

シーリング材の剪断疲労に及ぼす断面寸法と形状の影響

EFFECT OF CROSS SECTIONAL SIZE AND SHAPE ON
FATIGUE RESISTANCE OF SEALANT
BY SHEAR MOVEMENT

田中享二*, 宮内博之**, 平居孝之***

Kyoji TANAKA, Hiroyuki MIYAUCHI and Takayuki HIRAI

The effect of cross sectional size and shape of polysulfide sealing beads on shear fatigue resistance to shear movement was studied experimentally and analytically. Nine kinds of rectangular sealing beads with different sizes and six kinds of concave shape beads were repeatedly deformed by shear joint movement. The time to cracking was not affected by size for the rectangular beads, and it became shorter for the beads with deeper concave shape. To learn the reason for these results, the stresses of the beads were studied using a finite element method. It was concluded from both experimental and analytical results that a durable cross section of a sealing bead to shear movement is rectangular or slightly concave shapes.

Keywords: Sealant, Shear fatigue, Cross sectional size, Cross sectional shapes, Cyclic test, Stress analysis

シーリング材、剪断疲労、断面寸法、断面形状、繰り返し試験、応力解析

1. はじめに

シーリング目地の設計で最も考慮すべき点は、目地のムーブメントの繰り返しに対する長期水密性・気密性等の維持である¹⁾。この長期安全性を確保するためにシーリング材の機械的疲労性（追従性）が要求され、目地設計では伸縮と剪断に対して検討がなされる。しかし、実際のカーテンウォールなどの目地設計では多くの場合、剪断の動きに対しては安全側にあり、伸縮の動きに対して目地寸法が決定されてしまうことがほとんどであった。そのためシーリング材の剪断疲労性に対する関心は低く、研究例も少なかった。実際、シーリング材の剪断疲労の基本的なデータさえほとんど蓄積されていないのが実状であり、唯一検討のなされるカーテンウォールによる外壁設計における実大パネルを用いた剪断実験などでも、伸縮の条件で求められたシーリング目地の安全性の再確認という意味合いが強かった。

しかし、1995年度の兵庫県南部地震では、カーテンウォールの剪断ムーブメントによるシーリング材の破損が多数発生した。これらは、ムーブメントが設計値よりはるかに大きなものであったにせよ、剪断ムーブメントの繰り返しに対する研究の必要性を再認識させるものであった。さらにまた最近では、建築の高層化が進み、地震力ではなく風力によりその構造が左右される超高層建物が出現し

はじめている。この場合のムーブメントは継続されるのが特徴であり、剪断ムーブメントの繰り返しによる影響が予想される。このような状況を考えると、剪断疲労の問題に、今後はより強い関心を払ってゆく必要があると思われる。

シーリング目地の設計とは、最終的には目地寸法と形状を決定することである。目地寸法については想定される剪断ムーブメントと、シーリング材固有の許容剪断変形率を勘案することにより求められ、それに調和する目地深さが決定される。

まず目地寸法についてであるが、前報²⁾で伸縮のムーブメントについては目地幅と目地深さの比（形状係数）が同じであったとしても、目地幅自身の寸法も関与し、目地幅が大きくなるに従い耐疲労性が低下することを示したが、剪断ムーブメントに対してはどうか。まず、この点について検討する必要がある。

また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、わずかな凹形状をもっている。これは、施工最終工程でのヘラによる押さえ仕上げ、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が、さらには裏面は円形のバックアップ材が挿入されることもあり、断面は凹形状となることが圧倒的に多い。伸縮ムーブメントに対しては、その形状の影響を受けることが示されている³⁾が、剪断ムーブメントに対

* 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

** 東京工業大学 大学院生・工修

Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, M. Eng.

