

エポキシレジンモルタルのクリープ特性

沢 出 稔
松 田 辰 夫

§ 1. はじめに

材料が弾性的性質と粘性的性質をあわせ持っていることは粘弾性といわれ、日常われわれが手にする高分子材料はこの性質を有する。粘弾性体の全般的な性能、特にその力学的性質は温度・応力・時間により変化する。

このような力学的性質を調べる学問分野がレオロジーであり、本研究は高分子材料、主としてエポキシレジンモルタルを中心に、レオロジー理論を導入して、その物性を把握し、現場への応用に寄与させようとするものである。

前報¹⁾においては、レジンコンクリート等を1つの新しい材料として今後の開発を考える観点から、エポキシレジンモルタルの圧縮疲労性状について検討を加えた。

本報告では、前報と同じく市販のエポキシ樹脂を用いて現場で一般に使用されている骨材配合比の範囲、すなわち重量配合比で樹脂1：骨材4～8のレジンモルタルで行なったクリープ試験から得られた静的粘弾性から、レジンモルタルの力学的挙動を、弾性要素と粘性要素を組み合わせた四要素モデルを設定して、定量的に検討を加えた結果について述べる。

次に、動力学的試験から得られた複素弾性率 E^* や減衰項 $\tan \delta$ 等の動的粘弾性を利用して、クリープ速度を予測した結果について述べる。

§ 2. クリープ試験

今回問題としている高分子材料において、クリープに影響を与える因子としては高分子材料自体の化学構造および成分、充てん材、成形および加工方法、方向性、形状と寸法、表面仕上げの程度等が考えられ、これらの因子に温度（湿度）・時間・応力その他の使用環境が作用しクリープ現象をさらにむずかしいものとしている。

応力、熱に対して変形が大きい高分子材料は多くの用

途においてその寸法安定性は重要な問題となっている。エポキシ樹脂硬化物ならびにレジンモルタルにおいても長時間その寸法または形状を大きく変えることなく適度な荷重に耐えねばならず、その実用的見地からクリープ変形、クリープ破壊の挙動を的確につかむ必要がある。

このような観点から本研究実験ではエポキシ樹脂単体の硬化物およびエポキシレジンモルタルに対して狭い範囲のタイムスケールの条件で一軸圧縮クリープ試験を行ない、その得られたクリープ曲線から四要素モデルを設定して粘弾性論から検討を加え定量的な記述を試みた。

2.1 実験方法

2.1.1 使用材料

(A) エポキシ樹脂

実験に用いた樹脂は市販のものでレジンモルタル用、注入用、新旧コンクリート打継用として広く用いられているエポキシ樹脂Eと、硬化後に30%以上の大きな変形に耐え得るような軟質エポキシ樹脂Mの2種である。

これらは共にビスフェノールA型のエポキシ樹脂であり、エポキシ当量184～200、分子量370～400の範囲に入る最も一般的なものといえる。エポキシ樹脂Eはシェル石油化学社のエピコート828を基材とし、チオコール変成アミンダクト型硬化剤と組み合わせたものである。エポキシ樹脂Mはチバ社のアラルダイトGY250を基材として変成脂肪族環状ジアミン型硬化剤と組み合わせたもので、主にキシレン樹脂を非反応性希釈剤としてブレンドして硬化後の軟質賦与剤としている。

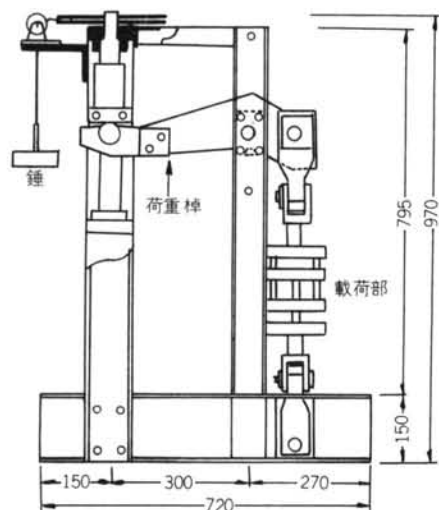
(B) 細骨材

今回の一連の実験に供するレジンモルタルの作製にあたっては、絶乾状態まで乾燥させた4号、5号、7号のそれぞれの硅砂を重量比で1：1：1に調合したものをを用いた。この配合比率の硅砂を用いたレジンモルタルは実際の現場等での使用にあたって作業性が良いことが経験的に解っている。

現在のところ、レジンモルタルの配合設計指針といっ

珪 砂	数 値	エポキシ樹脂の物性項目	エポキシ樹脂 E	エポキシ樹脂 M
粗 粒 率 (F, M)	2.99	基 材 エ ポ キ シ	エビコート 828	アラルダイト GY250
粒 大 (mm)	1.2以下	硬 化 剤	チオコール変成 アミンアダクト	変成脂肪族環状ジアミン
比 重	2.58	混練物の粘度(c. p. s)	2500 at 20℃	1350 at 20℃
単位体積重量(kg/m ³)	1,590	ゲル化時間(分)	110 at 20℃	440 at 20℃
含 水 率 (%)	0.12	最高発熱温度(℃)	115 at 20℃	90 at 20℃
充 て ん 率 (%)	61.9	最高発熱時間(分)	125 at 20℃	140 ta 20℃

表—1 珪砂とエポキシ樹脂の諸性質



図—1 クリープ試験機の概要(側面図)

たものではなく実際の施工時において材料の分離、ワーカビリティ、価格等の要因にともなって使用目的に応じて経験的に定められている。

施工性の観点からは、骨材の粒径は単一粒度のものよりも連続粒度分布を持つ骨材の方が良いことが解っている。ところが、骨材の最密充てんを得るための粒度曲線に定説はなく、現状では空隙率で推定されている。したがって、連続粒度、不連続粒度ともに経験的に選定されているようである。

細骨材の種類、および粒度分布、実績率等がクリープ変形におよぼす影響も実用的な面からは重要であるが、今回の実験では、実際に現場等で多くみかける実用範囲で配合されたレジンモルタルに絞り、検討を加えた。

