

経年変化と長期耐久性を考慮した土木施設の色彩設計に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令3～令5

担当チーム：地域景観チーム

研究担当者：福島宏文、榎本碧、笠間聡

【要旨】

公共空間において土木施設の塗装等の仕上げが景観や施設機能に及ぼす影響は大きい。塗装等の褪色・変色や除雪による剥がれ、亜鉛メッキやリン酸亜鉛処理などの融雪剤等による白錆の発生、色の経年変化などの景観面の課題がある。また、褪色等の劣化が進んだまま長期供用し、景観が損なわれる事例も増加している。本研究では公共空間の景観向上を目的に積雪寒冷地の土木施設の塗装等の仕上げについて、褪色などの見た目の変化がどのように進むかを文献調査や現地調査、実験から明らかにし、経年による色の変化の傾向の異なる塗装方法について景観評価を行い、経年変化や長期耐久性を考慮した色彩の設計手法について明らかにした。

キーワード：色彩、塗装、長期耐久性、景観評価、土木施設

1. はじめに

公共空間において土木施設の塗装などの仕上げの色が景観や施設機能に及ぼす影響は大きい。特に環境に配慮が必要な国立公園などの地域では、山林に囲まれた立地に馴染むこげ茶が景観色として使用されてきた。また、道路附属物では景観4色とされるダークブラウン(10YR 2/1)、ダークグレー(10YR 3/0.5)、グレーベージュ(10YR 6/1)、オフグレー(5Y 7/0.5)の4色などを採用し、景観に馴染む(融和する)色を使用する事例が増加している(写真-1)。

一方で、地域や土木施設によっては慣例的に使用されてきた彩度の高い鮮やかな色を使用し続ける事例もまだ多い(写真-2)。こうした色は、緑系の色相が有意な自然環境下において補色関係にあるため、使い方によっては景観に調和する(対比調和する)場合もある。しかし、土木施設のように使用する面積が大きい場合や多種多様な色が用いられる場合、点在する場合などでは景観を阻害するケースも多々ある。

また、維持管理においては、経年変化による塗装等の褪色・変色や除雪による剥がれ、亜鉛メッキやリン酸亜鉛処理などに対する融雪剤等による白錆の発生など、積雪寒冷地特有の景観面での課題もある。さらに、再塗装サイクルによっては、褪色などの外観の劣化が進行したまま長期間使用される土木施設も多い。(写真-2)。予防保全措置の実施に伴い、部分的な補修による色のばらつきが原因で景観が損なわれる事例も増加している(写真-3)。

これらの課題に対応するため、本研究では公共空間



写真-1 景観色が使用された土木施設
(札幌市内/グレーベージュ)



写真-2 高彩度色で塗装された土木施設。塗装ムラや錆などの影響が顕著に表れる



写真-3 補修時に部分的に再塗装された土木施設

の景観向上を目的に積雪寒冷地の土木施設の塗装等の仕上げについて、褪色などの見た目の変化がどのように進むかを文献調査や現地調査、促進試験から明らかにし、経年による色の変化の傾向の異なる塗装方法について景観評価を行い、経年変化や長期耐久性を考慮した色彩の設計手法について明らかにした。

2. 塗装色の経年変化に関する分析

2.1 塗装色の経年変化に関する既往研究レビュー

本節では、塗装の暴露試験および促進試験に関する既往研究を精査し、経年による色の変化に関する知見を整理した。土木施設の塗装には、工場もしくは現場での素地調整、下塗り、中塗り、上塗りという工程があるが、本研究では見た目の変化に焦点を当て、上塗りを対象としている。

また、土木施設で一般的に使用される塗料としては、エポキシ樹脂系、ウレタン樹脂系、フッ素樹脂系などがある¹⁾。日本塗料工業会の統計資料や塗料メーカーへのヒアリングによれば、橋梁などを除く土木施設ではウレタン樹脂系塗料が多く使用されている。そのため、本研究では特にポリウレタン樹脂系塗装の色変化に着目した。