*** 大分大学工学部福祉環境工学科 教授・工博

Prof., Dept. of Human Welfare Engineering, Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

してはどうなのであろうか。その点についても検討する必要がある。
 本研究は以上の観点から、剪断疲労に対して、シーリング目地の断面の寸法と形状が及ぼす影響について明らかにし、シーリング目地設計における最適断面形状を検討したものである。

2. 既往の研究

シーリング材の伸縮ムーブメントに対しての、断面の寸法および形状に関する研究は、非常に多い⁴⁻⁹⁾が、剪断ムーブメントに対する研究は少ない。この中でF. W. Shisler III等¹⁰⁾はシーリング材が受ける変形を形態的に整理し、その中で剪断変形を取り上げ、変形形態ごとに力学的性質について明らかにした。またJ. M. Klosowski等¹¹⁾は窓ガラス固定に用いられるシーリング材では、引っ張りと同様に面外への剪断の問題も重要であることを指摘し、剪断力と変形との関係について目地幅を変数として詳細に検討した。さらにM. S. Zarghamee等¹²⁾は窓ガラス部分のシリコンシーリング材の地震時の挙動を対象とし、引っ張りと剪断について研究し、実用的設計法を提案している。しかし、これらの研究はいずれも一回の挙動を対象に性能を述べているだけで、カーテンウォールで実用上、問題とされる多数回の繰り返しに対する検討は全くなされていない。

3. 剪断疲労試験 (シリーズ I)

：断面寸法の影響を調べるための試験

3. 1 試験体の寸法

断面寸法の影響の検討は、基本的な矩形について行った。断面寸法は図1に示すように、目地幅5, 10, 20mm, 目地深さ5, 10, 20mmの3段階、合計9種類とした。

試験体の作成法は次のとおりである。試料には二成分形ポリサルファイド系シーリング材を用いた。被着体には図2に示すようにボックス型アルミニウム型材 (25×50×280mm) を用い、これを2本

D \ W	5 mm	10 mm	20 mm
5 mm	D/W=1	D/W=0.5	D/W=0.25
10 mm	D/W=2	D/W=1	D/W=0.5
20 mm	D/W=4	D/W=2	D/W=1

図1 試験体の断面寸法

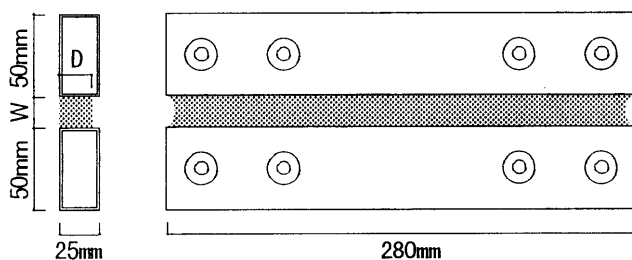


図2 試験体 (矩形断面)

平行に固定した。次いで発泡ポリエチレンバックアップ材を挿入し、所定の深さに調節した後、プライマーを塗布し、シーリング材を充填した。表面を被着体と同一平面となるようにへらで仕上げた後、室温環境下 (20~25℃) で4週間養生した。また、バックアップ材は実験中にシーリング材を裏面から観察するため、試料硬化後はこれを除去した。なお試験体の両端は、端部での応力集中による亀裂発生を避けるため、養生終了後円弧状に整形した。

3. 2 疲労試験の概要

疲労試験には、写真1に示す小型培材疲労試験機を使用した。これはムーブメントを油圧サーボアクチュエーターにより駆動・制御するもので任意振幅、任意速度の試験が可能である。さらに試験機全体が恒温槽内に設置されており、一定温度環境下で試験を行うことが出来る。

剪断ムーブメントの振幅は、シーリング材の設計剪断変形率の標準値¹³⁾を参考として、基準を±60%とし、それより過酷な条件として±100%の2段階とした。周期は10秒 (6回/分)、繰り返し回数は欠陥の発生するまでとし、欠陥の生じない場合は10万回で試験を打ち切った。試験温度はすべて20±2℃で行った。試験体数は2個ずつとした。