使用したエポキシ樹脂と混合珪砂の諸性質を表—1に示す。

2.1.2 供試体

供試体の形状は直径20mm、高さ40mmの円柱形のものである。レジンモルタルの配合比は、現場等で用いられる実用範囲に入る重量比で1:4、1:6、および1:8

の3種類とした。

供試体は同一条件で1度に28個ずつ作製し、型詰後24時間で脱型し、強度発現のバラツキを防止する意味で脱型後直ちに60℃の恒温槽で72時間加熱養生を行ない、以後試験材令まで実験室内(20±3℃)で養生した。

2.1.3 クリープ試験

実験に用いたクリープ試験機は当研究所で作製したもので、テコ部分にボールネジを採用して応力を約180倍に拡大し、非常に大きな変形を有する材料でも試験可能な精度を備えた一軸圧縮型クリープ試験機である。試験機の概要を図—1に示す。

実験にあたり、エポキシ樹脂Mのように硬化後も大変形を呈する材料の場合は、荷重棒部分に0.5%以内の大きさの荷重をあらかじめ加えておき、圧縮治具付近の機械ラグを防止した。

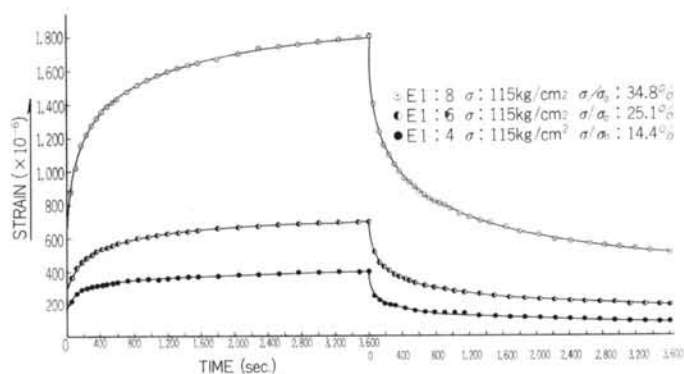
変位の測定は $10,000 \times 10^{-6}$ ひずみを越える場合は±5mm(1%F.S)の差動トランスを用い、 $10,000 \times 10^{-6}$ ひずみ以下の場合は供試体に直接抵抗線ひずみゲージを張り付けて、X-Y-レコーダーに記録した。

載荷応力範囲はエポキシ樹脂Eで30~120kg/cm²(応力度比5.1~20.%)、エポキシ樹脂Mで10~100kg/cm²(応力度比7.8~78%)を採用し、それぞれ200~3600秒の間の比較的短時間のせまい範囲のタイムスケールで実験を行なった。

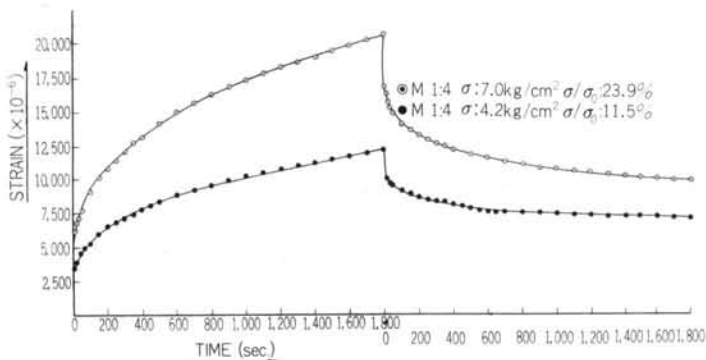
2.2 クリープ試験結果

クリープ試験結果の1例を図—2、図—3に示す。図—2はエポキシ樹脂Eの1:4、1:6、1:8それぞれの配合比別のレジンモルタルに同一応力を載荷した時に得られたクリープ線図をまとめたものである。図—3はエポキシ樹脂Mの1:4の配合比のレジンモルタルに載荷応力を変化させた場合に得られたクリープ線図をまとめたものである。

クリープ試験をしたレジンモルタルのJIS K 6911(熱硬化性プラスチックの試験方法)に準じた圧縮試験



図—2 樹脂Eの各配合比によるクリープおよびクリープ回復



図—3 樹脂M (配合比 1 : 4) の各応力によるクリープおよびクリープ回復

による骨材配合比と、最大破壊強度をまとめたものを図—4に示す。エポキシ樹脂Mの樹脂単体の硬化物のものは変形が大きく、強度のピークを生じないので表示していない。

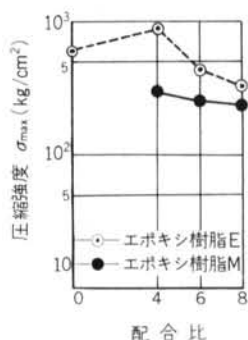
図—5に各々の配合比によるエポキシレジンモルタルの応力～ひずみ曲線の最大応力の $1/2$ の点と $1/3$ の点を結ぶ直線の傾きから求めた圧縮弾性係数を示す。図—4および図—5は、それぞれx軸が実数表示、y軸が対数表示となっている。

2.3 解析方法

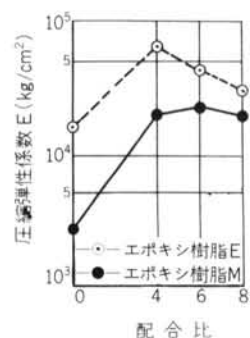
2.3.1 四要素モデルの設定

粘弾性を模型的にあらわすのに弾性変形と粘性変形の和が全体の変形に等しいとする Maxwell 型と、物体に作用する力が弾性要素と粘性要素とに配分されているとする Voigt 型の2通りの方法がある。

