

論文 画像処理による有機系表面被覆材の劣化度評価

奥野 倫太郎*1・森 充広*2・渡嘉敷 勝*3・浅野 勇*4

要旨: コンクリート開水路に施工された補修材料の耐久性評価手法の開発を目的に、有機系表面被覆材の促進耐候性試験を実施し、マイクロスコープで観察した。その結果、促進試験時間の経過に伴い、表面で微細ひび割れや気泡痕といった変状の発生が確認された。これらの変状の発生状況を定量的に評価するために、マイクロスコープで撮影された画像を2値化し、変状面積の経時変化を計測した。その結果、適切にしきい値を設定することにより、促進試験時間の経過に伴って増加する変状面積を定量化することができた。さらに変状面積の増加傾向の分析により、有機系表面被覆材の劣化の進行を定量的に評価できる可能性を示した。

キーワード: 有機系表面被覆材, 促進耐候性試験, マイクロスコープ, 2値化, 劣化度評価

1. はじめに

長期供用された農業用コンクリート開水路では、機能保全のための補修が実施されている。しかし、現在実施されている補修では、ライフサイクルコストを算定するために必要な補修工法の耐用年数が明確でない、補修後比較的早期に再劣化が生じることがあるといった問題点が指摘されている。耐用年数については、現在のところ開発メーカーが個別の検証条件のもとに設定した耐用年数を採用することが多い¹⁾。しかし、各開発メーカーが実施している伸び試験や付着試験といった検証は、直射日光や風雨に晒される、流水による摩耗や乾湿の繰返しを受けやすいといった農業用コンクリート開水路が置かれている環境を必ずしも考慮したものではなく、その手法も統一されていない。このため、農業用コンクリート開水路で使用する補修材料の耐久性を評価する手法が求められている。

現在、農業用コンクリート開水路の補修では、断面修復工法、表面被覆工法が多く実施されている。これらの工法に使用される補修材料は、無機系、有機系の2種類に大別される。このうち、無機系補修材料の耐久性については、農業用コンクリート開水路に特徴的な現象である摩耗に着目し、耐摩耗性を評価する研究が行われている^{2), 3)}。しかし、農業用コンクリート開水路に施工された有機系補修材料を対象とした耐久性に関する研究は未だ少ない。

本研究では、農業用コンクリート開水路に施工された有機系表面被覆材の劣化度評価手法の開発を目的として、紫外線劣化に着目し、有機系表面被覆材の促進耐候性試験を実施し、マイクロスコープにより、その表面の経時変化を観察した。そして、鋼橋の塗膜や舗装面など

で行われている画像解析^{4), 5)}を参考にして、画像処理(2値化)を利用した劣化度評価手法について検討した。

2. 促進耐候性試験

2.1 試験体

促進耐候性試験は、実際に農業用コンクリート開水路の補修に使用されている有機系表面被覆工法4種類(記号A~D)を対象とした。試験体は、JIS R 5201に準拠したモルタル板(W/C=50%, S/C=3)にそれぞれの有機系表面被覆材を現地で施工される厚みで塗布したものを使用した。なお、モルタル板は、70×70×20mmに成型したものを使用し、モルタル板を70×70mmの面が上になるように平置きした状態でモルタル板の上面に上方から有機系表面被覆材を吹付け塗布した。

各工法の材料は、A工法がポリウレア樹脂、B~D工法がポリウレタン樹脂である。なお、A工法のポリウレア樹脂は、B~D工法のポリウレタン樹脂と比較して、硬化が速く、硬化塗膜が固いという特徴がある⁶⁾。また、A~D工法は、耐候性向上を目的としたトップコートは施されていない。

促進耐候性試験では各材料で4体の試験体を同時に試験した。また、変色や変状の再現性を確認するため、各材料で2体の試験体を追加し、合計6体の試験を実施した。

2.2 促進耐候性試験の試験方法

促進耐候性試験に使用する耐候性試験機は、現在実用化されている耐候性試験機のうち、照射する光(紫外線)が最も太陽光に近似しており、光源が安定して再現性が確保しやすいという特徴を有するキセノンランプ式耐候性試験機とした⁷⁾。試験はJIS K 5600-7-7(塗料一般試

