

コンクリート表面保護工と近接目視点検

— 透明な表面被覆材とその視認性評価法 —

佐々木 巖*1・西崎 到*2

表面保護工は、コンクリート構造物の予防保全や損傷対策として、遮塩性、水分コントロール、ひび割れ封止などを目的に用いられる。表面被覆工法は、劣化促進物質の遮断に優れ、とくに沿岸部のコンクリート構造物で塩害を受けはじめた場合の補修方法として広く用いられている。一方、維持管理時代を受け多くのコンクリート構造物では、定期的な点検において構造物の全面にわたる直接近接目視を行い、変状を早期かつ詳細に発見することが規定されている。表面被覆材で補修した場合にはコンクリート表面の状態が直接目視できず、点検診断を困難にしていることが課題で、本報ではその事例としてのPC撤去桁の調査結果を示した。近年では、視認性保持を目的とした透明な表面被覆材が開発され普及しつつある。透明な被覆材の視認性（どの程度コンクリート表面を目視できるか）を定量的に評価する方法は確立されていなかった。このため、表面被覆材および被覆面の状態に関する評価指標を検討するとともに、機器測定による客観的指標に基づいた評価のための試験調査を行った。

キーワード：表面被覆、再劣化、目視点検、視認性、評価方法

1. はじめに

コンクリート部材は、水、塩分、二酸化炭素等のさまざまな要因と気象作用により劣化損傷が進行し、放置すると重篤化することもある。適切な維持管理を行うために、点検方法が定められている。たとえば道路橋では、5年ごとの定期点検において構造物の全面にわたる直接近接目視を行い、変状を早期かつ詳細に発見することが規定されている。そして、劣化損傷への対策として計画的な補修がなされる。

コンクリート部材の内部まで劣化損傷が及んでいない場合には表面含浸や表面被覆が、かぶりコンクリートの更新が必要な場合には断面修復により補修対策がなされることが多い。いずれも、コンクリート表面を保護し、塩化物イオン、水、水蒸気、二酸化酸素などの劣化因子の侵入を遮断して耐久性の向上を図る。

表面被覆工法や表面含浸工法は、コンクリート面に塗布することにより塗膜や改質層を形成するものであり、沿岸部の比較的軽度な塩害損傷をはじめとしたさまざまな予防保全的な補修に用いられている。

表面含浸工法は、施工後もコンクリート素地の外観がほ

とんど変わらず、目視点検への影響はほとんどない。塩化物イオンをはじめとした劣化促進物質の浸透を低減できるものの、長期的な遮断でなく遅延が目的である¹⁾。また、進行性のひび割れを伴う場合には適用困難な場合もある。

一方、表面被覆工法は優れた遮断性能とひび割れ追従性を有することが最大の特徴で、水分や塩化物の移動を有効に遮断することができる¹⁾。しかし、多層の有色（エナメル）塗膜で塗り込めてしまうことがこれまで一般的で、施工後のコンクリート表面の視認性が難しくなる。これは、目視点検における外観変状の発見を困難にし、ひいてはその後の再劣化が進行した場合の対応を遅らせることもある。

土木研究所ではコンクリート構造物の耐久性向上のための調査研究を続けてきており、コンクリート橋のメンテナンスサイクルの効率化・信頼性向上に関する研究では、表面保護工をはじめとした補修対策の効果的な適用や、施工の信頼性向上を進め、コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル（案）²⁾としてとりまとめた。これらの研究では、表面被覆の施工後に生じた再劣化の状況を調査した。また、定期的な近接目視点検を前提とする維持管理時代に対応する、コンクリート素地の視認性をもつ透明な表面被覆材と、その評価方法の研究を行ったのでここに報告する。

2. 表面被覆された部材の再劣化

2.1 PC橋撤去桁の再劣化事例

プレストレストコンクリート橋の補修対策においては、重要度、劣化度、コストなどを総合的に勘案して補修対策が実施される。しかし、断面修復や表面被覆による補修工事を施したのち、比較的早期に再劣化する事例もある。コンクリート構造物の補修後の再劣化に関しては、いくつかの原因が考えられ、補修時に想定した延命効果が得られていないケースについては、その原因を究明し、新たな対策の考案につなげることが望ましい。上記の補修対策施工マニュアルでは、劣化状況の判断、工法材料の選定、施工管理



