

デジタル技術による各種効率化

— AI、DIC、AR、リアルタイム流動解析 —

国土交通省国土技術政策総合研究所住宅研究部住宅ストック高度化研究室主任研究官

三 島 直 生

1. はじめに

近年のデジタル技術の革新には目を見張るものがあり、さらにスマートフォンなどの高性能端末の普及により各種のデジタル技術がより身近なものとなっている。また、Web 上には汎用的なものから専門的なものまで、各種のオープンソースプログラムが公開されており、各種モバイル端末のセンサ等リンクした高度な処理を行うための開発エンジンなどもアプリケーション開発者向けに公開されている。

このような状況は一昔前では考えられなかったものであり、アプリケーション開発時にはゼロからプログラムを書くのではなく、これらの公開されたプログラムを組み合わせることで大幅な開発期間の短縮とコストダウンが可能となるだけでなく、場合によってはよりバグ等の少ない高品質なプログラムの開発も可能となる。

また、ある種の計測システムを新規開発する際にも、スマートフォンに内蔵されたセンサを利用できる場合には、ハードの開発が不要となるだけでなく、開発した技術を普及させる際には、既にユー

ザが対応するスマートフォンを所持している場合にはアプリケーションソフトの購入のみで使用できるため、普及のためのハードルは一気に低くなる。

本稿では、筆者がこのような視点で実施してきた研究テーマとして、人工知能 (AI)、デジタル画像相関法 (DIC)、拡張現実 (AR) およびリアルタイム流動解析の各技術の建設材料・施工分野への活用を検討事例について概説する。ただし、ここで取り上げる技術は全て開発段階のものである。

2. 人工知能 (AI) による画像診断の活用事例

近年、AI による評価・診断技術が急速に発展している。その中でも特に進歩が著しいのが AI による画像診断である。同技術では、画像をそのままインプットデータとして使用できるため、人間が目視判定するような曖昧な事象を客観的かつ定量的に評価することが可能となるのが最大の利点である。また、後述するような、有償でクラウドサーバ上の汎用画像診断 AI が使用できるサービスも出てきており、開発期間の短縮および開発コスト削減に大いに貢献する技術として

期待される。

(1) AIによる高流動コンクリートの材料分離判定システムの開発¹⁾

建設工事に用いられる生コンクリートの品質管理として、材料分離の評価は非常に重要であるにもかかわらず、現状では目視により確認する以外に方法がなく、受入検査時に判定が分かれるなどの懸念がある。このような状況を改善する1つの方法として、本研究ではAIによる画像診断技術を応用し、現場での受入れ検査にも適用可能な簡易かつ客観的な材料分離の判定システムの開発を目指した。ここで、本開発対象は人間による目視判定のセカンドオピニオンを得るためのツールと位置づけ、最終の判定は人間が行うことを想定している。

図-1に、本研究で採用したシステムの概要を示す。試験者が受入れ検査時に、スマートフォンのアプリでスランプロー試験後の試料を真上から撮影すると、数秒後にAIによる材料分離の判定結果(確信度)が画面に表示される。アプリ使用時のスマートフォン画面の例を図-2に示す。ここで、AIエンジンには、開発コストおよび開発期間を大幅に短縮す

