

締固めた不飽和土の一軸圧縮条件下の 応力緩和に関する実験的考察*

THE EXPERIMENTAL RESEARCHES ON THE STRESS RELAXATION UNDER
UNIAXIAL COMPRESSION OF COMPACTED UNSATURATED SOILS

藤 本 広**

By Hiroshi Fujimoto

要 旨 不飽和状態で締固めた、粘土鉱物学的組成の異なる 4 種の試料土と混合比の異なる 3 種の粘土・砂混合試料について、温度依存性を考慮にいれた一軸圧縮条件下における応力緩和の実験を行ない、その結果を主として緩和スペクトルの概念にもとづいて整理し考察したところ、締固めた不飽和土の緩和特性は乱さない飽和沖積層粘土のものとはかなり異なり、主に試料土の粘土鉱物学的組成や飽和度によって強く影響され、土の強度定数との間にも有意的な関係のあることなどが判明した。

1. 緒 言

最近、土のレオロジー的性質に関する研究はいちじるしく進展してきているが、クリープとともに典型的なレオロジー現象としてよく知られている応力緩和については、筆者の関知する限りでは、T.K. Tan の基礎的な実験¹⁾、村山・柴田両氏の飽和沖積層粘土についての研究²⁾、S.S. Vialov や J. Folque などの部分的な実験^{3),4)}、および R.L. Kondner らの土の締固めに関連した実験的研究⁵⁾がある程度で、クリープ現象にくらべるとその研究は一步遅れている感が強い。ことに締固めた不飽和土の緩和現象については、わずかに前記 Folque のごく簡単な報告と Kondner の土の締固め能率と載荷時間とに関連して行なった研究がみられるだけで、今後、基礎的な面からもまた応用上の観点からも解明すべき問題はなお多分に残されているようである。

土の応力緩和に関する研究が比較的少ない理由は、実験の困難性***とともに、得られる資料が土質工学的にみた場合あまりに基礎的なものであり、クリープなどに比較してその応用面が工学上の問題の付随的な部分に限られていることなどにあるからではないかと筆者は考えている。しかしながら、Taylor, D.W.⁶⁾や村山教授^{2),7)}も指摘されているように、土の緩和現象は、粘性土の場

合の土圧やくい負摩擦などの時間的変化といった実際上の問題に関連していることは確かであり、その方面の解決もさることながら、一方、土も工学材料の一種であるとの見地から締固めた不飽和土のレオロジー的性質、ことにその基礎的な緩和機構に関する研究資料を眺めてみると、前述のように今なお不明の点が多々あることもまた事実であり、この基礎的な面の解明もまた重要であることはもちろんであろう。ところで、この後者の立場から研究を進めるにあたって、筆者は、土質力学の領域においても方法論的にいわゆる物性論的な考え方にもとづく研究態度がある程度必要ではないかと考え、先に内田教授⁸⁾とともに、粘土の応力緩和現象は、単位変形機構（粘土粒子の接触点）において粒子のずれを起せしめうる程度の有効応力成分が、粒子間の拘束ポテンシャル（粒子間の結合エネルギーや吸着二重水層の粘性抵抗など）のために粒子がずれのさいに熱エネルギーとして消散していくことに起因するものである、という仮説にもとづいて、粘土の緩和機構の解明に初歩的な段階ではあったが熱力学ないし統計力学的考察の導入を試み、基本的にはいわゆる力学模型によらないでかなり統一的に粘土のレオロジー的挙動を説明しうる基礎方程式を誘導してみた。

本文は、このような観点から行なってきた一軸圧縮条件下における締固めた不飽和土の温度依存性を考慮にいれた応力緩和に関する基礎的な実験の結果を、主として上記の理論的考察⁹⁾や緩和スペクトルの概念および村山・柴田両氏の提案された力学模型^{2),3)}などにもとづいて整理し考察したものである。

2. 試料土と実験方法

試料土には、前記理論的考察の妥当性を確かめるために、粘土鉱物学的に kaolinite としての結晶度が比較的高いといわれている関白カオリンを特に選び、これに対照的なものとして montmorillonite を主成分とするベントナイト、両者の中間的な物性を示すものとして福岡県の志免土（砂質粘土ローム）ならびに宮崎県の池内粘土を採用した。これらの試料の物理的性質ならびに締

* 土木学会第 18 回、および第 19 回年次学術講演会で一部発表

** 正会員 宮崎大学助教授 工学部土木工学教室

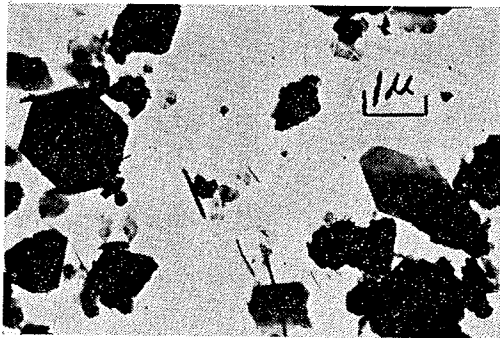
*** これは、土の場合、供試体に与える初期ひずみを理想的に実験中、一定に保ちえないということにある。

