

ハイパースペクトルリモートセンシングを用いた 塗装コンクリート表面の評価に関する研究

A study on the assessment of painted concrete surface with hyperspectral remote sensing

中島 貴司*・遠藤 貴宏*・安岡 善文*

Takashi NAKAJIMA, Takahiro ENDO and Yoshifumi YASUOKA

1. はじめに

近年、コンクリート構造物には数多くの劣化が顕在化している。具体的な事例として山陽新幹線の高架橋やトンネルにおけるコンクリートの剥落事故というのが記憶に新しく、コンクリートの劣化と構造物の維持管理に対して注目が集まっている。従来行われてきたコンクリートの維持管理手法は主に目視や打音による検査であるが、検査技術者の技量による違い、客観的な数字が残りにくい、多くの人手や時間を必要とするなどの欠点もある。さらに労働人口の減少という社会情勢の中で継続が難しくなっていることが予想される¹⁾。

東京大学生産技術研究所安岡研究室では2000年度、2001年度とコンクリートの劣化に伴う生成化学物質と劣化コンクリート表面のスペクトル特性との関係について研究が行い、理想的な状態であればコンクリートの劣化診断(中性化、塩害、硫化)が可能である知見を得ている^{2,3)}。そのため、非破壊検査手法のひとつとして、スペクトル(分光)特性に着目したスペクトル計測が有効であること示唆されている。しかし、劣化の起こりうる場所のコンクリート構造物は、あらかじめ塗装を施すことで劣化の進行を遅らせたり、劣化から保護しているということも少なくない。

そのため、スペクトル計測をコンクリート構造物の維持管理手法のひとつとして実用化レベルへ発展させるためには、塗装のスペクトル情報と劣化との関係を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では、ハイパースペクトルリモートセンシング手法を用いてコンクリート表面に塗装を施した塗膜のスペクトル特性を把握することで、塗装工程における塗膜の抜けをスペクトル情報から検査する手法を開発すること、塗膜を人工的に劣化させ、塗膜の光沢度(劣化度)を推定する手法を開発すること、さらに、塗膜と塗膜下のコンクリートがともに劣化している場合に、塗膜下のコンクリートの劣化のみを推定できるのか検討を行うことを目的とする。

2. ハイパースペクトル計測

2.1 計測機器

本研究ではハイパースペクトルメーター (GER 2600, 米国 GER 社製) を用いてハイパースペクトル計測を行った。表1にGER 2600の特徴を示す。

2.2 計測方法

本研究では常に一定の光量で対象物を計測し、再現性確保のため、暗室内で実験を行った^{2,3)}。計測条件について図1に示す。

2.3 分光特性について

本研究ではハイパースペクトルメーターによって計測された対象物の放射輝度値をランバシアン性を持つ標準白板 (BaSO₄) の放射輝度値で割ったものを分光反射率としている。式(1)に分光反射率の計算式を示す。

$$R_{\lambda_i} = \frac{Rad_{\lambda_i}}{Rad_{r_{\lambda_i}}} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

R_{λi} : 波長 λi における分光反射率 (%)

表1 GER2600について

計測波長範囲	333nm~2507nm
チャンネル数	585
バンド幅	約 1.5nm : 333nm~1003nm 約 13.5nm : 1003nm~2507nm

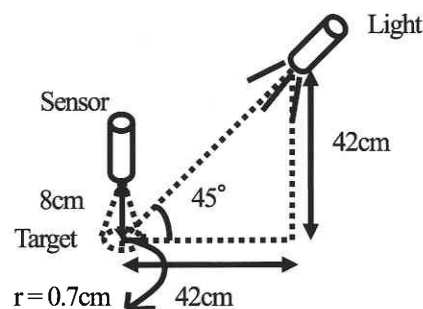


図1 計測条件

*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

Rad_{λ_i} : 波長 λ_i における対象物の放射輝度値
($W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)

$Rad_{r\lambda_i}$: 波長 λ_i における標準白板の放射輝度値
($W \cdot cm^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$)

また、スペクトルの傾きから各対象物のスペクトル形状を比較するために一次微分法を用いた。式 (2) に一次微分値の計算式を示す。

$$\frac{dR_{\lambda_i}}{d\lambda} = \frac{R_{\lambda_{i+1}} - R_{\lambda_i}}{\lambda_{i+1} - \lambda_i} \dots \dots \dots (2)$$

