

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

沢 出 稔

§ 1. 序

エポキシ樹脂は戦後まもなく日本に紹介され、その接着性、(超)高強度速硬性、耐薬品性、防水性、耐摩耗性等の数々の利点により建築土木分野にきわめて大きな影響をおよぼしている。

コンクリートに関連した用途としては、新旧コンクリート打継接着、コンクリートと金属の接着、舗装材、耐摩耗表層材等の形式で数多く利用されている。用途の大部分は仕上げ関係であり、梁、スラブ、サンドイッチ構造として、ごくまれに他の構造材と組み合わせで構造的な使われ方をされている。

これらの用途の中で、エポキシ樹脂の比較的新しい応用例として骨材との混合によるレジンコンクリート、レジンモルタルおよび炭素繊維補強プラスチック(CFRP)等で代表される複合材料のマトリックスとして使用される分野がある。これらは、例えばPC工法における接合部の接着材にみられるように、建設工法に新しい考え方、材料が採用されるにつれその重要度は拡大し、期待される材料として注目をあびるものと考えられる。

従来のように、エポキシ樹脂で代表される土木建築工用樹脂の利用対象、範囲を単にセメントコンクリートにとどめ、セメントコンクリートの不十分な部分、性能を補うという考え方から脱皮して、例えば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ておくことが必要であろう。

そのような場合、以下にあげる諸点が問題となる。

- ①有機質であるために耐熱、耐火性が弱点となる。
- ②疲労性状が不明である。(耐久性)
- ③荷重を受けると大きく変形する。(クリープ性状)

したがって、ここでは②と③に着目し、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。

高分子材料のような粘弾性体では、ある温度における

データが単に曲線を移動させるだけで、異なった温度で得られたデータと重なり合うことを示した Leaderman の研究¹⁾により、時間と温度が等価となることが知られている。この時間温度換算則により、粘弾性体の全般的な性能を比較的短時間で予測することができ、その他多くの力学的性質を評価することができるようになった²⁾。

エポキシ樹脂の性能試験は通常ただ1つの温度で、ただ1つの試験速度で行なっているが、温度・応力・周波数で変化する諸性質を考え合わせると、その変形特性等の諸物性を温度・応力・周波数(時間)の関数としてとらえる必要がある。

このような観点から、エポキシ樹脂単体およびエポキシレジンモルタルに対する疲労性状、ならびにクリープ性状の評価をレオロジー手法を用いて検討を加えた。

本報告においては、市販のエポキシ樹脂を用いて現場等で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圧縮疲労試験結果について述べる。クリープ性状に関しては次回に報告を予定している。

§ 2. 疲労試験機の製作

2.1 従来の疲労試験装置の問題点

材料の試験装置には、研究する材料の特性を確実に把握できるよう材料の種類、用途に適したものが必要となる。粘弾性的性質を持つ高分子材料では、載荷応力の種類およびその大きさ、繰返し速度、温度、高分子材料自体の内部構造等によって大きく影響を受けるので、応力を一定に保つことは非常にむずかしいこととなる。

もともと疲労試験装置は金属材料とともに発展しており、100余年の歴史を持ち、その試験方法も確立されている。高分子材料はその歴史的背景も20余年と短かく、元来薄板またはシート状で使用されることが多かったことと、適当な高分子材料用の疲労試験装置がないこ

とから、やむを得ず金属材料用の疲労試験装置を転用している場合が多く、高分子材料の正しい疲労特性の評価をむずかしいものとしている。

従来の金属材料用の疲労試験装置を、高分子材料の疲労試験に転用した場合の主な問題点としては以下の4点が考えられる。

- ①高分子材料は、試験中に試料の剛性が変化するため荷重が変動し、一定の応力を保つことがむづかしい。
 - ②一般に、試験速度が非常に速く、熱伝導率が低い高分子材料は温度上昇を起こし、熱疲労による破壊を生じ正確な疲労値がつかめない。
 - ③金属板、板状、シート状のものに適する疲労試験機では、レジンコンクリート、レジンモルタルのように骨材が入ったものの試験を行なうことは困難である。
 - ④破壊までに長時間かかる場合には、破壊の判定がむづかしく、破壊時の繰り返し回数が明確にならない。
- 今回製作した疲労試験機においては、上記①～④の問題点をそれぞれ以下に述べる方法で解決している。