*1 Iwao SASAKI

（国研）土木研究所
材料資源研究グループ



*2 Itaru NISHIZAKI

（国研）土木研究所
材料資源研究グループ長

の3類型に分けて事例を解説している。ここでは、本報の主題である表面保護工法とコンクリート素地の視認性に関して示唆を与えた撤去桁の詳細調査結果³⁾について述べる。

調査対象構造物は、新潟県内の国道の海岸部に1966年に架橋された5径間単純PCポストテンション方式T桁橋である。塩害による著しい劣化が生じ、2000年12月および2008年12月に表面被覆および断面修復による補修が施された。それぞれの補修では、損傷部分の断面修復、桁外面の全面に有機系の表面被覆材が使用された。しかし、その後の劣化の進行や路線の構造物更新計画において、2010年9月に供用停止にいたった。主に下フランジ部に、PC鋼材の腐食によるコンクリートのひび割れや浮き、それに伴う表面被覆材の割れが生じていた。この橋梁から、海側の桁中央部を切り出したものを撤去桁としてつくば市の土木研究所に搬入し試験体とした。

2.2 表面被覆の変状と内部の貫通ひび割れ

撤去桁のウェブでは表面被覆材の変状がみられ、図-1に示すように表面被覆材の膨れの分布の記録やコア採取を行った。図中右側の桁切断面から中央へ1m程度の範囲でコアを採取したところ、ウェブを貫通するひび割れが確認された。被覆の除去やコア試料からコンクリートのひび割れ箇所を調査し、そのひび割れ箇所を結んだ想定ひび割れ線を図中に示す。ひび割れは、表面被覆材に多数の膨れが観察された範囲の上縁付近に位置していた。

このひび割れの発生原因は、ウェブ断面に確認された貫通ひび割れとコアに確認したひび割れから類推すると、鉄筋腐食に起因するものではなく、過荷重や疲労によるものと考えられた。ウェブを貫通するほどのひび割れであったにも関わらず、ひび割れ注入などの補修が行われた形跡がないため、2000年の補修後にひび割れが生じたものと推察される。表面被覆材には、直径が1~5cm程度の膨れ、長さ15cm程度の割れ、表面被覆材の層間の剥がれが観察された。

2.3 ひび割れや被覆の膨れ内部構造

図-1中に示した位置から採取したコアを、X線CTにより内部観察した際の断面画像が図-2である。断面修復された箇所のX線CT画像(c)および(d)からは、①コンクリートと断面修復材の界面、②断面修復材の各層の塗

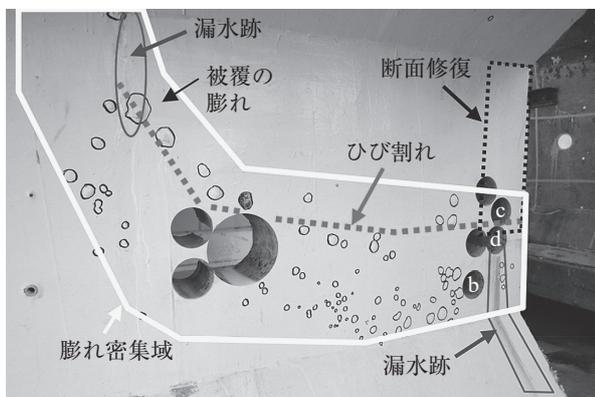
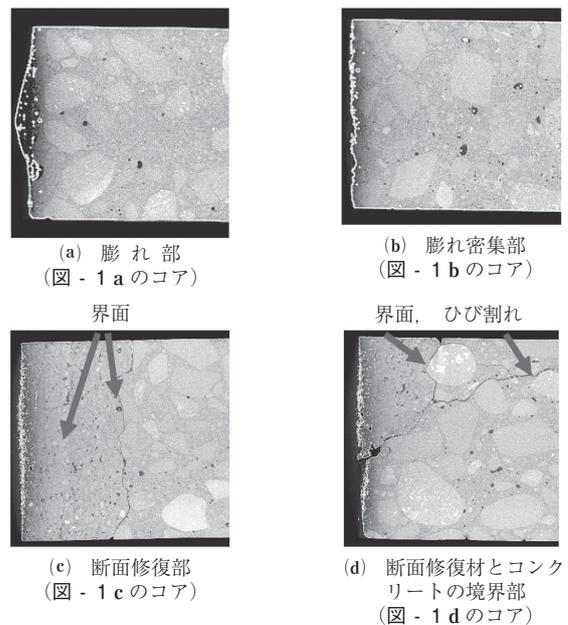