$\frac{dR_{\lambda_i}}{d\lambda}$: 波長 λ_i における分光反射率の一次微分値 (1/nm)
 R_{λ_i} : 波長 λ_i における分光反射率 (%)
 λ_i : バンド i における波長 (nm)

3. 使用塗料について

本研究ではレジガード # 200 (大日本塗料製) を用いて、本塗料における日本道路公団の塩害向け塗装システムである厚膜高弾性システム (塩害用) に準拠して塗装を行った。表 2 に各工程において使用した塗料の種類 (樹脂) と色について示す。

表 2 塗装工程

工程	樹脂	色
1 プライマー	エポキシ	透明
2 パテ	エポキシ	グレー
3 中塗り	エポキシ	白
4 中塗り	エポキシ	白
5 上塗り	ポリウレタン	グレー

4. 塗装工程の抜きの判別について

4.1 実験概要

塗装工程の抜きの判別方法として、実際に行なわれている塗装方法に順じて塗装を施した場合と塗装工程において工程抜けがある場合でスペクトル形状の比較を行い、スペクトル情報から塗装工程の抜けが判別できるか検討を行った。

4.2 結果考察

表 3 に本実験で用いた供試体の種類について示し、図 2 に各供試体の写真を示す。写真よりパテを抜いて作製した供試体に関しては、表面の凹凸より目視で工程抜けは判別できる。しかし、それ以外の工程抜けに関しては、目視では判別が困難であると推察する。

次に、各供試体の分光反射率の結果を図 3 に示し、一次微分値の結果を図 4 に示す。塗装を施していないコンクリートと塗装を施したコンクリートでは明らかにスペクトル

形状が異なることが分かる。また、工程通りに塗装した場合と、塗装工程で何かを抜いた場合で比較すると、可視から近赤外領域 (400-1000 nm) におけるスペクトル形状は、どの供試体も似ているが、1500 nm 以降大きく分けて中塗り塗料の有無によって、供試体間で多少異なることが分かった。さらに一次微分値の結果で比較すると、1820 nm 付近と 2250 nm 付近で中塗り塗料の有無で違いが生じている。これより、スペクトル計測では、中塗り塗料の工程抜けが判別できることが分かった。

表 4 に分光特性と空間特性による塗装工程の抜けの判別結果を示す。なお、表の○×は工程通りの場合と比較して違いが判別できる場合を○、判別ができない場合を×とした。

表 4 に示したようにデジタルカメラなどの空間特性を併用すると、中塗り塗料が 1 層だけ抜けた場合以外の工程

表 3 供試体の種類

No.	塗装手順	工程抜け
0	塗装なし (コンクリート)	
1	上塗り塗料	プライマー, パテ, 中塗り塗料 2 層
2	プライマー, 上塗り塗料	パテ, 中塗り塗料 2 層
3	プライマー, 中塗り塗料 1 層, 上塗り塗料	パテ, 中塗り塗料 1 層
4	プライマー, 中塗り塗料 2 層, 上塗り塗料	パテ
5	プライマー, パテ, 上塗り塗料	中塗り塗料 2 層
6	プライマー, パテ, 中塗り塗料 1 層, 上塗り塗料	中塗り塗料 1 層
7	プライマー, パテ, 中塗り塗料 2 層, 上塗り塗料	なし