①については、荷重検出にブルーピングリングを採用し、合わせてきわめて簡易な機構で、非常に正確に作用する応力一定保持機構を開発した。

②については、無段減速機の採用により任意の試験速度を選定できるようにした。

③については、片振り応力による圧縮型を採用した。

④については、剛性率の変化とひずみ量の増加を、ヒステリシスループを描かせ、観察、記録することとした。

市販されている各種疲労試験機と試作機との比較を表-1に示した。

2.2 装置の概要

2.2.1 主要仕様

疲労試験機の本体部分の詳細図を図-1に示す。また疲労試験の系統的な流れ図は図-2ようになる。

最大荷重（静的）	5,000kg
最大繰り返し荷重	4,000kg
繰り返し速度	1/8～3 Hz(7.5～180r.p.m)
最大振幅	0～25mm
試料高さ	0～100mm
試料径	φ12.5～70mm
繰り返し荷重用モーター	3.75kW 140V
荷重調節用モーター	100W 100V
本体重量	約 300kg

2.2.2 応力一定保持機構

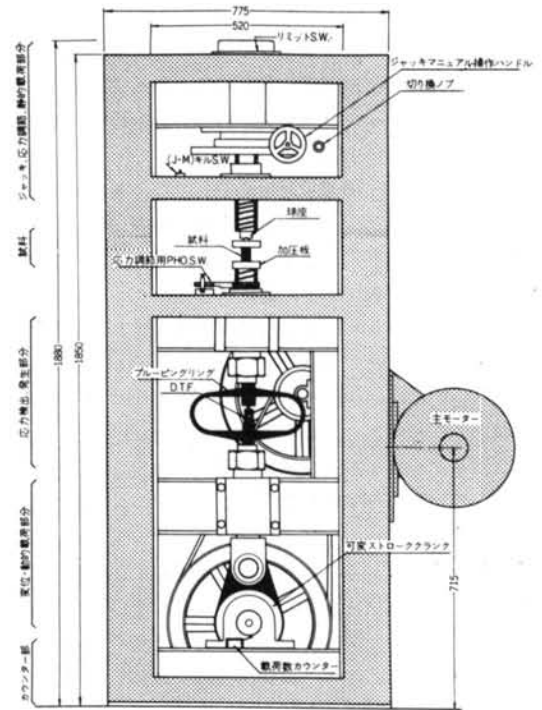


図-1 疲労試験機本体部分

機 構	試 験 の モ ード				試 験 速 度 (r.p.m)	高分子材料に用いた場合の適否	価 格	備 考
	疲 勞		静 力 リ ー プ	応 力 緩 和				
	応 力 一 定	ひ ず み 一 定						
1) 試作クランク型	○	○	○	○	7～180	○	低	高分子材料専用 荷重を一定に保てない 任意の変動荷重が加えられる 疲労試験に向かない 高速すぎる 許容ひずみが小さい 高速すぎる
2) クランク型	○	○			任意		中	
3) 油圧（空気）型	○		○		300～1,000	○	高	
4) インストロン型			○	○	数回		高	
5) 遠心力型	○				1,000～3,000		中～高	
6) 電磁力型	○				60～300		高	
7) 質量共振型	○				1,000～3,000		高	

