

まえがき……弾性波探査や試験体に振動を与えてえられる岩石の弾性常数が、静的な状態で圧縮試験をしてえられる弾性常数よりも相当大きくなることは周知の事実である。又同じ試験体の圧縮試験でも荷重速度の速い場合の方が緩つくりの場合に比べて大きな弾性常数を示すことが多い。圧縮強度についても急速試験の方が緩速試験よりも大きい強度を示すのが普通である。これら変形係数および強度におよぼす荷重速度又は歪速度の影響のことを総称して速度効果又は時間効果と呼ぶことにする。このような速度効果の原因は側圧効果と内部の原因の二つに大別されよう。

側圧効果……試験体に側圧を加えて三軸圧縮状態で静的圧縮試験を行うと側圧の大きい程一般に変形係数は増大する。これは図-1に示したように側圧が軸方向の変形をさまたげる効果を發揮するからである。弾性波探査では土の上載力により地下の土には側圧が加わつたと同じ状態で波の伝播速度を測定することになるので、これから求める変形係数が静的試験の場合より大きくなるわけである。急速載荷試験では側圧が加わっていないにもかかわらず次のような原因にもとづく見かけの側圧が加わるので変形係数は増大する。

(a) 横方向慣性力の効果……急速荷重によつて軸方向の変形を与えると図1-bのように横方向の変形をさまたげようとする慣性抵抗力が作用する。従つて、見かけの側圧が表れ三軸状態で試験をしたと同じ効果により変形係数は大きくなる。しかし、通常テストピースの寸法は小さいので非常に高速で試験をした場合に限りこのような効果が表れる。

(b) ダイラタンシー効果……これは岩石が飽水していても圧縮時に体積が増大するような特性をもっている場合に起こる。つまり、ダイラタンシー効果と呼ばれるもので圧縮時に体積が増えなくても急速荷重のもとでは周囲から水を吸入する余裕がなく間隙水にサクシオンが生じる。従つて側圧を加えた時と同じ荷重状態になつて変形係数が増えるのである。

2. 内部的原因……これは試験時の試験体の荷重状態によつて生ずるものではなく、材料自体の固有な性質に起因するものである。

(a) 非線型によるもの……急速荷重のもとでは種々の原因により、緩速試験の時に比して歪が小さい。歪が大きい時には降伏点をこえるため変形係数が小さいが、逆に歪が小さいと非線型領域に達せず従つて変形係数は大きくなるのである。波動の伝播速度等から求めた変形係数が静荷重試験の時に比べて大きくなる原因の一つはこのようなものであろう。

(b) 非排水性の効果⁽¹⁾……ダイラタンシーとは逆に飽和岩石が圧縮時に体積を縮小する性質を持つている場合骨格が縮小しただけ水が押し出されなくてはならない。所が急速載荷状態では排水する時間的余裕がないため、間隙水圧が増大し圧縮性の小さい水が大部分の力を受けもつので変

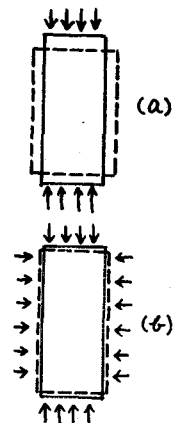


図1 テストピースの変形状態

形係数は増大する。載荷時に体積変化を生ぜず、剪断変形のみを起こす岩石ではこの効果は表われない。

- (c) 断熱性の効果⁽¹⁾……これは上記の非排水効果と似ており、水量を熱に、水圧を温度に置きかえて考えればよい。ただし、この場合岩石が水を含んでいなくてもよい。岩石が圧縮されて体積が縮小する場合には水圧と同じように考えて温度も多少上る。静的載荷では熱を外部に放出して温度が下る余裕があるため等温状態での変形係数を示すが急速載荷では時間がないため断熱状態での変形係数を測ることになり、従つてその値は増大する。ただし、この効果は熱伝導係数が小さく、熱容量の大きい材料にしか顕著に表われてこないと考えてよい。そして体積変化によつて温度上昇がはげしく起る材料でなくては、この考えは適用できない。

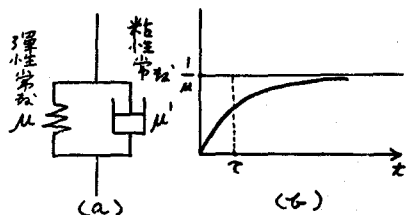


図2. Voigtモデルとクリープ曲線

- (d) 粘性の効果……岩石の骨格を構成する物質は弾性と同時に粘性も持っている。空隙に水が存在する場合には水の粘性および水と骨格との接触粘性がこれに加わることになる。これらを一括した平均的なものしか現在の所我々は測りえないので、これらの平均的な粘性を問題にするより仕方がない。粘性抵抗力は変形速度に比例するので変形速度が増大すると抵抗力が増し、変形が進行しにくくなつてその結果変形係数が大きくなるのである。

