

シーリング材の断面形状の耐疲労性に及ぼす影響

EFFECT OF CROSS-SECTIONAL SHAPES OF SEALING BEADS ON THEIR FATIGUE RESISTANCE TO JOINT MOVEMENT

田中享二*, 平居孝之**, 橋田 浩***, 小池迪夫****
Kyoji TANAKA, Takayuki HIRAI, Hiroshi HASHIDA and Michio KOIKE

Five kinds of sealing beads that were different in depth of their concavity were repeatedly extended and contracted by a fatigue machine. Cracks appeared in the corner or the center on the surfaces of some specimens. The time to cracking became clearly shorter on the specimens of deeper concave shapes. To know the reason of these results, the stress distribution on the surfaces of sealing beads were calculated by the boundary element method.

It was concluded by the both experimental and analytical results that a durable cross-sectional shape of a sealing bead to fatigue is a slightly concave shape.

Keywords : sealant, cross-sectional shape, fatigue resistance, cyclic test, joint movement, sealing bead
シーリング材, 断面形状, 耐疲労性, 繰返し試験, ムーブメント, シーリングビード

1. はじめに

シールドジョイントの設計で最も考慮すべきは、ムーブメントの繰返しによる長期間安全性である。その中で中心をなすのが目地幅と目地深さの検討である。この問題については古くは Egons Tons¹⁾ に始まる多くの研究があり、筆者らも近年の目地幅が大きくなる傾向を踏まえて、広範囲にわたる目地幅と目地深さの耐疲労性に及ぼす影響について検討を行った²⁾。そして基本的には目地幅と目地深さの比、形状係数の検討を中心に据えたこの方法でシールドジョイントの設計は可能であることを示した。しかしこれらはすべてシーリング材の断面形状が矩形であることを前提としている。一方、現実に施工されるシーリング材は表面が直線であることはほとんどなく、必ずわずかな凹面を持っている。これは施工の際、ヘラで押しながら仕上げるために凹面になること、あるいはシーリング材中に含まれる揮発成分等の散逸による体積減少等のためである。そういう意味では設計段階で図面に書かれたものと現実のものとは同じでないといえる。このことがシーリングジョイントの繰返しに対する耐久性にとって悪影響を及ぼすのか及ぼさないのかといった点については、実はよく解明されていない。直感的には多少曲面を持つほうがシーリング材のコーナーがなめらかに被着体と接合されるため望ましいよう

にも思えるが、凹形状の深さが深すぎるとシーリングビードの中央部断面が減少し、逆に危険なようにも思える。そういった意味からは、もし施工上あるいは材料の性質上必然的に曲率を持たざるを得ないとしても、その影響についての適正な判断と理解が必要とされる。本研究は以上の観点からシーリングジョイントの断面形態が耐疲労性に及ぼす影響について明らかにしようとしたものである。

2. 既往の研究

シーリング材の断面のプロポーションに関する研究は非常に多いが³⁾⁻⁸⁾、その形状に関する研究は少ない。寺内ら^{9), 10)}の凹状断面をもつシーリング材の内部応力についての解析的研究があるのみである。そのなかで、応力の高くなる部分は曲率の強い部分に生じることを示し、しかもそれは凹形状の深さが深くなるに従って増加すると述べこの問題の重要性を指摘している。ただこの研究では凹形状と応力の分布状態との関係および実用上問題となる欠陥発生現象との関係についてまでは論究されていないため、シーリング材の設計においてどのように考えていけばよいのかの筋道が十分示されているとはいえない。

* 東京工業大学工業材料研究所 助教授・博士 (工学)
** 大分大学工学部 教授・博士 (工学)
*** 清水建設株式会社 研究員
**** 千葉工業大学 教授・博士 (工学)

Assoc. Prof., Research Laboratory of Engineering Materials, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Prof., Oita University, Dr. Eng.
Research Engineer, Shimizu Corporation
Prof., Chiba Institute of Technology, Dr. Eng.