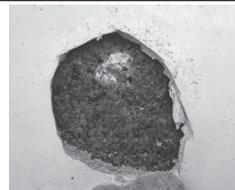
図-1 撤去桁のウェブにおける、膨れの分布、コア採取位置、躯体の想定ひび割れ²⁾



(画像左側が表面被覆面)

図-2 コア試料のX線CT画像³⁾

表-1 表面被覆の膨れの内部構造³⁾を改変

開削時の破壊状態と位置	 被覆材の層間 ひび割れ	 コンクリートと被覆の界面
	内容物の状況と性状	内部ひび割れから液体がしみ出した 黄色透明液体、pH 12.7、水と相溶、Cl ⁻ 濃度 0.8%、乾燥により被膜を形成

継ぎ界面、③コンクリートのひび割れが観察された。断面修復部の周辺は、上述の①~③の欠陥を介して水が集積しやすい構造となっており、図-1に示すとおり、その近傍には漏水箇所や密集した膨れが観察された。X線CT画像による膨れ部の解析からは膨れの内部は空洞ではない様子が観察されたが、膨れの内容物の成分は特定できなかった。

表-1には、表面被覆の膨れの内部構造を示す。膨れに切込みを入れたところ、いずれも膨れの内部から液体がしみ出した。表-1左に示す膨れの内部には、コンクリートに塗布されたパテに生じたひび割れ、そのひび割れから液体がしみ出している様子、ならびに、表面被覆材の層間の界面で一体性を失っている様子が観察された。表-1右に示す膨れの内部は、表面被覆材とコンクリートの界面で一体性を失っており、同様に液体がしみ出していたが、膨れの背面のコンクリートにひび割れは認められなかった。膨れ内容物の液体は、pH 12.7の強アルカリ性で、塩化物イオン濃度は0.8%であった。地覆縁端や床版防水欠陥部等から侵入した塩水は、コンクリート中を浸透し表面被覆の裏面に集積するものと考えられる。そして、ひび割れがあるとその移動経路になるとみられる。

2.4 撤去桁調査事例における表面被覆の課題

補修後に比較的短期間で再劣化したPC橋桁の調査では、表面被覆材を適用した箇所に膨れや割れなどの変状が集中していた。表面被覆層の裏面には、とくにひび割れ部において水分が移動していることがうかがわれ、架橋環境や劣化状況からすると、コンクリート桁内に浸透した塩化物の移流や拡散が生じているものと考えられる。

補修後の表面被覆のこれらの変状は、PC桁の再劣化の兆候を示すものであるが、表面被覆材に生じる変状は、密集するなど顕在化した場合を除いて目視点検で注目されにくい。表面被覆がないと、桁内の水分や塩化物の移動速度は更に早くなるほか、飛来塩分の供給を受けることになる。塩害の予防保全で表面被覆の有効性が高いことには変わりないが、補修後にも変状の進行有無を確認することは重要である。この点は、近接目視を中核としたコンクリート橋の維持管理における表面被覆工法の課題である。

3. 透明な被覆材による表面保護

表面被覆材は、劣化促進物質の遮断やひび割れ封止が目的であり、それを実現するために均質で強固な塗膜を形成する必要がある。このため、一般に顔料を含む有色（エナメル）塗料が用いられる。中塗りでは主に物質遮断のための体質顔料、上塗りでは耐水性や演色性をもたせた着色顔料が用いられる。したがって、これら従来型の表面被覆材で補修するとコンクリート表面の状態が直接目視できなくなり、前述したように、目視点検において損傷の兆候を見にくくする要因として、維持管理上の課題となる。もし補修効果が十分に得られずに再劣化してしまうと、劣化損傷の検知が遅れ重篤化につながる可能性があるとして危惧されている。

このような背景から、耐久性向上と目視点検の両立を図るものとして、近年、透明な表面被覆材や剥落防止材が開発され普及しつつある。これらの表面被覆材は、表面被覆材としての遮蔽性やひび割れ追従性を十分に保持しながら、図-3に示すようにコンクリート表面のひび割れなどの変状とその進行を目視することができることが特徴である。

