

不定形シーリング材の耐久性に関する研究(第2報)

—疲労特性と許容伸縮率について—

松本 洋一

小野 正

丸一 俊雄

§ 1. はじめに

建築物のカーテンウォールなどのワーキングジョイントに充てんされたシーリング材は、種々のムーブメントをうけている。前報¹⁾においては部材の熱伸縮に伴うムーブメントの中で、年間変動によるシーリング材の圧縮セットを取上げ、破断機構に大いに関係があることを実験室的に確認し、シーリング材の使い方について提言を行なった。

一方、圧縮セットとは別にムーブメントの繰返しによるシーリング材の疲労を知ることは、耐久性を把握する上で重要なプロセスである。一般にシーリング材の疲労に関しては、ジョイントデザインの際に許容伸縮率という概念の導入により配慮されている。しかし、シーリング材の繰返し疲労を定量的に把握していないために、許容伸縮率の設定があいまいになり、かなり苛酷な条件でシーリング材を使用し、漏水事故につながっている例がある。

以上を鑑み、本研究は各種のシーリング材について定ひずみ繰返し試験を実施し、疲労を定量的に把握することを試み、さらにそれを特性値として、ジョイントデザインの際に重要な役割を果す許容伸縮率を合理的に求める方法を確立しようとするものである。

§ 2. 疲労および許容伸縮率をめぐる問題点

2.1 シーリング材の疲労

ジョイントに生ずるムーブメントには諸々の種類がある。充てんされたシーリング材はそれらのムーブメントに追従し、ジョイントの水密性を確保しなければならない。ムーブメントとしては、部材の熱伸縮に伴う温度ムーブメント、地震時の面内変形を許容する層間変位ムーブメントの2つがもっとも代表的であり、ジョイントデザインの際に考慮されなければならない。これらのムー

ブメントの実態は定かでないが、ほとんど繰返し働いている。

繰返しムーブメントをうけるシーリング材としては、耐疲労性がすぐれていることが求められる。シーリング材の疲労に関する研究は数少ない。単なる定ひずみ繰返し試験によってシーリング材の疲労を定量的にとらえた試験報告²⁾³⁾はあるが、定量的にとらえて理論的展開を行なうに至っていない。加藤博士は、シーリング材の応力低下の程度をもって疲労度と定義し疲労特性の定量化⁴⁾に挑んでいるが、シーリング材として考慮すべき疲労限界との関係が定かでない。

したがって、本研究はシーリング材の定ひずみ繰返し試験によって疲労特性を定量的にとらえ、シーリング材としての限界を設定し、それらの関係から耐疲労性の優劣を検討しようとするものである。

2.2 ジョイントデザインにおける許容伸縮率

前項で述べたごとくシーリング材の疲労に関して、その外力となるムーブメント、およびシーリング材の耐疲労性についての知見は少ない。この疲労に関して、ジョイントデザインの中では許容伸縮率を設けて処理している。例えば、部材の熱伸縮に起因する温度ムーブメントについては次式で検討されている⁵⁾。

$$W \times \epsilon / 100 > \alpha \times \Delta T \times L$$

ここに、 W ：シーリング材の充てん幅(mm)

ϵ ：シーリング材の許容伸縮率(%)

α ：部材の熱膨張係数(/°C)

ΔT ：部材の推定温度差(°C)

L ：部材の長さ(mm)

すなわち、ジョイントに予想されるムーブメントが、充てんされたシーリング材に許容されるムーブメント以下になるように配慮されなければならない。上式の右辺に部材の拘束程度が乗せられるべきであるが、ここでは昨今のカーテンウォールのごとく、耐震的配慮から1点支持(部材の熱伸縮はフリー)のジョイントも多く、ま

記号	材 質	主剤：硬化剤	色	プライマー	被 着 体
P ₁	2成分型ポリサルファイド	100：10	グレイ	ウレタン系	アルミニウム素地板
S ₁	1成分型シリコーン	—	グレイ	シラン系	アルミニウム素地板
S ₂	2成分型シリコーン	100：2.5	グレイ	シラン系	アルミニウム素地板
U ₁	2成分型ウレタン	50：100	グレイ	ウレタン系	石綿スレート板

表-1 使用材料

要 因	水 準	数
シーリング材	P ₁ , S ₁ , S ₂ , U ₁	4
伸 縮 率 (%)	±10, ±20, ±40	3
繰返し回数(回)	1×10 ³ , 5×10 ³ , 1×40 ⁴ 5×10 ⁴ , 1×10 ⁵	5
繰返し速度(回/分)	100	1
履 歴 温 度 (°C)	20	2