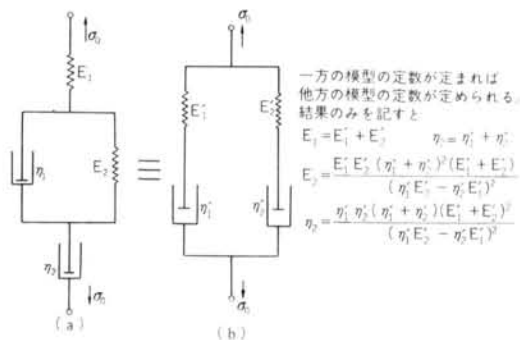
Maxwell 要素模型と Vogit 要素模型は物質の応力緩和やクリープをあらわすことのできる基本的模型であり、この2つの要素を2個ずつ、図—6の(a)、(b)に示すように直列および並列に組み合わせて連結したものは四要素モデルと呼ばれ、狭い範囲のタイムスケールの条件でたい



図—4 圧縮強度～配合比



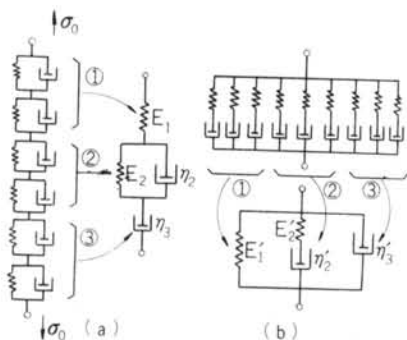
図—5 圧縮弾性係数～配合比



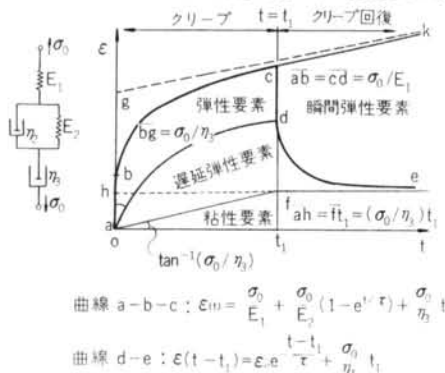
図—6 四要素モデル

ていの力学的挙動を定量的に記述することができる。この(a)と(b)の間には力学的インピーダンスの等価性があり¹⁾、このいずれを用いてもクリープと応力緩和の両方をあらわすことができる。

実在の高分子材料の力学的性質を厳密に表わすとなると分子量の不均一性、結晶部分と非結晶部分の混在、温度分布の不均一性等により種々の模型を考えねばならず図—6に示す四要素モデルでは不十分であり、たとえばより一般化した模型として図—7に示すような Maxwell 要素を多数並列に連結したものや、Voigt 要素を多数直



図—7 高分子材料の力学的挙動を表す一般化されたモデル



図—8 四要素モデルによるクリープ

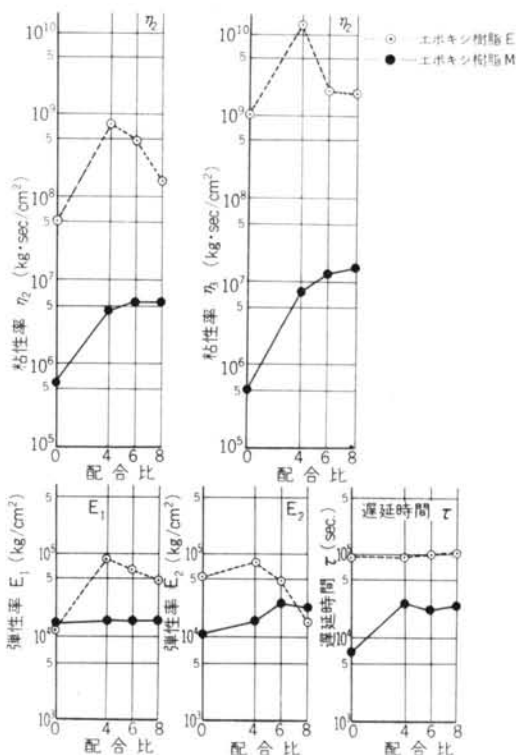
列に結んだものが考えられる。

2.3.2 一般化モデルの四要素モデルへの変換

クリープ試験をあるタイムスケールで行なうとするとその力学的挙動は図—7の(a)に示す多数のVogit要素からなることが考えられる。その時、バネ E とダッシュポット η の並列結合が弾性平衡に達するまでの遅れ時間の程度を示す遅延時間 $\tau = \eta/E$ として定義され、 $[E$ と $\eta]$ の並列結合が全変形の $(1-1/e)$ 、すなわち63.21%まで変形するのに要する時間を表す。

いま、タイムスケールより著しく長い遅延時間 τ を持つ要素群では、バネがほとんど働かず粘性的な性質を示す。逆に、著しく短い遅延時間の要素群では、流動して純弾性的に挙動し、この実験のタイムスケールと同程度の遅延時間を持つ要素群が遅延弾性の挙動を示すことになる。

すなわち、図—7の(a)の①で代表される要素群が右側に示す四要素モデル E_1 に、②が $\tau_2 = E_2/\eta_1$ を持つVogit要素に、③が η_3 に対応する。以上のことから、材料内部に存在する数多くの遅延時間のうち顕著なるもの1個を考えれば図—6に示す四要素モデルが得られることになり、このモデルは理論的根拠を持ったものとして理解される。したがって、粘弾性体の性質は遅延時間 τ を変数と



図—9 η_2 , η_3 , E_2 , τ と配合比の関係

する連続関数として考えることが可能である。

2.3.3 エポキシレジンモルタルの四要素への分解

四要素モデルに一定応力 σ_0 を作用させ変形を起こさせたとすると図—8のように挙動するので、クリープ曲線の持つ特徴の大部分を説明することが可能である。すなわち、瞬間弾性 σ_0/E_1 に続いてVogit要素 $[E_2, \eta_1]$ がクリープを起すが、同時に粘性要素 η_3 が働くために、停止することなく長い時間の後には斜線に漸近する永久流動が認められる。途中の時間0から時間 t_1 までに観測されるのは、Vogit要素のクリープと $(\sigma_0/\eta_3) \times t_1$ で表わされる永久変形が重畳したものである。