4. 表面被覆材に関する視認性の評価方法

透明な被覆材であっても、その塗膜を通して見た場合のコンクリート表面の様子は素地そのものと同じではない。表面被覆材の上からコンクリート表面をどの程度目視できるか（視認性）を客観的な方法で定量的に評価する方法については、確立されていない。そこで、被覆材が視認性に与える要因の調査を行い、目視点検のための視認性に関する表面被覆材の評価方法を検討した。まず、表面被覆材および被覆面の状態に関する視認性の評価指標を検討し、さらに、近接目視点検での点検者の主観的評価結果に関連付けることのできる、客観的指標に基づいた機器測定による評価方法を策定するための試験調査を行った⁴⁾。

4.1 表面被覆による視認性の低下要因

被覆材によるコンクリート表面の視認性阻害のメカニズ



図-3 コンクリート面を視認できる透明な表面被覆の例

ムについて検討した。その結果、表面被覆材自体の透明さ（透明性）だけでなく、素地に直接塗布するプライマーなどの材料がコンクリートに浸透した場合に生じる素地の暗色化が大きく関わっていることがわかった。

被覆材の膜が透明でないと視認できないことはいうまでもないが、透明であっても、表面が濡れたように暗く見えることが視認性に大きく影響することがわかった。とくにひび割れなどの変状箇所は健全な一般部に比べ濃色に見えることから、たとえば図-4の(b)や(c)のように表面が全体に暗色化することは、近接目視点検などにおいて変状の視認性を低下させることになると考えられる。

4.2 コンクリート表面の視認性の評価指標

(1) コンクリート表面の光学現象

光の波長よりも構造単位が大きい物質や多孔質材料等の表面に光があたると、入射光はその粒子や細孔の構造内にもぐり込み散乱し、素材表面で反射や屈折を繰り返したあと、再帰し出てくる。素材が特定の波長を吸収する（色彩をもつ）ものでなければ、人の目には光源色と同じ白色なものとして見える。たとえば、透明な物質である水が水蒸気（湯気）になり空中に分散すると白色に見えたり、透明な食塩や樹脂が粉体や繊維状になると白色を呈するのは、このような現象から説明される。

コンクリート表面では光が乱反射しており、構成素材の特定波長吸収もあまりないため、白色に近く見えていることが多い。しかし、細孔に水や樹脂が入り込み表面が濡れると、表面での屈折率の比（相対屈折率）の程度により光の乱反射が少なくなり、再帰する光量が低下することで暗色化が起こるとされる。つまり、粒子や細孔表面の相対屈折率が低下すると、より深く光がもぐり込むことになり減衰し、反射光が弱くなって系外に再帰する光量が減り白色度が低下する⁵⁾。

(2) 濡れによる暗色化

コンクリート表面の細孔内が空気（屈折率=1.00）から間隙水（屈折率=1.33）に置換されると、素材表面での相対屈折率が大きく変化し、細孔内部にもぐり込む光が多くなり再帰光が減り、結果として灰色が増して暗色化する。その程度は、コンクリート（セメント石膏や鉱物質の屈折率は、紙セルロース同様におおむね1.5~1.6と高い値である）と水や樹脂等の含浸媒質との相対屈折率の値により大きく支配されるほか、多孔質材料内部への光のもぐり込みや樹脂含浸の深さ、コンクリートに含まれる有色の鉱物や夾雑物の量にも左右される。つまり、表面保護の材料、とくにコンクリート面に直接触れ一部が浸透するプライマ

