

# 論文 コンクリート補修材料の促進耐候性試験結果と実現場での調査結果の比較

奥野 倫太郎\*1・森 充広\*2・渡嘉敷 勝\*3・石黒 寛\*4

**要旨:** コンクリート開水路に施工される有機系表面被覆材の耐候性評価手法の開発を目的として、促進耐候性試験により変状が発生した表面被覆材の表面の劣化の度合いと、実際に現地で施工された表面被覆材の表面の劣化の度合いを比較した。比較に当たっては、紫外線劣化に着目し、現地で紫外線量を測定し、現地での紫外線量と気象庁が測定している調査地近隣の全天日射量との相関を求め、調査地や環境条件により異なる供用期間中の表面被覆材の紫外線受光量を推定した。その結果、日当たりの良い面については、四国地区の供用期間約3年がキセノンランプ式促進耐候性試験1,500時間に相当していることが分かった。

**キーワード:** コンクリート開水路, 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

## 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、その劣化状況に応じて、表面被覆工法、断面修復工法、ひび割れ補修工法、目地補修工法などによる補修が行われている。このうち、コンクリート開水路では、通水能力の向上や劣化因子の侵入抑制を目的とする表面被覆工法や断面修復工法が多く実施されている<sup>1)</sup>。一方、コンクリート開水路は、直射日光による紫外線や温度変化、乾湿の繰返し、流水に晒されるといった特殊な環境に置かれており、コンクリート開水路に施工される補修材料にもこのような劣化要因による劣化が想定される。このため、今後は、事前に補修材料の耐久性を適正に評価する手法の開発が求められており、そのためにも、補修材料の劣化状況等を適時適切にモニタリングし、コンクリート開水路という環境条件下での補修材料の耐久性を明らかにする必要がある。

コンクリート開水路で多く実施されている表面被覆工法や断面修復工法に使用されている補修材料は、無機系、有機系の2種類に大別される。このうち、無機系の補修材料については、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<sup>2), 3)</sup>。一方、有機系の補修材料についても、近年、コンクリート開水路に施工された有機系表面被覆工法を対象として、マイクロスコープを活用した現地調査や、室内での促進耐候性試験などが実施されており、現地調査や室内試験で得られたマイクロスコープ画像の定量的な評価についても検討されている<sup>4), 5)</sup>。しかし、これらの検討は、現在、現地調査や室内試験の結果をそれぞれ個別に評価している段階である。したがって、コ

ンクリート補修材料の耐久性を促進耐候性試験によって評価する場合には、促進耐候性試験時間と現地での実時間との関係を把握する必要がある。

そこで、本研究では、実際にコンクリート開水路に施工された有機系表面被覆工法を対象として、現地調査を行い、その表面の劣化状況を定量的に評価すると同時に、別途、室内での促進耐候性試験により得られた表面の劣化状況との比較を行った。比較の際には、現地で有機系表面被覆材が施工された面の紫外線量を測定し、測定された紫外線量と気象庁が測定している調査地近隣の全天日射量との相関を求め、調査地や環境条件で異なる表面被覆材の紫外線受光量を推定した。

## 2. 現地調査

### 2.1 現地調査概要

実際にコンクリート開水路に施工された有機系表面被覆材の表面の劣化状況を確認するため、ポリウレタン樹脂を主材とするA工法が施工された北海道地区と四国地区のコンクリート開水路の現地調査を行った。調査対象水路の概要を表-1に示す。今回、調査の対象とした水路は、現場打ちフリューム型のコンクリート製三面張り開水路である。なお、表中の概略図においては、相対的に日当たりの良い側壁を図中左側に、日当たりの悪い側壁を右側に図示した。

北海道地区の既設水路の供用年数は不明である。水路は、左岸が北向き、右岸が南向きとなっている。水路側壁の天端は、周辺地盤高より50cm程度高い位置にある。補修する前のコンクリート開水路では、気温の低い北海道地区に多く見られる凍害の影響は確認されなかった。

\*1 日本基礎技術(株) 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 三重大学大学院生物資源学研究所 教授 農博 (正会員)

