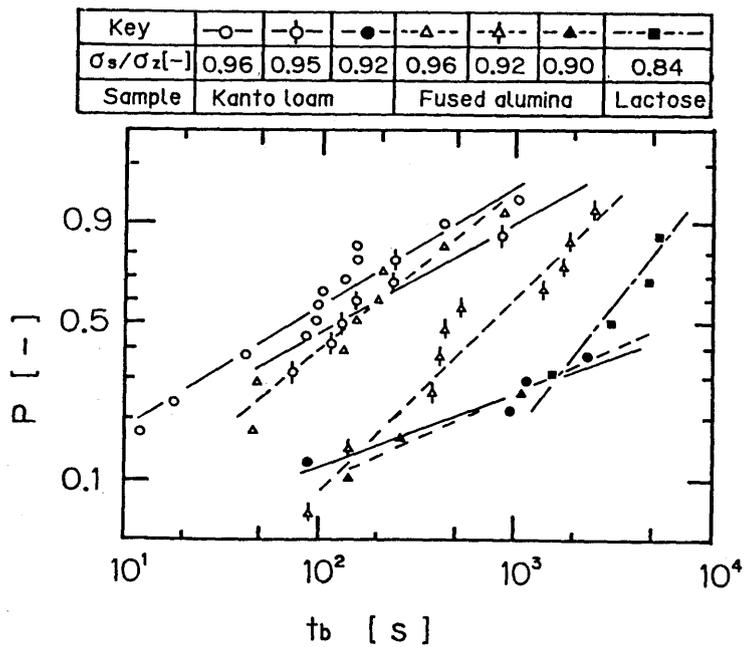


Fig.1-10 クリープ破断寿命分布の Weibull分布関数による評価

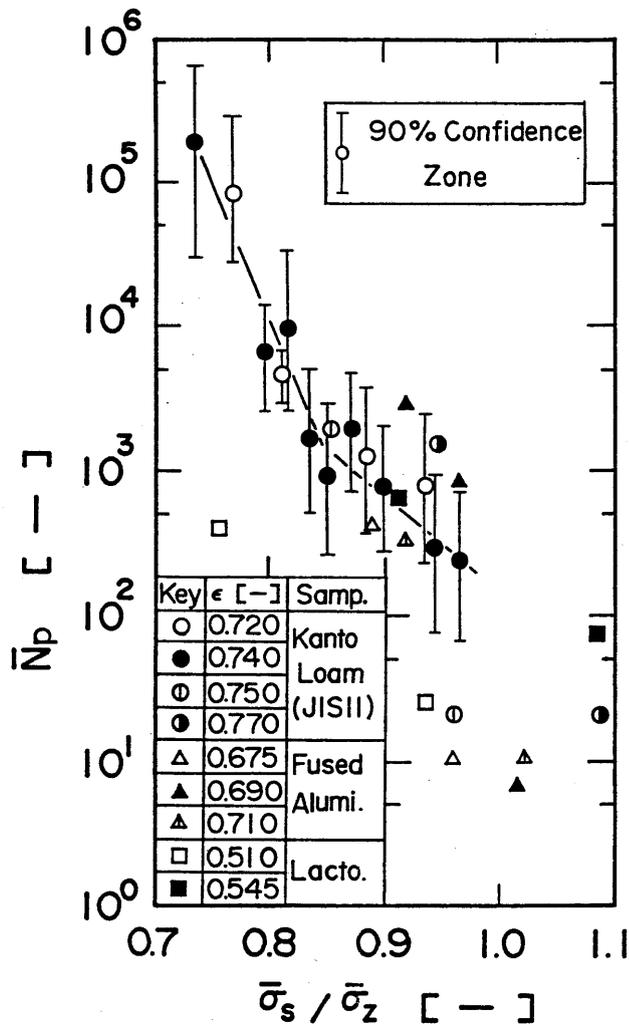


Fig.1-11 特性寿命と負荷応力の関係（疲労破断試験）

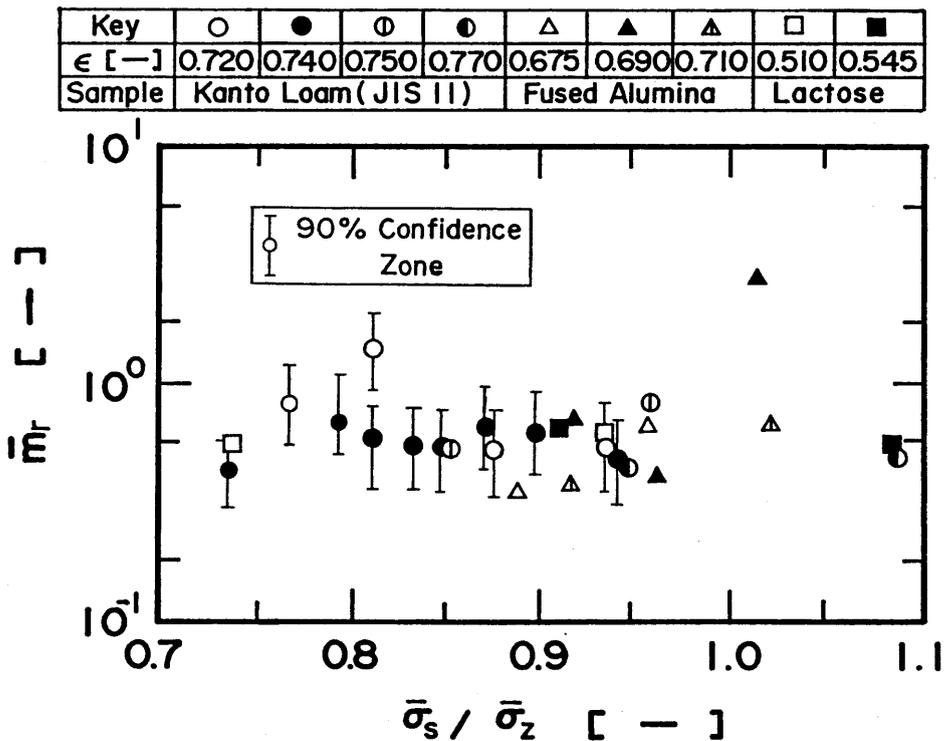


Fig.1-12 形状母数と負荷応力の関係（疲労破断試験）

用いたデータ数が、 N_p の定性的変化を評価するうえで不足していないことを示している。また、その他の測定点の少ない実験条件では、減少傾向が変化する応力比の前後1, 2点しか推定値がえられていないと考えられるが、推定値は図中の実線よりはずれた位置に存在しており、試料、実験条件によりS-N関係の位置、形状には違いがあることが、ここでも示されている。一方、形状母数 m_r の結果を示したFig.1-12は、 m_r がほぼ一定であることを示している。

次にクリーブ破断試験より得られた母数推定値 m_c 、 t_p についてFigs.1-13,14に示す。特性寿命の結果を示したFig.1-13をみると負荷応力比を下げていくと、急激に t_p が増加しており、破断現象が存在する応力範囲が狭いものの動的試験と同様の傾向を示している。また形状母数の結果を示したFig.1-14では、動的疲労の場合とは異なり試料間での違いが表われ、溶融アルミナ粉の方が関東ローム粉に比べ m_c の値が大きく分布が鋭いことを示している。しかし、事前に測定した、静的強度のばらつきは、変動係数で溶融アルミナ粉4.7%、関東ローム粉2.7%で寿命分布と逆の傾向を示している。したがって、寿命分布は、静的強度の分布からだけでは推定できない特性値として期待される。

さて、疲労破断現象の統計的解析結果から特に注目する点は、特性寿命 N_p の減少傾向が傾きの異なる二本の直線で示された点にある。これは、疲労破断現象が応力比によって二つの領域に分けられることを示唆していると考えられる。このことに特に考慮しながら、次に考察を行なう。

1-4 考 察

Fig.1-11において応力比を下げていくと、ある応力比から特性寿命 N_p が急増する現象は応力比の低下に伴う破断寿命の増加に加えて、本研究での負荷回数、負荷時間範囲では、破断しない非破断データが増大することにも起因している。そこで、この非破断現象と、特性寿命の変化との関係をもう少し整理してみる。非破断現象を検討するために、まず、本試験範囲内での破断確率を関東ローム粉を例にとってFig.1-15に求めた。疲労試験では 3×10^4 回、クリーブ試験では 10^4 秒以上の範囲では破断点が観察されなかったことから、とりあえずこの負荷回数、負荷時間までの破断確率を本試験範囲内での破断確率 P とした。破断確率はFig.1-5,6,7の応力比-寿命関係において、応力比をそれぞれの範囲に同じデータ数が入るように分け、各応力範囲内の非破断点を含む全データ数に対する破断データの比として与えた。

この結果と、Figs.1-11,13で得られた特性寿命の変化傾向を比較すると、破断確率 P^* がほぼ1に近づく応力比と疲労破断での特性寿命 N_p の変化傾向が変わる応力比が、ともに0.9程度でほぼ一致している。同様にクリーブ破断試験でも $P^*=1$ となる応力比で t_p が急増している。したがって、疲労破断試験で N_p の減少傾向の変化点以下の応力範囲は、有限回数の負荷では必ず非破断点を含む疲労破断限度領域であり、 $P^*=0$ となる応力比では、特性寿命 N_p は無限大に近づくと考えられる。このことは、この領域でのS-N関係が寿命軸に対してほぼ平行であることを示している。以上のことからこの領域は、S-N関係における水平部であると考えられる。

一方 N_p の急増点以上の応力範囲では、有限負荷回数で必ず破断する有限寿命領域でありこの領域でのS-N関係が、水平部に比べ傾斜していることを示している。したが

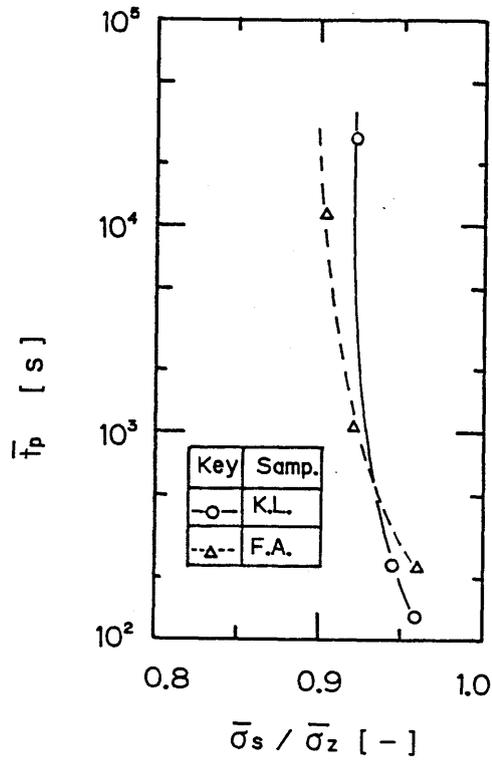


Fig.1-13 特性寿命と負荷応力の関係（クリーブ破断試験）

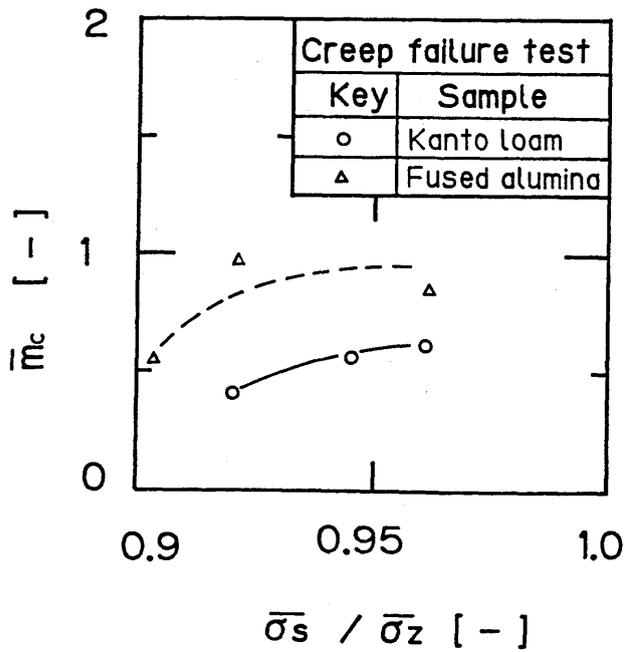


Fig.1-14 形状母数と負荷応力の関係（クリーブ破断試験）

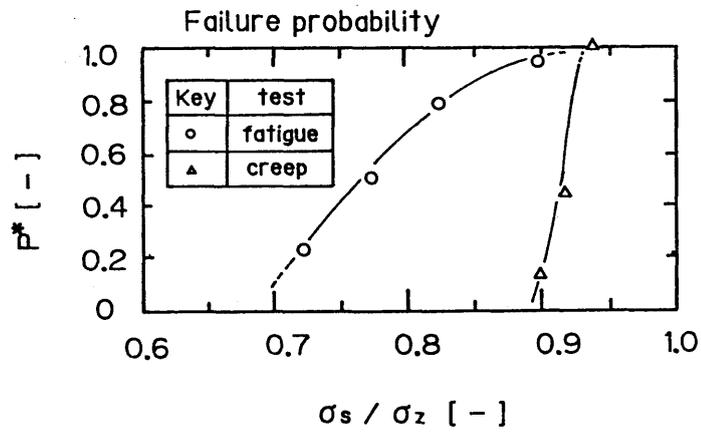


Fig.1-15 本試験範囲内（疲労試験： $N_b = 3 \times 10^4$ 回，
クリープ試験： $t_b = 10^4$ 秒）での破断確率と負荷応力の関係

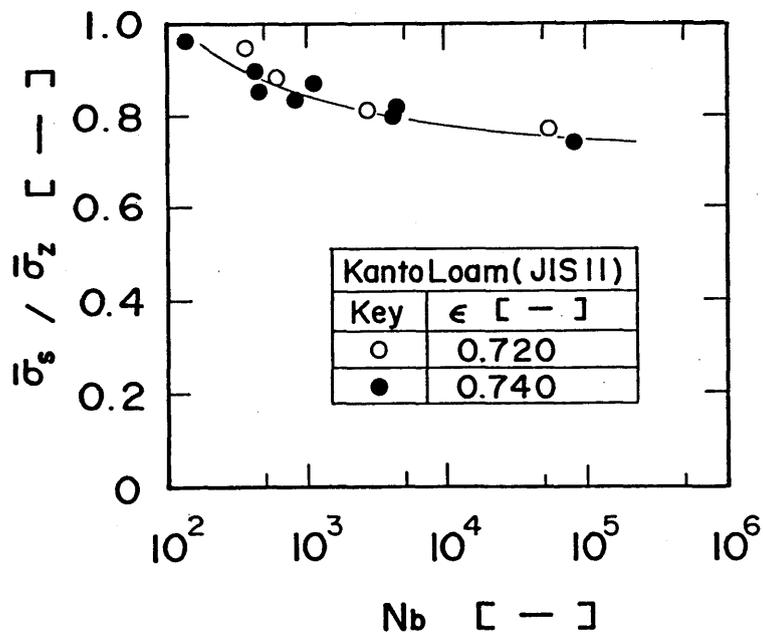


Fig.1-16 繰り返し負荷試験より求めた S - N 曲線

って、この領域はS-N関係における傾斜部であると考えられる。この水平部、傾斜部にあたる応力範囲を、動的疲労とクリープとで比較してみると、傾斜部にあたる $P^* = 1$ の応力比範囲は両者ともほぼ一致しているのに対し、水平部にあたる $0 < P^* < 1$ の応力範囲は、動的疲労では広くかなり低い応力比でも破断点が存在しているのに対し、クリープでは狭い。この原因には、試験装置の形式の違いだけでなく動的特性、すなわち応力負荷速度依存性が存在していることが、期待される。この動的特性としては、序章で述べた土質力学での研究成果より、他に破壊強度の応力負荷速度依存性が予測される。事実Fig.1-16にS-N曲線の一例として関東ローム粉の50% 寿命値を結んだ結果を示したが、この図は傾斜部から水平部に移行する負荷回数が 10^3 回程度であることを示すとともに、 $N = 1$ での応力比は1.0 より大きくなることを示している。この現象は、静的強度 σ_2 の分布では説明つかず動的繰り返しでは基準となる負荷一回で破断する強度が増加していることに起因していると考えられる。これらの動的特性については、3章で再び検討する。

結 言

粉体層に静的引っ張り強度以下の引っ張り応力を動的繰り返し負荷およびクリープ負荷する実験を行ない以下の結言を得た。

- 1) 粉体層の疲労破断現象には、 3×10^4 回の有限負荷回数範囲ではあるが、破断の起こる応力の限界値（耐久限）の存在する。
- 2) クリープ破断現象においても、 10^4 秒の有限時間範囲ではあるが耐久限が確認され、この耐久限応力比により試料をCharacterizeできる可能性をしめした。
- 3) この耐久限以上の応力で動的繰り返しおよびクリープ負荷をおこなった所、破断寿命分布は、ともにWeibull 分布で表わすことができた。
- 4) 粉体層の引っ張り疲労破断におけるS-N関係は、負荷応力比を下げていくと傾斜部から水平部に移行していく。
- 5) クリープ破断寿命分布の広さを試料間で比較したところ、静的強度のばらつきと逆の傾向を示し寿命分布が静的試験から推定できない特性値であることを示した。

< 使用記号 >

d_p = 一次粒径	[μm]
m_r, m_c = Weibull 分布関数中の母数 (形状母数)	[-]
N = 繰り返し負荷回数	[-]
N_b = 疲労破断寿命	[-]
N_p, t_p = Weibull 分布関数中の母数 (特性寿命)	[-], [s]
P = 疲労およびクリープ試験での破断確率	[-]
P^* = 本試験範囲での破断確率	[-]
t = クリープ負荷時間	[s]

t_b	=クリーブ破断寿命	[s]
ε	=空隙率	[-]
ρ_p	=粒子密度	[kg/m]
σ	=負荷引っ張り応力	[kPa]
σ_s	=設定応力	[kPa]
σ_z	=単調負荷による静的引っ張り強度	[kPa]

<引用文献>

- 1) 神谷，椿，神保：化学工学論文集，11，186（1985）
- 2) Kamiya H.，J.Tsubaki and G.Jimbo：Preprints of the 1st World Congress Particle Technology（1986,4 Nurnberg），to be published
- 3) Kamiya H.，J.Tsubaki，G.Jimbo：KONA，4（1986）to be published
- 4) 椿，加藤，竹山，神保：化学工学論文集，10，402（1984）
- 5) 日本機械学会編 ”統計的疲労試験法 JSME-S-002-1981” p.13（1981）
- 6) 塩見：“信頼性工学入門”，p.60，丸善，東京（1972）

第2章

疲労，クリープ破断現象 における塑性変位量増加過程 [1]

前章で検討した疲労、クリープ破断現象における応力-破断寿命関係は、破断現象の最終状態に着目した結果である。この章では、負荷開始から破断までの疲労、クリープ破断過程を考察するため負荷によって生じる塑性変位量の増加過程に着目した。最初に動的繰り返しおよびクリープ引張り負荷試験より得られる粉体層の変位量の増加過程を整理し定性的特徴を確認した上で、変形挙動と寿命値や応力-寿命関係との関連などについて考察した。

2-1 実験

前章の実験2，振動振幅を用いた動的疲労破断試験、および実験3，クリープ破断試験結果から破断までの変位量の増加過程が得られる。本章では、その結果を用いて解析を行なった。変位量の測定は、差動トランスを用いた。変位量測定の手順を簡単に述べる。動的疲労試験では、セル内に試料を充填，圧密，成形後、応力を負荷しない状態で可動セルを固定しているクランプをはずし、応力が負荷されない状態での粉体層の変位量を求め、これを変位量0の基準点とした。そして、再び可動セルを固定し、可動セルと振動台をつなぐワイヤーに張力を与えてからクランプをはずして振動を開始し、層に加わる引張り応力の最大値が設定した値 σ_s に達した時の変位量を負荷一回目の変位量 Δ_1 と定義した。そして、破断するまでの変位量の増加過程をレコーダー上に記録した。またクリープ引張り破断試験でも、設定応力 σ_s に達した時の変位量を Δ_0 と定義し、同様に破断するまでの変位量の増加過程を記録した。

2-2 繰り返し、およびクリープ引張り負荷による変形挙動の概略

まず、最初に準静的繰り返し負荷試験で得られた粉体層の応力-変位関係の概略をFig.2-1に示した。この図より粉体層の繰り返し負荷による変位量には、繰り返し負荷により累積される不可逆変位量 Δ_p と可逆変位量 Δ_e に区分される。本章では、不可逆変位量 Δ_p に着目し可逆変位量については、5章で考察することにする。また、粉体層の応力-変位関係は応力負荷過程でも除荷過程でも非線形である。この応力-変位関係の非線形性はレオロジーモデルにより記述されるが、これも5章で報告する。

まず、動的疲労試験により得られる負荷開始から破断までの累積変位量の測定結果の一例をFig.2-2に示した。各データとも増加の仕方は、似た傾向を示し、負荷周波数の違いは、変位量の増加の仕方に顕著な影響を示していないので、とりあえず周波数については、影響がないものとして、検討をおこなった。

さて、そこで寿命値の異なる変位量の増加過程を比較するために、横軸の負荷回数を寿命値との比として与え、Fig.2-3に示した。ここで寿命値が異なっても、後に比較を行なう負荷1回目と破断1回前の変位量が同じ横軸の値で比較できるように、横軸は、

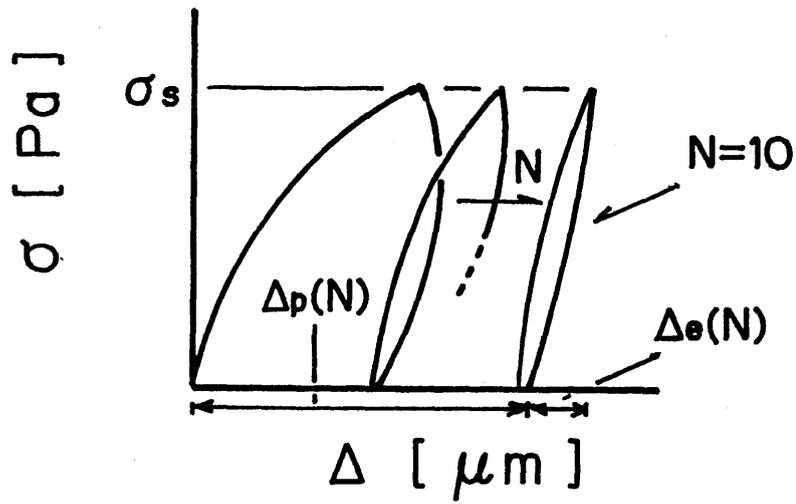


Fig.2-1 準静的繰り返し負荷試験での負荷応力-変位関係

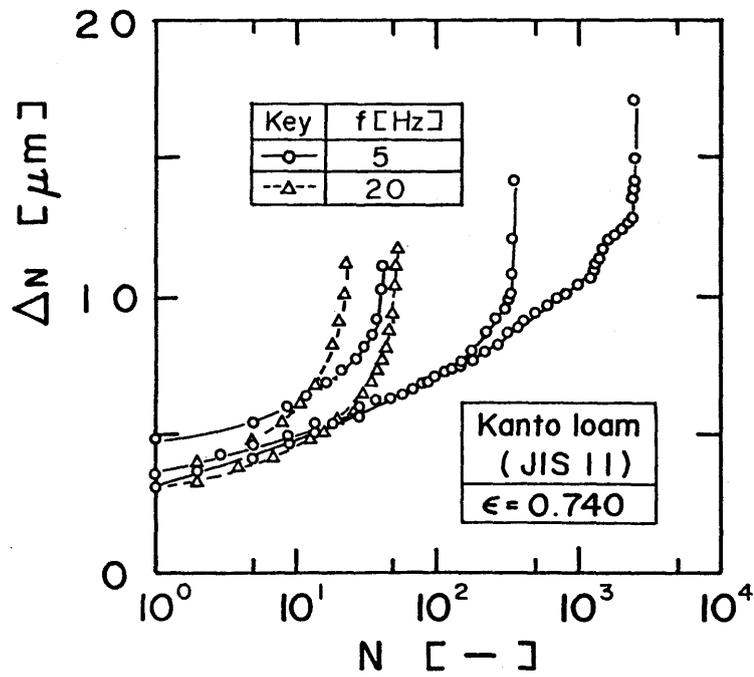


Fig.2-2 動的繰り返し負荷試験における変位量増加過程への振動周波数の影響

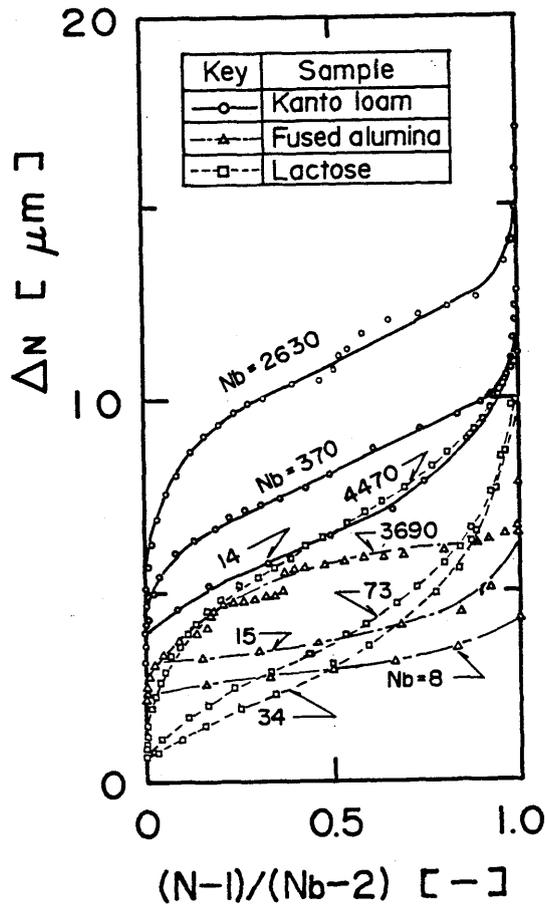


Fig.2-3 破断に至るまでの変位量増加過程の一例

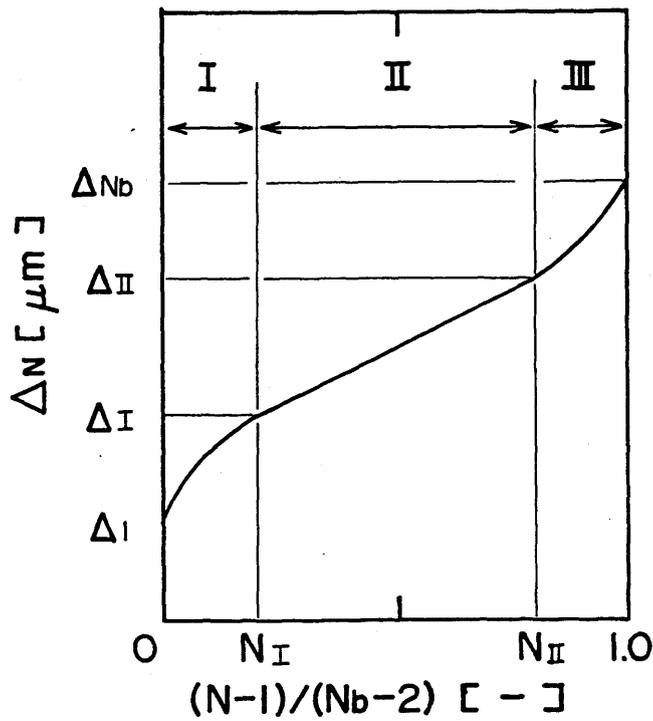


Fig.2-4 破断に至るまでの変位量増加過程における三区間の区分

(N-1)/(Nb-2)で与えぬ。また、各曲線上の数字は寿命値を示している。

この図より粉体層は、動的疲労の場合にも、Fig.2-4 に示した次の三つの過程を順次経て破断している。第一の区間は、負荷開始後、粉体層の累積変位量の増加割合が次第に低下していく区間Ⅰ、第二の区間は、累積変位量が繰り返し回数に対してほぼ直線的に増加する定常変形区間Ⅱ、そして第三の区間は累積変位量の増加量が増大し最終破断に達する区間Ⅲである。ただしこの三区間の表われ方は、試料、寿命値によって異なり、特に寿命値が、20-30回以下の場合には区間Ⅰが確認できないデータもある。クリーブ破断過程でも同様な三区間の区分は存在し、クリーブ破断に至っている。したがって、土の三軸圧縮クリーブや金属材料のクリーブなどで示された破断過程[2]が、乾燥微粉体層の動的繰り返しおよびクリーブ引っ張り試験でも確認された。

さて次に、この区分に基づいて各区間ごとに変形挙動の整理を行なう。まず、土の場合[3]と同様な変形挙動から寿命値が推定できる相関関係をいくつか求め、その結果を用いて変位量の増加過程が三区間に分かれることについての考察を試みた。

2-3 変形挙動からの寿命推定と変位量の増加過程の三区間の区分に関する考察

まず定常変形区間Ⅱの傾きが、各試料ごとにみるとほぼ等しいことから、負荷1回あたりの区間Ⅱでの平均変位量を次式から求め寿命値との関係をFig.2-5 に示した。

$$\bar{\delta}_I = (\Delta - \Delta_I) / (N - N_I) \quad (2-1)$$

ここで、 Δ_I 、 Δ_{II} 、および N_I 、 N_{II} は、それぞれ区間Ⅰ、Ⅱの終了時の累積変位量および負荷回数である。この図で明らかのように、どの試料でも傾き-1の関係があり、次式が得られる。

$$\bar{\delta}_I \cdot N_D = \Delta_r \quad (= \text{Const.}) \quad (2-2)$$

ここで Δ_r は試料により異なり、Table 2-1 に各試料の Δ_r を、静的引っ張り試験での平均破断変位量 $\bar{\delta}_z$ とともに示したが、 Δ_r と $\bar{\delta}_z$ の両者には相関がなく、 Δ_r は疲労破断現象に関する特性値と考えられる。

Sample	Δ_r [μm]	$\bar{\delta}_z$ [μm]
Kanto loam	3.80	11.9
fused alumina	0.94	7.7
lactose	2.67	5.6

