

カラーフィルター撮影画像を用いた トンネル覆工コンクリートの表面気泡の検出

岡本 健太¹・黄 華濤²・大森 禎敏³・吉武 勇⁴

¹正会員 五洋建設株式会社 土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: kenta.okamoto@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²元 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: huataohuang@outlook.com

³正会員 五洋建設株式会社 土木技術部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

E-mail: sadatoshi.oomori@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: yositake@yamaguchi-u.ac.jp

コンクリート構造物の表面品質は緻密性の評価法で表面透気試験等があるが、見栄えについては点検員による目視評価のため、評価結果は点検員の経験や知識技術などに依存することから、定性的な評価に留まっていた。本研究では、コンクリート表面品質の一評価対象となる表面気泡を定量評価するため、適切な検出方法について検討した。特に、ストロボにカラーフィルターを取り付けた撮影画像のRGB値に変化を与え、表面気泡の検出効果を調べた。表面気泡面積の異なる2つの供試体を用いた室内実験と建設中のトンネル工事現場での撮影実験で得た画像を用いて解析した結果、ある種のカラーフィルターを用いることで気泡検出率が向上するとともに、明度が一定の場合には色相と彩度を調整することで表面気泡の検出率を向上できる可能性があることがわかった。

Key Words: tunnel lining concrete, surface quality, bughole, image analysis, color filter

1. はじめに

通常、山岳トンネルの覆工コンクリートに力学的な機能は付与されないために、発注機関が指定した強度を満たすれば十分と考えられてきた。しかし近年では、耐久性確保の観点から、視覚によるコンクリート表面品質の評価項目が加えられ、それに伴いトンネル覆工コンクリートの「見栄え」が重視されるようになってきた。過去に行われたトンネル覆工コンクリートの各種性能の重要性を定量的に評価したアンケート調査によると、耐久性に次いで美観性(見栄え)が重要と考えられていることが明らかになった¹⁾。さらにHu, et al.^{2,3)}は、コンクリート表面の仕上がり状態が、見栄えだけでなく、耐久性にも影響することを指摘し、凍結融解作用下における表面気泡の影響について報告している。

表面気泡はコンクリート表面の変状の一種で、打設後のコンクリート表面に現れる欠陥である。従来、コンクリート構造物の表面品質について、緻密性の評価手法と

して表面透気試験(Torrent法)や表面給水試験(SWAT)等があるが、見栄えについては点検員による目視評価のため、評価結果は点検員の経験や知識などに依存するとともに、定性的な評価に留まっていた。また、山岳トンネルの覆工コンクリートは一般に広大な表面積を有するため、その表面の目視観察には多くの時間と手間を要していた。

そこで近年の研究⁴⁾⁵⁾では、トンネル覆工コンクリートの表面気泡を簡易的に定量評価するための画像解析法が開発された。しかしながら、この画像解析法では、太陽光がほとんど入らずトンネル内の照明だけの環境下でフラッシュを使用して撮影すると、コンクリート表面の撮影画像が白くなってしまい、気泡の識別が困難となる問題があった。そこで本研究では、ストロボにカラーフィルターを装着することで、撮影画像のRGB値に変化を与えることで表面気泡の識別性能を改善し、定量的に評価することを試みた。具体的には、表面気泡面積の異なる2つの供試体を用いた室内実験および建設中のトン

ネル工事現場での撮影実験を実施してカラー画像解析から表面気泡を検出し、定量的な評価を試みた。これを基に、トンネル施工環境におけるカラーフィルターを用いた画像解析手法の正解率と適合率について考察する。

2. 試験条件

(1) 実験装置および検討ケース

本実験では、三脚、カラーフィルター（イメージビジョン製）およびストロボを装備可能な一眼レフカメラ（約2420万画素）を使用して撮影実験を行った。ストロボに取り付けるカラーフィルターの装着位置およびカメラの概況を写真-1に示す。バンドでカラーフィルターをストロボに固定した。現場実験でのカメラの設定詳細を表-1に示す。ストロボの発光量は各トンネルの照明状況の違い、また取得画像の解析が可能となる範囲で光量を調整し、実験状況に応じて1/4、1/8、1/32、1/64、1/128（ストロボの発光時間：1/1700秒、1/2100秒、1/2400秒、1/2690秒、1/2700秒）の5種類のいずれかに設定した。また、撮影実験時におけるカメラと被写体となるコンクリート壁面の位置関係を図-1に示す。室内および現場での撮影実験では、すべての実験ケースにおいてコンクリート表面から1mの離隔距離でカメラを固定し、撮影を行った。なお、室内実験でのストロボ発光量は1/32（ストロボ発光量：1/2100秒）である。

本研究で使用したカラーフィルターの種類を図-2に示す。原色が14色（#2～#15）、補色が5色（#16～#20）で市販されているカラーフィルターを使用した。また、フィルターを設置しない場合（#1）についても同じ撮影実験を行い、合計20ケースの撮影画像を解析した。

(2) 実験場所

照明のあるAトンネル、照明のない室内実験および同Bトンネルで撮影実験を行った。AおよびBトンネルは覆工コンクリート施工中の山岳工法適用のトンネル工事現場である。



写真-1 カラーフィルターを装着したカメラの概要

表-1 現場実験でのカメラの設定詳細

	A トンネル	B トンネル
ピクチャースタイル	スタンダード (S)	
撮影モード	絞り優先 (Av)	
絞り数値 (F 値)	f6.3	f7.1
露出補正	±0	
ホワイトバランス	オート	
ストロボ同調速度	1/60 秒	
ストロボ発光量	1/4, 1/8	1/32, 1/64, 1/128