*1 日本基礎技術株式会社 技術本部 課長代理(正会員)

*2 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 農博(正会員)

*3 農村工学研究所 施設工学研究領域 主任研究員 農博(正会員)

*4 農村工学研究所 施設工学研究領域 上席研究員 農博(正会員)

験方法—塗膜の長期耐久性—キセノンランプ法)に準拠し、放射照度 60W/m²、ブラックパネル温度 63±2℃、1 サイクル (120 分間) の照射時間中に 18 分間の水噴射を行う条件とした。試験中は、主に目視により有機系表面被覆材の変色、ふくれ、はがれ等の有無を観察するとともに、顕微鏡による拡大観察を行った。使用した顕微鏡の仕様を表-1 に示す。顕微鏡は接触アダプタを装着し、有機系表面被覆材の表面に顕微鏡を接触させて観察した。

観察は、A～C 工法については、表面の変化を詳細に確認するため、試験時間が 100 時間に達するまでは 10 時間毎に、その後は 100 時間毎を原則として、耐候性試験機から試験体を取り出して実施した。D 工法の観察は、最初に試験体を確認する試験時間を 50 時間とし、その後は 100 時間毎を原則として実施した。また、A 工法については、表面の変状が著しかったことから、6 体の試験体のうち、500 時間で 2 体の試験を終了し、1000 時間で残りの 4 体の試験を終了した。B～D 工法については、6 体の試験体のうち、1000 時間で 4 体の試験を終了し、2000 時間 (D 工法については 2090 時間) で残り 2 体の試験を終了した。

3. 画像処理

3.1 画像処理の概要

4.2 で詳細に述べるが、顕微鏡を用いた観察から、有機系表面被覆材の表面には気泡痕および微細ひび割れといった変状が発生し、それらの面積は経時的に増加する傾向が確認された。そこで、今回の研究では、これら表面の変状の進行を劣化と捉え、劣化の進行を微細ひび割れや気泡痕といった変状の面積で定量化できると仮定し、検討を進めることにした。塗膜分野では、

表-1 拡大観察に使用した顕微鏡の仕様

倍率 ^{※1}		20 倍	50 倍
視野範囲 (mm)	H (横)	15.2	6.1
	V (縦)	11.4	4.6
撮影画像の画素数(Pixel)	H (横)	640	
	V (縦)	480	
分解能 (mm/Pixel)		0.024	0.010

※1: 15 インチモニター (画面解像度 640×480) での倍率

塗膜劣化部を撮影した画像を 2 値化し、正常部と劣化部を区別、評価する方法が用いられている⁸⁾。2 値化とは、濃淡のある画像を白と黒の 2 階調に変換する画像処理の手法である。本研究では、劣化面積を定量化するため、この手法を応用することとした。

3.2 しきい値の選択

本研究で使用した顕微鏡は LED 光源を有し、また、接触アダプタを用いて試験体に接触した状態で使用した。このため、照明などの撮影条件は全ての画像で一定である。また、画像処理を簡便にするため、しきい値は全ての画像で同じ値を選定することとした。ここで、しきい値とは、濃淡画像を 2 値化する際の境界となる値 (濃度値) であり、2 値化の際には、このしきい値を基準として、各画素の濃度値がしきい値以上であれば白に、しきい値より小さい場合には黒に変換する処理を行う。本研究では、いくつかの顕微鏡画像を用いて、試行錯誤的にしきい値を変化させた 2 値化画像を作成し、作成された 2 値化画像と元画像とを目視で比較した。その結果、20 倍画像および 50 倍画像とも、しきい値 80 付近で 2 値化した場合には、目視で確認できる微細な変状の多くを抽出できないこと、しきい値 120 付近で 2 値化した場合には、変状でない正常な箇所