Table 2-1 Eq.(2-2)中の定数と平均静的引っ張り破断変位量 $\bar{\delta}_z$ の比較

同様の関係は、クリーブ破断試験でも確認されFig.2-6 に区間Ⅱでの変形速度 C_{II} と寿命値の関係を示した。傾き-1の関係が得られ次式を得た。

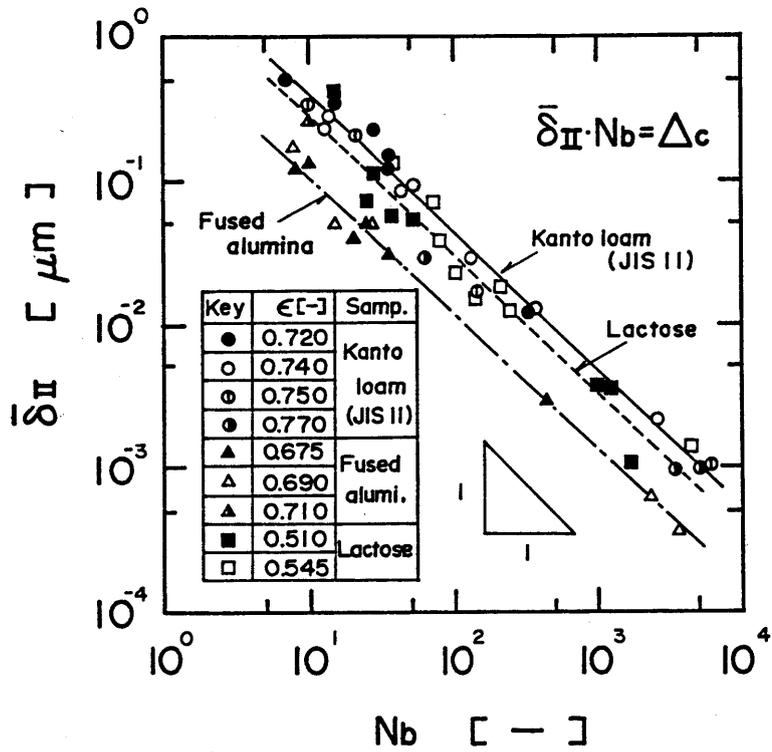


Fig.2-5 区間IIでの負荷1回当たりの平均変位量と疲労破断寿命の関係

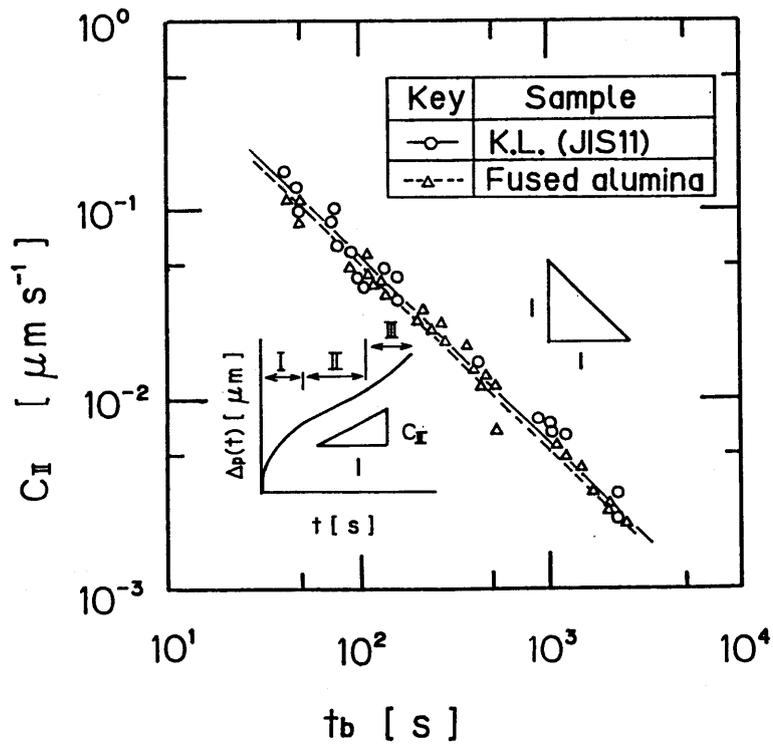


Fig.2-6 区間IIでの平均変形速度とクリープ破断寿命の関係

$$C_{II} \cdot t_b = \Delta_c \quad (= \text{Const.}) \quad (2-3)$$

Eqs.(2-2,3) は、破断するまで負荷を続けなくとも、区間 II に達した段階で変形速度を求めれば寿命が予測できることを意味しているが、区間 I の終了時の負荷回数、時間からも同様な相関関係が得られる。Figs.2-7,8 に区間 I の終了時の負荷回数 N_I 、負荷時間 t_I と寿命値の関係を示したが、ともに比例関係が得られており最小二乗法により次式の関係が得られた。

$$N_I / N_b = 0.2 \quad (2-4)$$

$$t_I / t_b = T_I \quad (= \text{Const.}) \quad (2-5)$$

クリーブ破断試験の場合、区間 II の終了時の負荷時間 t_{II} と寿命値の関係も比例関係を示しており、クリーブ破断試験の場合、三区間の存在割合は、ほぼ一定であることが求められた。

さて、Figs.2-5-8 の関係から、累積変位量の増加過程の三区間の区分の存在について、破断を起こさない場合との比較に基づいて若干の考察を試みる。疲労やクリーブ破断が起きない場合、すなわち寿命値が無限大となる場合には、区間 I の終了時の負荷回数、時間も、無限大となり、区間 II での変形速度も 0 に近づいていく。したがって破断が起きない場合には、粉体層の累積変位量の増加過程はある値に漸近していく形状になる。事実、Fig.2-9 に疲労破断が、 10^4 回繰り返して負荷しても起きなかった場合の変形挙動を示したが、この場合には負荷 1 回あたりの変位量は減少し続けており、破断が起きない場合には、区間 I の状態しか存在しないと考えられる。したがって、区間 I は応力負荷に対する粉体層の安定化を示していると考えられる。しかし、この安定化が、破断が起こる場合には一定の段階で停止するために、定常変形区間 II が存在し、最終破断に至る区間 III の状態まで、粉体層の力学的性質が変化すると考えられる。各区間の移行時には強度などの力学的性質に変化が表われることが期待され、次章で考察を行なう。本章では、強度変化などについて考察する前に、まず、ある区間から次の区間へ移行する際の力学的挙動の変化を、累積変位量に着目して検討するため、次に、1) 設定応力に達した時の変位量 2) 区間 I, II の終了時の累積変位量 3) 破断時の変位量 について考察した。

2-4 各区間での塑性変位量の累積過程

まず、全過程の最初の段階である設定応力に達した時点での変位量について検討を加える。Fig.2-10 に、疲労試験での負荷 1 回目の変位量と寿命値の関係を示したが、両者の関係は、S-N 関係と同様な形状となり、しかも S-N 関係に比べばらつきは小さい。この点をさらに詳しくみるため、Fig.2-11 にクリーブ破断試験において、同じ設定クリーブ負荷応力で試験した場合と、クリーブ開始時の変位を同じにして試験した場合の寿命分布を比較したが、 $\Delta\sigma$ を一定として試験した場合の方がやはり寿命分布が狭くなっている。この原因を考察するため、静的引張り試験結果を用いて検討する。

クリーブ引張り試験では、設定応力 σ_s に達するまでは、定応力負荷速度で粉体層に応力を加える。前章で求めた静的引張り強度はこの条件で求めたもので、試験時の応力-変位関係の一例を Fig.2-12(a) に示す。平均静的引張り強度 $\bar{\sigma}_z$ は、約 20 点の

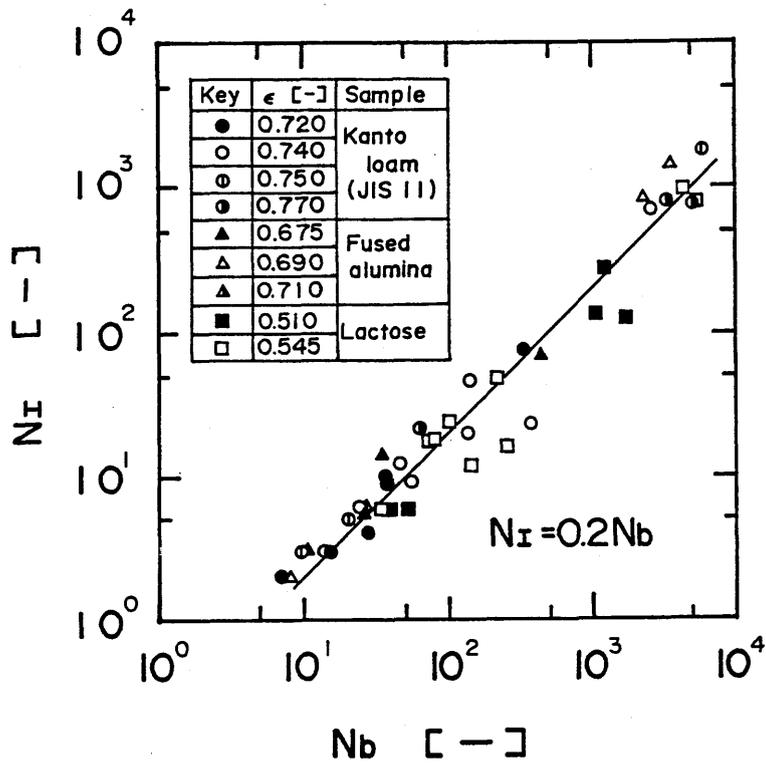


Fig.2-7 区間 I 終了時の負荷回数と疲労破断寿命の関係

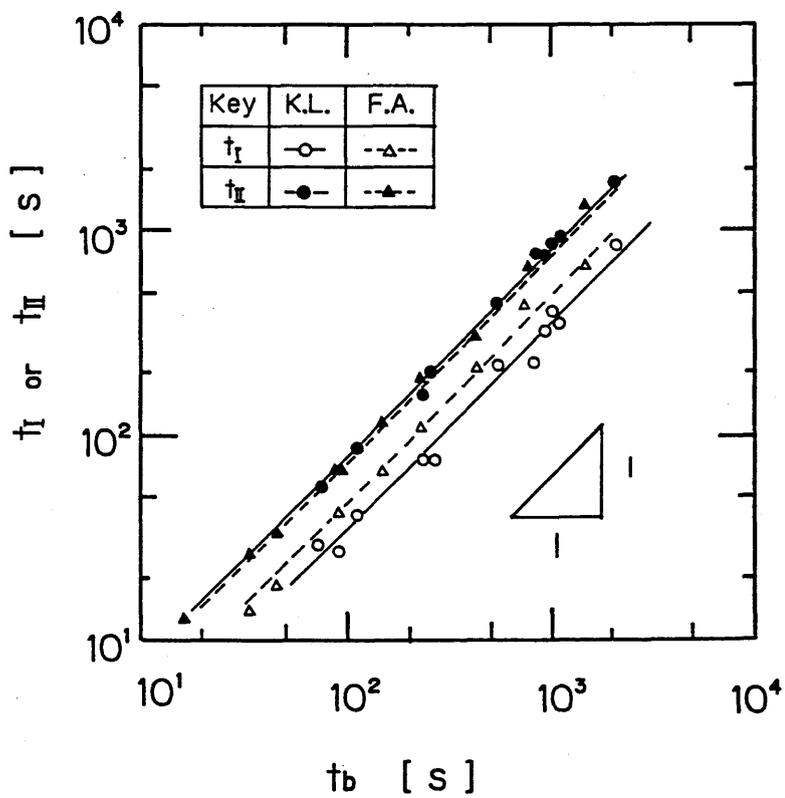


Fig.2-8 区間 I, II 終了時の負荷時間とクリープ破断寿命の関係

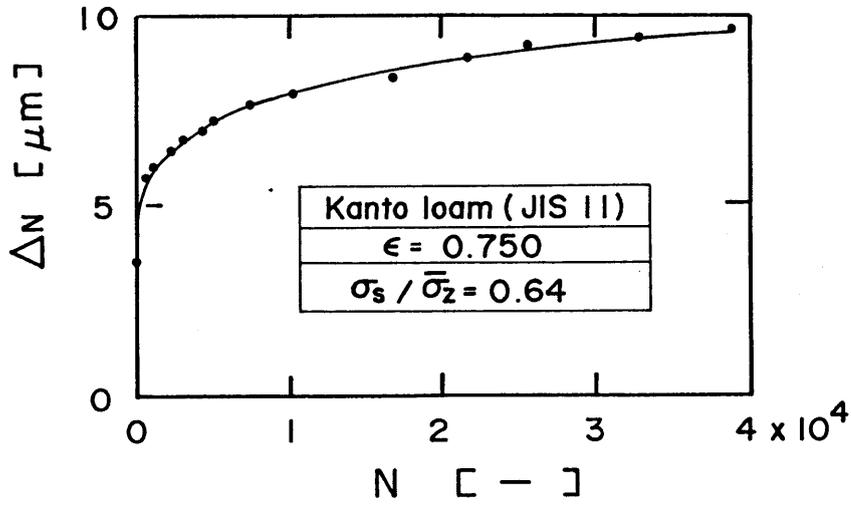


Fig.2-9 疲労破断が起きない場合の変位量増加過程の一例

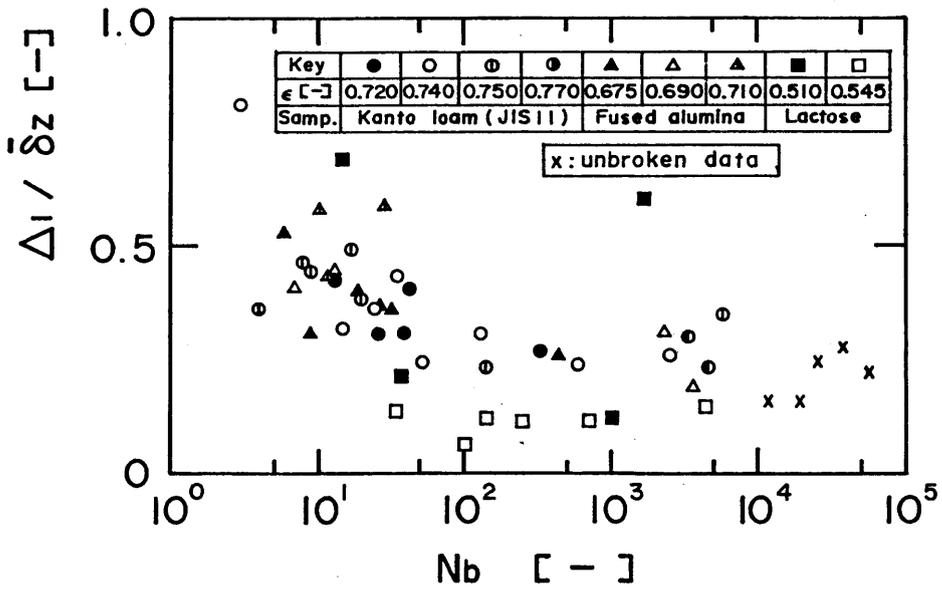


Fig.2-10 負荷 1 回目の変位量と疲労破断寿命の関係

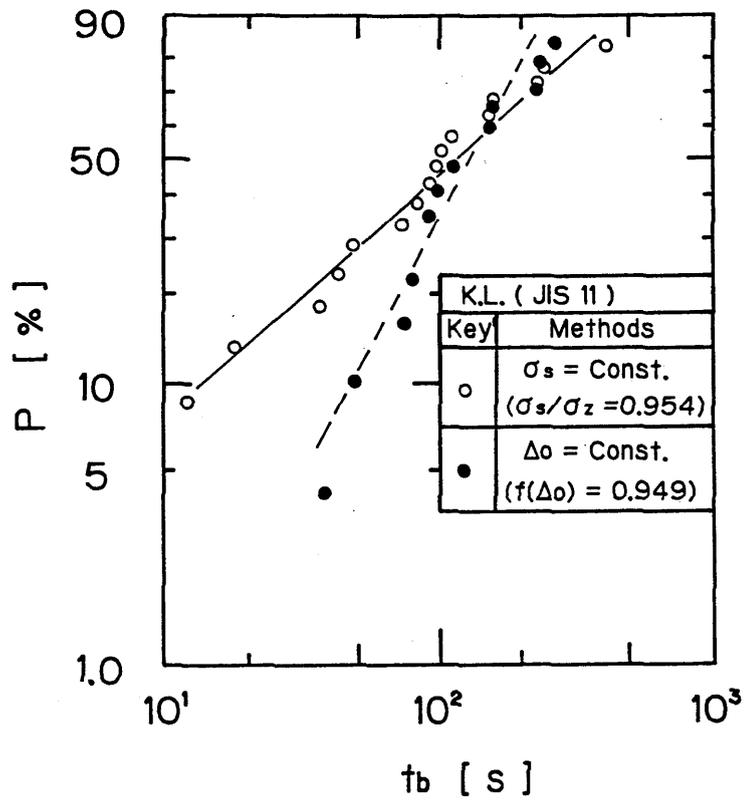


Fig.2-11 負荷応力一定および初期変位一定の条件でクリープ破断試験を行なった場合の寿命分布の比較

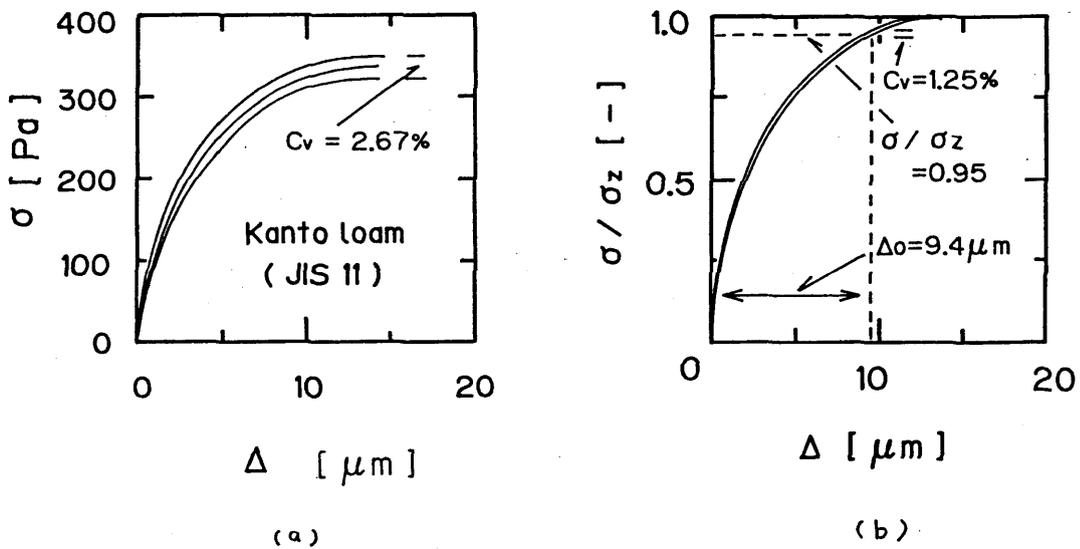


Fig.2-12 静的単調負荷試験での応力-変位関係の整理

データから求めたが、データのばらつきは、関東ローム粉では、変動係数で約2.7%である。この図の縦軸を各データの強度で無次元化するとFig.2-12(b)のように応力-変位曲線は、ほぼ一致する。一例として図中の変位量 $9.4\mu\text{m}$ での応力比のばらつきは、変動係数で1.4%まで下げることができた。したがって、設定応力に達した時点での変位量により、応力比をFig.2-12(b) から推定して整理することは、寿命分布におよぼす静的強度のばらつきの影響をかなり小さくすることになり、疲労、クリーブ破断現象自身のばらつきの評価に近づくことになると思われる。

また、この結果より、定応力負荷速度での応力-変位関係のある程度の負荷応力まで求めれば、破断させなくとも強度が推定できる。いま、Fig.2-12(b) の曲線群の平均曲線を、 $f(\Delta_0)$ と定義すると、クリーブ開始時の応力、変位量 (σ_s , Δ_0) を用いて推定強度 σ_z^* は次式で与えられる。

$$\sigma_z^* = \sigma_s / f(\Delta_0) \quad (2-6)$$

この関係式は次章で用いる。

さて次に区間 I , II の終了時の変位量と寿命値の関係を、動的疲労の場合をFigs.2-13(a),(b)、クリーブ破断の場合をFig.2-14に示した。どのデータでも寿命値の増加にともない変位量は増加しており両対数紙上でほぼ直線関係が得られている。特に、同一条件である程度のデータ数が存在するクリーブ破断試験では、二種類の試料とも $\Delta_I \propto t^{0.4}$ の関係が存在し興味深い。

さらに、破断直前の変位量と疲労寿命の関係を示したFig.2-15でも、同様に寿命値の増加に伴い変位量は増加している。この図では破断時の変位量は静的引っ張り試験での平均変位量で無次元化してあるが、特にS-N関係の水平部にあたる長寿命領域では、静的引っ張り試験での破断変位量より変形しても破断が、起きていないことを示している。

以上の結果から若干の考察を行なう。Fig.2-13-15における、寿命値の増加に伴う累積変位量の増加は、疲労およびクリーブ破断条件が累積変位量では記述できないことを示している。また、疲労およびクリーブ破断を起こす応力範囲が狭いことから、破断条件は累積変形エネルギー量でも記述できない。この原因としては、長時間の繰返しおよびクリーブ応力履歴によって粉体層の層構造が変化し、破断状態が静的引っ張り試験の場合と異なっていると考えられる。そして、この構造変化が変位量の増加として表われるため、単純な形で破断条件が記述できないものと思われる。この構造変化は、長寿命の場合ほど大きく変位量の増加も顕著であるが、逆に極めて短時間で破断する場合には構造変化も少なく破断変位量も静的引っ張り試験の場合とあまり変わらないものと思われる。

さて、2-4節で述べたある区間から次の区間に移行する際の力学的挙動の変化を累積変位量に着目して検討を試みたが、区間移行時の累積変位量は寿命値と共に増加し、区間が変わる際の条件を与えるものではないことが明らかになった。そこで、次章では破断に至るまでの粉体層強度の低下過程を実測し、強度に着目して破断過程を解析する。

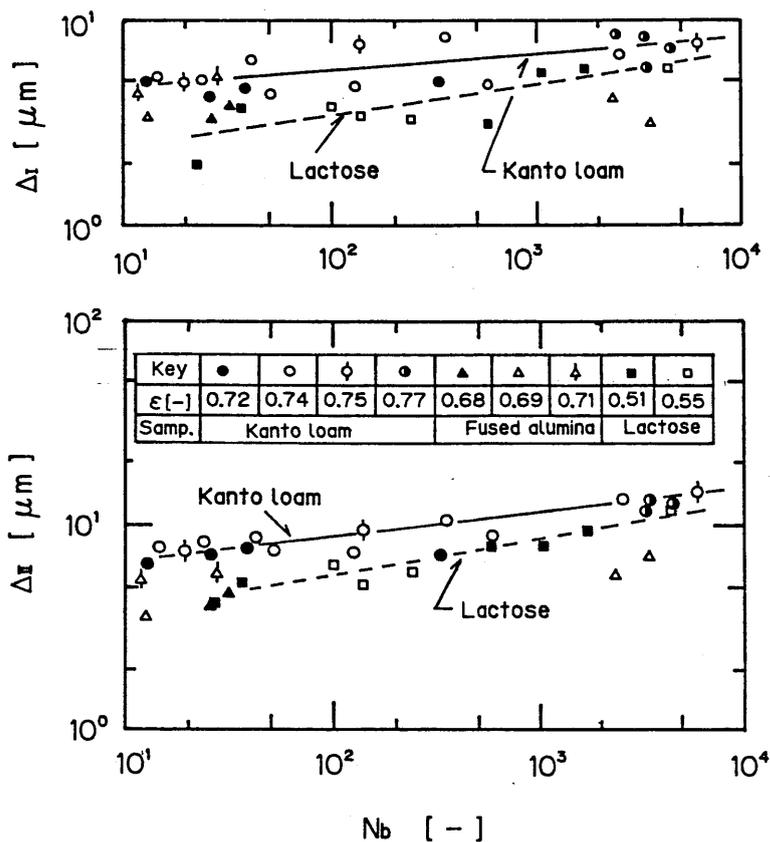


Fig.2-13 区間 I, II 終了時の変位量と疲労破断寿命の関係

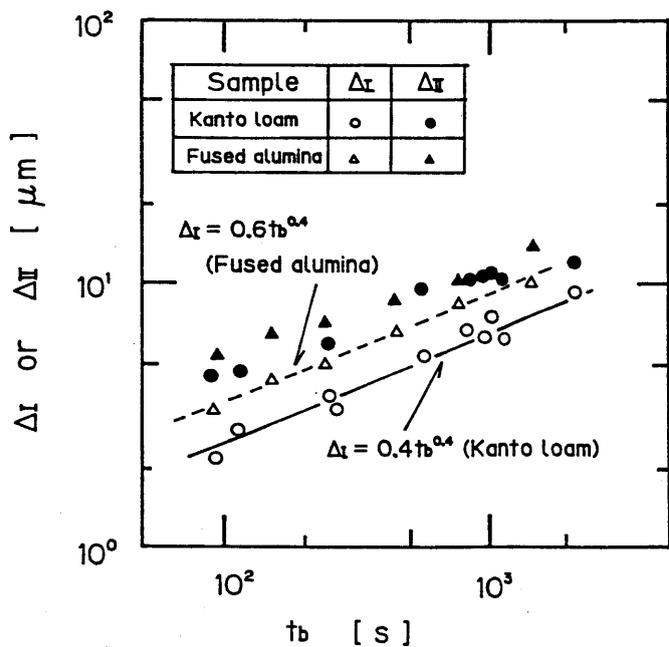


Fig.2-14 区間 I, II 終了時の変位量とクリープ破断寿命の関係

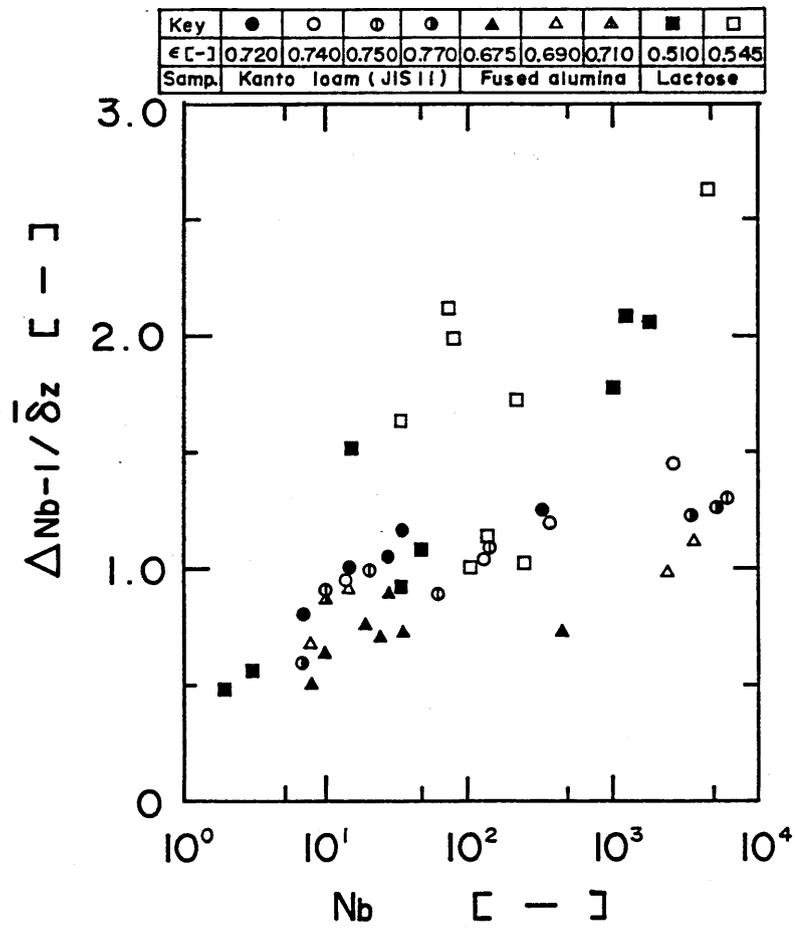


Fig.2-15 疲労破断直前の変位量と寿命の関係

結 言

粉体層の動的疲労およびクリーブ破断における不可逆変位量増加過程について検討した結果以下の結言を得た。

- 1) 粉体層の動的疲労およびクリーブ破断過程における変位量の増加過程も、三区間に区分され、各区間の変形挙動から非破断状態で寿命を推定できる実験式が得られ、この結果に基づいて三区間の区分の存在について考察をおこなった。
- 2) 静的引っ張り試験の応力-変位関係の整理によって、非破断状態で強度を推定する方法および静的強度のばらつきの影響を縮小した応力比-寿命関係の測定法が求められた。
- 3) 各区間終了時および破断時の累積変位量は寿命値に比して増加しており、累積変位量などからは破断条件が決定できないことが示された。

< 使用記号 >

C_{II}	=クリーブ破断試験における区間IIでの平均変位量	[$\mu m \cdot s^{-1}$]
CV	=変動係数	[%]
N	=繰り返し負荷回数	[-]
N_b	=疲労破断寿命	[-]
N_I, N_{II}	=区間I, II終了時の負荷回数	[-]
P	=破断確率	[-]
t_b	=クリーブ破断寿命	[s]
t_I, t_{II}	=区間I, II終了時のクリーブ負荷時間	[s]
Δe	=可逆変位量	[μm]
Δp	=不可逆変位量	[μm]
$\Delta c, \Delta r$	=Eqs.(2-3,4) 中の定数	[μm]
Δ_I, Δ_{II}	=区間I, II終了時の累積変位量	[μm]
δz	=単調静的引っ張り負荷での破断変位量	[μm]
Δo	=クリーブ負荷開始時の変位量	[μm]
$\bar{\delta}_{II}$	=区間IIでの負荷1回あたりの平均変位量	[μm]
σ	=引っ張り負荷応力	[kPa]

< 引用文献 >

- 1) 神谷, 古川, 椿, 神保: 粉体工学会誌, 11, 210 (1985)
- 2) Singh A., K.Mitchell: Proc. ASCE, SM1, 94, 21 (1968)
- 3) Saito M., H.Uezawa: Proc. 5th ICSMFE, 1, 315 (1961)