なお試験体の観察は最初の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、表面および裏面について亀裂発生の有無及びその位置を調べた。亀裂発生は、Saint-Venantの原理¹⁴⁾によれば、試験体の端部から目地幅および目地深さと同程度離れると、応力と変位が安定するとされており、その領域を欠陥観察範囲とした。

3. 3 試験結果及び考察

疲労試験により、一部の試験体に亀裂が発生した。その発生位置は被着体近傍であり、そのまま被着体に沿って成長した。JASS 8の設計法によればシーリング目地は、目地幅が決まれば同設計法に記載される形状係数 (目地深さDと目地幅WのプロポーシオンでD/Wで表される) をもとに、目地深さが求められ、最終的にその断面寸法が決定されるという過程をとる。従って剪断疲労に対しても形状係数の影響を明らかにしておく必要がある。そのため、疲労試験結果を形状係数ごとに整理し、図3に示した。

疲労試験であるため、結果にはかなりばらつきがあるが、形状係

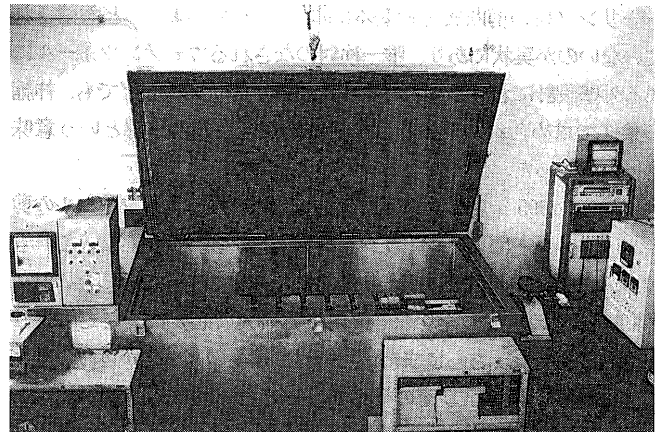


写真1 小型培材疲労試験機

数のいかに係わらず全体的には平行に推移しており、ここで測定した範囲では寸法が変わっても、亀裂発生回数にはそれ程、差がないように思われる。すなわち、目地の剪断ムーブメントの変形率が同じならば、シーリング材の断面寸法の影響はそれ程大きくないと思われる。

4. 剪断疲労試験 (シリーズII)

：断面形状の影響を調べるための試験

シリーズIの剪断疲労試験から、断面寸法の影響はそれ程大きくないと思われるため、シリーズIIでは、通常設計されるシーリング材の断面寸法に固定し、断面形状の影響を調べた。

4.1 試験体の形状

図4に試験体の寸法と形状を示す。断面形状の基本目地幅は20mmとした。目地深さはJASS 8中の形状係数の範囲の目安¹³⁾をもとに13mm (形状係数2/3)とした。

また断面の凹形状は楕円形を採用した。これは凹形状の浅いものから深いものまでひとつの楕円方程式 ($X^2/(10\text{mm})^2 + Y^2/A^2 = 1$, ここでAは図5に示す楕円の軸の長さの1/2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