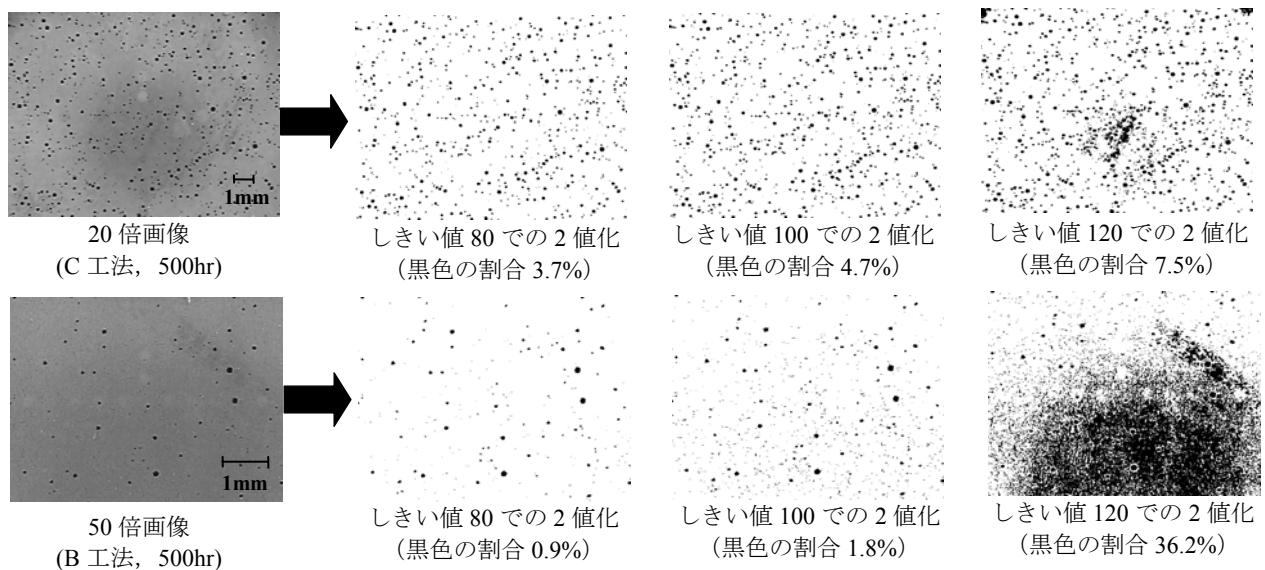


図-1 しきい値別の 2 値化画像の例 (黒色を変状とみなす)

を変状（黒色）として抽出することを確認した（図-1）。そして、しきい値 100 で 2 値化した結果が目視で確認した変状を適切に抽出していると判断した。よって、本研究では、しきい値 100 を選択することとした。

3.3 画像処理の手順

本研究で実施した画像処理の手順を以下に示す（図-2）。

- 1) マイクロスコブ画像をグレースケール化し、黒（0）から白（255）までの 256 階調の濃淡画像を作成する。
- 2) グレースケール化された画像の 256 階調のヒストグラムを作成し、しきい値 100 で 2 値化する。
- 3) 2 値化された画像の濃度ヒストグラムから、黒色を変状とみなし、撮影画像（640×480pixel）中の黒色（0）の割合（%）を算出する。

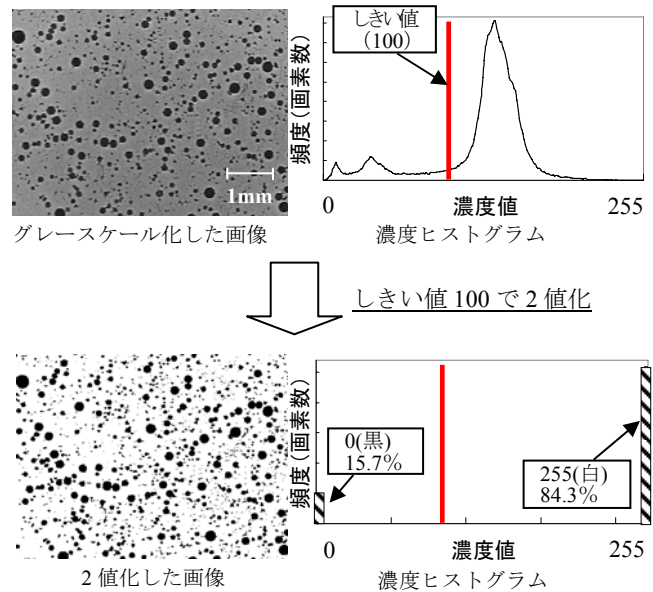


図-2 画像処理の方法
(C 工法, 50 倍, 1000hr)