第3章 引っ張り応力履歴を受けた粉体層の強度変化 [1,2]

クリープ、および疲労破断過程について、前章では変位量の増加過程に着目して考察してきた。本章では、この結果に基づきながら、破断過程での力学的挙動の変化についてさらに考察するためクリープ破断に至るまでの強度低下過程について検討を加える。またこれまでのアプローチが、耐久限以上の時間依存型破断現象が起こる応力範囲に着目しての研究であった。しかし、耐久限以下の応力範囲で繰り返し負荷を行なった粉体層の強度がかえって増加する現象の存在を確認した[3]ことから、内藤ら[4]は、この強度増加現象と耐久限の間に関連があることを指摘している。そこで0-耐久限の範囲でクリープ応力履歴を与えた粉体層の強度の経時変化を求め、クリープ破断条件である耐久限の存在機構について考察する。さらにこの結果を用いて1章で問題となった疲労とクリープの比較や応力負荷速度依存性について検討を行ない時間依存型破断現象について総括的な検討を行なう。

3-1, クリープ破断過程での引っ張り強度低下過程

3-1-1, 実験および実験方法

実験装置は、前章での、クリープ破断試験と同じ吊り下げ式付着力測定装置を用いた。試料の充填、圧密、成形操作も、クリープ破断試験と同様である。そして、実験はFig. 3-1 に負荷応力と変位量の試験中の経時変化を示したが、定応力負荷速度 ($\dot{\sigma}=4.4\text{Pa/s}$) で、設定変位量 Δ_0 まで粉体層を変形させた所で、プーリーを止めクリープ試験に入った。そして、粉体層がクリープ破断を起こす前に、再び負荷応力を破断するまで増加させて強度 σ_E を測定した。このクリープ破断過程での強度測定試験は、前章である程度の応力範囲でクリープ破断現象の存在が確認された関東ローム粉、および溶融アルミナ粉について行なった。実験条件として、初期変位一定の条件でクリープを行なったのは、2-4-1 節の結果より静的強度のばらつきの影響を小さくするためである。また初期変位量 Δ_0 は、前章で行なったクリープ破断試験で、ほぼ100%クリープ破断を起こすことが確認された、変位量基準の応力比 $\sigma / \sigma_z^* = f(\Delta_0) = 0.95$ となる変位量に設定した。粉体層の予圧密条件、温度、湿度条件は、前章のクリープ破断試験と全く同じ条件で行なった。

3-1-2, 結果および考察

実験結果を、関東ローム粉についてFig.3-2、溶融アルミナ粉についてFig.3-3 に示す。この図で、横軸のクリープ時間 t_c は、各データの寿命推定値 t_b^* で、測定強度 σ_E は、各データの強度推定値 σ_z^* で無次元化してある。 t_b^* は前章で得られた区間IIでの変形速度 C_{II} と、寿命値の関係式Eq.(3-1)より次式で求めた。

$$t_b^* = \Delta_c / C_{II} \quad (3-1)$$

ここで Δ_c は各試料ごとの定数である。なお、ここで用いた寿命推定法が区間IIでの変

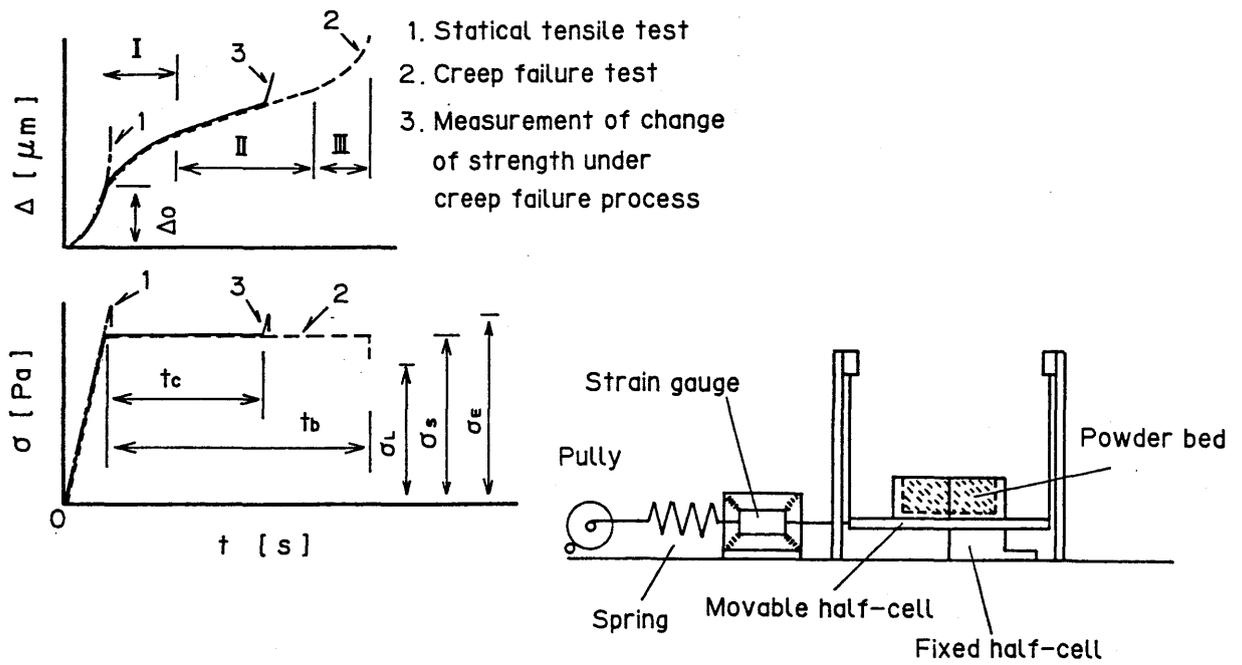


Fig.3-1 クリープ破断過程での強度測定試験方法の概略

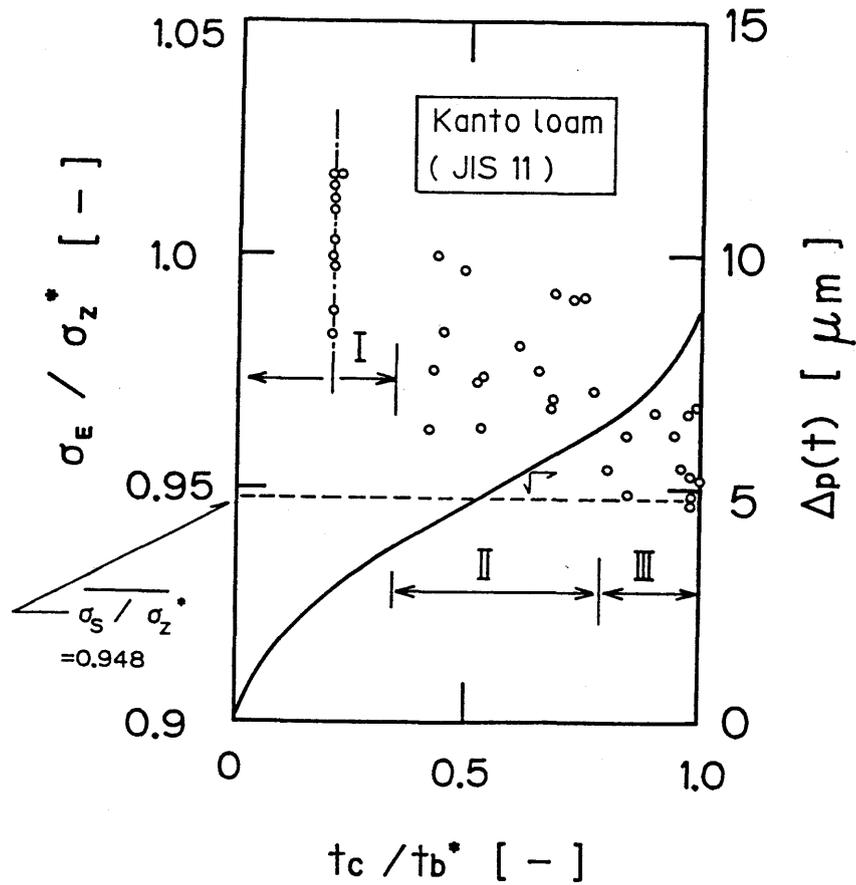


Fig.3-2 クリープ破断に至るまでの粉体層強度低下過程 (関東ローム粉)

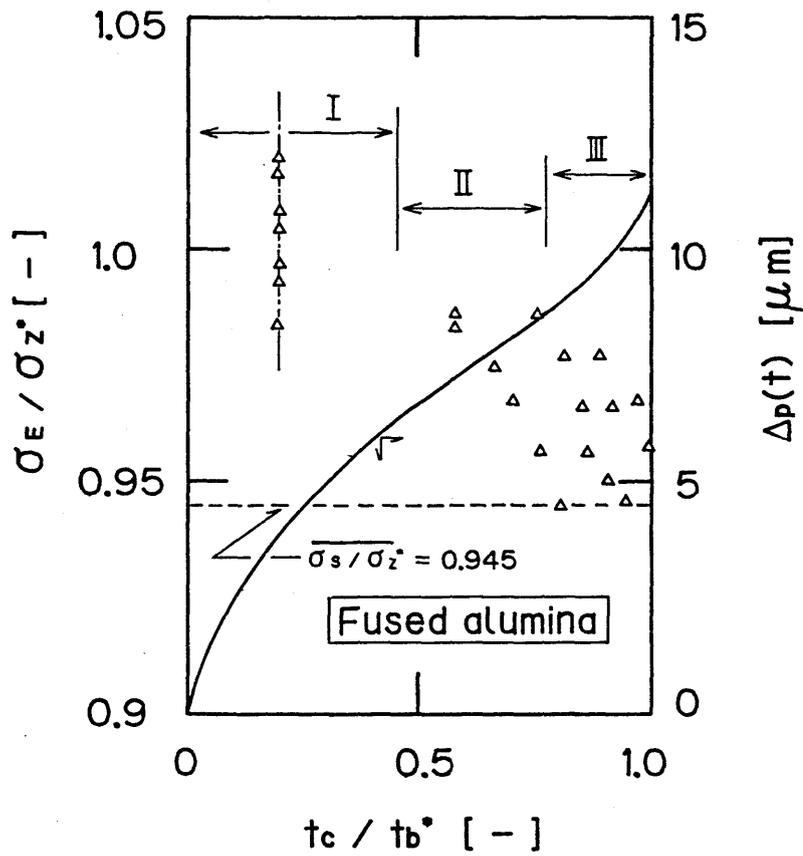


Fig.3-3 クリープ破断に至るまでの粉体層強度低下過程 (熔融アルミナ粉)

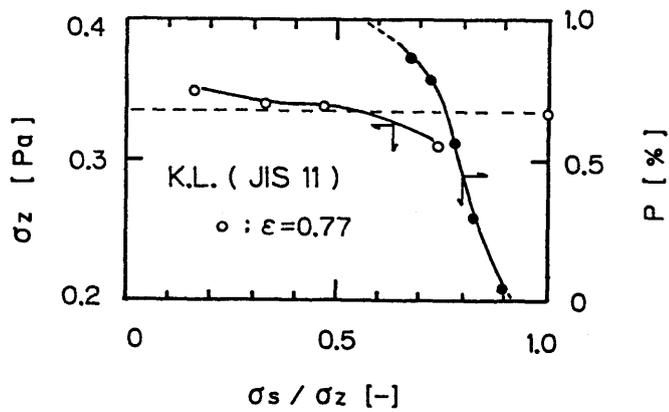


Fig.3-4 疲労耐久限以下の動的繰り返し負荷を受けた粉体層強度 (内藤ら、[4])

形挙動から得られたものであることから、区間 I で強度を求めたデータについては、 t_b^* の推定が困難であるため強度測定時の t_c/t_b^* は求めず、 $t_c/t_b^*=0.2$ の位置に一括して示した。また、推定強度 σ_z^* は、前章の Eq.(2-5) より求めた。各区間ごとに考察を行なう。

まず区間 I では、クリープ引張り履歴を受けた粉体層強度 σ_E は、 σ_z のばらつきの範囲で分布しており、強度の低下傾向は表われていない。この区間のどのデータも、20秒以上のクリープ引張りを行なっていることから、区間 I の段階では、クリープ引張りによる強度低下は発生しないものと思われる。言い換えればクリープ引張り応力による強度低下開始条件には、クリープ応力の作用時間が条件として存在すると思われる。次の区間 II, III では、全ての強度 σ_E のデータが $\bar{\sigma}_z$ を下回っており、はっきりと強度の低下が示されている。また、低下割合は、区間 II では比較的小さく、区間 III では大きい。以上のように、変形挙動と強度変化過程の間には、相関が存在することが予測される。両者の関係については第 5 章で定量的考察を行なう。

さて以上の結果は全て疲労、クリープ破断の起こる耐久限以上の応力範囲での現象に着目した結果である。しかし、クリープ、および疲労破断を起こさない耐久限以下の応力範囲についても繰り返し負荷試験後の粉体層の強度が増加するという興味深い現象を確認している[3]。すでに一章で指摘したように、粉体層の疲労およびクリープ破断試験では、ある程度の繰り返し負荷回数、およびクリープ負荷時間以上では、破断点が存在しない現象が確認され、この非破断点により粉体層の S-N 関係は、水平方向に延長され破断の起きない応力の下限値の存在を示した。そこで、内藤ら[4]はこの、耐久限の存在と強度増加現象の関連を指摘し、負荷応力値を変えて動的疲労履歴を受けた粉体層強度を Fig.3-4 に示したように求め、耐久限応力を堺にして強度の変化傾向が異なることを確認した。そして、この強度増加現象が起きた粉体層では、これ以上負荷しても破断現象が起きないことが予測され、耐久限を解明する上でこの現象が、重要であることを指摘している。そこで、次に耐久限以下のクリープ引張り応力履歴を受けた粉体層強度の経時変化を測定し、耐久限の存在機構について検討を行なう。

3-2, 耐久限以下のクリープ引張り応力履歴を受けた粉体層強度変化

3-2-1 実験

実験装置は、吊り下げ式付着力測定装置を用い、粉体層の充填、圧密、成形操作は、クリープ破断試験と全く同様である。実験は、クリープ引張り試験を設定時間 t_c まで行なった後、層が破断するまで負荷応力を増加させ強度 σ_E を求めた。

実験条件として、クリープ応力値は 0 - 耐久限までの範囲で、クリープ時間は 300 - 100000 秒の間で 4, 5 点選んで測定した。粉体層の予圧密条件、温度、湿度条件は、クリープ破断試験と全く同じで行なった。

3-2-2 実験結果と考察

まず、クリープ引張り応力履歴時間 t_c に対する、履歴後の粉体層強度 σ_E の関係を Figs.3-5, 6, 7 に示した。この図はそれぞれ、関東ローム粉、熔融アルミナ粉、石灰石粉の結果で、履歴後の強度 σ_E は平均静的引張り強度 $\bar{\sigma}_z$ で無次元化してある。この図中には、1章のクリープ破断試験で、破断点が存在する応力範囲でも破断を起こさな

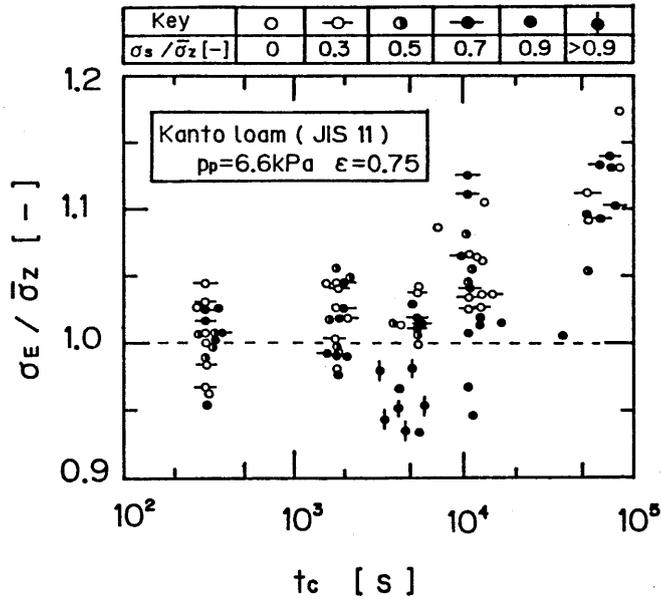
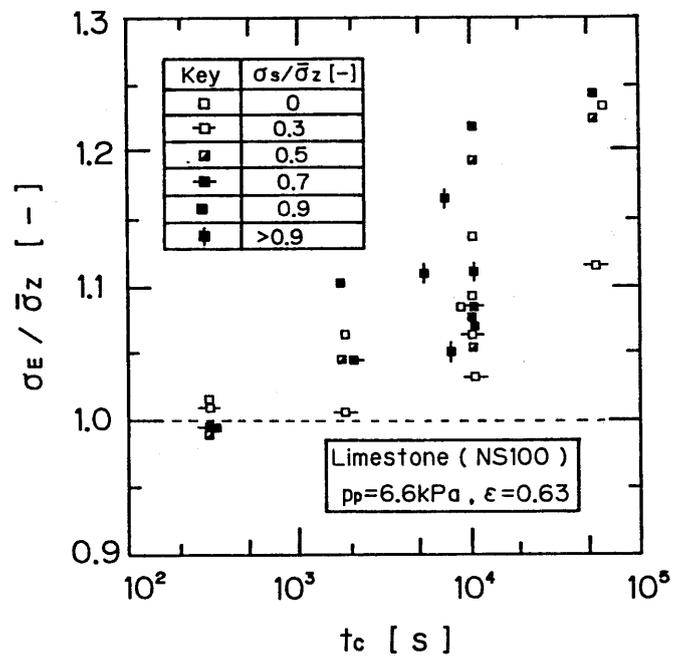
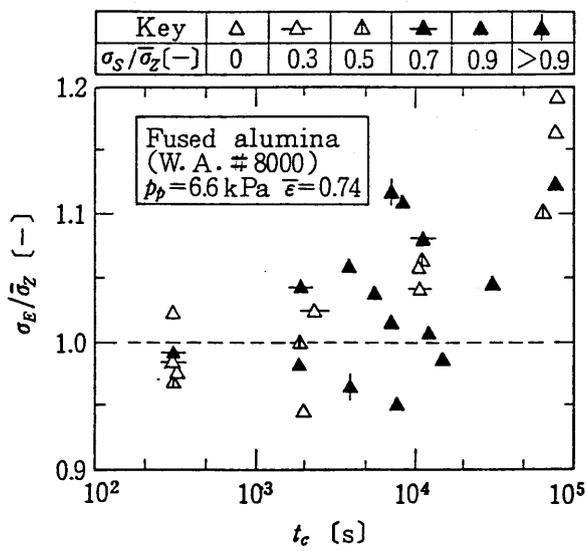


Fig.3-5 クリープ耐久限以下のクリープ応力履歴を受けた粉体層の強度変化 (関東ローム粉)



Figs.3-6,7 クリープ耐久限以下のクリープ応力履歴を受けた粉体層の強度変化 (熔融アルミナ粉, 石灰石粉)

かった $\sigma_s / \bar{\sigma}_z > 0.9$ の応力履歴を受けた粉体層の強度も示してある。

各試料とも、クリープ履歴時間の経過に伴い強度増加を示すデータを含んでおり、強度増加を起こした場合にはクリープ破断は起きないと思われる。また時間の経過に伴い強度が増加していることから、疲労破断試験において 3×10^4 回以上で破断点が存在しなかった現象との関連が考えられる。

さて、1章で示された試料による耐久限の違いについて考察するため、まず試料間での強度変化について比較を行なう。Fig.3-7 の石灰石粉では、 10^3 秒で強度増加が表われており、どの負荷応力でも強度増加が起きている。このように、静的引っ張り強度に極めて近いクリープ応力でも強度増加が起きているため、石灰石粉では、破断の起こる応力範囲が限られるものと思われる。一方Fig.3-5 の関東ローム粉では、 10^4 秒クリープを行なっても強度増加を示さないデータが存在する。このデータは主に $\sigma_s / \bar{\sigma}_z \geq 0.9$ のクリープ耐久限近傍のデータであることから、負荷応力 σ_s により強度の経時変化が異なるものと考えられる。

そこでクリープ引っ張り応力 σ_s の粉体層強度におよぼす効果を考察するため履歴時間2000,10000秒でのクリープ応力と履歴後の強度の関係をFig.3-8,9 に示した。

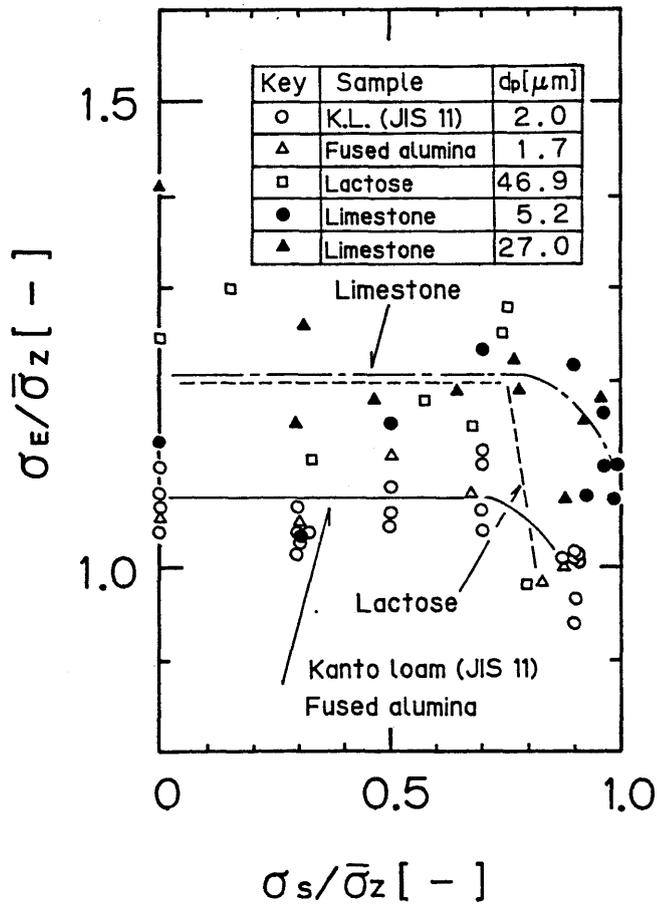
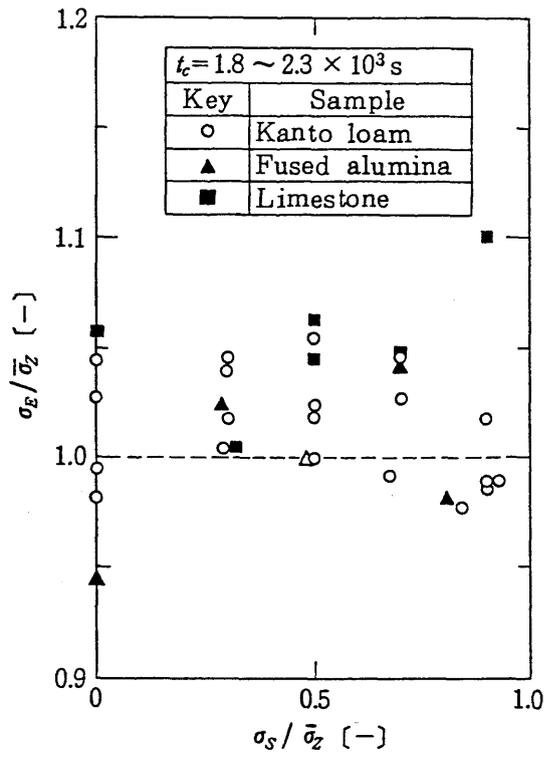
最初にこの結果をデータ数の多い関東ローム粉にのみ着目して考察する。まず耐久限近傍の $\sigma_s / \bar{\sigma}_z = 0.9$ では、Fig.3-9 で特に顕著に示されているが、他の応力範囲で生じている強度増加が現われていない。この傾向は2000秒でもすでに現われている。

一方耐久限に達しないクリープ応力範囲 ($0 \leq \sigma_s / \bar{\sigma}_z \leq 0.7$) では、強度の増加のしかたに顕著な差異がない。この結果は、強度増加現象が主に $\sigma_s = 0$ の引っ張り応力の作用しない状態で起きており、耐久限に達しないクリープ引っ張り応力は、 $\sigma_s = 0$ の強度増加を弱める方向に働いていないことを示している。以上の結果を整理するとFig.3-10が得られる。関東ローム粉を例にとって説明する。 $\sigma_s = 0$ の状態で発生する強度増加現象に対し、耐久限に達しないクリープ引っ張り応力は強度低下作用を持たない。クリープ引っ張り応力による強度低下作用は、耐久限近傍の臨界応力 σ_{cri} を超えると発生し、この低下作用と強度増加現象がみ掛け上釣り合う負荷応力が存在する。そしてさらに負荷応力を増加させると強度低下作用が強度増加現象を上回りクリープ破断現象が起こる。

この結果を他の試料にも適用して考察する。破線で示したラクトース粉の場合、強度増加領域での強度増加割合は関東ローム粉に比べ大きい、強度低下作用は比較的低い応力比で現われる。また、石灰石粉ではクリープ応力による強度低下作用に比べ、強度増加現象が顕著なため、 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z > 0.9$ の範囲で若干の強度低下作用が観察されるものの $\sigma_E = \sigma_z$ となる負荷応力条件が静的強度に極めて近いいため観察されず、クリープ破断現象もほとんど確認されなかったものと思われる。

以上の結果より、耐久限はクリープ引っ張り応力による強度低下作用だけでなく、 $\sigma_s = 0$ の状態で発生する強度増加現象が因子としていることが求められた。この強度増加現象については次章で考察を行ない本章では引っ張り応力による強度低下作用についてさらに考察を加えてみる。

3-3, 引っ張り応力による強度低下開始条件



Figs.3-8,9 クリープ引っ張り応力と履歴後の強度の関係
 (履歴時間: $t_c = 1.8 \sim 2.3 \times 10^3 \text{ s}$, $t_c = 10^4 \text{ s}$)

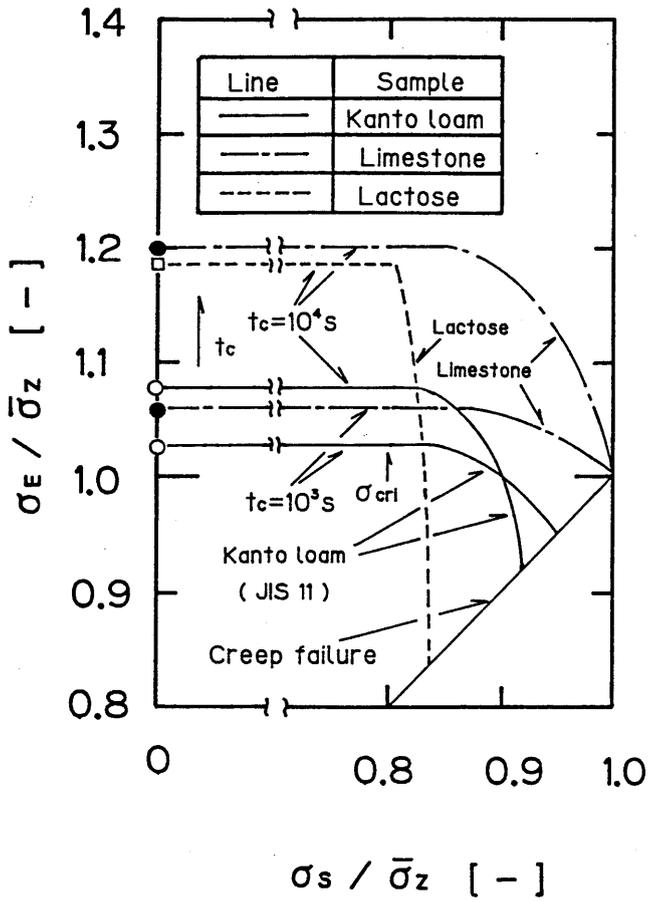


Fig.3-10 クリープ引っ張り履歴を受けた粉体層強度変化の概略

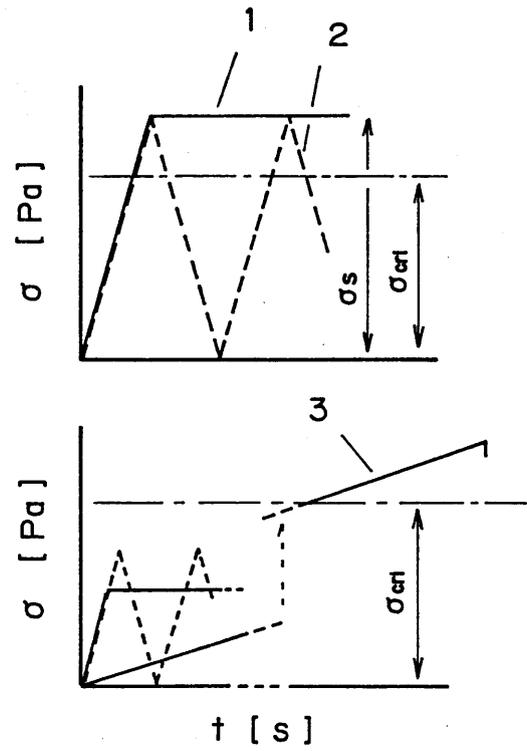


Fig.3-11 引っ張り応力の粉体層強度に及ぼす影響の考え方とその検討のための実験方法

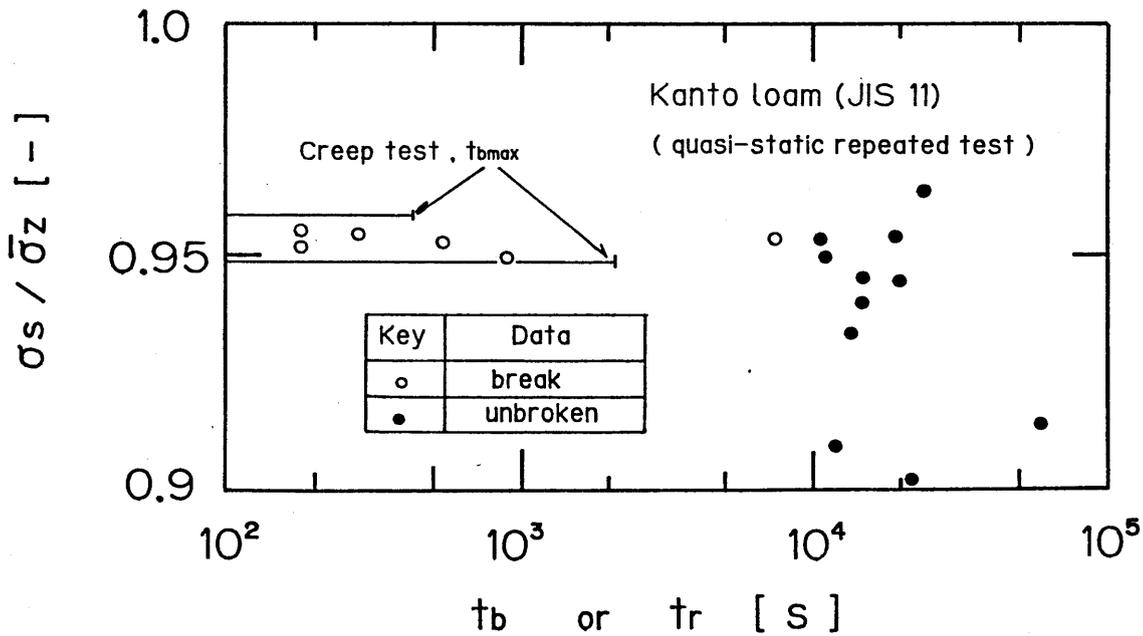


Fig.3-12 準静的繰り返し負荷による負荷応力-寿命関係

3-1,2 節において得られた知見から疲労、クリープ等の時間依存型破断現象に関する強度低下開始条件を考察する。3-2 節の結果からクリープ引っ張り応力による強度低下作用は臨界引っ張り応力 σ_{cri} を超えないと発生しないことが求められた。また3-1 節で、耐久限を超えるクリープ引っ張り応力を作用させても、区間 I の間は強度低下が観察されなかったことから、強度低下が開始するには応力の条件とともに σ_{cri} を超える応力の作用時間が条件として存在するものと思われる。この仮説を検討するため Fig.3-11 に示した準静的繰り返し試験や応力負荷速度を変えた場合での引っ張り破断試験結果との比較を行なう。準静的繰り返し負荷試験の場合応力を変動させるため、臨界応力 σ_{cri} を超える応力の作用時間は短く、しかも $\sigma < \sigma_{cri}$ の領域にも応力状態が存在する。もし強度低下開始条件が、先に述べた応力および応力の作用時間によるのであれば、 σ_{cri} を超える同じ最大引っ張り応力で試験を行なっても、繰り返し負荷試験では強度の低下が抑制され、疲労破断が起きにくくなるものと思われる。そこでほぼ100%クリープ破断が起きた $\sigma_s / \bar{\sigma}_z = 0.95$ の応力比で準静的繰り返し負荷を行なった場合、およびクリープ耐久限以下で繰り返し負荷を行なった後、強度を測定する実験を行ないクリープ試験との比較を試みた。