2.1.1 防食性能とコストに関する既往の知見

ポリウレタン樹脂系塗料の主な劣化要因は、紫外線や加水分解などであり、重防食塗料ガイドブック²⁾によれば、特に色の変化に繋がる自然光の紫外線環境(411kJ/mol)における減耗速度はポリウレタン樹脂系(減耗2μm/年) > フッ素樹脂系(0.5μm/年)である。機械工事塗装要領(案)・同解説²⁾に示される基本的な塗装仕様では、ポリウレタン樹脂系塗料の上塗厚さは30μmであり、この場合、減耗速度から耐用年数は15年と考えられる。塗膜の塗布厚さが同じであればフッ素樹脂系の方が耐用年数は高く、また色変化も小さい。しかし、図-1に示すように、上塗り塗料の材料のみの積算単価を見ると、フッ素樹脂系の価格はポリウレタン樹脂系の約3倍となる。また、色別に見ると、展色剤の種類に限らず黄・オレンジ系および赤系の濃彩色は、淡彩や中彩に比べて約2倍の価格差がある³⁾。

2.1.2 塗装色の変化に関する既往研究

塗膜の減耗に伴い、塗装色の見た目の変化も起こる。既往研究では、暴露試験および促進試験を通じて、ポリウレタン樹脂系塗装等の色差ΔE*の結果が示されている。一方、土木施設の色彩設計においては、日本塗料工業会色番号や対応するマンセル値により塗装色の検討が行われることが多い。そこで、これらの既往

研究の結果から、マンセル値における色相、明度、彩度の変化がどの程度生じるかを比較分析した。なお、以降、色相、明度、彩度と表記した場合は、マンセル値における色相、明度、彩度を指すものとする。

(1) 屋外暴露試験 20年経過後の色差の分析

重防食塗料ガイドブック²⁾では、色相および濃淡の異なる塗装色について、20年経過後の色差の計測を行った結果が示されている。この調査では一部の色を除くと、おおまかな色名、色の種類、濃淡のみが示され、具体的な日本塗料工業会の色番号やマンセル値は示されていない。そのため、試験片の当初の色相、明度、彩度は不明である。また色の変化についても色差ΔE*のみが示されているため、経年による色相、明度、彩度、もしくはL*a*b*のそれぞれの変化は分からない。なお、色差ΔE*は、CIE76色差式⁴⁾により、

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

で算出できる。ΔL*は色測計により計測した明度L*の差、Δa*は赤緑成分a*の差、Δb*は黄青成分b*の差を表す値である。

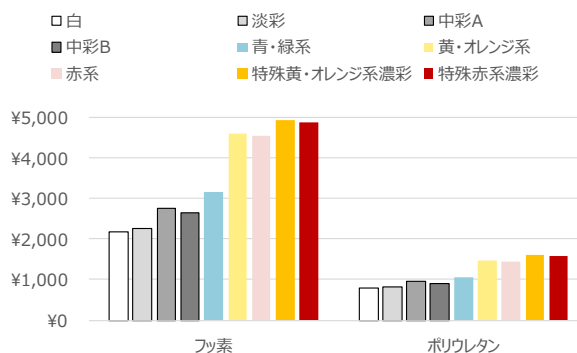


図-1 色別の上塗り塗料の積算単価の比較³⁾
(1m²・30μm厚さあたり、塗料メーカー3社単価平均、令和6年3月時点)

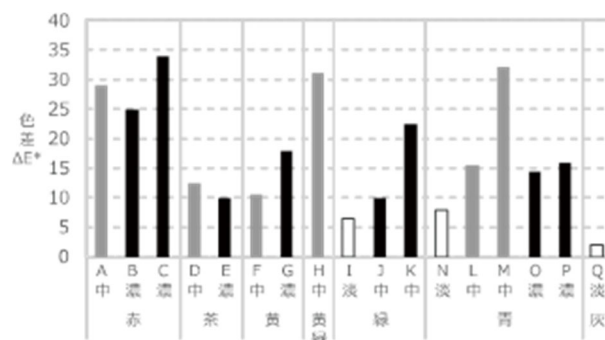


図-2 ポリウレタン樹脂の暴露20年後の色差の比較(文献¹⁾の試験結果を色相ごとに分類)