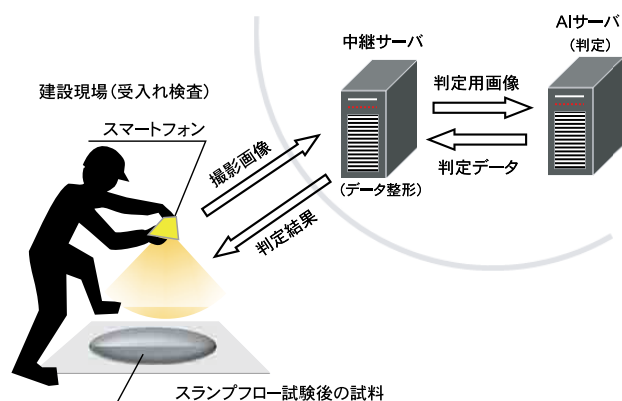


図-1 材料分離判定システムの構成

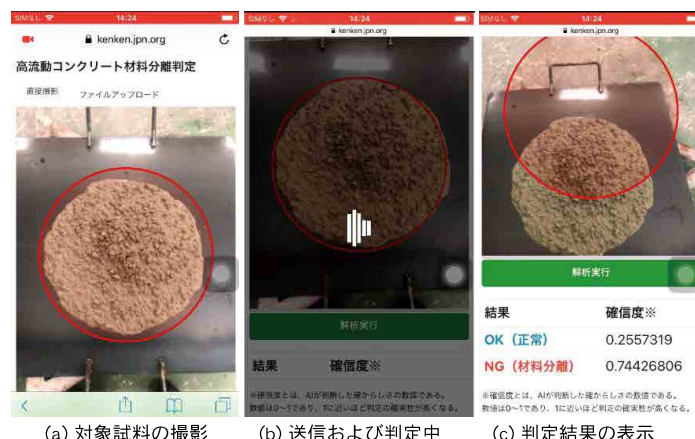


図-2 アプリ使用時のスマートフォン画面の例 (赤丸は撮影時の目印)

ることが可能な汎用エンジン²⁾を用いた。

写真-1に学習用の画像の例を示す。本開発では正常：26枚、材料分離：19枚を学習用データとして用いた。図-3に、AIによる確信度の結果と目視判定結果との比較を示すが、材料分離および正常の判定においては、9割前後の正答率となった。本システムは、一般的な画像判定と比べて学習データの量が非常に少ないものの、同一調合、同一使用材料に対する判定精度については十分に実用レベルにあると言える。また、今後の学習用データの蓄積により判定精度と汎用性を向上させることは可能である。本システムは、試験時の手間と時間、コスト、客観性など全ての面において、現状では最も現実的な材料分離の判定方法と言え、実用化に向けた早急なデータの蓄積が求められる。

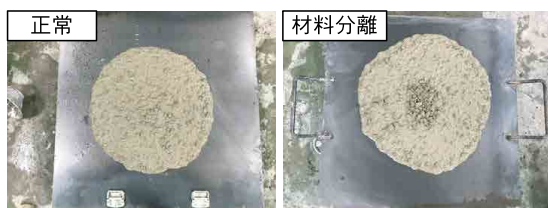


写真-1 学習用画像の例

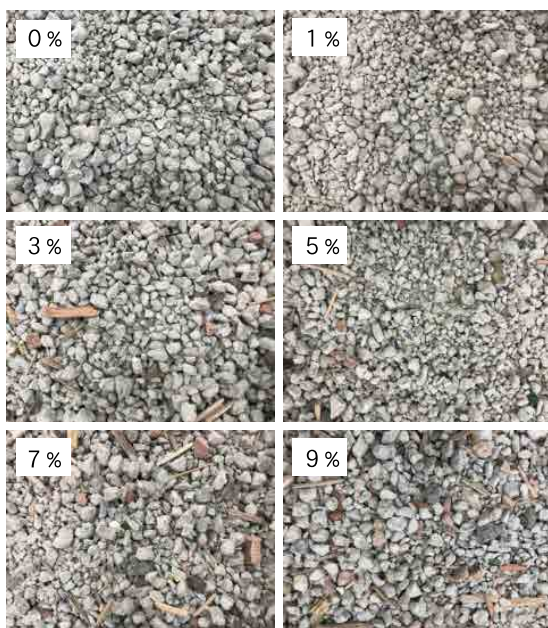


写真-2 模擬不純物の混入率ごとの再生粗骨材の画像の例（数値：不純物混入率、撮影範囲：約300×400mm）

(2)AIによる再生粗骨材の不純物混入率の推定システムの開発

コンクリート用再生粗骨材の活用において、不純物混入率の評価は限度見本による目視判定によらざるを得ず、客観的かつ定量的な評価が難しい。この様な問題に対してAIによる画像判定技術を応用し、簡易かつ客観的な不純物混入率の推定システムの開発を試みた。本開発では、AIによる画像判定に加えて、従来技術である一般的な画像解析（彩度0.3以上となる画素の面積率を算出）も同時に行い比較した。各不純物混入率の撮影画像の例を写真-2に、学習用画像の例を写真-3に示す。AIによる画像判定システムは既述の2.（1）と同様なものを用

い、本検討では不純物の混入率を数値で得るために、不純物混入後の撮影画像を100分割し、不純物が映っている画像を不純物と分類し、その比率に補正係数を乗じて不純物混入率を算出した。このため、本検討では1枚の撮影画像に対して100回の画像判定を実施している。学習用データとしては、写真-3に示すような撮影画像を分割したもののうち、再生粗骨材：500枚、不純物458枚を用いた。不純物混入率の算定方法のイメージを図-4に示す。