また、水路の両岸は、田畑や道路である。このため、水路が受ける直射日光を遮るものではなく、特に南向きの左岸は、直射日光を受けやすい。

四国地区の既設水路は、昭和 30 年代に整備されており、供用年数は 40 年以上である。水路は、左岸が北西向き、右岸が南東向きとなっている。水路側壁の天端は、周辺地盤高と同じ、もしくは 10cm 程度低くなっている。補修する前のコンクリート開水路の側壁部分では、ひび割れや目地材の欠損、底板部分では流入土砂を含んだ流水による摩耗が確認された。周囲は田畑や道路となっており、水路が受ける直射日光を遮るものではなく、特に南東向きの右岸は直射日光を受けやすい。また、水路自体がもたれ擁壁の形状となっているため、擁壁が直立している水路と比較して直射日光を受けやすい。

## 2.2 表面状態の撮影

現地調査ではマイクロスコープを使用し、実際に施工された有機系表面被覆材の表面の拡大画像を撮影した。使用したマイクロスコープの仕様を表-2 に示す。マイクロスコープは接触アダプタを装着し、表面被覆材の表面に接触させて 20 倍と 50 倍で観察した。このマイクロスコープを用いて、調査対象地の 2 地区において、左岸、右岸の側壁の気中部（設計最大水位よりも上の部分）を北海道地区では 4 か所、四国地区では 2 か所撮影した。また、現地調査は北海道地区で 2 回、四国地区で 3 回実施した。現地調査時点での有機系表面被覆材の供用期間を表-3 に示す。なお、調査の対象とした有機系表面被覆材は、ポリウレタン樹脂を主材とするもので、膜厚は 3 mm 程度であり、トップコートは施工されていない。

## 2.3 紫外線量の測定

紫外線量は、携帯型の紫外線量測定器を用い、調査対象地の 2 地区において、表面被覆材が施工された左岸、右岸の側壁の気中部で測定した。使用した紫外線量測定

表-2 マイクロスコープの仕様

倍率 <sup>※1</sup>		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

表-3 調査の対象とした有機系表面被覆材の供用期間

工法	地区	供用期間	記号
A 工法 (ポリウレタン樹脂)	北海道	1 年 7 ヶ月	H1.7
		2 年 6 ヶ月	H2.6
	四国	2 年 9 ヶ月	S2.9
		3 年 2 ヶ月	S3.2
		3 年 11 ヶ月	S3.11

表-4 紫外線量測定器の仕様

測定要素	紫外線
測定範囲	0~30W/m <sup>2</sup>
測定誤差	0.1~30mW/cm <sup>2</sup> : ±5% (25°C, 50%RH の場合)
測定/ 表示分解能	最小 0.001mW / cm <sup>2</sup> 4 桁表示

器の仕様を表-4 に示す。測定の際には、平型のセンサーを水路の側壁に貼り付け、センサーが側壁に対して直角に水路内側を向くようにした。なお、測定は、北海道地区では 2010 年 11 月と 2011 年 10 月のそれぞれ 1 日ずつの計 2 日間、四国地区では、2010 年 12 月の 2 日間実施

表-1 調査対象水路の概要

調査地区	北海道地区	四国地区
既設水路の供用年数	不明	40 年以上 (昭和 30 年代に整備)
水路躯体	鉄筋コンクリート	無筋コンクリート
水路幅	1.3m	1.9m
水路高さ	1.1m	0.9m
概略図		

したが、四国地区では降雨の影響で測定ができない時間があった。また、測定のインターバルは、2010年に実施した四国地区の2日および北海道地区の1日では10秒、2011年に実施した北海道地区の1日では60秒とした。

### 3. 画像処理

マイクロスコープを用いた観察から、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した。劣化の定量化は2値化によって行った<sup>4)</sup>。

### 4. 現地で有機系表面被覆材が受光した紫外線量の推定

それぞれの調査対象水路の日当たりの良い面と悪い面で測定した紫外線量と気象庁が測定している調査地近隣の全天日射量を比較した。全天日射量とは、散乱によって天空の全ての方向から入射する日射、雲から反射した日射及び直達日射（大気中で散乱、反射されることなく太陽面から直接地上に到達する日射）を合わせた日射量である<sup>6)</sup>。なお、気象庁のアメダス<sup>7)</sup>では、毎時の積算値 (MJ/m<sup>2</sup>/hr) と1日の合計値 (MJ/m<sup>2</sup>/day) が公表されている。一方、現地で使用した紫外線量測定器では、積算値ではなく、瞬間値 (mW/cm<sup>2</sup>) が測定される。このため、測定された瞬間値から各時間における積算値 (MJ/m<sup>2</sup>/hr) を算出し、同じ日時の調査地近傍の全天日射量と比較し、実際に施工された表面被覆材が受光した積算紫外線受光量を推定した。