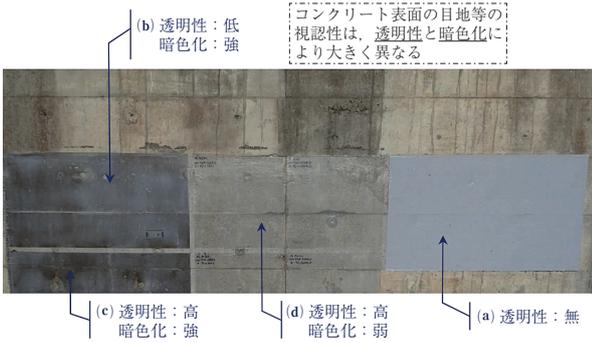


図 - 4 コンクリート面の視認性への影響要因



写真 - 1 視認性評価試験状況

表 - 2 試験材料の組合せと隠ぺい率（透明性）および暗色化度合いの測定結果

プライマの種類	透明被覆材の種類（隠ぺい率 %）					
	I (6.0)	II (12.6)	III (14.3)	IV (18.3)	V (20.0)	VI (21.1)
A エポキシシーラー	15.7	7.6	5.5	3.2	3.5	9.3
B 弱溶剤形エポキシシーラー	10.5	7.6	4.1	7.0	4.2	8.6
C 水性ウレタンプライマー	2.0	5.6	-0.8	-1.0	-6.1	-2.6
D 弱溶剤形エポキシシーラー 50% 希釈品	17.9	9.1	7.0	7.3	2.2	6.7
E ラッカー系アクリルプライマー	1.9	3.1	6.7	-2.0	-1.8	-0.2
F 水性カチオン系シーラー	3.6	1.9	5.3	0.4	-1.1	3.2
G 水性シーラー	0.4	-1.7	-2.1	-0.6	-6.4	-3.3

注) 表中の数値は暗色化度合い (-ΔL*)

表 - 3 目視による視認性評価集約結果

供試体	A-I	A-II	A-III	A-IV	A-V	B-I	B-II	B-III	B-IV	B-V	C-I	C-II	C-III	C-IV	C-V	D-I	D-II	D-III	D-IV	D-V	E-I	E-II	E-III	E-IV	E-V	F-I	F-II	F-III	F-IV	F-V	G-I	G-II	G-III	G-IV	G-V							
評価平均	3.6	1.8	2.6	2.1	1.8	2.6	3.1	2.2	2.0	1.8	2.0	1.1	2.9	1.7	2.7	2.0	1.8	1.9	3.0	2.3	1.8	1.6	1.3	2.1	3.9	3.3	3.1	3.4	1.7	3.2	3.9	3.5	2.8	2.0	2.4	2.0	3.4	2.9	2.8	2.8	2.8	1.4
標準偏差 σ	0.79	0.79	0.84	0.83	0.80	0.69	0.83	0.82	0.86	0.83	0.88	0.26	0.98	0.76	0.85	0.88	0.79	0.90	0.77	0.90	0.90	0.74	0.52	0.80	0.31	0.76	0.74	0.69	0.72	0.77	0.26	0.64	0.72	0.82	0.88	0.92	0.83	0.74	0.83	0.75	0.86	0.63
2: 専門家	3.2	1.3	2.2	2.0	1.5	2.5	3.2	2.5	2.0	1.8	1.8	1.0	3.0	1.8	2.7	1.7	1.5	1.7	3.0	2.5	1.5	1.5	1.0	1.8	4.0	3.3	3.0	3.3	1.5	3.0	4.0	3.5	2.8	1.7	2.2	1.8	3.5	2.8	2.8	2.7	2.5	1.2
1: 技術者	3.6	1.6	2.4	2.1	1.8	2.6	3.0	2.0	1.8	1.5	1.8	1.0	3.0	1.6	2.8	1.6	1.8	1.9	2.8	1.9	1.4	1.1	2.0	4.0	3.1	3.3	3.6	1.5	3.4	4.0	3.5	2.8	1.8	2.3	1.5	3.4	3.0	2.9	2.8	3.0	1.4	
0: 一般	3.7	2.1	2.9	2.1	1.9	2.6	3.1	2.1	2.1	1.9	2.1	1.1	2.9	1.7	2.7	2.3	1.9	2.1	3.1	2.5	2.2	1.7	1.4	2.4	3.8	3.4	3.1	3.3	1.9	3.1	3.9	3.4	2.9	2.3	2.6	2.3	3.3	2.9	2.7	2.8	2.9	1.6

一の物性が主因となり、コンクリート表面の暗色化の程度に相違が生じると考えられる。

構造物の点検においてひび割れを目視する場合、ひび割れはコンクリート表面の健全な一般部に比べると、黒い線状、つまり暗色に見える。塗料の含浸に伴い表面色が全体に暗色化することは、近接目視点検などにおいてひび割れなどの変状の視認性を低下させることとなり、できるだけ暗色化の生じない被覆材料であることが望ましい。