表-2 要因と水準



写真-1 定ひずみ繰返し試験装置

た、安全サイドで検討されることから削除している。

充てんされたシーリング材に許容できるムーブメントは、ジョイント幅と許容伸縮率によって決まるものであるから、許容伸縮率の小さいシーリング材を使用する場合は、同じムーブメント量でもジョイント幅を大きくしなければならない。

この許容伸縮率は、シーリング材の疲労特性の代替値でもあり、重要な意味を持っている。シーリング材のエラストマー別、さらに詳しくは商品別に示されるべき固有の性質でもある。しかし、現状ではこの許容伸縮率の数値は合理的に求められていない。単なる経験的判断、あるいは製造者からの一方的情報によって与えられており、技術的体系にのっとって算出したものではない。したがって、JASS8（日本建築学会建築工事標準仕様書・防水工事）第4節：シーリング工事、あるいはシーリング材についての日本工業規格でも、正式にその数値を示すところまで技術的に至っておらず、合理的に求める手

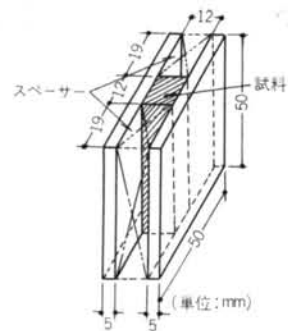


図-1 試験体

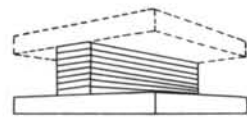


図-2 切断の方向

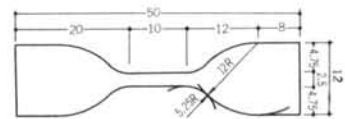


図-3 ダンベル型試験体の形状・寸法（単位：mm）

項 目	仕 様
最大荷重(kg)	750
繰返し速度(回/分)	2.4~9.0, 84~300
振 幅 (mm)	0~12
位置調整範囲(mm)	0~40
カウ ン タ ー	6桁(リセット装置)
試験体取付け治具	防水層用、シーリング材用(H型, L型)
温度調節範囲(°C)	-10~100

表-3 定ひずみ繰返し試験装置の仕様

法の確立が待たれている。

§ 3. 疲労特性

3.1 実験計画

3.1.1 使用材料および試験体の作製

実験に用いたシーリング材4種とプライマーおよび被着体を表-1に示す。試験体の作製は JIS A 5757（建築用シーリング材の用途別性能）に準拠し、プライマー塗布後の2枚の被着体と2個のスパーサーを図-1に示すごとく組み立てて12×12×50mmの空洞を作り、その空洞にシーリング材を気泡の入らないように配慮して充てんした。試験体の作製後、28日間の標準養生（20°C, 50% R.H）を行なった。なお、スパーサーの離脱は充てんしてから7日後に行なった。

3.1.2 要因と水準

シーリング材が繰返しムーブメントを受けることによって起きる疲労の程度を把握するために表-2に示す要因と水準で定ひずみ繰返し試験を行なった。定ひずみ繰返し試験装置は当研究所で開発したもので、写真-1に