表一 試料土の物理的性質

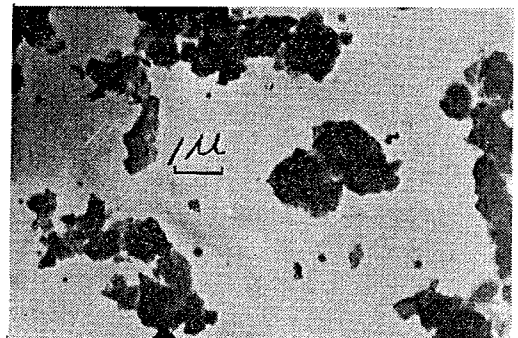
	土粒子比重	粒 度			三角座標による土質分類	コンシステンシー		活性度 (activity)	締 固 め 特 性			
		砂 (%)	シルト (%)	粘 土 (%)		L.L. (%)	P.I. (%)		O.M.C. (%)	$m_{max} \gamma_d$ (g/cm ³)	min ^e	S_r (%)
関白カオリン	2.69	0	8.0	92.0	粘 土	52.8	25.6	0.28	31.0	1.420	0.90	93.3
ベントナイト	2.40	0	7.0	93.0	粘 土	468.5	431.8	4.64	54.0	1.018	1.36	95.8
志 免 土	2.72	50.0	25.0	25.0	砂質粘土ローム	67.5	36.2	1.02	31.0	1.425	0.92	92.0
池 内 粘 土	2.72	18.3	45.1	36.6	粘 土	58.4	34.4	0.94	23.5	1.580	0.72	88.7
粘土・砂混合土(a)	2.71	30.5	37.0	32.5	粘 土	40.2	23.1	0.71	18.6	1.724	0.57	88.9
” (b)	2.70	55.0	23.0	22.0	砂質粘土ローム	27.0	13.3	0.60	13.1	1.883	0.44	81.4
” (c)	2.65	73.0	12.0	15.0	砂質ローム	20.4	N.P.	—	12.5	1.888	0.40	82.1

注 (1) 粘土・砂混合土 (a) は池内粘土 0.75, 豊浦標準砂 0.25 の割で混合したもの。
 ” (b) ” 0.50, ” 0.50 ”
 ” (c) ” 0.25, ” 0.75 ”
 (2) S_r は, O.M.C. における値

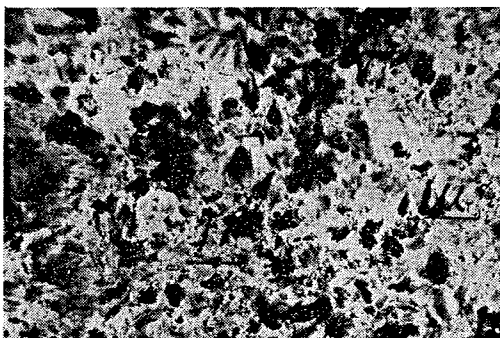
写真一 (a) 関白カオリンの電子顕微鏡写真



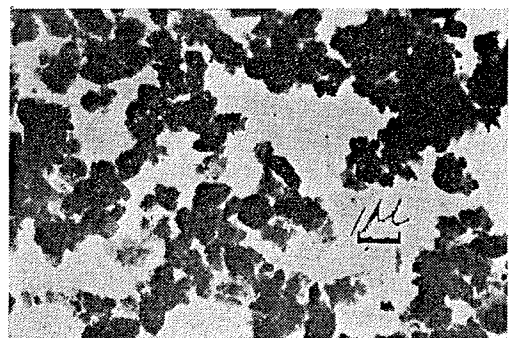
写真一 (c) 志免土の電子顕微鏡写真



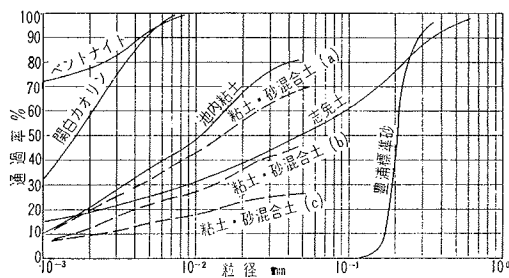
写真一 (b) ベントナイトの電子顕微鏡写真



写真一 (d) 池内粘土の電子顕微鏡写真



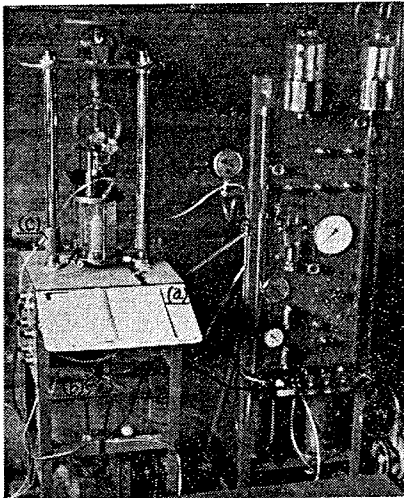
図一 試料土の粒度曲線



固め特性を表一に、粒度曲線を図一に、 2μ 以下の粘土粒子の電子顕微鏡写真を写真一(a)~(d)に示す。この4試料のうち、関白カオリンとベントナイトの粘土鉱物は確定的であるが、志免土と池内粘土のそれはD.T.A.やX線回折を行っていないため粘土鉱物学的に

は確実に断定できない。しかし、いずれにしても純然たる kaolinite や montmorillonite のみから成っていないことだけは写真からみて一応確かであろう。したがって、これらの試料土を供試体として O.M.C. 以下の含水比で締固めた場合、カオリンの骨組構造断面が、前記理論的考察⁸⁾の基礎となっている筆者らの提案した粘土の仮想網目模型 (imaginary model of clay network) に最も近いものとみて差し支えあるまい。また、粘土粒子の吸着二重水層の厚さは、T.W. Lambe¹⁰⁾も説明しているようにカオリンのそれが4試料のなかで最も厚いものと考えてよからう。一方、志免土には混在する粗粒子の影響がかなりきいてくるものと推測される。この粗粒子混合の影響を調べるために、別に池内粘土を用いてその乾燥重量に対し豊浦標準砂 ($G_s=2.63, D_{10}=0.17$

写真-2 実験装置



mm, $D_{90}=0.23$ mm) を, 25, 50 および 75% の割合で混合した (a), (b), (c) 3 種の粘土・砂混合試料を準備した。