20年経過後の色差の結果を色相ごとに再編集したグラフを図-2に示す。これによると赤系の濃彩が $\Delta E^* = 34$ と最も変化が大きく、このほか、赤、緑、青系の中彩は $\Delta E^* > 20$ であった。淡彩の ΔE^* の平均値は約5で、色の変化は濃彩、中彩に比べて小さかった。

(2) 屋外暴露試験5年経過後の色変化の分析

(1)の既往研究では色の濃淡や色相ごとの ΔE^* の変化量の傾向を把握した。この経年による ΔE^* の変化量に対する色相、明度、彩度の変化量の関係を明らかにするため、土木研究所が1973~78年に神戸市で実施したポリウレタン樹脂系塗装を対象とする5年間の暴露試験の結果を分析した⁵⁾。この試験結果の報告書では、暴露試験の経過を色見本(カラーチップ)、最終的な色の変化を色差 ΔE^* で記録されている。報告書の当時作成された色見本は、0年(試験前)、3年(水洗後)、5年(水洗後)、5年(水洗前)の4つのデータがある。これらの色見本から色測計(コニカミノルタ、CR-20)により $L^*a^*b^*$ および色相、明度、彩度を計測した。また、濃彩色の色相の計測結果はばらつきが大きかったため、JIS色票を用いた目視による色測を行い、推定値を得た。

本試験の対象色を表-1、計測結果を図-3に示す。本試験では赤、黄、緑、青、無彩色の各色相について、顔料の配合を変えた濃彩色、淡彩色の計12色が対象であった。なお、計測の結果、無彩色を除くすべての対象色は、現在の積算単価では濃彩に分類される。

計測の結果、5年間の暴露で最も変化の大きかった試験片は、a)アゾ系顔料を用いた淡彩色の赤(アゾ系赤80%、チタン白20%)で、明度が2ポイント上昇し、彩度が5ポイント低下していた。この時の $\Delta E^* = 30.8$ (報告書の $\Delta E^* = 30$)であった。一方、変化の小さかったのは濃彩色の青および無彩色で、どちらも明度が約1ポイント上昇し、彩度の変化はほとんどなかった。色差 ΔE^* は濃彩色の青が10.1(報告書 $\Delta E^* = 14$)、無彩色が8.4(報告書 $\Delta E^* = 9.5$)であった。この結果から、ポリウレタン樹脂系塗装の経年による色の変化は、明度が上がり、彩度が下がると考えられる。また、紫外線の影響を最も受ける赤は、他の色相に比べて特に彩度の変化が大きかったことが分かった。

2.2 現地調査および促進試験による塗装色の経年変化の分析

2.2.1 現地調査による塗装色の経年変化の分析

2.1節で整理した既往研究の分析結果を検証するため、北海道内の7ヶ所の橋梁について現地における色測調査を実施し、時間経過により色相、明度、彩度の

表-1 土木研究所屋外暴露試験の対象色(色見本計測結果からの再現)

色相	濃淡	顔料	色相	濃淡	顔料
a	赤濃	アゾ系赤 100%	g	黄淡	酸化鉄黄 40% チタン白 60%
b	赤淡	アゾ系赤 30% チタン白 70%	h	緑濃	シアングリーン 80% チタン白 20%
c	赤濃	アゾ系赤 50% 弁柄 50%	i	緑淡	シアングリーン 10% チタン白 90%
d	赤淡	アゾ系赤 15% 弁柄 15% チタン白 70%	j	青濃	シアンプール 70% チタン白 30%
e	朱濃	モリブデートオレンジ 100%	k	青淡	シアンプール 5% チタン白 95%
f	黄濃	酸化鉄黄 100%	l	灰淡	カーボン 1% チタン白 90%

