

論文 表面被覆材のひび割れ追従性疲労試験に関する基礎的研究

国枝 稔^{*1}・長嶋 宏弥^{*2}・上田 尚史^{*3}・中村 光^{*4}

要旨: 表面被覆材の耐久性を検討するうえでの指標の提案を目的とし、表面被覆材の疲労破壊のメカニズムに着目し、3種類の表面被覆材を対象としたひび割れ追従性疲労試験を実施した。(1)ひび割れの変動幅が小さいほど、き裂発生までの繰返し回数が大きくなること、(2)静的な試験から得られたひび割れ追従性の高い表面被覆材が、必ずしも疲労破壊に対する抵抗性が高いわけではないこと、(3)種類の違いによらず、繰返し回数の増加に伴って、表面被覆材の薄膜部分や空隙等に起因した小さな穴が発生し、それらが互いに連結していく破壊形態であることが明らかとなった。

キーワード: 表面被覆材, ひび割れ追従性疲労試験, き裂, 不均質性, ゼロスパン

1. はじめに

劣化したコンクリート構造物の補修方法のひとつに表面被覆補修がある。適用された表面被覆材の劣化形態として“膨れ”, “剥れ”ならびに“割れ”が生じることが報告されている¹⁾。“割れ”に関しては、母材コンクリートに生じたひび割れに沿って生じる場合が多く、日射や乾湿によるひび割れ幅の変動や活荷重の作用によるひび割れ幅の変動に追従できずに生じていると推察される。そこで、適切な性能を有する表面被覆材を選定するためには、ひび割れ追従性の評価が重要とされている²⁾。土木学会から提案されている表面被覆材のひび割れ追従性試験方法(JSCE-K 532-1999)などにより、ひび割れ追従性の評価が行われる場合が多いが、動的な作用(疲労)による影響を確認し、必要に応じて補修設計レベルに反映させることが重要である。

表面被覆材の疲労破壊に対する抵抗性に関しては、飯塚ら³⁾は、15種類の仕様を対象とした100万回疲労試験、および5種類の仕様を対象とした1000万回疲労試験を実施している。いずれも、ひび割れ追従性に着目した試験であり、例えば試験条件として±0.02mm, 10Hzの変動を用いている。また、成瀬ら⁴⁾も、室内動的ひび割れ追従性試験を行っている。しかし、これらの実験的研究は、ある条件に対する表面被覆材の疲労破壊に対する抵抗性を確認したものにとどまり、破壊のメカニズムに着目した表面被覆材の疲労特性が明らかにされた研究はない。

本研究では、3種類の表面被覆材を対象としたひび割れ追従性疲労試験を実施し、疲労破壊に対する抵抗性を実験的に確認した。特に、疲労試験後の供試体の破断面を観察することで、表面被覆材の疲労破壊のメカニズム

についての考察を行った。

2. ひび割れ追従性試験

2.1 供試体概要

本研究では、寸法10×40×120mmのU溝モルタル板(溝の幅5mm, 深さ5mm)の表面に表面被覆材を塗布した供試体を使用した。対象とした表面被覆材は、表1に示すように、柔軟型エポキシ樹脂系(エポキシ)、ポリブタジエン樹脂系(ポリブタ), アクリル系ポリマーセメント(アクリル)の3種類とした。これらの表面被覆材は、通常中塗り(主材)に用いられているものである。膜厚や施工方法等については、製造業者の定める方法に従い、特に膜厚については、塗布量により管理したのみであり、実際の膜厚は確認していない。なお、いずれも被覆材塗布前にプライマーを塗布し、上塗りは塗布していない。また、塗布後は約2年間、室内にて静置した。補修に用いられるエポキシなどの有機系材料では、材齢2年での剛性が、材齢1ヶ月でのそれに比べて大きくなるとの指摘がある⁵⁾。剛性が小さい時期での表面被覆材のひび割れ追従性の評価は過大評価となる可能性がある。さらに、疲労試験は1つの供試体の試験に時間を要するため、すべての試験が終了するまで表面被覆材の物性(特に剛性)が変化しないよう、施工後(塗布後)約2年経過した供試体を利用した。