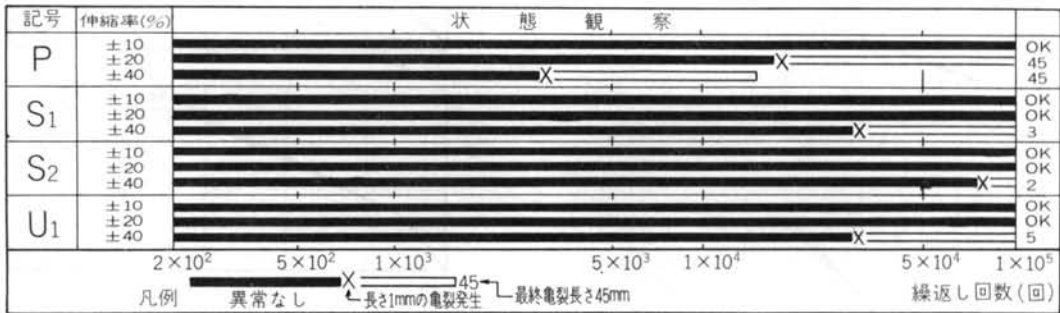


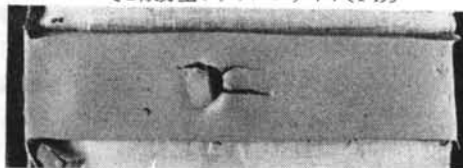
図-4 繰返し回数の増加に伴う状態観察の結果



写真-2 繰返し後の状態の例



〔2成分型ポリサルファイド(P₁)〕



〔2成分型シリコーン(S₂)〕

写真-3 内部破壊の例

示すごとくの外観で、表-3に示す仕様を有している。

3.1.3 実験の方法

所定の繰返し回数を経た試験体の疲労の程度を定量化するために、5個のうち2個は図-2に示す方向に厚さ約1.5mmの薄片に切断し、内部の状態を観察した後、異常のない場合は図-3に示すダンベル型試験体を得て、チャック間距離30mm、引張速度200mm/minで引張試験を行なった。他の3個はそのままの状態から引張速度5mm/minで引張試験を行なった。なお、引張試験機としては島津社製オートグラフ IS 5000 (ロードセル5kgまた

は100kg)を使用した。定ひずみ繰返し試験、および引張試験は23℃、60% R. Hの環境で実施した。

3.2 実験結果

3.2.1 状態観察の結果

繰返し回数の増加に伴いシーリング材が呈する亀裂・剝離等の定性的な状態観察の結果は図-4に示すごとくである。写真-2は繰返し後の状態を示す一例である。

所定の繰返し回数を経たものの内部を観察したところ2成分型ポリサルファイド(P₁)と2成分型シリコーン(S₂)に、外からは観察できない破壊が発生していた。この内部破壊の例を写真-3に示す。

3.2.2 引張試験の結果

内部破壊の生じていないものについては、ダンベル型試験体で引張試験に供しS-S曲線を得た。P₁、S₁、S₂について伸縮率±20%の場合を図-5~7に示す。なお、U₁は引張抵抗が大きすぎて薄片状に切断できなかったので削除した。

次に、所定の繰返し回数を経たものをそのままの状態から引張試験を行ないS-S曲線を得た。各シーリング材について、伸縮率±20%の場合を図-8~11に示す。

3.3 結果の検討

3.3.1 疲労破壊

合成ゴムを基材としているシーリング材は、ひずみ量が小さくとも繰返して作用された場合には疲労し、やがては破壊に至ることがある。このような疲労現象は、繰返し速度が一定の場合は伸縮率が大きくなるに伴って、少ない繰返し回数で破壊が発生する傾向を示す。

シーリング材の疲労破壊は、前掲の写真-2に示した

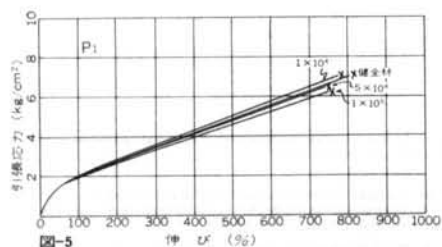


図-5

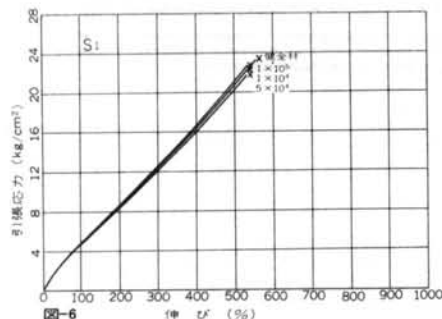


図-6

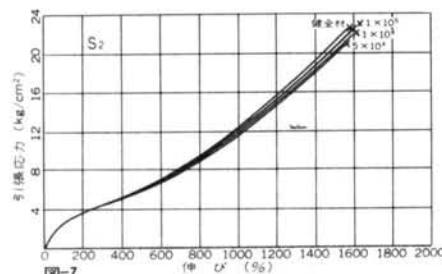


図-7

図-5~7 S-S曲線 (ダンベル型・伸縮率±20%)

ごとくの外部破壊と、写真-3で示したごとくの内部破壊に大別できる。前者は接着面付近において応力集中が発生し破壊に至る疲労であり、これについて検討を与えた報文^{2,3)}は見うけられる。後者は混練時等に巻き込んだ気泡(断面欠損部)の周辺において応力集中が発生し破壊に至る疲労である。したがって、この内部破壊は気泡の巻き込みやすいポリサルファイドやウレタンなどに見られる。筆者らは、この気泡を巻き込んだポリサルファイドシーリング材と諸物性の関係については既に報告⁶⁾しており、定ひずみ繰返し試験では疲労破壊のモードが気泡の有無によって異なることを明らかにしている。