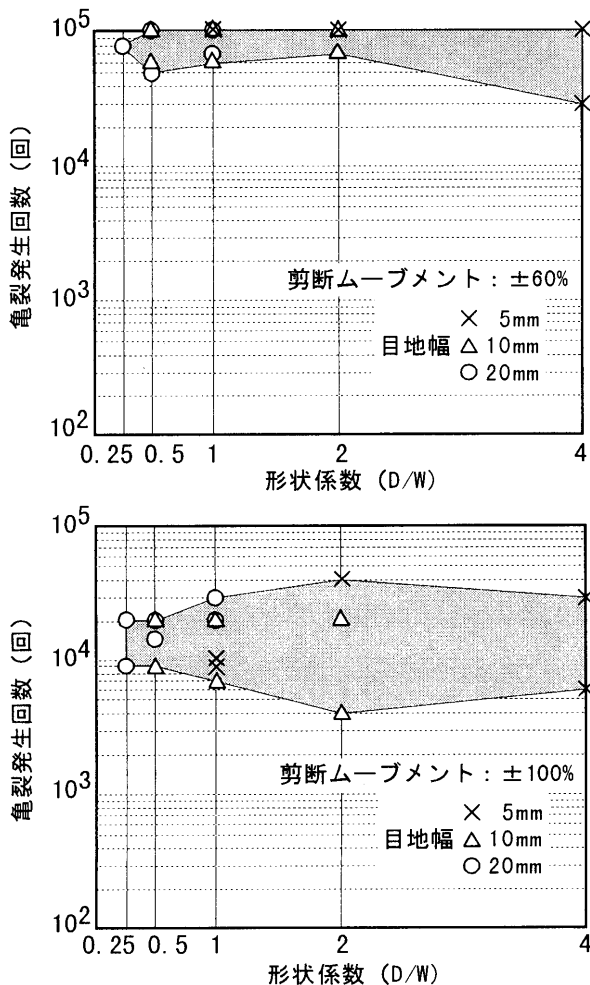


図3 矩形断面における剪断疲労試験結果

の端部で被着体となめらかに接するためである。ここでは形状を図5に示すように、凹形状の深さを0mm (矩形) から20mmまで変化させた。

試験体の作成法は次のとおりである。試料及び被着体は、シリーズIと同様のものを用いた。目地部分には、発泡ポリエチレンバックアップ材と、凹形状断面を作成するために凸型に象ったエポキシ樹脂系のバーを挿入し、プライマーを塗布後、シーリング材を充填した。試料表面は、各々の凹形状深さに整形したヘラで仕上げた後、室温環境下 (20~25°C) で4週間養生した。また、バックアップ材及び凸形状のバーは、試料硬化後除去した。なお、試料の両端は、養生終了後円弧状に整形した。

4.2 疲労試験の概要

疲労試験は、基本的には断面寸法の影響を調べる試験の場合と同様であるが、この場合は剪断ムーブメントの大きさの影響を今少し詳しく調べるために±60%、±80%、±100%の3段階とした。

4.3 試験結果及び考察

(1) 亀裂の形態

このシリーズIIの試験でも、繰り返しの進行とともに亀裂が発生したが、断面形状によって亀裂形態が異なった。それらは写真2に示す3種類に大別された。すなわち、a: 亀裂が被着体近傍に発生し、そのまま被着体にそって平行に進行する形態、b-1: 目地の凹形状の中央部で発生し、そこからX状に進行する形態、b-2: 同じく凹形状の中央部で発生するが、そのまま中央部にそって被着体に平行に進行する形態である。ちなみにシリーズIの断面寸法の影響を調べる疲労試験では、亀裂形態はすべて(a)形態のみであった。

(2) 剪断疲労に及ぼす凹形状深さの影響

図6に凹形状の深さと亀裂発生までの繰り返し回数の関係を示す。ムーブメント±60%の場合は、10万回疲労を与えても亀裂の発生が見られなかったが、±80、±100%の場合は凹形状が深くなると明らかに耐疲労性は低下している。ただし凹形状の浅い範囲では、