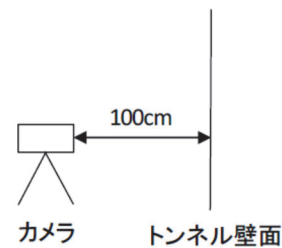
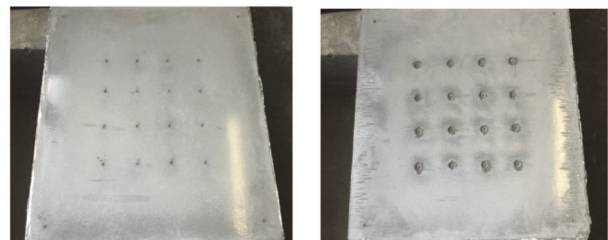


図-1 カメラと被写体（トンネル壁面など）の距離



(a) A 供試体 (b) B 供試体

写真-2 室内実験に用いた供試体

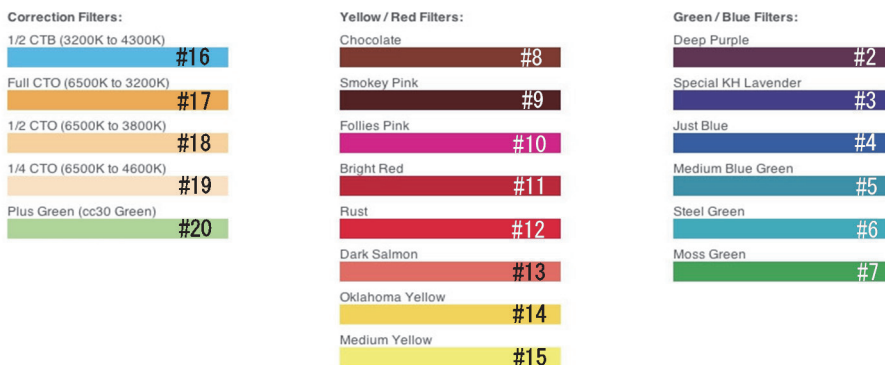


図-2 本研究で使用したカラーフィルターの一部加筆

室内実験では、表面気泡の面積が異なる2体の供試体を用いた。表面気泡1個あたりの直径が3~5mmをA供試体、10mm以上をB供試体とし、それぞれ写真-2(a), (b)に示す。

現場実験におけるAトンネルでは、太陽光の影響が少なく、トンネル内の照明のみがコンクリート表面の色に影響を与える場所で撮影を実施した。坑内照明はLEDランプと水銀灯の2種類であったが、コンクリート表面の色に影響したのは主にLEDランプと考えられた。

選定した撮影場所は、目視で気泡が識別しやすく、気泡以外の表面の欠陥がほとんど見られない Spot1, グレーの色調の濃淡が多く点在し、コンクリート表面に色むらが多数見られた Spot2 とした。以上のような表面変状が気泡検出精度に与える影響も併せて調査した。ストロボの発光量は 1/4, 1/8 (ストロボの発光時間: 1/1700, 1/2100 秒) の明るさに設定した。

Bトンネルでは、坑内照明が撮影画像に影響しないように撮影時に周囲のLED照明を消灯し、できる限りフラッシュ以外の光が入らない環境で撮影実験を行い、撮影画像に変化を与える要素をフラッシュだけとした。撮影場所は2箇所を選定した。1箇所は、コンクリート表面に小さな気泡が多く、加えて大きな気泡がいくつかみられた Spot3 とした。もう1箇所は、Spot3 に比べて覆工コンクリートの表面に大きな気泡があり、気泡の深さも様々であった Spot4 とした。ストロボの発光量は 1/32, 1/64, 1/128 (ストロボの発光時間: 1/2400, 1/2690, 1/2700 秒) の明るさに設定した。

撮影範囲は縦 70cm, 横 100cm 程度で、取得した画像から表面気泡が多く含まれている 2000×2000 画素 (37.7cm×37.7cm) の範囲をトリミングして画像解析を行った。覆工と撮影箇所の位置関係を図-3に示す。

(3) 表面気泡の検出方法および定量評価法

本研究における表面気泡の検出方法および定量評価には、先行研究で開発された表面気泡自動判定ソフトウェア (以下、本ソフトウェア) を使用した⁴⁹⁾。本ソフトウェアでは、デジタルカメラで撮影したコンクリート表面のカラー画像を算術的に処理し、表面気泡を自動的に判定し、定量評価することができる。解析対象領域にある表面気泡の中から任意に選んだ表面気泡の R 値, G 値, B 値を基準値 (以下, 基準 RGB 値) に設定し、任意の画素の RGB 値が基準 RGB 値よりも小さい (=暗い) 場合は、その画素が表面気泡として判定される。この判定は順に1画素ごとに行われる。表面気泡であると判定された画素が複数個あり、かつ隣接していた場合、それらの表面気泡はひとつの集合体とし、1個の表面気泡と判定される。さらに、コンクリート表面とともに鋼尺 (スケール) を撮影し、本ソフトウェア内でスケールの設定

表-2 混同行列

	陽性 (検出)	陰性 (非検出)
真 (気泡)	TP	FN
偽 (コン表面)	FP	TN

記号の説明

TP: 気泡を気泡として検出, FN: 気泡を非検出
FP: コン表面を気泡と誤検出, TN: コン表面をコン表面と判定

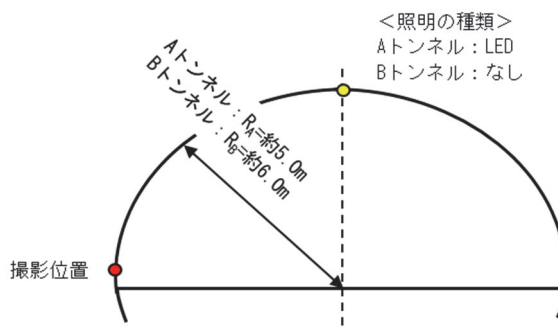


図-3 覆工と撮影位置の関係

を行うことで、1画素あたりの面積を算出できる。解析対象領域の表面気泡の個数および各表面気泡の面積 (mm²) を求めることができる。

このように、本ソフトウェアを表面気泡の検出に使用することで、従来の2値化画像処理法や圧力測定フィルム法に比べ、色の不均一性による誤検出が少なくなり精度が高くなる。