表-1 各種疲労試験機との比較

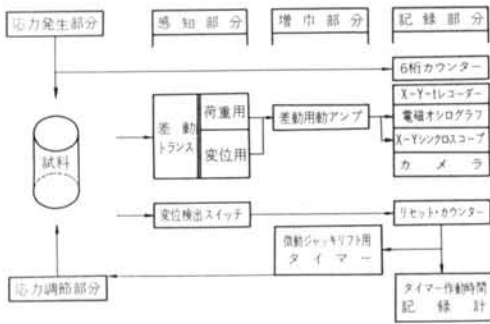


図-2 疲労試験機ブロックダイアグラム

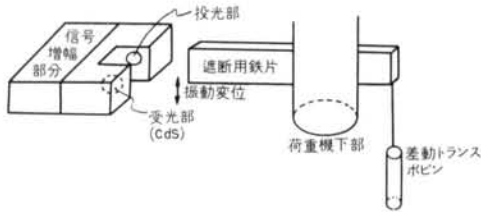


図-3 変位検出スイッチ概略図

試験体が塑性変形すると、1/100mm以上の精度で作動する光透過型フォトトランジスタと白熱ランプから成る変位検出スイッチが作動し、試験体の塑性変形した量だけ載置台を調節する。図-3に変位検出スイッチの概略図を示す。

この操作は、かさ上げ量をジャッキ作動時間調節タイマー(0.9~15秒の任意の時間に設定可能)の運転時間に置き換え、荷重調節用モーターを駆動させる。

荷重調節用モーターは、1回転すると1/1800mm上昇するようになっているので、試験中に生ずる塑性ひずみ量も計算可能である。

2.2.3 荷重変動

高分子材料は、疲労試験中に剛性が変化するので、応力一定試験では剛性の変動に伴う荷重の変動が問題となる。本試作機における荷重変動を、剛性低下率12.5%の点注³⁾でとらえ計算を行なった。

図-4にモデル化した試験機を示す。

運転中は、リング②と試験体③の2つのバネを直列に接続した組み合わせとみなす。この系に P の力を作用させ、 Δl の変位を生じさせるとすると、試験速度は低速のため試験体に加わる慣性力は無視できる。したがって、

$$\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2 \quad \dots\dots(1)$$

注)日本においてもASTMの試験方法に準拠して、1972年にJIS K 7119「硬質プラスチック平板の平面曲げ疲れ試験方法」ができた。これによると、剛性が初期値の80%に達した時を破壊とみなしている。

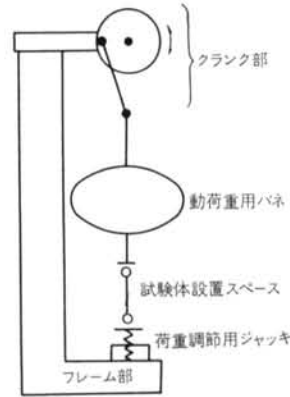


図-4 モデル化した試験機

リングのバネ定数 k_1 、試験体のバネ定数 k_2 およびリングと試験体の各々のバネを合成したもののバネ定数を k とすると、 $P = k_1 \Delta l_1 = k_2 \Delta l_2 = k \Delta l$ ……(2)

$$\text{式(2)より、} \Delta l_1 = P/k_1, \Delta l_2 = P/k_2 \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{式(1)と式(3)より、} k = k_1 k_2 / (k_1 + k_2) \quad \dots\dots(4)$$

$$ak_1 = k_2 \text{ とすると、式(4)より、} k = (1/a + a)k_1 \quad \dots\dots(5)$$

故に、 a の値を充分大きくとれば、 k の変化は充分少なくできる。試験体の剛性(バネ定数 k_2)が、はじめの7/8まで低下した時のリングと試験体とを組み合わせた系のバネ定数 k の値を k' とすると、 $k' = \frac{7/8a}{1+7/8a} k$ だから、

$$\frac{(k-k')}{k} = \frac{1}{8+7a} \quad \dots\dots(6)$$

5mmの変位で3000kgの荷重を示すリングを用いた場合、リングのバネ定数 k_1 は $k_1 = 600 \text{ kg/mm}$ となる。

試験体のヤング率を E_R とすると、

$$E_R = \frac{p/S}{\Delta l/L} \left(= \frac{d}{\Delta l/L} = \frac{pL}{S \cdot \Delta l} \right) = \frac{p}{\Delta l} \cdot \frac{L}{S} \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 p : 荷重 (kg)

S : 断面積 (mm^2)