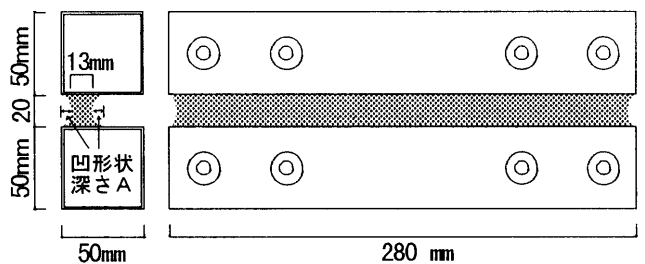


図4 断面形状を変数とした試験体

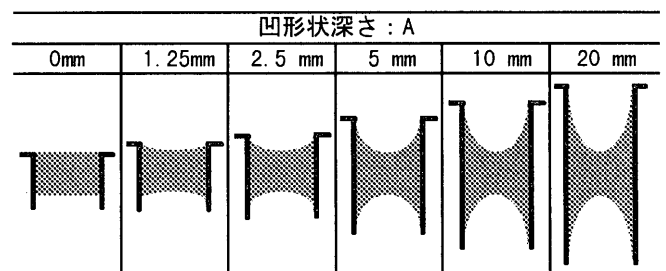


図5 試験体の凹形状深さと断面

それ程大きな差は見られていない。

(3) 亀裂形態と凹形状深さとの関係

同じく図6に亀裂の形態を記号で示した。矩形断面のもの及び凹形状が浅い試験体では、形態aの被着体に沿っての亀裂である。凹形状が中程度の場合には、形態b-1の目地中央部分から亀裂が発生し、X状に進展する。凹形状が最も深い場合には、形態b-2の同じく目地中央部から発生するが、そのまま中央部に沿って進展する。すなわち凹形状が深くなるに従って、亀裂進行の形態は a → b-1 → b-2 へと変化する。

5. シーリング材の応力について

疲労試験結果より、シーリング材の剪断而疲労性は凹形状が深い場合に低下すること、また亀裂の形態も変わることが明らかになったが、これは明らかに断面形態によって応力状態が異なるためであ

り、これを考察するため応力状態をFEM解析により検討した。

5.1 解析の概要

(1) 解析モデル

解析モデルは図7に示すように、6面体20節点のアイソパラメトリック要素を用いた三次元モデルを用いた。形状の近似性と計算結果に含まれる誤差の予備計算から、要素数120のモデルとした。シーリング材の剪断疲労性に凹形状が影響するので、断面が楕円形になる凹形状の曲面を精度良く近似できるように、要素の稜の中間にある節点の座標を適切に設定した。計算は、試験体の断面形状と同じ凹形状深さ(Aの値)を0から20mmまで変化させたシーリング材断面6形態について行った。

(2) 数値計算上の諸条件

現実のシーリング材の多くのは粘弾性的性質を示すが、ここでは応力分布の概要を知ることが目的としているため、材料の時間依存性的性質を考慮せず静的弾性解析とした。試験に用いた2成分形ポリサルファイド系シーリング材は図8に示すように応力レベ

亀裂形状	亀裂状況
a: 端部	
b-1: X字状	
b-2: 中間部	

写真2 剪断疲労試験による亀裂形状

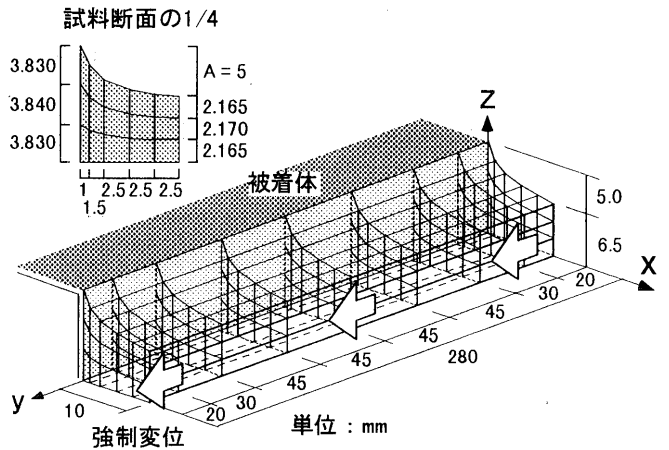


図7 解析モデルと要素の分割の例 (A=5mmのときの例)