レオメーターは 写真-2 に概要を示したとおりで, 一軸ならびに三軸圧縮条件下における応力緩和とクリープの計測およびひずみ制御方式による通常の圧縮せん断試験が可能である。応力緩和実験の場合は写真のスプリング制御レバー (a) を操作して, 三軸室底部に装着してある鋼製スプリング (このスプリングは下部のハンドル (b) であらかじめ圧縮されるようにしてある) の弾性反発力により, 供試体に一定の初期ひずみ (ϵ_0) を瞬間的に与えるようになっている。この場合, ϵ_0 の大きさは写真のひずみ制御金具 (c) で調節される。三軸室には実験時の室温以上 $50^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ の範囲内で任意の温度の恒温水をロータリポンプで循環させ, 供試体の温度をいかなる場合でも実験中一定に保つことができるようにしてある。供試体の軸方向応力 σ_1 は力計 (荷重 50 kg のときのリング変形量は 0.2 mm) またはロードセルで, 変形量は摺動抵抗式ダイヤルゲージひずみ計でもってそれぞれ自記記録できるようになっている。

供試体の寸法は高さ 75 mm, 径 33 mm で, JIS 規定の標準突固め試験で求めた各試料の最大乾燥密度 (\max, γ_d) でもって飽和度 (S_r) のみが 60~100% の範囲にわたって変化するように, 2 mm フルイ通過の気乾試料に蒸留水を加えて含水比を調整して静的に縮固めて作り, ゴムスリーブで包んで密閉容器 (容器内の湿度は常時約 95% に保たれる) 中にすべて 48 時間静置した後実験に使用した。なお, 供試体は同一物性のものを同時に 3~5 本作り, そのうち 1 本は緩和実験の場合と同じ条件のもとで単に一軸圧縮試験にのみ使用した。

緩和実験では, 表-1 の 7 試料について, (A) 飽和度 S_r と緩和特性との関係, (B) 初期ひずみ ϵ_0 と緩和

特性との関係を一軸圧縮条件下で検討した。実験中の供試体の温度は 30°C , 40°C および 50°C の 3 段階を採用した。この場合, 各供試体とも応力の緩和が停止した後ただちに荷重をゼロにもどし, 変形の回復が終わってから再度載荷して応力-ひずみ曲線のヒステリシス・ループを描かせたうえで圧縮強度 q_u を求めた。その後同一物性の緩和履歴をもたない新鮮供試体について同一温度条件の下で単に一軸圧縮試験のみを行なった。ただしこの際, 一部の供試体については, 供試体のひずみ ϵ が緩和実験の場合の初期ひずみ ϵ_0 に等しくなったとき除荷し, 上記と同様にヒステリシス・ループを描かせた後圧縮強度を求め, 緩和履歴を有する供試体のループ面積と有さない供試体のループ面積とを比較した。この操作は, 土の応力緩和の現象は単位変形機構 (粘土粒子の接点) に作用する有効応力成分が粘土粒子の “ずれ” (leapining あるいは slipping) にともなって熱エネルギーとして消散していく結果によるものであろうという, 先に筆者が提案した仮説を確かめるために行なったものである。圧縮試験のひずみ速度は毎分 1.6~0.8% であった。

3. 実験結果の考察

(1) 緩和速度 (緩和スペクトル) と飽和度ならびに初期ひずみとの関係

実験 (A) の場合, ϵ_0 がすべての供試体に対して同一であることが理想的であるが, 供試体の剛性がその S_r によってかなり異なり, 特に低飽和度の剛性の大きな供試体に高飽和度の供試体と同一の ϵ_0 を与えようとするとき, 供試体に生ずる応力が応力測定装置の測定容量以上となってスケールアウトし, 計測が不可能となるので結局 ϵ_0 をすべての供試体に対して同一とすることができなかった。しかし, この点は測定した軸方向応力 $\sigma_1(t)$ を ϵ_0 で割った値, つまり緩和弾性率 (relaxation modulus) $G_{(t)} = \sigma_1(t) / \epsilon_0$ でもって緩和曲線を求めるようにすれば, ϵ_0 の不同に由来する実験条件の差異は相殺できることになる。

図-2 および 図-3 はかくして求めた緩和曲線の一例で, 図-2 は実験 (A) のベントナイトの緩和曲線, 図-3 は実験 (B) のカオリンの緩和曲線である。これらの図から緩和の一般的な傾向として, 70~100 分までは応力あるいは緩和弾性率とも時間の対数に対して直線的に緩和減少し, 300 分前後で緩和が停止していることがわかる。このような傾向は他の試料についてもほとんど同様であった。これらの傾向を乱さない飽和沖積層粘土²⁾のそれと比較してみると, 直線部分の時間範囲には大差がないが緩和の停止時間がやや短くなっているのが特徴的である。