時刻 t_1 で力を除くと瞬間弾性分である σ_0/E_1 がすぐに回復し、その後にVogit要素の分 σ_0/E_2 は徐々に回復するが、永久変形の分 $(\sigma_0/\eta_3) \times t_1$ は回復しないのでクリープ回復曲線は $(\sigma_0/\eta_3) \times t_1$ の値に漸近する。

したがって、クリープ回復曲線を用いればVogit要素を分離できるので、実際のクリープ試験により得られた実測クリープ曲線のうちクリープ回復曲線を用いて回帰させることにより、5個の固有値 E_1 , E_2 , η_2 , η_3 , τ が計算により求まる。

エポキシ樹脂E、エポキシ樹脂Mを用いたそれぞれのレジンモルタルを、実験のタイムスケール200~3600秒

の範囲の結果を用いて4つの要素に分解して得られた E_1 , E_2 , η_2 および η_3 と配合比との関係をグラフ化したものを図-9に示す。また、遅延時間 τ を計算した結果を図-9の右側下段に示す。図-9はx軸が実数表示、y軸が対数表示となっている。

2.4 結果の検討

2.4.1 弾性要素 E_1

エポキシ樹脂Mにおいては、樹脂単独の硬化物およびレジンモルタルの弾性要素 E_1 の値はほとんど変化していない。いい換えるならば、 σ_0/E_1 で表わされる弾性的な変形量は同じである。これは、図-5で示した各々の配合比によるレジンモルタルの圧縮弾性係数が樹脂単独と比較して大きく異なる結果と相異している。

一方、エポキシ樹脂Eでは弾性要素 E_1 と図-5に示す各配合比の圧縮弾性係数の変化が同じ傾向を示し、レジンモルタルとして骨材が添加されるにつれて E_1 の値の増加が認められ、重量比で1:4の所で極大となっている。このことは、同じ荷重が作用した場合には1:4の配合のものの弾性的変形(可逆的変形)の量が少なくなることであり、図-2からも確かめられる。

2.4.2 遅延弾性要素 $[E_2, \eta_2]$

E_2 の値が大きいということは、荷重を除いた時から生ずるクリープ回復力が一般に強くなる(早くなる)ということを示しており、 η_2 の値が増加するということは、 η_2 の伸び抵抗が増すことであるから、弾性挙動が強くなる傾向を示す。

エポキシ樹脂Mは、骨材の増加につれて E_2 および η_2 の値は増加しており、この点からレジンモルタルにすることにより樹脂単独の場合よりも弾性的な挙動を示すようになったといえる。

エポキシ樹脂Eでは E_2 , η_2 とともに1:4の配合のものが極大値をとり、1:6および1:8で大幅に低下している。特に E_2 において1:6, 1:8のものが樹脂単独のものよりも低い値を示していることは注目に値する。

空隙率(樹脂の最小必要量と配合比との関係を含む)等の影響を考慮する必要はあるが、普通、樹脂単独の硬化物のものよりもレジンモルタルとした方が、それも骨材配合比の大きいレジンモルタルの方が、変形は少ないといわれている。ところが、今回のエポキシ樹脂Eによる1:8のレジンモルタルの実験値において明らかなごとく、バインダーの樹脂自体よりも流動(変形)しやすくなるものもあることが解かる。

エポキシ樹脂Eのレジンモルタルにおいては、1:4

以下の配合でも、1:4以上の配合でも樹脂単体と比較してより粘性的になるといえる。

2.4.3 粘性要素 η_3

η_3 は、荷重が作用している t 時間の間は $\sigma_0/\eta_3 \times t$ なる大きさの永久変形(不可逆的変形)を示す。したがって、 η_3 の値が大きければ大きいほど永久変形の量は少ない。

この観点からみると、エポキシ樹脂Mは骨材の増加につれて η_3 の値は増大しており、永久変形が生じにくくなっていることが容易に理解される。一方、エポキシ樹脂Eでは η_3 の値は1:4の配合比のもので極大を示し、1:6, 1:8と低下し、1:0の時の値と近くなっている。今回使用した骨材の場合では配合比1:4のレジンモルタルが一番流動しにくい、すなわち永久変形が小さいといえる。

2.4.4 遅延時間 τ

本実験で得られた4つの要素の値を用いて算出した各配合比のレジンモルタルの遅延時間 τ は、 E_2 , η_2 の変化が骨材配合比により同じ様な傾向で変化することから、図-9にみられるようにほとんど変化しない。

遅延弾性要素 $[E_2, \eta_2]$ の挙動は、実験のタイムスケールが遅延時間 τ と比較して非常に短かい時は粘性的に、非常に長い時は弾性的に、そして同程度の時は粘弾性的となる。

エポキシ樹脂Mはレジンモルタルとなると遅延時間 τ が樹脂単体のものよりも大きな値となっており、骨材の添加により弾性的となることが、これからもいえる。

エポキシ樹脂Eでは E_1 , E_2 , η_2 , η_3 の各要素の値が配合比により異なることから瞬間弾性ひずみ量、遅延弾性変化量および永久変形量等が異なっているが、遅延時間 τ の値は骨材配合比に関係なく一定の値を示しており、クリープ回復の速さが一定であることが解る。

2.5 要約

実験のタイムスケール200~3600秒という比較的短時間の一軸圧縮クリープ試験により得られたクリープ曲線を四要素モデルに適合させて、各々の要素に分解して検討を加えた結果、エポキシ樹脂Eとエポキシ樹脂Mのレジンモルタルに関して次の事柄が解った。

2.5.1 エポキシ樹脂Eのレジンモルタル

(1)弾性要素 E_1 の値は樹脂単体と比較して骨材が添加されると増加が認められ、1:4の配合比のもので極大をとる。このことは同じ荷重が作用した場合には、1:4の配合比のものの弾性的変形(可逆的変形)の量が一番少なくなることである。

(2)遅延弾性要素を構成する E_2 , η_2 の値は共に1:4

の配合比の所で極大となり、1 : 6, 1 : 8 となるにつれ低下する。しかし、 E_2 および η_2 の変化が骨材配合比により同じ傾向で変化することから $[\eta_2/E_2]$ の式で計算される遅延時間 τ は骨材配合比に関係なく一定の値を示すことになり、クリープ回復の速さが一定であることが解る。