3. 各種断面をもつシーリングジョイントの疲労試験

3.1 試験体

シーリングジョイントではシーリング材が図-1に示すような2枚のパネルと目地深さを調整するバックアップ材により構成される空間に充填される。それゆえ本研究ではこれを図-2に示すような試験体にモデル化した。試料は2成分型ポリサルファイド系シーリング材を使用した。

試験体の作成方法は以下のとおりである。被着体にはアクリル樹脂焼付けボックス状アルミニウム形材(長さ200mm)を使用し、これを2本平行に固定する。裏面側は種々の形状を持つエポキシ樹脂で成形したバックアップ材を装着する。この空間にシーリング材を充填し、表面をバックアップ材と同一の形状をもつヘラで仕上げる。これら試験体を室温環境下(20-25°C)に2週間放置後、50±2°C環境下でさらに1週間養生した。なおバックアップ材は試験中のシーリング材裏面からの観察のため、試料硬化後はこれを除去した。

3.2 シーリング材の断面形状

シーリング材の断面形状の基本目地幅は20mmとした。目地深さはJASS8中の形状係数の範囲の目安¹⁾をもとに13mm(形状係数約2/3)とした。これは通常設計される中で比較的多く採用される寸法であり、かつ予備試験によるとジョイント50%縮小時でもシーリング材が座屈することなく単純に圧縮される限界の形状であったためである。

また断面の凹形状は楕円形を採用した。これは凹状の浅いものから深いものまでひとつの楕円方程式($X^2/A^2 + Y^2/(10\text{mm})^2 = 1$, ここでAは図-2に示す楕円の短軸の長さである。この場合は目地幅が20mmと固定されているため目地深さはAの寸法で決定されることになる。)を利用して曲率を段階的に変えながらその深さを自由に变化させることができること、また楕円はシーリング材の端部で被着体となめらかに接するためである。

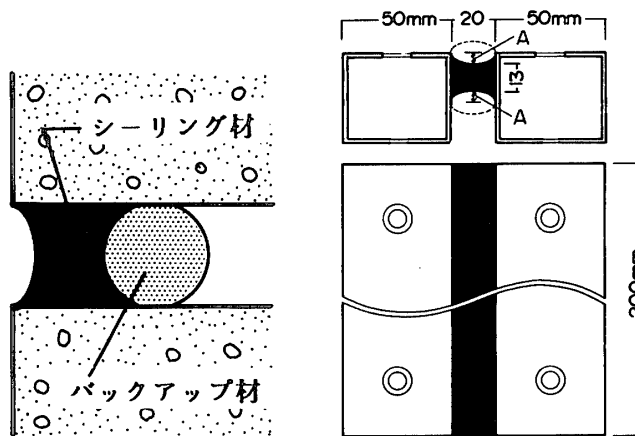


図-1 シーリングジョイントの形状

図-2 試験体の形状とだ円による近似

だ円の寸法 A の寸法	被着体前面と同一面の場合	被着体前面より内側の場合
0mm		
1.25mm		
2.5mm		
5mm		
10mm		

図-3 対称断面試験体の形状・寸法

だ円の A の寸法		
表面側	裏面側	
2.5mm	0mm	
	2.5mm	
	5mm	
	10mm	

図-4 非対称断面試験体の形状・寸法

試験体の形状は表裏対称形を基本としたが、実際のシーリングジョイントでは裏面に用いられるバックアップ材が矩形もしくは円形断面の2種であり、シーリング材の断面形状が表面側と裏面側とでは非対称となることが多い。そのためさらに断面の非対称性が耐疲労性に及ぼす影響を調べておく必要もあり、表側の凹形状の深さをA=2.5mmとし、裏面側の深さを種々変えた試験体も作成した。

またシーリング材の施工位置は、通常施工される被着体と同一面のもと、被着体前面から10mm後退したものの二種とした。これはシーリング材表面が被着体表面と同一面の場合圧縮時にシーリング材が被着体のコーナーの外側にはみでて、被着体のくい込みにより、シーリング材が切断されるような挙動が予想されるため、その影響を除去した純粋に断面形状の影響だけを調べるための試験体も必要であると考えたからである。図-3に表面側と裏面側の形状が対称である試験体の断面を、図-4に非対称試験体の断面を示す。

3.3 疲労試験の概要

疲労試験には写真-1に示す小型部材疲労試験機を用いた。本試験機は油圧サーボアクチュエータにより駆動

するもので全体が恒温槽内に設置されており、一定温度環境下での試験が可能である。試験条件は以下に示す前報²⁾と同様の条件とした。

(1) ムーブメント

ムーブメントの基本波形は、拡大・縮小を繰り返すサインカーブであり、振幅は試験体目地幅の±10%、±30%、±50%の3段階とした。ここでの目地幅は20mmであるので各々±2mm、±6mm、±10mmとなる。周期は10秒(6回/分)とした。これは現実を観測されるムーブメントよりかなり速いが、試験時間短縮のためこの速度を採用した。