2.2 ひび割れ追従性試験方法

土木学会規準「表面被覆材のひび割れ追従性試験方法(JSCE-K 532-1999)」に準拠し、各種類につき3本の供試体を用いて静的ひび割れ追従性試験を行った。図-1に示すように、供試体を試験機のつかみ具で固定し、ロードセル(容量2kN)とパイ型変位計(検長50mm, 精

*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博士(工)(正会員)

*2 名古屋大学 全学技術センター(工)技術職員

*3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教 修士(工)(正会員)

*4 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工)(正会員)

表-1 表面被覆材の種類とひび割れ追従性試験結果

種類	目標膜厚	施工方法	ひび割れ追従性*(mm)
柔軟型エポキシ樹脂 (エポキシ)	0.16mm	刷毛塗り	0.46
ポリブタジエン樹脂 (ポリブタ)	0.5mm	刷毛塗り	0.47
アクリル系ポリマーセメント (アクリル)	0.9mm	こて塗り	0.73

*3本の試験結果の平均値

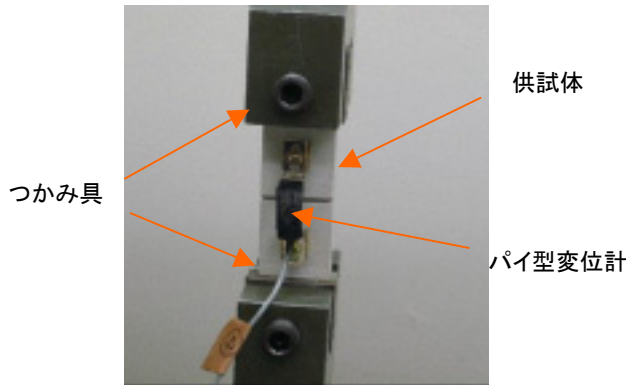
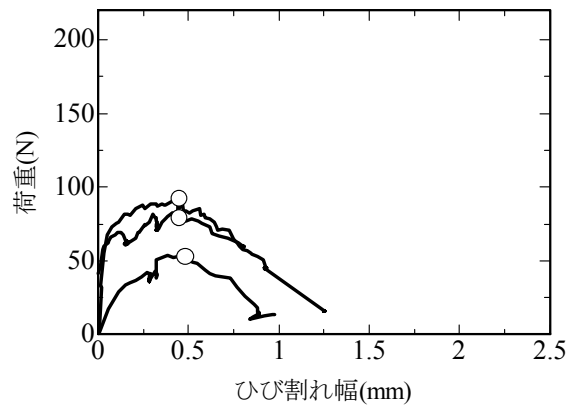