- (3) 粘性要素 η_3 の値においても 1 : 4 の配合比のものが極大を示す。したがって流動抵抗が一番大きく $[(\sigma_0/\eta_3) \times t]$ なる式で表わされる永久変形（不可逆的変形）の量は最少となる。
- (4) エポキシ樹脂 E の 1 : 4 の配合比のレジンモルタルは η_3 の極大から弾性挙動の傾向を強め、 η_3 の極大から永久変形量が少なく、また E_1 の極大から弾性変形量も小さく出る。したがって、今回使用した骨材の場合では他の配合比のものと比較して硬くなっているといえる。

2.5.2 エポキシ樹脂 M のレジンモルタル

- (1) 弾性要素 E_1 の値は、樹脂単体の硬化物と各配合比のレジンモルタルとほぼ同じであるから、弾性的変形量も同じとなる。
- (2) 骨材が添加されると遅延弾性要素の各成分 E_2 と η_2 の値はともに増加するが、 η_2 の増分の方が E_2 の増分より大きいので η_2 の伸び抵抗が増し、レジンモルタルにすることにより、樹脂単体の場合よりも弾性的な挙動を示す。このことは、遅延時間 τ の飛躍的な増大（樹脂単体と比較して 1 桁増える）として確かめられる。
- (3) 粘性要素 η_3 の値は骨材の増加につれて増大する。したがってレジンモルタルとなると、それも骨材配合比の多い方が永久変形は少なくなる。
- (4) エポキシ樹脂 M の樹脂単体とレジンモルタルでは η_3 の値で 1 桁、 η_2 の値で 2 桁の差が出るほど、骨材の添加により流動抵抗が増し、弾性的挙動が強まる。

§ 3. 動力学的試験によるクリープ速度の予測

動力学的試験は、周期的に変化する力に対する応答変形の測定として定義されているように、振動が基本となっている。要するに試料を交互にねじったり、引張ったり、押し下げる時に生ずる試料の伸び、あるいは力の変化から、その材料の粘弾性的性質を決めるもので、材料試験方法としては比較的新しい方法といえる。

この試験方法の特徴としては、振動を利用することに

より測定が精密化できること、電気における諸法則と類似性があるので理論的に整理ができること、広い温度範囲にわたる試験を比較的簡単に短時間でこなえること等がある。

そこで本研究実験では、エポキシレジンモルタルについて行なった動力学的試験から得られた複素弾性率 E^* や減衰項 $\tan \delta$ 等の動的粘弾性を利用してクリープ速度を予測した。

3.1 実験方法

3.1.1 使用材料

実験に用いたエポキシ樹脂は、§ 2. で用いたエポキシ樹脂 E とレジンモルタル用、注入用、アンカーボルト固定用として実績のあるエポキシ樹脂 C の 2 種である。

エポキシ樹脂 C は、チバ社のアラルダイト GY250 を基材として変成芳香族ポリアミン型硬化剤（アミンアダクト型）と組み合わせたものである。細骨材も § 2. の実験で使用したものと同じである。エポキシ樹脂 C の諸性質を表—2 に示す。

3.1.2 供試体

供試体の形状は、ASTM D 695-69 (Compressive Properties of Rigid Plastics) に準じた直径 12.7mm、高さ 25.4mm の円柱形のものである。

レジンモルタルの配合比は、それぞれ重量比で 1 : 4, 1 : 6 および 1 : 8 の 3 種類とした。

供試体は型詰め後 24 時間で脱型し、以後試験材令まで実験室内 (20 ± 3 °C) で養生した。

3.1.3 動力学的試験

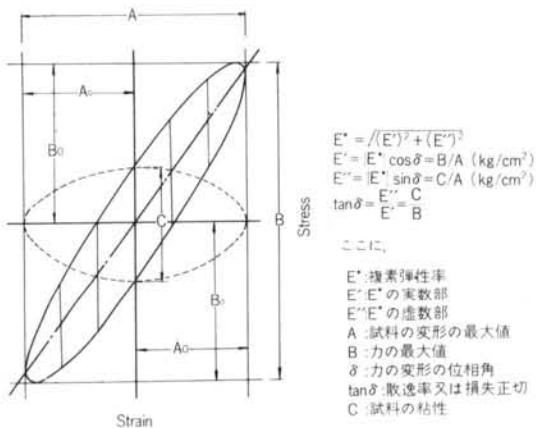
(A) 強制振動法の採用

動力学的試験の測定には多くの型があり、それぞれ固有の長所と欠点を持っている。

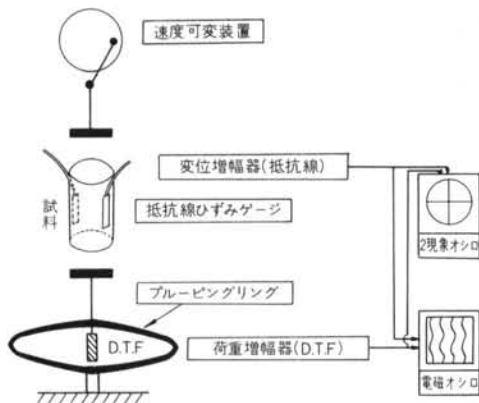
今回の実験では、当研究所で開発した高分子材料専用の片振り圧縮型低サイクル疲労試験機²⁾を用いて試料に強制的に周期的な外力を加えて振動させ、一定の条件における振動から粘弾性を求めるという強制振動法のうちの非共振法を採用した。

エポキシ樹脂	C
基 材 エ ポ キ シ	アラルダイト GY250
硬 化 剤	芳香族アミンアダクト
混練物の粘度 (c. p. s)	2500 at 20°C
ゲル化時間 (分)	235 at 20°C
最高発熱温度 (°C)	150 at 20°C
最高発熱時間 (分)	50 at 20°C