図-5および図-6に、AIおよび画像解析による不純物混入率の推定結果と両者の比較を示す。ここで、同図は各不純物混入率につき5枚1組の評価を3回

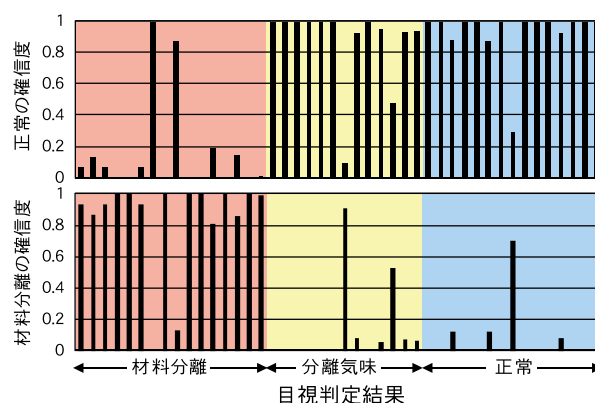


図-3 AIの判定結果と目視判定結果の比



写真-3 AIの学習用データの例

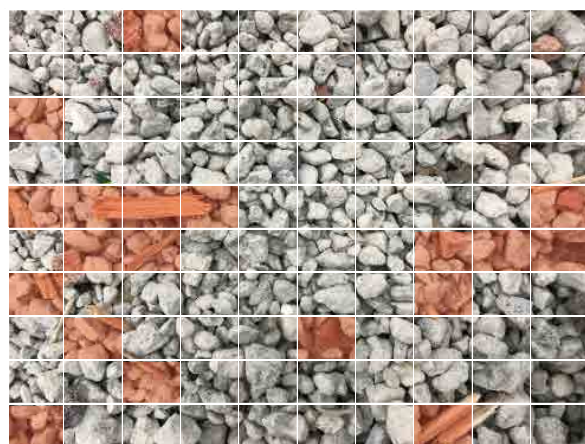


図-4 AIによる判定方法のイメージ〔赤色を不純物と判定した場合の不純物混入率：19マス×0.2=3.8(%)〕

繰り返した結果（計 15 枚）を示す。また、AI と画像解析ではそれぞれ同じ画像データを用いている。図-5 によれば、ばらつきは大きいものの、実際の不純物混入率と推定値で良好な相関関係は見られる。また、AI では大きめの、画像処理は小さめの推定結果となる傾向があるが、この結果は補正係数や彩度の閾値などの設定により変化するものである。図-6 によれば、AI と画像解析で推定結果には線形の強い相関関係が見られ、現状の AI の推定結果は特徴量として彩度が重視されたものとなっていると推定される。このような場合にはより簡易な画像解析による手法の採用が望ましいとする考え方もある。

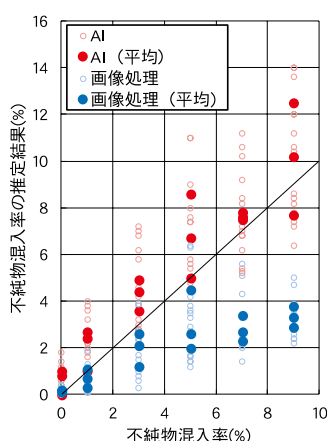


図-5 不純物混入率の推定結果

3. デジタル画像相関法を用いた建築物の損傷検知システムの開発³⁾

地震発生後の被災建築物に対しては、余震等に対する安全性を迅速に判定し、人的被害の防止と避難の可否の判断を示すことが求められる。現状では、建物被災後に応急危険度判定士が現地に赴き、建物 1 棟毎に目視による外観調査および建物の沈下や傾斜などの簡易な計測を行うことで判定が実施されている。しかし、これらの被害調査は、地震発生直後の危険かつ制約の多い条件下での実施が想定され、人員の確保および調査日数を要するだけでなく、調査員を危険にさらすことになるという問題も残されている。これに対して、

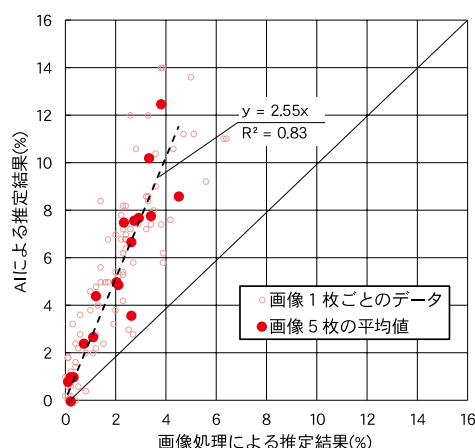


図-6 AIと画像解析の結果の比較

建物に事前に加速度センサ⁴⁾や変位の計測装置⁵⁾等を設置しておき、それらの計測結果から自動的に地震後の構造安全性を判断する手法などが既に実用化段階にある。一方で、応急危険度判定としては躯体の構造安全性だけでなく、外装材等の破損や脱落などまで含めた、外観変状による評価も重要となる。本研究では、このような目視調査により検出される建物の外観変状を対象として、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation: DIC) を応用した、建築物の損傷検知システムの実用可能性に関する基礎的な検討を行った。