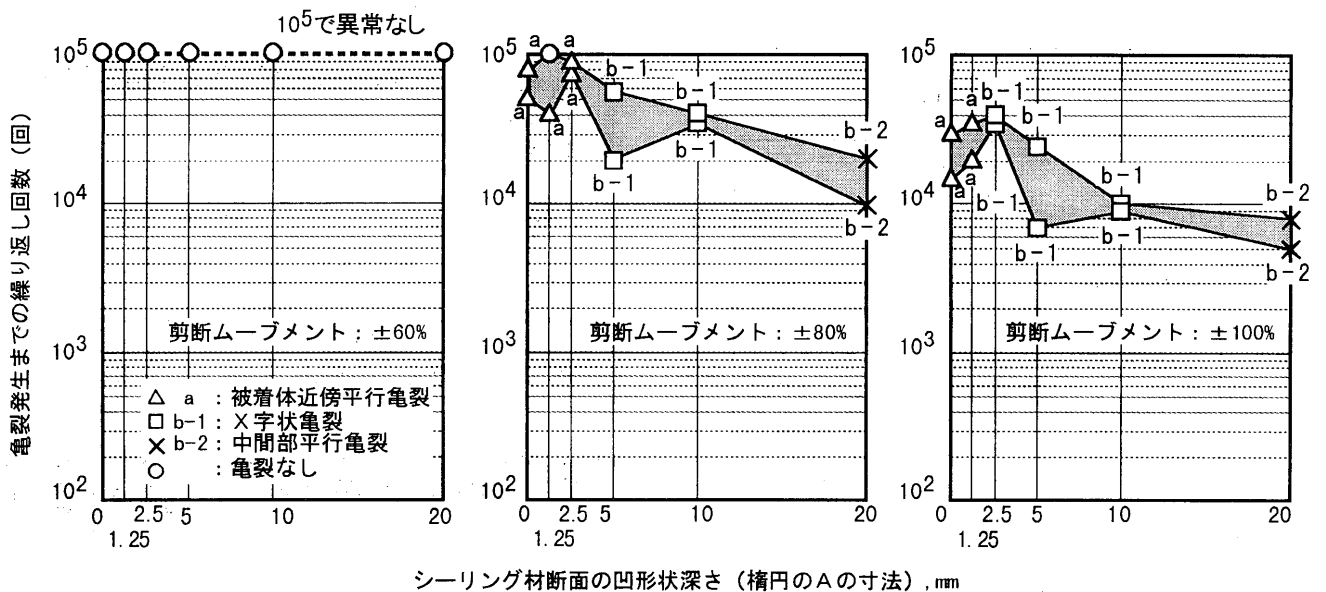


図6 凹形状の深さと亀裂発生までの繰り返し回数との関係

ルが上がるにつれてヤング率が小さくなる（この図は試験体の変形速度 100mm/分の剪断試験結果をもとに得られたものである）。そのため、これを3本の直線で近似した引張応力度-歪関係にモデル化して計算に用いた。

5. 2 計算結果および考察

(1) シーリング断面内の引張主応力度の分布

シーリング材は非常に伸びの大きいエラストマーであり、目地の剪断変形時には、材料が大きく伸長された状態にある。そのため、ここでは引張主応力に着目した。また応力計算結果は、当然試験体の長さ方向端部で大きくなるが、ここで検討しようとしているのは、一般目地部分についてであり、考察には Saint-Venant の原理をもとにした試験体端部からの影響が少ない位置（試験体の長さ方向中央部分）の引張応力について比較検討する。

シーリング材断面内の引張応力度の分布を、表面からの深さごとに図9に表す。これには凹形状の深さ 5 mm の場合の例を示すが、表層部の応力度の変化が最も大きく、内部に入るに従ってほぼ均一になる。また高い応力度は表層部分の中央部分に見られる。

(2) 凹形状の深さと表層部応力度の関係

高い応力度は表層部分で見られるため、図 10 に表層部における最大引張主応力度の分布を形状ごとに示す。矩形断面ではどの位置でも同一の応力であるが、凹形状については中央部分で応力が大きくなる。またその大きさは凹形状が深くなればなるほど上昇する。