4. 促進耐候性試験の結果

4.1 変色状況

促進耐候性試験後の試験体の変色状況を図-3 に示す。A～C 工法では、促進耐候性試験を開始してから、最初に試験体を観察した 10 時間で変色が認められた。特に A, B 工法では、10 時間で、紫外線が照射された箇所と照射されていない箇所（試験体を保持するステンレス製のホルダーにより覆われている箇所）が明確に判別できるほど変色が進んでいた。D 工法でも最初に試験体を観察した 50 時間で変色が認められた。以上の結果から、今回試験の対象とした A～D 工法は、試験開始から 10～50 時間までといった比較的短い促進試験時間で変色すると考えられる。なお、A～D 工法の 50 時間の変色の程度は、A, B 工法の方が C, D 工法に比較して大きかった。

有機系表面被覆材として使用される高分子は、紫外線により分子結合が変化し、その結果として変色すると考えられる。例えば、B～D 工法の有機系表面被覆材として使用されているポリウレタンは、紫外線により、分子間に連続した共役二重結合が発現することにより変色することが報告されている¹⁰⁾。よって、今回の促進耐候性試験により発生した変色についても、照射された紫外線による分子結合の変化が原因と推測できる。このような促進耐候性試験による材料の化学的変質は、比較的短い促進試験時間で発生すると推測される。

なお、ふくれ、はがれは、A 工法では 1000 時間まで、B～D 工法では 2000 時間まで見られなかった。

4.2 マイクロスコブ画像の観察結果

(1) 初期状態の観察結果

全ての工法において、試験開始前（0 時間）の初期状態では表面に黒色の孔が存在した（図-4）。佐野ら¹¹⁾は、黒色水系アクリル樹脂エマルジョン塗料の表面を走

査型電子顕微鏡（SEM）で観察し、塗膜表面に現れる黒色の孔を泡と定義している。また、日本建築仕上材工業会¹²⁾は、塗装作業後に発生する欠陥として、泡（発泡）を挙げており、高粘度での吹付け塗装を原因として発生するとしている。今回の試験においても、初期状態で黒色の孔が確認された A～D 工法の材料は吹付けで施工されており、空気が混入し易い状況であったと推察できる。このことから、初期状態で存在した黒色の孔は、施工時の気泡の巻き込みに起因する気泡痕と判断した。なお、初期状態の気泡痕の数をマイクロスコブ画像において目視で観察した結果、C, D 工法が最も多く、A 工法が最も少なかった。