(3) 被覆塗膜の透明性

表面被覆をもつコンクリートの視認性評価の指標として、塗膜自体がどの程度透明であるかが重要であるのは明らかである。コンクリート表面に積層される被覆層が、白濁していたり呈色しているよりは全体として透明であるほうが良いことはいうまでもなく、透明度が高い塗料ほど、それが塗布されたものの表面状況の確認に有利と想定される。

4.3 試験方法

(1) コンクリート面の暗色化の評価方法

コンクリート面の暗色化は、塗膜のみではなく基板上の塗布面での評価試験が必要である。ここでは、塗装前後のモルタル表面について JIS K 5600-4-6 に基づき機器測定により明度 L* を測定し、モルタル素地の明度との差を暗色化度合い (-ΔL*) の指標として、以下の式により求めた。

$$\Delta L^* = L^*_a - L^*_b$$

ここに、L*_a: 塗装後のコンクリート表面の明度

L*_b: 塗装前(無塗装)のコンクリート表面の明度

(2) 塗膜の透明性の評価方法

塗膜の透明性は、素地や下層塗膜を覆い隠さないという評価尺度であり、塗膜の隠ぺい性と正反対の指標であると考えることができる。そこで、JIS K 5600-4-1 にて規定される淡彩色塗料用の隠ぺい力測定方法を用いて、表面被覆材の透明性指標としての隠ぺい率を求めた。

(3) 被験者目視による主観評価

機器測定による客観指標の設定の根拠データとして、近接目視点検での点検者の主観的評価を想定したブラインド

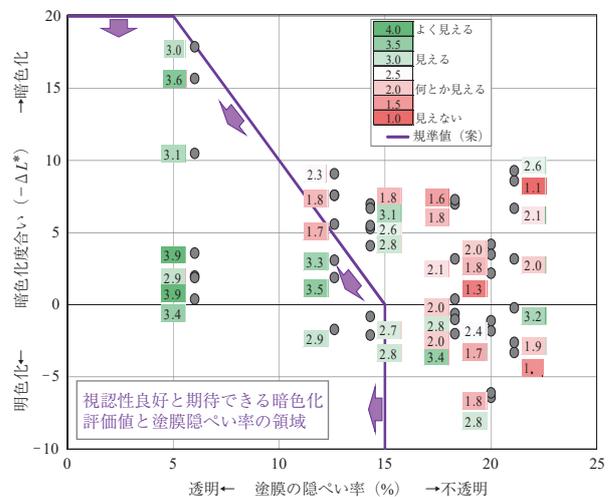


図 - 5 視認性を確保できる表面被覆材の性能指標の範囲

テストを行った。コンクリート材料の専門家から建設材料に関する経験があまりない者までを含めた 28 名を被験者とし、供試体記号のみを示し評点を記録した（写真 - 1）。評点は、模擬ひび割れや素地の表面が、よく見える：4 点、見える：3 点、何とか見える：2 点、見えない：1 点として集計した。

4.4 試験材料

70 × 150 mm のモルタル試験板（厚さ 10 mm）の表面中央にダイヤモンドカッター（刃厚：0.2 mm）を用いて 1 本のキズ（深さおよそ 1 mm）を付けて模擬ひび割れとした。この基板に、異なる種類および膜厚をもつ透明な表面被覆材 6 種類に、性状の異なるプライマ 7 種類を組み合わせることにより、視認性がさまざまに異なるのべ 42 種類の供試体を準備した。被覆材料の組合せと、それらの隠ぺい率および暗色化度合いの測定結果を表 - 2 に示す。なお、モルタル基板の無塗装の場合の明度の平均値は 58.4、標準偏差は 0.99 であった。暗色化度合い（ $-\Delta L^*$ ）の値はこの平均値からの差であり、値が大きいほど暗く見えることとなる。

4.5 試験結果と性能指標値

42 種類の供試体の被験者目視による主観評価結果の集約を表 - 3 に示す。この結果では、被験者経験による顕著な相違は認められなかった。被験者の経験はひび割れ等の発見や判別に求められるスキルであるものの、今回の試験では着目すべきひび割れが明らかであるためと考えられる。本検討は室内での供試体に対する試行であり実橋桁下等の環境と異なるが、評点の標準偏差も 1 未満であり、ひび割れ等の変状の視認性としては有効であると判断できる。

