シーリング目地の交差部の耐剪断疲労性の評価

EVALUATION OF FATIGUE RESISTANCE OF SEALANT TO SHEAR MOVEMENT AT CROSS AREA OF SEALED JOINT

宮内 博之*, 田中 享二**

Hiroyuki MIYAUCHI and Kyoji TANAKA

Fatigue resistance of straight area in sealed joint design has been mainly evaluated, but there is a lot of cross area of sealed joint in actual building. Fatigue resistance of sealant to shear movement at cross area of sealed joint was studied experimentally and analytically. Three kinds of sealant were evaluated. The cross joint specimen and straight joint one were repeatedly deformed by shear movement. As a result, the cracks appeared at corner area earlier than the straight area. Moreover, it was shown that the stress of sealant was concentrated at corner area by using the finite element analysis. It was made clear that corner area of sealed joint provided lower shear fatigue resistance than the straight area of it.

Keywords : Sealant, Fatigue resistance, Joint, Corner, Shear movement, Stress Concentration

シーリング材、耐疲労性、目地、隅角、剪断ムーブメント、応力集中

1. はじめに

前報¹⁾²⁾では、シーリング材の耐剪断疲労性に及ぼす断面寸法、断面形状について検討を行い、建物の目地の中で最も多くの面積を占める直線的な目地である一般目地を対象とした剪断疲労試験方法の提案を行った。しかし、実際の建物では、一般目地以外にも、表1、及び図1に示すような十字目地、T字目地、L字目地などの交差目地が見られ、これらの目地には隅角部が必ず存在する。ここで、外力によりムーブメントが生じた場合、目地の形状が急激に変化する隅角部付近で応力分布の片寄りが生じ、その結果、耐疲労性に影響を及ぼすと考えられる。

これら交差目地において、どの程度耐疲労性が低下するのかは、工学的観点からほとんど検討されておらず、目地幅の変更も実際には考慮されていない状況にある。また、先の阪神・淡路大地震の際に見られたように、そのムーブメントは非常に大きかったにせよ、剪断ムーブメントによるシーリング目地隅角部での損傷は多く見られ、この検討は目地設計の観点からは非常に重要と思われる。

これらの背景を踏まえ、本研究では、剪断ムーブメントに対する交差目地の耐疲労性について検討することを目的とし、一般部に対する隅角部の応力集中の度合いと、応力レベルの違いがどの程度耐疲労性に影響を及ぼすのかについて調べた。

表1 目地及び耐疲労性の検討箇所の名称の定義

目地の名称		耐疲労性の検討箇所の名称
一般目地		一般部
交差目地	十字目地	隅角部
	T字目地	
	L字目地

図1 一般目地と交差目地の形態、及び耐疲労性の検討箇所

* 東京工業大学建築物理研究センター 助手・工修

** 東京工業大学建築物理研究センター 教授・工博

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

既往の研究については、前報で述べたように、シーリング材の剪断の研究に関する報告自体非常に少なく³⁾⁻⁶⁾、交差目地の影響について述べた文献に至っては、Zarghamme⁷⁾らが、ガラスカーテンウォールに施工されたシリコン系シーリング材の地震時の挙動について検討し、剪断ムーブメントによってその十字目地の亀裂が発生したことを報告しているのみである。つまり、一般目地以外の目地の耐久性についての研究は殆どなされていないのが実状である。

2. シーリング目地形態の違いによる耐疲労性の評価にあたって

建物の外壁の形態によって、シーリング目地の形態は多少異なってくるが、大きくシーリング目地形態を分類すると、一般目地、十字目地、T字目地、L字目地に分けられる。しかし、目地の交差部が存在するかどうかの分類と考えれば、一般目地は交差部の存在しない目地、一般目地以外の目地である十字目地などは、交差目地として大別できる。これは、交差目地の形態が異なっても、応力の大小で目地の耐疲労性を評価できると考えられる。本研究では、交差目地の影響をあらかじめ検討した結果⁸⁾⁻⁹⁾、一般目地の次に多くの面積を占める十字目地を交差目地の代表的目地として取り上げ、一般目地と共に応力集中の度合いや耐疲労性の影響について検討を行った。