解析対象範囲は、撮影した画像から2000×2000画素をトリミングした領域とした。トリミングした画像を9つの領域に分割し、各領域でそれぞれ基準となる気泡を選択した。

(4) 解析結果の評価方法

解析結果の評価はI.表面気泡の検出率 (以下, 気泡検出率), II.対象画像のRGB値をHSV値 (色相 Hue, 彩度 Saturation, 明度 Value) に変換, III.表-2に示す混同行列により正解率と適合率を算出する手順で実施し、各カラーフィルターの正解率と適合率を比較した。

a) 気泡検出率

本ソフトウェアによる検出した表面気泡面積を各領域を拡大して手動検出した表面気泡面積で除したものを気泡検出率として定義した。

b) RGB値をHSV値へ変換

解析画像をRGB値以外で評価する方法として、RGB値をHSV値に非線形変換し、カラーフィルターの特性を調べた。

c) 正解率と適合率を算出

解析結果から検出した表面気泡について、混同行列を用いた整理を行った。具体的には、気泡を気泡として検出したTP(True Positive)と、気泡を非検出したFN(False Negative)、気泡以外(以下、コン表面)を気泡と誤検出したFP(False Positive)、コン表面をコン表面と判定したTN(True Negative)とするものとし、正解率と適合率を次式で求めた。

$$\text{正解率} = \frac{TP + TN}{TP + FN + FP + TN}$$

$$\text{適合率} = \frac{TP}{TP + FP}$$

なお、表面気泡の正值は、撮影画像を拡大して詳細な画像解析を行った結果によるものとした。

が振り分けた領域番号を示している。第2領域は撮影過程においてフラッシュが供試体表面に直接反射し、撮影画像のRGB値が第1領域と大きく異なるため、別の領域として評価した。

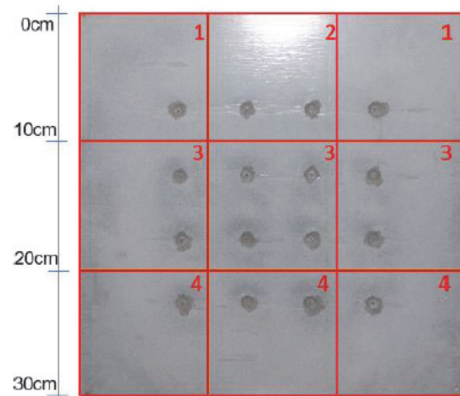


図4 室内実験の供試体における解析領域 (B 供試体)

3. 実験結果および考察

(1) 室内実験

室内実験では、表面気泡の面積が異なる2体の供試体を用いた。A 供試体は表面気泡の直径が約 3~5mm, B 供試体は表面気泡の直径が 10mm 以上である。図-4 に示すように、供試体の表面を9分割したうえで、4つの解析領域に整理した。上端から0~10cmの範囲における左右端部を第1領域とし中間部を第2領域とした。また、上端から10~20cmの範囲を第3領域、上端から20~30cmの範囲を第4領域とした。各赤枠の右上にある数字

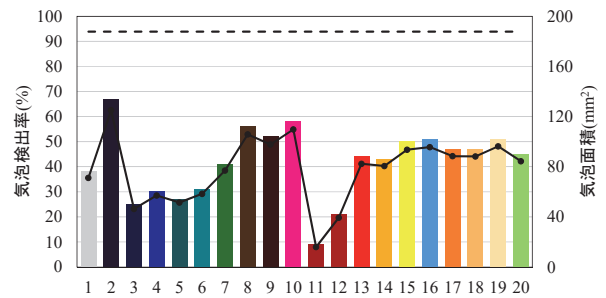
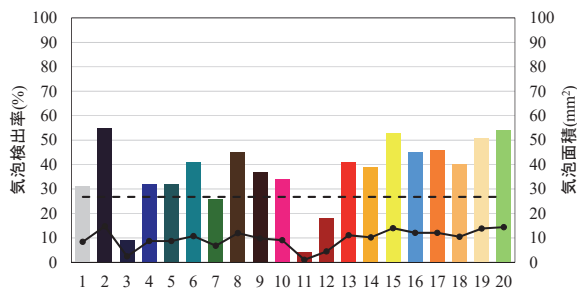
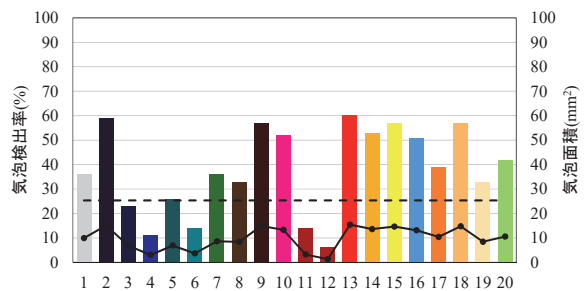


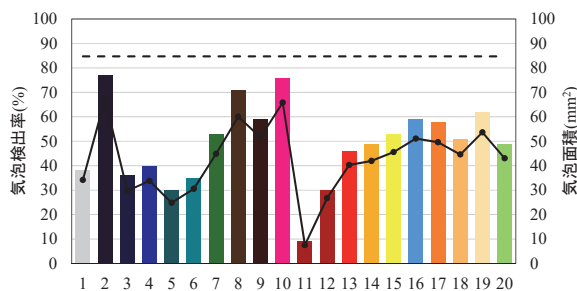
図-6 A 供試体のカラーフィルターによる気泡検出率 (領域平均)