さらに Fig.3-11 の 3 で示した応力負荷速度を下げ $\sigma < \sigma_{cri}$ の応力状態に長時間おかれた場合の引っ張り試験での強度について比較検討を加えた。

実験は3-1,2 節と同様吊り下げ式付着力測定装置を用い、これまでの静的引っ張り試験と同じ $\dot{\sigma} = 4.4 \text{ Pa/s}$ の定応力負荷速度で繰り返し負荷を行なった。試料は関東ローム粉の場合について行ない試料の予圧密条件等は、前節とおなじ条件である。

3-2-1 準静的繰り返し負荷試験

まずクリープ耐久限以上の応力で準静的繰り返し負荷を行なった場合の負荷応力-寿命関係を Fig.3-12 に示す。横軸は最初に最大負荷応力に達してから繰り返し負荷により破断するまでの、時間で寿命値を与えてある。また時間 t_r まで負荷しても破断しなかったデータを黒ぬりの Key で与えてある。図中には、負荷応力比 0.959, 0.949 でクリープ引っ張り試験を行なった場合の寿命値の範囲を示してある。この図より、クリープ試験では100%破断が起こる応力条件でも、準静的繰り返し負荷では 10^4 秒を超えても破断しないデータが存在しており、準静的疲労破断はクリープ破断に比べて起きにくいことがわかる。

さらに Fig.3-13 に、クリープ耐久限以下の応力で繰り返し負荷した後の強度 σ を繰り返し負荷時間 t_r に対して示した。図中には、 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z < 0.7$ および $\sigma_s / \bar{\sigma}_z = 0.9$ の条件でクリープ引っ張り後の強度測定値の平均値を結んだ曲線を示してある。 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z$

< 0.7 の条件では、準静的繰り返し、クリープ負荷とも、ほぼ同様に強度が時間とともに増加している。したがって $\sigma < \sigma_{cri}$ の範囲に引っ張り応力条件がある場合には、準静的に応力を変動させても引っ張り応力は強度低下作用を持たないことが求められた。

一方 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z = 0.9, 0.95$ の条件で繰り返し負荷を行なった後の強度 σ_E のデータは、クリープ試験結果を示した二本の曲線間に存在する。つまりこの応力条件の繰り返し負荷では、強度増加現象に対して若干の強度低下作用が存在するものの、クリープ引っ張り試験の場合程大きくないことを示している。

このことは、Fig.3-14 に示した $t_r = 10000$ 秒での繰り返し応力 σ_s と繰り返し負荷

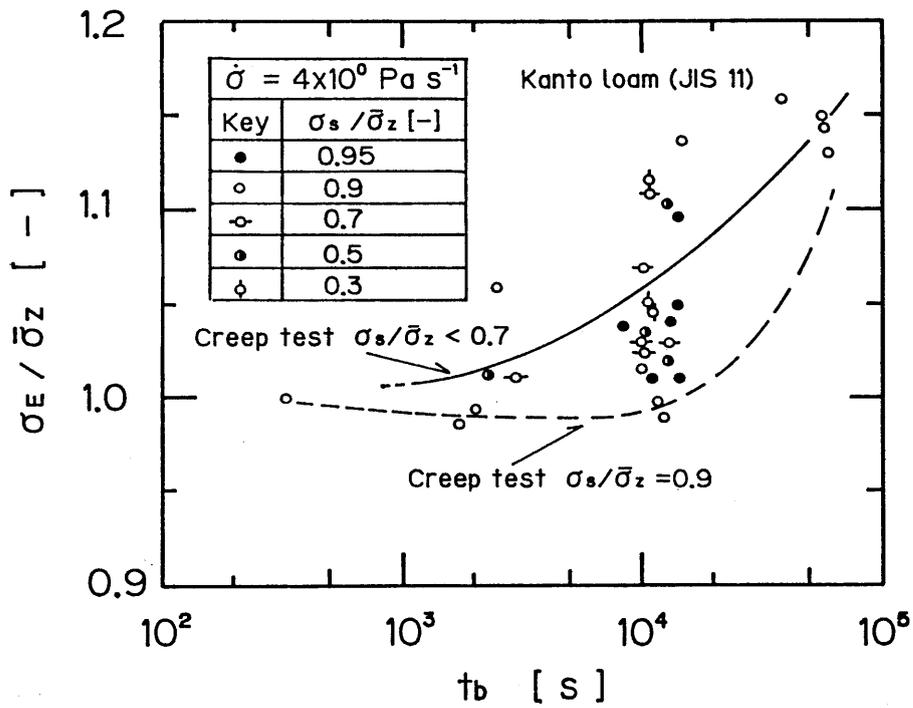


Fig.3-13 準静的繰り返し負荷履歴を受けた粉体層強度変化

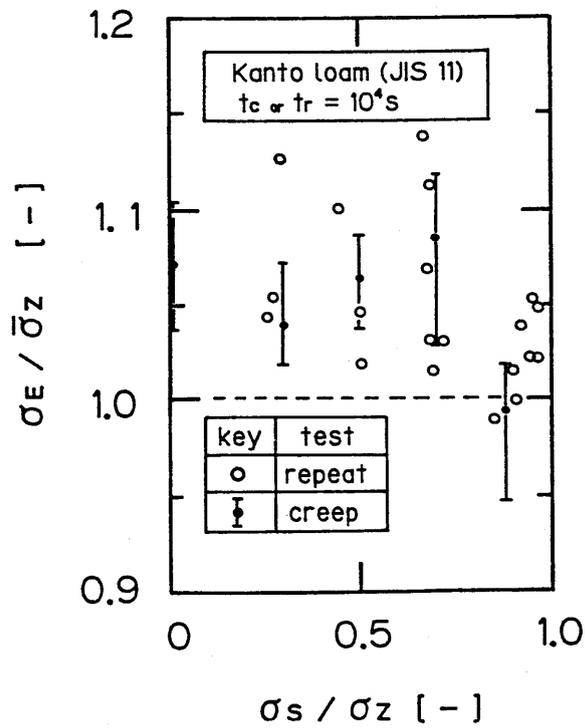


Fig.3-14 準静的繰り返し負荷履歴による強度変化と負荷応力

後の強度 σ_E の関係から、よりはっきりしてくる。図中には、前節で求めたクリーブ試験での結果を示したが、 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z < 0.7$ の範囲では、両者に顕著な差はないのに対し $\sigma_s / \bar{\sigma}_z > 0.9$ での強度低下傾向が繰り返し負荷の場合鈍く、疲労破断が起きにくくなることを示している。

次に応力負荷速度を下げた場合について述べる。

3-3-2 低い応力負荷速度での引っ張り破断試験

Fig.3-15に応力負荷速度を変えた場合の測定破断強度 $\sigma_E(\dot{\sigma})$ の結果を示す。横軸は負荷開始から破断に要する時間 t_z を示してある。応力負荷速度が遅く t_z が長い程強度は増加しており、しかも図中の $\sigma_s / \bar{\sigma}_z < 0.7$ の条件でクリーブ負荷したのちの強度測定値を示した曲線とほぼ一致している。これは低応力負荷速度で強度を求めた場合には、 $\sigma < \sigma_{cri}$ の領域に長時間応力状態が置かれるために強度増加現象が起きたものと思われる。

以上の結果から引っ張り応力が準静的に ($\dot{\sigma} < 4.4 \text{ Pa/s}$) 変動した場合にも、臨界応力 σ_{cri} 以下に応力状態がある場合には引っ張り応力が強度低下作用を持たないことを確認した。また、繰り返し試験結果から、引っ張り応力による強度低下が開始し進行する条件として、応力の条件とともに応力の作用時間の条件が存在することが確認されたが、この条件の定量化にはさらに実験的考察が必要である。

以上の結果は、 $\dot{\sigma} < 4.4 \text{ Pa/s}$ の範囲に限って確認された結果である。これ以上の応力負荷速度範囲では、ここで得られた知見では説明できない可能性がある。とくに1章で行なった動的疲労では低い応力比で、破断が起きることを確認し、負荷1回での破断強度も増加することが予測されている。この点をさらに考察するため、次に応力負荷速度を増加させて力学的挙動の変化を考察する。

3-4, 比較的高速負荷領域での粉体層の強度及び疲労

1章の動的疲労試験より動的特性として 1)高速負荷による破断強度の増加 2)クリーブ、準静的繰り返しに比べ低い負荷応力でも疲労破断が起きる、という2点が期待された。ただ、これらの知見はクリーブ破断試験とはかなり異なった実験系で得たデータとの比較によるものである。そこで応力負荷速度を動的負荷 (1 Hz以上) 状態から準静的負荷の間で変化させ ($\dot{\sigma} = 1.0 - 100 \text{ Pa/s}$)、強度測定や繰り返し負荷試験を行ない上記の知見について検討を行なった。

3-4-1 比較的高速負荷領域での強度測定試験

実験は吊り下げ式付着力測定装置を用い、応力負荷速度は、モーターの回転速度および可動セルとプーリーの間に入れるばねを変えて調節した。粉体層の圧密法などはこれまでと同じ方法を用い、試料は関東ローム粉を使った。

Fig.3-16に応力負荷速度 $\dot{\sigma}$ と引っ張り強度 $\sigma_E(\dot{\sigma})$ の関係を示す。応力負荷速度を増加させていくと、 $\dot{\sigma} < 1.0 \text{ Pa/s}$ の場合と同様な強度増加が認められる。しかし、この $\dot{\sigma} > 4.4 \text{ Pa/s}$ での強度増加は静的条件下とは異なるメカニズムで起きていると思われる。土質力学の分野でも[5]、この現象の機構解明はもとより、現象把握もまだ十分行なわれていないのが現状である。ここでもまず、現象把握を中心に進めるため、次に $\dot{\sigma} = 4.4 \text{ Pa/s}$ の場合より明確に破断強度の増加が確認されている $\dot{\sigma} = 40 \text{ Pa/s}$ の応力負荷速度で繰り返し負荷試験を行ない耐久限值等の比較検討を行なう。

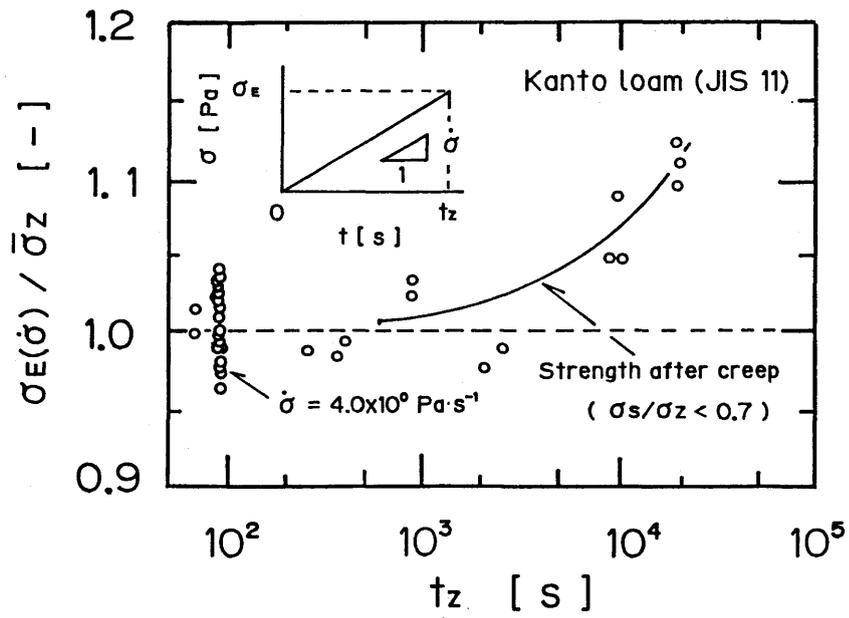


Fig.3-15 応力負荷速度を低下させた場合の破断強度変化

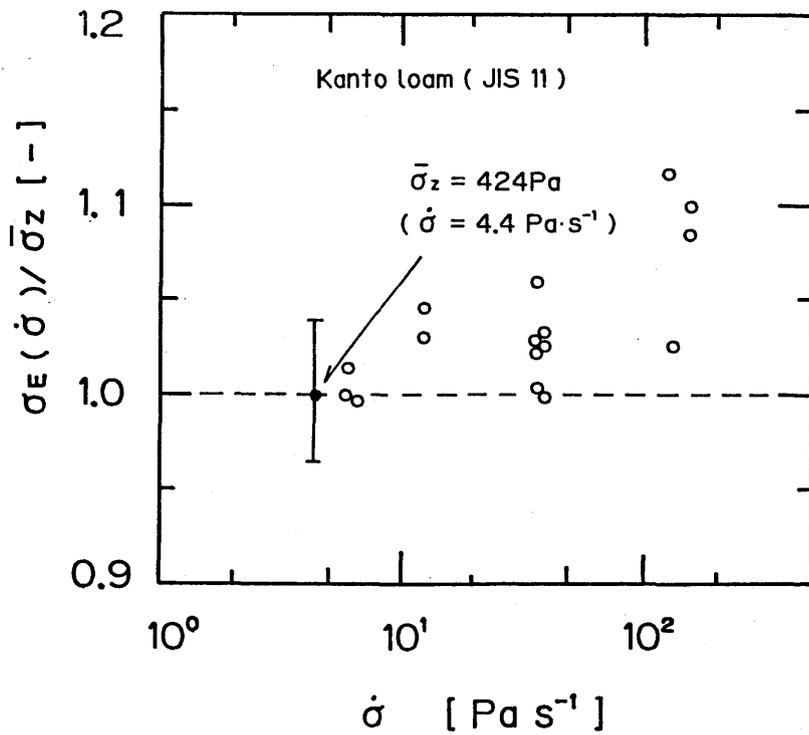


Fig.3-16 応力負荷速度を増加させた場合の破断強度変化

3-4-2 比較的早い応力負荷速度での繰り返し負荷試験

実験は3-3節と同様、クリープ耐久限付近の応力で疲労破断を起こすことを目的とした試験とクリープ耐久限以下の応力で10000秒繰り返し負荷を行なった後の強度測定試験の二種類を行なった。まずFig.3-17に最大負荷応力と破断寿命の関係を示した。図中には $\dot{\sigma} = 4.4 \text{ Pa/s}$ での疲労試験結果、および一点鎖線でクリープ破断試験で破断点を確認された最低応力値を示してある。また $N = 1$ には各負荷速度での破断強度を分布範囲とともに示してある。この図であきらかなように $\dot{\sigma} = 40 \text{ Pa/s}$ の繰り返し負荷では $\dot{\sigma} = 4.4 \text{ Pa/s}$ の繰り返し負荷およびクリープ負荷に比べて小さい応力でも破断点が存在している。しかも同じ応力比でも破断点と非破断点がともに存在しており、一章で述べた動的疲労のS-N関係と同様な傾向を示している。

この低い応力でも破断点が存在する原因を考察するため、クリープ耐久限以下の応力で10000秒繰り返し負荷を行なった場合の強度測定結果をFig.3-18に示す。縦軸の σ_z は $\dot{\sigma} = 40 \text{ Pa/s}$ での平均引っ張り強度である。この図から $\dot{\sigma} = 40 \text{ Pa/s}$ の条件では10000秒繰り返し負荷しても強度増加割合は小さく、強度増加を確認するには、さらに繰り返し負荷を行なうことが必要である。この強度増加現象の現われ方の鈍さが、低い応力比でも破断点が存在する原因の1つと考えられる。しかし本論文では、動的領域についてはデータのにも不十分であることから次の4,5章でも検討は行なうものの、機構解明などについては今後の課題と考える。

結 言

種々の引っ張り応力履歴を粉体層に加え、強度の経時変化を測定したところ、次の結言を得た。

1) 耐久限以上の応力によるクリープ引っ張り試験での強度低下過程を測定したところ、クリープ破断過程の最初の3-40%を占める区間Iでは、強度の低下が観察されないなど、粉体層の強度低下過程とクリープ変形過程の間に定性的相関関係があることが確認された。

2) 0-耐久限以下のクリープ引っ張り応力履歴を受けた粉体層の強度の経時変化を調べた結果、耐久限に達しない応力範囲では、強度増加現象が観察されクリープ破断が起きないこととの関連が示された。ただ、この強度増加現象は、耐久限に達しない引っ張り応力の履歴には、ほとんど無関係で、粉体層の予圧密、除荷操作に関連して発生するものであると考えられる。したがって、クリープ引っ張り応力の作用としては負荷応力を耐久限近傍の臨界応力 σ_{cri} 以上に設定した場合に発生する強度低下作用が中心である。この σ_{cri} 以上の応力範囲では、強度増加作用と釣り合っ見掛け上強度変化が表われない負荷応力値が存在も確認された。

3) そして、1),2)の知見よりクリープ応力による強度低下の開始条件は、(1)クリープ応力が臨界応力 σ_{cri} を超えることともに、(2)臨界値を超えるクリープ応力の作用時間が条件として存在すると予測され、準静的繰り返し試験でのS-N関係や強度の応力負荷速度依存性などの測定結果から、準静的領域($\dot{\sigma} < 1.0 \text{ Pa/s}$)では、この仮定が定性的には確認された。

4) 一方、高速負荷領域での強度の増加特性や疲労破断に関するS-N関係において

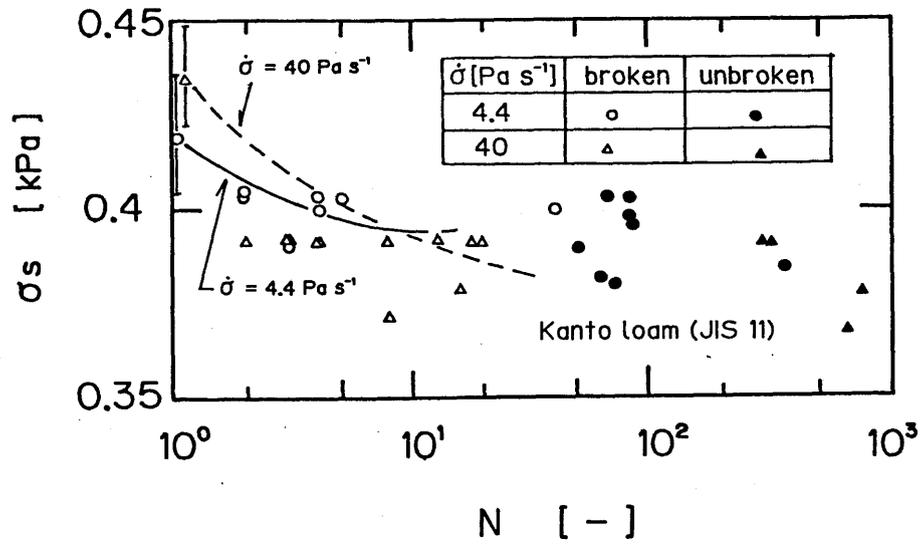


Fig.3-17 応力負荷速度を変えた場合のS-N関係の変化

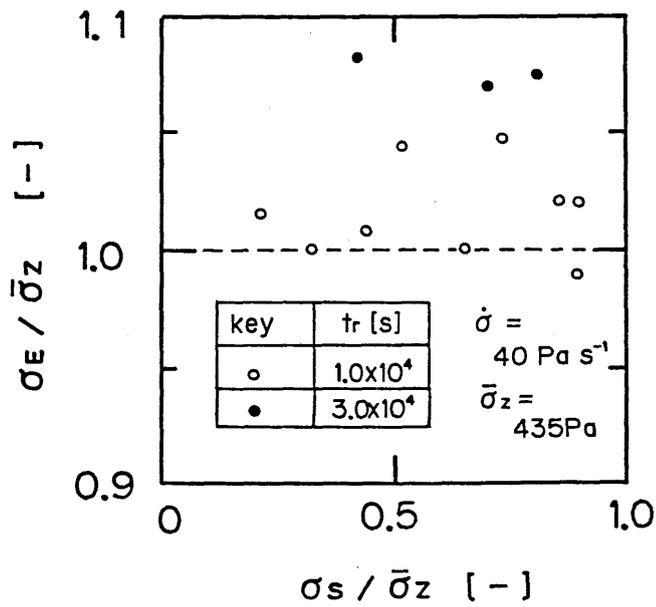


Fig.3-18 比較的高速引っ張り応力負荷速度による繰り返し負荷履歴を受けた粉体層強度変化

水平部の応力範囲が広がる現象など、準静的な範囲での知見では説明つかない現象について検討したところ、強度の増加特性について確認できるとともに、高速負荷領域では強度増加現象の進行が遅い、などの現象が新たに指摘された。

< 使用記号 >

d_p	= 一次粒径	[μm]
p_p	= 予圧密応力	[kPa]
P	= 非破断確率	[-]
t_b	=クリーブ破断寿命	[s]
t_c	=クリーブ引張り履歴時間	[s]
t_r	=準静的繰り返し負荷時間	[s]
t_z	=単調負荷による破断までに要する時間	[s]
Δo	=クリーブ引っ張り試験開始時の変位置	[μm]
ε	=空隙率	[-]
σ	=応力負荷速度	[kPa/s]
σ_{cri}	=引っ張り応力による強度低下作用の現われる臨界応力	[kPa]
σ_S	=設定クリーブ引っ張り応力	[kPa]
σ_L	=クリーブ耐久限	[kPa]
σ_E	=クリーブ履歴後の粉体層引っ張り強度	[kPa]
σ_Z	=単調負荷による静的引っ張り強度	[kPa]

< 引用文献 >

- 1) 神谷, 古川, 椿, 神保: 粉体工学会誌 :22 , 618 (1985)
- 2) Kamiya H. , J.Tsubaki and G.Jimbo : Preprints of the 1st World Congress Particle Technology (1986 , 4 Nurnberg) , to be published
- 3) 椿, 加藤, 竹山, 神保: 化学工学論文集 ,10 ,402 (1984)
- 4) 内藤, 椿: 粉体工学会誌 ,22 , 17 (1985)
- 5) Adachi T. , M.Okano : Soils and Foundations , 14 , 55 (1974)

第4章 粉体層の圧密操作に関するレオロジー挙動と粉体層の強度増加現象[1]

前章で確認された時間の経過に伴う強度増加現象は、粉体層の疲労、クリープ耐久限を決定する上でも、また粉体の貯槽、ホッパーからの払い出しなどの実際の粉体のハンドリングにおいても重要な現象である。3-2節の耐久限以下のクリープ引っ張り履歴を受けた後の強度測定において強度増加現象は $\sigma_s = 0$ の引っ張り応力の作用しない系でも存在し、耐久限に達しない引っ張り応力による影響が顕著でないことから、引っ張り応力による強度増加現象への関与は小さく、 $\sigma_s = 0$ の状態つまり粉体層の予圧密、除荷操作に関連して発生するものと思われる。このことを検証するために、予圧密操作に関していくつか形態を変えて粉体層に履歴を加え、強度の経時変化を測定する。

4-1 強度増加現象に関する予備的考察

この強度増加現象が予圧密、除荷操作に関連して発生することを検討するため、予備実験的に吊り下げ式付着力測定装置を用いて、Fig.4-1に示した次の三種類の方法で粉体層に履歴を与え、強度変化を測定した。

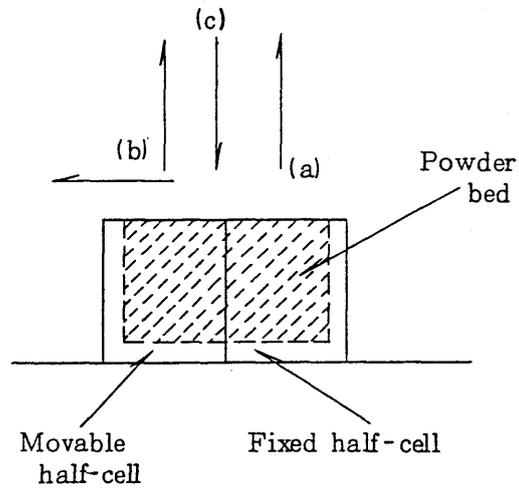
- 試料充填、10分間予圧密後、荷重を除荷し可動セルを固定したまま放置する。（垂直方向クリープ回復）
- 予圧密、除荷後、可動セル部を固定していたクランプを外し、 $\sigma_s = 0$ の状態で放置する。
- 試料充填後予圧密応力を加えたまま放置する。（クリープ圧密）

実験条件として、放置時間は、300 - 100000 秒の範囲で5,6 点選んで行なった。また予圧密応力は6.6kPaに固定し、試料は関東ローム粉を用いた。

Fig.4-2に履歴を受けた時間 t_h と履歴を受けた粉体層の強度 σ_E の関係を示した。強度増加開始時間、増加割合ともほぼ一致しており、履歴の形態の違いによる影響は小さく、強度増加現象は放置時間 t_h に支配されているように見える。

次に履歴を受けた粉体層の応力-変位関係をFig.4-3で比較してみる。この図は、履歴時間 $t_h = 86400$ 秒の結果を比較したものである。どの履歴形態でも、10分間圧密しただけの場合に比べ、破断時の変位量が減少しており、脆性的な破断を起こしている。さらにこの図ではa)の履歴を80000 秒加えた後、再び6.6kPaの圧密を10分間加え、除荷直後の引っ張り試験での応力-変位関係を示したが、変位量は $t_h = 0$ のデータに比べ減少しているものの、強度は $t_h = 0$ の値に戻っている。この再圧密により強度がクリープ回復を行なわない場合に戻る現象はFig.4-4に示した熔融アルミナ粉でも確認された。以上の結果より粉体層の強度増加現象について若干の考察を行なう。

強度増加現象は、圧密応力を除荷しクリープ回復を行なっても同様に発生することから、粉体層に加えられた力により接触点が塑性変形を起こし、接触面積の増加を原因とした付着力の増加によってのみ起こるのではない。また、クリープ耐久限以下のクリープ引っ張りおよびクリープ回復試験では、粉体層は、引っ張り方向に膨張し、破断面



- (a) Recovery of creeping to direction of vertical axis
- (b) Recovery of creeping to directions of horizontal and vertical axis
- (c) Creeping under compression

Fig.4-1 粉体層圧密における時間依存型現象に関する履歴の形態

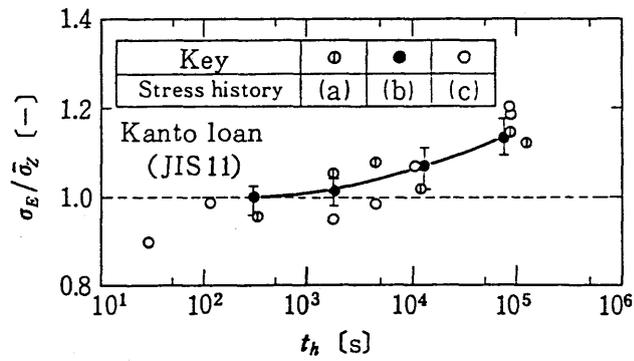


Fig.4-2 種々の圧密履歴による粉体層強度の経時変化

line				
stress history	(a)	(b)	(c)	$t_h = 0$

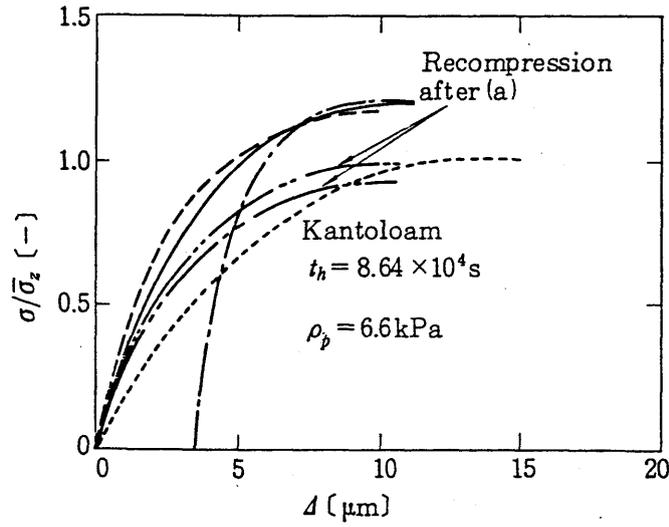
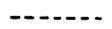