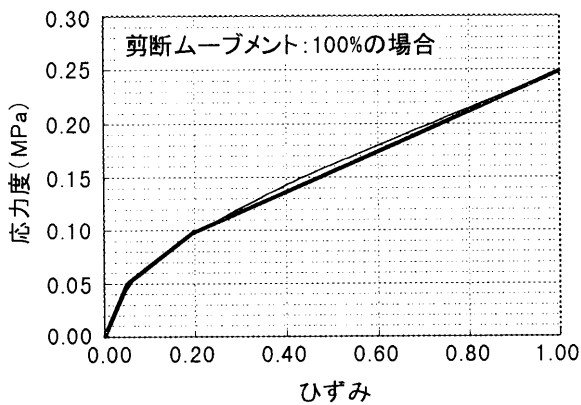


図8 応力-歪み曲線

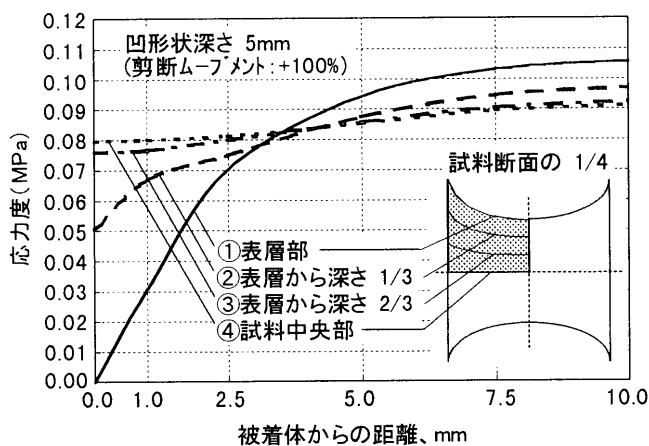


図9 試験体断面内の主応力度

(3) 疲労試験による亀裂発生位置と応力度分布との関係

凹形状深さの深い断面の場合は、応力が中央部分で著しく高くなり、中央部分から亀裂が発生しやすくなると考えられる。矩形断面もしくは凹形状の浅い場合は、被着体近傍で必ずしも応力レベルが高い訳ではないが、実際には被着体による端部拘束を受けながら変形方向が交互に変えられるため疲労しやすく、その部分から亀裂が発生したものと考えられる。

6. 剪断疲労耐久性から見た時のシーリング材の最適断面形状の考察

凹形状が深くなると引張主応力度が極端に大きくなり、剪断耐疲労性が低下すると考えられる。一方、矩形もしくは凹形状の浅い断面の場合は極端に応力度の高い部分がなくなっており、耐疲労性の向上することが期待される。これらのことは、剪断疲労試験でも同様な結果が得られている。従って、耐疲労性の観点から望ましい断面形状は、矩形もしくは浅い凹形状であるといえる。