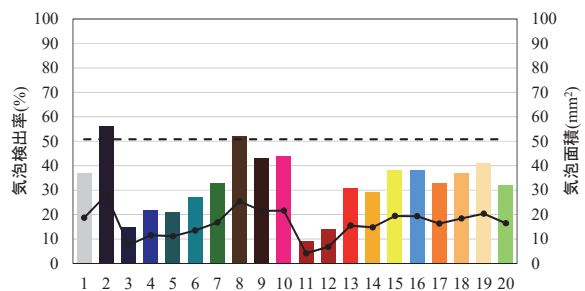
(a) 領域1



(b) 領域2



(c) 領域3



(d) 領域4

図-5 A 供試体における解析領域ごとのカラーフィルターによる気泡検出率

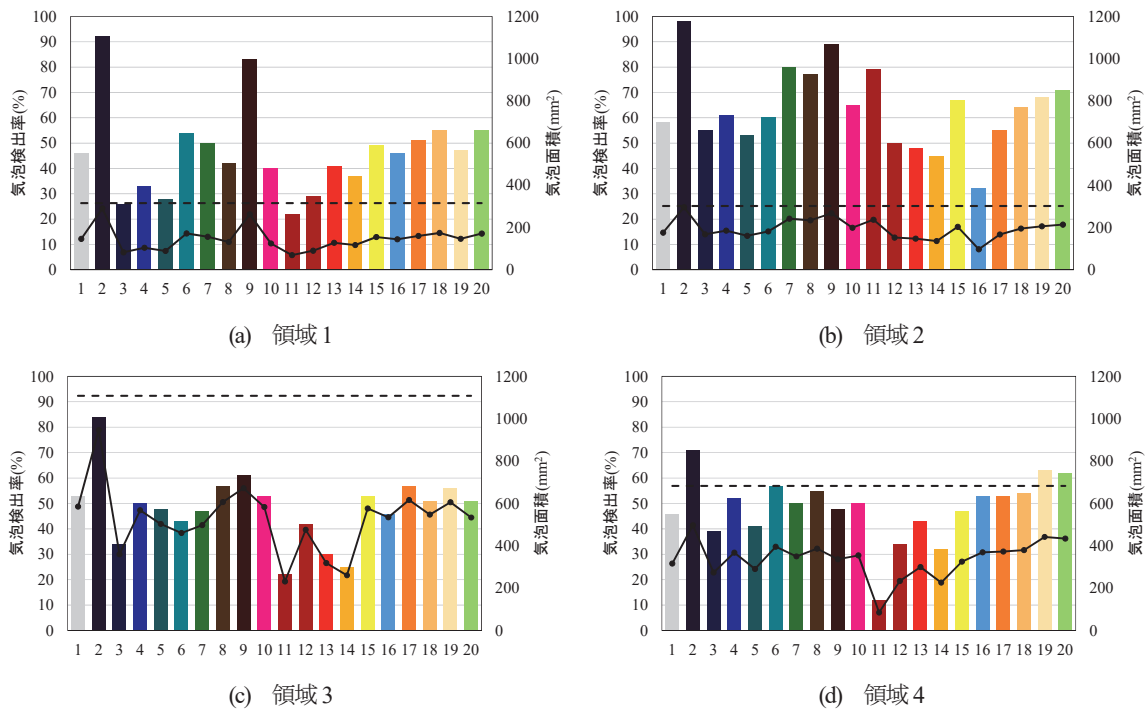


図-7 B 供試体における解析領域ごとのカラーフィルターによる気泡検出率

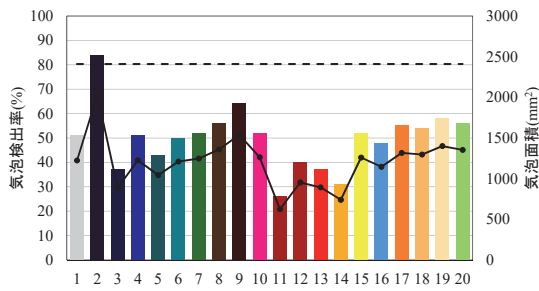


図-8 B 供試体のカラーフィルターによる気泡検出率 (領域平均)



図-9 B 供試体の撮影画像と解析画像

a) A 供試体

図-5(a)~(d)と図-6は、A 供試体における各領域および全領域の平均気泡検出率(棒グラフ)と気泡面積(折れ線グラフ)を示したもので、折れ線グラフの破線は詳細解析にて得られた各領域および全領域の気泡面積である。図の横軸は図-2に示したカラーフィルターの番号で、カラーフィルターを使用しない場合を#1とした。図-5(c)に示した上端から10~20 cmの範囲にある第3領域において、半数以上のカラーフィルターで気泡検出率が最も高い値を示した。図-5(d)に示した供試体表面が最も暗い第4領域では、気泡検出率が50%以下となるフィルターが多数を占めた。このことから、気泡検出率を向上させるためには適切な光量が必要であることがわかる。

カラーフィルター別に着目すると#2のカラーフィルターが全領域において最も高い気泡検出率を示した。

第1~4領域の平均気泡検出率(以下、平均気泡検出率)を示した図-6を見ると、カラーフィルターを使用し

ない場合(#1)に38%であったのに対し、カラーフィルターを使用した場合、#2が最大の67%であり、29%増加した。以上より、適切なカラーフィルターを装着することにより、気泡検出率が向上する可能性があることがわかった。

b) B 供試体

B 供試体におけるカラーフィルターごとの気泡検出率と平均値を図-7(a)~(d)と図-8に示す。第2領域では、図-9に示すようにフラッシュが気泡に近接して反射した影響で供試体表面のRGB値が全体的に高くなり、気泡部分とコンクリート表面でRGB値の差異が顕著になったため、#16、#17を除くすべてのカラーフィルターで気泡検出率が最大となった。なかでも、#2の気泡検出率は98%であった。