	開始前 (0hr)	50hr 後	試験終了時
A 工法			
B 工法			
C 工法			
D 工法			

図-3 促進耐候性試験による変色状況

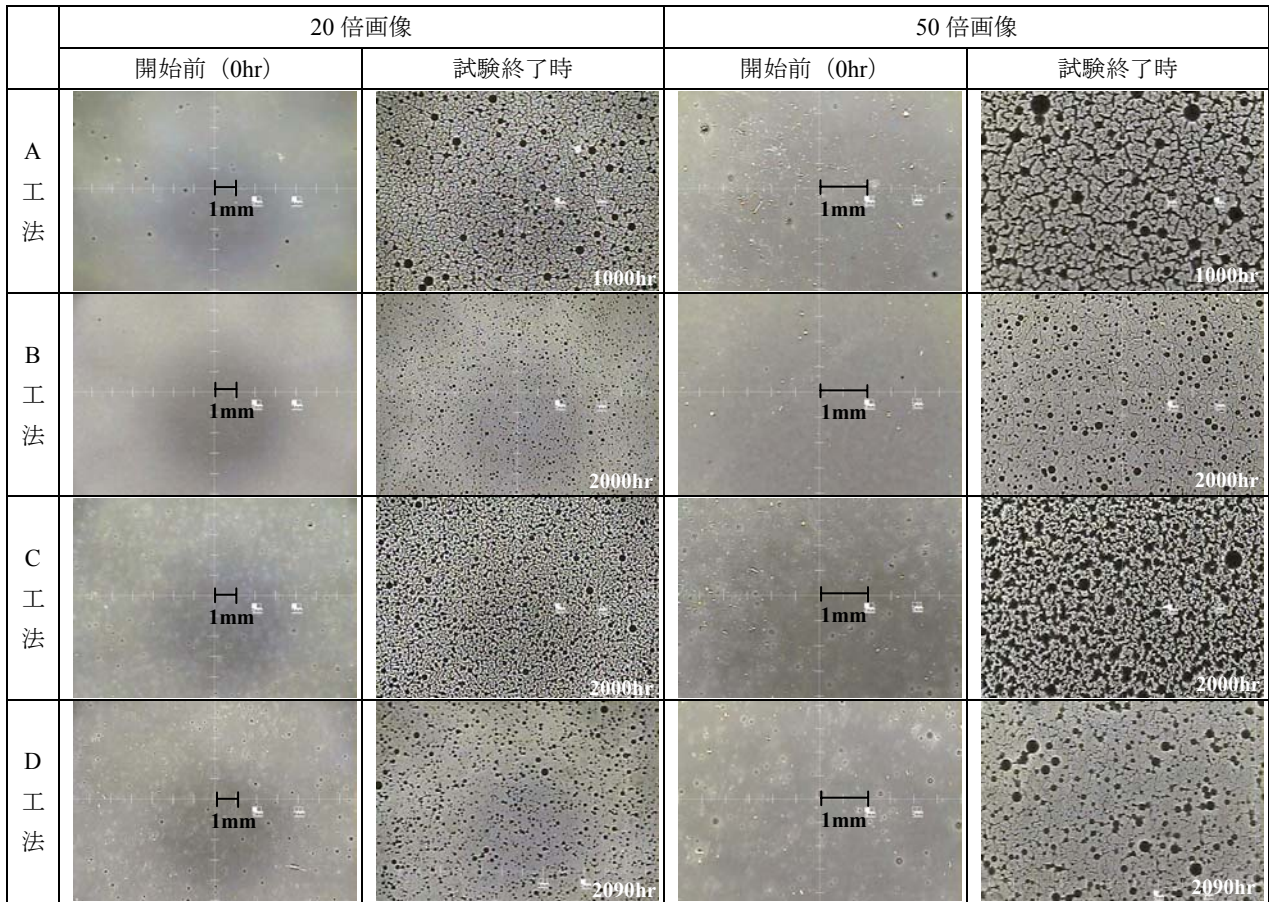


図-4 促進耐候性試験結果

(2) 促進試験時間の経過に伴う変状の発生

促進試験時間の経過に伴って、有機系表面被覆材が表面から劣化し、初期状態から存在していた気泡が表面に現れた。表面に現れた気泡（気泡痕）は、促進試験時間の経過に伴って、径が拡大したが消失することはなかった。さらに促進試験時間が経過すると、奥に存在していた気泡が出現し、顕微鏡の観察では、見かけ上気泡痕の数が増加した。また、試験の途中からは、微細ひび割れの発生を確認した（図-4）。微細ひび割れは、A工法で70時間、B工法で300時間、C、D工法では800時間で発生が認められた。また、図-4の撮影に使用した顕微鏡とは別のレーザ顕微鏡でA工法の1000時間の試験体の変状の深さを計測した。レーザ顕微鏡は、対物レンズを深さ方向に動かして反射光を検出することにより高低差を計測する。計測の結果、変状の深さは最大で257 μ mであった。なお、A工法に使用している有機系表面被覆材の厚みは、約2.5mmである。