表—2 エポキシ樹脂 C の諸性質



図—10 ヒステリシスループ法の説明



図—11 測定装置の系統図

本実験では温度を 20℃ に固定し、周波数を $1/4$, $1/2$, 1, 2, 3 (Hz) の 5 段階に変化させた。

(B) 動力学的測定の原理

力学的ヒステリシスを観測するためには、応力とひずみの関係を求めれば良い。それには X-Y レコーダー等による応力・ひずみと時間との関係を記録する方法と、2 現象オシロスコープ等を用いてヒステリシスループを書かせる方法とがある。荷重曲線と変形曲線の位相差から減衰を計算するという前者の方法は、ヒステリシスループ法と比較して誤差が大きく出る傾向があるので、測定はすべてヒステリシスループ法によった。

図—10 にヒステリシスループ法を示す³⁾。

ヒステリシスループから粘弾性体の動的粘弾性を求めるためには、振動の定常状態における、しかも線形の範囲内での応力とひずみの関係を求めれば良く、粘弾性理論によると複素弾性率 E^* の実数部分 E' と虚数部分 E'' 、および散逸率と呼ばれる減衰項 $\tan \delta$ はそれぞれ図—10 において示される式で表わされる。

(C) 測定方法

測定装置の系統図を図—11 に示す。

実際の測定においては、試料に与える力が片振り応力のために荷重が 0 付近ではヒステリシスループが弓型になってしまうので、あらかじめ供試体にいくらかの荷重を加えた状態から抵抗線ひずみゲージおよび供試体に疲労を生じさせない範囲の荷重 (2000μ 以内) を選んで載荷した。

データーの計算は、オシロスコープに書かれたヒステリシスループを写真にとり記録し、粘弾性理論および各レオロジー実験式を用いて行なった。

また、実験において供試体と加圧板の間の摩擦を減少させるために、厚さ 0.2mm のテフロンシートにグリースを塗布したものを減摩材として供試体と加圧板との間に挿入した。なお、減摩材の変形量は供試体の変形量と比較して非常に小さく、実験結果への影響は無視できる。

3.2 測定結果

正弦波応力によって変化する動的な微小ひずみを時間的に測定することにより得られたデーターから、複素弾性率 (Complex modulus) E^* と散逸率 (Dispersion factor) または損失正切 (Mechanical loss angle tangent) と呼ばれる $\tan \delta$ を計算し、エポキシ樹脂 C とエポキシ樹脂 E のレジンモルタルの骨材配合比別、観測周波数別にとまとめた結果を図—12 および図—13 に示す。

3.3 考察

3.3.1 動力学的測定結果の考察

複素弾性率 E^* の実数部分 E' は、弾性的変形に対応する弾性率で貯蔵弾性率 (Storage modulus) または動的弾性率と呼ばれ、図—12 および図—13 にあるとおり、各配合比のレジンモルタルは測定周波数の範囲では周波数の上昇に従ってわずかながら増加が認められる。図—7 に示すような粘弾性的挙動の機械的性質を表わすことができる一般化された Maxwell 模型を考えると、動的弾性率 E' は変形の大部分がダッシュポットで起る低周波領域では非常に低い値となり、高周波領域では振動周期の間でダッシュポットに流動が起るだけの時間がなくなるのでバネの弾性率と等しくなる。したがって、今回の測定範囲外の高い周波数では、動的弾性率 E' は周波数の増加とともに急速に増大する筈である。

虚数部分 E'' は損失弾性率 (Loss modulus) または動的損失といわれ、粘性的は変形に対応する。実験範囲内で定性的に述べると $1/2$ Hz 以下の周波数領域では比較的わずかなエネルギーが周期的変形で消失するにすぎない

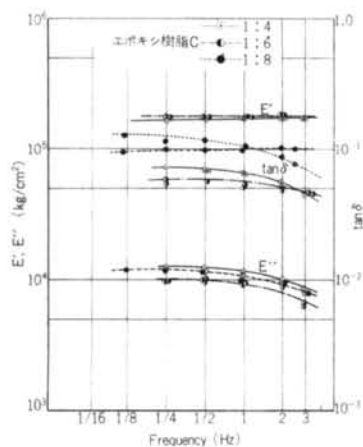


図-12 エポキシ樹脂Cを用いたレジソモルタルの複素動的縦弾性係数の周波数依存性

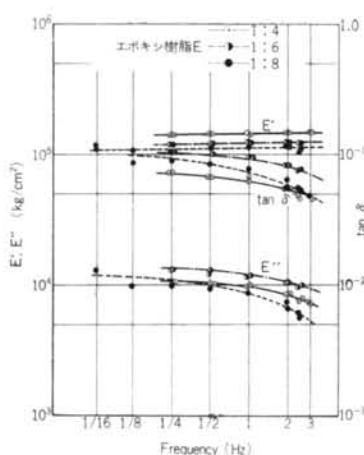


図-13 エポキシ樹脂Eを用いたレジソモルタルの複素動的縦弾性係数の周波数依存性

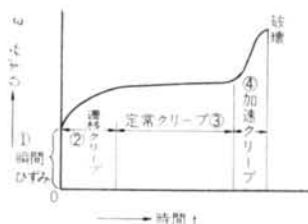


図-14 一般的なクリープ曲線
ものが1, 2, 3 Hz と周波数が増すにつれて減衰が大きくなる。

図-7 に示す模型に粘弾性理論をあてはめて考えると、周波数が高くなるにつれてダッシュポットの運動がバネの運動と比較して無視できるようになるから、損失弾性率 E'' は0に近づくことが容易に推定できる。一方、周期が非常に長い低周波領域においてはダッシュポットは大きく運動するが、この運動は非常に遅いのでダッシュポットのせん断速度は無視できるほど小さく、したがって E'' は0に近づく筈である。

各配合比のレジソモルタルの $\tan \delta$ も損失弾性率 E'' と同様に、実験範囲内の測定においては周波数が増すにつれて減少している。 $\tan \delta$ 自体は E''/E' として定義され無次元で物理量を意味しておらず直接理論的な説明を与えることは困難であるが、自動振動の減衰、伝搬振動の減衰、共鳴感応の振幅巾のような巨視的物性を支配するものといわれ、一般に減衰が大きいと騒音や振動を軽減する効果があるとされている一方、寸法安定性が低下するとされている⁴⁾。

