

AIを活用した コンクリート表層品質評価システムの開発

佐野 健彦・小笠原 一基・佐原 晴也

コンクリート構造物の長期耐久性は、コンクリート構造物の表層部分の品質によって大きな影響を受ける。国土交通省東北地方整備局にて試行的に導入されているコンクリート表層部分の目視評価手法に着目し、数千枚のコンクリート表層部のデジタル画像に対してコンクリート診断士が評価した評価値をデータベースとして、畳み込みニューラルネットワークを用いて構築したAIを活用した表層品質評価システムを開発した。このシステムは、調査者の技量および経験に左右されない客観的な評価を行うことを可能にした。さらに、コンクリート表層部分の品質評価項目のうち表面気泡を対象とした評価において本システムの有効性を確認した。

キーワード：ディープラーニング、画像認識、AI、コンクリート、表層品質目視評価

1. はじめに

コンクリート構造物の長期耐久性は、コンクリート表層部分の品質によって大きく左右される¹⁾。コンクリート構造物の耐久性を向上させるためには、かぶりコンクリートの厚さを確保するとともに、水、塩類および二酸化炭素などの外的劣化因子の侵入抵抗性を向上させるための表層コンクリートの「密実さ」や「緻密さ」として表現される物質移動抵抗性²⁾を確保することが最も重要である。コンクリート構造物の耐久性を判断するための表層部の定量的な評価方法としては、表層透気試験³⁾や表面吸水試験⁴⁾などがあるが、点データとしての評価であり、構造物全体の評価を行うためには多くの測定データが必要なこと、測定結果が測定面の乾燥状態の影響を大きく受けること、簡便さに欠けるなどの課題⁵⁾がある。このような状況を鑑み、コンクリート表層品質向上を目的とした表層品質目視評価手法が提案⁶⁾され、施工時における品質向上の取り組みが始まった。この手法は、目視によって、コンクリート表層部分の表面気泡、沈みひび割れ、打重ね線、型枠継ぎ目のノロ漏れ、砂すじなどの表面出来映えの状態に着目し、それぞれの項目についてあらかじめ準備された評価基準を参考にランク分けを行い、これまで定性的な評価にとどまっていたコンクリート表面の出来映えを面的に定量評価するものである。また、評価結果に基づき、施工方法の見直し、改善、計画を常に実施し、PDCAサイクルを活用して

品質向上を図る点が特徴である。2013年秋からは、国土交通省東北地方整備局で導入⁷⁾され、復興道路・復興支援道路で試行中⁸⁾である。この手法は、調査者の経験および技量によって同じ対象物を評価した際の結果が大きくばらつく点や、現場技術者が自ら施工する現場を評価した場合、過剰に厳しく評価する傾向があるといった主観が入る要素が大きく、客観性に劣る点が指摘⁹⁾されている。この点に関しては、一定のトレーニングを実施することで、改善が可能であるとの報告⁹⁾もあるが、例えば、画像認識技術を活用した、画一的で客観的な評価方法を積極的に導入し改良していく余地は十分あると考えられる。

画像認識技術¹⁰⁾は、GPUやマルチコア化されたCPUなどによって構成されたコンピュータの飛躍的な性能向上により、急速な発展を遂げており、文字認識、医療画像による診断支援、自動運転自動車のコア技術など幅広い分野において応用的に活用されている。これらの画像認識技術は、AI技術の一領域であり、今後、技能労働者やベテラン技術者といった生産労働人口の大幅な減少、更新期を迎える多くの土木構造物の維持管理業務の増大が見込まれる建設業への適用は不可避であると考えている。さらに、AI技術は、コンクリート診断士や、ベテラン技術者のノウハウを若手技術者に伝承するためのツールとしても期待出来る。

以上を踏まえ、本研究では、コンクリート構造物の長期耐久性の向上を目的としたコンクリート構造物の

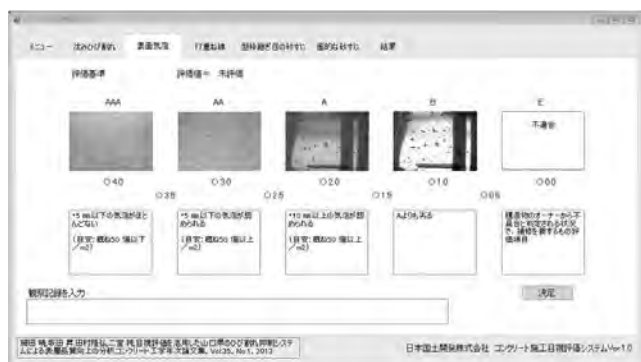
表層部分の品質確保に関する取り組みに対して、AIを活用したコンクリート表層品質評価システムの開発について述べる。