5. 画像処理による劣化度評価

5.1 画像処理結果

2値化された画像中の黒色が占める割合を変状面積率と定義する。図-5に20倍画像と50倍画像から求めた

変状面積率と促進耐候性時間との関係を示す。若干のばらつきはあるものの、全ての試験体で、促進試験時間の経過に伴って変状面積率は増加した。なお、毎回試験体の同じ地点（中心）を対象に観察を行っており、顕微鏡画像を目視で観察した結果からも、促進試験時間の経過に伴って、微細ひび割れが発生し、気泡痕の径が拡大していることを確認した。以上から、撮影された顕微鏡画像を適切なしきい値で2値化し、2値化された画像中の変状面積率を算出し、促進試験時間の経過に伴う変状面積率の変化を計測することで、変状の進行を定量的に評価することが可能と考える。

5.2 拡大倍率や観察地点の違いが画像処理結果に与える影響

拡大倍率や観察地点の違いが画像処理結果に与える影響について検討するため、各工法の1000時間の試験体を対象に、観察地点を変えて1試験体当たり9地点で20倍、50倍の顕微鏡観察を行い、画像処理により変状面積率を算出した。続いて、9地点で算出された変状面積率から、20倍画像と50倍画像の変状面積率の平均値、変動係数求め比較した（表-3）。