Fig.4-3 圧密履歴を受けた粉体層の応力-変位関係 (関東ローム粉)

Line			
Stress history	$t_h = 0$	(a)	Recomp after(a)

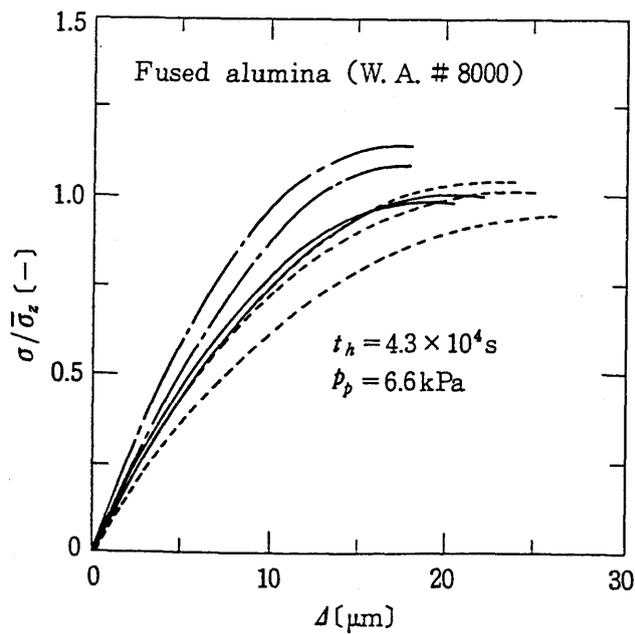


Fig.4-4 圧密履歴を受けた粉体層の応力-変位関係 (熔融アルミナ粉)

近傍では空隙率が増加しているにもかかわらず強度は増加することから空隙率の変化でも説明できない。そこで、椿[2]らは、粉体層圧密に関する応力緩和現象の研究の中で、応力緩和現象を層内の局所力学的不安定構造の存在により説明を試みたが、ここでもこの概念を用いて考察する。粉体層への加圧、除圧、クリープ応力負荷時には層内に力学的に不安定な構造が局在し、時間の経過と共にこの不安定構造は、まわりの構造を変えながら安定化していくと考えられる。粉体層の強度は、層内の強度の弱い部分に支配されていると思われるが、この弱い部分に不安定構造が相当し、構造の安定化に伴い弱い部分が消失、平均化され全体の層強度が増加するものと思われる。このことは、Figs.4-3,4でクリープ回復後、再圧密すると、もとの強度に低下した現象と関連をもつと思われる。ただ、温度、湿度を前述の範囲で一定に保っているものの、粒子接触点での付着力が増加していることも考えられる。しかし、一個粒子-ガラス面間の付着力の接触時間依存性を測定した、Corn[3]，神保ら[4]の結果を見ると、鉄粒子など表面の化学変化を受けやすい粒子を除き、ガラス粒子、石灰石、熔融アルミナ粒子などでは、本試験範囲の10秒の範囲で付着力の増加は確認されていない。このことから、本章では、この接触点付着力の時間依存性についてはとりあえず着目しないで、圧縮操作に伴って発生するレオロジー挙動と強度増加現象の関係をさらに考察することに主目的を置いた。そこで、つぎに粉体層圧密に関するレオロジー挙動を整理しながら強度増加現象について考察を行なう。

4-2, 圧密操作に関する種々の時間依存型履歴を受けた粉体層強度変化の測定

引っ張り試験など粉体層の力学的特性を求める試験で行なう予圧密操作は、金型に充填した粉体層の圧縮操作、所謂、一次元圧密試験という定義がされているが、この操作における時間依存型現象としては、序章で述べたように、クリープ圧密や繰り返し圧密による粉体層の空隙率の低下現象やクリープ回復、応力緩和現象などがある。本節では、これらの現象について順次考察を加えながら、こうした圧密履歴を受けた粉体層強度の経時変化を測定し、強度増加機構について検討を行なう。最初にこれらの現象を検討する上での基礎となる単調一次元圧密試験での結果について報告する。

4-2-1, 粉体層の一次元圧縮過程

実験に用いた装置を、Fig.4-5に示す。粉体層を充填、圧縮する金型は、内径5cm、深さ2cm、肉厚が底面、側面とも2cm、材質はステンレス製である。試料は、1000 μ mのふるいを通りさせて充填し、金型上に溢れた試料はセル上面ですり切ることで除去した。圧縮に用いた材料試験機(米倉製作所製)は、コンピューターによりデータの取り込みと、クロスヘッドの制御を行なうことができる。実験は、材料試験機上に試料を充填した金型を置き、一定速度でクロスヘッドを降下させ圧縮試験を行なった。

この一次元圧密による粉体層の圧密過程を、応力-空隙率の関係で示した一例が、Fig.4-6である。この図より一次元圧密過程は、小さな応力範囲で空隙率 ε が急速に減少する区間Iと、 ε の低下がなだらかな区間II、そして再び圧縮が進行する区間IIIと、三区間の区分を認めることができる。各区間の表われ方は試料により異なる。またこの p - ε 関係には、圧密速度の影響も確認されている。ここで粉体層の圧密は、粒子の再配列や粒子自身の塑性変形や破壊などにより進行する[5]と考えられるが、この圧縮過程

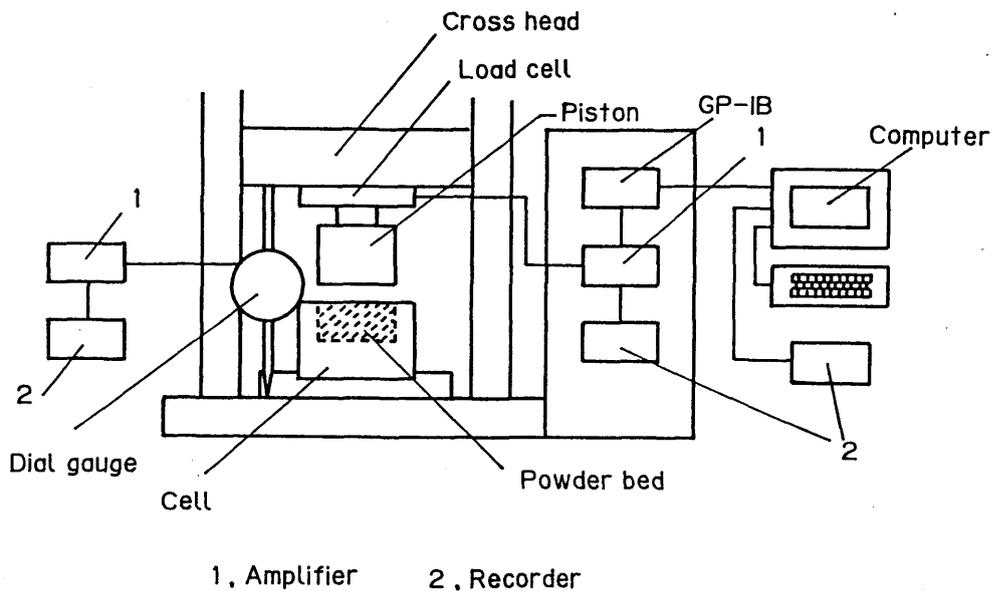


Fig.4-5 金型に充填した粉体層の圧密試験装置の概略

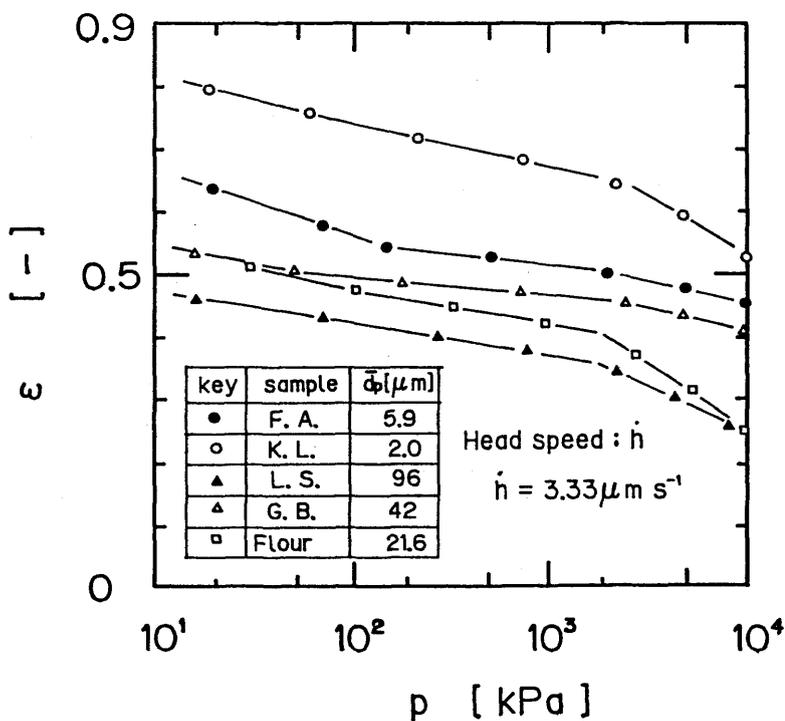


Fig.4-6 定歪速度による粉体層圧密試験での圧密応力と空隙率の関係

に現われる区分は、各区間で圧密を進行させる支配的な因子が異なっていることを示していると思われる。そこで、この区分の粉体層圧縮に関する時間依存型現象への影響を考察するため、最も顕著にこの区分が示された溶融アルミナ粉について各区分1点ずつと、区間ⅠからⅡ、区間ⅡからⅢへ移行する付近の応力により繰り返し圧密試験を行ない、粉体層空隙率の低下を検討してみる。

繰り返し圧密は、クロスヘッドの移動速度を一定 ($h=0.083\text{mm/s}$) にして行ない圧縮と除荷の制御はコンピューターを用いて行なった。結果の一例としてFig.4-7 に繰り返し圧密応力 p と ε の関係を負荷回数を変数にしてプロットした。この図から、繰り返し負荷による空隙率の変化割合は、大きな圧密応力を加えた区間Ⅲの場合ほど、著しい。この傾向は、どの試料でも共通して表われている。また、この区間Ⅲの応力範囲では、繰り返し負荷回数が1000回を超えても空隙率変化が停止しないことを確認している。こうした圧密応力の大きい条件では、あとでも述べるように粒子接触点での塑性変形が顕著に起きている可能性があり、粉体層としてより固体挙動が支配的になってくると考えられる。そこで以下の圧密に関するレオロジー挙動と強度増加現象の関連の考察については区間Ⅰにあたる比較的圧密応力の小さな応力範囲で検討を行なう。

4-2-2, クリープ圧密、クリープ回復による粉体層強度増加現象

まず最初にクリープ圧密および圧密後荷重を除荷し放置するクリープ回復挙動と、こうした履歴を受けた粉体層の強度増加現象の関連を、4-1 節より実験条件を拡大して考察する。実験装置は、4-1 節でも用いた吊り下げ式付着力測定装置と併せてFig.4-8 に示したベアリング式付着力測定装置を用いた。この装置は、吊り下げ式装置の圧密応力の限界が、20kPa 程度であることから、それ以上の圧密応力での実験を行なうために試作した。セルの内径、深さ、材質は、吊り下げ式と同じである。クリープ圧密過程での、圧密変位はダイヤルゲージで測定し、レコーダーに記録した。粉体試料の充填方法は、これまでと同じ目開き1000 μm のふるいを通させて行ないクリープ圧密は、圧密時間 t_c を3-10000 秒の範囲で変え、圧密後の強度 $\sigma_E(t_c)$ を求めた。またクリープ回復試験は、4-1 節とは圧密時間を変え、5 および30秒圧密後、荷重を除荷し120-10000 秒の範囲でクリープ回復を行ない強度を測定した。圧密応力は、吊り下げ式の場合は、6.6kPa、ベアリング式の場合は、13,38,57kPa を選んだ。温度、湿度条件もこれまでと同じ $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$, $50\% \pm 5\%$ の範囲でほぼ一定に保って行なった。用いた試料もこれまでと同じTable 4-1 に示した5種類を用いた。

4-2-2-1 クリープ圧密による空隙率低下過程と強度増加現象

まず最初にクリープ圧密による強度増加過程をFig.4-9 に示す。この図は、圧密応力 $p_p = 6.6\text{kPa}$ の結果を一括して示したもので、横軸にクリープ圧密時間、縦軸に強度を与えてある。各試料とも圧密時間の増加に伴い強度が増加しているが、増加パターンは試料によって異なる。関東ローム粉、溶融アルミナ粉は、圧密時間30秒までに急速に強度が増加し、30秒以後は漸増している。一方他の3種類の試料は、圧密初期の強度の急増は確認されず、強度は比較的なだらかに増加している。次に、ベアリング式装置を用い圧密応力を大きくした場合の結果をFig.4-10に示したが、関東ローム粉、ラクトース粉は、6.6kPaと同様の傾向を示しているのに対して、石灰石粉は圧密初期に関東ローム粉と同様な急激な強度増加が観察され、圧密応力により強度増加パターンに変化が現われている。

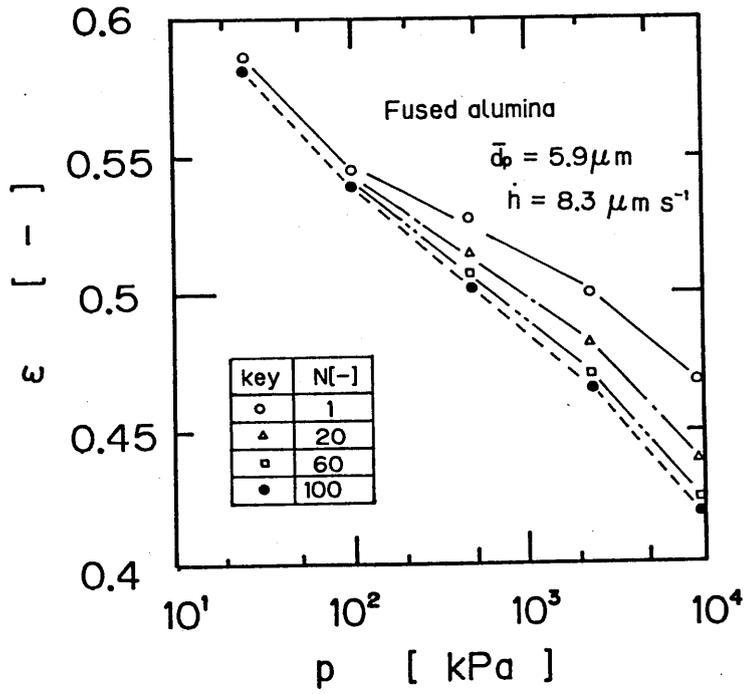


Fig.4-7 繰り返し圧密による粉体層の空隙率変化

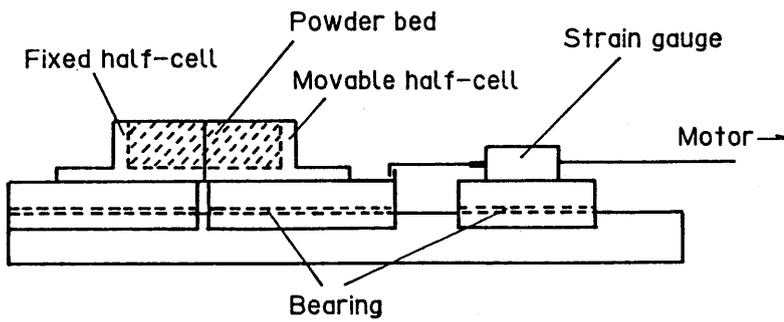


Fig.4-8 高圧密応力用引っ張り強度測定装置

Sample	\bar{d}_p [μm]	$\rho_p \times 10^{-3}$ [kg/m^3]
Kanto loam (JIS 11)	2.0	3.0
fused alumina (W.A. #8000)	1.3	3.9
lactose	46.9	1.53
limestone	27.0	2.7
limestone (NS 100)	4.6	2.7

Table 4-1 Sample

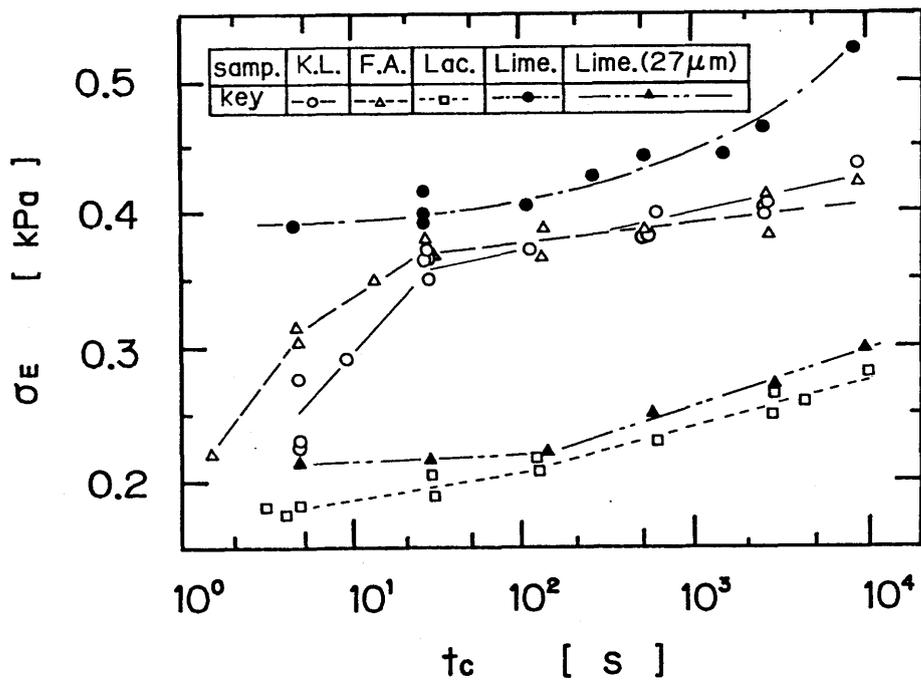


Fig.4-9 クリープ圧密履歴を受けた粉体層強度の経時変化（吊り下げ式付着力測定装置： $p_p = 6.6\text{kPa}$ ）

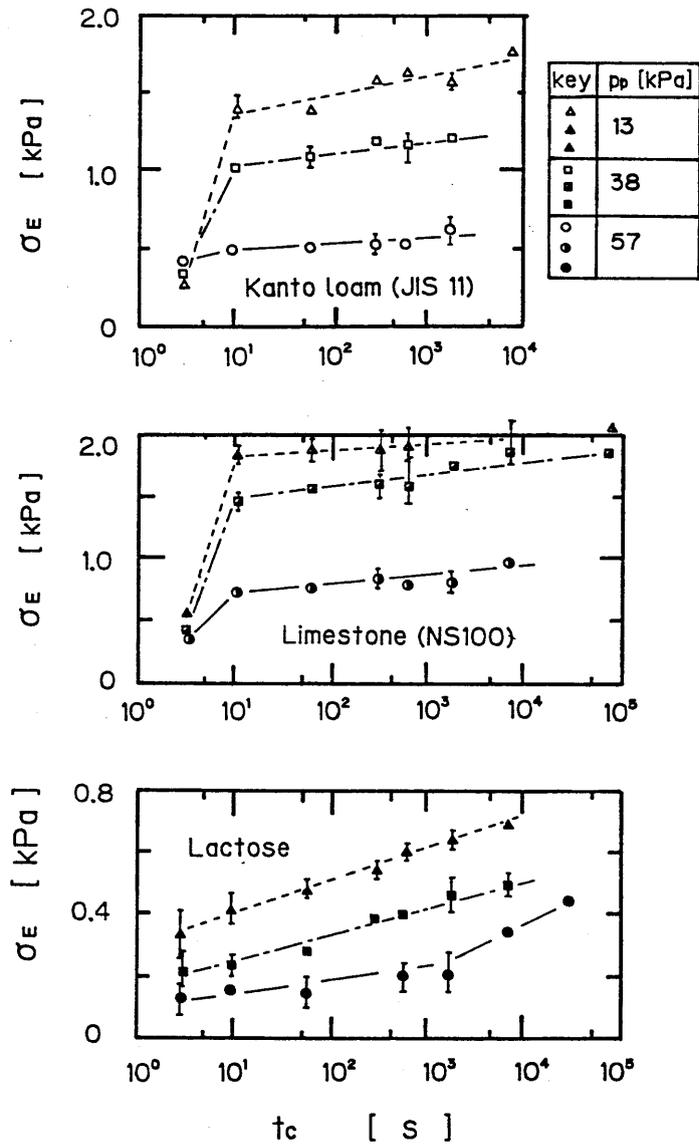


Fig.4-10 クリープ圧密履歴を受けた粉体層強度の経時変化（ベアリング式装置）

この強度増加現象に現われる試料間の違いを考察するため、クリープ圧密による空隙率の経時変化を、圧密応力6.6kPaの結果についてFig.4-11に示した。この図で、圧密時間30秒以内に強度が急増する関東ローム、溶融アルミナ粉では、空隙率の低下が、圧密開始30秒以内に顕著に起き、その後は漸減している。したがって、強度の増加と空隙率の低下は対応している。一方強度増加傾向が似ていたラクトース粉と石灰石粉は、空隙率 ε の経時変化は全く傾向が異なる。石灰石粉は、圧密応力6.6kPaの条件では、本試験範囲のクリープ時間範囲では、 ε は、ほぼ一定であるのに対して、ラクトース粉では、 10^4 秒経過しても ε の低下が続いている。圧密応力を変えた場合の結果をFig.4-12に示したが関東ローム粉、溶融アルミナ粉の場合は、応力を増加させても同じ傾向を持っている。ただ、石灰石粉の場合は、圧密応力を増すと6.6kPaの場合には見られなかった、関東ローム粉と同様な、圧密初期での空隙率の顕著な低下が現われ、強度増加傾向と対応を示している。したがって、関東ローム粉などの試料において圧密初期に強度が急増する現象は、空隙率変化と関連があることが確認された。

この結果よりFig.4-13に強度と空隙率の関係をまとめて示した。この図は、圧密応力6.6kPaでの結果を示したものであるが、この結果から、粉体層のクリープ圧密による強度増加過程は、Fig.4-13中の概念図に示したように、空隙率変化を伴う区間(α)と空隙率変化がわずかである区間(β)に分けられる。ただし本試験で行なったクリープ圧密時間 $t_c = 5 - 10000$ 秒の範囲では、ラクトース粉は区間(α)の範囲しか存在しないようである。また石灰石粉でも6.6kPaの条件では、区間(β)しか確認できていない。しかし、圧密応力を増加させれば、区間(α)の状態が確認できたことから、6.6kPaの条件では、石灰石粉はきわめて早い時間で区間(β)に移行するものと思われる。したがって、ラクトース粉だけが他の試料と若干異なる挙動を示している。そこでつぎに、この区間(α)、(β)の強度増加機構の違い、および試料間での違いを検討するため、クリープ回復後の強度変化を検討してみる。

4-2-2-2 クリープ回復による強度増加過程

クリープ回復試験は、4-1節と同様に圧密後、荷重を除荷して放置する実験である。回復を開始するまでの圧密時間は、区間(α)、(β)の機構を考察するため、関東ローム粉などの試料において、区間(α)にの状態でいる5秒、および区間(β)に移行しはじめる30秒を選んだ。回復後の強度測定結果をFig.4-14に示す。圧密時間5秒のデータは ϕ のKey、30秒のデータは \circ のKeyで与え、横軸は、圧密時間 t_c と回復時間 t_r の和が与えてある。また図中の曲線は、クリープ圧密後の強度測定結果の平均値を結んだ曲線である。この図でまず圧密時間30秒のデータに着目するとラクトース粉以外は全て、クリープ圧密を続けた場合とほぼ一致している。ラクトース粉以外の試料では、圧密時間30秒では、すでに区間(α)に達しており、区間(β)になれば、強度増加過程はクリープ圧密を続けても、荷重を除荷して回復試験を行なっても強度はほとんど同様に増加することが確認された。

一方、圧密時間5秒およびラクトース粉のデータでは、クリープ圧密を続けた場合のような強度の増加は起こらず、強度の増加割合は小さい。したがって、クリープ回復による強度増加現象も、空隙率の低下がある程度顕著な区間(α)とわずかである区間(β)とでは傾向を異にすることが確認された。

4-2-3、圧縮応力緩和を受けた粉体層の強度変化過程

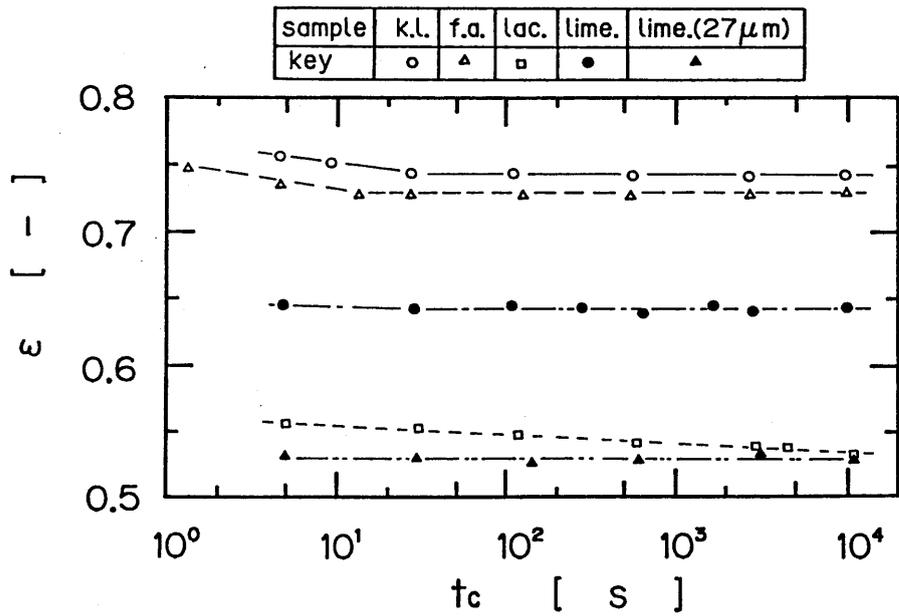


Fig.4-11 クリープ圧密による空隙率の経時変化（吊り下げ式装置）

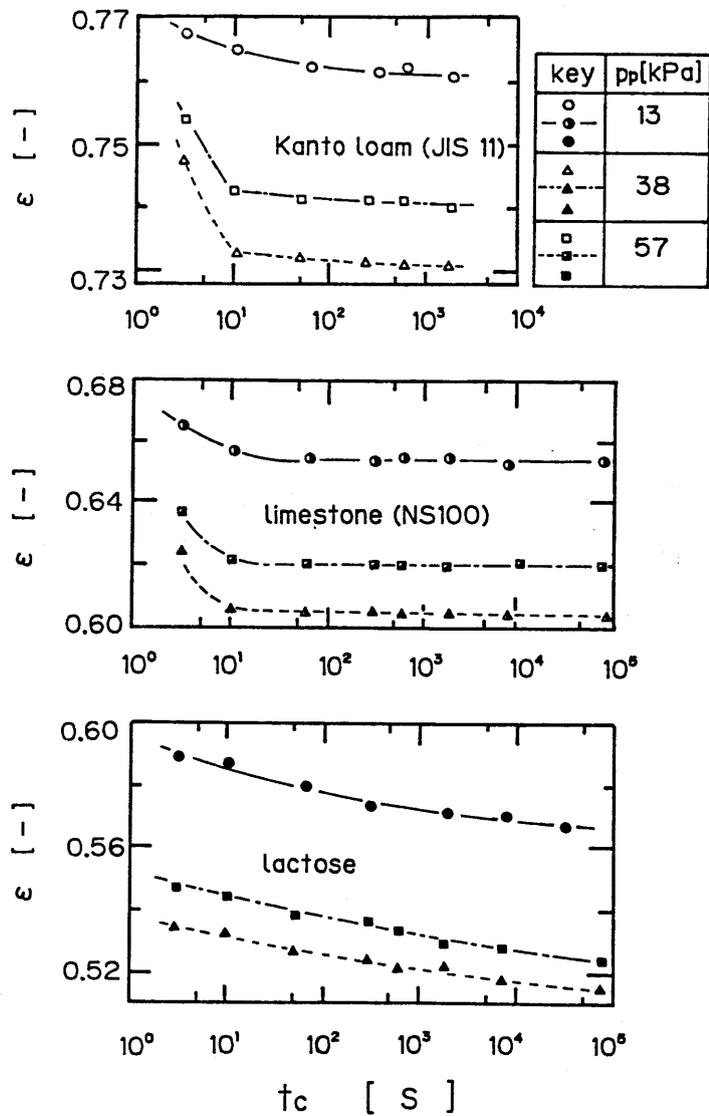


Fig.4-12 クリープ圧密による空隙率の経時変化（ベアリング式装置）

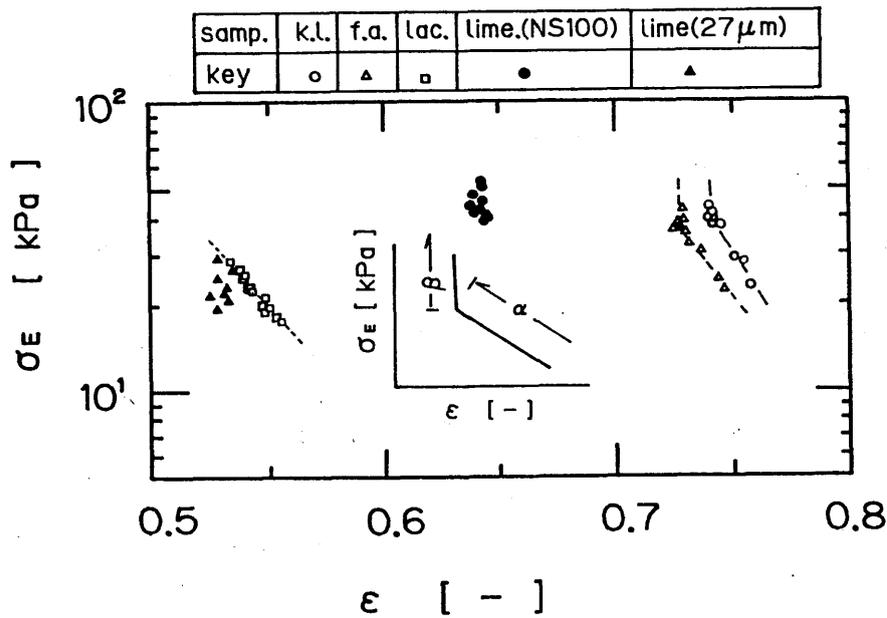


Fig.4-13 クリープ圧密履歴を受けた粉体層の強度-空隙率関係

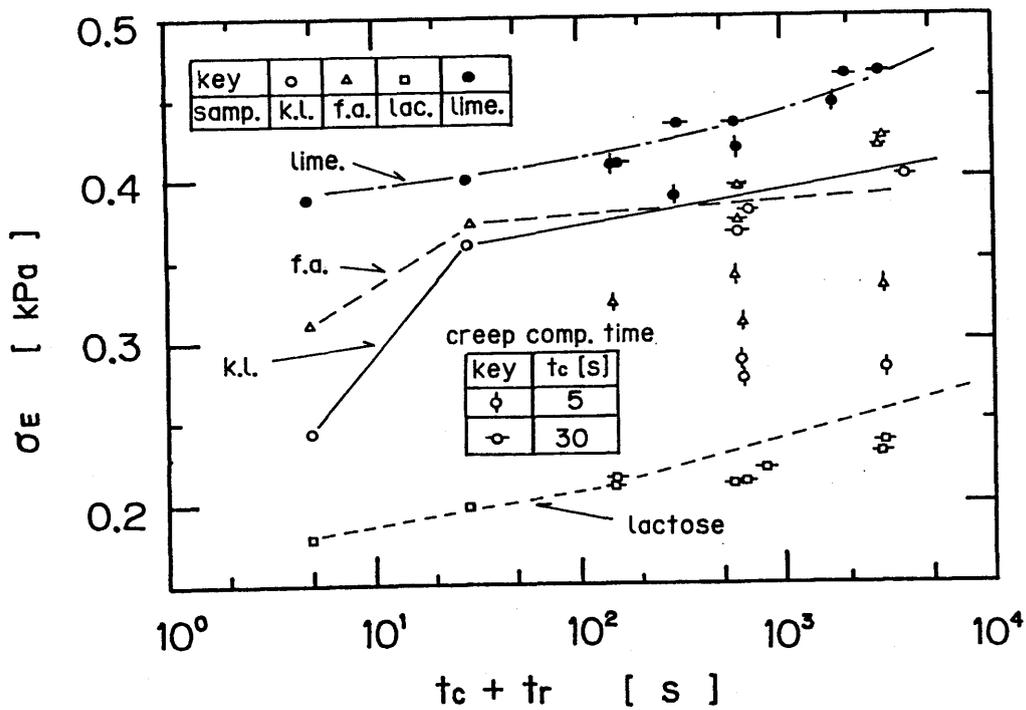


Fig.4-14 クリープ回復履歴を受けた粉体層の強度変化

次に応力緩和履歴を受けた粉体層の強度変化過程を考察する。金型内に充填した粉体層の応力緩和現象の応力緩和曲線を、Fig.4-15に模式的に示した。この図は、設定応力 p_0 に達するまで定歪速度で粉体層を圧密し、 p_0 に達した時点で圧密を停止し応力緩和を開始する試験での応力と歪の経時変化が表わしてある。緩和開始後の応力の変化は、粉体層の塑性変形によると思われる瞬間的な応力の低下 Δp_p と、その後のなだらかな緩和過程を示している。椿ら[2] はRheology modelによりこの曲線を定量化して検討を行なったが、ここでは緩和開始15分後の緩和割合 p^* を次式で定義し考察を行なった。