図-1 引張試験の概要

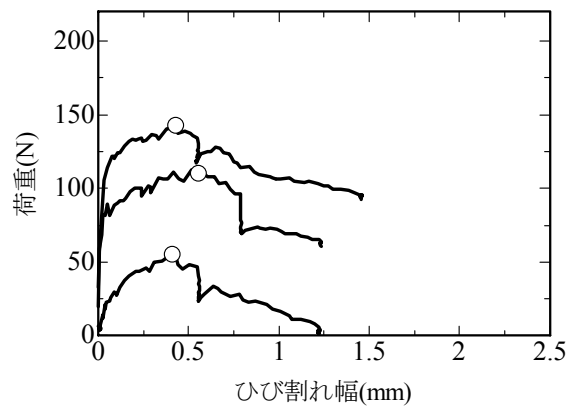
度 1/2000) で引張荷重と供試体中央の U 溝部の開口変位を計測した。

2.3 ひび割れ追従性試験結果

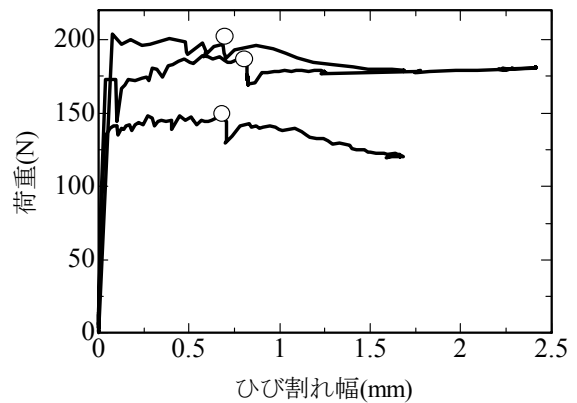
図-2 にひび割れ追従性試験により計測された荷重-ひび割れ幅曲線を、表-1 にそれぞれの曲線から求められた各表面被覆材のひび割れ追従性の平均値を示す。ひび割れ追従性は、主材の破断を伴う最大荷重時における変位をその表面被覆材のひび割れ追従性とした (図中では白丸で表示)。なお、アクリルの 1 本のみ、母材のひび割れ発生荷重が最大であったことから、表面被覆材の割れが目視にて確認された時点をもひび割れ追従性と定義した。エポキシ、ポリブタおよびアクリルのひび割れ追従性は、それぞれ 0.46mm, 0.47mm および 0.73mm であった。また、最大荷重は、3 種類の中でアクリルが一番大きく、ポリブタ、エポキシの順で小さくなった。ただし、同一の表面被覆材であっても、荷重-ひび割れ幅曲線の形状は大きく異なり、ばらつきが大きかったことが分かる。このばらつきは、例えば、塗布量をもって膜厚を管理しているのみであり、各供試体毎の膜厚を実際に管理していないこと、ならびに同一供試体内でも厚さが異なる部分があることなどが主要因と考えられる。しかし、最大荷重時の変位で定義されるひび割れ追従性については、そのばらつきは比較的小さいことから、後述のひび割れ追従性疲労試験では、このひび割れ追従性の結果を基準に実施した。