3. 疲労試験における十字目地の耐剪断疲労性

3.1 試験体

一般目地と十字目地を模した試験体を図2に示す。

試験体の形としては、地震力・風力を受けた場合に発生する剪断ムーブメントを再現できる最小限のものである。また、長手方向の目地

※シーリング材の目地幅20mm、目地深さ13mm

図2 試験体の種類

表2 シーリング材の物理的性質

項目	2成分形 シリコン系 (記号: SR-2)	2成分形 変成シリコン系 (記号: MS-2)	2成分形 ポリサルファイド系 (記号: PS-2)
50%引張応力 (N/mm ²)	0.13	0.13	0.11
最大引張応力 (N/mm ²)	0.47	0.45	0.39
伸び (%)	775	560	685
色	グレー	グレー	グレー

の長さ設定は、目地の端部の影響が生じる範囲をあらかじめ数値解析¹⁰⁾⁻¹¹⁾を行い検討してから図2に示す長さに設定した。断面寸法は基本的な目地寸法である目地幅20mm、目地深さ13mmとした。

シーリング材には、2成分形シリコン系シーリング材(記号: SR-2)、2成分形変成シリコン系シーリング材(記号: MS-2)、2成分形ポリサルファイド系シーリング材(記号: PS-2)を用いた。なお、表2に本研究で用いた3種類のシーリング材の物理的性質について示す。

試験体の作成方法は次の通りである。被着体にはアルミニウム材を用い、これを2本平行に固定した。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。シーリング材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、シーリング材が硬化後、これを除去した。なお、試験体数は各々2個ずつとした。

3.2 剪断疲労試験の概要

疲労試験には、前報¹⁾⁻²⁾と同様の剪断疲労試験機を使用した。シーリング目地に発生する剪断ムーブメントは、外力に対する外壁部材の動きの違い、すなわちスライド方式とロッキング方式の支持方法によって多少異なる。しかし、本研究では十字目地試験体と一般目地試験体に単純に繰り返し剪断ムーブメントが生じるスライド方式の支持方法を用いて、耐剪断疲労性の検討を行なった。

剪断ムーブメントの振幅は、試験体目地幅(20mm)の±30%(±6mm)、±60%(±12mm)、±100%(±20mm)の3段階とした。なお、剪断ムーブメントの与え方は、写真1に示すように試験体被着体の一方を試験装置移動板に、もう一方を試験装置固定板に固定し、移動板を所定の剪断ムーブメントになるように設定した。周期は10秒(6回/分)、試験温度は20±2℃で行なった。繰り返し回数については、亀裂の発生する時までとし、亀裂の生じない場合は前報¹⁾⁻²⁾では10万(=10⁵)回としたが、本研究では一般目地と十字目地の耐疲労性の差とムーブメントの影響をより詳しく調べるために100万(=10⁶)回まで疲労試験を行なった。なお、実際の建物に使用されるシーリング材は、剪断ムーブメントと同時にウェザリングの影響も受ける。このため、今回の試験において100万回の時点で健全であった試験体であっても、実際の屋外環境では、亀裂が発生する可能性がある。

写真1 十字目地試験体に剪断ムーブメントを与えた時の状況

3.3 試験結果及び考察

3.3.1 亀裂の形態

十字目地試験体に繰り返し剪断ムーブメントを与えた後のPS-2シーリング材の亀裂発生状況を写真2に示す。一般目地については被着体近傍で亀裂が発生し、被着体に沿って亀裂が進行した。また、十字目地については、隅角部から亀裂が発生し、被着体に沿ってもしくは斜めに亀裂が進行した。

3.3.2 十字目地と一般目地の亀裂発生回数の比較

繰り返し剪断ムーブメントを与えたときの一般目地と十字目地における亀裂発生回数の結果を図3に示す。全てのシーリング材における剪断ムーブメント±30%、及び一般目地SR-2で±60%では100万回の時点で亀裂が発生せずその差が見られなかったが、MS-2及びPS-2における±60%と全てのシーリング材における±100%では、十字目地試験体の方が一般目地試験体より先に亀裂が発生した。亀裂発生回数については、十字目地は一般目地に比べ桁以上早かった。