$$p^* = 1 - \{p / (p_0 - \Delta p_p)\} \quad (4-1)$$

序章に述べたように、応力緩和現象について多くの研究が行なわれているが、圧密特性との関連を検討した椿ら[2] のアプローチのように他の力学挙動との関連を考察した研究は少ない。そこで、応力緩和履歴を受けた粉体層の強度変化過程を検討するまえに、4-2-1 節で行なった繰り返し圧密試験後、応力緩和試験を行なった結果をFig.4-16に示した。この図は、縦軸に繰り返し回数 N での緩和割合 $p^*(N)$ 、横軸に N における空隙率 $\varepsilon(N)$ が与えてある。縦軸、横軸ともに圧密1回目での緩和割合 $p^*(1)$ および空隙率 $\varepsilon(1)$ で無次元化してある。この結果で明らかのように繰り返し圧密による応力緩和現象の変化は試料によって傾向が異なっており、クリープ圧密特性と応力緩和現象が必ずしも対応関係を持たないことを示している。したがって、応力緩和現象履歴を受けた場合には、クリープ圧密とは異なる強度増加現象の存在が期待される。

そこで、粉体層に材料試験機を用いて応力緩和を行ない、緩和の進行にともなう強度変化を測定する。実験は、ベアリング式付着力測定装置を材料試験機上にのせ、4-1 節と同じ方法で試料の充填を行ない、設定応力 p_0 まで圧密後、応力緩和を設定時間 t_{rel} まで行なったのち荷重を除荷し、強度測定を行なった。実験条件として、応力緩和現象は、同じ設定圧密応力でも、圧縮過程での歪速度の影響を受ける。Fig.4-17に歪速度と緩和割合 p^* の関係を示したが、歪速度が早いほど緩和割合は増加し、圧密過程での歪速度により緩和量が変化することから、この歪速度の影響も加味して検討を行なった。

Fig.4-18に緩和時間と引っ張り強度の関係を示した。この図は関東ローム粉の結果を示したもののだが、応力緩和試験を行なった後の強度は、歪速度が0.83mm/sの大きい場合を除いてほとんど変化していない。また、歪速度0.83mm/sの場合も、強度増加が確認されるのは緩和初期だけで、クリープ圧密やクリープ回復試験で見られたような強度の増加現象は、あまり観察されていない。この応力緩和履歴後の強度変化は、一種類の試料でしか検討していない点に問題があるが、強度の経時変化は、応力履歴の形態によって変化することが予測される。この結果から強度増加現象は、単に接触点での付着力が物理化学的作用で増加することに起因しているのではなく、4-1 節で述べたような層構造の微視的な変化により発生していることが期待される。

4-3, 強度増加現象に関する考察

4-2 節の結果より強度増加現象の機構を解明するうえで重要な現象として次の3点が注目される。

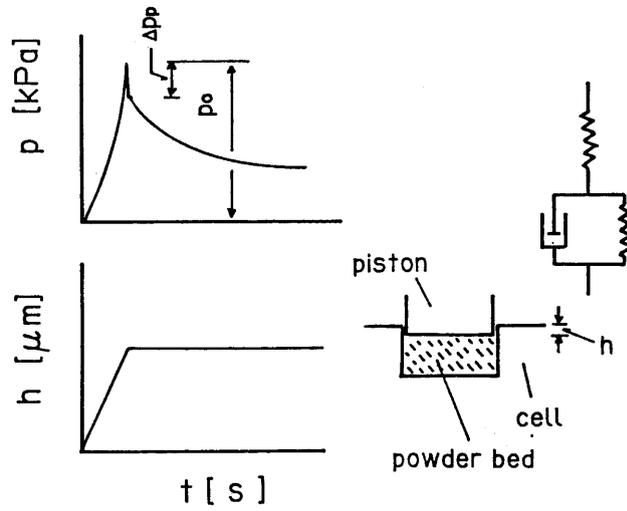


Fig.4-15 応力緩和試験における圧密応力変化の概略

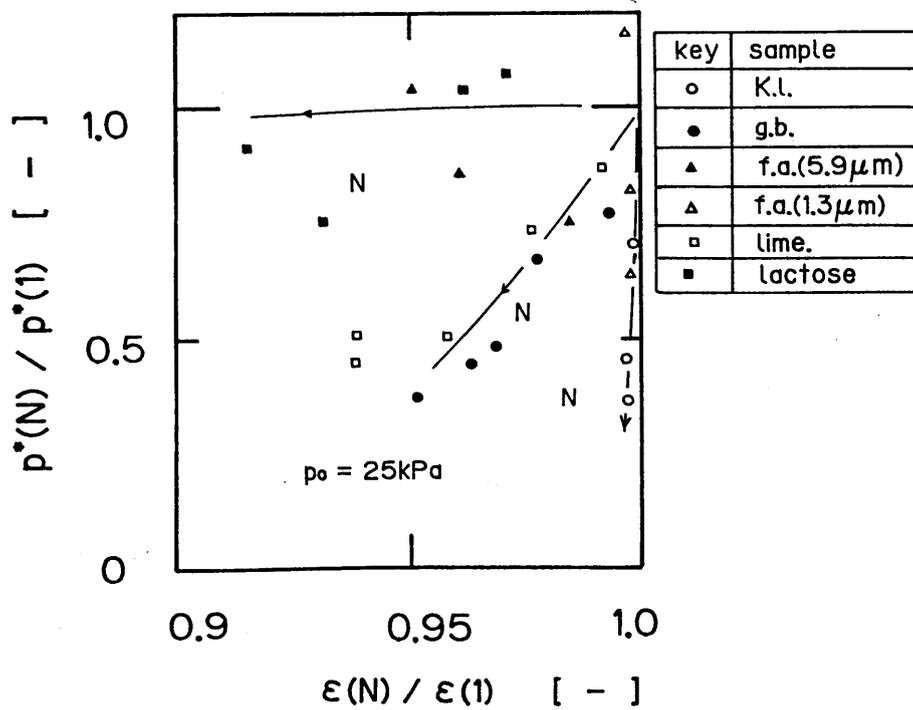


Fig.4-16 繰り返し圧密による空隙率と応力緩和現象の変化

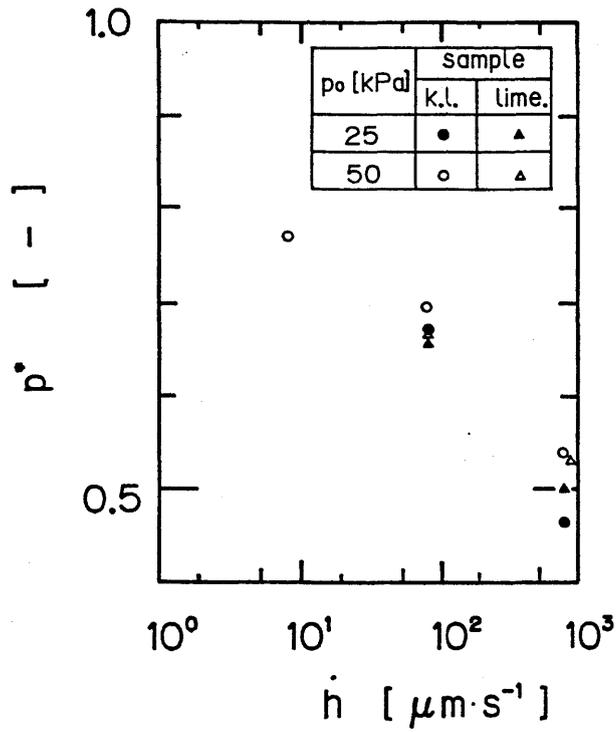


Fig.4-17 応力緩和現象の圧密速度依存性

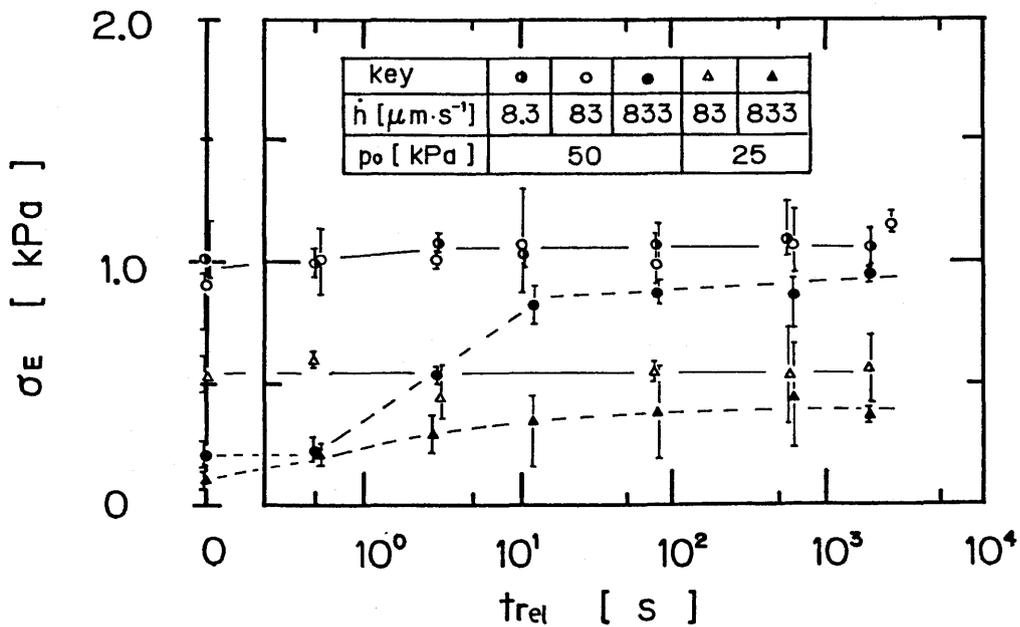


Fig.4-18 応力緩和履歴を受けた粉体層強度の経時変化

(1) 圧密応力6.6 - 57kPa の範囲では、クリープ圧密による強度増加が、空隙率変化を伴う区間と、伴わない区間に分けられ、クリープ回復後の強度増加過程もどちらの区間でクリープ回復を開始するかにより挙動が異なることが認められた。

(2) ただラクトース粉だけは、空隙率の減少が 10^4 秒圧密を続けても確認されるなど、他の試料とは、異なる挙動を示した。

(3) 応力緩和履歴を受けた場合には、クリープ圧密、クリープ回復の場合とは強度増加過程が異なる。

ただ、(3)の応力緩和については、他の試料との比較など行なっていないことから、ここでは結果の紹介に留め、本報では(1),(2)について考察を行なう。まず、ラクトース粉以外の試料で確認された、(1)のクリープ圧密における強度増加過程の区分について考察を行なう。

粉体層の強度の決定因子としては、これまでの研究[7]から1)空隙率変化に伴う接触点数の増加 2)接触点の付着力の増加 3)4-1節で述べた層構造の微視的变化の3点が考えられる。この3点に順次着目して、クリープ圧密過程での強度増加機構を考察する。

まず、1)については、粉体層の層構造を等方ランダムであると仮定して求めたRumpf[6]らの式を、粉体層に加わる巨視的応力と接触点に働く力の関係式としてとらえなおした椿ら[7]のアプローチにより考察できる。椿らは、接触点での付着力 Σ を一定に保ち、かつ等方ランダム構造を変えないままで、粉体層の空隙率すなわち接触点数を変化させた場合、粉体層強度 σ_z は次式で与えられることを示した。

$$\sigma_z = 10 \exp(-4.5 \varepsilon) \Sigma / d_p^2 \quad (4-2)$$

この式は、上記の条件を満たした状態で粉体層の空隙率だけを変化させ、接触点数を増加させた場合、 $\sigma_z - \varepsilon$ 関係が片対数紙上で傾き-4.5の直線で表わせることを示している。しかし、クリープ圧密による強度増加過程における $\sigma_z - \varepsilon$ 関係は、区間(α), (β)とも傾きは、-4.5より大きく、空隙率低下に伴う接触点数の増加という幾何的条件だけでは、クリープ圧密における強度増加現象は、説明できない。したがって、強度増加現象は、2)の接触点の付着力変化および、3)の層構造の変化を考慮しなければならない。まず、3)の層構造変化に着目して検討する。

粉体層の充填構造は、Rumpf[6]らのモデルで仮定されたような等方ランダム構造ではない。まず粒子充填時には、Fig.19に示したような空隙率の高さ方向の分布が存在し、これに圧縮力を加えると、逆に上部では密、下部では疎の状態に分布が変化する。このような空隙率分布の変化には、ある程度の時間が必要であると考えられる。これは、Fig.4-10で示したクリープ圧密後の強度測定試験結果の中で、関東ローム粉、石灰石粉の圧密時間3秒のデータが、圧密応力によらず、ほぼ一定の強度であることから推定される。すなわち圧密時間3秒では、層底部まで空隙率および応力分布の変化が達しておらず、底部では疎充填の状態がかなり保たれていると考えられる。粉体層強度は、4-1節で述べたように層構造の弱い部分に支配されると考えられることから、強度がこの疎充填部分により決まるため、圧密時間3秒では、圧密応力による測定強度の差が僅かであったものと思われる。実際、圧密時間3秒の場合には、上部では、圧密されているものの、底部ではあまり圧密が進んでいないことを定性的に観察している。したがって、ク

クリープ圧密における区間 (α) は、巨視的な空隙率分布の変化を起こしながら、圧密が進行していく区間であると考えられる。区間 (α) でクリープ回復を行なうと、このような巨視的な空隙率分布の変化が停止するため、クリープ圧密を続けた場合のような強度増加が観察されないものと思われる。

つぎの区間 (β) であるが、この区間では巨視的な空隙率分布の変化は僅かになり、微視的、局所的な粒子配列の変化が支配的となるとと思われる。この区間では、クリープ回復を行なっても強度の増加は、圧密を続けた場合と同様な増加を続ける。これは、この区間での強度増加現象が、クリープ応力による接触点の塑性変形の進行にともなう付着力の増加を原因としているのではないことを示している。したがって、この区間での強度増加は、層構造の微視的变化に起因していると思われるが、こうした構造変化は、応力負荷および除荷後の粉体層の応力分布の経時変化や、粉体層の膨張、収縮などの巨視的手法によるさらに正確な測定がまず必要であり、今後の課題である。

最後にラクトース粉での挙動について考察する。ラクトース粉の場合には粒子自身の変形が影響していることが予測される。そのため、ある程度、圧密時間を長くしてもクリープ圧密と回復の場合では、強度の増加パターンが異なるものと思われる。この点については、竹山ら[8]の遠心加圧した一個粒子の付着力測定実験を、応用することが有効と思われる。竹山らは、ガラス面上に分散させた粒子に遠心力により加圧力を加えた後、逆に粒子を分離させる方向に遠心力を作用させ、粒子付着力の分布を測定した。Fig. 4-20に実験結果の一例を示した。この図は、縦軸に平均付着力、横軸に加圧力を与えたもので、各粒子とも、 10^5 [N]程度の加圧力から、接触点の塑性変形が原因と思われる付着力の増加が観察される。さて、この結果を粉体層に適用して考察するために、粉体層を応力 p で圧縮した際の接触点に加わる力 P を、Eq.(4-2)を変形した次式より求める。

$$P = p d_p^2 / 10 \exp(-4.5 \epsilon) \quad (4-3)$$

この式は、Eq.(4-2)と同様に等方ランダム充填構造を仮定している。この式より本研究で用いた試料の接触点にかかる力の計算値をTable 4-2に一括して示す。粒径の大きいラクトース粉の場合には、接触点に働く力は、 10^5 [N]に達しており、しかも他の試料より降伏値が小さいと思われることから、接触点で塑性降伏が起き、クリープ圧密により接触点がクリープ変形していることが予測される。この計算は多くの仮定を含んだものであるが、ラクトース粉の長時間にわたるクリープ圧密の進行は、層構造の変化とともに粒子自身の変形が関与しており、他の試料についても圧縮応力が増加すればこうした傾向は表われるものと思われる。ただ、この検証には、一個粒子をクリープ加圧する実験が必要であり今後の課題である。

Sample	K.L.	F.A.	Lactose	L.S. (NS100)
$\bar{\epsilon}$ [-]	0.745	0.733	0.544	0.642
\bar{d}_p [-]	2.0	1.7	46.9	5.2
P [N]	7.54×10^{-8}	5.16×10^{-8}	1.68×10^{-5}	3.21×10^{-7}

Table 4-2 Eq.(4-3)より求めた接触点に加わる力 $p = 6.6$ kPa

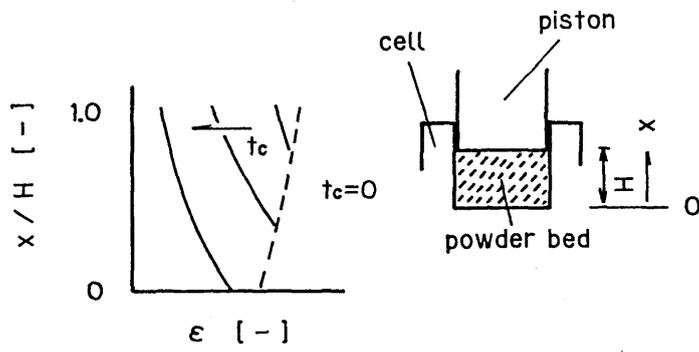


Fig.4-19 クリープ圧密初期での空隙率分布の変化

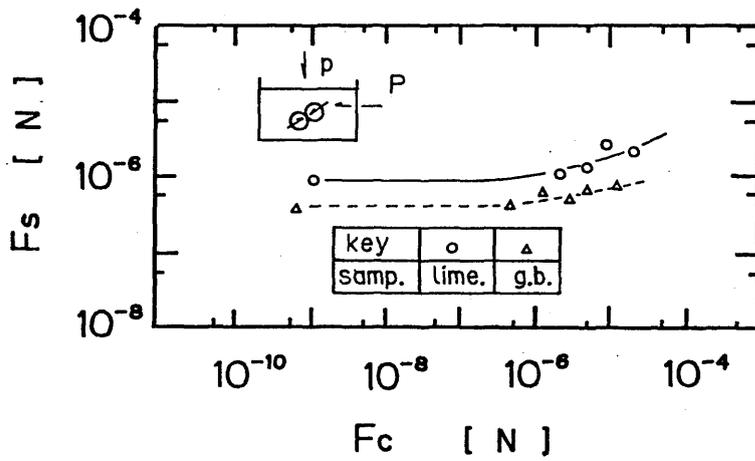


Fig.4-20 遠心加圧した一個粒子の付着力

結 言

(1) 時間の経過に伴い粉体層強度が増加する現象は、圧密、除荷操作に関するレオロジ挙動と関連していることが確認された。

(2) クリープ圧密による粉体層強度増加過程は、本試験で用いた圧密応力 6.6–57kPa の範囲では、顕著な空隙率変化を伴う区間 (α) と、空隙率変化がほとんど観察されない区間 (β) に分けられた。両者の違いは、各段階でクリープ回復した場合の強度増加傾向に顕著に表われ、区間 (β) に達した段階でクリープ回復を行なっても、クリープ圧密を続けた場合と変わらない強度増加現象が確認され、この区間での強度増加現象が、微視的な層構造の変化に起因するという予測がなされた。

(3) ただ、ラクトース粉のみは、圧密時間が 10^4 秒を超えても空隙率の低下が継続し、区間 (α) の状態しか確認できず、クリープ回復試験結果も他の試料とは異なる結果を示した。この原因は、接触点の塑性クリープ変形によるものと思われ粉体層の時間依存型現象には、層構造とともに粒子自身の時間依存性の検討が必要であることが指摘された。

(4) 粉体層圧密を応力緩和によって行なった場合には、応力緩和の進行にともなう強度の変化は、クリープ圧密、および回復試験による場合と異なる傾向を示した。この結果からも強度増加現象は、粒子接触点での付着力の変化だけによるのではなく、層構造の微視的变化などの要因が存在すると思われる。

< 使用記号 >

F_c	=	一個粒子の平均付着力	[N]
F_s	=	一個粒子に加わる遠心加圧力	[N]
h	=	圧密変位量	[μm]
\dot{h}	=	圧密速度	[μm]
N	=	繰り返し圧密回数	[-]
p	=	圧密応力	[kPa]
p^*	=	応力緩和割合	[-]
P	=	粒子接触点に加わる力	[N]
t_c	=	クリープ圧密時間	[-]
t_r	=	クリープ回復時間	[s]
t_h	=	粉体層圧密に関する履歴時間	[s]
t_{rel}	=	応力緩和時間	[s]
Δ	=	引っ張り変位量	[μm]
ε	=	空隙率	[-]
σ	=	負荷引っ張り応力	[kPa]
σ_E	=	圧密履歴後の粉体層強度	[kPa]
σ_Z	=	単調負荷による静的引っ張り強度	[kPa]

< 引用文献 >

- 1) 神谷, 古川, 椿, 神保: 粉体工学会誌 ,22 , 618 (1985)
- 2) Tsubaki J. , G.Jimbo , K.Takagi : Preprints of 3rd European Symposium on Particle Characterization , p.487 (Nurnberg 1984)
- 3) Corn M. : J. of Air Pollution Control Association , 11 , 566 (1961)
- 4) 浅川, 神保: 材料 ,16 , 358 (1967)
- 5) 原, 梅屋: 粉体工学会誌 :19 , 18 (1982)
- 6) Rumpf H. : Chem. Ing. Tech. , 42 , 538 (1970)
- 7) Tsubaki J. , G.Jimbo : Powder Technology ,37 , 219 (1984)
- 8) 竹山: 1983年度名古屋大学修士論文

第5章 粉体層強度の時間依存型 変化と変形挙動[1,2]

粉体層、土の時間依存性を加味した構成関係は、単なる現象記述を目的とした研究を除けば、時間を考慮しない場合の研究に比べ極めて少ない。土質力学の分野では、序章で述べたモデル論的研究があるものの、これらは間隙を水で満たし、しかも粒径も比較的大きい系での現象を対象としている。また、塑性論を応用した連続体としてのモデル化についても、実験的に検討した時間依存型現象に限られていたり、降伏、破壊など塑性論における基本的な概念を全般的に検討しているものは少ないようである。この破壊、降伏と変形挙動との関連という点では、3-1,2 節でのクリープ引っ張り試験より得られた、強度低下作用の現われる臨界クリープ応力値 σ_{cri} の存在や、クリープ破断に至るまでの強度低下過程と変位量増加過程の間の相関関係の存在が注目される。この臨界クリープ応力 σ_{cri} の存在は、粉体層の引っ張り試験での応力-変位関係がほとんど全ての応力範囲で非線形であることから、弾塑性論で為れているような線形性からの逸脱では定義できない降伏値の存在を示していると考えられる。また、強度低下過程と変形過程との関連の存在は、クリープ破断過程での変形挙動も強度の関数として記述できる可能性を示唆している。そこで本章では、5-1 節において、クリープ変形挙動についてもこの σ_{cri} を境界にして変化が存在するかを検討した後、強度変化に伴い変形挙動を表わす変数が変化すると仮定したレオロジーモデルを適用して、この相関関係の定量的考察を試み、 σ_{cri} 以上と以下でのクリープ変形挙動の記述について検討を加える。

そして、5-2 節以降では、クリープ引っ張り試験での塑性変位量だけでなく、3, 4 章で行なった繰返し試験で得られる可逆変位量や、クリープ圧密、クリープ回復後、あるいは動的負荷により強度増加を確認した粉体層の応力-変位関係についても解析を行なう。そして、クリープ引っ張り試験で得られた降伏応力の存在や破断強度と変形挙動の相関関係が確認できるか検討し、この考え方の適応性について考察を試みる。

5-1 クリープ破断現象における強度低下過程と塑性変形挙動

クリープ引っ張り試験での変形挙動と強度変化過程について検討するまえに、耐久限以上と以下での変形挙動の比較を行ない、考察の基礎となるレオロジーモデルを提案する。すでに序章および2章で述べたように、粉体層のクリープ変形挙動は耐久限以上と以下では極端に異なる。Fig.5-1(a)に両者の概略を示したが、両者をレオロジーモデルで統一的に記述することは困難である。しかし、2章でも指摘したクリープ応力に対して粉体層が安定化していく過程であると思われるクリープ破断過程での区間 I、および耐久限以下での変形過程については、基礎式が次式で与えられる Fig.5-1(b)のVoigt モデルにより近似できる。

$$\sigma(t) = k_p \Delta(t) + \eta \{d\Delta(t)/dt\} \quad (5-1)$$

このモデルの適用性は $\sigma(t) = \sigma_s = \text{Const.}$ の条件で Eq.(5-1) を解いて得られる変位量の経時変化が次式で与えられることから確かめられる。