(a) エポキシ



(b) ポリブタ



(c) アクリル

図-2 ひび割れ追従性試験における荷重-ひび割れ幅関係

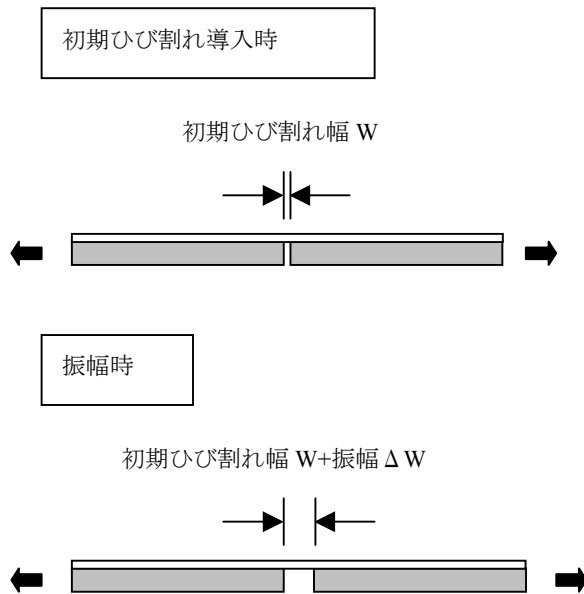


図-3 初期ひび割れと強制変位の与え方

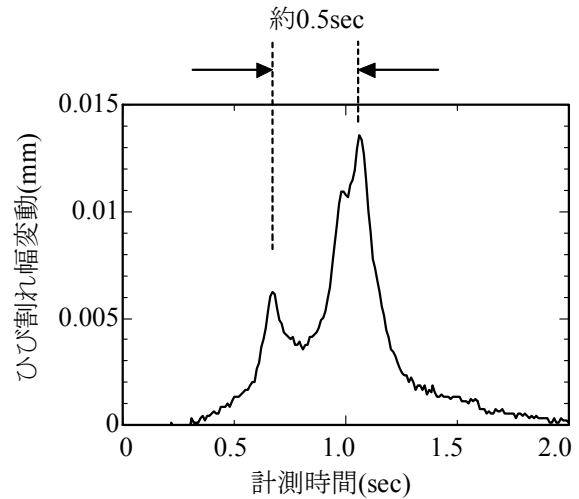


図-4 道路橋床版でのひび割れ幅変動の計測例

3. ひび割れ追従性疲労試験

3.1 供試体の概要

ひび割れ追従性疲労試験に用いた供試体の形状および表面被覆材は、前章の静的なひび割れ追従性試験と同様とした。なお、各表面被覆材につき、5本の供試体について試験を実施した。

3.2 試験条件の設定

ひび割れ追従性疲労試験は、図-3に示すように、初期ひび割れ幅 ($W=0.05\text{mm}$) を導入し、その後所定の振幅 ΔW を繰り返しで与えた。図-4に示すように、道路橋床版に生じたひび割れ部にて計測されたひび割れ幅変動計測結果⁶⁾より、1回のひび割れの開閉が約0.5秒であったため、図-5に示すように、1秒間に2回の振幅を与えた。また、振幅 ΔW は、各表面被覆材のひび割れ追従性の試験結果の50%、30%、10%になるように設定した。

3.3 ひび割れ追従性疲労試験結果

ひび割れ追従性疲労試験の結果をまとめるにあたり次の点に留意して行った。まず、“き裂発生”とは、目視で確認できるき裂長さが約5mmとなった時点と定義した。後述のとおり、ひび割れ追従性疲労試験においては、まず小さな穴が被覆材の表面に生じるため、厳密にはこの穴が生じた時点がき裂発生と定義するのが望ましいが、小さな穴の有無を検出するのが難しく、ばらつきも大きいことから、き裂がある長さ(本研究では5mm)まで進展した時点がき裂発生とした。また、供試体端部では施工時に膜厚不足が生じやすく、図-6に示すように、供試体端部からき裂が進展するものも少なくなかったため、供試体端部から進展するき裂は評価から除外し

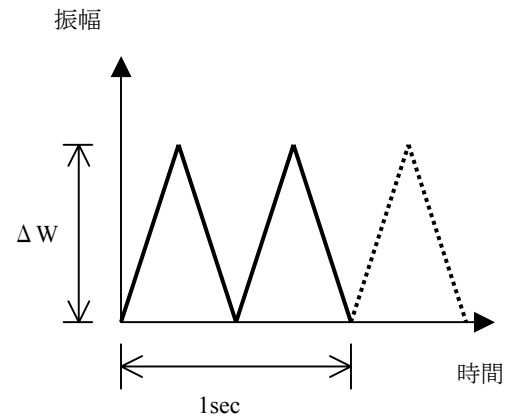


図-5 疲労試験周波数

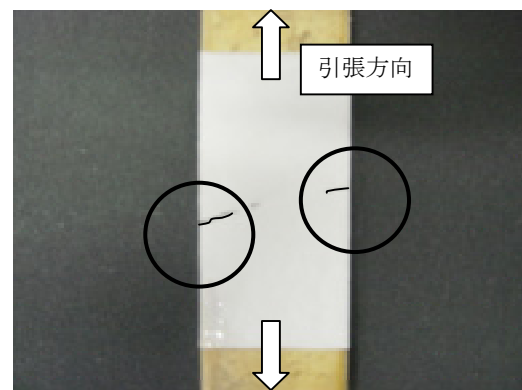


図-6 供試体端部から進展するき裂の例(丸で囲んだ部分、き裂位置は画像上で強調)