DIC では、解析対象の画像内にサブセットと呼ばれる任意の範囲の画素パターンを認識し、このサブセットの移動を追跡することで変位およびひずみを算出する。一般に、DIC による変形計測では、このサブセットを検出しやすくするために、材料表面にまだら模様が塗布されることが多いが、本研究では建物外装の模様をそのまま認識パターンとして用いることとした。DIC の優位性は、変形の面的な分布が特殊なセンサ等を用いることなく容易に計測できる点にあり、地震被害のように厳密な破壊位置を予測することが難しい場合には、非常にメリットが大きい。その反面、変形前後の画像が必ず必要であること、および計測対象に模様がないと計測できないなどの制約もある。

図-7 に、本研究で想定する DIC を応用した損傷検知システムを示す。地震による損傷前後の画像が必要となるため、ここでは監視カメラのような常時の動画撮影を前提とし、地震発生後に地震直前と直後の計 2 枚の画像を自動抽出して解析することで、建物の損傷を定量的に検

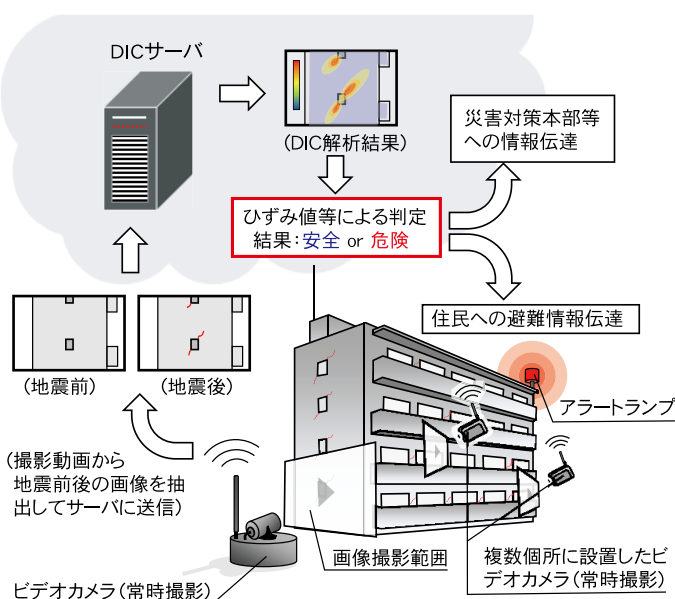


図-7 DICによる損傷検知システムの概要

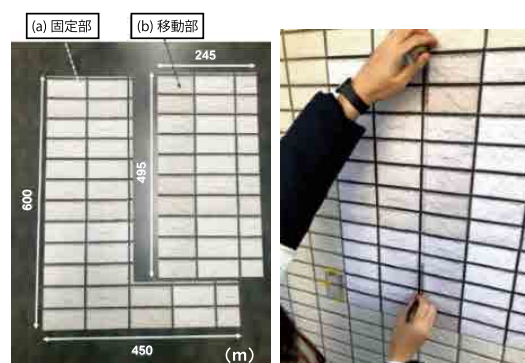


写真-4 ひび割れの再現方法（左：使用したパネル、右：ひび割れの調整状況）



写真-5 パネル設置後の撮影画像の例（カメラ1、撮影距離2000mm、ひび割れ幅0mm）

知するシステムを想定する。DIC解析はクラウドサーバ上で行うこととし、結果として得られるひずみまたは変位の値により損傷程度および危険性を判定し、結果を当該建物に避難情報として返すとともに、災害対策本部等の情報集積機関に送る。ここでは上記システムのうちDIC解析によるひび割れの検出精度に対して実験的な検証を行った。

実験では、写真-4に示すような実建物の外壁パターンを印刷した600×450mmのパネル（厚さ2mm）を建物外壁に設置し、そのパネルの一部をひび割れ幅だけ移動させて隙間を作りひび割れを再現した。ひび割れ幅は隙間ゲージにより調整した。測定対象は色調の異なる2種類のマンションのタイル外装および戸建て住宅の外装パネル（サイディング）とした。カメラはカメラ1：1280×960pixel、およびカメラ2：3280×2464pixelの2種類を用いた。写真-5に撮影画像の例を示す。