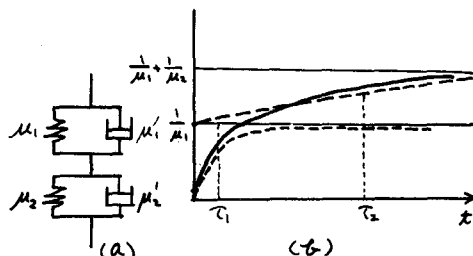


図3. 2要素から成る Voigtモデルとクリープ曲線

3. 粘弾性的解析

さて、以上速度効果について定性的な考察を行つてきたが、最後の粘性の効果について、ここでは更に詳細な定量的検討を行つてみることにする。⁽²⁾粘性以外の原因による速度効果の定量的な評価が困難な場合この粘性効果の中に他のものも含まれてしまつていてと考えてよい。さて、粘性の効果

を考える場合には、材料が同時に持っている弾性的性質との兼ね合いで考えていかないとその意義は薄い。今、図2-aのようなVoigtモデルと呼ばれる最も簡単なモデルで材料の性質が表わされると仮定した場合、一定応力を加えてその変形を測定すると図2-bのようになる。 τ は緩和時間と呼ばれて

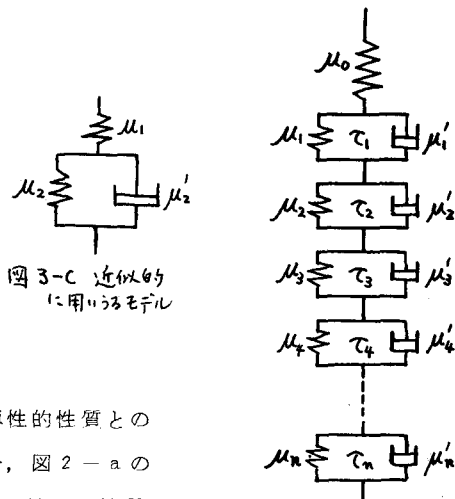


図4. 一般化された Voigtモデル

$\tau = \mu' / \mu$ で与えられる。一定応力を加えている時間を載荷時間 t であるとみなすと、 τ に比べて t が小さい時には図 2 - b に示すように粘性が支配し、 t が τ より大きい時には弾性によるだけでも材料の性質を表現しうる。結局、粘性と弾性の両方を考えないと材料の性質が表現し切れないのは t が τ と同じ位の値をもつ時のみである。以上のことより、同じ材料であつても載荷時間によつて粘性的材料になつたり、弾性的材料になつたりすることがわかる。つまり載荷時間を抜きにして、この材料は粘性だとか弾性だとか云々しても全く意味のない話であることが理解されよう。次に図 3 - a に示すような 2 個の Voigt 要素が直列に並んだモデルに一定荷重を加えた場合を考えよう。変形の時間的变化は図 3 - b に示したように緩和曲線を 2 つ加えたものに等しくなる。ただし、図 3 - a のモデルで、各 Voigt 要素の緩和時は $\tau_1 = \mu' / \mu_1$ 、 $\tau_2 = \mu_2 / \mu_2'$ で与えられ、 $\tau_1 < \tau_2$ であると仮定する。図 3 - b では各要素の変形曲線を点線で示しておいた。この図から明らかなように t が小さくて τ_1 の附近にある時には、図 3 - a の μ_1 、 μ_1' から成る単独な Voigt 型のみで材料の性質を近似してよからうが、 t が大きく τ_2 と同じ位の値を取る場合には、図 3 - c のようなモデルで近似しなくてはならない。以上のことより、一つの材料が一定の粘弾性の性質を持つと考えるのは全く意味のないことであつて、載荷時間によつてそれは常に変つて行くものであることがわかる。変わるとい

うよりも、その材料が潜在的に本来持っている力学的性質が載荷時間の長短によつて実際に表われたり表われなかつたりすると考える方が妥当であろう。以上のような概念を一般化して拡張すると図 4 のような一般化された Voigt モデルがえられ、載荷時間に従つて次々に異なる特性をもつた Voigt 要素が表面に表われてくるようになり、広範囲の載荷時間にまたがる材料の性質をうまく表現できるようになる。所で、今までは、一定荷重を資料に加える実験（クリープ試験）を頭において話を進めてきたがクリープ試験で信頼できるデータをうることのできるのは載荷時間が数秒以上のの場合に限られる。これより小さい載荷時間におけるクリープ曲線をうるためには急速載荷試験でえられるデータを利用するのも一法である。今、一様増加荷重の形で急速荷重を図 3 - a のモデルに加えたとしても、変形 ϵ は次のように表わされる。

$$\epsilon = \left\{ \frac{1}{\mu_1} \left\{ 1 - \frac{\tau_1}{t} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \right\} + \frac{1}{\mu_2} \left\{ 1 - \frac{\tau_2}{t} (1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \right\} \right\} a \quad \dots \dots \dots (1)$$