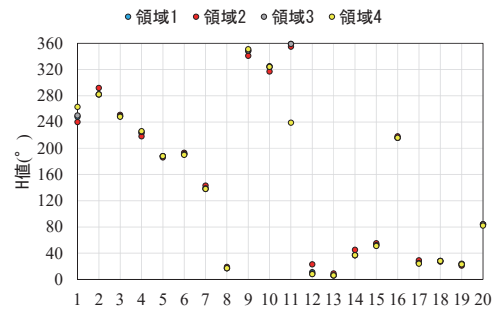
図-8に示した平均気泡検出率においても、#2は84%であり、カラーフィルターがない(#1:51%)場合に比べて33%増加した。また、A 供試体に比べ、フラッシュの影響が小さい第4領域で、全カラーフィルターの平均

気泡検出率が上昇した。これは、B 供試体の表面気泡に一定の深さがあり、気泡とコンクリート表面の RGB 値に差異が生じたためと考えられる。今回は面的な要素として気泡をとらえていたこともあり、気泡深さに関する定量的な観点については今後の検討課題としたい。

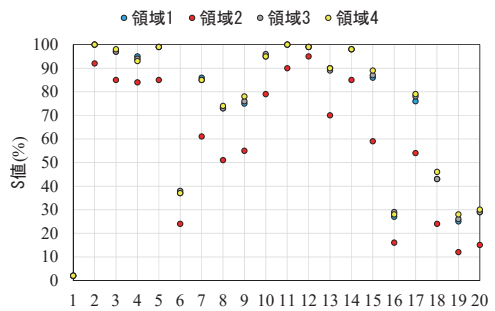
RGB 値から変換した各領域の HSV 値を図-10(a)~(c)に示す。比較的、気泡検出率が高い #2 と低い #11 に着目すると、#2 の H 値は全領域で 282° であったが、#11 は第 1 領域から 359° 、 355° 、 359° 、 239° と分散している。これは、第 4 領域から第 3 領域にかけて色調は連続的に変化しているが、その間に気泡部分が存在し基準 RGB 値が設定されたことで気泡部分が検出されにくく、気泡検出率の低下につながったと考えられる。一方、明るさによって色相 H が変化しないということは、#2 の R 値、G 値、B 値における比が概ね一定であったといえる。そのため、領域ごとの基準 RGB 値が各画素に対して一定であったことから、検出精度が高かったものと考えられる。第 2 領域では、フラッシュが供試体表面で反射しているため、全カラーフィルターの V 値が大幅に増加している。一方、気泡検出率が高い #2、#9 の第 1、3、4 領域では、他のフィルターと比べ、その変化は小さく一定であった。明度 V 値の変化が小さいことは、R 値、G 値、B 値の最大値が一定であったものであり、領域ごとの基準 RGB 値が各画素に対して一定であったことから、検出精度が高かったものと考えられる。