%は重量比

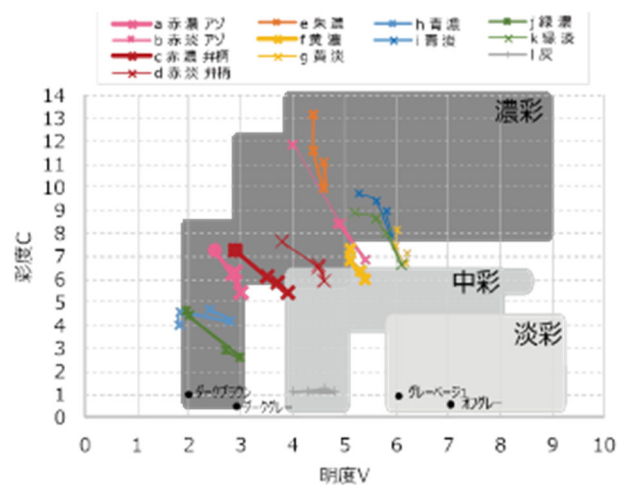


図-3 明度V-彩度Cの変化量(試験前-5年/水洗前の比較)文献⁴⁾の色見本の計測結果から得た推定値

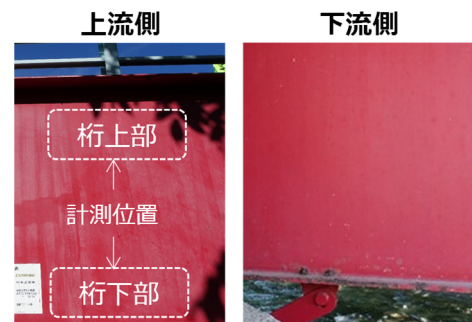


図-4 現地調査の対象箇所(赤色/10年以上経過)

要素がそれぞれどの程度変化したか、その変化の特徴を分析した。調査対象箇所を図-4に示す。調査は橋梁桁の上流側と下流側の外側桁面について、それぞれ紫外線暴露の少ない桁上部、桁下部の2ヶ所ずつ計4ヶ所について、表面汚れをふき取る前後の条件で5回ずつ計測を行った。なお、色相によっては5年以上経過したポリウレタン樹脂系塗装の例がみられなかった

め、塩化ゴム系の塗装例を参考として調査した。なお、2.1 (2) で整理した土木研究所の報告書では、塩化ゴム系塗装の暴露試験の結果も示されており、経年による色の変化はポリウレタン塗装の色差と同程度であった。

結果の一例を図-5 に示す。調査の結果、最も紫外線の影響を受ける赤系の塩化ゴム系塗装では、当初の塗装色 5R 3/12 に対して、塗装 20 年以上経過後（推定）では南側桁上部の明度が平均 0.1 ポイント上昇し、彩度が 5 ポイント低下した。また、より紫外線のあたる桁下部で明度が平均 0.8 ポイント上昇し、彩度は 6.3 ポイントの低下がみられた。また、表面の汚れありの場合は、汚れの程度によって、汚れのふき取り後と比べて明度が 0.7 ポイント上昇し、彩度が 0.8 ポイント低下した。

2.2.2 耐候性促進試験による塗装色の経年変化の分析

2.1 節で整理した既往研究の分析結果を検証するため、ポリウレタン樹脂系塗装の促進耐候性試験を実施した。試験方法はキセノンランプ法 (JIS K 5600) を使用し、試験片は 13 色、各色 3 枚ずつ計 39 枚を対象とした。試験対象色は表-2 に示し、1400 時間経過後の明度および彩度の変化を図-6 に示す。

明度については、当初の明度が 5 以下の試験片では 1400 時間後に明度が 1 ポイント程度上昇している。明度 6 および 7 の試験片ではほとんど変化は見られないが、全体としてわずかに上昇する傾向が見られる。彩度に関しては、色相に関わらず彩度 6 以上の高彩度の試験片は 1400 時間後に 1~3 ポイント低下が見られる。これらの結果は 2.1 節の試験結果と同様の傾向を示している。