すなわち、シーリング材の疲労には2つの破壊があり両者を絡めて検討しなければ適切な評価を行なうことができない。しかし、現状では内部破壊を非破壊検査によって明らかにすることができない。したがって、本研究では内部破壊については、その存在を指摘したのにとどめ、次章以降での解析には報文^{2,3)}等で扱っている外部破壊を特性値として検討を進める。

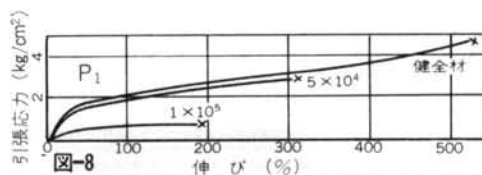


図-8

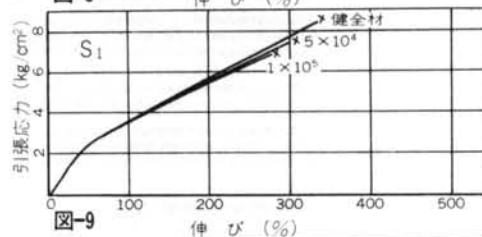


図-9

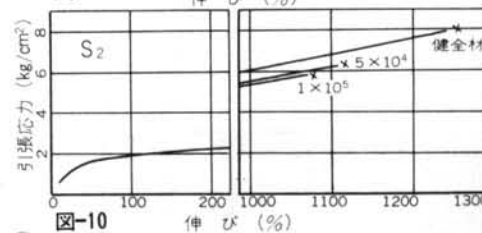


図-10

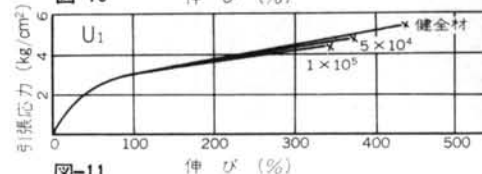


図-11

図-8~11 S-S曲線 (H型・伸縮率±20%)

3.3.2 限界RE

所定の繰返し回数を経た後のダンベル型試験体の引張試験結果より Resilient Energy^{注)} (以下REと略す)を算出し、繰返し回数の増加に伴って外部破壊として観察された亀裂の成長と繰返し回数との関係で示せば図-12~14のごとくであり、REと亀裂等の欠陥との間には顕著な関係はなく、繰返し回数が増加し亀裂が発生している状態においても、シーリング材そのもののREは低下していない。

一方、所定の繰返し回数を経た後そのままの状態、すなわちある形状を有するH型試験体においては、REおよび亀裂長さとも繰返し回数との間には図-15~18に示すごとくの関係にある。すなわち、REは繰返し回数が多くなるほど、伸縮率が大きくなるほど低下し、亀裂は伸縮

注) 1920年にカナダのWiegandが「ゴムの性質はゴムを引張って切断するまでに要する仕事量(S-S曲線の面積)、換言すれば切断するまでにゴムが外部から吸収するエネルギーの量で表わす」ことを提案している。ゴムは変形が大きいために元の体積で除して単位体積当りのエネルギー量で表示してあり、単位は $\text{kg} \cdot \text{cm} / \text{cm}^3$ である。

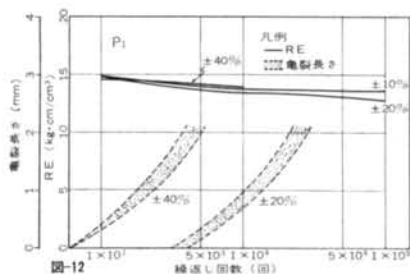


図-12

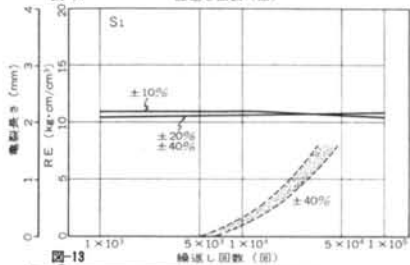


図-13

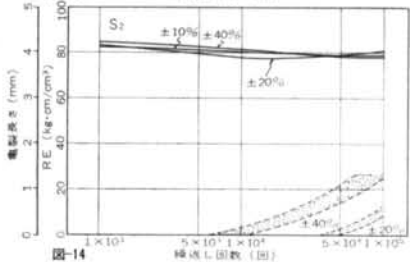


図-14

図-12~14 繰返し回数とREおよび亀裂長さの関係 (ダンベル型)