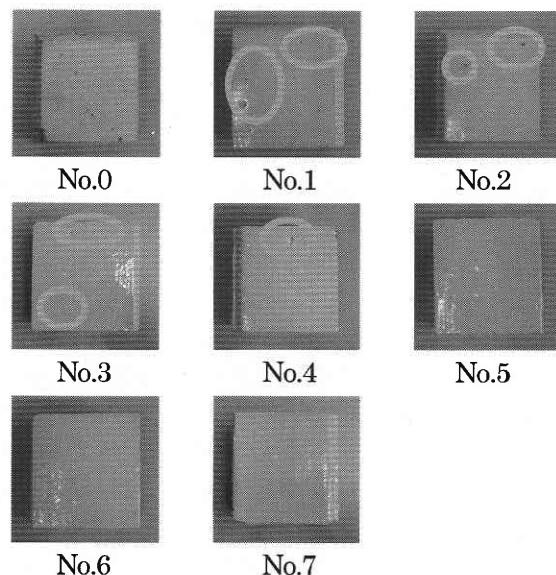


図 2 供試体の写真

研究速報

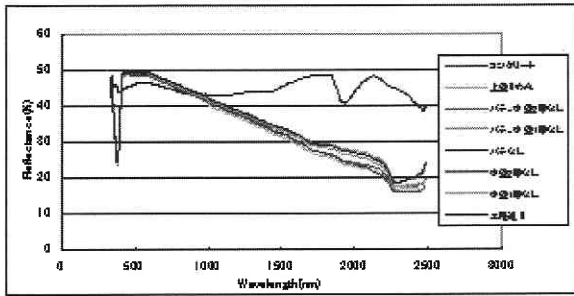


図3 各供試体の分光反射率

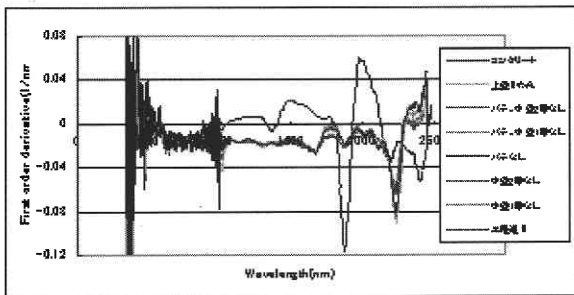


図4 各供試体の一次微分値

表4 分光特性と空間特性の結果

	No.1	No.2	No.3	No.4
No.7	空間:○	空間:○	空間:○	空間:○
	分光:○	分光:○	分光:×	分光:×
	No.5	No.6		
No.7	空間:×	空間:×		
	分光:○	分光:×		

抜けは、どちらかの方法を用いて判別することが可能であると結論する。

5. 塗膜が劣化した場合の評価について

5.1 実験概要

本実験では、①スペクトル情報から紫外線による塗膜の劣化を評価すること、②塗膜が劣化し、さらにコンクリートも劣化した場合に、塗膜下のコンクリートの劣化が推定可能であるか検討を行った。表5に本実験で準備した供試体の種類を示す。供試体は、各コンクリートに対して表2の通りに塗装を施したものを準備し、さらにメタルハイドランプによって強度の紫外線を照射させることで短時間で人工的に光沢低下した塗膜表面を作製した⁴⁾。なお、照射時間は50、100、200時間照射したもの(200時間のみ両方のコンクリート)を作製した。また、光沢度計を用いて計測した各供試体の光沢保持率の結果を表6に示す。

5.2 結果考察

健全なコンクリートに対して塗膜表面が紫外線劣化した供試体の分光反射率の結果を図5に示し、一次微分値を

表5 供試体の種類

	健全な塗膜表面	紫外線劣化した塗膜表面
健全なコンクリート	①, ②	①, ②
塩害コンクリート	②	②

表6 各供試体の光沢保持率

サンプル	光沢度(照射前)	光沢度(照射後)	光沢保持率(%)
50時間	47.7	43.7	91.5%
100時間	54.9	49.8	90.8%
200時間	69.1	26.6	38.5%
200時間(塩害)	62.9	24.7	39.2%

6に示す。分光反射率で比較すると、照射時間が長いほど分光反射率は減少していることがわかる。また、一次微分値で比較すると1650 nm付近、1800 nm付近、2250 nm付近で照射時間が長いほど一次微分値の大きさが異なっている。これは塗膜の主成分である樹脂の結合力が弱くなったことで塗膜が劣化し、スペクトル情報に影響を与えたと推察される。

図7に塩害コンクリートに対して塗膜表面が紫外線劣化した供試体の分光反射率の結果、図8に一次微分値の結果を示す。凡例のs0 h, s200 hは、塩害コンクリートに塗装を施した供試体を示す。健全なコンクリートの時と比較すると、紫外線照射を施すと分光反射率が減少することは同様の傾向である。しかし、紫外線劣化前と劣化後の分光反射率、一次微分値は共に差が見られなかった。これは多層塗りを施しているため表面の塗膜は劣化しているが、下層の塗膜は完全に劣化していないと考えられ、塩害コンクリートの特徴波長域を捉えるに至らなかったと推察された。そのため、塩害コンクリートの特徴波長域を捉えるためには、塗膜の全層が劣化している場合を再現する必要があると結論する。