2. 開発の経緯

コンクリート表層品質目視評価手法は、特殊な測定機器を必要とせず、調査者が調査用紙だけで簡便で迅速な評価を行うことが出来る点が特徴である。本章では、この手法をベースにAIを活用したコンクリート表層品質評価システムの開発に至った経緯について時系列に述べる。

(1) タブレット端末を活用したコンクリート表層品質の目視評価手法

既往の研究^{11), 12)}では、目視評価手法による調査の更なる円滑化を目的とし、調査用紙に代えてタブレット端末を活用した調査を行うとともに、評価データを広範囲かつ統一的にとりまとめたデータベースの構築により、将来のコンクリート施工の品質確保および維持管理の可能性について提案している。本研究では、既往の研究による調査手法を準用し、2014年5月～8月にかけてL型擁壁、橋脚などの構造種別の異なる4現場において、図—1に示すタブレット端末で動作可能なアプリケーションプログラムを活用した測定および評価を行った。測定および評価は、調査用紙を用いた調査と同様にして調査者が目視によって評価した結果をもとに、評価項目ごとに評価点をラジオボタンをタップしてデータを入力した。また、評価時には、タブレット端末に内蔵されているカメラを用いて評価結果に対応する写真を撮影した。さらに、調査時のコメントは、コメント欄に入力してデータベースに残す仕組みとした。既往の研究に基づくタブレット端末を活用した評価システムは、実効性の高い品質管理手法の1つであることを確認した。



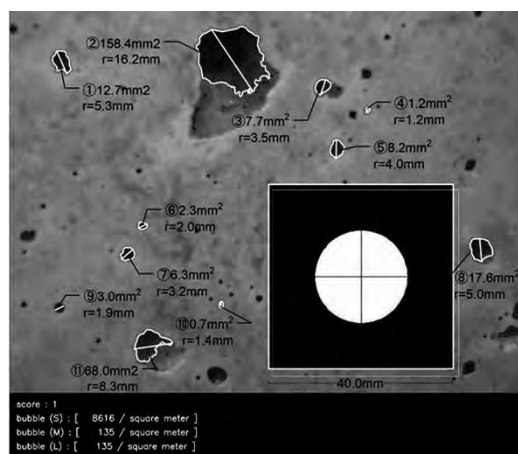
図—1 タブレット端末によるプログラムの表示例

(2) 画像処理によるコンクリート表層品質の評価

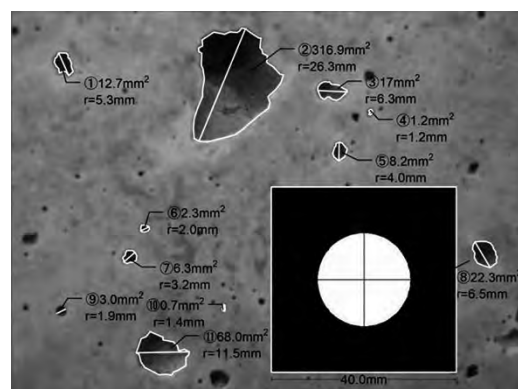
タブレット端末を活用したコンクリート表層品質評価システムでは、大量の写真画像を取得することが出来るため、データベースの観点からは有用であるが、そのデータ処理には多くの労力を要することとなった。そのため、大量のデータを短時間に客観的に評価するシステムが必要であると考えに至った。そこで、得られた画像データに対してコンピュータビジョンを用いた画像処理による点数化を試みることにした。本研究では、デジタルカメラを用いて撮影したコンクリート表層部分の表面気泡に着目し、画像解析を行った。評価基準は、気泡の個数および大きさによって4.0点から1.0点の範囲で評価し、評価点が高いほど気泡が少なく、評価点が低いほど気泡が多く大きいという尺度である。画像解析には、オープンソースのコンピュータビジョン向けライブラリ Open CV¹³⁾を用いた。具体的な画像処理は、表—1に示す通りである。一般的に、対象物の認識や測定を行う場合は、対象と背景とに分類する処理を経た二値画像¹⁴⁾として扱うと特徴抽出がし易い。そこで、画素の色情報を基準とするしきい値に対して255（白色）と0（黒色）の二値に分けて画像を単純化した二値化処理を実施した。着目した気泡の大きさを計測するため、二値化した画像に対して、輪郭抽出の処理を行った。その後、極端に小さいノイズを除去するフィルター処理を施し、強調表示されたコンクリート表層部分の表面気泡の輪郭から面積を計算してスコアを算出しグレーディングした。図—2は、二値化処理による気泡面積の自動検出と目視による評価結果の違いを示している。図—2(a)は、画像処理プログラムを用いた気泡面積の自動検出結果を示し、図—2(b)は、CADを用いて、写真画像から表面気泡を目視トレースした図である。両図中に表示されている黒色の四角形と白色の円形は、プログラムの自動検出でスケール情報を獲得するために配置したものである。自動検出および目視によるトレースの結果について表—2に示す。自動検出と目視評価によるCADトレースでは、気泡面積に