率が大きくなるほど少ない繰返し回数で発生し、その長さは繰返し回数の増加に伴い進行する。

ここで、繰返し回数の増加に伴って発生し成長する亀裂と、次式で求めたREの低下率(D_{RE})の関係を2成分型ポリサルファイド(P)について示せば図-19のごとくである。

$$D_{RE} = \frac{RE_0 - RE_N}{RE_0} \times 100 \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 D_{RE} : 繰返しに伴うREの低下率(%)

RE_0 : 健全材のRE (kg·cm/cm³)

RE_N : N回繰返し後のRE (kg·cm/cm³)

すなわち、亀裂が発生してから成長する過程で亀裂長さとREの低下率は直線的な関係を示し、亀裂長さが長くなるに伴いREの低下率も大きくなる傾向にある。この関係は、他のシーリング材についても同様の傾向を示している。ここで、亀裂の発生時点防水機能を保持できる疲労限界とし、その時のREを限界RE(RE_L)とする。したがって、限界REは伸縮率と繰返し回数に関係なく同一シーリング材ごとに決る値といえる。

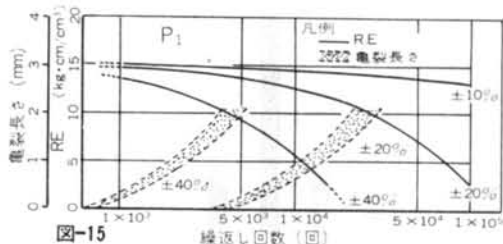


図-15

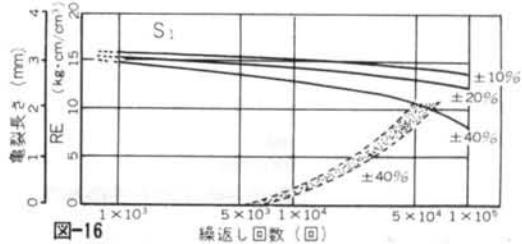


図-16

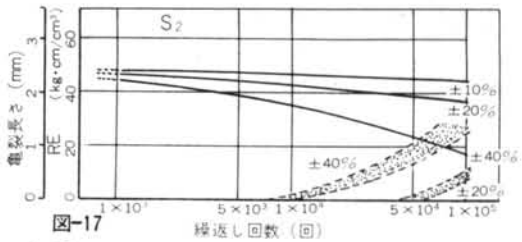


図-17

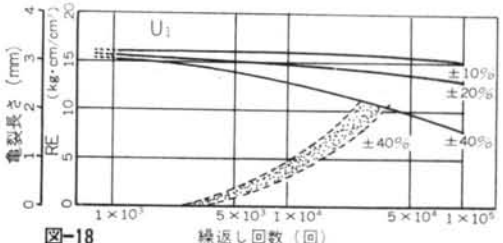


図-18

図-15~18 繰返し回数とREおよび亀裂長さの関係(H型)

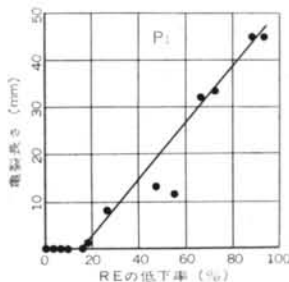


図-19 REの低下率と亀裂長さの関係

3.3.3 耐疲労性

前項の手順にしたがって限界REを求めて、定ひずみ

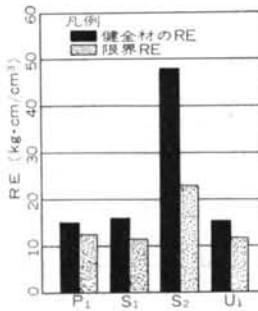


図-20 限界RE

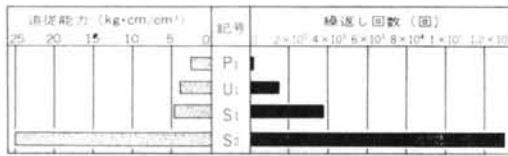


図-21 伸縮率±40%の場合の追従能力と繰返し回数の関係
繰返し試験に供する前(健全材)のREと比較して示せば図-20のごとくである。ここでこの両者の差(式(2))を寿命に至るまでに消費しうるRE, すなわち繰返しムーブメントへの追従能力(RE_P)と定義する。

$$RE_P = RE_0 - RE_t \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 RE_P : 追従能力 ($\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$)
 RE_0 : 健全材のRE ($\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$)
 RE_t : 限界RE ($\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3$)