3.3.2 実測クリープ線図
クリープ曲線は時間とひずみの関係を表わしたもので一般に図-14のように表わすことができる。すなわち、負荷された瞬間に生ずる①瞬間ひずみ、変形速度が時間とともに減少する②遷移クリープ、変形速度が時間に無関係に一定かつ最小の③定常クリープ、変形速度が次第に増大して砂壤にいたる④加速クリープの4つの部分に分けることができる。

3.3.2 実測クリープ線図

クリープ曲線は時間とひずみの関係を表わしたもので一般に図-14のように表わすことができる。すなわち、負荷された瞬間に生ずる①瞬間ひずみ、変形速度が時間とともに減少する②遷移クリープ、変形速度が時間に無関係に一定かつ最小の③定常クリープ、変形速度が次第に増大して砂壤にいたる④加速クリープの4つの部分に分けることができる。

図-15にエポキシ樹脂Cの1:8、および図-16にエポキシ樹脂Eの1:4の配合比のレジソモルタルの実測値によるひずみ変化(クリープ挙動)を、応力および時間の関数として両対数上にグラフ化したものを代表例として示す。今回の実験では、クリープ試験を前出の疲労試験機²⁾の変位検出機構を利用して行なったために、変形初期の瞬間ひずみ部分および遷移クリープ部分が精度良く測定されていないことから省略してある。

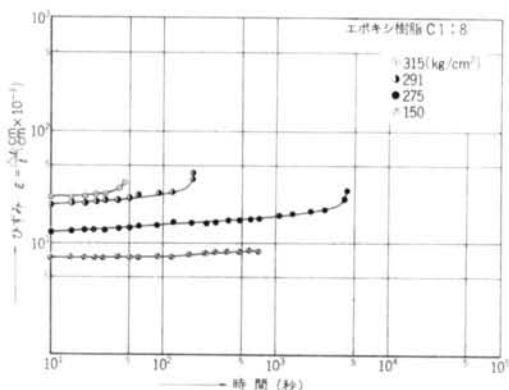


図-15 エポキシ樹脂Cによる1:8レジソモルタルの実測クリープ線図

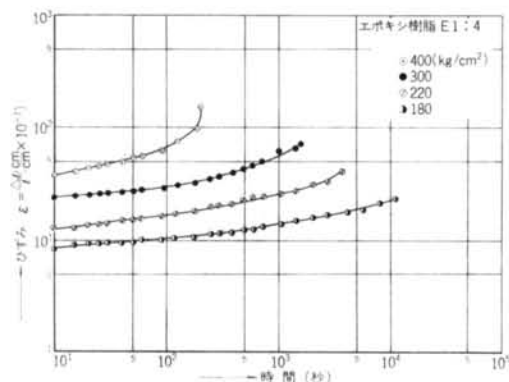


図-16 エポキシ樹脂Eによる1:4レジソモルタルの実測クリープ線図

これらレジンモルタルの実測クリープ曲線の特徴は、応力が小さくない限り遷移クリープの後には必ず定常クリープがあらわれ、加速クリープに移行する前までの各応力における定常クリープ曲線が両対数グラフ上でほとんどの平行な直線となることである。

3.3.3 Nutting 式の適用

材料力学の分野では、クリープ挙動に対してその挙動と良く一致するようなレオロジー方程式が用いられる。そのひとつに、従来比較的柔軟な材料に用いられて来た Nutting - Scott Blair の式（一般に Nutting 式と呼ばれている）がある。

Nutting 式は現象論的な実験式であり、以下(1)または(2)の式の形で示される。

$$\epsilon_t = k\sigma^b t^n \quad \dots\dots(1)$$

$$\log \epsilon_t = \log k + b \log \sigma + n \log t \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 ϵ_t ：全ひずみ σ ：応力

k ：材料定数 t ：時間

上式を用いてクリープ曲線を両対数グラフ上にあらわすと図-17のようになる。両対数グラフ上で直線を示すクリープ曲線の傾き n は、定常クリープにおけるクリープ速度に相当し、一定の温度においては材料の粘性を示す定数となる。また、この n の値は動力学試験の結果から得られる $\tan \delta$ の値を用いて式(3)に示す関係式より求められる。

$$\tan \delta = E''/E' = (d \log \epsilon / d \log t) \times \frac{\pi}{2} = n \cdot \frac{\pi}{2} \quad \dots (3)$$

($d \log \epsilon / d \log t$) は両対数でプロットされたクリープ曲線の傾きより求められ、これにより特定温度における動力学試験データをクリープのデータから計算でき、またその逆を行なうこともできる。

クリープひずみと応力の関係も、式(2)で示される Nutting 式右辺第2項の係数 b が求まることにより、特定温度において定められることが解かる。

3.3.4 レジンモルタルのクリープ速度

動力学測定による結果から得られたクリープ速度と疲労試験機の変位検出機構を用いて行なった実際のクリープ試験による実測データからのクリープ速度を比較した結果を、エポキシ樹脂Cを結合材としたレジンモルタルについてまとめたものを図-18に示す。動力学試験によるクリープ速度の平均値が幅を持っているのは $\tan \delta$ の値が試験した周波数によりそれぞれ異なっていることによる。

実測されたクリープ速度と比較して $\tan \delta$ から求められたクリープ速度は小さめに出ており、低周波における測定で得られた $\tan \delta$ の値、すなわち $\tan \delta$ の値が大き