表—1 画像処理の概要

画像処理項目	画像処理の概要
二値化処理	しきい値によって画像を白黒に分類する処理
輪郭検出	二値化した画像に対して気泡などの輪郭検出をしやすい処理を行う
フィルター処理	極端に小さいノイズなどの除去をする
スコア算出	輪郭面積の大きい順に並び替え、輪郭面積を基にスコア化を行う



(a) プログラムによる自動検出図



(b) 目視によるトレース図

図—2 二値化処理による気泡面積の自動検出と目視による評価結果の違い

表—2 気泡面積の比較

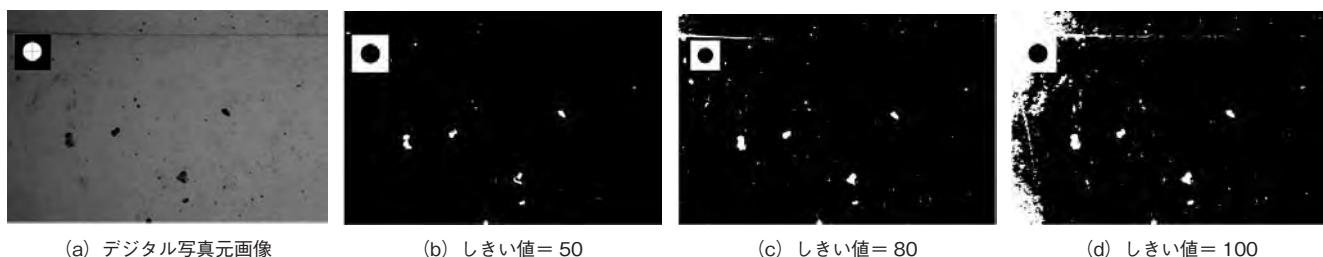
No.	気泡面積		面積誤差 (mm ²)
	自動検出 (mm ²)	目視評価 (mm ²)	
①	12.7	12.7	0.0
②	158.4	316.9	-158.5
③	7.7	17.0	-9.3
④	1.2	1.2	0.0
⑤	8.2	8.2	0.0
⑥	2.3	2.3	0.0
⑦	6.3	6.3	0.0
⑧	17.6	22.3	-4.7
⑨	3.0	3.0	0.0
⑩	0.7	0.7	0.0
⑪	30.1	68.0	-37.9

誤差を生じている部分が存在していることがわかる。これらの数値に対して図—2 (a) および図—2 (b) を見比べると、同じ部分の気泡を検出出来ているが、その検出範囲に差異があることが見てとれる。これは、二値化処理では、気泡の浅い部分は、白色に近く検出されないためだと判断出来、深さが一様な気泡では問題ないが、深さが一様でない気泡では明度によって健全度が過大に評価される可能性があることを意味している。図—3 は、コンクリート表面画像の二値

化処理のしきい値の違いによる評価結果の例を示している。図—3 (a) は、デジタル撮影された元画像であるが、図—3 (b)、図—3 (c)、図—3 (d) はそれぞれ、二値化におけるしきい値を変更した場合の気泡の検出を可視化したものである。この検証から、二値化処理を基本とした画像処理では、しきい値の設定によって結果が大きく異なることがわかる。以上から、画像処理による評価は、撮影した写真の明度、陰影などの影響を受け、結果を左右するしきい値の調整が非常に困難だという課題が生じたため、別の手法を考える必要性が生じた。