L : 試験体の高さ (mm)

試験体の形状を $\phi 12.7 \text{ mm}$ 、高さ 25.4 mm として試験体のバネ定数 k_2 を求めると、

$$k_2 = p/\Delta l = E_R \cdot S/L = E_R \cdot 127/25.4 = 5 \times E_R \quad \dots\dots(8)$$

試験するレジン単体およびレジンモルタルの動弾性係数は $500 \sim 5,000 \text{ kg/mm}^2$ の範囲に入るといえるから式(8)より

$$2.5 \times 10^3 < k_2 < 2.5 \times 10^4 \text{ kg/mm} \quad \dots\dots(9)$$

$ak_1 = k_2$ だから $a = k_2/k_1$ 、 $k_1 = 600 \text{ kg/mm}$ および式(9)より、

$$4.17 < a < 41.7 \quad \dots\dots(10)$$

式(10)の値を式(6)に代入し百分率で表わすと、

$$2.7\% \left\langle \frac{k-k^1}{k} \right\rangle > 0.33\% \quad \dots\dots(1)$$

以上の結果から、動弾性係数 500kg/mm² の材料で試験中に剛性が7/8に低下しても、荷重変動は最大2.7%に押えられ実用上問題ないと判断される。

§ 3. 実験方法

3.1 使用材料

3.1.1 エキポシ樹脂

実験に使用した樹脂は、市販のものでレジソモルタル用、注入用樹脂として広く用いられているエポキシ樹脂Cとエポキシ樹脂Eの2種である。これらは、ともにビスフェノールA型のエポキシ樹脂であり、エポキシ当量184~194、分子量370~390の範囲に入る最も一般的なもので、エキポシ樹脂Cはチバ社のアラルダイト GY250を基材とし、変成芳香族ポリアミン型硬化剤（アミンダクト型）と組み合わせたものであり、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、硬化剤にチオコール変成アミンダクトを用いたものである。

3.1.2 細骨材

今回の一連の実験に供するレジソ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号のそれぞれの珪砂を重量比で1:1:1に調合したものをを用いた。この配合比率の珪砂を用いたレジソモルタルは、実際に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。

使用した樹脂と混合珪砂の諸性質を表-2に示す。

3.2 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。

レジソ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。

珪砂	数値	エポキシ樹脂の種類	C	E
粗粒率 (F.M)	2.99	基材エポキシ	アラルダイトGY250	エピコート 828
粒大 (mm)	1.2 以下	硬化剤	芳香族アミンダクト	チオコール変成アミンダクト
比重	2.58	混練物の粘度 (c. p. s)	at 20°C 2,500	at 20°C 400
単位体積重量 (kg/m ³)	1.590	ゲル化時間 (分)	at 20°C 235	at 20°C 110
含水率 (%)	0.12	最高発熱温度 (°C)	150	115
充てん率 (%)	61.9	最高発熱時間 (分)	50	125

表-2 珪砂とエポキシ樹脂の諸性質

3.3 疲労試験

3.3.1 試験速度の設定

高分子材料に高速で繰り返し応力（ひずみ）を作用させると発熱し、その結果分子運動が開始されるに十分な自由体積を持つまでに膨張し熱疲労を生じる⁴⁾。熱疲労が生じては試験体の正確な疲労性状が得られないので、熱疲労の起きない試験速度を選定しなければならない。このため、20±2°Cの室内で荷重と試験速度を変化させた予備試験を行なった。この結果を図-5に示す。シロッコファン（5200l/分の風量を試験体から5cmの近接距離より吹き付ける）による強制空冷を採用することにより2Hzまでの試験速度ならば熱疲労が生じないことが解ったので、今回の疲労試験では2Hzの試験速度を採用した。

3.3.2 検出および記録

図-2に示すごとく、繰り返し荷重が加えられた回数は6桁のカウンターに表示される。荷重および試験体の変位検出は作動トランスを用い、2現象シンクロスコープ、X-Yレコーダー等によりヒステリシスループとし