図-4 は, 試料土の種類による緩和特性の相違をみるために, S_r がほぼ同一のカオリン, ベントナイトならび

図-2 飽和度 (S_r) をパラメーターとしたベントナイトの緩和曲線

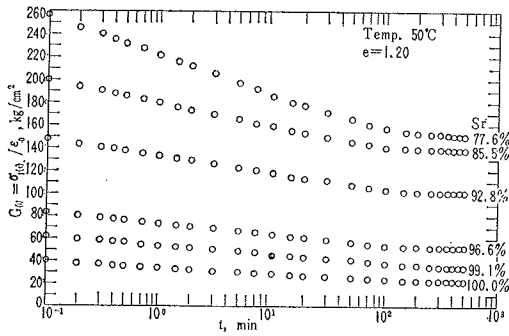


図-3 初期ひずみ (ϵ_0) をパラメーターとしたカオリンの緩和曲線

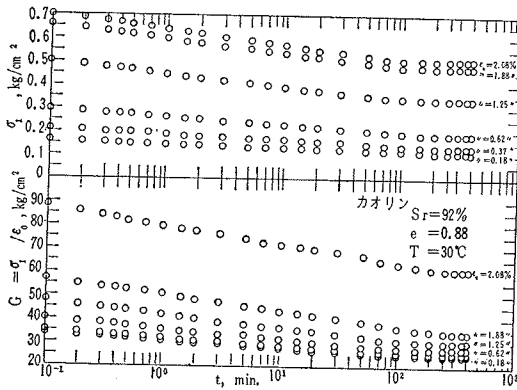
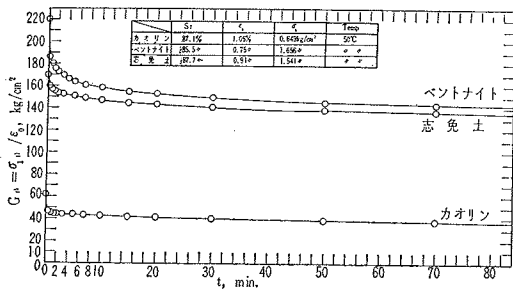
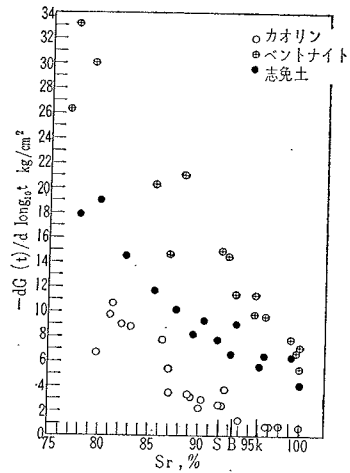


図-4 粘土の種類による緩和曲線の相違



に志免土の温度 50°C における緩和曲線を示したものである。ただしこの図の時間軸は対数目盛ではない。この図から試料土の粘土鉱物学的な物性の相違によって緩和特性がいちじるしく異なっていることが明らかにわかる。この傾向を実験 (A) の資料全部についてまとめたものが 図-5 である。すなわち、図-5 は、図-2 および 図-3 で代表される緩和曲線の直線部分の勾配 $[-dG_u(t)/d \log_{10} t]$ を S_r に対してプロットしたもので、実験時の温度による区別はしていない。図-5 で $[-dG_u(t)/d \log_{10} t]$ は高分子レオロジーの領域で常用されている“緩和時間の分布関数” (distribution function of relaxation time), つまり “緩和スペクトル” (relaxation spectrum) の一部分に相当するもので¹¹⁾, これはま

図-5 緩和スペクトル ($-\frac{dG_u(t)}{d \log_{10} t}$) と飽和度 (S_r) との関係

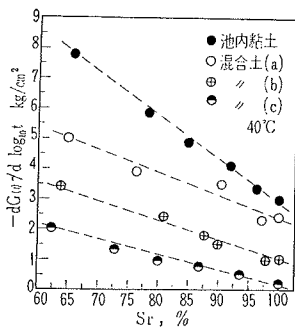


た緩和の速度をも示すものである。図で S_r 軸上に K, B, S の文字を記入してある点は、それぞれ、カオリン、ベントナイトならびに志免土の最適含水比における S_r を示したものである。この図から一般的な傾向として、緩和スペクトルと飽和度とは逆比例的な関係にあることと、同一飽和度における緩和スペクトルはベントナイト、志免土、カオリンの順に小さくなっていること、つまり緩和スペクトルが試料土の粘土鉱物学的組成に強く支配されていることが明らかになる。ところで、この粘土鉱物学的組成の相違は間接的に Skempton, A.W. の提案したいわゆる活性度 (activity; $A_c = P.I./\text{clay content}$)¹²⁾ である程度数値的に表わすことが可能と考えられからそれによると、緩和スペクトルは活性度の高い土ほど大きくなると考えてよいようである (図-7 参照)。なお、図-5 で、ベントナイトと志免土の緩和スペクトルは $S_r = 100\%$ までほとんど直線的に低下しているが、カオリンのそれはカオリンの最適含水比における飽和度 (図中 K の文字で表示してある) のほぼ近傍以上になると低下の程度が小さくなり、ほとんど一定値になるような傾向を示している。以上の傾向はつぎのように説明される。すなわち、緩和スペクトルが飽和度に対して逆比例的に低下している傾向は、飽和度が高くなれば粒子間に作用する毛管水張力が当然低下し、同時に単位変形機構における粒子の吸着二重水層の粘性もいくらか低下すると推測されるので粒子がずれやすくなり、筆者の提案した緩和機構の基本理念「粒子のずれにともなう有効応力成分の熱エネルギーとしての消散」の割合、つまり緩和速度が飽和土の高い土ほど小さくなるために現われるのであろうと考えられる。また、montmorillonite と kaolinite では粒子性状の相違から同じ飽和度における粒子の吸着水層の厚さは前者の方が後者より比較的に薄いと考えられており¹⁰⁾, しかも締固めた状態における

粘土の骨組構造を想像してみると、カオリンの方がベントナイトより容易にいわゆる card-house 構造、つまり筆者の提案した網目模型⁸⁾を形成しているものと思われる。したがって以上のことから、ベントナイトの単位変形機構における粒子の拘束ポテンシャル——粒子間結合力や吸着水層の粘性低抗など——の方がカオリンのそれより大きくなると推測されるので、その結果ベントナイトの緩和速度（緩和スペクトル）がカオリンの緩和速度より大きくなるものと考えられる。なお、カオリンの緩和スペクトルがその最適含水比における飽和度の近傍からほぼ一定値に落ち着く傾向は、上述のようにカオリンの方がベントナイトより提案した網目模型の形成度が高く、しかもこの形成度は締固め時の含水量に応じて比較的含水比の低い側で高く、最適含水比以上の含水状態になると粒子が一方向に整列（orient）され、粒子間距離も大きくなるといった傾向があるため、高含水（高飽和度）状態における粒子の拘束ポテンシャルは低含水（低飽和度）状態におけるそれよりもはるかに小さいある一定値に落ち着くのではないかと、ということに起因するものと推測される。一方、志免土の粘土粒子はその主体が illite ないし montmorillonite 系の粘土鉱物から成っているものと写真から一応推定されるが、混在する粗粒子の影響でベントナイトとカオリンの中間の傾向を示しているものと考えられる。この粗粒子混在の影響はつぎの図-6 で確かめられる。すなわち 図-6 は 3 種の粘土・砂混合試料の飽和度と緩和スペクトルとの関係を混合比をパラメータとして示したものである。この図でも緩和スペクトルは粘土のみの場合と同様に飽和度に逆比例的に低下しているが、その低下の割合は砂の混合比が大きくなるほど小さく、また同一飽和度では混合比が大きいほどやはり小さくなっていることがわかる。図-7 は、供試体の飽和度が 80% に近いものの活性度（activity）と緩和スペクトルとの関係を示したものである。