2.3 塗装色の経年変化の特徴

2.1 および 2.2 節の結果から、土木施設で一般的に使用されるポリウレタン樹脂系塗装の経年による色の変化の特徴をまとめる。

- ・ポリウレタン樹脂系塗装は、約 1 年で表面光沢が落ち始め、3 年経過すると色の変化が目視で確認できるようになる。その際の色の変化は、当初の色相、明度、彩度によって程度は異なるが、色相の変化は小さく、明度は 1~2 ポイント上昇し、彩度は 1~6 ポイント低下する。
- ・最も色変化が大きい赤系では、20 年で色差 $\Delta E^* = 30$ 以上変化する。これは、マンセル値で明度 1~2 ポイント上昇、彩度 5~6 ポイント低下に相当する
- ・最も変化の小さい色は、低彩度で明度 6 以上のグレー、低明度の中では明度 3 の濃青系であった

- ・景観色は彩度が 0.5~1 であり、無彩色または低彩度色に分類される。これらの塗装は、紫外線暴露により 1 年程度で表面光沢が減耗していくが、5 年経過後の色変化はほとんど見られない。

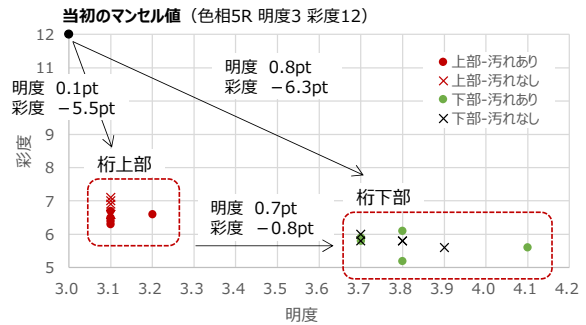


図-5 現地調査結果（赤系/塗装 20 年以上経過）

表-2 促進試験の対象色

試験片番号	色相	明度	彩度	備考
1	赤	5R	5	配合が異なる
2		5R	5	
3		5R	5	
4	朱			
5	黄			
6	黄緑			
7	緑			
8	青緑			
9	青			
10	景観色	10YR	2	ダークブラウン
11		10YR	3	ダークグレー
12		10YR	6	グレーベージュ
13		5Y	7	オフグレー



図-6 促進試験による明度および彩度の変化 (1400 時間経過後)

3. 経年変化を考慮した土木施設の塗装色に関する 景観評価

3.1 実験概要

本実験では、2章で分析した経年による色の変化の特徴を踏まえて、河川施設を対象とした塗装色の印象評価実験をWEBアンケートにより実施し、色の経年変化に伴う印象評価の変化を分析した。印象評価実験の対象色を図-3.1に示す。評価色は、①河川施設でよくみられる塗装色、②①の塗装が経年により褪色した色（明度2ポイント上昇、彩度5ポイント低下した場合を想定し、日本塗料工業会色見本帳から近似色を抽出）、③②の代替色（彩度2程度で経年変化の比較的小さい色）、④③に含まれない景観色として用いられる色（彩度1以下）の4種類のグループに分けて設定した。なお、プレ実験で色の違いが表現できなかった低明度色は、本実験では除外し未評価とした。また、WEB画面上ではテクスチャの変化等の評価が難しいと考えられたため、色変化のみの評価とし、本試験では、光沢の変化や、褪色や刷毛ムラによる表面の色変化のばらつき、亜鉛メッキ等の素材のテクスチャの評価は行っていない。

評価実験に使用した画像は、上屋あり樋門と上屋なし樋門の2種類の構図とした。評価に使用した画像例を図-8に示す。実験では上記の2種類の構図について19色の異なる評価色を用いた土木施設の画像を1枚ずつ提示し、景観に馴染むかどうかを7段階で評価してもらい、回答者数に基づく合計得点で評価を比較した。