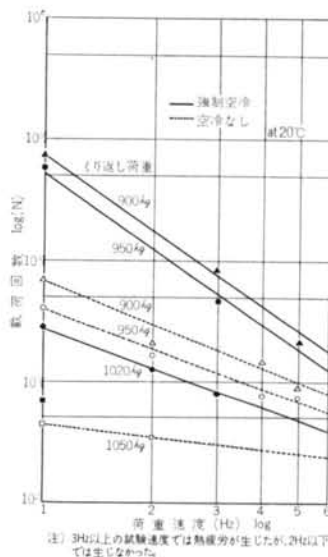


図-5 載荷速度・疲労寿命・冷却の有無

て視覚化される。得られたヒステリシス曲線を観察することにより、試験体の動的挙動、剛性変化等を検討した。

疲労試験中の動クリープ曲線が、変位検出スイッチの作動回数と荷重調節用モーターの作動時間の関係から得られる。

§ 4. 試験結果

各配合の供試体の材令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 (Initial Tangent) から求めたヤング率、および単位体積重量を測定した結果を図-6 に示す。

インストロン型定ひずみ試験機を用いて行なった20℃における各配合のレジンモルタルの応力～ひずみ曲線を図-7 に示す。

4.1 S-N 線図

応力 S と破壊回数 N との関係は 図-8 に示すようになる。一般に、応力 S と破壊回数 N との関係を示す曲線は $S-N$ 線図といわれ、疲労試験結果から疲れ強さを推定するのに最も望ましい方法とされている。

同一条件で一定の応力振幅を受けて疲労破壊するまでの繰り返し数のばらつきが大きいことは経験的に知られており、最近になりこのばらつきの統計的な性質が、疲労破壊の本質的、基本的性質であることが解ってきた⁶⁾。エポキシ樹脂 C、および E とともに 10^6 回の繰り返し回数では $S-N$ 線図は水平とならず、いい換えるならば疲労限度に達していない。高分子材料は、一般にははっきりとした疲労限度を示さないものが多く、 10^7 回の疲労強度 (時間強度) をもって疲労限度に代えることが多いようである。しかし、 図-8 に示した回帰曲線の傾きが右下りであり、外挿すると応力が 0 となっても破壊する回数が存在することとなり、説明できないこととなるので、ある回数以上では $S-N$ 線図が水平となる、すなわち疲労限度が存在すると考えた方が妥当である。

異なる材料の性能あるいは同一材料の異なる条件下での性能の良否の大まかな比較には、この $S-N$ 線図法による比較で満足されると思われるが、構造物の設計に应用する場合には、疲労寿命が応力振幅によってばらつくことから、平均疲労寿命 (N の平均値) に加えて破壊する確率もしくは破壊しない確率をもって表わされるべきものであろう⁶⁾。