この追従能力の消費は伸縮率と繰返し回数によって決まり、式(3)で表わすことができる。

$$RE_P = k \cdot \epsilon \cdot N \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 ϵ : 伸縮率(%)
 N : ϵ で限界REに達する繰返し回数(回)
 k : 係数 ($\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3 \cdot \text{回}$)

次に一例として、伸縮率±40%の場合について追従能力(RE_P)と、限界REに達するまでの繰返し回数(N)を求めて相互の関係を示せば図-21のごとくであり、耐疲労性を RE_P で表わすことの妥当性を認めることができる。

§ 4. 許容伸縮率

4.1 実験計画

4.1.1 使用材料および試験体の作製

実験に用いたシーリング材8種とプライマーおよび接着体を表-4に示す。試験体の作製は3.1.1と同様であ

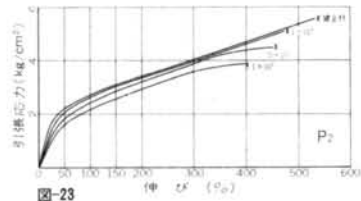


図-23

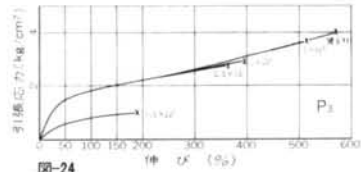


図-24

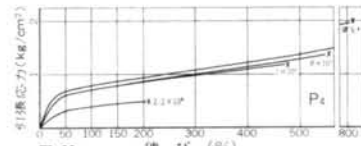


図-25

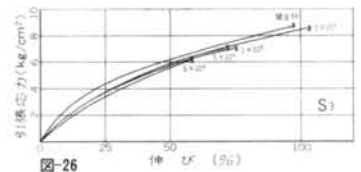


図-26

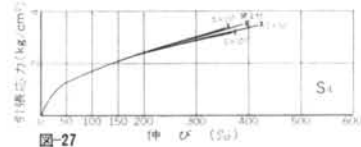


図-27

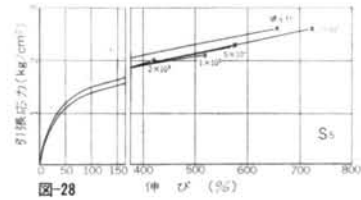


図-28

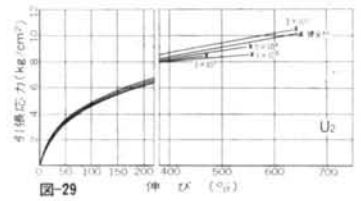


図-29

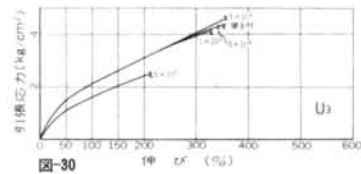


図-30

図-23~30 S-S曲線(H型・伸縮率±20%)