(2) 繰返し回数

繰返し回数は原則として欠陥の発生する時までとし、欠陥の生じない場合は100万回で試験を打ち切った。

(3) 試験温度

試験はすべて20±2°Cで行った。

(4) 試験体の観察

観察は最初の100回までは10回ごと、1,000回までは100回ごと、その後は1,000回ごとに試験機を停止し、表面および裏面(ファイバースコープを用いて観察)について亀裂発生の有無、およびその位置、進行状態などを調べた。

(5) 試験体の数

断面の形状とムーブメントの振幅の種類ごとにそれぞれ2個ずつ試験を行った。

3.4 疲労結果および考察

繰返し疲労のためにシーリング材には亀裂が生じたが、その発生位置は図-5

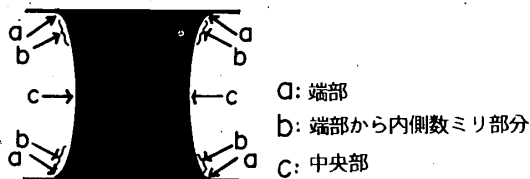


図-5 亀裂の発生位置

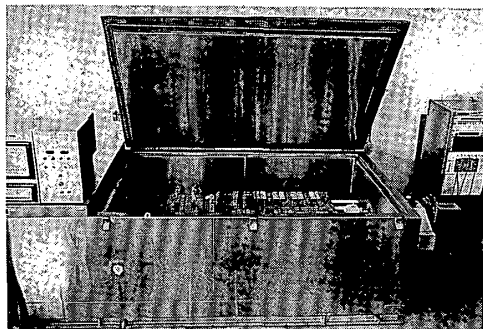


写真-1 疲労試験の状況

に示す三カ所の位置からであった。すなわち、a;被着体に沿ったシーリング材表面の両端部(被着体表面からの界面はく離ではない)、b;シーリング材の両端から内側数ミリの範囲(この場合は細い亀裂が一本入るのではなく、まずしわ状の疲労破壊を起こしその中のいくつかもしくは一本が次第に内部に深く裂け入ってゆく)、c;シーリング材の中央部(この場合は亀裂が一本だけ中央部に入りそれが内部に深く裂け入ってゆく)である。多くの場合亀裂はただ一種類のものだけが成長してゆくが、変形率の大きい場合は途中で新たな亀裂が生ずる場合もある。

だ円Aの寸法	ムーブメントの振幅	欠陥発生までの繰返し回数						亀裂発生位置
		10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	
0mm	±10%							a b a b a b a b
	30							
	50							
1.25	10%							b b b b b b b b
	30							
	50							
2.5	10%							c c c c c c c c
	30							
	50							
5	10%							c c c c c c c c
	30							
	50							
10	10%							c c c c c c c c
	30							
	50							

図-6 対称断面試験体の疲労試験結果(シーリング材が被着体前面と同一面の場合)

だ円Aの寸法	ムーブメントの振幅	欠陥発生までの繰返し回数						亀裂発生位置
		10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	
0mm	±10%							
	30							
	50							
1.25	10							
	30							
	50							
2.5	10							
	30							
	50							
5	10							
	30							
	50							
10	10							
	30							
	50							

図-7 対称断面試験体の疲労試験結果(シーリング材が被着体前面から10mm内側に入っている場合)

だ円Aの寸法	ムーブメントの振幅	欠陥発生までの繰返し回数						亀裂発生位置
		10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	
2.5mm	0mm							
	2.5							
	5							
	10							

図-8 非対称断面試験体の疲労試験結果

これら疲労試験の結果を対称断面試験体のシーリング材が被着体前面と同一面の場合については図-6に、シーリング材が被着体前面から10mm内側に入っている場合については図-7に、非対称断面試験体については図-8に示す。図中の各欄では2本の線で2個の試験体の結果を表している。多くの試験体では数百回から数千回の繰返し回数で上記亀裂が発生し、それが次第に深く大きくなり、数万回で破断した。ただしムーブメントの振幅の小さい場合は、100万回の繰返しでも欠陥の発生しないものもあった。