図-8に、市販のDICソフト⁶⁾による解析結果の例を示す。図によれば、タイル外装のパターンによりDICによるひずみおよび変位の検出が可能であることがわかる。図-9に、DICによる解析値（変位の最大値）とひび割れ幅の関係に及ぼす各測定条件の影響を示す。図によれば、ひび割れ幅の小さい領域を中心にノイズ検出による誤差が見られるものの、両者には良好な相関がみられた。また、測定条件による明確な傾向は見られず、全体的にひび割れ幅が実際よりも大きめに測定される結果となった。

DICのメリットは、画像のみからひずみや変位といった、物理量が計測できる点であり、特殊なセンサ等が不要なためコストも最も低い部類になると予想される。また、DICにより建物外装の模様から直接変状の計測が可能であることは、実用化に向けては大きな知見であり、今

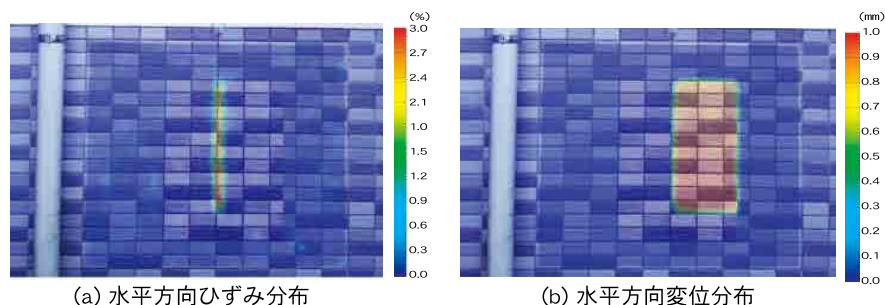


図-8 DIC解析結果の例〔マンション(茶タイル)、カメラ2、撮影距離2000mm、ひび割れ幅1.0mm〕

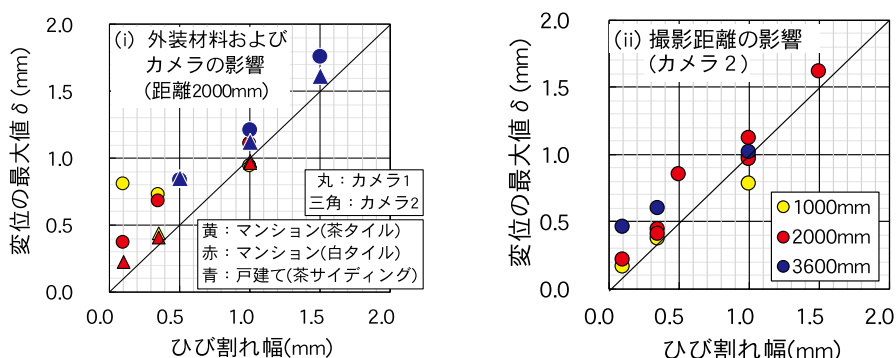


図-9 DICの解析値とひび割れ幅の関係の例

後の応用が期待される。

4. AR 打音アプリによる欠陥の自動検出技術の開発⁷⁾

建築物のタイル外装や鉄筋コンクリート構造物の表層部欠陥を非破壊で調査し、早期に発見することは住空間の安全の確保および構造物の適正な維持管理において非常に重要である。構造物の欠陥検出のための非破壊検査手法としては様々な方法が適用されているが、その中でも打音検査は検出精度の高さなどの理由で広く用いられている。しかし、検査コストは高額となるため、打音検査の効率化・省力化が社会的な要求となっている。

本研究ではこれまでに、打音検査を効率化することを目的に、打音試験による時間周波数分析結果を拡張現実

(Augmented Reality:AR) により検査部位に仮想的に貼り付けて表示させることのできるスマートフォン用アプリを開発した⁸⁾。写真-6⁹⁾に、AR打音アプリを用いて外装タイル供試体の表面にTFFT（時間周波数分析）画像および円錐形のマーカを表示させた状態の例を示す。その結果からは、ARの導入は欠陥位置の検出および記録に対して非常に有効であることが確認された。しかし、既存のアプリでは、測定が直線上でしかできないこと、測定可能距離が2m程度と短いこと、および欠陥部をTFFT画像から人為的に目視判定する必要があること等の問題点が残されていた。これらの問題点を解決するために、欠陥部の異常音を自動で判定し、直接欠陥部にARマーカを表示させるための改良を行った。