### 5. 調査結果および考察

#### 5.1 有機系表面被覆材の表面の劣化度

##### (1) 促進耐候性試験の結果

本項では、既往の論文から、著者らが実施した促進耐候性試験結果<sup>4)</sup>について述べる。なお、ここで示す実験結果は、今回実施した現地調査の比較対象となる結果である。

室内で実施した促進耐候性試験は、JIS R 5201に準拠したモルタル板 (W/C=50%, S/C=3) にA工法を現地で施工された方法と同じ方法で塗布した試験体に対して、JIS K 5600-7-7 (塗料一般試験方法—塗膜の長期耐久性—キセノンランプ法) に準拠した方法で実施した。なお、試験中は現地調査でも使用したマイクロスコープ (表-2) により、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観察した。0, 500, 1,500, 2,000時間経過後のマイクロスコープ画像 (50倍) とその画像

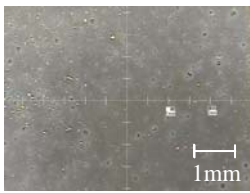
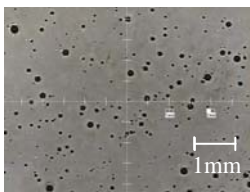
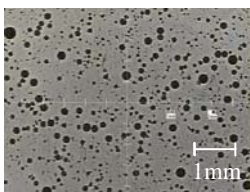
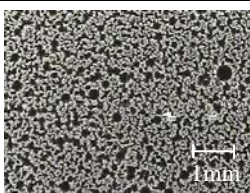
試験時間	50倍画像	2値化後 (変状部の面積率)
0時間		0.6%
500時間		4.2%
1,000時間		15.7%
2,000時間		47.2%

図-1 促進耐候性試験結果 (マイクロスコープ画像)

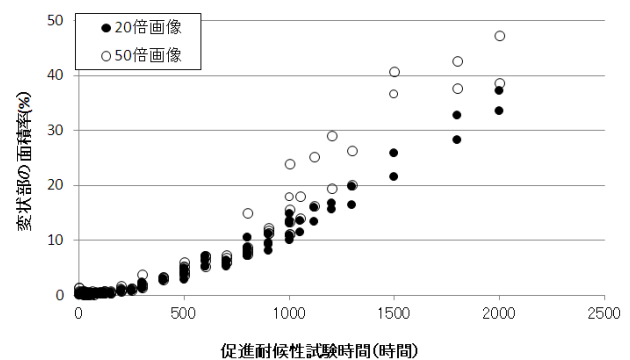


図-2 促進耐候性試験時間と変状部の面積率の関係<sup>4)</sup>

を画像処理 (2値化) した結果を図-1に示す。

マイクロスコープによる観察から、促進耐候性試験時間の経過に伴って初期状態から存在する黒色の孔 (気泡痕) の拡大が確認された。また、800時間経過後にひび割れの発生を確認し、その後、試験時間の経過に伴って、ひび割れの長さが長くなり、幅が広がっていた。マイクロスコープ画像を画像処理することにより、試験時間の経過に伴って増大する変状部の面積率を定量的に評価することができた (図-2)。

**(2) 現地調査の結果**

現地で撮影したマイクロスコープ画像とその画像を画像処理（2値化）した結果を図-3に示す。なお、撮影は20倍と50倍のマイクロスコープで実施したが、ここでは、微細なひび割れ等、より詳細な表面の状況が観察できる50倍のマイクロスコープ画像を示している。

全ての画像で室内での促進耐候性試験と同様に黒色の孔（気泡痕）が確認され、その気泡痕は供用期間の経過に伴って、拡大していた。また、四国地区では、日当たりの良い面と悪い面の表面の状態が大きく異なっており、日当たりの良い面では、供用期間2年9か月でひび割れが確認され、その後、供用期間の経過に伴って、

ひび割れの長さが長くなり、幅が拡大していた。日当たりの悪い面では、供用期間2年9か月と3年2ヶ月ではひび割れが確認できないが、供用期間3年11ヶ月でひび割れの発生を確認した。

また、画像処理した結果から、目視観察の結果と同様に日当たりの悪い面と比較して日当たりの良い面の方が変状部の面積率が大きいこと、同じ地区の同じ面は供用年数の経過に伴って変状部の面積率が大きくなっていくことを定量的に評価することができた。