実験（B）に関しては、すでに村山・柴田両氏が飽和沖積層粘土に対する研究結果を発表されているが、締固

図-6 粘土（池内粘土）・砂混合土の緩和スペクトル $[-dG_{(t)}/d \log_{10} t]$ と飽和度 (S_r) との関係



めた不飽和土についてのこの種の報告はまだみられない。図-8 はカオリンの飽和度 S_r をパラメータとして初期ひずみ ϵ_0 を 0.10~2.50% の範囲内で与えた場合の応力の緩和速度ならびに緩和スペクトルと ϵ_0 との関係を示したものである。図で応力緩和速度が ϵ_0 の増すにつれて大き

図-7 緩和スペクトル $[-\frac{dG_{(t)}}{d \log_{10} t}]$ と活性度 (activity) との関係

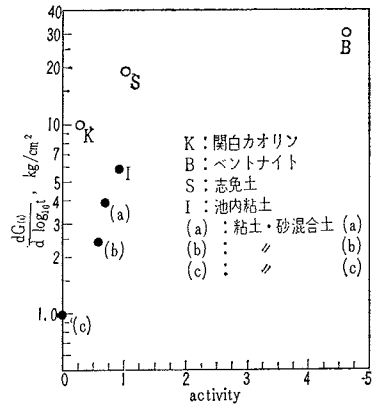
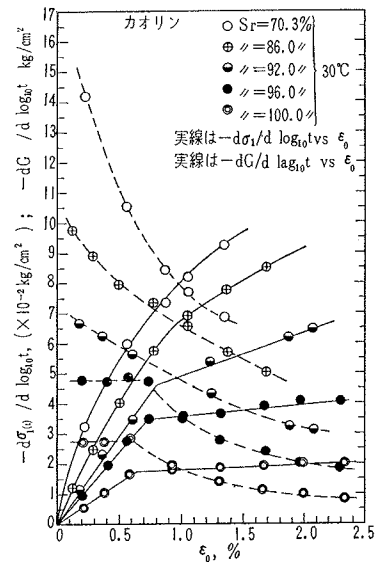


図-8 飽和度をパラメータとしたカオリンの初期ひずみ (ϵ_0) と応力緩和速度 ($-d\sigma_1/d \log_{10} t$) および緩和スペクトル ($-dG_{(t)}/d \log_{10} t$) との関係



くなっている傾向は、村山・柴田両氏の単位変形機構に関する仮定⁹⁾、

$$M = a(\sigma_1 - \sigma_0), N = b(\sigma_1 - \sigma_0) \dots \dots \dots (1)$$

と、内田教授ならびに筆者が誘導した応力緩和の理論式⁸⁾

$$\sigma_1(t) = -C_1 \ln C_2 - C_1 \ln t_1, C_1 = N/D \dots \dots \dots (2)$$

$$G(t) = \sigma_1(t)/\epsilon_0 = -(C_1/\epsilon_0) \ln C_2 - (C_1/\epsilon_0) \ln t \dots \dots \dots (3)$$

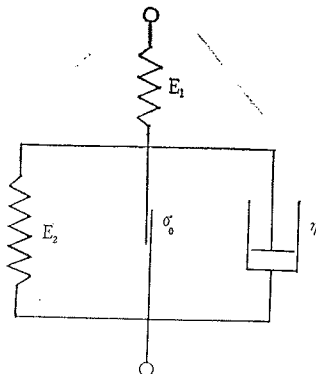
とによれば一応合理的に説明できる。上式中、 C_1, C_2 はレオロジー定数、 M は応力の作用方向に平行な単位長さのなかに直列に存在する単位変形機構の数、 N は応力の作用方向に直角な単位断面積中に並列に存在する単位変形機構の数で、 a, b は比例定数である。 σ_0 は村山・

柴田両氏によって固有内部抵抗と呼称された下限降伏値である。さて、いま同一物性の供試体では ϵ_0 が大きいときには当然 ϵ_0 に対応する初期応力 $\sigma_1(t=0)$ が大きくなり、式(1)中の活性化しうる単位変形機構の数 N が大きくなる。その結果式(2)の応力緩和曲線の勾配を表わす C_1 が大きくなり、結局緩和速度 $[-d\sigma_1(t)/d\log_{10}t]$ が大きくなることになる。これに対して緩和スペクトルが逆に ϵ_0 の増大につれて低下している傾向は、式(3)から $G(t)$ の緩和曲線の勾配を表わすタームが ϵ_0 に逆比例的であることから説明できる。

ところで、村山・柴田両氏の実験結果²⁾では、図-8の応力緩和速度と ϵ_0 との関係が、ある ϵ_0 の値で不連続となる折線となっており、その間の関係を説明するために両氏の提案された図-9のモデルの弾性定数 E_1 、 E_2 がその ϵ_0 で降伏するという事実をあげておられる。この点について筆者の実験結果は、図-8によると S_r が100%と96%のものだけが完全に折線となっており、村山・柴田両氏の考察による E_1 、 E_2 の降伏を示す ϵ_0 はそれぞれ前者で0.60%、後者で0.75%となっている。しかも両者の緩和スペクトル(図中、破線で示す)は、いずれもその折点に対応する ϵ_0 まではほとんど変化なく、 $S_r=100\%$ では約 2.80 kg/cm^2 、 $S_r=96\%$ では約 4.80 kg/cm^2 の値をそれぞれ示しており、問題の ϵ_0 をこえるとその値は急に低下している。ここで $S_r=96\%$ という値は実際的にはほとんど飽和状態に近いものであると考えられるから、結局、締固めた粘土の場合でも飽和試料では文献2)の実験結果と同様に $[-d\sigma_1(t)/d\log_{10}t]$ と ϵ_0 との関係はある ϵ_0 のところで折線となることがあらためて確認できる。一方、緩和スペクトルの値が急に低下する点の ϵ_0 は前記折点に対応する ϵ_0 と全く一致していることが図から明らかであるが、これは一つの新資料であり、文献2)における E_1 、 E_2 の降伏という事実とよく対応している資料として注目される。