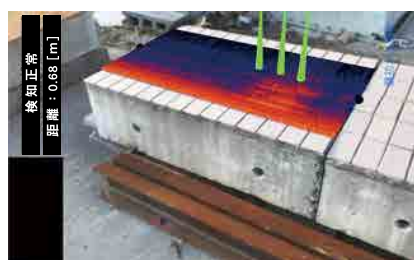


写真-6 AR打音アプリによるARオブジェクトの表示例⁹⁾

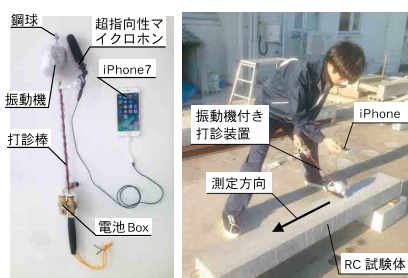


写真-7 AR打音検査装置の構成（左）と測定状況（右）

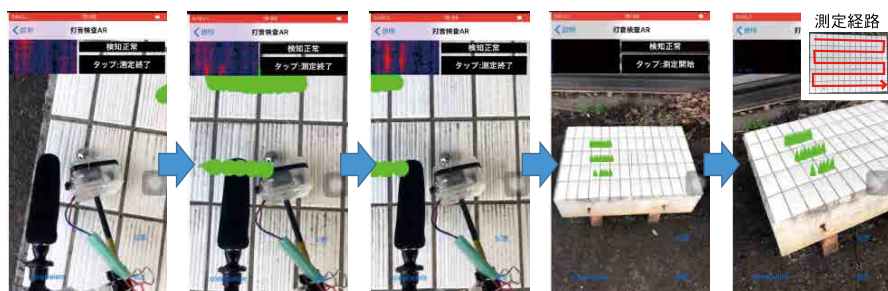


図-10 タイル供試体に対する測定状況の例（供試体サイズ：700×490mm、計測時間：約30s）

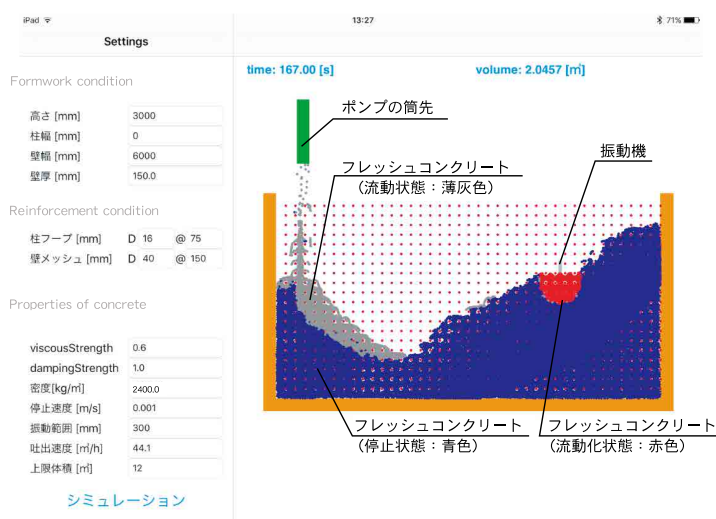


図-11 リアルタイム解析の画面の例（iPadを使用）¹⁴⁾

写真-7に本研究で使用したAR打音検査装置の構成と測定状況を示す。試作した振動機付き打診棒とスマートフォンとマイクという、非常にシンプルな構成となっており、計測は1人で実施可能である。振動機付き打診棒としては、市販の打診棒の鋼球近傍に振動機を固定することで連続的に打撃が加えられるようにしたものである。超指向性マイクロホンで収録された打撃音の処理にはiPhone7を使用し、ARオブジェクトの表示にはアプリ開発者向けに公開されているARエンジンであるARKit¹⁰⁾を利用した。収録された打撃音は、高速フーリエ変換を行った後に欠陥の判別に用いた。欠陥の

判別は、閾値となる音圧レベルを設定できるようにし、それ以上の音圧レベルが検出された部位を欠陥と判定した。また、健全部の打撃音およびモータ音などの周囲ノイズを計測し、その周波数帯を自動でマスクして計測する機能も実装した。

図-10に、外装タイル供試体の測定の様子を連続写真で示す（ここではマスク機能は使用していない）。同図右上に示す計測経路で測定し、欠陥部の異音が検出された部分にARマークがリアルタイムで設置されている。計測終了後に供試体にスマートフォンをかざすと、ARマークにより欠陥位置が容易に視認できる。