**5.2 現地で補修材料が受光した積算紫外線量の推定**

5.1で述べたように、室内での促進耐候性試験や、同じ環境条件下にある現地調査の結果を個別に定量的に

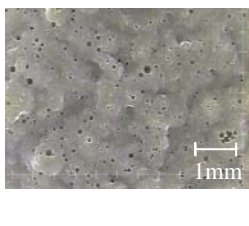
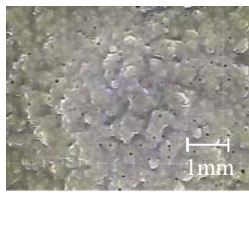
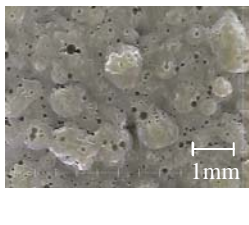
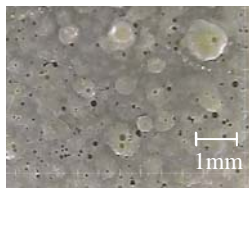
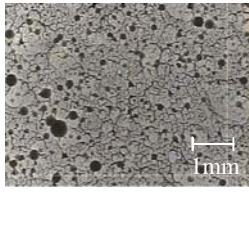
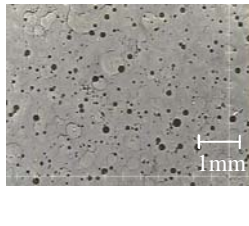
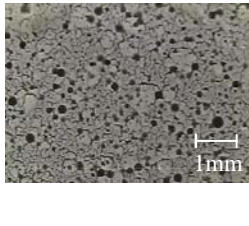
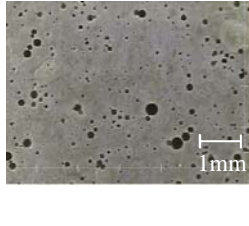
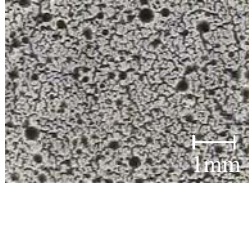
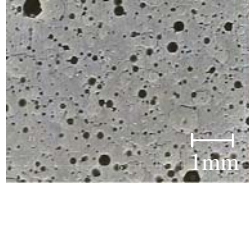
地区	記号	日当たりの良い面		日当たりの悪い面	
		50倍画像	2値化後 (変状部の面積率)	50倍画像	2値化後 (変状部の面積率)
北海道	H1.7		2.4%		0.7%
	H2.6		7.1%		2.3%
四国	S2.9		24.6%		6.1%
	S3.2		26.5%		6.3%
	S3.11		28.9%		10.2%

図-3 現地調査結果（マイクロスコープ画像）

評価することができた。これらで得た室内での促進耐候性試験結果と現地調査の結果を比較するためには、促進耐候性試験により試験体が受けるエネルギー（紫外線）と、現地で実際に施工された表面被覆材が受けるエネルギー（紫外線）との関係を把握する必要がある。そこで、現地調査時に、それぞれの環境条件で紫外線量を測定し、現地で実際に施工された表面被覆材が受光した紫外線受光量を推定した。推定の手順を次に示す。

- 1) 現地で側壁の紫外線量 ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) を測定する。
- 2)  $W=J/s$  であることから、測定された紫外線量 ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) に時間 (測定間隔が 60 秒であれば 60 秒) を掛算し、得られた紫外線量 ( $\text{J}/\text{m}^2/60$  秒) のデータを 1 時間分 (測定間隔が 60 秒であれば 60 データ) 積算し、測定値の単位  $\text{mW}/\text{m}^2$  を  $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$  に換算する。
- 3) アメダスのホームページ<sup>7)</sup> から、調査地近隣の調査日の毎時の全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) を取得する。
- 4) 3) で取得した調査地近隣の毎時の全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) を X 軸、1) で換算された測定値 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) を Y 軸とするグラフを作成する (図-4)。そして、毎時の近隣の全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) と換算された測定値 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) との相関を求める。なお、図-4 は北海道地区および四国地区とも測定した 2 日間の毎時のデータをプロットしている。
- 5) アメダスのホームページ<sup>7)</sup> から、調査地近隣の供用開始日から調査日までの毎日の全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{day}$ ) を取得し積算する。
- 6) 4) で得られた近似式の x (毎時の全天日射量) に、5) で得られた供用期間中の積算全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) を代入し、現地の側壁が受光した積算紫外線量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) を求める。