7. おわりに

シーリング材の剪断疲労に及ぼす断面寸法と断面形状について検討した。得られた結論を要約すると次のとおりである。

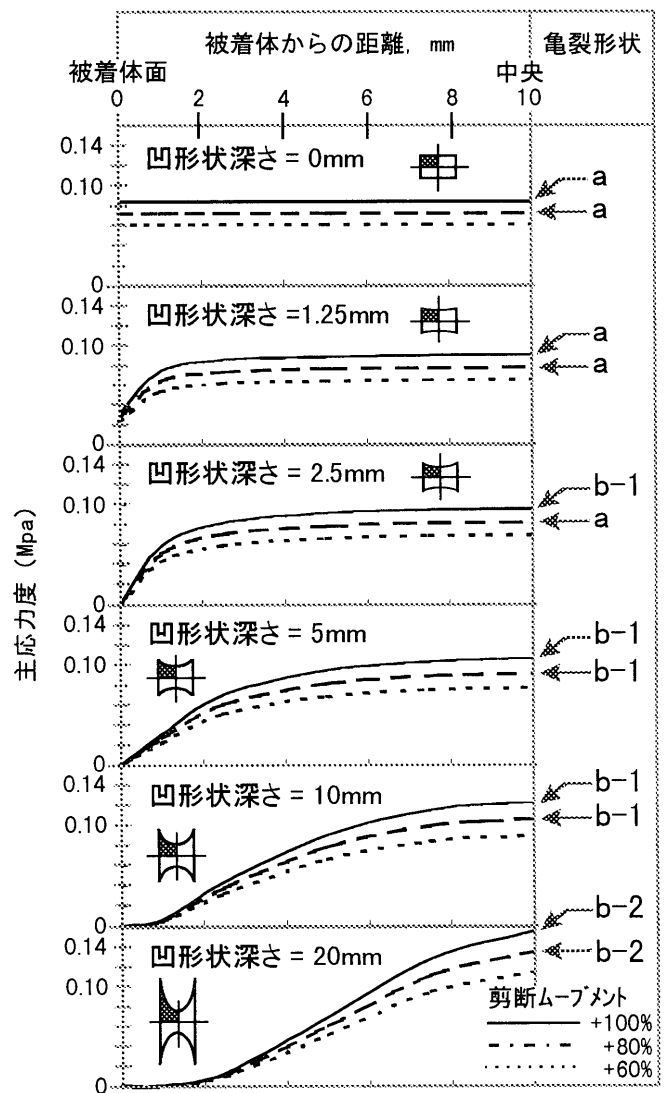


図10 各形状における表層部の応力度

- (1) 断面寸法については剪断変形率が同じであれば、その影響はそれ程大きくはない。
- (2) 断面形状については、凹形状の深さが大きな影響を与え、その深さが深くなると耐疲労性は低下する。
- (3) 剪断耐疲労性の観点からは矩形もしくは浅い凹形状断面が望ましいと考えられる。

本研究では、試料にポリサルファイド系シーリング材を用いて、剪断耐疲労性に及ぼす断面寸法と形状の影響について評価を行った。この結果については、シーリング材の応力状態に起因するものであり、基本的には他の試料を用いた場合でも適用できるものと思われる。

なお、ここでの議論は剪断疲労に対してだけなされたものであるが、カーテンウォールでは伸縮の疲労も受けている。そのため、実際には両者を考慮した上で、寸法・形状は決定されなければならない。特に剪断と伸縮が複合された場合には、より複雑な疲労形態が予想されるが、これらについては今後の課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、試験体製作および実験には須田祐子氏(当時東京電機大学)の協力を得ました。心より謝意を表します。

なお、この研究の一部は平成8、9年度文部省科学研究費補助金基盤研究(C)(2)課題番号08650665によりました。

参考文献

- 1) Egons Tors: Theoretical Approach to Design of a Read 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) 田中享二、平居孝之、橋田 浩、小池迪夫: シーリング材の断面形状の耐疲労性に及ぼす影響; 日本建築学会構造系論文報告集、第438号、pp.23~29、1992
- 4) 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
- 5) 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性(その1); 日本建築学会関東支部研究報告集、P.461~464、1976
- 6) 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、P.277~280、1985
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) F.W.Shisler III and J.M.Klosowski: Sealant Stresses in Tension and Shear; Building Sealants, Materials, Properties and Performance, ASTM STP 1069, American Society for Testing and Materials, pp.95-107,1990
- 11) Klosowski, J.M. and Wong, A., "Shear Component of a Structural Sealant Glazing Joint," Science and Technology of Building Seals, Sealants, Glazing and Waterproofing, ASTM STP 1168, C.J.Parise, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp.97-105, 1992
- 12) M.S.Zarghamee, T.A. Schwartz and M.Gladstone: Seismic Behavior of Structural Silicone Glazing; Science and Technology of Building Seals, Sealants, Glazing, and Waterproofing, ASTM STP 1286, American Society for Testing and Materials, pp.46-59,1996
- 13) 日本建築学会: 日本建築学会標準仕様書 JASS 8 防水工事、P.283、1993
- 14) 西田正孝: 応力集中 森北出版社 1967、増補版 1978

(1998年2月9日原稿受理、1998年4月2日採用決定)