3. ディープラーニング手法を用いた表層品質評価システム開発の概要

ディープラーニングは、多層のニューラルネットワークを用いた機械学習手法の1つとして、音声認識、画像認識や自動翻訳に代表される文書処理などに適用され、AIを実現するためのアプローチとしてその有用性が広く認知された手法である。本章では、ディープラーニング手法をコンクリート表層品質評価に対して適用した開発の概要について詳細を示す。



図—3 コンクリート表面画像の二値化処理のしきい値の違いによる評価結果の例

(1) ディープラーニング手法の概要

本研究では、カリフォルニア大学バークレー校のBLVC (Berkeley Vision and Learning Center) が中心となって開発しているオープンソースのディープラーニングライブラリCaffe¹⁵⁾を使用し、畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural network, CNN) と呼ばれるニューラルネットワークを用いた。Caffeは、画像認識分野で広く利用¹⁶⁾されており、高速処理が可能な点が特徴である。畳み込みニューラルネットワークは、入力層、畳み込み層、プーリング層と、分類を行う全結合層、出力層で構成され、画像認識分野では高い性能が出ることが知られている¹⁷⁾。畳み込み層は、入力データに対して、フィルターのウインドウを一定間隔でスライドさせながら適用し、畳み込み演算を行い、画像の局所特徴を抽出する層である。プーリング層は、畳み込み層で抽出された特徴の位置感度を若干低下させる（物体の位置が変動しても同一の物体であるとみなす）役割をする。全結合層は、直前の層のすべてのユニットを結合している層であり、畳み込み層、プーリング層を通して抽出された特徴を基にパターン分類を行う分類器の役割をする。出力層では、ソフトマックス関数などの尤度関数を用いて、尤度の最大を分類して出力する。

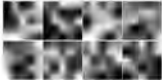
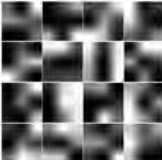
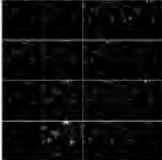
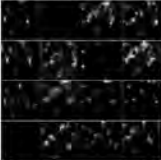
(2) ディープラーニング設定パラメータの概要

畳み込みニューラルネットワークは、あらかじめ決定しておくべきパラメータがいくつか存在する。ネットワークに関するパラメータとしては、畳み込み層のフィルタサイズとフィルタ数、活性化関数の種類、プーリングの種類、層の構成、過学習を回避するためのドロップアウトの割合、データの正規化の有無などがある。また、学習に関するパラメータとして、ミニバツ

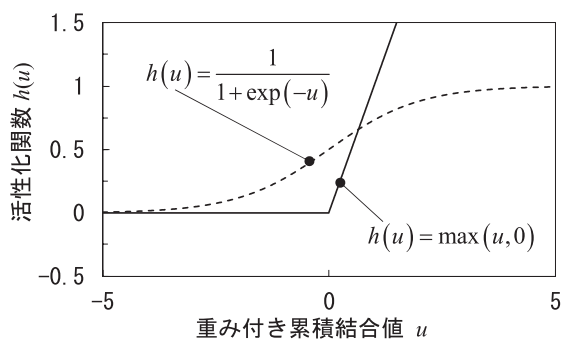
チのサイズ、学習係数、更新回数などがある。図—4は、学習により得られた畳み込み層におけるフィルタと入力画像を対象とした場合の出力例を示している。図—5は、本研究で用いたニューラルネットワークの全体構造を示している。入力層、5層の畳み込み層、5層のプーリング層、2層の全結合層と出力層の全14



図—5 ニューラルネットワークの全体構造

入力画像	畳み込み層1	畳み込み層2	畳み込み層3	畳み込み層4	畳み込み層5
サイズ：256×256 	フィルタ				
	フィルタサイズ：5×5 フィルタ数：8 	フィルタサイズ：5×5 フィルタ数：8 	フィルタサイズ：5×5 フィルタ数：8 	フィルタサイズ：3×3 フィルタ数：16 	フィルタサイズ：3×3 フィルタ数：16 
	画像入力時の出力				
サイズ：256×256 	サイズ：128×128 	サイズ：64×64 	サイズ：32×32 	サイズ：16×16 	