また、 図-8 から両方の樹脂ともに骨材の増加に従い

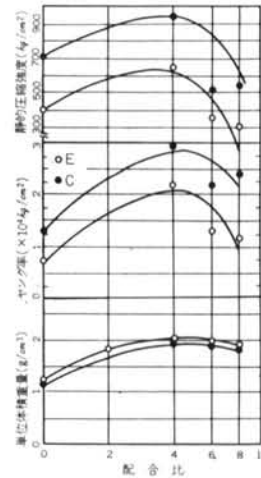


図-6 骨材配合比と圧縮強度、ヤング率、単位体積重量の関係

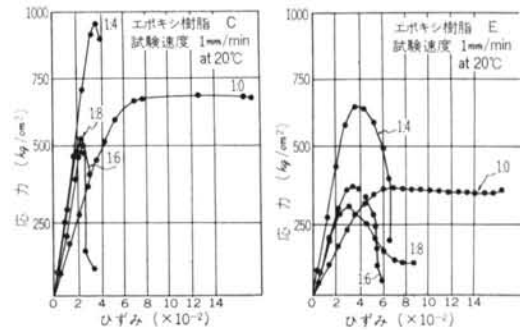


図-7 各配合のレジンモルタルの応力～ひずみ曲線

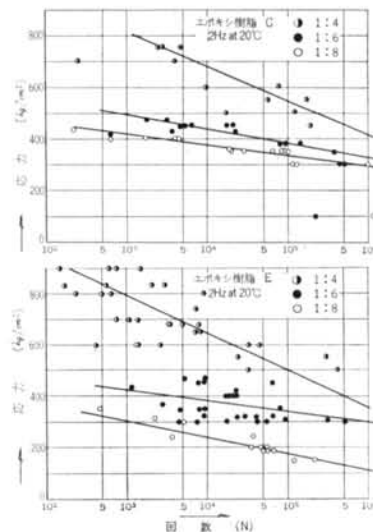


図-8 応力と破壊回数との関係

疲労寿命の低下が認められる。エポキシ樹脂Cでは、1:6と1:8の有義差はないが、エポキシ樹脂Eの場合、1:6の方が1:8のものよりも疲労寿命が良いといえる。疲労寿命の観点からエポキシ樹脂CとEを比較すると、エポキシ樹脂Cの方が優れている。

4.2 剛性低下

高分子材料が、疲労試験中に剛性変化を起こすということはその特徴の1つとして挙げられ、この剛性の経時変化の目安として、Van der Poel⁷⁾はスティフネス (Stiffness) という概念を「応力/全ひずみ」として定義している。試験中に得られるヒステリシス曲線よりスティフネスを計算してグラフにまとめた結果を図-9に示す。

今回試験したエポキシレジノルタルの場合、疲労破壊直前に大きく剛性が低下することが、図-9より明らかになった。載荷荷重の低いものは、一度剛性率が上昇しそれから低下する傾向を持ち、載荷荷重が高いものの剛性率はほぼ一定の値を保ち、破壊近くで低下する。本研究の結果から、破壊点は初期剛性率の80~90%まで低下した時期をもって示すのが適当と考える。

なお、骨材配合別によるスティフネスの変化の差は認められない。剛性率の変動は破壊直前のものを除くと平均±10%である。

4.3 永久ひずみ (塑性ひずみ)

疲労は繰り返し数 N だけで決まるのではなく、それに伴う時間 t の効果も存在する⁹⁾。疲労変形はクリープ諸現象と類似しており、繰り返し数に対して、はじめ急激に増加し、その後きわめて徐々に増すあるいは飽和する⁹⁾。