上記の 4) において、調査地近隣の毎時の全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) と換算された測定値 ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{hr}$ ) を比較した結果、北海道地区の日当たりの悪い面で、 $R^2=0.2705$

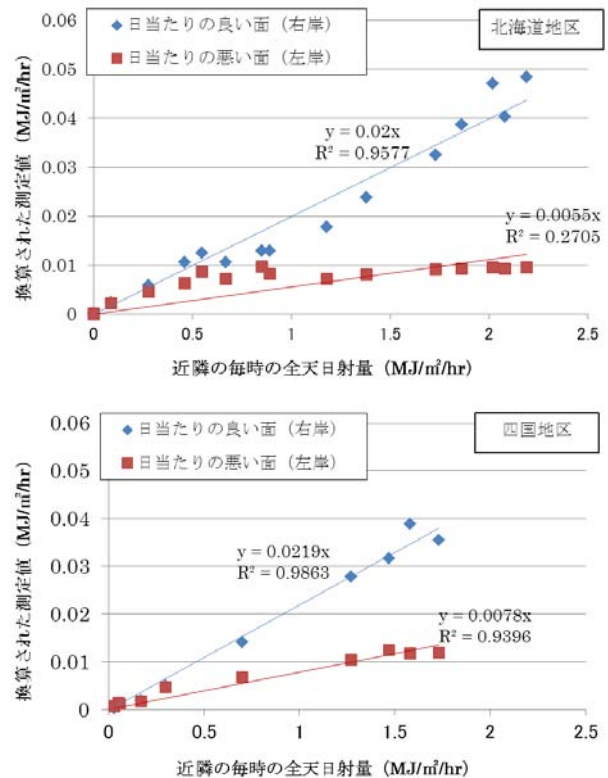


図-4 現地で測定した紫外線量と全天日射量との関係

となり、結果に大きなばらつきがみられるが、その他データでは、測定値と近隣の全天日射量に一定の関係があることが示された (図-4)。この結果から、近隣の全天日射量から現地の表面被覆材が受光した紫外線受光量を推定できると考え、6) に示したように図-4 のグラフ中に示したそれぞれの近似式を用い、供用期間中の積算全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) を推定した。側壁が受光した積算紫外線受光量の推定値を表-5 に示す。なお、表-5 には、5.3 で述べるキセノンランプ式耐候性試験で同等の積算紫外線量を照射するのに必要な時間も併せて記載した。

### 5.3 供用期間と促進耐候性試験時間との相関

今回実施している室内での促進耐候性試験は、キセノンランプ式耐候性試験機で実施している。使用している

表-5 各現地調査時点での積算紫外線量と推定した促進耐候性時間

地区	記号	積算全天日射量 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ ) ※1	日当たりの良い面		日当たりの悪い面	
			側壁が受光した積算紫外線量の推定値 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )	キセノンランプ式耐候性試験で同等の積算紫外線量を照射するのに必要な時間 (hr)	側壁が受光した積算紫外線量の推定値 ( $\text{MJ}/\text{m}^2$ )	キセノンランプ式耐候性試験で同等の積算紫外線量を照射するのに必要な時間 (hr)
北海道	H1.7	7,439.35	155.48	719.82	25.30	117.12
	H2.6	11,337.28	236.95	1,096.98	38.55	178.47
四国	S2.9	14,743.53	333.20	1,542.61	101.73	470.98
	S3.2	15,917.56	359.74	1,665.44	109.83	508.48
	S3.11	20,269.30	458.09	2,120.77	139.86	647.50

※1 気象庁の気象統計データから算出

キセノンランプの波長 300~400nm の範囲の照度は、JIS K 7350-2 により赤道地帯の太陽光を規準としており、全放射照度約 1,090W/m<sup>2</sup> の 6% である 60 W/m<sup>2</sup> が規定されている<sup>8)</sup>。なお、400nm 以下の紫外線のうち 280nm 以下は地表には到達せず、塗膜の劣化に大きな影響を及ぼすのは、315~400nm の紫外線である<sup>9)</sup>。促進耐候性試験において、キセノンランプ光を 1 時間照射したときの試験体を受けるエネルギーは、 $W=J/s$  より、次式(1)で得られる。

$$60 \text{ W/m}^2 \times 3600 \text{ 秒} \times 10^{-6} = 0.216 \text{ MJ/m}^2/\text{hr} \quad (1)$$