図—4 各層におけるフィルタと入力画像を対象とした場合の出力例



図一六 シグモイド関数とReLUの比較

層で構成されている。プーリング層は最大プーリングを採用している。活性化関数は、入力信号の総和を出力信号に変換する関数であり、代表的な活性化関数としては、シグモイド関数などの非線形関数があるが、図一六の点線に示すように、指数関数のため、重み付き累積結合値の変動が大きい場合には、出力が0または1のどちらかになりパラメータの更新がほとんど行われないう特徴がある。本研究では、画像認識の処理においてシグモイド関数よりも良い結果が得られることが報告¹⁸⁾されているReLUを用いた。ReLUは、図一六の実線で示すように重み付き累積結合値が0以下ならば出力が0、重み付き累積結合値が0以上ならばその値を出力するという非線形関数である。過学習の状態を回避するためのドロップアウトの割合は、0.75とし、全結合層1と全結合層2の間で設定した。出力層には、1.0点、2.0点、3.0点、4.0点に対応する4つのユニットを定義した。

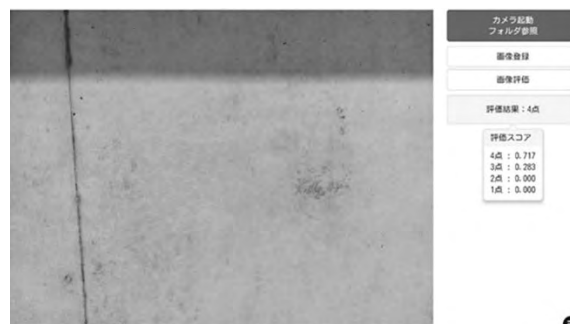
(3) 学習データの概要

学習に使用した画像は、複数のコンクリート診断士によって診断された1.0点から4.0点までを0.5点刻みの7段階に分類した評価値および画像データを用いた。実際の撮影では、1.0点306枚、1.5点17枚、2.0点421枚、2.5点87枚、3.0点560枚、3.5点110枚、4.0点427枚の合計1938枚の写真データを集めた。これらの画像データは、畳み込みニューラルネットワークによるディープラーニングで一般的に用いられるデー

タ拡張の考え方を活用して、水平鏡面反転処理を施した画像データによる拡張を行った。上下鏡面反転処理による拡張は、画像処理的には十分可能であるが、コンクリート打設によるノロだれなどの重力方向の影響を考慮出来ないため採用していない。データ拡張も含めた画像データは、6056枚にのぼり、このデータで表面気泡に関するディープラーニングを実施した。

4. AIを活用したコンクリート表層品質評価システム

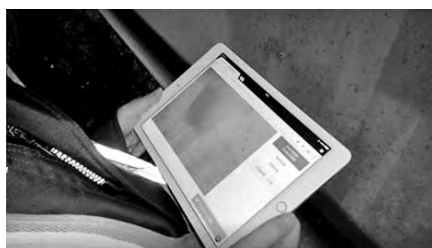
写真一1(a)および写真一1(b)は、現場におけるAI評価を実施している状況である。現場では、Wi-Fi接続が可能なスマートフォンやiPadなどのタブレット端末を用いて、コンクリート表面の写真撮影を行う。撮影した写真は、その場でクラウド上にあるAIに評価値の問い合わせを行うことで、瞬時にコンクリート表面の出来映えについて評価をすることが出来る。また、インターネットに接続出来ないトンネルなどの閉鎖空間では、写真一1(c)に示す、可搬性に優れた携帯型小型サーバとの通信で評価値の問い合わせが出来るシステムを構築してある。また、更なるAIの精度向上を目的とした学習データ収集を行う機能も有しており、品質向上を目的とした施工におけるPDCAサイクルの中でAIの育成も出来る環境を整えてある。図一七は、タブレット端末を用いて撮影した現場のコンクリート表面写真に対してAIによる評