ただし $\sigma = \sigma_0 t$ 、 σ_0 = 荷重速度とする。

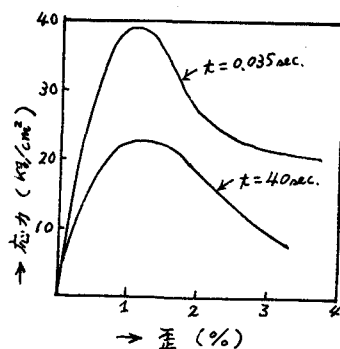


図5. 応力-歪曲線 (Cucaracha Rock) Soapy

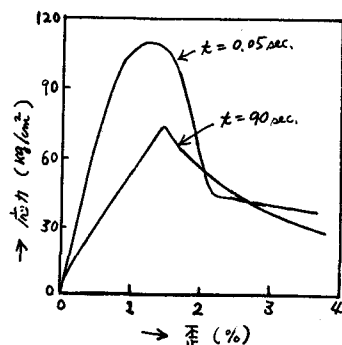


図6. 応力-歪曲線 (Cucaracha Rock) Sandy

$t \div \tau_1$ の時と $t \div \tau_2$ との 2 つの場合に (1) 式を図に表わすと、例えば図 5 のようになる。これは Cucaracha Rock に対して、Casagrande & Shannon⁽³⁾ が荷重速度を 2 種類にして、実験的に求めた応力-歪曲線である。このように実験的に求められた応力-歪曲線を図上で (1) 式に当てはめれば μ_1 , μ_2 , τ_1 , τ_2 の値が求められ、図 3-b のようなクリープ曲線が短時間の載荷時間に対しても求まることになる。荷重速度を変えてえられる応力歪曲線の数が多ければ多いほど図 4 の Voigt 要素を多く取ることができるので、クリープ曲線の範囲も拡がり又その精度もよくなるのである。図 6 は別の Cucaracha Rock に対する応力-歪曲線である。図 5 と図 6 を上記のような考えのもとに整理し、クリープ曲線に直したのが、それぞれ図 7, 図 8 である。縦軸には変形係数の逆数に相当する値 (粘弾性学では Compliance と云う) がプロット

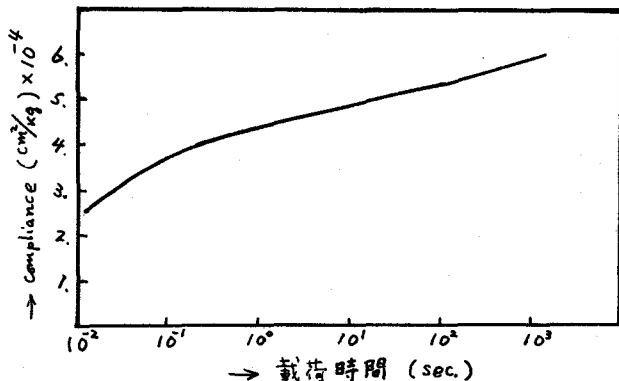


図 7 クリープ曲線 (Cucaracha Rock soapy)

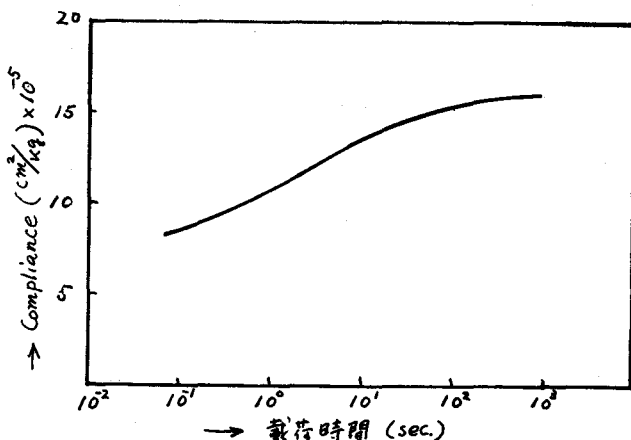


図 8 クリープ曲線 (Cucaracha Rock Sandy)