供試体に、一軸圧縮による繰り返し応力を作用させる

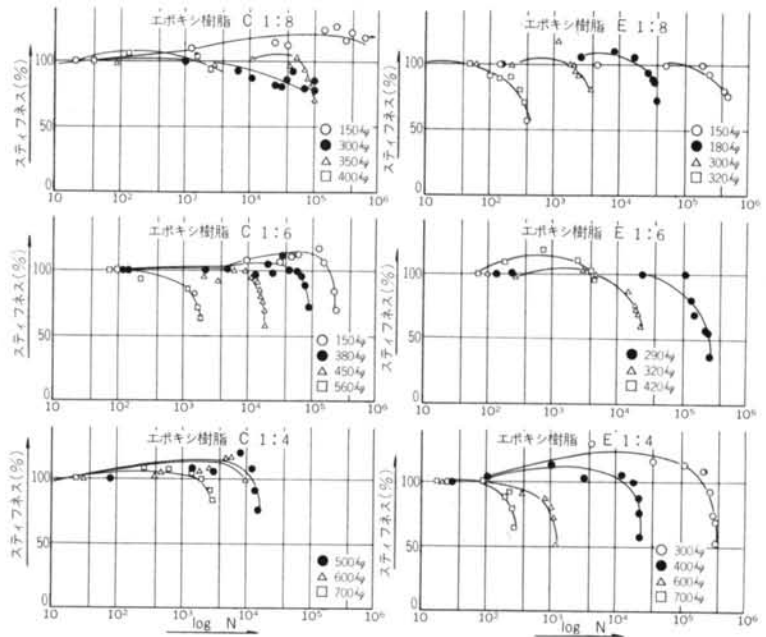


図-9 樹脂配合別スティフネス変化

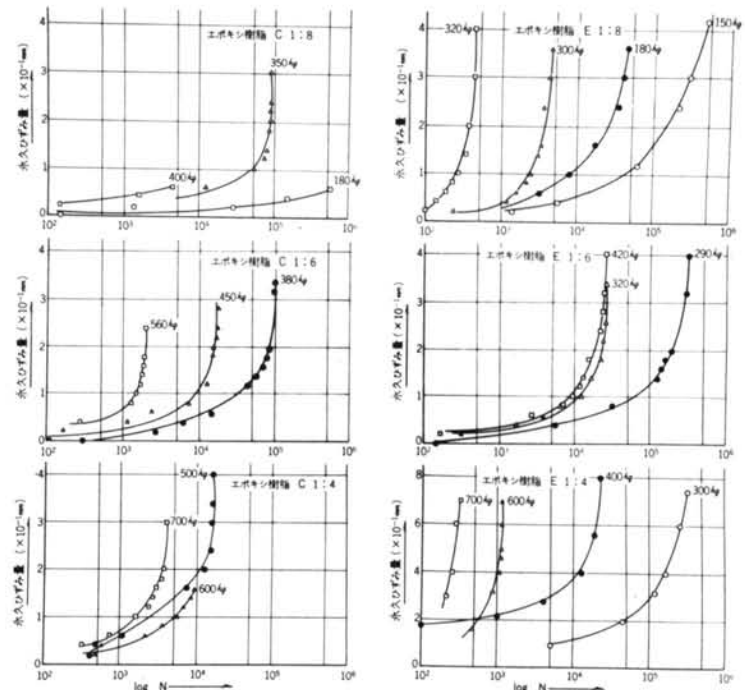


図-10 樹脂配合別による永久ひずみ~N線図

と、永久ひずみにより試験体が縮む。その変形した量を検出し、永久ひずみ~N線図として配合別別にグラフ化したものを図-10に示す。

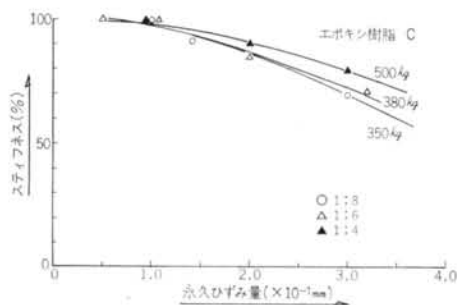


図-11 永久ひずみとスティフネスの関係

図-7 に示した静的試験による応力～ひずみ曲線からエポキシ樹脂Cのレジンモルタルは、高さ25.4mmに対する変位で0.20～0.35mmに達した時点で破壊しており、エポキシ樹脂Eのものは、同じく変位で0.35～0.40mmの間で破壊している。これは、疲労試験においても高さ25.4mmに対する変位で0.20～0.40mmの間でほとんど全て破壊し、静的破壊の変位量と疲労試験における破壊時の変位量とほぼ一致する。また、比較的硬いエポキシ樹脂Cについては、試験体の高さに対する変位量が0.15～0.20mmに達する時点から破壊に向かって進行する。

これは、永久ひずみとスティフネスの関係によって示すことができ(図-11)、永久ひずみの測定結果から疲労破壊を推定することができる。

4.4 結言

今回のエポキシレジンモルタルの圧縮疲労試験を行なうにあたり、高分子材料の特性を考慮して製作した低サイクル片振り圧縮型の疲労試験機は十分に予期した性能を発揮し、レジンモルタルなどの疲労特性をつかむこと

ができると判断される。

今後、試験環境条件を変えてその特性をつかむようにしたい。

今回の実験結果および考察から、エポキシレジンモルタルの疲労に関して次のことが明らかとなった。

①試験雰囲気温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ で試験速度2 Hzでは、エポキシレジンモルタルの熱疲労による破壊は生じない。