ところが、 S_r が92%以下の不飽和状態になると、

図-9 村山・柴田両博士が提案された粘土の力学モデル(1958年)



図で明らかなように緩和スペクトルは ϵ_0 に対して下方に凸となるような曲線状に漸減しているのみで上記のような明確な変化点は現われていない。また、これらの試料の $[-d\sigma_1(t)/d\log_{10}t]$ と ϵ_0 との関係も図からわかるとおり単純に直線ないし折線で連ねることはとうていできない。したがって、緩和スペクトル $[-dG(t)/d\log_{10}t]$ と ϵ_0 との関係曲線における上記変化点の有無は、 $[-d\sigma_1(t)/d\log_{10}t]$ と ϵ_0 との関係が折線になるかならないかを判定する資料として有効であると考えて差し支えあるまい。このような観点からみた場合、不飽和試料(図-8では $S_r=70.3\%$ と $S_r=86.0\%$)の $[-d\sigma_1(t)/d\log_{10}t]$ と ϵ_0 との関係は直線ないし折線関係でなく、むしろ、いわゆる応力-ひずみ曲線に近似した曲線関係であるとするほうが妥当なようである。ただ、 $S_r=92.0\%$ の $[-d\sigma_1(t)/d\log_{10}t]$ と ϵ_0 との関係のみは、プロットした実験値の傾向から図では一応折線をもって連ねておいたが、前述のようにその試料の緩和スペクトルと ϵ_0 との関係に明らかな変化点が認められないので、あるいはこの関係は折線でなく曲線とすべきであったかもしれない。しかしながら、いずれにしても、ここではむしろ、この関係はその実験値が飽和状態と不飽和状態との間の過渡的な領域の傾向を示しているものとして眺めるべきであろうと筆者は考えている。

なお、図-8で不飽和試料の場合に弾性定数の降伏を意味する変化点が現われないということは、供試体に初期変形を与えた場合の不飽和試料と飽和試料との間の圧縮性の差によるものではないかと考えられる。すなわち、不飽和試料の変形にともなう圧縮による体積変化は飽和試料のそれより比較的に大きいはずであるから、その結果粒子間距離が短くなり粒子を拘束するポテンシャルが逆に大きくなって単位時間の緩和量、つまり粒子のずれにともなう単位時間における有効応力成分の熱エネルギーとしての消費量が大きくなるものと想像される。このために ϵ_0 の増大に応じた緩和速度の増大の割合が飽和試料の場合より比較的に大きくなり、図示のように明確な変化点が現われないのではないかと推測される。

(2) 応力の緩和率と飽和度ならびに初期ひずみとの関係

試料の S_r と ϵ_0 とが応力の緩和率にどのような影響を与えるかをみるために、初期応力 $[\sigma_1(t=0)]$ に対する応力の緩和量 $[\sigma_1(t=0) - \sigma_1(t \rightarrow \infty)]$ の比、つまり応力緩和率 $[\sigma_1(t=0) - \sigma_1(t \rightarrow \infty)] / \sigma_1(t=0)$ と S_r および ϵ_0 との関係を求めたものが図-10と図-11である。 $\sigma_1(t \rightarrow \infty)$ は緩和が停止した後の残存応力である。図-10は実験時の温度条件の相違を考慮にいれていないため点の散らばりがかなり大きくなっているが、だいたいの傾向として緩和率は S_r の増加にともなって大きくなっており、その増加の程度はカオリンが他の試料に比較してややいちじ

図-10 応力の緩和率 $\left[\frac{\sigma_1(t=0) - \sigma_1(t \rightarrow \infty)}{\sigma_1(t=0)} \right]$ と飽和度 (S_r) との関係

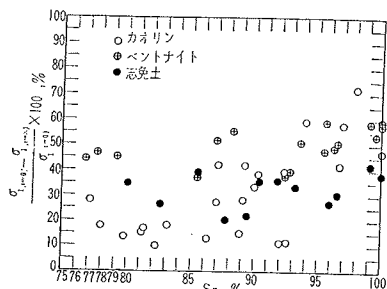
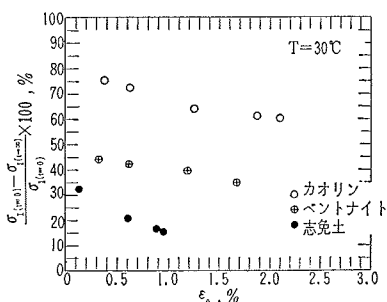


図-11 応力の緩和率 $\left[\frac{\sigma_1(t=0) - \sigma_1(t \rightarrow \infty)}{\sigma_1(t=0)} \right]$ と初期ひずみ (ϵ_0) との関係



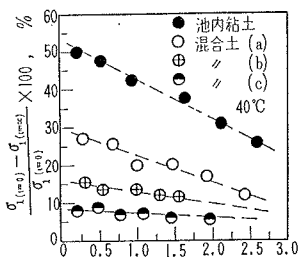
るしいようである。図-10 の傾向は、 S_r の増加に応じて粘土粒子のずれを拘束するポテンシャルが低下する結果緩和速度も低下するが、粒子がずれた後の再結合力が小さいために別の位置で再結合するまでに要する時間が低飽和度の試料に比較して長くなるので、その間における応力成分の熱エネルギーとしての消費量は結局それほど小さくならず、 $\sigma_1(t=0)$ の小さいことと相まって結果として緩和率が比較的に高くなるのではないかと考えられる。図-11 で緩和率が ϵ_0 に逆比例的に減少していることは、村山・柴田両氏が緩和の終局応力（残存応力）として誘導された次式²⁾、

$$\sigma_1(t \rightarrow \infty) = \frac{E_1 \cdot E_2}{E_1 + E_2} \epsilon_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