図一七 AIによる画像診断結果



(a) 現場における評価状況

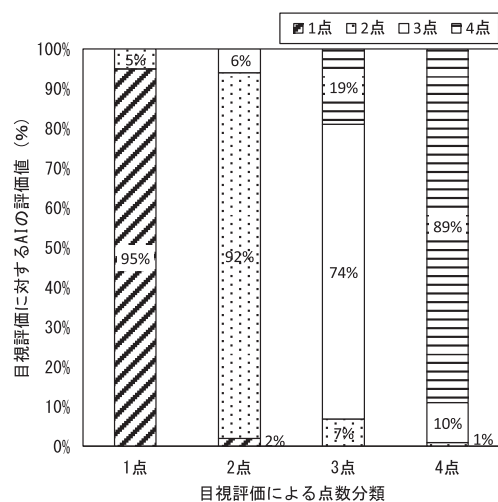


(b) 端末使用状況



(c) 携帯型小型サーバー

写真一1 タブレット端末を活用したAI診断



図一8 AI評価の学習成熟度指標

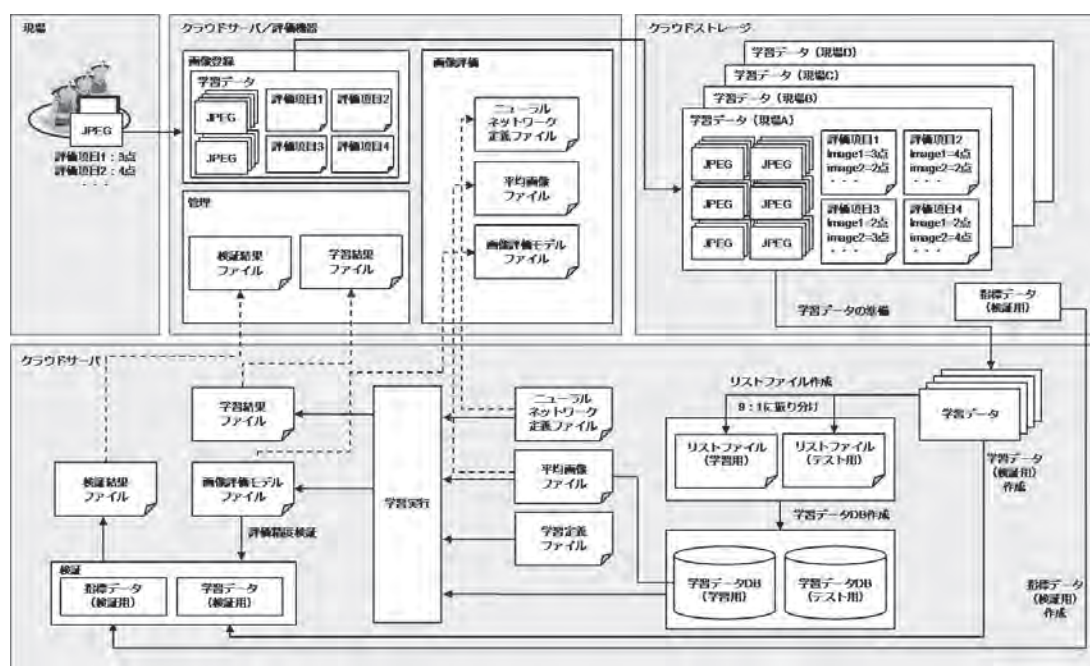
価を行った例である。この図では、評価結果として4.0点が表示されている。また、AI評価値と人間の目視による評価値に乖離がある場合は、目視の評価値を学習データとしてアップロードすることも可能である。アップロードされた画像データは、AIによる評価精度向上のための教師データとなる。評価スコアとしては、71.7%の確からしきで4.0点であると判定していることを意味している。図一8は、AI自体の学習成熟度を指標として表したグラフである。学習成熟度の検証には、指標データとして、学習データに使用していないコンクリート診断士によって評価分類されたデータを用いた。図中の斜線塗り潰し、ドット塗り潰し、塗り潰しなし、横線塗り潰しは、それぞれ1点、2点、3点、4点を示している。グラフの縦軸は、表

層品質目視評価の評価値に対するAIの評価値を示し、横軸は、表層品質目視評価による点数分類である。例えば、横軸の1点の項目に着目すると、棒グラフは、斜線塗り潰しとドット塗り潰しの2パターンで構成されていることがわかる。これは、1点の画像をAIによって評価した場合に、正しく斜線塗り潰し（1点）と評価する確率が、約95%であることを示し、ドット塗り潰し（2点）と評価する確率が5%程度であることを示している。その他についても同様であるが、図中の評価点3点は、3パターンで構成されており、評価結果にばらつきが生じ易いことを示している。ただし、3点と正しく判定する確率は74%であり、精度的には満足出来る状況だといえる。図一9は、AIを活用したコンクリート表層品質評価システムの概要を模式的に表した図である。