② 10^6 回までの繰返し回数ではS-N曲線は水平とはならず、疲労限度に達しない。

③しかし、初期剛性率が80～90%まで低下すると一般に疲労破壊が生じる。したがって、エポキシレジンモルタルの破壊点を剛性率の低下によってとらえることができる。

④剛性率の変化の観察には、ヒステリシスループ法が適している。

⑤エポキシ樹脂Cのように、比較的硬質のエポキシ樹脂を用いたレジンモルタルについては、疲労試験中に生ずる永久ひずみが試験体の高さ(25.4mm)に対して0.15～0.20mm(0.6～0.8%の永久ひずみ)に達すると、剛性率が初期値より10%程度の低下を示しており、この永久ひずみの測定によっても疲労の判定が可能である。

謝辞 本研究にあたり数多くの提言、忠告をいただいた当研究所工博丸一俊雄氏に深く感謝いたします。材料研究部の松田辰夫君には、疲労試験機の製作をはじめとして実験遂行の良き協力者として活躍していただいた。同じく佐久間政則君の協力に負う所が多かったことを付記し、感謝いたします。

＜参考文献＞

- 1) Leaderman, H.: "Elastic and Creep Properties of Filamentous Materials and Other High Polymers" The Textile Foundation (1943)
 - 2) 数多く認められるが、例えば以下の2つが比較的有名である。
Ferry, J. D.: "Viscoelastic Properties of Polymers" Wiley (1961)
Tobolsky, A. V.: "Properties and Structure of Polymers" Wiley (1960)
 - 3) ASTM D 671-71: "Standard Method of Test for Flexural Fatigue of Plastics by Constant-Amplitude-of-Force"
 - 4) Doolittle, A. K.: J. Appl. Phys. Vol. 22, 1471 (1951)
 - 5) 横堀武夫: "材料強度学第1版" 技報堂 昭和42年 pp. 163～168
 - 6) 横堀武夫: "材料強度学第2版(岩波全書)" 岩波 昭和49年 pp. 215～216
 - 7) C. van der Poel: "A General System Describing the Visco-elastic Properties of Bitumens and Its Relation to Routine Test Data" J. Appl. Chem. Vol.4 (1954) pp. 221～236
- その他、このスティフネスの概念を用いた例としては以下のものがある。

P. S. Pell & I. F. Taylor: "Fatigue Phenomena in Bituminous Systems" Dept. of Civil Engineering, Great Britain, 1974 pp. 1103~1121

8) 横堀武夫: "材料強度学第2版(岩波全書)" 岩波 昭和49年 pp. 204~208

9) 横堀武夫: "材料強度学第1版" 技報堂 昭和42年 p. 223

その他, 本論文作成にあたり以下を参考とした.

10) M. Levitt: "The Fire-resistance of Resin-jointed Concrete"

11) J. H. Golding: "The Use of Epoxy Adhesives for Bonding Concrete, Part I"

12) R. P. Johnson: "The Use of Epoxy Adhesives for Bonding Concrete, Part II"

13) ACI Committee 503: "Use of Epoxy Compounds with Concrete (Title No. 70-56)" ACI Journal, Sept. 1973

14) R. Paul Johnson: "Glued Joints for Structural Concrete" The Structural Engineer Vol. 41, No. 10 (1963)

15) J. D. Kriegh & G. M. Nordby: "Methods of Evaluation of Epoxy Compounds Used for Bonding Concrete (Epoxy with Concrete; ACI SP-21)" Oct. 1966

16) Felix Hugenschmidt: "Epoxy Adhesives in Precast Prestressed Concrete Construction" PCI Journal, March-April 1974

17) ACI Committee 403: "Guide for Use of Epoxy Compound with Concrete (Title No. 59-43)"

18) Ference Szépe: "Strength of Adhesive-bonded Lap Joints with Respect to Change of Temperature and Fatigue"

19) C. F. Derrington & L. Pepper: "Survey of Applications of Epoxy Resins for Civil Works Projects" AD-728813

20) H. G. Geymayer: "Use of Epoxy or Polyester Resin Concrete in Tensile Zone of Composite Concrete Beams" Technical Report C-69-4, March 1969