を考慮すれば、 $\sigma_1(t \rightarrow \infty)$ が ϵ_0 に比例するので結局緩和率 $[\sigma_1(t=0) - \sigma_1(t \rightarrow \infty)] / \sigma_1(t=0)$ は ϵ_0 の増加に応じて小さくなることは明らかである。

図-12 は池内粘土と豊浦砂の混合土の混合比をパラメーターとした応力緩和率と ϵ_0 との関係を求めたものである。実

図-12 粘土（池内粘土）・砂混合土の応力緩和率 $\left[\frac{\sigma_1(t=0) - \sigma_1(t \rightarrow \infty)}{\sigma_1(t=0)} \right]$ と初期ひずみ (ϵ_0) との関係

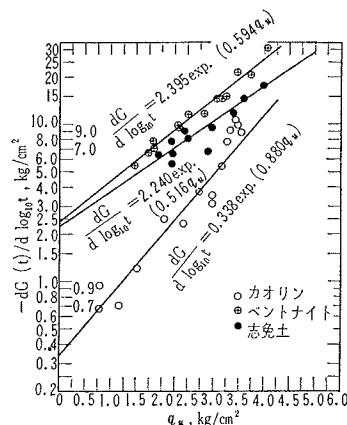


験時の温度はすべて 40°C である。これによると、粘土・砂混合土の場合も緩和率は ϵ_0 にほとんど逆比例的に減少しており、さらに、砂の混合比が大きいほど緩和率は低く、しかもその混合比が 50% をこえると砂混合の影響が顕著に現われてくるようである。

(3) 緩和特性と一軸圧縮試験結果との関係

3. (1) で説明したように、緩和スペクトルが粘土粒子の吸着水層の性状に強く影響されているということから、緩和特性と土の強度定数との間にも何らかの相関性のあることが推測される。図-13 はこの推測にもとづいて、同一物性の試料の一軸圧縮強度 q_u と緩和スペクトルとの関係をプロットしたものである。その結果図のように 3 種類の試料についてそれぞれ次式で表わされる関係が求められた。

図-13 緩和スペクトル $\left(\frac{dG_t}{d \log_{10} t} \right)$ と一軸圧縮強度 (q_u) との関係



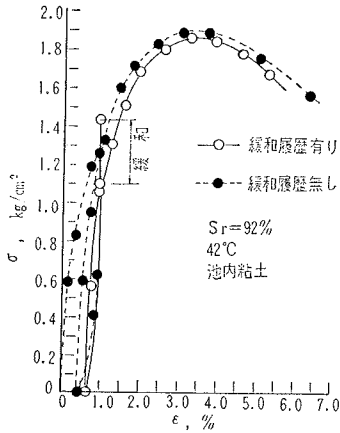
関白カオリン: $\frac{dG(t)}{d \log_{10} t} = 0.338 \exp(0.880 q_u)$ (5)

ベントナイト: $\frac{dG(t)}{d \log_{10} t} = 2.395 \exp(0.594 q_u)$ (6)

志免土: $\frac{dG(t)}{d \log_{10} t} = 2.240 \exp(0.516 q_u)$ (7)

また、図-14 は同一物性の緩和履歴を有する供試体と有さない供試体との一軸圧縮条件下における応力・ひずみ曲線のヒステリシス・ループを比較したものの一例である。図で緩和履歴を有さない供試体はそのひずみ ϵ が緩和実験の初期ひずみ ϵ_0 に等しくなったとき除荷したもので、試料は池内粘土 ($S_r=92\%$) で実験時の温度は 40°C である。これによると、緩和履歴を有する供試体のヒステリシス・ループの面積は有さない供試体のループ面積に比べてかなり小さい。このことは、応力の緩和現象が筆者の提案した「単位変形機構における粒子の

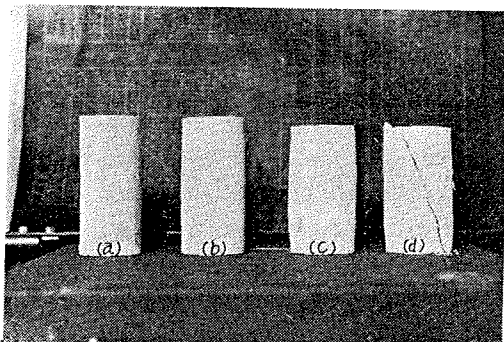
図-14 緩和履歴を有する供試体と有さない供試体の応力-ひずみ曲線(一軸)



ずれにともなう有効応力成分の熱エネルギーとしての消散に起因するものである」との仮説を実証しているものとみて差し支えあるまい。なお図によると、緩和履歴を有する供試体の除荷にともなうひずみの回復量は有さない供試体の回復量より小さくなっているが、これは、回復に必要な内部エネルギーが緩和によって失なわれたものと考えてよかろう。さらに、緩和履歴を有する供試体の応力-ひずみ曲線が、除荷後再載荷した場合も緩和履歴を有さない供試体の応力-ひずみ曲線に沿って上昇しほとんど同一形状を描いて破壊点に到達しているという事は、緩和履歴のみによっては供試体の内部構造に変化が生じないということを示しているようである。ちなみに、資料の表示は省略したが、緩和履歴を有する供試体の q_u と有さない供試体の q_u との間には統計的にみてほとんど差がなかったことを付記しておく。参考までに、実験に使用した供試体(カオリン)の一例を写真-3(a)~(d)で示す。(a)は実験前のもの、(b)は緩和実験のみを終ったもの、(c)は緩和後除荷してさらに圧縮試験を行なったもの、(d)は単に一軸圧縮試験のみを行なったものである。供試体はいずれも同一物性($S_r=83\%$)のものである。