(1) 耐疲労性に及ぼす凹形状の深さの影響

図-9にシーリング材断面の凹形状の深さと亀裂発生までの繰返し回数を示す。シーリング材の表面が直線である矩形断面より、多少曲率のついた凹形状のほうが耐

疲労性は向上する。ただし凹形状が深くなりすぎると耐疲労性は逆に低下する。本試験で耐疲労性が最良であったのはA=1.25mm(凹形状の深さが目地幅の1/16)の時であった。この傾向はムーブメントが±30%、±50%のいずれの場合にも見られるが、凹形状の深すぎる場合の耐疲労性の低下は±50%の場合に特に著しかった。

(2) 亀裂の発生位置と凹形状の深さとの関係

亀裂発生位置と凹形状の深さとの関係を表-1に整理し示す。深さがゼロの時、すなわち矩形断面の場合には亀裂はすべてシーリング材の両端部で発生している。深さが1.25~2.5mmの場合にはシーリング材の両端からごくわずかに内側に入った領域で発生する。一部シーリング材の中央部に亀裂が発生するものもある。深さ5mm以上の場合はすべてシーリング材の中央部で亀裂が発生した。

表-1 凹形状の深さと亀裂発生位置

凹形状の深さ 楕円Aの寸法 (mm)	対称断面試験体 シーリング材が被着体 前面と同一面の場合	対称断面試験体 シーリング材が被着体 前面から10mm内側に入 っている場合	非対称断面試験体
0	a	a	a
1.25	b	b,c	c
2.5	c	b,c	c
5	c	c	c
10	c	c	c

a: 被着体に沿ったシーリング材の両端部
b: シーリング材の両端から内側数ミリの範囲
c: シーリング材の中央部

(3) シーリング材の被着体表面からの位置の影響

同じく図-9にシーリング材が被着体前面から10mm内側に入った位置に施工された場合の疲労試験結果を同一面に施工された場合と比較して示す。明らかにシーリング材の目地内での位置の影響が見られる。通常で行われる、シーリング材表面が被着体表面と同一面の場合には、後退しているものに比べて亀裂発生までの回数は早くなる。ただしこれは凹形状が浅い場合にのみ顕著である。これには目地縮小時のシーリング材の形態が関係しており、凹形状の浅い場合には目地縮小時にシー