(2) 現場実験

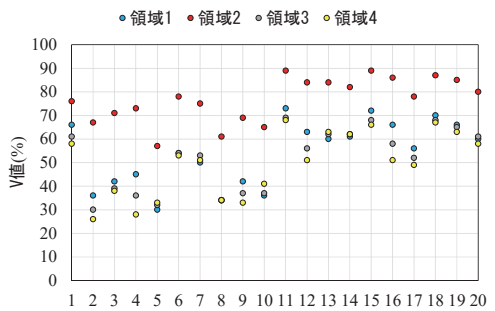
現場実験では、表面気泡の面積別に結果を整理し、正



(a) H 値

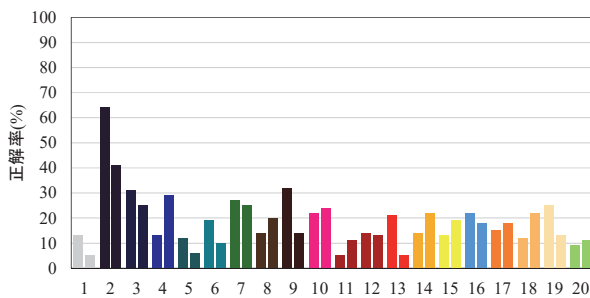


(b) S 値

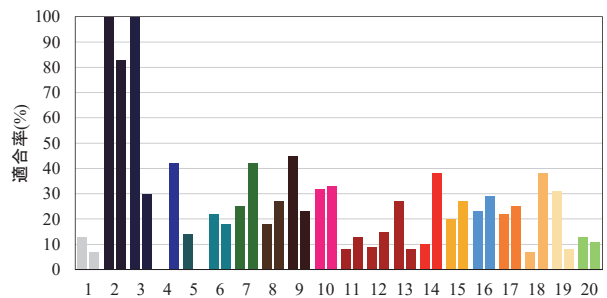


(c) V 値

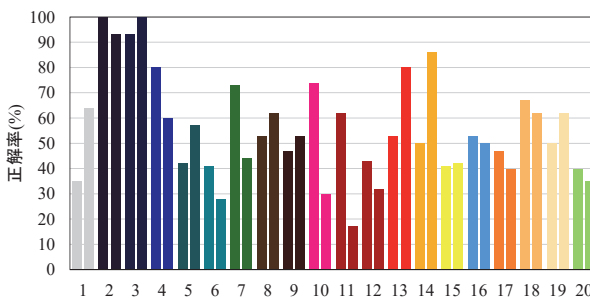
図-10 B 供試体の RGB 値から変換した各領域の HSV 値



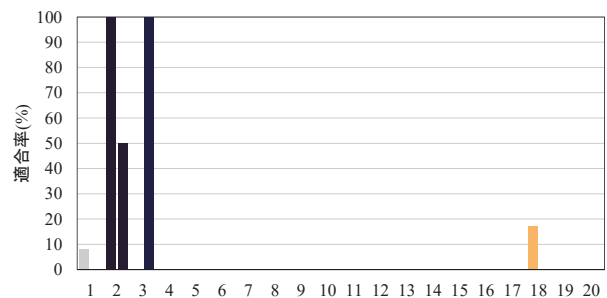
(a) 4~5mm²の正解率



(b) 4~5mm²の適合率



(c) 10mm²以上の正解率



(d) 10mm²以上の適合率

図-11 A トンネル (Spot1) における表面気泡面積別の正解率と適合率

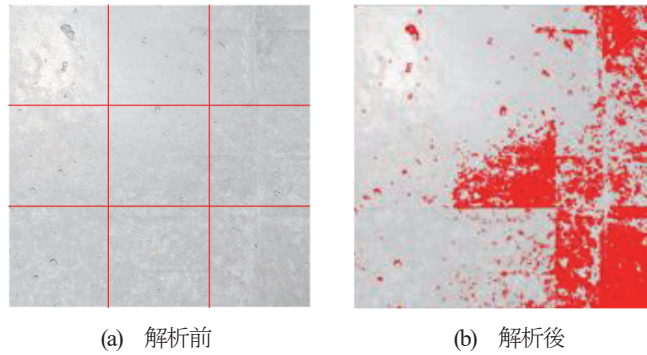


図-12 Aトンネル (Spot1) の表面状態

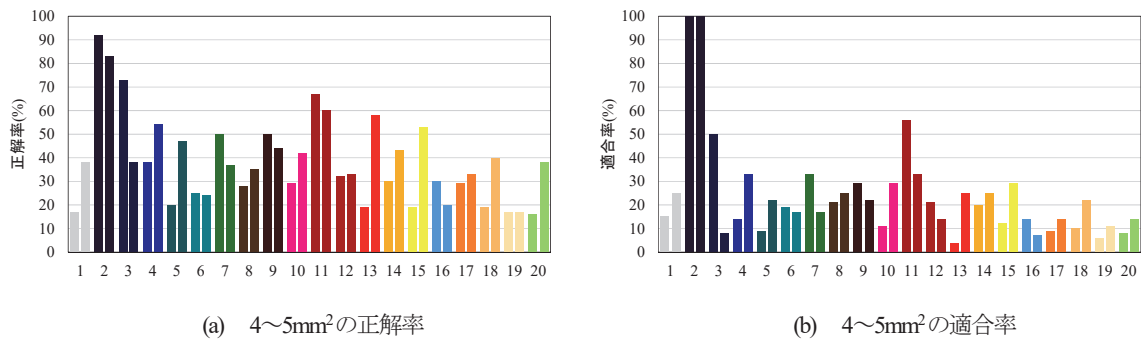


図-13 Aトンネル (Spot2) における表面気泡面積別の正解率と適合率

解率と適合率で評価した。正解率とは、正解数をデータ数で割った数値であり、評価モデルの傾向がわかる。ただし、二値が均等でなくデータが偏在している場合、正解率で評価することは望ましくない。例えば、「気泡」が正解のデータが1個、「コン表面」が正解のデータが99個とした場合、すべて「コン表面」と判定されれば正解率99%となる。これでは、本来「気泡」か「コン表面」かを判定するモデルとしては不適當である。そこで、正解率に併せて適合率でも評価する。適合率とは、陽性予測（気泡と判定されたもの）のうち実際に陽性（気泡）である割合を示した指標である。前述した例では、適合率が0%となり、このモデルが不適當であると判断できる。

a) Aトンネル

Spot1における表面気泡面積が4~5 mm²および10 mm²以上における正解率および適合率の結果を図-11(a)~(d)に示す。ストロボの発光時間による違いも示しており、棒グラフの左列が1/2100秒、右列が1/1700秒の結果である。ストロボの発光時間が1/1700秒の方が1/2100秒より正解率および適合率の結果が低い傾向となっている。これは、発光時間が長くなることによって、供試体表面と表面気泡のRGB差が小さくなり、気泡を検出しづらくなったと考えられる。以下、ストロボの発光時間が1/2100秒の結果を考察する。

気泡面積4~5 mm²では、#1の正解率および適合率が

それぞれ13%だが、#4、#5、#11、#12、#15、#18、#20を除くカラーフィルターは、正解率、適合率ともに増加している。例えば#2では、それぞれ64%、100%である。

図-12(a)、(b)に示すように、解析対象領域を9分割したうちの右列3行では、基準RGB値とコンクリート表面のRGB値が近似していたことから、当該箇所を気泡と誤検出するカラーフィルターが数多く存在した。しかしその中でも、#2や#3のカラーフィルターは、色むらを気泡と誤検出することが少なかった。

気泡面積10 mm²以上では、#1の正解率および適合率が35%、8%に対し、#2はどちらも100%である。一方、他のカラーフィルターは適合率が低く、0%のカラーフィルターも存在する。これは、もともと10 mm²以上の面積をもつ表面気泡が少ない(Spot1で10 mm²以上の面積をもつ気泡は1個)ため、それが非検出(陰性)となると適合率が0%になる。また、表面気泡面積が大きくなることによって、ストロボの光がトンネル壁面に直接反射した際、気泡部分のRGB値が上昇し、基準となるRGB値との差異が小さくなることで気泡の検出精度が低下することも要因のひとつとして挙げられる。その中でも適合率が100%であった#2は適切に気泡を検出できている。