3.3.3 十字目地における剪断ムーブメントと亀裂発生回数の関係

図4に十字目地における各シーリング材ごとの剪断ムーブメントと亀裂発生回数の関係を示す。剪断ムーブメント±30%を与えた場合、100万回の時点で亀裂が発生しなかったため、剪断ムーブメントと亀裂発生回数の正確な関係は得られなかった。しかし、100万回での亀裂が、剪断ムーブメント±30%～±60%の間で発生すると考えた場合、剪断ムーブメントが大きくなるほど、曲線の傾きが大きくなり、その1回の変位に対するシーリング材の疲労に与える影響が大きくなると思われる。また、剪断ムーブメントがある程度小さくなると、逆に曲線の傾きが小さくなり、耐疲労性が増すことがわかった。

3.3.4 シーリング材の種類の影響

シーリング材の性能の上では、SR-2の耐疲労性は、MS-2及びPS-2に比べ良好であることがわかった。ただし、図5に示すように、試験

体2個の亀裂発生回数の平均値を用い、一般目地に対する十字目地の亀裂発生回数の比を求めた場合、どのシーリング材においても、隅角部での亀裂発生回数の低下率は同程度の値を示した。これより、本実験の範囲において、一般目地に対する十字目地の耐疲労性は、シーリング材の種類に大きくは依存しないことがわかった。

試験体	剪断ムーブメント	シーリング材	亀裂発生までの繰り返し回数				
			10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶
一般目地	±30%	SR-2					
		MS-2					
		PS-2					
	±60%	SR-2					
		MS-2					×
		PS-2				×	×
	±100%	SR-2				×	×
		MS-2			×	×	
		PS-2			×	×	
十字目地	±30%	SR-2					
		MS-2					
		PS-2					
	±60%	SR-2				×	×
		MS-2			×	×	
		PS-2			×	×	
	±100%	SR-2			×	×	
		MS-2		×	×		
		PS-2		×	×		

× 亀裂が発生したことを意味する。

図3 一般目地と十字目地の亀裂発生回数

一般目地

十字目地

写真2 亀裂の発生状況

図4 十字目地における剪断ムーブメントと亀裂発生回数の関係

4. 十字目地の応力分布解析

4.1 解析の概要

4.1.1 解析モデル

一般目地に対する十字目地の耐疲労性の低下の影響を明らかにする目的で、シーリング材の応力分布状態をFEM 数値解析¹¹⁾⁻¹²⁾により調べた。また、一般部の応力度と比べた場合の隅角部での応力集中の度合い（応力集中率）についても検討した。

応力分布解析は、図2に示す疲労試験で用いた一般目地と十字目地の試験体に対してモデル化したもので行い、その解析モデルを図6に示す。また、解析モデルに対しては、引張りを受ける側の最大応力部に亀裂が入ることを想定したものとした。解析モデルの拘束条件は、図6で示すように目地開放面以外の下側4面の斜線部を固定する。変位条件は、上側4面に剪断変位+30%、+60%、+100%の変

位量を与えることとした。要素タイプは2次元モデル、8接点四角形要素とし、最大応力部に最小の要素を割り当てた要素分割を行った。なお、要素の大きさによる解の収束性は確認している。

4.1.2 数値計算上の諸条件

シーリング材は、非線形性、大変形をもつ材料である。これらを考慮した解析を行うために、歪エネルギー関数を用いた。その関数は、シート状試験体(90x90x2mm)を用い、単軸引張試験と2軸引張試験より得られた各シーリング材の引張応力と伸び率の関係(図7)から求めた。

4.2 解析結果及び考察

4.2.1 シーリング材の応力分布について

PS-2における剪断変位+60%を一例にとり、応力分布を調べた結果を図8に示す。図8から一般目地に比べ、十字目地の隅角部で応

図5 各シーリング材における十字目地の亀裂発生回数の低下率

図6 解析モデル

図7 引張応力と伸び率

図8 シーリング目地内の最大主応力度分布
(PS-2において、剪断変位+60%を与えた場合)

図9 目地隅角部の応力状態
(PS-2において、剪断変位+60%を与えた場合)

図10 一般部と隅角部における剪断変位と最大主応力との関係

力が集中することがわかる。この応力集中の生じている箇所を拡大し図9に示すと、その応力集中は、隅角部の非常に狭い領域で生じていることがわかる。

4.2.2 剪断ムーブメントに対する隅角部と一般部の応力レベルの比較

各シーリング材ごとに剪断変位を変えた場合の、最大主応力の变化について図10に示した。各材料のモジュラスの違いにより応力レベルの絶対値は多少異なるが、隅角部、一般部共に剪断変位が増せば、応力レベルが高くなり、その剪断変位に対する最大主応力の勾配は、隅角部の方がより大きくなることがわかった。