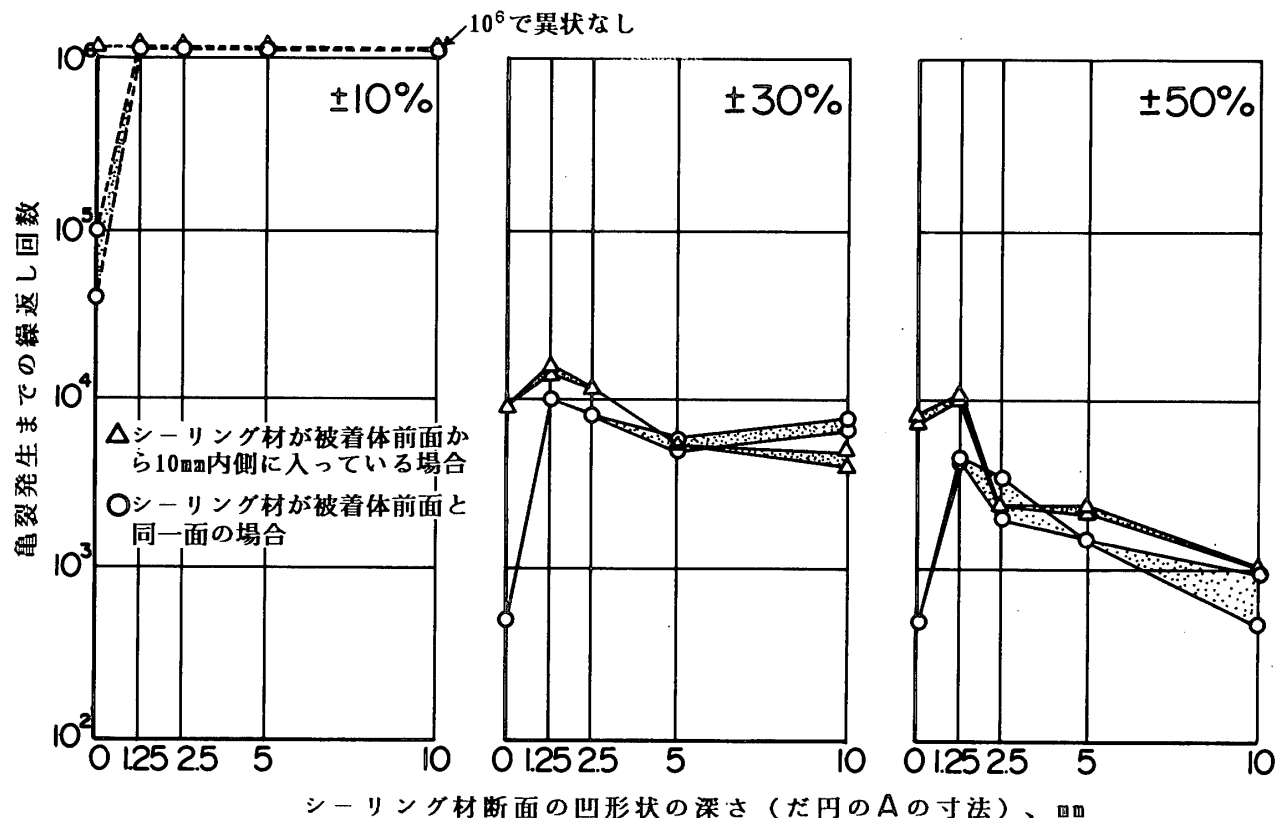


図-9 対称形シーリング材の亀裂発生までの繰返し回数と断面の凹形状の深さとの関係

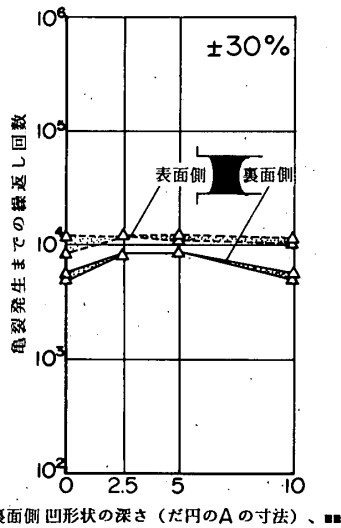


図-10 非対称形シーリング材の亀裂発生までの繰返し回数と裏面側凹形状の深さとの関係

リング材が被着体表面の外側にはみ出るような状態になり、被着体のコーナーにくい込むような挙動が生じるためと思われる。したがって凹形状が深くなり、目地縮小時にシーリング材が被着体表面から外側へはみ出さない場合には、シーリング材の目地内での位置による差は見られなくなる。

(4) シーリング材の断面形状が非対称であることの影響

図-10に非対称形シーリング材の亀裂発生までの繰返し回数を表面側と凹形状の深さを変えた裏面側とを比較し示す。まず裏面側であるが、この面は前項試験と同様の傾向が見られており、深さ2.5mmから5mm(この場合の試験体には深さ1.25mmの試験体は含まれておらず、試験はされていない。)で耐疲労性が良好でこれよりも浅すぎても深すぎても耐疲労性は低下する。次に表面側すなわち打ち込み面側であるが、多少のバラツキは見られているものの裏面の凹形状のいかにかわらず亀裂発生までの回数が約 10^4 程度とほぼ一定の値となっている。このことはこの程度のプロポーシヨンの断面形状の場合には表側と裏側の非対称性はお互いにそれほど影響を与えていないと推定され、実用上各々の面は独立して考えても良いように思われる。

4. シーリング材断面の縁応力について

疲労試験で明らかにしたように、シーリング材の断面形状が矩形の場合と、凹形状ではその深さが深い場合に耐疲労性が著しく低下した。これは明らかに断面形状により応力状態が異なるためであり、このことを考察するために応力の数値計算を試みた。シーリング材の破壊はすべてその表面から生じており、その観点からはシーリング材より剛性の大きな被着体から強制変形されるシーリング材断面の縁応力が重要であり、ここでは異種材料の

接合問題¹²⁾で精度の良い結果の得られる境界要素法のプログラムを用いて解析を行った。

4.1 解析の概要

(1) 解析モデル

解析モデルは図-11に示す二次元モデルである。予備計算によりその精度を検討し、隅角部でその分割を細かくした矩形で64要素、凹形状が深くなるに従って要素数を増やし、最大88要素(A=10mmの場合)までのモデルを設定した。現実のシーリング材は奥行き方向に長く連続していることを考慮し平面ひずみ状態で計算した。試験体の断面形状と同じになるように凹形状深さ(Aの値)を0から10mmまで変化させたシーリング材断面5形態についてモデルを作成して数値計算を行った。