3.2 実験結果のまとめ

実験結果を図-9に示す。この結果、個別の色ごとの評価に有意な差は見られないが、全体の傾向として、①よく使用される色、②褪色後の色、③代替色・景観色のグループ間の評価には有意差が見られた(Kruskal-Wallis検定、 $p=0.04$)。特に、①よく使用される色および②褪色後の色に比べて、③代替色・景観色のグループの評価は有意に高い。

なお、①現在よく使用される彩度の高い色や、これらの色が②褪色した色の評価の傾向には、ばらつきがある。このうち、②褪色後の色の評価が高まるのは、経年変化で彩度が低下するため、高彩度の色も次第に景観に馴染む色に変化するケースがあるためである。しかし、これらのグループよりもさらに③代替色・景観色の方が全体的な評価が高い。また、今回はテクスチャの変化についての検証は行っていないが、実際には褪色による表面のムラや白化などの影響により、実物を対象とした場合の経年による印象評価は、色のみ

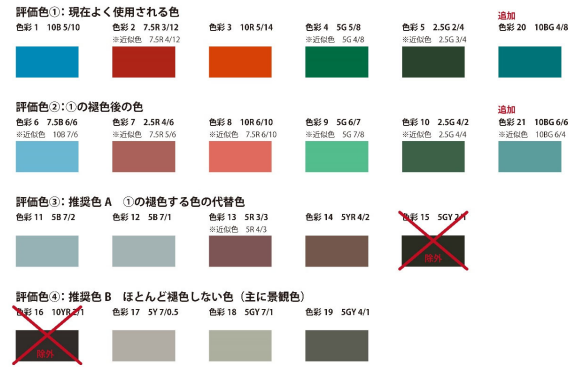


図-7 印象評価実験の対象色



図-8 設問画像例

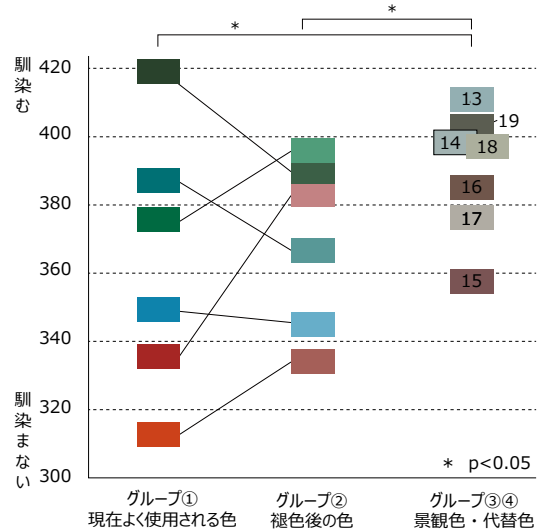


図-9 印象評価実験

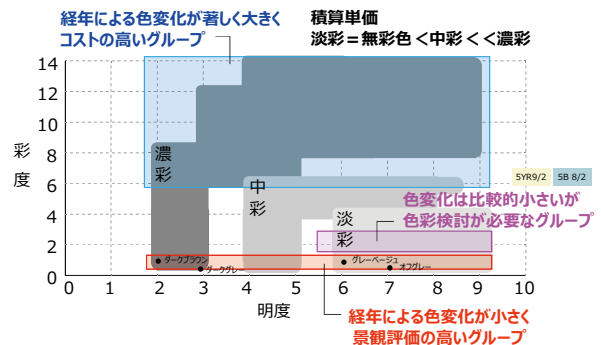


図-10 塗装色の褪色性能とコスト、景観評価の関係

を対象とした本実験よりも低下することが推測される。なお、①③④の結果は2020年に河川堤防上で実際の塗装色サンプルを対象に実施した色彩評価実験の結果とも傾向は一致する。これらの試験結果は既報⁵⁾に詳述しているので参考にされたい。