供試体の暗色化度合いの結果と被覆材の隠ぺい率をマトリックス状に示したプロットに、目視による視認性評価結果（28 名の平均値）を重ねた結果を図 - 5 に示す。塗膜の隠ぺい率が大きく透明性が低い領域（図の右上側）で視認性が低い傾向が認められた。隠ぺい率が 18.3 % 以上で不透明に近くなると、暗色化度合いの値にかかわらず視認性評点は低くなることから、塗膜の隠ぺい率の上限として 15 % を設定するのが良いと思われた。隠ぺい率が 5 ~ 15 % で中程度の場合には、塗膜による暗色化度合いが小さいほど視認性が良い傾向がある。塗膜の隠ぺい率が低く透明な場合は、暗色化度合いが 20 程度、すなわち素地が暗く見えてもひび割れの視認性を確保できることがわかる。

これらの結果から、大多数の人にひび割れが見えると判断できる範囲を、目視評価による視認性評点の平均値が 3 以上と設定すると、図中に矢線で示した領域を判定値として整理できると考えられる。

5. おわりに

コンクリート構造物の維持管理において、定期的な直接近接目視点検によるコンクリートの健全性の確認がなされるようになってきている。塩害等の劣化損傷が進行するとその予防保全のために表面被覆などの対策がなされる。ところ

が、2 章の事例で示したように再劣化が進むようなことがあると、表面被覆により点検時に変状の発見が困難になることがわかる。

その解決策のひとつとして、表面被覆材としての遮蔽性を十分に保持しながら、コンクリート表面のひび割れなどの変状を目視することのできる、透明な表面被覆材が開発され普及しつつある。これらは、遮蔽性やひび割れ追従性といった表面被覆材としての品質規格は照査されているものの、コンクリート素地の視認性については既往の評価指標がないことから開発者ごとの判断によりその性能を示している。これをうけて、本研究ではコンクリートの表面の視認性を機器測定により評価する方法を検討した。評価指標の検討と供試体によるブラインドテストの結果から、塗膜の隠ぺい率と暗色化度合いによる判定指標を得ることができた。その結果から、評価方法（案）⁴⁾として提案した。

今後、現場での視認性評価による検証を続けて、データの拡充を進め、補修材の品質規格への適用を図る予定である。また、黄変や白濁等の塗膜の材料劣化、あるいは塗膜表面への塵埃やカビ等の付着により、コンクリート素地の視認性が低下することが懸念される。そのため、室内促進劣化試験、屋外暴露試験供試体や実橋等での調査により評価検証を続けている。

本研究では表面被覆材を対象に検討を進めたが、コンクリート表面の目視がより重要であるものに剥落防止工がある。同様に透明性を有するものが普及しつつあり、コンクリート素地の健全性に関する目視点検の有効性を確保するための視認性評価指標が求められている。剥落防止工は繊維を有するものが多いものの、視認性のメカニズムは同様であると考えられ、これらの材料工法についても試験結果を蓄積して本評価法の適用範囲の拡大を図りたいと考えている。

参考文献

- 1) 佐々木 徹, 櫻庭浩樹, 西崎 到, 青山敏幸: 海洋暴露 30 年経過したコンクリート保護工の調査報告, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.24, pp.487-490, 2015.10.
- 2) 土木研究所: コンクリート構造物の補修対策マニュアル (案), 土木研究所資料第 4343 号, 2016.8.
- 3) 熊谷慎祐, 櫻庭浩樹, 宮田敦士, 佐々木 徹, 西崎 到: 表面被覆工および断面修復工による補修を施したコンクリート構造物の再劣化, 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, 日本材料学会, Vol.14, pp.271-276, 2014.10.
- 4) 土木研究所: 透明な表面被覆材を施したコンクリート表面の視認性評価方法に関する研究 - コンクリート表面の視認性に関する表面被覆材の評価方法 (案) -, 土木研究所資料第 4387 号, 2019.3.
- 5) Eugene Hecht: ヘクト 光学 I 基礎と幾何光学, 原著 5 版, 丸善出版, p.243, 2018.

【2020 年 10 月 9 日受付】