(2) 数値計算上の諸条件

現実のシーリング材の多くのものは粘弾性的性質を示すが、ここでは比較的短時間である10秒の周期でムーブメントを与えた疲労試験における試験体の応力分布の概要を知ることを目的としているため、時間依存性の材料的性質を考慮せず静的弾性解析とした。試験に用いた2成分系ポリサルファイド系シーリング材は図-12の引張・圧縮試験結果に示されるようにヤング率が低く大きな変形を生じ、また応力レベルが上がるにつれてヤン

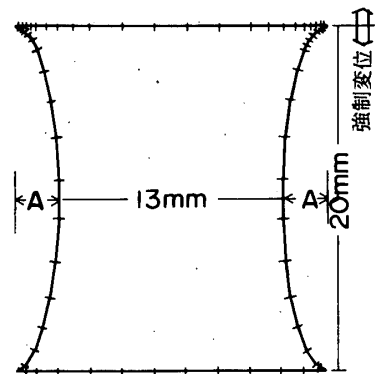


図-11 解析モデルと要素の設定 (A=2.5mmの時の例)

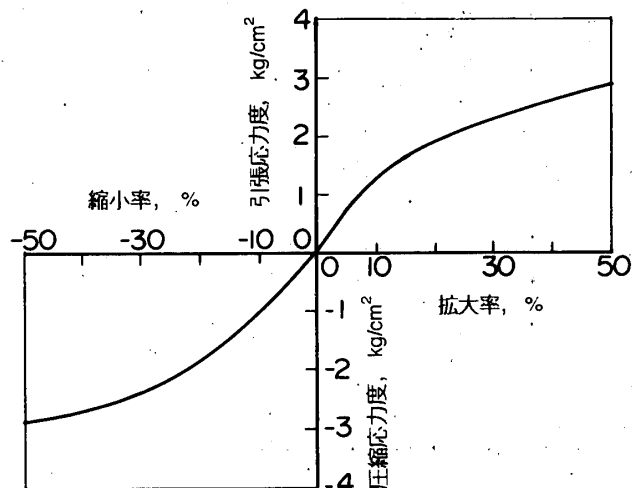


図-12 試験に用いたシーリング材の力学的性質(100mm/min)

グ率が小さくなる。このため目地幅5%ごとの変形に対しその応力レベルのヤング率とポアソン比を与え、モデル各要素の変形および応力を計算し、変形は順次形状に加算して増加させる作業を繰り返す逐次計算の方法により、大変形を考慮した解析を行った。ポアソン比は実験より応力レベルが異なってもほぼ0.48であったので、いずれの場合もその値を用いた。

4.2 計算結果および考察

(1) 縁応力度の分布

シーリング材の縁に沿って生じている縁応力度を図-13に示す。目地幅の変形率が大きくなるに従って縁応力度が高くなるがその分布は均一ではない。目地幅拡大時、縮小時のいずれも極値はシーリング材の隅角部およびその近傍と目地中間点の二カ所に存在する。

(2) 凹形状の深さと縁応力度の関係

縁応力度が極値となる位置は断面の形状と密接に関係しており、矩形断面の場合は隅角部での応力度が著しく高くなっているが、凹形状の深さが大きくなるに従ってその位置が少しずつシーリング材の目地中間点の方に移動してくる。一方中央部の縁応力度の極値の位置は凹形状の深さがいづれであっても目地幅の中間点である。