5. おわりに

本研究では、コンクリート構造物の表層部分の品質確保に関する取り組みに対して、AIを活用したコンクリート表層品質評価システムの開発を行った。今回の検討範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 本評価システムは、評価者によるばらつきを小さくすることを目的とした複数のコンクリート診断士による評価結果を学習データとしており、調査者の技量や経験に左右されない客観的な評価が可能であることを確認した。
- (2) 畳み込みニューラルネットワークを用いたディ-



図一9 AIを活用したコンクリート表層品質評価システムの概要

プラーニングでは、学習データ量やパラメータの調整によって評価結果が大きく異なるため、指標データによる学習成熟度の把握による最適なパラメータ調整が必要であるとともに、さらに多くの画像データによる学習および精度向上が必要である。

今後は、表面気泡以外の評価項目に対して本システムが適用出来るように開発を行っていく予定である。

JCM A

《参考文献》

- 1) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会（JSCE335 委員会）第二期成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ 97，2012.
- 2) 酒井雄也，中村兆治，岸利治：コンクリートの物質移動抵抗性を代表する空隙構造指標の抽出と検証，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol. 70，No. 4，390-401，2014.
- 3) 吉田早智子，細田暁，林和彦，内田晃一：表面吸水試験および透気試験による山口県の構造物の表層品質評価，コンクリート工学年次論文集，33 巻 1 号，pp.1823-1828,2011
- 4) 林和彦，細田暁：表面吸水試験によるコンクリート構造物の表層品質の評価方法に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.1，pp.82-97，2013
- 5) 坂田昇，渡邊賢三，細田暁：コンクリート構造物の品質向上と表層品質評価手法，コンクリート工学，Vol.50，No.7，pp.601-606，2012.7
- 6) 細田暁，坂田昇，田村隆弘，二宮純：目視評価を活用した山口県のひび割れ抑制システムによる表層品質向上の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1,2013
- 7) 日経コンストラクション：「強度＝耐久性ではない」，8 月 26 日号，pp.64～69，2013
- 8) 佐藤和徳：復興道路・復興支援道路に関する取組み，コンクリート工学 Vol.53，No.1，pp.15-20,2015.1
- 9) 渡邊賢三，小林聖，坂田昇，細田暁：目視調査に基づくコンクリート構造物の表層品質評価手法の特徴・傾向に関する分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.1813-1818，2015.
- 10) 原田達也：機械学習プロフェッショナルシリーズ 画像認識，講談社，2017
- 11) 井林康，細田暁，二宮純，岩城一郎，田村隆弘：コンクリートの施工状況把握チェックシートおよび施工後目視評価のタブレット端末への適用，「データベースを核としたコンクリート構造物の品質確保」に関するシンポジウム，2013.9.
- 12) Kou IBAYASHI, Osamu YODA, Yasushi TANAKA and Kyuichi MARUYAMA : Road Bridge Brief Inspection And Input System With Tablet Computer, International Conference on Sustainable Construction Materials & Technologies, 2013.8.
- 13) OpenCV (Open Source Computer Vision Library: <http://opencv.org>)
- 14) 高木幹雄，下田陽久：新編 画像解析ハンドブック，東京大学出版会，A5 判，pp.1519-1546，2004.
- 15) Y. Jia, E. Shelhamer, J. Donahue, S. Karayev, J. Long, R. Girshick, S. Guadarrama, and T. Darrell. Caffe: Convolutional architecture for fast feature embedding, arXiv:1408.5093, 2014.
- 16) 山下隆義：イラストで学ぶディープラーニング，講談社，2016
- 17) Y. LeCun, B. Boser, J. S. Denker, D. Henderson, R. E. Howard, W. Hubbard and L. D. Jackel: Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition, Volume 1, No. 4, pp. 541-551, 1989
- 18) 岡谷貴之：機械学習プロフェッショナルシリーズ 深層学習，講談社，2015

【筆者紹介】

佐野 健彦（さの たけひこ）
日本国土開発㈱
土木事業本部技術部技術設計グループ
課長 修士（工学）



小笠原 一基（おがさわら かずき）
㈱科学情報システムズ
ソリューション本部ソリューションシステム部
主任 修士（理学）



佐原 晴也（さわら はるや）
日本国土開発㈱
土木事業本部技術部技術開発グループ
博士（工学）