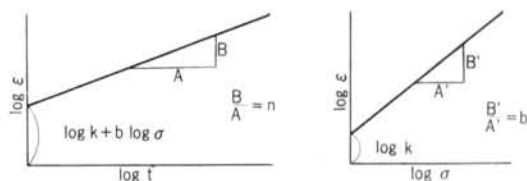


図-17 Nutting 式で表わされるクリープ

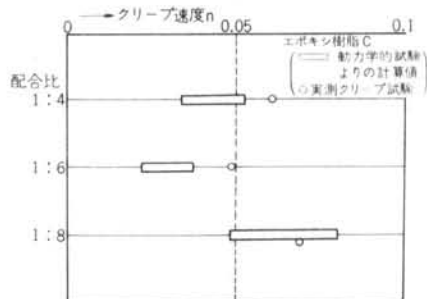


図-18 実測のクリープ速度と動力学試験よりの計算値によるクリープ速度の比較

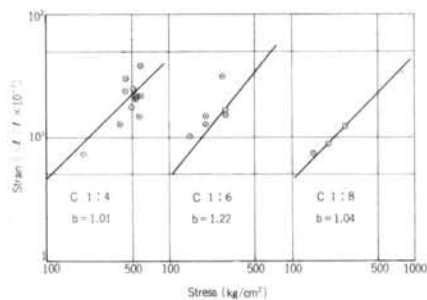


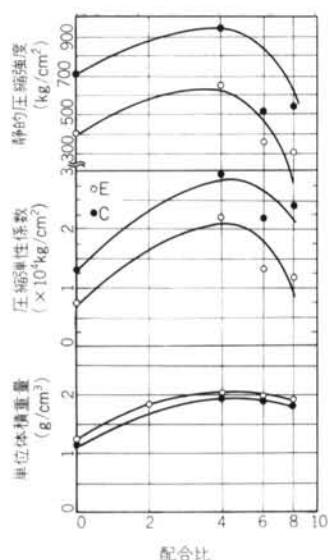
図-19 $t=10$ min. におけるクリープひずみと応力の関係
いほど実測値に近似する。

桜井⁹⁾の研究によれば、定常クリープがあらわれれば破壊にいたる時間はすでに決定されていることから、今回の実験のように定常クリープを問題としているエポキシレジンモルタルは必ず破壊が生ずるとみなして良く、このような材料であれば $\tan \delta$ を測定することにより、クリープ寿命の推定を行なうことが可能である。

3.3.5 クリープひずみと応力の関係

図-19に $t=10$ 分におけるクリープひずみと応力の関係をエポキシ樹脂Cを用いたレジンモルタルについてまとめた結果を示す。1：6の配合比のものが1：4、1：8の配合比のものと比較して両対数で表示された直線の傾きが大きく、したがって応力の影響を大きく受けることが解かる。

図-20は各配合のレジンモルタルの材令28日における静的圧縮強さ、圧縮応力～ひずみ曲線の初期勾配から求めた圧縮弾性係数および単位体積重量を測定した結果で



図—20 各配合におけるレジンモルタルの単位粒度、圧縮弾性係数、圧縮強さ

あるが、これからも解かるとおりエポキシ樹脂Cの1：6の配合比のレジンモルタルは圧縮弾性係数および静的圧縮破壊強さともに1：4、1：8の配合比のものと比較して低く出ている。また図—18にあるとおり、クリープ速度も一番小さい。この原因は骨材の実績率（粒度分布）と樹脂の最小必要量との関係等をつかむことにより得られるものと考えられることから目下検討中である。

3.4 要約

温度を固定し、周波数のみを変化させて行なった今回の動力学試験では、エポキシレジンモルタルの動的粘弾性の挙動を現象的にとらえた。今回の測定結果および考察から次の事柄がいえる。

- 1) エポキシ樹脂を結合材としたレジンモルタルは、定常クリープ部分が両対数グラフ上で直線性を示すことから、Nutting式を適用することができる。
- 2) 式(3)から $(d \log \epsilon / d \log t)$ が両対数グラフ上にプロットされたクリープ曲線の傾きより求めることがで

きる。特定温度における動力学試験データをクリープのデータから計算可能となる。また、その逆を行なうこともできる。

- 3) 減衰項 $\tan \delta$ をもとに算出したエポキシレジンモルタルのクリープ速度は、実際のクリープ試験から得られるクリープ速度と比較的良好な一致を示す。この場合、低周波における測定で得られる $\tan \delta$ の値を用いた方がより実測値に近似する。
- 4) エポキシ樹脂Cの場合、1：6の配合比のレジンモルタルが1：4、1：8のものと比較して一定温度の条件下では応力の影響を強く受ける。

§ 4. おわりに

本研究実験では、レオロジーの観点からエポキシ樹脂およびその合材の物性挙動を把握しようという試みから、エポキシレジンモルタルのクリープ性状について静的粘弾性、動的粘弾性を用いてその性状を現象的にとらえることで一応の成果をおさめた。

しかし、物性の評価手法に重点が置かれたために、クリープに大きな影響を与える細骨材の種類、粒度分布および実績率等の検討がなされていない。また、レジンモルタルの価格を左右する樹脂の最小必要量を満足する配合と、バランス良く性能が発揮される適正配合との関係も今後の問題として残されている。

以上の問題点を検討することにより、今回の実験で未解決であるエポキシ樹脂Cの1：6の配合比のレジンモルタルの強度低下の原因およびエポキシ樹脂Eの1：4の配合比のレジンモルタルが他の配合比のものと比較して優れている原因も解かるものと考えられる。

謝辞 本研究の遂行にあたり当研究所工博丸一俊雄氏には数多くの提言、忠告をいただいた。同じく佐久間政則君には実験の良き協力者として活躍してもらったことを付記し、感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 中川鶴太郎：“レオロジー(岩波全書)” 岩波 pp. 162~163
- 2) 沢出稔：“エポキシレジンモルタルの圧縮疲労特性に関する一考察” 清水建設研究所報 第27号 昭和51年10月
- 3) 高分子学会編：“レオロジーハンドブック(第1版)” 丸善 p. 248 他
- 4) 各参考書において部分的に触れられている。例えば次のものが比較的まとまって述べられている。
L. E. Nielsen (小野木重治訳)：“高分子の力学的性質(第1版)” 化学同人社 1974年 pp. 135~136
- 5) 桜井春輔：“セメントモルタルのクリープ変形と破壊に関する実験的研究” 土木学会論文報告集 第217号 1973年9月