6. ま と め

本研究の成果を以下に示す。

- ① スペクトル情報と空間特性との併用手法により、中塗り塗料が1層だけ抜けた場合以外の工程抜けを判別することが可能
- ② 塗膜表面のスペクトル特性から、紫外線劣化による塗膜の劣化度(光沢度)を推定することが可能
- ③ 多層塗り塗装を施した塩害コンクリートを紫外線劣化させた場合、下層の塗膜まで劣化が進行しないと劣化コンクリート自体のスペクトル情報を計測することは困難であることが示唆

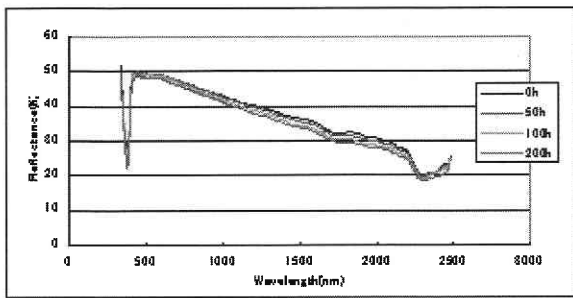


図5 紫外線劣化させた塗膜表面の分光反射率
(健全なコンクリート)

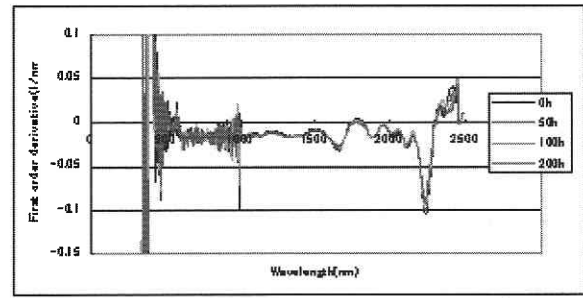


図6 紫外線劣化させた塗膜表面の一次微分値
(健全なコンクリート)

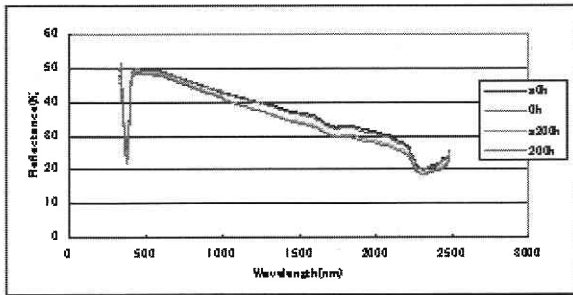


図7 紫外線劣化させた塗膜表面の分光反射率
(塩害コンクリート)

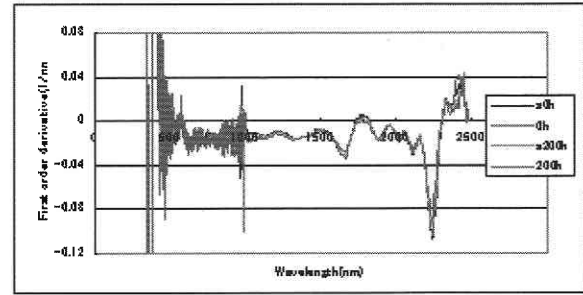


図8 紫外線劣化させた塗膜表面の一次微分値
(塩害コンクリート)

また、今後の課題について以下に示す。

- ① 点計測から面計測へ移行するためにハイパースペクトルイメージャー計測への応用
- ② 室外計測時の環境因子の影響を評価
- ③ その他の塗料における分光特性と劣化度との検証
- ④ 塗膜の劣化とコンクリートの劣化との物理的な関係を明らかにすることが必要

謝 辞

本研究で使用した塗料の提供、メタルハライドランプによる紫外線劣化と光沢度計による光沢保持率の計測の際に協力していただいた大日本塗料株式会社の岩見 勉様に感

謝の意を表し、ここに記します。

(2004年3月4日受理)

参 考 文 献

- 1) 森島啓行, 尾高達男: コンクリート構造物と非破壊検査, JR EAST Technical Review-No. 2, pp. 11-17, 2003
- 2) 有田淳: ハイパースペクトルリモートセンシングを用いたコンクリートの劣化特性の評価に関する研究, 東京大学修士論文, 2001
- 3) 佐々木顕一郎: ハイパースペクトル計測による劣化コンクリート表面に評価に関する研究, 東京大学修士論文, 2002
- 4) 社団法人日本塗料工業会: 各種耐候試験機の調査研究 [報告書], 2003