4.2.3 隅角部の応力集中について

図10の剪断変位と最大主応力との関係をもとに、隅角部は一般部に比べてどの程度応力集中するか調べた。なお、本研究では、この応力集中の度合いを一般部に対する隅角部の応力集中率 (α) とし定義し、式(1)を用いて検討した。

$$\alpha = \sigma_c / \sigma_o \quad \dots (1)$$

σ_c : 隅角部における最大主応力 (N/mm²)

σ_o : 一般部における最大主応力 (N/mm²)

その結果、図11に示すように3種類のシーリング材は、所定の剪断変位に対して、ほぼ同じような応力集中率を示した。また、その大きさは、剪断変位+30%において2.0以上の値を示すとともに、剪断変位が大きくなると、徐々に応力集中率も増加した。

5. 十字目地の耐疲労性の評価

5.1 応力と亀裂発生回数の関係

十字目地が一般部より耐剪断疲労性が劣るのは、解析結果でもわかるように、応力レベルの大きさに起因すると考えられる。そこで、繰り返し剪断ムーブメントを与えたときの一般部と隅角部の最大主応力と、亀裂発生までの繰り返し回数との関係について調べた。この結果、図12に示すようにSR-2では、亀裂が発生しなかった試験体が多かったため、明確に変化が見られなかったが、MS-2及びPS-2については、隅角部と一般部の亀裂発生回数は領域をもった一つの曲線で表せることができ、応力が高くなるほど曲線の傾きは大きくなり、隅角部はより早い段階で亀裂が発生しやすくなることがわかった。

5.2 一般部と隅角部における剪断ムーブメントと亀裂発生回数の関係

JASS 8¹²⁾では各種シーリング材ごとに設計剪断変形率(目地幅に

図11 剪断変位と応力集中率の関係

に対する剪断変形の割合)を設定しているが、それぞれの値は、標準となる一般目地に対する要求性能を示しているため、同時に隅角部がどの程度の性能をもつかは不明である。そこで、所定の剪断ムーブメントを与えた場合、一般部に対して隅角部はどの程度耐疲労性が低下するかを、5.1の応力と亀裂発生回数の関係をもとに同一の式を用いて数式化を試みた。まず、応力と亀裂発生までの繰り返し回数の関係について調べた。式(1)から、

$$\sigma_c = \alpha \cdot \sigma_o \quad \dots (2)$$

次に、図10から各シーリング材における一般部での剪断変位と最大主応力の関係を求めると、ほぼ式(3)で近似できる

$$\text{SR-2: } \sigma_o = 0.0018 s$$

$$\text{MS-2: } \sigma_o = 0.0018 s$$

$$\text{PS-2: } \sigma_o = 0.0015 s$$

... (3)

s : 剪断変位 (%)

また、応力と亀裂発生までの繰り返し回数の関係については、比較的多く用いられているBasquin式¹³⁾をもとにして関係を求めた。

$$N = A \cdot \sigma_c^{-B} \quad (B > 0) \quad \dots (4)$$

N : 亀裂発生回数 A, B : 係数

5.1で述べたように、応力と亀裂発生回数の関係は領域をもった一つの曲線の中で表されるが、目地設計の観点からより安全側をとって、

図12 最大主応力度と亀裂発生回数の関係

表3 一般部と隅角部における
亀裂発生回数と剪断ムーブメントの関係

シーリング材	隅角部と一般部の亀裂発生回数の予測式
SR-2	$N=146 (\alpha \cdot 0.0018 s)^{-4.24}$
MS-2	$N=15.5 (\alpha \cdot 0.0018 s)^{-4.89}$
PS-2	$N=1.81 (\alpha \cdot 0.0015 s)^{-5.31}$