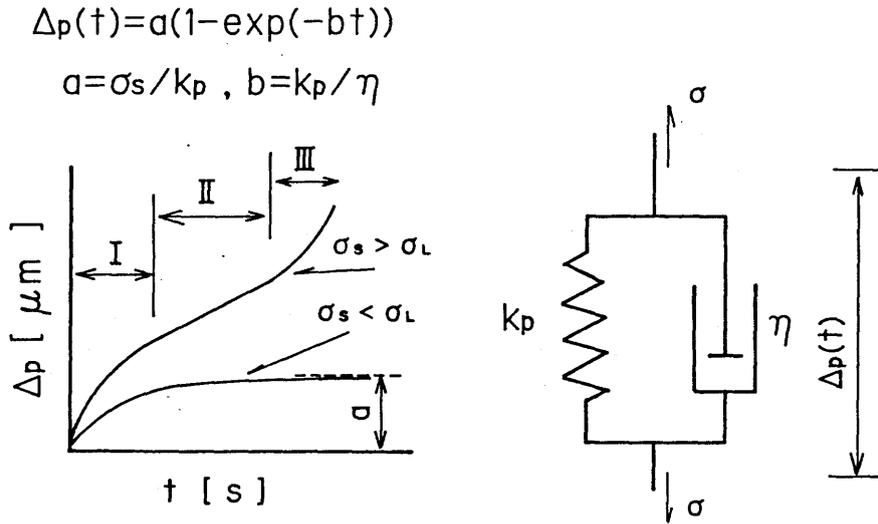


Fig.5-1 クリープ引っ張り試験による変位量増加過程と適用した rheology model

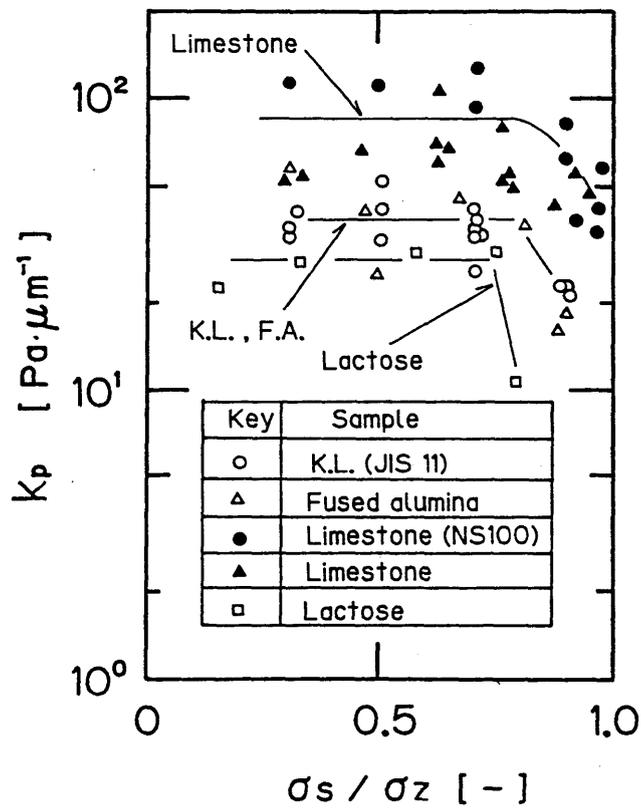


Fig.5-2 耐久限以下のクリープ応力による変形挙動の rheology model を用いた解析

$$\Delta(t) = \sigma_s/k_p \cdot \{1 - \exp(-k_p t/\eta)\} \quad (5-2)$$

この式はバネ要素によって与えられる平衡変位量 $a (= \sigma_s / k_p)$ まで、変位量が粘性抵抗を受けながら増加することを示しており、区間 I および耐久限以下の応力のクリープ変形挙動をある程度の時間範囲で記述するのに適している。

そこでまず、耐久限以下でのクリープ変形挙動、特に臨界応力 σ_{cri} 付近での変形挙動の変化について考察するため、3章で得られたクリープ変形曲線に Eq.(5-2) を適用し、Curve fitting により Rheology parameter k_p , η を求めてみる。結果の一例を Fig.5-2 に示す。この図は、クリープ負荷応力 σ_s と Curve fitting により求めた parameter k_p の関係を示したものである。比較のため、Fig.5-3 に3章で得た 10^4 秒クリープ引っ張りを行なった後の強度 σ_E とクリープ応力 σ_s の関係を示した。Figs.5-2,3 を比較すると、クリープ応力を耐久限近傍に設定しクリープ応力による強度低下作用が表われる応力範囲 ($\sigma_s / \bar{\sigma}_2 > 0.8$) では、parameter k_p が明確に低下している。この傾向は、どの試料でも存在しており、強度だけでなく塑性変形挙動についても σ_{cri} を境界にして変化することが確認された。したがって、3章で求めた臨界応力 σ_{cri} は、強度だけでなく塑性変形挙動に関しても、降伏条件を表わす値であることが確認された。

また、粉体層強度の低下にともない粉体層の塑性変形抵抗の低下が確認されたことから、変形挙動を表わす変数である k_p は、強度の関数として記述できることが予測される。この仮定を耐久限以上の応力による複雑なクリープ変形挙動に適用すれば、3章で求めたクリープ破断過程において、強度の低下が確認された区間 II, III では、強度低下に伴い Rheology parameter k_p , η が低下する。そして、この仮定により、Fig.5-1(b) の Rheology model の構造を変えなくても、区間 II, III での変形挙動が記述できることが期待される。そこで、次に Rheology parameter k_p , η が、クリープ時間 t_c のどのような関数で変化すればクリープ破断過程での複雑な塑性変形挙動を記述できるかを検討する。

Rheology parameter k_p , η が時間の関数と考えると Eq.(5-1) は、次式で書きかえられる。

$$\sigma(t) = k_p(t) \Delta(t) + \eta(t) \{d\Delta(t)/dt\} \quad (5-3)$$

この式に基づいて各区間ごとに $k_p(t)$, $\eta(t)$ の関数形を検討する。まず、強度変化が現われない区間 I では、各 parameter は一定と考えられ、次式で与えられ変形挙動も Eq.(5-2) と同様に表わすことができる。

$$k_p(t) = k_{pI} \quad (= \text{Const.}) \quad \eta(t) = \eta_I \quad (= \text{Const.}) \quad (5-4)$$

次に、区間 II, III であるが、この区間の変位量の増加過程はそれぞれ次式で近似的に表現できる。

$$\Delta(t) = C_{II} (t - t_I) + \Delta_I \quad (5-5)$$

$$\Delta(t) = C_{III} (t - t_I)^2 + C_{II} (t - t_I) + \Delta_I \quad (5-6)$$

この、Eqs.(5-5,6) で近似した変形過程が、Fig.5-1(b) で示した Voigt model の構造を変えることなく記述できるよう $k_p(t)$, $\eta(t)$ の関数形状を求める。

ここで計算の簡略化のため次式の過程を用いる。

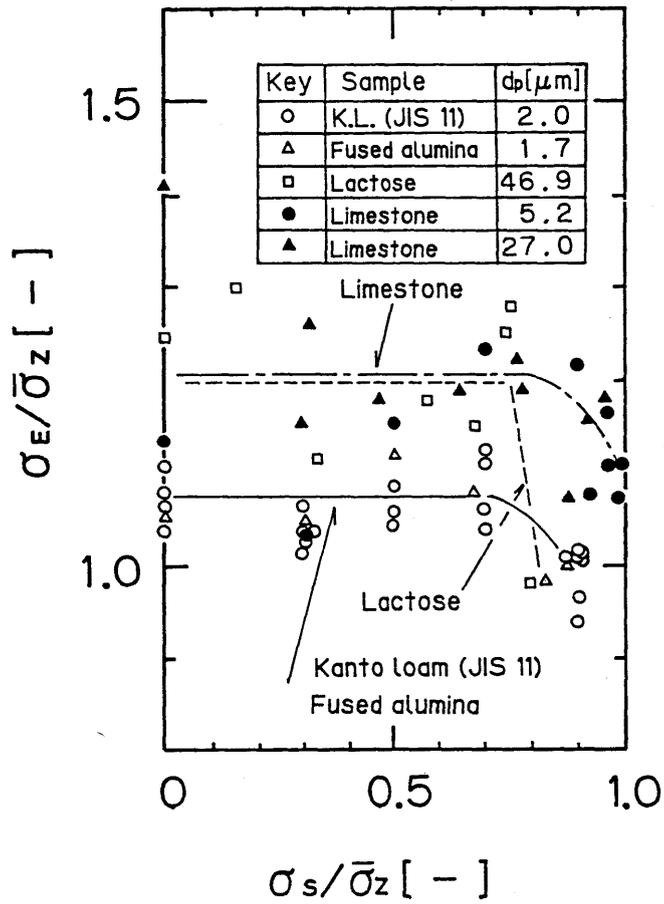


Fig.5-3 耐久限以下のクリープ応力による履歴を受けた粉体層強度の経時変化

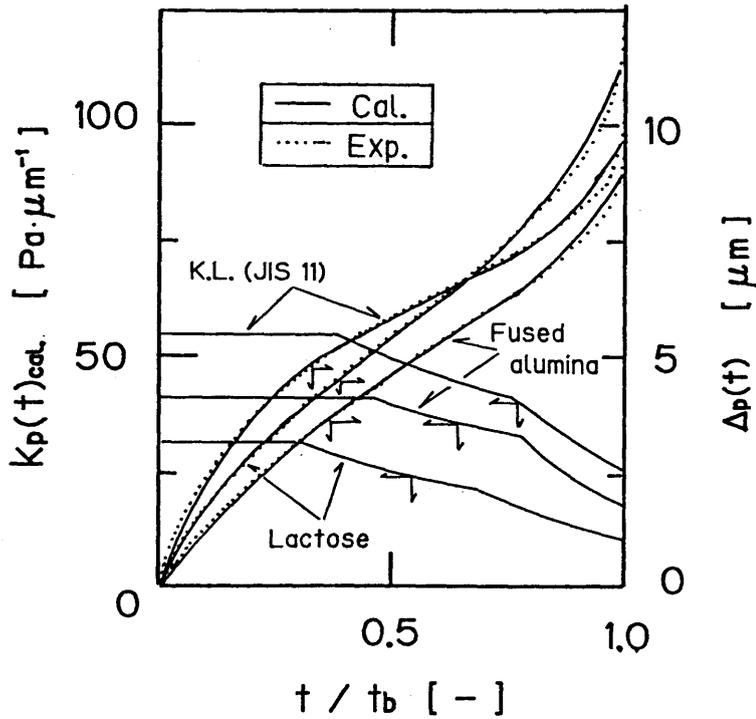


Fig.5-4 変形過程のfitting 結果と rheology parameter の計算結果の一例

$$b = k_p(t) / \eta(t) = \text{Const.} \quad (5-7)$$

この仮定は、さきに行なった耐久限以下のクリープ変形挙動の解析より求めた b の値が、特に負荷応力の大きい範囲で一定となる傾向があることから使用した。

このEq.(5-7)、およびEqs.(5-5,6)をEq.(5-3)に代入し、 $k_p(t)$ について解くと次式が得られる。

(1) 区間II ($t_I < t < t_{II}$)

$$k_p(t) = k_{pI} / \{b \exp(-bt_I) \cdot (t - t_I) + 1\} \quad (5-8)$$

(2) 区間III ($t_{II} < t$)

$$k_p(t) = k_{pI} \sigma_s b / \{k_{pI} C b (t - t_I)^2 + b \sigma_s \exp(-bt_I) \cdot (t - t_I) + \Delta_I\} \quad (5-9)$$

さてこのEq.(5-8,9)で得られた $k_p(t)$ の経時変化を実際に図示するには、式中の係数 k_{pI} , b , C_I , C_{III} を求める必要がある。そこで、クリープ破断試験で得た変形過程曲線に各区間ごと、Eqs.(5-2,5,6)を用いてCurve fittingを行ない各係数を求めた。Fig.5-4にCurve fitting結果と $k_p(t)$ の経時変化の一例を示した。区間II, IIIでの $k_p(t)$ の変化傾向は、Fig.5-5にあらためて示した3章で得られた強度低下過程とよく似ている。

そこで、この $k_p(t)$ の変化と強度変化の相関を直接検討する。Fig.5-5に示したクリープ破断過程での強度測定データの内、区間II, IIIのデータの t/t_b を求め、この t/t_b に相当する $k_p(t)$ の値をEqs.(5-8,9)より計算する。そして、求めた $k_p(t)$ と強度 $\sigma_E(t)$ の関係をFigs.5-6,7に示した。横軸のParameterの計算値 $k_p(t)_{cal}$ は、区間Iでの値 k_{pI} で無次元化してある。また、 $k_p(t)$ を計算する際用いたEqs.(5-8,9)中の係数および寿命値は、クリープ破断データの中で、各区間の存在割合が最も、全データの平均値に近いデータの値を用いた。また、図中の直線は、 $k_p(t)$ と $\sigma_E(t)$ の間に一次の関係が存在すると仮定した場合を示しており、一点鎖線は、区間Iでの強度測定値のばらつきが、クリープ破断過程でも保たれたと仮定した場合のばらつきの範囲を示したものである。

この図から、二種類の試料とも、 $k_p(t)$ と $\sigma_E(t)$ の関係は強度のばらつきの範囲で相関を示している。そして、低下割合に比べ $k_p(t)$ の低下割合が大きいことから、わずかな強度低下によって粉体層が著しく変形しやすくなることが確認された。また、Rheology parameterが、強度の関数として示されたことにより、耐久限以上と以下の複雑な変形過程が単一のRheology modelで統一的に記述できると考えられる。この結果は、単に現象記述に留まらず微視的構造変化について今後考察を進める上で重要な知見であると思われる。

土質力学では同様なアプローチとして、序章で述べた動的負荷での強度増加を超過応力の概念で記述したPerzyna [3,4,5] の粘塑弾性モデルを用いた研究[6,7,8]があるが、時間が関与する強度変化現象は、3,4章で述べたように動的負荷によるものと、準静的負荷領域での現象の発生メカニズムは異なると考えられ構成関係は、それぞれの負荷速度領域で検討が必要である。また、Sekiguchiら[9,10]のアプローチも興味深い。三軸圧縮クリープの場合には一次元引っ張りの場合と応力条件が異なることや、破壊、強度、降伏など塑性論における他の基礎的概念についてあまり実験的検討を行っていないよ

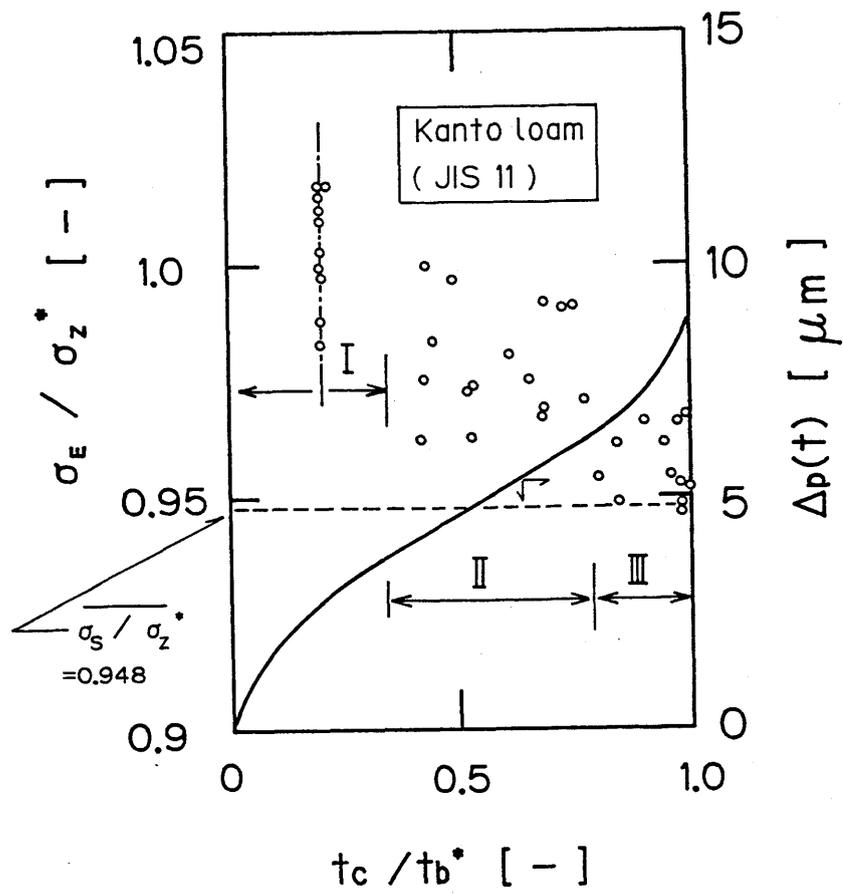


Fig.5-5 クリープ破断に至るまでの強度低下過程

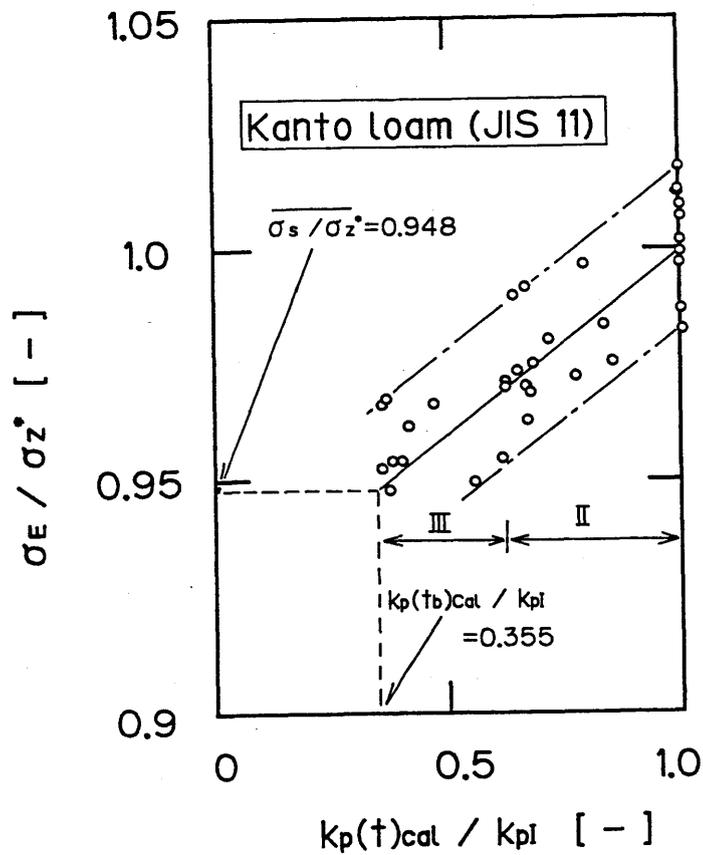


Fig.5-6 クリープ破断過程での粉体層強度とrheology parameterの関係 (関東ローム粉)

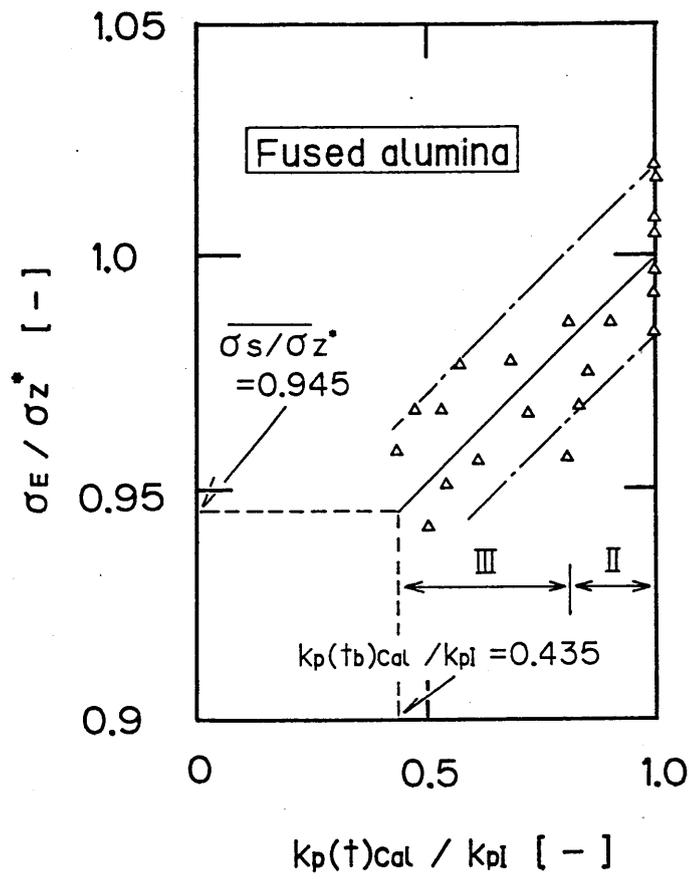


Fig.5-7 クリープ破断過程での粉体層強度と rheology parameter の関係 (溶融アルミナ粉)

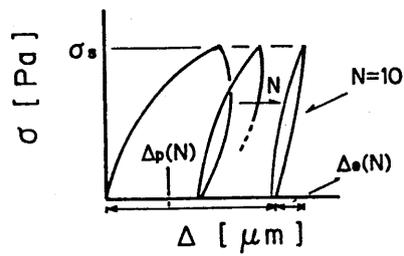


Fig.5-8 準静的繰り返し負荷による引っ張り応力-変位関係

うである。したがって、このアプローチは、これら土質力学の手法とは異なる側面からみたアプローチであると考えられる。

ただ、ここで得られた降伏応力 σ_{cri} の存在や、強度と変形挙動を表わす変数との相関関係の存在は、クリープ引っ張り試験での塑性変形過程での結論に過ぎない。そこでつぎに、3章の繰り返し負荷試験で確認される可逆変位量や、4章で強度増加現象の確認された圧密操作に関する履歴を受けた応力-変位関係、あるいは3章で得た動的負荷条件での粉体層の応力-変位関係など、引っ張り負荷に関する応力-変位-時間関係について、広く適用できるかを検討をする。まず次節では、繰り返し負荷により得られる可逆変位量について考察する。

5-2 準静的繰り返し負荷試験より得られる可逆変位量に関する考察

準静的繰り返し負荷によって得られる応力-変位関係の一例を、Fig.5-8 に示した。すでに2章で述べたように、変位量は、不可逆変位量 Δp と可逆変位量 Δe に区別される。不可逆変位量の繰り返し負荷による累積過程は、クリープの場合と同様の形状であることから5-1節と同様な議論が成立すると思われる。そこで本節では、可逆変位量に着目して整理を行なう。可逆変位量を整理するため、繰り返し負荷での可逆変形に関する係数 k_e を次式で定義する[6]。

$$k_e = \sigma_s / \Delta_e \quad (n) \quad (5-10)$$

最初に、疲労破断が起きない応力範囲において、この k_e と繰り返し負荷応力の関係を整理する。この応力範囲でも、特に負荷応力が大きい場合では、Fig.5-8 に示したように繰り返し負荷初期において除荷過程でも塑性変形が進行する。そこで、繰り返し負荷初期では解析せずに、累積塑性変位量の増加が比較的小さくなる $N=10$ 回、および繰り返し負荷時間が 10^4 秒に達した時点での k_e の値を繰り返し負荷応力 σ_s に対して plot したのが、Fig.5-9 である。この図より k_e が負荷応力により変化している。したがって、可逆変形に関しても応力-変位関係は、非線形であることが確認された。また、 k_e の負荷応力の増加に伴う低下傾向は、強度低下作用の確認された、 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z > 0.7$ 付近を境界にして、変化しており、応力比が0.7以下の応力範囲では、Eq.(5-11)、0.7以上の応力範囲では、Eq.(5-12)の関係がある。したがって、可逆変形挙動にも、 σ_{cri} を境界とした降伏の影響が現われることが示された。

$$k_e \propto (\sigma_s / \sigma_z)^{0.3} \quad \sigma < \sigma_{cri} \quad (5-11)$$

$$k_e \propto (\sigma_s / \sigma_z)^{1.4} \quad \sigma > \sigma_{cri} \quad (5-12)$$

参考のため、この式を使って、Fig.5-10に、可逆変位量と実際の引っ張り破断試験での応力-変位関係を比較したが、単純な引っ張り破断試験においては、この可逆変位量は、total 変位量に比べて小さく、極めて小さな応力でも塑性変形が開始していることがわかる。

また、 $N=10$ と、繰り返し負荷時間が、 10^4 秒に達した時点での k_e を比較すると、 k_e は時間の経過に伴って増加する傾向がある。この増加割合は、 $\sigma_s / \bar{\sigma}_z < 0.7$ の強

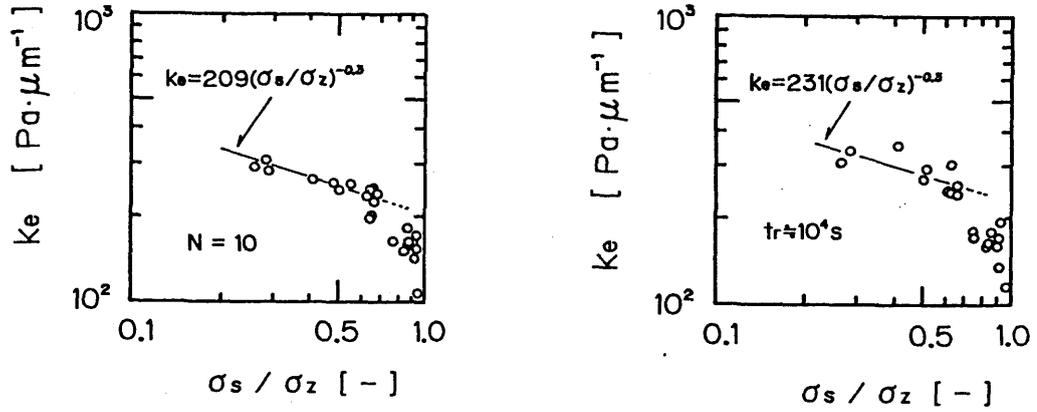


Fig.5-9 可逆変形挙動の準静的繰り返し負荷応力による変化

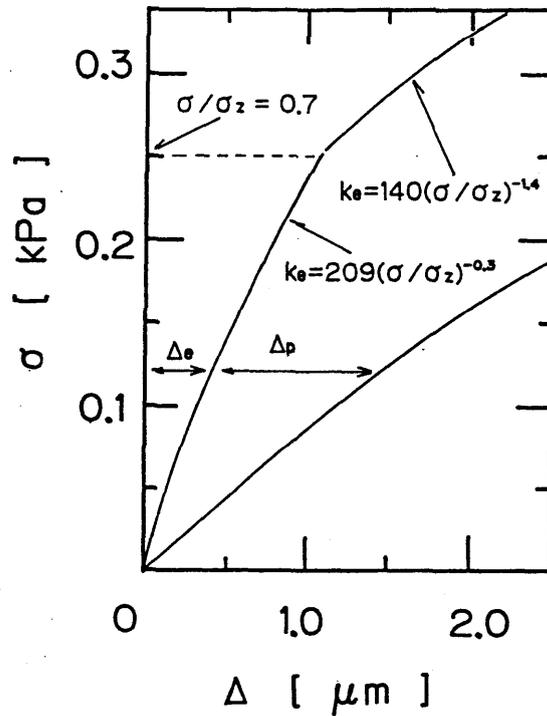


Fig.5-10 可逆変形に関する応力-変位関係と実際の単調負荷による応力-変位関係の比較

度増加が起こる応力範囲の方が大きいことから、強度増加が現われる場合には、 k_e が、増加し変形しにくくなることが予測される。したがって、強度増加が発生する場合にも、強度と変形挙動を表わす変数の間に相関関係が存在することが期待される。そこで、次に3, 4章で強度増加が確認されたクリープ圧密, クリープ回復後の引っ張り破断試験、および比較的高い応力負荷速度での、引っ張り試験での応力-変位関係について考察を加える。

5-3 強度増加現象が現われる条件での応力-変位関係

各試験での応力-変位関係を比較検討する前に、単純な引っ張り破断試験での応力-変位関係の定量化が必要である。Fig.5-11(a) に示したような引っ張り破断試験での応力-変位関係を定量的に評価するには、Rheology modelが有効である。ただ、その場合に考慮すべき点は、5-1,2 節で示した強度低下作用が現われる σ_{cri} 以上の応力では、変形挙動も変化したことである。この結果から、クリープや繰り返し負荷を開始する前段階でもある引っ張り試験での応力-変位関係においても、 σ_{cri} を境界にして変形挙動が変化していることが期待される。この σ_{cri} で表わされた降伏応力の存在を考慮して、応力-変位関係の解析法を検討する。

引っ張り試験での応力-変位関係も、5-1節で用いたVoigt model を用いて近似できる。しかし、定応力負荷速度で試験した場合の応力-変位関係は、次式で示したようにMaxwell modelの方が、簡略でありfitting 誤差も小さいことを確認している。

1), Maxwell model

$$\Delta = \sigma/k_{pM} + \sigma^2/(2\sigma_e n_M) \quad (5-13)$$

2), Voigt model

$$\Delta = \sigma/k_{pV} + \sigma_e n_V \{ \exp(-k_{pV}\sigma/n_V\sigma_e) - 1 \} / k_p^2 \quad (5-14)$$

$$(\sigma_e = \delta = \text{Const.})$$

また、ここでは、モデルの物理的意味よりも強度増加に伴う応力-変位関係の形状に関する考察を中心に行なうことから、fitting 制度の良いMaxwell model を採用した。

さて、応力-変位関係のMaxwell Model によるfitting であるが、モデルの適用限界を見るため、fitting を行なう応力範囲を $\sigma/\sigma_z = 0.1$ から 1.0 まで徐々に拡大していった場合の k_{pM} , n_M およびfitting 誤差 CV を、fitting を行なった応力範囲の上限値に対して求めたのが、Fig.5-12 である。この図は、10分間予圧密した直後に引っ張り破断試験を行なった場合のものであるが、クリープや疲労試験において強度低下作用が表われた応力比 $\sigma/\sigma_z > 0.7-0.8$ に着目すると、fitting 誤差が急激に増加し、 0.7 以下の応力範囲ではほぼ一定であった、 k_{pM} , n_M の値も変化することを示している。これは、 $\sigma/\sigma_z > 0.7-0.8$ の範囲を含めると、右辺の応力に関して2乗の項までの和で与えているEq.(5-12) では記述できず、さらに高次の項を加えなければ変形挙動を記述できないことを示している。同様な、強度低下作用が表われる応力比範囲でのfitting 誤差の拡大は、Voigt model を用いたfitting でも確認されている。これは、クリープや疲労試験で強度低下作用を確認した応力範囲では、クリープや疲労試験を開始する