してある。
 昨年、岩の力学シンポジウムにおいて堀部、小林⁽⁴⁾の両氏は石城砂岩と大理石に対して、急速載荷試験を行った結果を報告されている。

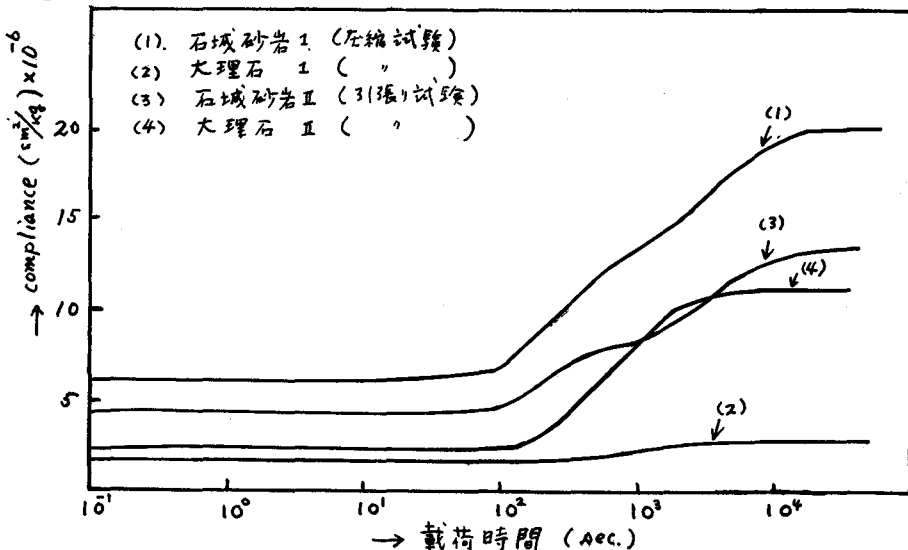


図 9. クリープ曲線 (石城砂岩, 大理石)

そのデータを上記の考えで整理してクリーブ曲線の形に直したのが図9である。これを見ると、載荷時間が100～10000sec.の範囲で粘性の影響が強く表われてくることがわかる。又0.1～100sec.の載荷時間では、これらの岩石は大体弾性であると見なしてもよいことがわかる。図7、図8からもわかるように、岩石の粘性は一般に長期間の載荷に対してのみ問題になるようである。

最後に、このようにしてえられたクリーブ曲線をいかに用いるかという問題に簡単に触れておく。例えば地震時の岩盤の挙動を計算で求めようとする場合には、地震動の周期は大体0.1～2sec位だから1/4周期を載荷時間とみなして0.025～0.5sec位の範囲のクリーブ曲線より粘性と弾性を決めるべきである。図8の場合には粘性は0と仮定して差しつかえない。又例えば2年間にわたる岩盤の変形状態を推定するには約 6.3×10^8 sec.における粘性と弾性をクリーブ曲線より求めて用いねばならない。

参 考 文 献

- (1) K. Ishihara : " Theory of Consolidation of a Porous Material with Heat Effect Based on the Irreversible Thermodynamics " 土木学会誌 第113号 (1965) PP28～42
- (2) K. Ishihara : " Effect of Rate of Loading on the Modulus of Deformation of Materials Exhibiting Viscoelastic Behaviors. " 土木学会誌 第117号(1965) PP35～50
- (3) A. Casagrande & W. L. Shannon : " Research on Stress - Deformation and strength Characteristics of soils and soft Rocks under Transient Loading " Harvard University soil Mechanics series 163 1947～1948
- (4) 堀部富男, 小林良二 : " 各種静荷重速度下における岩石の力学的挙動について " 岩の力学シンポジウム (1964)

The Modulus of Deformation of Rocks under Transient Loading.

Kenji Ishihara.

It is well known that the modulus of deformation of rocks is greater for rapid application of load than for slow loading. Possible reasons for this phenomenon were classified and illustrated according to the testing conditions or material properties itself. Among various causes for the rate effect, effect of material viscosity is the one which should be considered uttermost responsible for the occurrence of this rate effect. Physical implication was, therefore, afforded to this based on the linear viscoelastic theory. The available results of transient tests on rock obtained by some researchers were accumulated, put in the light of the proposed theory and rearranged in the form of creep curves from which usable stress-strain curves for the stress analysis problems can be deduced in accordance with the time of loading being considered.

As the results of the study, it was found out that usually rock resists elastically for the short time of loading of about 10 sec. or below, but that the viscous effect becomes more and more predominant as the time of loading increases.

Hence it was concluded that for the earthquake problems, for example, the rock permits the analysis of stress wave propagation on the basis of the elastic theory, but for the problems of long-range deformation of rock foundation, the rock should be treated as a viscoelastic body.