Spot2での各カラーフィルターの正解率と適合率を図-13(a)、(b)に示す。Spot2では10 mm²以上の面積を有する気泡はなかったため、4~5 mm²の結果を示す。ストロボ

表-3 Spot1におけるRGB値およびHSV値

Filter No.	※	R	G	B	H	S	V
#1	1	206	206	205	60	0.5	80.8
	2	243	243	243	0	0	95.3
#2	1	60	7	82	282	91.5	32.2
	2	101	12	138	282	91.5	54.1
#5	1	0	147	138	176	100	57.6
	2	3	171	164	178	98.2	67.1
#9	1	114	35	48	350	69.3	44.7
	2	196	79	100	349	59.7	76.9

※ストロボ発光時間 1: 1/2100秒, 2: 1/1700秒

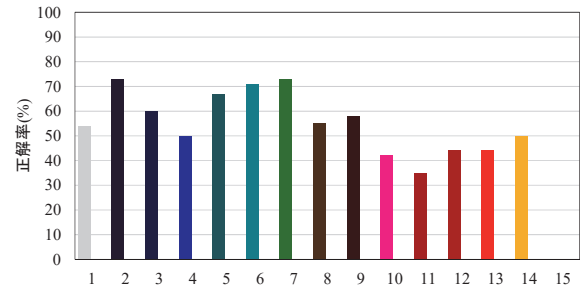
表-4 Spot2におけるRGB値およびHSV値

Filter No.	※	R	G	B	H	S	V
#1	1	222	222	221	60	0.5	87.1
	2	250	250	250	0	0	98
#2	1	74	11	94	286	88.3	36.9
	2	133	20	167	286	88	65.5
#5	1	1	158	147	176	99.4	62
	2	6	177	171	178	96.6	69.4
#9	1	131	46	57	352	64.9	51.4
	2	218	95	116	350	56.4	85.5

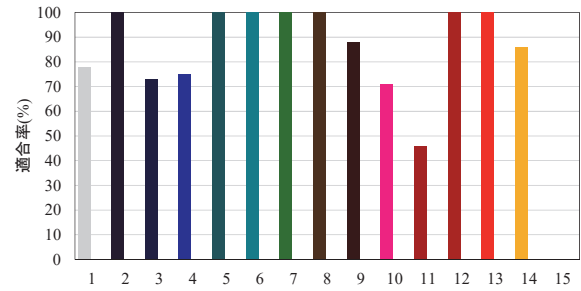
※ストロボ発光時間 1: 1/2100秒, 2: 1/1700秒

の発光時間が1/1700秒の方が1/2100秒より正解率および適合率の結果が高い傾向となっており、フラッシュの明るさによる影響はSpot1と傾向が異なる。これは、Spot2ではコン表面に色むらが多いことからその色むらを気泡と誤検出するが、ストロボの発光時間を長くすることで色むらのRGB値を大きくしたことで誤検出が少なくなったと考えられる。したがって、ストロボの発光時間1/1700秒の方が1/2100秒に比べて、適合率が高いカラーフィルターが過半数を占めている。カラーフィルターの#2に着目すると、正解率および適合率は1/2100秒でそれぞれ92%、100%、1/1700秒で83%、100%となっており、他のカラーフィルターに比べて高い検出率を誇っている。

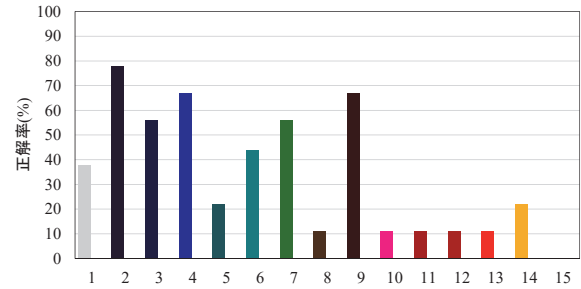
Spot1, Spot2における撮影画像のRGB値をHSV値に変換した結果を表-3および表-4に示す。異なる明るさにおける解析対象画像のRGBの各値を比較することで定性的な傾向は把握できるが、カラーフィルター使用時の定量評価は困難である。そこで、RGB値をHSV値に変換することで、解析対象画像のパラメータを直接比較できるようにし、カラーフィルターの特性を調査することとした。ストロボの発光時間が長くなることに伴い、すべてのカラーフィルターのV値が増加し、H値およびS値は不規則に変動した。その中で正解率と適合率が高い#2のH値とS値はほとんど変化しなかった。これは、明るさが異なるケースにおいても#2のR・G・B値の差分の比が一定であるといえる。そのため、基準RGB値が各



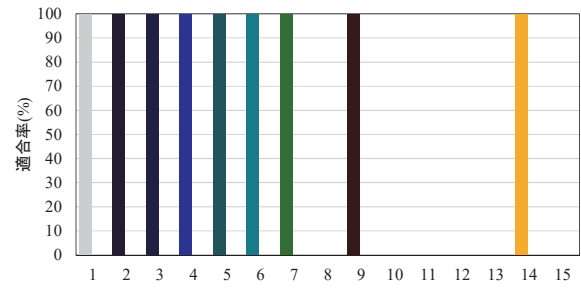
(a) 3~4mm²の正解率



(b) 3~4mm²の適合率



(c) 10mm²以上の正解率



(d) 10mm²以上の適合率

図-14 Bトンネル (Spot3) における表面気泡面積別の正解率と適合率

画素に対して一定であったことから、検出精度が高かったものと考えられる。この結果は室内実験の結果と同様である。

b) Bトンネル

Bトンネルでは、ストロボの発光量を3種類設定したが、機材トラブルで一部撮影画像が黒くなり、解析不可能となったためストロボ発光量による比較はできない。したがって、Spot3ではストロボの発光時間1/2400秒の結果を示す。使用したカラーフィルターについて、室内