現時点では、欠陥の検出方法との組合せによっては検出できない欠陥もあるが、計測の容易さ、装置のシンプルさ、および計測速度の面では十分に実用レベルであり、また計測結果の視覚的な解りやすさは従来技術には無いものといえる。欠陥の検出精度の改善に対して最も影響が大きいと思われるのが振動打診棒の性能（打撃の強さ）であり、この開発が今後の課題となる。

ARアプリケーションの改良に関しては、本原稿執筆時点で既にARKitが大幅にバージョンアップされており、ARオブジェクトの表示精度の改善とともに、ARオブジェクトの保存および複数端末による共有が実現している。将来的には、GPS等を利用した位置座標の特定が実現すれば、BIMデータとの連携も可能となり、調査診断業務の効率化が一気に進むものと予想される。

5. フレッシュコンクリート用リアルタイムシミュレータの開発^{11, 12)}

建設現場の生産性向上は緊急の課題となっており、その中でもコンクリート工事は最も生産性の向上が遅れている分野の1つとされている。このため、コンクリート工事の合理化および生産されるコンクリート構造物の品質確保を目的として、フレッシュコンクリートの流動解析技術に関する研究が数多く行われてきた。既往のフレッシュコンクリートの流動解析の対象はほぼ全てが高流動コンクリートを想定した単調な自重流動であるのに対し、一般的な工事の大多数で使用されているのは普通コンクリートであり、普通コンクリートの配筋された型枠内への打込みでは振動締め固めが不可欠である。このため、振動による流動化を再現できない限り実用レベルでは適用範囲が極端に限定されることになる。コンクリートポンプの筒先（吐出口）の移動についても同様のことが言える。

本研究の最終目標は、施工現場で、ある程度の精度を持った実大施工シミュレーションを、リアルタイムで簡易に行うことのできるツールを開発することにある。本研究では、解析精度をある程度犠牲にしても、解析負荷を低減してリアルタイム解析とすることで得られるメリットが充分にあると考え、2次元のリアルタイム解析を採用して研究を進めている。リアルタイムシミュレーションの

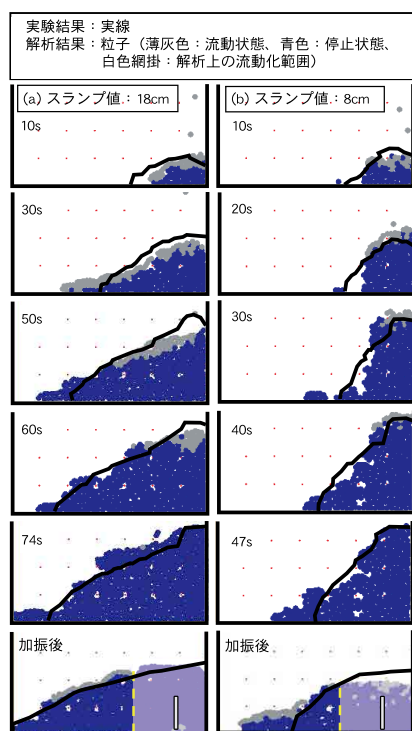


図-12 実験結果と解析結果の例

優位性としてまず挙げられるのは、実際の施工と同様に、振動機やポンプの筒先の位置といった境界条件を、コンクリートの流動状況を確認しながら変更できる点にある。実施工で行われているこれらの条件変更を解析的に再現するための、ほぼ唯一の解決方法であると考えられる。また、結果がすぐに得られること、および解析負荷が少ないためにスマホやタブレット端末で解析可能であることなどから、これまで数値解析に馴染みのない実務者（現場管理者および現場作業員）にも普及が期待できることなどが挙げられる。ここで、上記の議論は3次元の精密な解析を否定するものではなく、2次元の簡易解析と3次元の精密解析を適切に使い分けることで、より現実的な施工設計が実現すると考えている。

本解析で用いる物理演算方法は、リアルタイム解析を実現するために大幅に簡略化された解析エンジン¹³⁾をフレッシュコンクリートの流動解析に適用したものである。フレッシュコンクリートの構成モデルは厳密なレオロジーモデルではなく、フレッシュコンクリートの状態を流動状態（粘性流体）、停止状態（剛体）、および振動下の流動化状態（完全流体）の三相と仮定し、流動状態と停止状態の判別は流動速度のみで行う簡易的なモデルを採用している。図-11¹⁴⁾に、iPadで実行中の解析画面の例を、図-12に