た。すなわち、供試体端部からき裂が発生した場合には、そのまま試験を継続し、供試体中央部に新たなき裂が発生し、そのき裂長さが5mmになるまで試験を継続した。

各表面被覆材について、き裂発生までの繰返し回数の平均値を5本の供試体のばらつきの範囲とともに図-

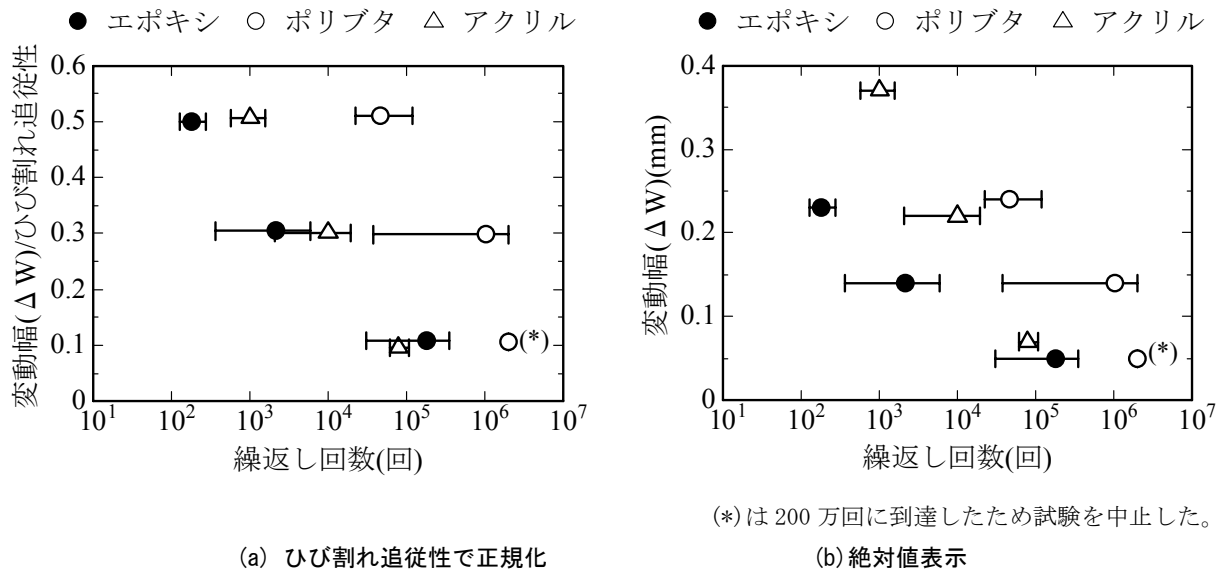


図-7 疲労試験結果

表-2 各表面被覆材のき裂発生回数

種類	試験結果			
	柔軟型エポキシ樹脂 (エポキシ)	変動幅 (mm)	0.1	0.19
	き裂発生回数 (回)	179,260	2190	180
ポリブタジエン樹脂 (ポリブタ)	変動幅 (mm)	0.1	0.19	0.29
	き裂発生回数 (回)	2,000,000*	1,041,480	45,870
アクリル系ポリマーセ メント (アクリル)	変動幅 (mm)	0.12	0.27	0.42
	き裂発生回数 (回)	78,800	10,020	1,020

*200万回を超えたため、試験を中止した。

7(a)に示す。なお、縦軸は疲労試験を実施した振幅の値を、ひび割れ追従性（静的）の値で除した値であり、例えば0.5とは、各表面被覆材のひび割れ追従性の50%の振幅で疲労試験を行ったことを意味する。また、実際の繰返し回数の値を表-2にまとめた。図-7(a)より、ばらつきは大きいものの、いずれの表面被覆材についても、変動幅 ΔW が小さいほど、き裂発生までの繰返し回数が大きくなるのが分かる。また、ポリブタに関しては、200万回を超えてもき裂が発生しなかったため、試験を中止した。この図が示すように、変動幅を変化させた場合の、き裂発生までの繰返し回数の変化の割合は、種類によって異なることが明らかとなった。