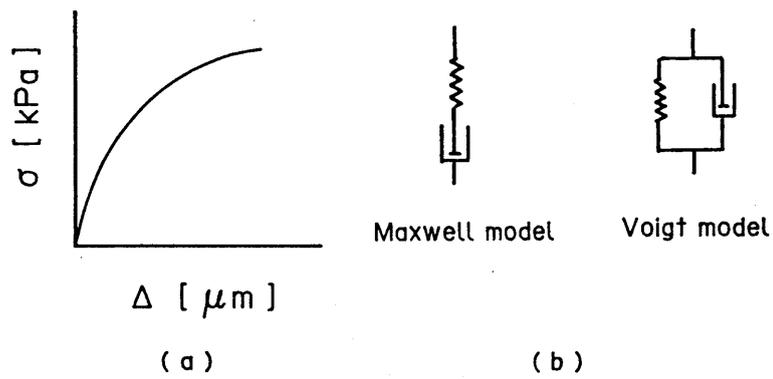


Fig.5-11 単調引っ張り負荷による応力-変位関係と解析に用いた rheology model

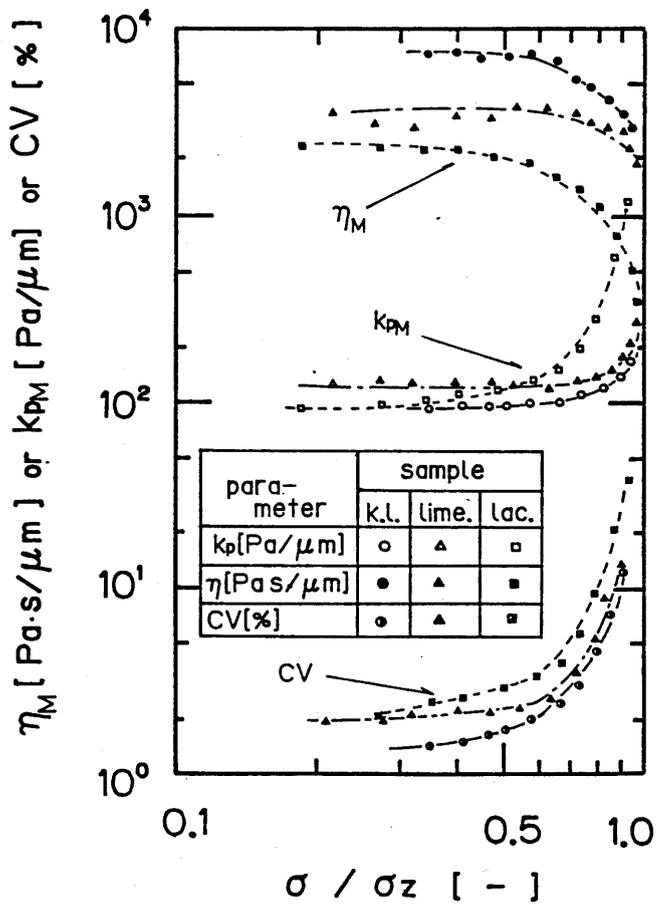


Fig.5-12 計算を行なう応力範囲を徐々に拡大した場合のMaxwell model による fitting 精度の変化

前の静的引っ張りの段階でなんらかの降伏現象が存在していることを示している。この結果から、クリープ圧密、クリープ回復後の引っ張り試験及び比較的高速引っ張り負荷試験での応力-変位関係は、Maxwell model でのfitting 誤差が急増するまでの応力範囲についてFig.(5-12)の解析より求めたMaxwell model の係数 k_{PM} , η_M で、それ以上の応力範囲については破断時の変位量 Δb で整理を行なった。

まず、クリープ圧密、クリープ回復後の引っ張り試験での応力-変位関係の整理結果を示す。Figs.5-13-15に破断強度と k_{PM} , η_M , および破断時の変位量 Δb の関係を示した。○, -○- のKey は、それぞれ 5,30 秒クリープ圧密後、クリープ回復を行なったデータの結果である。各試料とも強度の増加に伴いRheology parameterは増加、破断変位量は、低下傾向を示し、変形しにくくなっていることを示している。また、クリープ圧密と回復の結果を比較すると、圧密時間 5,30 秒とも回復を行なったデータの方が変形しにくいことを示しており、強度ではあまり差が認められなくとも、応力-変位関係では明確な違いが確認された。以上の結果より5-1 節で仮定した強度と変形挙動の関係は、準静的な範囲では、強度増加が起こる領域、条件でも定性的には適用できることが確認された。

また、同様な強度増加が現われた比較的高速引っ張り負荷での応力-変位関係について同様な解析を行なった。Fig.5-16 に破断強度と、Rheology parameter k_{PM} , η_M および破断変位量 Δb の関係を示した。図中には比較のため、クリープ圧密、回復での結果を併せて示してある。Rheology parameter k_{PM} , η_M は、クリープ圧密の場合と同様に強度の増加に伴い増加する傾向を示している。しかし、破断時の変位量 Δb は、強度の増加に伴い増加する傾向を示しており高速負荷での強度増加が、クリープ圧密などによる増加減少と異なるメカニズムで発生していることがここで認められる。

したがって、準静的なクリープ引っ張り、圧密などによる強度の時間依存型変化と変形挙動との関連が、強度増加領域、減少領域ともにある程度、統一的に記述できるとともに、強度変化機構が異なると予測される場合にはその評価方法としての有効性が確認された。

結 言

クリープ、および繰り返し引っ張り試験、クリープ圧密、クリープ回復後の引っ張り試験、また比較的高速引っ張り試験での破断強度と変形挙動の時間依存変化について検討を加えたところ以下の結言を得た。

1)、クリープ、疲労試験において引っ張り応力による強度低下作用が確認された臨界応力 σ_{cri} 以上の応力範囲では、変形挙動についても変化が現われ、この変化をRheology parameterの低下などにより定量的に評価することができた。この変化は、疲労、クリープ試験での塑性変形過程だけでなく、各種条件下での引っ張り試験での応力-変位関係でも認められた。弾塑性論では、応力-変位関係の線形性からの逸脱により降伏条件を定義しているが、臨界応力 σ_{cri} は、この定義では決定できない降伏条件であることを確認した。

2)、1)で得られた結果から、強度変化に伴い変形挙動を表わす変数が変化すると仮定したRheology modelによりクリープ変形挙動を解析したところ、強度と変形抵抗の間に

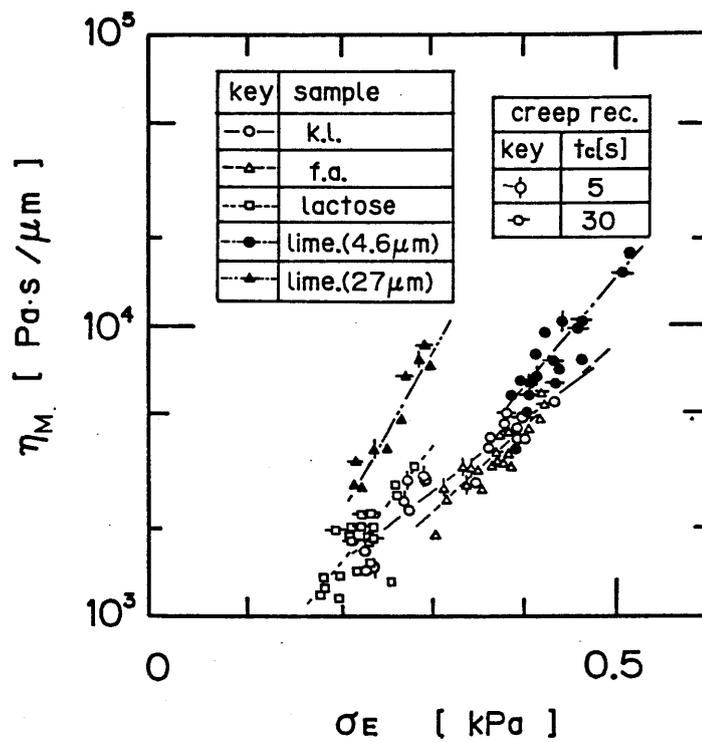


Fig.5-13 圧密履歴を受けた粉体層の強度と変形挙動の関係
(Maxwell model による解析)

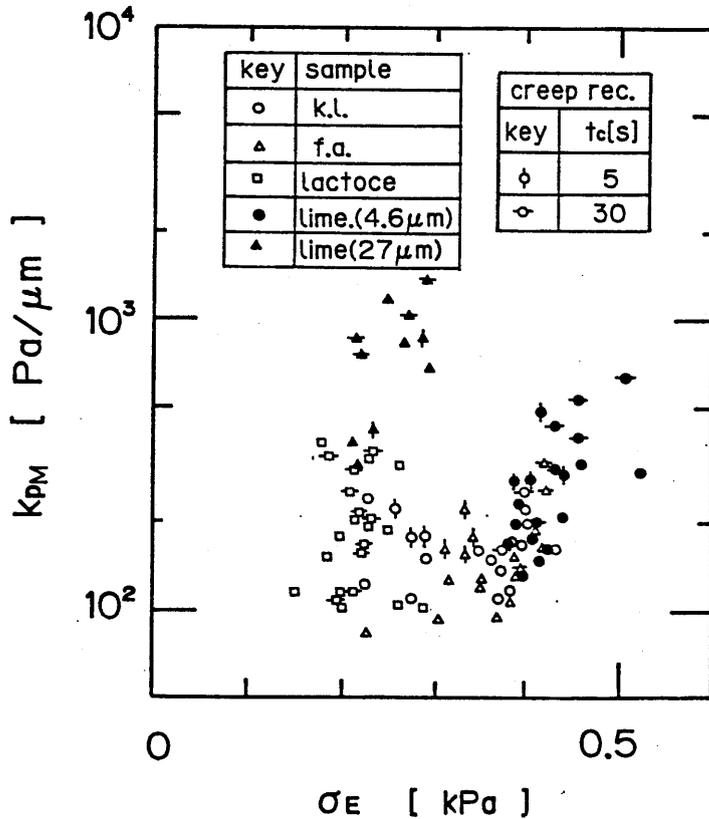


Fig.5-14 圧密履歴を受けた粉体層の強度と変形挙動の関係
(Maxwell model による解析)

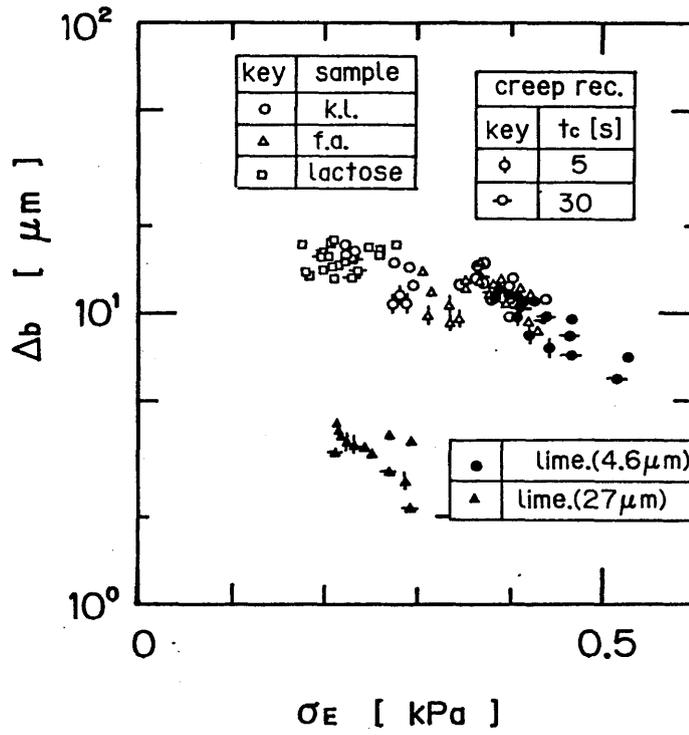


Fig.5-15 圧密履歴を受けた粉体層の強度と破断変位量の関係

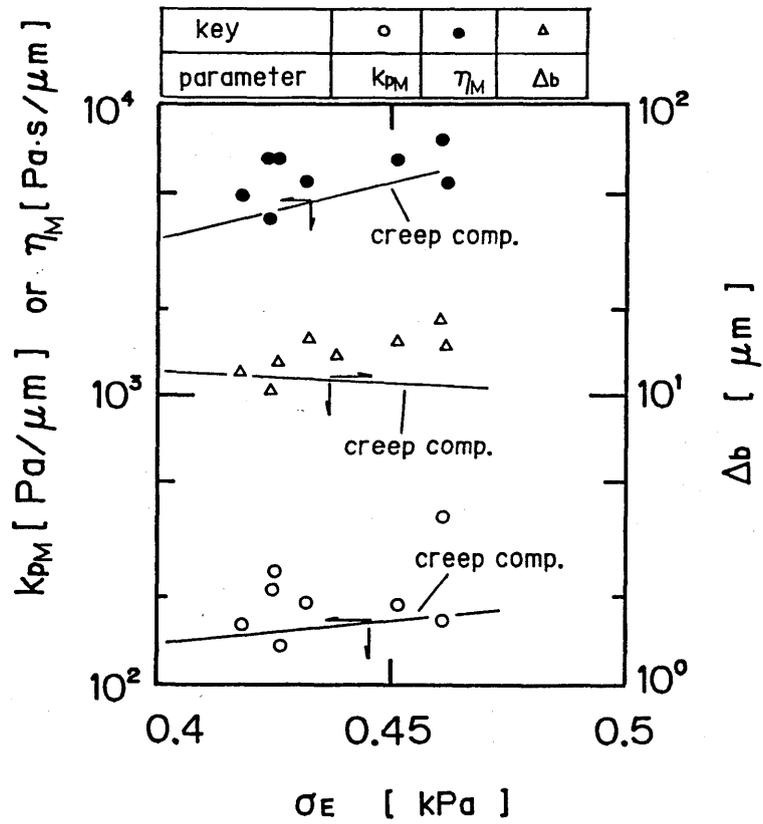


Fig.5-16 比較的高速引っ張り負荷による破断試験での応力-変位関係の解析

比例的な関係があることを確認した。そして複雑な変形過程を示す耐久限以上と以下のクリープ変形挙動が、ひとつのモデルで統一的に記述できることを示した。この関係は、強度増加が確認された条件でも認められた。また、静的条件と同様な強度増加を示した、比較的高い応力負荷速度での引っ張り試験での応力-変位関係は、準静的試験とは逆に、強度の増加が認められる高速負荷の場合ほど、破断変位量が増加する傾向が確認され、強度増加機構が準静的条件の場合とは、異なっていることが求められた。

< 使用記号 >

a	= 破断を起こさない場合の平衡クリープ変位量	[μm]
b	= 平衡変位量の63.2% に達するまでの時間	[s]
C_{II} , C_{III}	= クリープ変形挙動を近似した Eqs.(5-5,6) 中の係数	[$\mu\text{m/s}$] , [$\mu\text{m/s}$]
k_e	= 可逆変形挙動を記述する parameter	[$\text{kPa}/\mu\text{m}$]
k_p	= 不可逆変形挙動に関する rheology parameter	[$\text{kPa}/\mu\text{m}$]
k_p	= Maxwell model 中の rheology parameter	[$\text{kPa}/\mu\text{m}$]
t	= クリープ引っ張り時間	[s]
t_b	= クリープ破断寿命	[s]
Δb	= 単調引っ張り負荷試験での破断変位量	[μm]
Δe	= 可逆変位量	[μm]
Δp	= 不可逆変位量	[μm]
η	= 不可逆変形挙動に関する rheology parameter	[$\text{kPa}\cdot\text{s}/\mu\text{m}$]
η_M	= Maxwell model 中の rheology parameter	[$\text{kPa}\cdot\text{s}/\mu\text{m}$]
σ_{cri}	= 強度低下作用が現われる臨界クリープ引っ張り応力	[kPa]
σ_E	= 履歴を受けた粉体層強度	[kPa]
σ_S	= 設定クリープ引っ張り応力	[kPa]
σ_L	= クリープ耐久限	[kPa]
σ_Z	= 単調負荷による静的引っ張り応力	[kPa]

< 引用文献 >

- 1) 神谷, 椿, 神保: 化学工学論文集, 11, 356 (1985)
- 2) 神谷, 古川, 岸, 椿, 神保: to be submitted
- 3) Perzyna P.: Proc. of Vibration Problems, 3, 281 (1963)
- 4) Perzyna P.: Quart. Appl. Math., 20, 321 (1963)
- 5) Perzyna P.: Advan. in Appl. Mech., 9, 243 (1966)
- 6) Adachi K., F.Okano: Soils and Foundations, 14, 55 (1974)
- 7) Akai K., F.Oka: Proc. of JSCE, 253, 109 (1976)
- 8) Zienkiewicz O.C., C.Humpheson and R.W.Rewis: Geotechnique, 25, 671

(1975)

- 9) Sekiguchi H. , H.Ohta : Preprints of Speciality Session 9 , 9th ICSMFE , 229 (1977)
- 10) Sekiguchi H. : Soils and Foundations ,24, 129 (1984)

終 章

粉体層の時間依存型現象について本研究では、耐久限値を決定する因子を考察する目的などから(1)粉体層圧密、成形操作における現象(2)成形した粉体層に破壊応力(例えば引っ張り、せん断応力)を作用させた場合の現象に大きく分けて考察してきた。しかしこの両者は密接な関係を持つことが本研究結果からも予測される。この点を体系的に考察した研究は時間を考慮しない条件を含めても少なく[1,2]、多くの研究は全く両者を分離して検討している。そこで本研究で得られた結論の中で特に注目したい点をまとめながら、この現象の体系的考察という角度から今後の課題を展望してみる。

1, 本研究で得られた結論から

本研究で得られた結論の中で特に注目されるのは次の点である。

- (a) 単調負荷による破壊強度 σ_z 以下の応力範囲に、比較的多くの現象に関連する降伏応力値 σ_{cri} が存在する。
- (b) 疲労、クリーブ破断寿命分布形状が、 σ_z の分布とは単純には対応しない。
- (c) 応力負荷速度依存性の存在、特に高速負荷領域での挙動の特異性
- (d) 時間依存型圧密特性の存在とこうした圧密履歴を受けた粉体層強度変化現象
- (e) 強度(破壊条件)と構成関係(応力-変位関係)との間の相関の存在とその定量的記述

この5点は、これまでの単調負荷による破壊試験や圧密試験では求められない、粉体の力学的特性をCharacterizeするものである。[3] この(a)-(e)を中心に本研究で得られた結果を概観してみる。

まず、単調負荷による破断強度以下の応力範囲に、一種の降伏応力値が存在することが確認された。この降伏応力 σ_{cri} を境界にしてクリーブ、疲労試験では、強度低下作用が現われ、可逆、不可逆変形挙動を表わす変数も顕著な低下を示し、単調負荷における応力-変位関係も急激な変化が現われることから、応力の負荷形式にかかわらず存在する降伏値として期待される。応力の負荷形態の影響は、おもに σ_{cri} を超える応力範囲で問題になった。例えば、疲労、クリーブ耐久限 σ_L は、Fig.1 に 10000秒応力負荷を受けた場合の負荷応力と粉体層強度の関係を模式的に示したが、3章で述べたように、i)圧密履歴に関連する強度増加現象、および ii)応力負荷速度、などの影響により変動する。

この σ_{cri} 以上の負荷応力範囲で、疲労、クリーブ破断現象が起こる場合の破断寿命分布は静的強度 σ_z の分布とは異なる傾向を示し、これらの破断現象が、単調負荷による破壊とことなるメカニズムで起きていることをここで示した。

、金型に粉体層を充填し、圧縮応力を加えた場合、加える応力の形態により粉体層は様々な時間依存性を現わし、この時間依存性は、圧縮変位や圧縮応力だけでなく、圧縮、成形後の強度や粘塑弾性挙動にも影響をもつことが確認された。この圧密履歴を受けた粉体層の強度と変形挙動の関係は、現象の体系的考察という点からも今後注目する必要

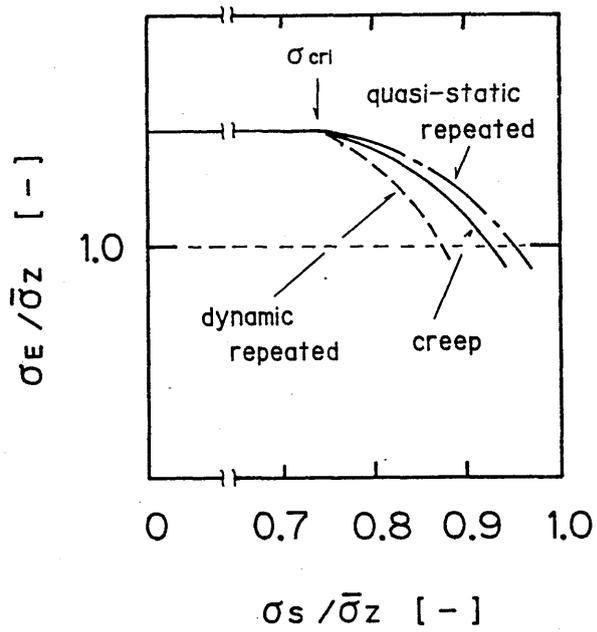


Fig.1 引っぱり応力の形態を変えた場合の粉体層強度の変化

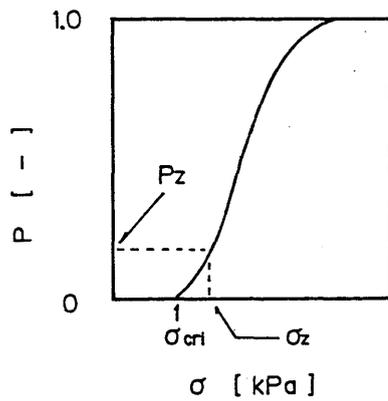


Fig.2 層内強度分布を仮定した場合の微視的破断開始と巨視的破断条件

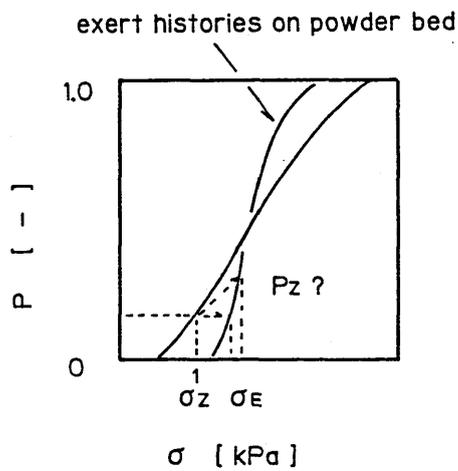


Fig.3 圧密履歴を受けた場合の強度分布の変化

がある。

以上の実験事実から連続体力学的手法を応用して、5章で強度（破壊条件）と構成関係の関連について定量的評価を試みた。その結果、準静的な応力負荷条件では、 σ_{cri} を超える引張り応力を受け強度低下が現われる場合も、圧密履歴をうけ強度増加が発生する場合でも、強度と変形挙動を表わす変数の間に比例的な相関が存在することを確認した。時間依存型現象を体系的に考察するという点からみると、連続体力学を用いた強度、応力-変位関係のモデル化は、(d)の時間依存型圧密特性を含めて記述する必要がある、本研究結果の中で得られたクリープ圧密過程と強度増加過程の相関の存在は、その記述がある程度可能であることを示している。しかし、次節で述べるように、圧密による強度増加過程は種々の現象が複合的に関与していると考えられることから、その機構解明に取り組む必要がある。また、ここでは圧密履歴による影響を強度、変形挙動に着目したが、降伏応力 σ_{cri} も圧密履歴により変化することが予測される。弾塑性論における破壊、降伏、塑性ポテンシャル曲面などの基本曲面の概念が、強度、変形挙動、 σ_{cri} に関連しているが、時間依存型現象がこれらの基本曲面の考え方でまとめられるのか、一次元圧密における時間依存型特性と関連づけられるのか、などの点の解明が、連続体モデルとしての取り扱いが必要である。

そこで、まだ現象論的整理も十分でないけれども、(a)-(e)までの結果に基づいて少し具体的に今後の課題を検討する。

2, 今後の課題

粉体層の時間依存性、特に時間依存型一次元圧密挙動にともなう強度増加現象について解明が第一の課題である。この現象の発生メカニズムとして次の2点の検討が重要と思われる。

(α) 粉体層の微視的層構造の不均一性、不安定性、異方性などに起因する層構造変化

(β) 粒子自身の、特に接触点の力学的特性の時間依存性とその分布

第1の層構造については、粉体層の力学において、例えば力学的特性のばらつき的主要因素のひとつと考えられるなど、極めて重要な問題である。しかし層構造を対象とした研究は、主に等方ランダムを仮定した理想的な系を対象としたものが多い。仮に粉体層がランダム充填の仮定を満たし、しかも粒子間の力がつりあいとれていれば、時間依存性は(β)の固体としての特性に支配される。したがって、この(α), (β)の両者を分離した考察が必要である。

粒子自身の時間依存性としては、4章で指摘した接触点のクリープ変形や接触点の物理化学的作用による付着力など粒子間相互作用の時間依存型変化などが考えられる。前者については竹山ら[3]の遠心力を用いた一個粒子付着力測定的手法を応用してクリープ加圧した粒子の付着力変化から考察するアプローチなどが考えられる。後者については、真空または特殊雰囲気での一個粒子および粉体層の時間依存型挙動の変化の測定が必要である。

こうしたアプローチと並行して、粉体層の時間依存性をさらに厳密に検討することによって粉体層の層構造をモデル論的に考察できることが期待される。層構造に関する実

験的アプローチとしては、層構造をいきなり一個粒子に着目して考察するには、数 μm 程度の微粉体層の場合、凝集体構造の評価の解明が必要である。こうした微視的構造を直接検討する前に、4章で触れたような連続体的扱いではあるが、粉体層の不安定性や異方性の考察をまず行なう必要がある。特に一次元圧密における時間依存型現象、クリープ圧密、クリープ回復、応力緩和過程における層内の応力および空隙率の分布の時間の経過に伴う変化を求め、この結果から層内分布変化を加味した連続体モデルによる一次元圧密特性と圧密、成形した粉体層の強度、粘塑弾性挙動における時間依存性を体系的にまとめることを考えている。その上で凝集体構造などさらに微視的構造の解明にアプローチしたい。

第二の課題として降伏応力 σ_{cri} の存在機構の解明が必要である。この σ_{cri} の存在機構を、Fig.2のように、層内に層構造の分布または、接触点の付着力分布などに起因する微視的強度分布が存在したとして考察してみる。 σ_{cri} はこの強度分布の最小値にあたり、層の性質に変化を起こす微視的破壊開始応力であり、巨視的破壊は、粉体層の組織感性により微視的破壊がある程度起こると発生すると考えられる。このときの破壊確率 P_z が巨視的破壊条件であり、一種の破壊靱性に相当すると考えられる。こうした考え方を導入すると、強度分布が広く巨視的破壊条件 P_z が大きい場合ほど静的強度 σ_z に対する σ_{cri} の割合は小さくなり、疲労、クリープ破断が起き易くなる。例えば、圧密履歴を長時間受けた粉体層では、層構造は安定し均一化が進み、Fig.3に示したように強度分布は鋭くなることが予測され、強度増加現象も記述できる。ただこの場合、巨視的破壊条件(P_z)も履歴により変化し、変化の仕方により σ_z に対する σ_{cri} の比および耐久限応力比も変化する可能性がある。

このモデルは、微視的強度の定義、微視的破壊が起きた後の強度分布の変化などについて検討が必要である。実験的には、圧密履歴を受けた粉体層の σ_{cri} の変化の測定などが重要である。そしてここで仮定した強度分布が、圧密に関する時間依存型現象と関連する応力、空隙率分布変化とどう対応するのか考察を深めたい。

以上のことから粉体層の時間依存性は、粉体層力学の分野で今後重要な課題として位置付けられる層構造や粒子の相互作用に関して貴重な問題提起を含んでおり、粉体層力学を体系化していく上で重要な柱のひとつであると考えられる。

< 使用記号 >

P_z	=	微視的破壊の発生割合	[-]
P	=	巨視的破壊条件	[-]
σ	=	負荷応力	[kPa]
σ_{cri}	=	降伏応力	[kPa]
σ_z	=	巨視的破断応力	[kPa]

< 引用文献 >

- 1) Tsubaki J. , G.Jimbo : Powder Technology ,37 , 219 (1984)

- 2) Sekiguchi H. : Soils and Foundation , 24 , 129 (1984)
- 3) Kamiya H. , J.Tsubaki and G.Jimbo : Preprints of the 1st World Congress Particle Tecnology (1986,4 Nürnberg) , to be published

謝 辞

本研究は、筆者が名古屋大学工学部化学工学科第2講座に大学院前期課程，後期課程を通じて5年間在籍した間に行なった研究をまとめたものです。大学院進学後、終始暖かいご指導、ご教授を賜りました本学工学部教授神保元二先生に感謝の意を表します。

テーマ設定から、研究の進め方、その他様々な点について一貫して椿淳一郎助手にご助言、ご指導いただきました。また内藤牧男氏（細川粉体工学研究所，現在、名古屋大学大学院在学中）には、研究開始から現在に至るまで様々なご指摘、ご助言をいただきました。記して、心から感謝の意を表します。

卒業論文では、研究の進め方など基本的な点につきまして竹内寛助教授、高橋勝六講師にご指導いただきました。記して感謝の意を表します。

輪講等におきまして、適切なるご助言、ご協力いただいた山崎昌男助教授、山崎量平助手、また実験上などでアドバイスいただいた桜井幸夫技官，羽多野重信技官、タイプ等で協力いただいた飯田知子さんに謹んで感謝の意を表します。

本研究に際しては岸伸展君，古川真一君，森下啓之君はじめ本学工学部化学工学科第2講座院生，学生，ならびに卒業生の方々にご協力いただきました。ここに深く謝意を表します。

論文目録

論文題目	発表方法	共著者
粉体層の動的繰り返し引張り負荷による疲労破断現象の統計的解析	化学工学論文集 Vol.11 , 189-192(1985)	椿淳一郎 神保元二
粉体層の動的繰り返し引張り負荷による疲労破断現象における変位量増加過程	化学工学論文集 Vol.11 , 210-216(1985)	椿淳一郎 神保元二
粉体層の繰り返し引張り負荷による応力-変位関係の変化	化学工学論文集 Vol.11 , 356-358(1985)	椿淳一郎 神保元二
履歴による粉体層の強度変化とクリープ破断現象	粉体工学会誌 Vol.22 , 618-625(1985)	椿淳一郎 古川真一 神保元二
Characterization of Mechanical Powder Properties by Fatigue and Creep Phenomena (疲労およびクリープ現象による粉体層力学的特性の評価)	Preprints of the 1st World Congress Particle Technology (1986.4.Nürnberg) to be published	J.Tsubaki G.Jimbo

学会口頭発表目録

発表題目	発表学会（場所，年月）	共著者
微粉体層の繰り返し負荷による疲労破壊	化学工学協会 信州大会 (上田，1983年 7月)	椿淳一郎 神保元二
微粉体層の繰り返し負荷による引張り疲労破壊――変位量による考察――	化学工学協会 第17回秋期大会 (仙台，1983年10月)	椿淳一郎 神保元二
微粉体層の繰り返し負荷による引張り疲労破壊――レオロジーモデルによる考察――	化学工学協会 第17回秋期大会 (仙台，1983年10月)	椿淳一郎 神保元二
粉体層の履歴による引張り強度増加現象	第22回粉体に関する 討論会 (秋田，1984年10月)	椿淳一郎 神保元二
粉体層の履歴による引張り強度変化とレオロジー特性	化学工学協会 第50年会 (横浜，1985年 3月)	古川真一 岸伸展 椿淳一郎 神保元二