1400×700×100mmの壁型枠を用いた施工実験と解析結果の比較を示す。ここで、流動パラメータは事前に無筋型枠に対する施工実験結果に対する逆解析により決定した値を用いている。図によれば、流動の先端で解析結果が先行する傾向はみられるものの、全体の流動形状は実験結果を良く再現している。また、振動後の結果は、いずれの配筋条件も概ね良好な対応関係を示している。さらに、自重流動後には鉄筋周囲などにフレッシュコンクリートの未充填部が見られるが、振動締固めによりこれらの未充填部が密実に充填される様子も解析的に再現されており、欠陥の形成と振動による緻密化が再現できるなど、実務解析としての要件を十分に備えていると言える。

現場打ちコンクリート工事の生産性改善に対しては、ロボットによる機械化施工が1つの有力な回答となると思われるが、そこで不可欠となるのが材料の挙動予測、すなわち型枠内のフレッシュコンクリートの流動予測である。リアルタイム解析であれば実際の施工と同時に並行で解析を行い、そこで把握された流動状況に基づき筒先や振動機などの機器を移動させるような制御も可能となる。ただし、現在の研究段階はまだ基礎的な段階にあり、解析に用いる流動パラメータの整備が直近の課題となる。

6. おわりに

本稿では、筆者が最近行った4種類のデジタル技術に関する研究を概説した。ここで紹介した技術に共通して言えるのは、最新技術を用いることでこれまでは不可能であったことが実現しているだけでなく、公開されたプログラム等をうまく活用することにより短期間で安く開発を進めることができている点であると思われる。

いずれの技術もまだまだ改良の余地はあり、精度検証も今後の課題となる。ただし、必要な精度を適正に判断し、活用方法まで含めて検討することで早期の技術導入は可能であると考ええる。

例えば医療分野でのAIによる画像診断ではセカンドオピニオンとしての活用に限定して効果を上げている。建設分野においても同様な活用方法からスタートするのが現実的であり、また、使い始めることで次の課題も正確に認識できると考える。

【参考文献】

- 1) 三島直生、鹿毛忠継、山田義智、崎原康平：AIによる高流動コンクリートの材料分離判定システムの開発に関する基礎研究、第73回セメント技術大会講演要旨、論文番号1317、2019.5
- 2) Google, Cloud AutoML Vision β : <https://cloud.google.com/vision/automl/docs/> (閲覧日: 2019.2.11)
- 3) 三島直生、宮内博之、向井智久：デジタル画像相関法を用いた建築物の損傷検知システムの実用可能性に関する基礎実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、情報システム技術、pp.181-182、2019.9
- 4) 楠浩一ほか：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発 その1～28、日本建築学会大会学術講演梗概集、2003～2015
- 5) 山田哲也：地震時建物変位計測システムの防災上の活用方法に関する提案、地域安全学会論文集、No.29、pp.15-24、2016
- 6) <https://www.gom-correlate.com/> (閲覧日: 2019.8.30)
- 7) Mishima N.: Fundamental Study on Automatic Detection Method of Surface Defect of Structure by AR Hammering Test Application, The 3rd ACF Symposium 2019、2019.9
- 8) 三島直生、住田賢司、藤原聖史、中山研人：AR技術を活用した外装タイルおよびコンクリートの内部欠陥の打音検査システムの開発研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.40、No.1、pp.1767-1772、2018.6
- 9) <https://www.youtube.com/watch?v=SAqtr0mZENI> (閲覧日: 2019.8.30)
- 10) <https://developer.apple.com/augmented-reality/> (閲覧日: 2019.1.30)
- 11) 三島直生、山田義智、崎原康平、谷口遼：フレッシュコンクリートの壁型枠内流動に関する2次元リアルタイム解析手法の開発に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.39(1)、pp.1213-1218、2017.6
- 12) Naoki MISHIMA, Yoshitomo YAMADA, Kohei SAKIHARA and Ryo TANIGUCHI: Fundamental Study on Development of Two-Dimensional Real-Time Flow Simulation Method of Fresh Concrete in Wall Form, CIB World Building Congress 2019, Ab0099、2019.6
- 13) LiquidFun Programmer's guide, <http://google.github.io/liquidfun/Programmers-Guide/html/index.html> (閲覧日: 2016.1.15)
- 14) <https://www.youtube.com/watch?v=NLFFJf1c2mLE> (閲覧日: 2019.8.30)