次にその大きさであるが、図-14にシーリング材の

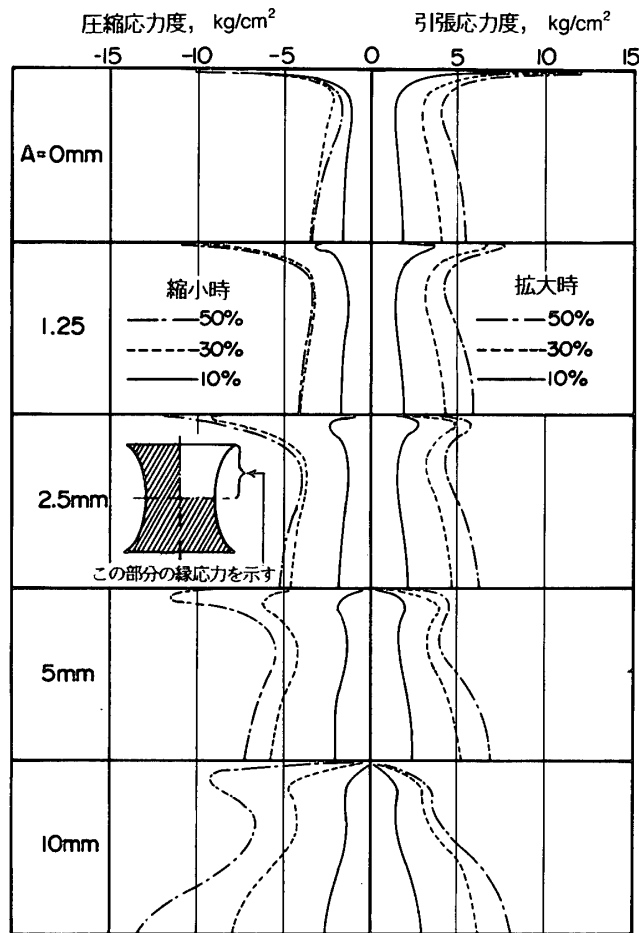


図-13 ジョイント拡大時、縮小時のシーリング材の縁応力度の分布（シーリング材の1/4の部分について図示）

疲労時の亀裂発生に関与すると考えられる目地幅拡大時について、隅角部およびその近傍と目地中間点の縁応力度の極大値を凹形状の深さとの関係で図示する。隅角部近傍に生ずる応力度の極大値は凹形状の深さが深くなるに従って急激に減少する。一方中間点の応力度は凹形状が深くなるに従って増加するがそれほど急激ではない。当然のことであるが、目地幅拡大率が大きい場合には応力全体が高くなるが、この傾向は目地幅拡大率が10%と30%と50%のいずれでも同様である。

(3) 疲労試験の亀裂発生位置と縁応力度分布との関係

図-14にさらに疲労試験における亀裂発生位置を、凹形状の深さごとに、図-5に示したa, b, cの表示で書き込み示す。変形率±10%の疲労試験の場合では矩形断面のもの以外は亀裂が発生しない。±30%, ±50%の場合には疲労試験における亀裂発生位置が(a)シーリング材の両端部および(b)シーリング材の両端から内側数ミリの範囲の場合は、計算結果によると隅角部およびその近傍の応力度の極値が目地中間点応力度よりも大きくなっている時である。一方、(c)シーリング材の中央部で亀裂が発生したものは、逆に目地中間点での応力度が隅角部およびその近傍での応力度よりも大きくなっている時である。すなわち疲労試験における亀裂