20倍、50倍の顕微鏡観察は、ほぼ同じ地点で実施した。撮影した9地点の全てで20倍画像よりも50倍画像の方が、変状面積率が大きかった。また、

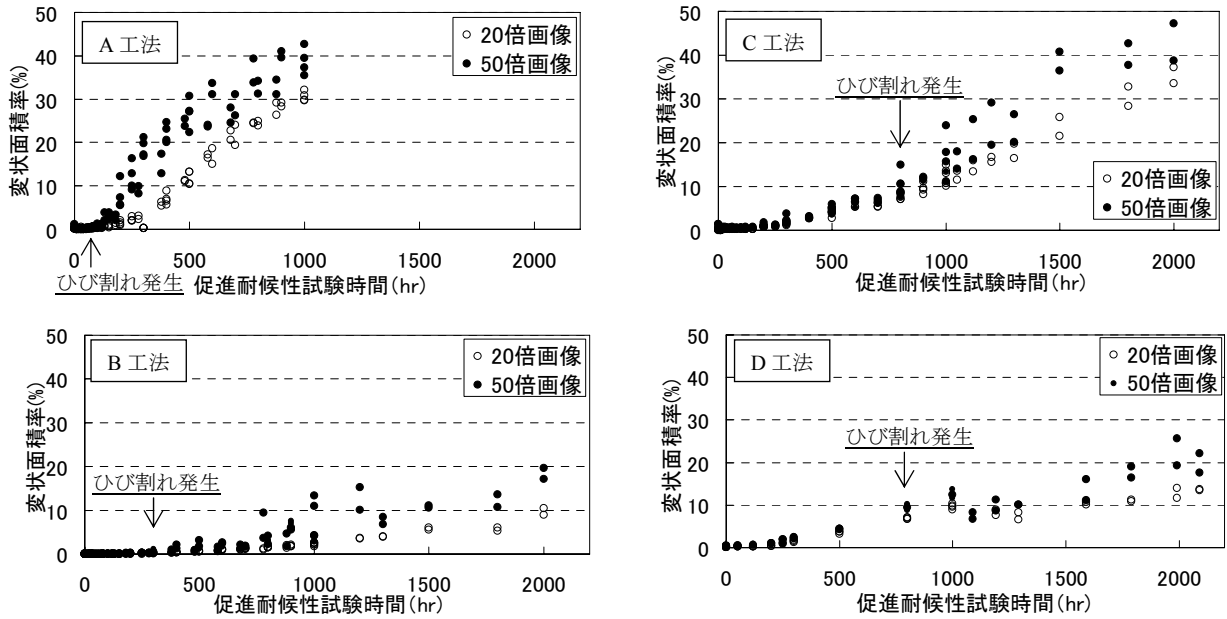


図-5 促進耐候性試験時間と変状部の面積率の関係

図-5 から、50 倍画像から求めた変状面積率が 20 倍画像の変状面積率より大きくなるのは、各工法の微細ひび割れが確認された時間(A 工法 70 時間、B 工法 300 時間、C、D 工法 800 時間)以降で顕著であることが確認できる。20 倍画像より 50 倍画像の方が変状面積率が大きくなるのは、分解能の違いが原因と考えられる。つまり、0.024mm/Pixel (20 倍画像) の分解能では変状として検出できない微細ひび割れを 0.010mm/Pixel (50 倍画像) の分解能では検出でき、検出された微細ひび割れを画像処理し、変状として判別が出来たため、20 倍画像よりも 50 倍画像で面積率が大きくなったと考えられる。このことから、画像処理により得られる変状面積率は、拡大倍率(分解能)の影響を受け、分解能が高いほど得られる変状面積率が大きくなる傾向があるといえる。

変動係数は、各工法の 20 倍、50 倍画像とも比較的小さかった。このことから、画像処理により得られる変状面積率は、観察地点の影響を受けない(観察地点によって大きく結果が変わらない)と考えられる。また、視野範囲が異なる 20 倍画像と 50 倍画像で、変動係数に大きな差が認められなかった。よって、視野範囲の違いについても画像処理結果には影響しないと考えられる。以上のことから、本研究で試みた変状の定量化により、信頼性が高い評価が可能になると考える。

5.3 促進試験時間の経過に伴う変状の発生

表-4 に各工法の促進試験開始前(0 時間)、微細ひび割れ発生時、1000 時間、2000 時間の変状面積率を示す。なお、変状面積率は平均値とした。微細ひび割れ発生時の変状面積率は、A、B 工法と C、D 工法で大きく異なった。A、B 工法では促進試験開始前から、微細ひび割れ発生時までに変状面積率がほとんど増加しなかった。

表-3 同じ試験体での画像処理結果の比較

	倍率	変状面積率 (%) ※1	
		変状面積率 (%) ※1	変動係数※2
A 工法	20	30.6	0.02
	50	36.7	0.02
B 工法	20	1.9	0.23
	50	4.8	0.29
C 工法	20	9.9	0.10
	50	12.7	0.12
D 工法	20	7.5	0.04
	50	9.8	0.13

※1: 9 地点の平均値, ※2: 9 地点の変動係数

表-4 各促進試験時間での変状面積率(平均値)

工法	倍率	変状面積率 (%) ※1			
		初期 0hr	ひび割れ発生時	1,000hr	2,000hr
A	20	0.2	0.2	70hr	30.6
	50	0.3	0.2		38.7
B	20	0.0	0.2	300hr	2.3
	50	0.1	0.6		6.6
C	20	0.1	8.3	800hr	12.2
	50	0.8	9.7		15.6
D	20	0.2	6.9	800hr	9.7
	50	0.3	9.4		12.6

※1: 各促進試験時間での平均値, ※2: 2090hr

一方、C、D 工法では微細ひび割れ発生時には、変状面積率が 7~10%程度に増加していた。これは、C、D 工法において、微細ひび割れ発生までに、気泡痕の数が増加し、径が拡大している状態を表しているといえる。微細

ひび割れの発生は、気泡痕の配置、使用している材料の力学的な物性、有機系表面被覆材の厚さなどに影響を受けると考えられる。今後は、これらの影響要因の分析を行うとともに、気泡痕から微細ひび割れがどのように進展していくかについて検討が必要である。