図-7(a)に示した結果について、変動幅 ΔW を絶対値として図-7(b)に示す。前章のひび割れ追従性試験結果では、アクリル、ポリブタ、エポキシの順で大きいのが、疲労試験における ΔW が0.2mm近傍では、ポリブタ、アクリル、エポキシの順でき裂発生までの繰返し回数が大きくなっている。しかし、 ΔW が0.05mm近傍になると、ばらつきは大きいものの、エポキシとアクリルの結

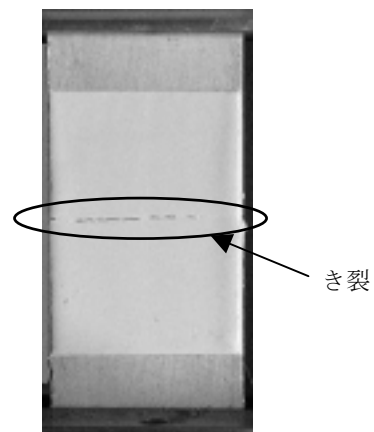
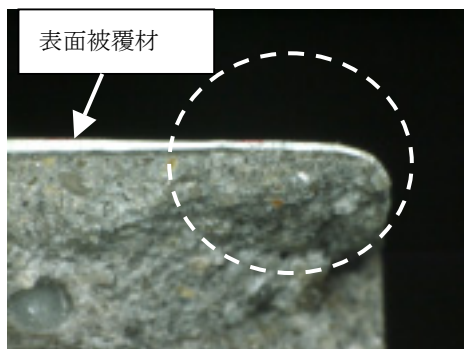


図-8 生じたき裂の例（ポリブタ）

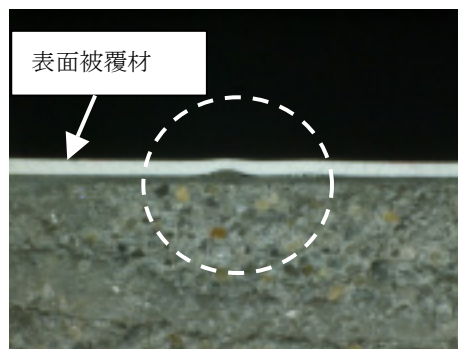
果が類似したものになった。このことは、ひび割れの変動幅の大きさによっては、通常の静的なひび割れ追従性に優れた表面被覆材が、必ずしも疲労破壊に対する抵抗性が高いわけではない可能性を示している。

3.4 表面被覆材のき裂発生、進展メカニズム

き裂進展の特徴としては、種類の違いによらず、繰返



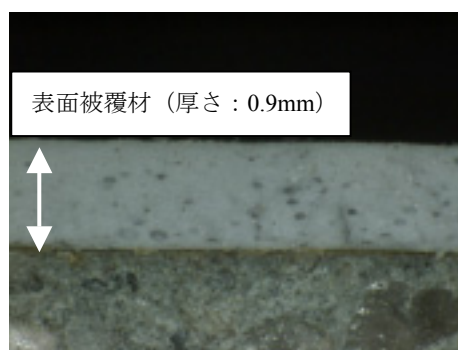
(a) 供試体の端面の薄膜部分の例



(b) 膜内に生じた薄膜部分の例



(c) 破断面の空隙の例 (ポリブタ)



(d) 破断面の空隙の例 (アクリル)

図-9 表面被覆材の破断面

し回数の増加に伴って、表面被覆材の表面にごく小さな穴が複数発生し、それらが互いに連結していくような破壊形態を示した(図-8 参照)。図-9(a), (b)に試験終了後の供試体断面を示す。なお、図中の点線にて囲まれた部分に表面被覆材の表面から観察できる小さな穴が生じていた。顕微鏡で撮影されたこの写真が示すように、初期に発生した小さな穴は、表面被覆材の膜厚の小さい部分に生じていることが確認された。また、図-9(c), (d)にポリブタとアクリルの試験終了後の断面を顕微鏡にて拡大した図(175倍)を示す。これによると、表面被覆材内には直径0.1~0.2mm程度の気泡が生じており、小さな穴の発生は、この気泡の位置や量などにも起因していると推察される。