亀裂発生回数の低い値をもとに係数を求めた。これより、各シーリング材において、

$$\text{SR-2: } N=146 \sigma_c^{-4.24}$$

$$\text{MS-2: } N=15.5 \sigma_c^{-4.89}$$

$$\text{PS-2: } N=1.81 \sigma_c^{-5.31} \quad \dots (5)$$

として、応力と亀裂発生回数の関係を求めることができる。ここで、式(2)、(3)、(5)より、各シーリング材において一般目地および十字目地に同じ剪断ムーブメントが生じた場合の亀裂発生回数の関係について、表3のように式を求めることができる。この表3の式によれば、一般部と隅角部における亀裂発生回数 N は、剪断変位 s と応力集中度 α との関係で示される。 $\alpha=1$ の場合一般部の亀裂発生回数を表すが、隅角部の場合には α の値が大きいくほどより早い段階で亀裂が発生する。目地設計では、隅角部における α の値をできるだけ1に近づけることが、耐剪断疲労性を増加させるために必要になってくる。この問題については今後の課題とする。なお、今回目地幅20mmの場合の耐疲労性について検討したが、実際の建物に適用される目地幅は、20mmに対して極端に大きくなったり、小さくなったりしないため、目地幅が変化しても、おおよそではあるが表3で示す式により亀裂発生回数を予想することができると考えられる。

6. まとめ

本研究では、シーリング目地の交差部における耐剪断疲労性について検討し、次のような結果及び知見が得られた。

- (1) 剪断疲労試験結果により、十字目地の隅角部は一般部に比べ早い段階で亀裂が発生し、亀裂発生回数の低下率は3種類のシーリング材共に同様の傾向を示した。
- (2) 数値解析の結果、十字目地の隅角部の非常に狭い領域で応力

が集中した。また、一般部に対する隅角部の応力集中度は、3種類のシーリング材共に所定の剪断ムーブメントに対してほぼ同じ同じ値を示すとともに、剪断変位が増すごとに徐々に大きくなった。

- (3) 応力を基準にして考えると、一般部と隅角部の亀裂発生回数は領域をもった一つの曲線で表せることができる。また、応力が高くなるほど、曲線の傾きは大きくなり、隅角部ではより亀裂が発生しやすいため、耐剪断疲労性を低下させる恐れがあることがわかった。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金奨励研究(A)「各種シーリング材の耐疲労性の比較と目地設計への適用」によりました。

参考文献

- 1) 田中享二、宮内博之、平居孝之：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；日本建築学会構造系論文集、第511号、pp. 47-52、1998. 9
- 2) 田中享二、宮内博之：シーリング目地の新しい剪断疲労試験方法の提案、及びそれを用いての目地形状の影響の検討；日本建築学会構造系論文集、第522号、pp. 7-12、1999. 8
- 3) Hiroyuki Miyauchi and Kyoji Tanaka: New Shear Fatigue Test Method for Building Sealants and Some Tests of Sealants with Various Shapes; Durability of Building and Construction Sealants, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, pp. 275-285, 2000
- 4) F. W. Shisler III and J. M. Klosowski: Sealant Stresses in Tension and Shear; Building Sealants, Materials, Properties and Performance, ASTM STP1069, American Society for Testing and Materials, pp. 95-107, 1990
- 5) J. Iker and A. Wolf: Secondary Stresses Induced by Shear Movement in Structural Glazing Sealants; Materials and Structures, vol. 25, pp. 137-144, 1992
- 6) J. M. Klosowski and A. Wong: Shear Component of a Structural Sealant Glazing Joint; Science and Technology of Building Seals, Sealants Glazing and Waterproofing, ASTM STP 1186, American Society for Testing and Materials, pp. 97-105, 1992
- 7) 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
- 8) 宮内博之、田中享二：シーリング目地コーナー部の耐疲労性評価；日本建築学会大会学術講演梗概集[A]、pp. 69-70、1999
- 9) 宮内博之、田中享二：ムーブメントに対するシーリング目地隅角部と目地一般部の耐疲労性の評価；日本建築学会大会学術講演梗概集[A]、pp. 47-48、2000
- 10) Ogden, J. T.: Finite Elements of Nonlinear Continua, McGraw-Hill, New York, 1972
- 11) Twizell, E. H. and R. W. Ogden: Non-linear Optimization of the Material Constants in Ogden's Stress-Deformation Function for Incompressible Isotropic Elastic Materials; J. Austral. Math. Soc. Ser. B, vol. 24, 1983
- 12) 日本建築学会：日本建築学会標準仕様書 JASS 8防水工事、pp. 283、1993
- 13) 河本実：金属の疲労、朝倉書店、1962

(2001年9月7日原稿受理、2001年12月5日採用決定)