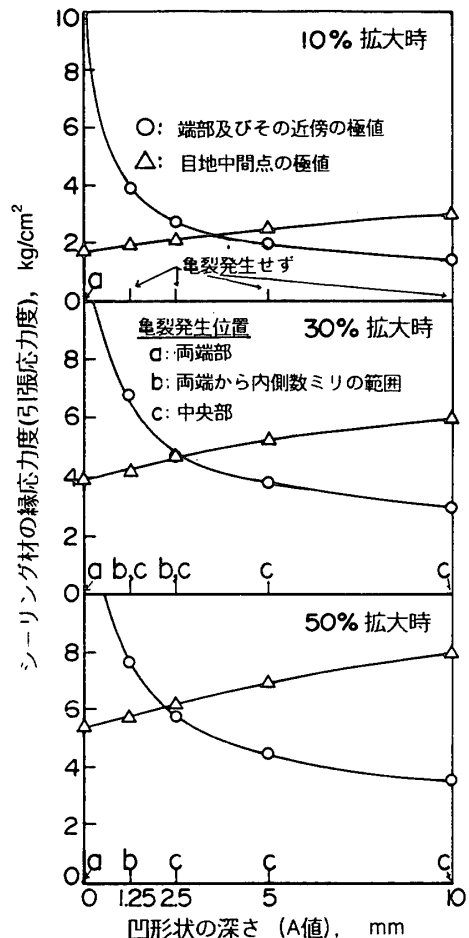


図-14 シーリング材の縁応力度の二つの極値および亀裂発生位置と凹形状の深さとの関係

発生位置は、シーリング材の隅角部およびその近傍と目地中間点の縁応力度の大きさとその大小に強い相関を示している。

5. 耐疲労性の観点から見たときのシーリング材の最適断面形状

隅角部およびその近傍の縁応力度の極値は凹形状の深さが深くなるに従い低下し、逆に目地中間部の縁応力度は凹形状の深さが深くなるに従って増加する。したがって耐疲労性が最も良好と考えられるのは二つの縁応力度の大きさがいずれも小さくバランスのとれている時である。図-13の計算結果によると二つの縁応力度の極値の大きさが等しくなる凹形状の深さは10%拡大時で2.5mmより少し大きい場合、30%拡大時では2.5mm、50%拡大時では2.5mmより少し小さい場合であり、図-9、図-10の疲労試験結果においては、1.25mm(目地幅の1/16)もしくは2.5mm(目地幅の1/8)程度の時であり、両結果は完全に一致はしていないがほぼ似た領域で耐疲労性が最大となっている。

すなわち耐疲労性の観点からはシーリング材の断面は矩形よりは凹形状の方が望ましく、その凹形状の深さは最適な断面形状の領域があり、例えば多く設計される20mm程度の目地幅では凹形状の深さは1/16~1/8程度が適していると考えられる。

6. おわりに

シーリング材の耐疲労性に及ぼす断面形状の影響について検討した。得られた結論を要約すると以下のとおりである。

- (1) 疲労試験より耐疲労性の優れるシーリング材の断面形状は矩形より凹形状の時であること、またその深さは深すぎても良くないことを実験的に明らかにした。
- (2) 数値計算による縁応力度の解析により、シーリング材の表面にそって応力レベルの高い部分が隅角部およびその近傍と、目地中間点の二カ所に生ずることを示した。また疲労試験で亀裂の発生する位置はこの応力度の大きい箇所であり、試験結果の耐疲労性はその縁応力度と強い相関をもっていることを明らかにした。
- (3) 耐疲労性を最大とする最適断面形状は縁応力度のバランスがとれている場合であると考えられ、多く設計される20mm程度の目地幅では深さが目地幅の1/16~1/8程度の浅い凹形状の場合であることを示した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、試験体製作には鈴木秀樹氏(昭石化工(株))、試験の一部には林文秀氏(鮮京建設(株)、当時大学院生)の協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) Egons Tons : Theoretical Approach to Design of a Road Joint Seal; Highway Research Board I (1959)
- 2) 田中享二, 小池迪夫, 橋田 浩, 岡本 肇, 林 文秀 : 矩形断面をもつシーリングジョイントの耐疲労性に及ぼす形状・寸法の影響; 日本建築学会構造系論文報告集, 第390号, pp.10~17, 1988
- 3) 加藤正守 : 弾性シーラントの性状に関する研究(モジュラス, 伸び率と目地幅, 深さとの関係について); 日本建築学会大会学術講演要旨集, P.74, 1965
- 4) 加藤正守, 吉池祐一 : 弾性シーラントの耐久性におよぼす形状寸法の影響(その1) 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.461~464, 1976
- 5) 加藤正守, 吉池祐一 : 建築用シーリング材の応力に及ぼす形状寸法の影響について—その1. 応力と形状係数の関係; 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.277~280, 1985
- 6) 松本洋一, 小野 正, 丸一俊雄 : 不定形シーリング材の耐久性に関する研究(断面形状とRE); 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.255~256, 1977
- 7) 加藤正守, 吉池祐一 : 建築用シーリング材の耐久性に関する研究(その14) 耐疲労性に及ぼす断面寸法の影響について; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.555~556, 1986
- 8) 寺内 伸, 松永勝巳 : カーテンウォールジョイントシールに関する研究—ジョイントシールの最適断面形状に関する検討; 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.273~274, 1985
- 9) 寺内 伸, 鎌形修一, 松永勝巳 : カーテンウォールジョイントシールの最適断面形状に関する研究(その2); 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.553~554, 1986
- 10) 寺内 伸, 岡野昌明 : ジョイントシーリング断面の最適形状に関する研究(その2); 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.557~558, 1987
- 11) 日本建築学会 : 日本建築学会標準仕様書 JASS 8 防水工事, 1986
- 12) 寺崎俊夫, 瀬尾健二, 平居孝之 : 残留応力の整理パラメータ, 異種材料の境界接合部に生ずる残留応力について(第1報); 溶接学会論文集, 第5巻, 第4号 pp.103~108, 1987

(1992年3月10日原稿受理, 1992年5月19日採用決定)