この結果をもとに、5.2 で得られた側壁が受光した積算紫外線受光量の推定値 (MJ/m<sup>2</sup>) を 0.216MJ/m<sup>2</sup>/hr で割り算すると、キセノンランプ式耐候性試験で同等の積算紫外線量を照射するのに必要な時間が得られる (表-5)。この方法により、環境条件が異なる補修材料であっても、それぞれの劣化状態を比較することが可能となる。

#### 5.4 促進耐候性試験結果と現地調査結果の比較

5.3 で得られたそれぞれの供用期間に対応する促進耐候性試験時間をもとに、促進耐候性試験結果と現地調査結果を変状部の面積率で比較した (図-5)。20 倍、50 倍拡大画像とも、ばらつきはあるが、促進耐候性試験結果と同様に促進耐候性試験時間の経過に伴い、変状部の面積率が増加する傾向が確認できた。ただし、20 倍、50 倍拡大画像とも、促進耐候性試験結果と比較して、現地調査結果の方が、変状部の面積率が小さかった。特にこの傾向は、1,000 時間以降の積算紫外線受光量が比較的多い画像で確認された。これは、現地では水路表面に汚れが付着したりすることで、紫外線が遮られることなどが原因と考えられる。つまり、現地に施工された表面被覆材は、紫外線が遮られることのない促進耐候性試験と比較すると照射された紫外線量が少ないと考えられる。このように、一般に公開されている全天日射量のデータを用いて積算紫外線受光量を推定することにより、促進耐候性試験結果と現地調査の結果を比較することができた。また、図-5 から、キセノンランプ式促進耐候性試験 1,500 時間の 20 倍拡大画像の変状部の面積率の平均値 (23.65%) と、四国地区の日当たりの良い面の 3 年 2 ヶ月 (促進耐候性試験 1,665.44 時間) の 20 倍拡大画像の平均値 (24.1%) がほぼ等しい値となった。この結果から、ばらつきはあるものの四国地区の日当たりの良い面の約 3 年がキセノンランプ式促進耐候性試験 1,500 時間に相当すると考えられる。なお、20 倍拡大画像の方が 50 倍拡大画像と比較して結果のばらつきが小さいことから、促進耐候性試験結果と現地調査結果の比較を行う際には、20 倍拡大画像の方が有効と考えられる。

#### 6. まとめ

本研究では、コンクリート補修材料の促進耐候性試験

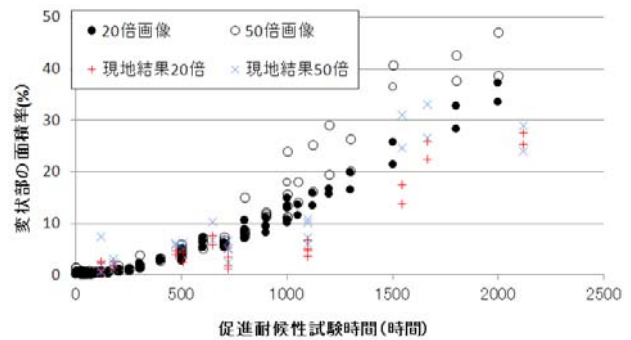


図-5 促進耐候性試験結果と現地調査結果の比較

結果と現地調査の結果を比較するための手法について、紫外線劣化に着目して検討した。その結果、環境条件によって異なる紫外線受光量を、一般に公開されている全天日射量から推定することにより、それぞれの表面の劣化の度合いを比較できることが分かった。また、日当たりの良い面については、四国地区の供用期間約 3 年がキセノンランプ式促進耐候性試験 1,500 時間に相当すると考えられる。

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」により行った研究成果の一部である。

#### 参考文献

- 1) 米田勇一：既設農業用水路の改修について、水と土、No.159, pp.57-60, 2010.3
- 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) 奥野倫太郎, 森充広, 渡嘉敷勝, 浅野勇：画像処理による有機系被覆材の劣化度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 791-796, 2011.7
- 5) 奥野倫太郎, 森充広, 浅野勇, 渡嘉敷勝, 石黒覚：コンクリート開水路に施工された有機系表面被覆材の画像処理による劣化度評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11, pp.51-58, 2011.10
- 6) 気象庁：気象観測の手引き, pp.40, 1998.10
- 7) 気象庁：アメダス, <http://www.jma.go.jp/jp/amedas/>
- 8) 日本ウェザリングテストセンター：促進暴露試験ハンドブック, pp.候 17, 2009.9
- 9) 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