微細ひび割れの発生時間は A 工法（70 時間）、B 工法（300 時間）、C、D 工法（800 時間）の順に早かったが、2000 時間の変状面積率は、B 工法<D 工法<C 工法<A 工法の順に大きくなっていった（A 工法は、1000 時間からの想定）。このことから、微細ひび割れの発生時間と 2000 時間の変状面積率には相関がないといえる。また、促進耐候性試験による外観の変色は、10～50 時間までといった比較的短い促進試験時間で発生しており、50 時間での変色の程度は、A、B 工法の方が C、D 工法に比較して大きかった。一方、2000 時間の変状面積率は B 工法<D 工法<C 工法<A 工法となっており、変色と変状の相関を確認できなかった。このことから、変色と変状のメカニズムは異なる可能性があると考えられる。また、B～D 工法の 1000 時間から 2000 時間の変状面積率の増加率は、B 工法の 20 倍画像で 3.2%、50 倍画像で 1.8%、C 工法の 20 倍画像で 1.9%、50 倍画像で 1.8%、D 工法の 20 倍画像で 0.4%、50 倍画像で 0.6%となった。このことから、特に D 工法は他の工法と比較して、1000～2000 時間での変状面積率の増加が小さいという特徴があることを確認できた。このように図-5 に示した促進耐候性試験時間と変状面積率との関係を示すグラフの勾配などから、有機系表面被覆材の特性を把握できる可能性が示された。

6. まとめ

本研究では、4 種類の有機系表面被覆材を対象に促進耐候性試験を実施し、20 倍、50 倍のマイクロスコープを使用して、表面の経時変化を観察した。その結果、10～50 時間までという比較的短い促進試験時間で、表面の変色を確認された。また、促進試験時間の経過とともに初期状態から存在する気泡痕の数が増加し、径が拡大した。試験の途中からは、微細なひび割れが発生した。

さらに、促進試験時間の経過に伴う気泡痕や微細ひび割れといった変状の発生および拡大状況を定量的に評価するため、マイクロスコープで撮影された画像を 2 値化し、変状面積率の算出を試みた。その結果、適切にしきい値を設定することによって、変状を適切に抽出でき、試験時間の経過に伴う変状の面積の増加を定量化することができた。

そして、促進試験時間の経過に伴う変状面積率の増加傾向やその特徴を分析することで、今回実施した画像処理（2 値化）により、表面の劣化の進行を定量的に評価できる可能性があることを示した。

謝辞：本研究は、農林水産省農林水産技術会議「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発研究」により行なった研究成果の一部である。

参考文献

- 1) 野々村圭造，鈴木隆善，加藤公平，栗田徹：実効的なストックマネジメントの実施へ向けた諸課題，水土の知，Vol.77，No.4，pp.3-6，2009.4
- 2) 石神暁郎，渡嘉敷勝，森充広，増川晋：農業用コンクリート水路における断面修復材の耐摩耗性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1739-1744，2006.7
- 3) 長束勇，上野和広，渡嘉敷勝，石井将幸：水砂噴流摩耗試験機の試作とその性能評価，農業農村工学会論文集，Vol.266，pp.25-31，2010.4
- 4) 三宅将，藤原博，赤井隆晃：鋼橋の塗膜劣化度診断システムの開発，土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集 第 I 部門，I -A359，pp.718-719，1995.9
- 5) 市坪誠，Masanobu SHINOZUKA：舗装面の劣化抽出システムの自動化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1653-1658，2002.7
- 6) （株）月形ー有機系材料・ポリウレタ樹脂ー：
http://www.tukigata.co.jp/concrete/material/organic_system/poriurea_resin.html
- 7) 飯田眞司，高橋弘道，矢部正実：促進耐候性試験法，塗料の研究，145 号，pp.22-23，2006.10
- 8) 藤原博，三宅将，赤井隆晃，河野幸弘，出川定男：画像処理による鋼橋塗膜の劣化度判定法に関する研究，土木学会論文集 No.598，I -44，pp.85-96，1998.7
- 9) 田村秀行：コンピューター画像処理，オーム社，pp.137-142，2008.1
- 10) INOC WORLD：専門用語集 黄変，
<http://www.inoc.jp/watch/magazine/words/a/19>
- 11) 佐野秀二，大柴雅紀，石原真興：エマルジョン塗料の粘弾性と塗膜に残存する泡との関係，DNT コーティング技報，No.2，2002.10
- 12) 日本仕上材工業会：建築仕上塗材ハンドブック，pp.47-61，2007.9