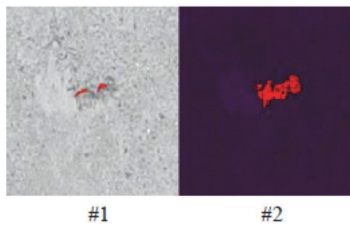


図-15 Bトンネル (Spot4) の解析画像

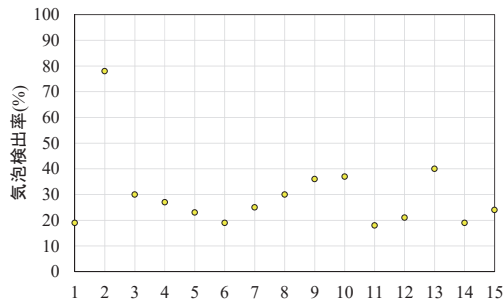


図-16 Bトンネル (Spot4) の気泡検出率

実験の結果およびAトンネルにおける現場実験の結果から、#16~#20の補正フィルターはフィルターなし (#1)の結果と比べて解析結果の向上が見込めないと判断したため、#2~#15を対象に現場実験を実施した。気泡面積 $3\sim 4\text{ mm}^2$ 、 10 mm^2 以上における各カラーフィルターの正解率および適合率を図-14(a)~(c)に示す。気泡面積 $3\sim 4\text{ mm}^2$ の正解率は#1と比較して#2、#6、#7が高かった。また、適合率に関しては上述したカラーフィルターを含めて7つのカラーフィルターで100%となっている。一方、気泡面積が 10 mm^2 以上では、6つのカラーフィルターで0%となっている。これは、Aトンネルの考察で述べたように、面積が大きく、深さの浅い気泡では気泡内のRGB値が小さくなり基準RGB値との差異が生まれにくくなったことで誤検出が多くなったと考えられる。

Spot4では解析結果の詳細を考察するため、ある特定の気泡を1つだけピックアップして解析し、各カラーフィルターの気泡検出率を評価した。解析時の画像を図-15、各カラーフィルターの気泡検出率を図-16に示す。#1が19%の検出率であったのに対し、カラーフィルターの使用により#11を除いたカラーフィルターで検出率が上昇した。なかでも#2に関しては78%の検出率となり、59%増の結果となった。#1では、表面気泡内の上部は黒く見えるため基準RGB値より低いRGB値のため気泡として判定されるが、下部はフラッシュの影響で陰がつくられず、基準RGB値を上回るRGB値になったものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、カラーフィルターを用いた撮影画像の画像解析を行い、室内実験および現場実験において気泡検出率、HSV値、正解率と適合率の観点から解析結果を考察した。撮影実験は、供試体に照明が影響しない室内およびトンネル工事現場など、異なる照明環境下で実施した。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- (1) 外部光源下では、カラーフィルターを使用しない場合に比べ、任意のカラーフィルターを用いた撮影画像の解析により、正解率と適合率が向上した。
- (2) #2のカラーフィルターは、フラッシュの発光時間を $1/2400$ 秒に設定したとき、最も高い正解率と適合率を示した。
- (3) V値が一定の割合で増減するうえで、H値およびS値が変化しないカラーフィルターを用いることで、気泡の検出精度に与える色むらの影響を低減することができた。
- (4) 現場実験における気泡面積等の定量的な考察に関しては照明状況や撮影環境によるところが大きいいため、今後の検討課題としたい。

謝辞：本研究の調査にて、写真撮影に関するご協力をいただきました。たなかみちよ氏に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 稲川雪久, 吉武勇, 石田能康, 小仲井一郎, 坂本一哉: 見栄えのよい覆工コンクリートの調査検討, NPO法人臨床トンネル工学研究所 小委員会報告書, Vol.1, pp.163-173, 2011.
- 2) Hu, L., Yoshitake, I. and Maeda, T.: A laboratory test on the effect of bugholes on surface degradation of tunnel lining concrete subject to freeze-thaw cycles, *Magazine of Concrete Research*, 2020.
- 3) Hu, L.: Influence of surface bugholes on freeze-thaw degradation of tunnel lining concrete, 山口大学博士論文, 2020.
- 4) 前田智之: 山岳トンネル覆工コンクリートの表面気泡の定量評価と低減方法, 山口大学博士論文, 2017.
- 5) 前田智之, 原田沙里, 森内麻衣, 藤原正稔, 吉武勇: デジタルカラー画像解析による締固め過程のコンクリート表面気泡の評価, *材料*, Vol.66, No.3, pp.205-210, 2017.
- 6) Yoshitake, I., Maeda, T. and Hieda, M.: Image analysis for the detection and quantification of concrete bugholes in a tunnel lining, *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier, Vol. 8, pp. 116-130, 2018.
- 7) イメージビジョン(株), ROGUE GELS, <http://www.imagevision.jp/products/roguegels.html> (2021/9/10)

(Received May 17, 2021)
(Accepted October 14, 2021)

DETECTION OF BUGHOLES OF TUNNEL LINING CONCRETE BY USING THE IMAGE WITH COLOR FILTERS

Kenta OKAMOTO, Huatao HUANG, Sadatoshi OHMORI and Isamu YOSHITAKE

Quality evaluation of concrete surface is generally performed by visual inspection, hence the results depend on the knowledge and experiences of the inspector. The foci of this study are to detect bugholes in detail and to quantify the surface quality of tunnel lining concrete. In this study, color filters were used to emphasize the bugholes in the colored image. To examine the effect of the novel image analysis, the experimental study conducted photo-shooting test at a laboratory and two fields of tunnel construction site. The accuracy of image analysis to detect bugholes was improved by using a kind of color filter.