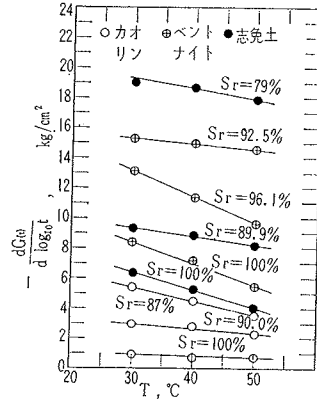
(4) 温度依存性について

写真-3 実験後の供試体の変形状況



この実験では、主として試料の含水量依存性の面から不飽和土の緩和特性を追究したので、温度依存性については図-15に示した程度の資料を得たにすぎなかった。この結果はすでに報告されている飽和沖積粘土の場合²⁾とだいたい相似の傾向を示しているようである。

図-15 緩和スペクトル $[-\frac{dG_{(t)}}{d \log_{10} t}]$ と温度(T)との関係



4. 結 論

現在、筆者は、緩和現象の応用ということ考慮に入れた三軸圧縮条件下の応力緩和に関する実験を進めているが、資料の整理ならびに発表の都合上その分は引き続き次回で報告することにして、ここではひとまず、第一報的なものとして一軸圧縮条件下の基礎的な緩和実験によって求められた資料のみについての考察をまとめてみた。その結果を要約するとつぎのとおりとなる。

(1) 不飽和土の場合でも、応力ならびに緩和弾性率は飽和土と同様に時間の対数に対して直線的に緩和していく。ただし緩和の停止時間は不飽和土の方がやや短い。

(2) 応力の緩和速度、あるいは緩和スペクトルは飽和度に逆比例的に低下し、また試料土の粘土鉱物学的組成に強く影響され、活性度(activity)の大きい土ほど大きくなる。

(3) 応力の緩和速度と初期ひずみとの関係は、飽和粘土の場合には比例関係をもった2本の直線、つまり折線で表わされるが、飽和度が低くなるにつれて応力-ひずみ曲線に近似した曲線で表わされるようになり、村山・柴田両氏が提案された力学モデルの弾性定数の降伏を意する折点は明瞭に現われがたくなる。

(4) 緩和スペクトルと初期ひずみとの関係は、飽和試料では前記折点までは緩和スペクトルは初期ひずみに関係なくほとんど一定値を示すが、折点に対応する初期ひずみを越えると急にその値が低下する。この変化点は前記折点と全く一致している。飽和度が低くなるとこのような変化点は現われず、両者の関係は双曲線状の逆比

例的なものとなる。

(5) 粘土・砂混合試料では、砂の混合比が増すと緩和速度（あるいは緩和スペクトル）は低下する。

(6) 応力の緩和率は飽和度が高いほど高いがその傾向はそれほど顕著でない。同一物性の試料では緩和率は初期ひずみに逆比例的に低下する。また、砂の混合比が高いほど緩和は低い。

(7) 緩和スペクトルと一軸圧縮強度との間には明瞭な指数曲線の関係がある。

(8) 緩和履歴を有する供試体と、同一物性の履歴を有さない供試体との一軸的な応力-ひずみ関係において、前者の初期ひずみと同一のひずみ段階ではじまった後者のヒステリシス・ループの面積は前者のものよりかなり大きくなる。またこの場合の後者のひずみ回復量も前者のそれより大きくなる。これらのことは、緩和が有効応力成分の熱エネルギーとしての消散に起因するものであるということを示している。

終りに、この研究を進めるにあたってご指導とご援助を受けている九州大学 内田一郎教授に紙上を借りて改めて謝意を表する次第である。また、実験の一部は九大内田研究室 松本錬三助手および本学卒業生の松尾孝是、後藤 靖両君に協力していただき、さらに京大防災研の村山朔郎教授ならびに柴田 徹助教授からは適切なご討議を寄せていただいた。なお、この研究の大部分は、筆者が昭和 37 年度文部省内地研究員として内田研究室に在留中行なったものである。以上付記して関係各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) T.K. Tan : Discussion, to the Soil Properties and Their Measurement, Proc. of 4th. Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 3, 1958, pp. 87-89
- 2) 村山・柴田 : 粘土の応力緩和について, 土木学会論文集, No. 76, 昭和 36 年 5 月, pp. 54-58
- 3) S.S. Vialov : Problems of the Rheology of Soils. Proc. of 5th Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1, 1961, pp. 387-390
- 4) Folque, J. : Rheological Properties of Compacted Unsaturated Soils, Proc. of 5th Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1, 1961, pp. 113-116
- 5) Kondner, R.L., Stallknecht, A.R. : Stress Relaxation in Soil Compaction, Proc. H.R.B., Vol. 40, 1961, pp. 617-629
- 6) D.W. Taylor : Fundamentals of Soil Mechanics, 1948, p. 523-524
- 7) 村山 : 粘性土中のトンネル土圧について, 土木学会第 18 回年次学術講演会講演概要, 昭和 38 年 5 月, pp. 57-58.
- 8) 内田・藤本 : 粘土の応力緩和機構についての考察, 材料学会誌, Vol. 12, No. 116, 昭和 38 年 5 月, pp. 276-280.
- 9) 村山・柴田 : 粘土のレオロジー的特性について, 土木学会論文集, 40 号, 昭和 31 年 12 月
- 10) T.W. Lambe : The Structure of Compacted Clay, Proc. of A.S.C.E., SM Vol. 84, No. 2, May 1958, pp. 1654
- 11) たとえば, 中川・神 : レオロジー (みすず書房) 1962, p. 404
- 12) Skempton, A.W. : The Colloidal "Activity" of Clays, Proc. of 3rd Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1, 1953, pp 57-61.

(1964.2.14・受付)