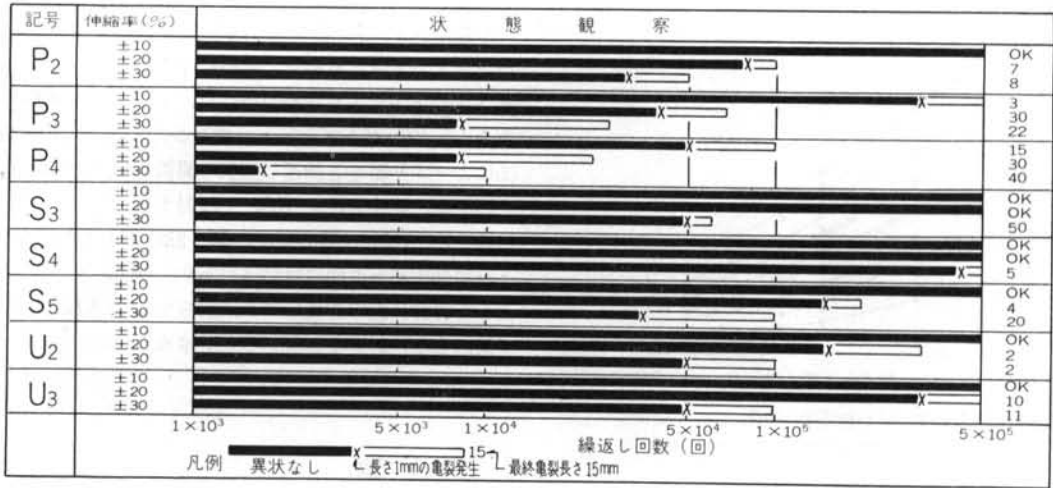


図-22 繰返し回数の増加に伴う状態観察の結果

記号	材質	主剤:硬化剤	色	プライマー	被着体
P ₂	2成分型 ポリサルファイド	100:5	グレイ	ウレタン系	アルミニウム 素地板
P ₃	"	100:10	"	"	"
P ₄	"	100:8	"	"	"
S ₃	1成分型 シリコーン	—	"	シラン系	"
S ₄	"	—	"	"	"
S ₅	2成分型 シリコーン	100:2.5	"	"	"
U ₂	1成分型ウレタン	—	"	使用せず	"
U ₃	2成分型ウレタン	100:3.7	"	"	"

表-4 使用材料

る。試験体の養生は、作製後60日間の標準養生(20℃, 50% R.H)を行なった。

4.1.2 要因と水準

定ひずみ繰返し試験は、表-5に示す要因と水準で行なった。

4.1.3 実験の方法

所定の繰返し回数を経た試験体の疲労の程度を定量化するために、そのままの状態の試験体を引張速度 5 mm/min で引張試験を実施した。定ひずみ繰返し試験機と引張試験機は3.1.3で示したものと同じものを使用し、実験は23℃, 60% R.Hの環境で実施した。

4.2 実験結果

4.2.1 状態観察の結果

繰返し回数の増加に伴い、シーリング材が呈する亀裂等の状態観察の結果を図-22に示す。

要因	水準	数
シーリング材	P ₂ ~P ₄ , S ₃ ~S ₅ U ₂ , U ₃	8
伸縮率(%)	±10, ±20, ±30	3
繰返し回数(回)	1×10 ⁴ , 5×10 ⁴ , 1×10 ⁵ 5×10 ⁵	4
繰返し速度(回/分)	100	1
履歴温度(℃)	20	1

表-5 要因と水準

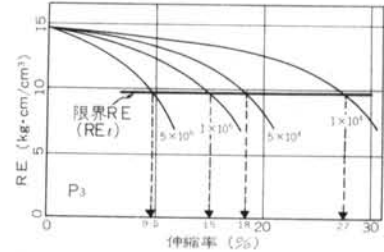


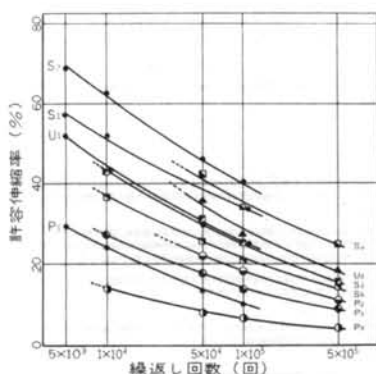
図-31 REと伸縮率の関係

4.2.2 引張試験の結果

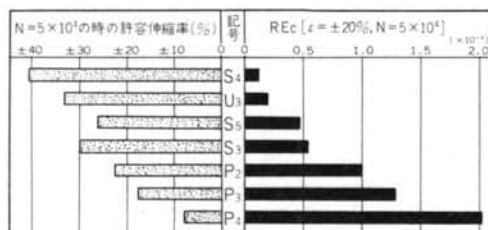
所定の繰返し回数を経たものを、そのままの状態から引張試験に供しS-S曲線を得た。各シーリング材について、伸縮率±20%の場合のS-S曲線を図-23~30に示す。

4.3 疲労と許容伸縮率

3.3で示した手順にしたがってREを算出し、限界REを求めた後、その限界REに至る伸縮率と繰返し回数の関係を求めれば、繰返し回数と許容伸縮率の関係図を得ることができる。図-31は各繰返し回数ごとにREと伸縮率の関係を示したものであり、求めた限界REと各