以上の結果から、経年変化による褪色を考慮した場合、彩度の高い鮮やかな色を使用するよりも、彩度2以下の低彩度の塗装を使用した方が印象評価は高いことがわかる。これらの色は、色別に比較した積算単価も高彩度の色に比べて小さく(図-1)、経年による色変化も小さいため、維持管理面でも利点大きい。これらの評価の傾向についてグループごとに図-10にまとめた。

- A: 低彩度・高明度の色: 積算単価が最も小さい淡彩色のうち、経年による色の変化も最も小さく、景観評価も高いグループ
- B: 低明度のため、経年により明度が上昇するが、低彩度であり、景観評価の高いグループ
- C: 高明度のため経年による色の変化は小さいが、彩度2のため、土木施設の立地する環境の色彩を考慮して、色相の選定に十分な色彩検討が必要なグループ
- 土木施設の色彩設計では、上記のA~Cに分類するグループに基づいて、土木施設の規模や形状、立地環境の色彩を考慮することで、景観や維持管理に配慮した色選定が可能となる。

4. まとめ

執本研究では公共空間の景観向上を目的に土木施設の塗装に着目し、文献調査および現地調査、促進試験から塗装色の経年変化の特徴を明らかにし、その結果をもとに景観評価を行い、経年変化や長期耐久性を考慮した塗装色の選定方法について明らかにした。本研究の成果の概要は以下の通りである。

- ・ポリウレタン樹脂系塗装の耐用年数を15年とした時、低明度および中明度(明度5以下)は化学変化や汚れ等により、この間に明度が1~2ポイント上昇する。
- ・当初の彩度が高いほど経年による彩度低下は大きく、彩度2以下であればほとんど変化はない。
- ・彩度2以下は、経年による色変化の少なく、景観に調和の観点で評価が高い。
- ・色相では赤系が最も経年による色の変化が大きく、また、どの色相でも中~高彩度では色の変化は大きい。
- ・土木施設の色彩の設計方法において、低彩度の色を

基準に、立地環境の色彩に合わせて明度および色相を調整することで景観および維持管理に配慮した色選定が可能である。

- ・山間部などの自然環境において彩度の高い鮮やかな赤や朱色などは補色関係にあり対比調和するが、経年による明度や彩度の変化が顕著である。そのため、これらの色を使用する際には、色彩や塗装の専門家の助言を受けることを推奨する。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本塗料工業会: 重防食塗料ガイドブック、第5版、2020.
- 2) 国土交通省: 機械塗装工事要領(案)、2021.
- 3) 例えば、日本ペイント株式会社: 鋼構造物塗料積算資料、2024.
- 4) 日本規格協会; JISハンドブック 61 色彩、2022.
- 5) 土木研究所: 海上長大橋用着色塗料の色調選定試験第2報、土木研究所資料、1474号、1979.
- 6) 榎本碧、笠間聡、松田泰明: 積雪寒冷地の河川空間における土木施設の色彩の印象評価、第63回(2019年度)北海道開発技術研究発表会、pp.317-322、2020.

A Research on Color Design of Civil Engineering Facilities Considering Aging and Long-Term Durability

Research Period: FY2021-2023

Research Team: Scenic Landscape Research Team

Author: FUKUSHIMA Hirofumi

ENOMOTO Midori

KASAMA Satoshi

Abstract: In public spaces, the color of paints and other finishes on civil engineering facilities significantly impacts the landscape and facility functions. Various issues arise concerning aesthetics, such as fading and discoloration of painted surfaces, peeling due to snow removal, and white rust caused by snow removal and thawing agents, including zinc plating and zinc phosphate treatment. Additionally, there are increasing instances where long-term use results in landscape damage due to fading and other forms of deterioration.

In this study, aiming to improve the landscape of public spaces, we investigated how the appearance of paints and other finishes on civil engineering facilities in snowy and cold regions changes over time. This investigation was based on literature surveys, field surveys, and experiments. We also conducted landscape evaluations of different painting colors that change over time and clarified design methods for these approaches.

Keywords: Color, Painting, Landscape Evaluation, Long-term Durability, Munsell Value