以上のことから、本研究の範囲内では、疲労に対する抵抗性を向上させるためには、薄膜の部分を生じさせない施工、内部に気泡を生じさせない表面被覆材および施工が重要であることが伺える。なお、静的なひび割れ追従性試験においても表面被覆材の破壊のメカニズムについて詳細に検討した事例が少ないのが現状である。表面被覆材の内部構造(気泡の大きさ、数や位置など)に着目した破壊メカニズムの解明および材料開発が重要であると思われる。

4. まとめと今後の課題

3種類の表面被覆材を対象とし、静的なひび割れ追従性の値に対して50%, 30%, 10%の振幅でひび割れ追従性疲労試験を実施したところ、本研究の範囲内では、以下の結果が得られた。

- (1) いずれの表面被覆材についても、変動幅 ΔW が小さいほど、き裂発生までの繰返し回数が大きくなった。また、変動幅を変化させた場合の、き裂発生までの繰返し回数の変化の割合は、種類によって異なることが明らかとなった。
- (2) 静的なひび割れ追従性試験結果では、アクリル、ポリブタ、エポキシの順で大きく、 ΔW が0.2mm近傍のひび割れ追従性疲労試験では、明らかにアクリルの方が、エポキシに比べてき裂発生までの繰返し回数が大きくなっている。しかし、 ΔW が0.05mm近傍になると、ばらつきは大きいものの、エポキシとアクリルの結果が類似したものになった。すなわち、静的なひび割れ追従性に優れた表面被覆材が、必ずしも疲労破壊に対する抵抗性が高いわけではない可能性が示された。
- (3) き裂進展の特徴としては、種類の違いによらず、繰返し回数の増加に伴って、表面被覆材に小さな穴が複数発生し、それらが互いに連結する破壊形態であ

った。なお、この穴の発生は、表面被覆材塗布時に生じた膜厚の小さな部分、表面被覆材内に混入した気泡などが原因と推察された。

なお、今後の課題には例えば以下のものがある。

- (1) 道路橋のひび割れ幅変動の計測結果⁵⁾によると、 ΔW が0.02mm程度以下であることから、設計で利用するためにも、 ΔW が小さい領域での試験を行う必要がある。
- (2) 初期のひび割れ幅(本実験ではW)の設定の妥当性、およびすでにひび割れが生じた部分に適用された表面被覆材の疲労特性、などについて明らかにする必要がある。

これらの課題も踏まえて、様々な表面被覆材を対象とした実験を行う必要がある。

謝辞

本試験に使用した表面被覆材を提供くださった各社にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 縦山好幸, 吉田幸信, 吉田敦, 山田卓司, 宮川豊章: 塗装系防食材の追跡調査に基づく耐久性能評価と付着性能評価手法の提案, コンクリート工学論文集, Vol.14, No.3, pp.11-22, 2003
- 2) 阪神高速道路公団: コンクリート構造物の表面保護工便覧(案)・同解説, pp.86-93, 1989
- 3) 飯塚康弘, 西村次男, 魚本健人: ひび割れを有するコンクリートに塗布した表面保護材料の100万回及び1000万回疲労実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.427-432, 2001
- 4) 成瀬雅也, 田中宏昌, 関雅樹, 丹間泰朗: コンクリート表面保護材の長期ひび割れ追従性試験について, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.433-438, 2001
- 5) 国枝稔, 若槻晃右, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: ひび割れ注入材の材齢が付着試験結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1425-1430, 2002
- 6) 国枝稔, 撫養啓祐, 中村光: 表面被覆材のひび割れ追従性評価のための動的ひび割れ幅変動の計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.1573-1578, 2005