図—32 繰返し回数と許容伸縮率の関係



図—33 RE_c と許容伸縮率

繰返し回数ごとのRE曲線の交点より、各繰返し回数ごとの許容伸縮率が得られる。他のシーリング材 (§3. のデータを含む) についても、同様の手順で各繰返し回数ごとの許容伸縮率を求めて繰返し回数との関係で示せば図—32のごとくであり、材質別にみると、シリコン>ウレタン>ポリサルファイドの順となる。

次に、3.3で述べた耐疲労性について、さらに伸縮率と繰返し回数の関係から検討する。

伸縮率 ϵ を一定とした場合の、単位繰返しごとに消費したREの平均値 (RE_c) は式(4)で表示できる。

$$RE_c = \frac{RE_0 - RE_N}{N} \quad \dots\dots(4)$$

$$RE_c \cdot N = RE_0 - RE_N \quad \dots\dots(5)$$

ここで RE_N が RE_i に達したとすると、式(5)は式(6)となる。

$$RE_c \cdot N = RE_0 - RE_i \quad \dots\dots(6)$$

式(2)に式(6)を代入すると式(7)が得られる。

$$RE_P = RE_c \cdot N$$

$$N = \frac{RE_P}{RE_c} \quad \dots\dots(7)$$

したがって、シーリング材が一定の伸縮率で繰返しムーブメントを受ける場合、寿命に達するまでの繰返し回数 (N) を多くするための条件は、式(7)より「 RE_P が大きく、 RE_c が小さいこと」である。なお、 RE_P は式(3)によって伸縮率と繰返し回数の関係で検討しており、その結果、耐疲労性を RE_P で検討することの妥当性を指摘した。 RE_c に関しては、図—33に示すように RE_c と許容伸縮率との間には関係があり、 RE_c が小さい程大きな許容伸縮率を採用でき、耐疲労性は RE_c も含めて検討しなければならないことが確められた。

§ 5. 結論

本研究は、シーリング材の疲労特性、およびジョイントデザインに使用する許容伸縮率について検討を与えてきた。その結果、以下に挙げる事項を明らかにすることができた。

- i) REの変化と疲労破壊の関係から、防水機能を保持できる疲労の限界と仮定した限界REは材料固有の値として導き出すことができる。
- ii) 耐疲労性のすぐれたシーリング材とは「健全材のREと限界REの差 (RE_P) が大きく、また単位繰返しごとに消費したREの平均値 (RE_c) が小さいもの」である。
- iii) 限界REより許容伸縮率を合理的に求めることが可能である。この許容伸縮率はエラストマーの種類によって概ねグループ化できるが、配合条件あるいは硬化の程度によって異なる。

なお、§ 4. によって求めた許容伸縮率を広くジョイントデザインの実務資料として使用するには、さらにシーリング材の充てん形状、ウェザリング、環境温度、ムーブメントの速度等について検討を進め、シーリング材の疲労を劣化と絡せて解明し、適確に諸条件との関係が推定できるように進展させるべく努めたい。

また、3.3.1で指摘した疲労過程における内部破壊に関しては、その定量的把握および疲労特性との関係について今後の課題として究めたい。

なお、本研究は筆者らの既報^{7,8)} に対して新たな論考を与えたものである。

<参考文献>

- 1) 松本・小野・丸一：“不定形シーリング材の耐久性に関する研究(第1報) —圧縮セットについて—” 清水建設研究所報

第27号 昭和51年10月

- 2) 小池：“ジョイントシール材の疲労試験” 日本建築学会論文報告集号外 昭和40年9月
- 3) 加藤・吉池・高山：“弾性シーラントの性状に関する研究(XV) 劣化後の疲労寿命と許容ひずみ(1)” 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北) 昭和48年10月
- 4) 加藤・吉池：“弾性シーラントの性状に関する研究(VII) 高・低温時の疲労性能の検討” 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 昭和45年9月
- 5) 日本シーリング工業会：“建築用シーリング材とその正しい使い方” 産報 昭和51年4月
- 6) 松本・小野・丸一：“不定形シーリング材の耐久性に関する研究(連行気泡とその評価)” 日本建築学会関東支部研究報告集 昭和51年
- 7) 松本・丸一：“不定形シーリング材の耐久性に関する研究(疲労とその評価方法)” 日本建築学会関東支部研究報告集 昭和50年
- 8) 松本・小野・丸一：“不定形シーリング材の耐久性に関する研究(許容伸縮率について)” 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海) 昭和51年10月

