論文 AR 技術を応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

三島 直生*1・住田 賢司*2・藤原 聖史*3・中山 研人*4

要旨:本研究では、剥離欠陥のある外装タイルの検査において、擦過音を時間周波数分析により可視化する ことで検査業務を効率化する手法の検討を進めてきた。しかし、時間周波数分析結果の画像と実構造物の間 の詳細な位置関係を特定する方法に関しては知見が無く、実用化に向けて解決すべき問題の1つとして残さ れていた。この問題に対して本報では、新たに AR (Augmented Reality・拡張現実)技術を導入することで、 時間周波数分析画像を効率的に実構造物と関連付けて表示させることが可能となり、欠陥を有する外装タイ ルおよびコンクリート試験体を用いた実験の結果からは、欠陥検出に対する本技術の有効性が示された。 キーワード:AR、拡張現実、打音検査、時間周波数分析、外装タイル、コンクリート、内部欠陥

1. はじめに

1.1 構造物の診断コストの低減の重要性

高度経済成長期以降に建設された建築・土木構造物の 経年劣化の進行と、将来的な人口減少および経済的な低 成長予測などを背景とする既存構造物の使用期間の延長 などにより、既存構造物の維持管理の重要性が益々増大 している。

構造物の維持管理において最も重要なことの1つは, 劣化や欠陥を早期に,かつ見落とすこと無く発見するこ とである。これは,劣化が進行する前に対処することで 補修・改修コストを圧縮できるだけでなく,劣化により 発生する事故等を未然に防ぐという重要な役割もある。

このような視点で劣化診断や健全度の評価をとらえ ると、検査の質のさらなる向上も重要ではあるが、検査 の頻度を上げることが、特に劣化の早期発見においては 成果に直結すると考えられる。

これまでにも,鉄筋コンクリート構造物の劣化および 欠陥の検査技術に関する研究は数多く行われてきており ¹⁾,想定される劣化現象に対しては,適切な検査方法の選 択により劣化の検出は可能となっていると考えられる。

しかし一方で,劣化診断や健全度の評価は構造物全体 が対象となり,この場合の調査費用は一般に高額となる。 また,その予算が確保できなければ検査の頻度は下がる ことになり,劣化や欠陥が放置される期間が長くなる。 既存構造物の中でも劣化の進行が問題となる,年代の比 較的古いものでは,建設時に充分な維持管理コストまで を見込んだ収支計画が立てられているものは多くは無く, 今後はこの維持管理コストの中でも,特に検査コストの 圧縮が,経済的にも住環境の安全確保の面でも重要な研 究テーマとなる。

1.2 本研究の目的

筆者らはこれまでに、剥離欠陥のある外装タイルを対 象として、低コストで全面打診ができる簡易検査方法の 開発を試みてきた²⁻³⁾。同手法では、外装タイル表面に鋼 球を押し付けた状態で滑らせた時の擦過音(外装タイル 表面に目地による凹凸があるため打撃音も含まれる)を 録音し、時間周波数分析(TFFT)により収録音を画像化す ることで、画像の特徴から欠陥の検出・評価を行った。

実験の結果からは、用意した試験体のほとんど全ての 条件で TFFT 画像による欠陥の検出が可能であった。ま た、1 度の測定で確実に記録が残り、測定結果の再現度 も高く繰返し測定の必要が無いため、大幅な測定時間の 短縮が可能であること、および通常の音のみによる主観 的な評価と比べて TFFT 画像では客観的な評価が可能で あることなど、多くのメリットがあることが示された。

しかし、TFFT 画像によって検出された欠陥位置が、実 構造物のどの位置に当たるかといった、詳細な位置関係 を特定する方法に関しては知見が無く、実用化に向けて 解決すべき問題の1つとして残されていた。

この問題に対して本報では,新たに AR (Augmented Reality・拡張現実)技術を導入することで,時間周波数 分析画像を効率的に実構造物と関連付けて表示させるシ ステムの開発を目的としている。また,対象とする試験 体をより一般的なものとするために,外装タイルの剥離 に加えて,鉄筋コンクリートにおけるかぶりコンクリー トの剥離を想定した試験体も検出対象とした実験的な検 討を行う。

1.3 本研究の位置づけ

本報で対象の中心とするのは、打音試験によって得ら れた TFFT 画像と実構造物の位置関係を特定する手法で

*1 三重大学大学院 工学研究科建築学専攻准教授 博士(工学) (正会員) *2 ジョーカーピース株式会社 代表取締役 *3 ジョーカーピース株式会社 システム開発部 *4 三重大学 工学部建築学科 学部学生

あり, 欠陥の判別方法および装置の移動方法に関しては 検討対象から除外する。

また, 1.1 節で述べた背景に基づき, 本研究では検査コ ストの低減および高効率化に主眼を置いた検討を進めて いる。本手法の適用レベルとしては、最終的な精密検査 の前段階の簡易検査(1次検査)レベルを想定している。 検査精度に関しては、本手法を容易かつ低コストとする ことができれば、実施頻度を高めるだけでなく、適用範 囲の拡大といった利点が期待でき、この点で補うことが できると考えている。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

(1) 外装タイル試験体

外装タイル試験体は, 既報 2-3)で用いたものと同じ形式 のものを用いた。欠陥の種類を表-1 に、試験体および 欠陥の位置を図-1に示す。

躯体コンクリートには、700×490×180(厚)mmの鉄 筋コンクリート壁体を使用した。欠陥に発泡スチロール およびビニルシートを使用した水準では、躯体コンクリ ートに所定の大きさの欠陥を張り付け、その上から 10mm 厚の下地モルタルを施工した後に、タイルを市販 の張付けモルタルで接着し、硬化した後に目地を施工し た。空洞の場合には、所定の欠陥サイズのくぼみを持つ 10mm 厚の硬化モルタル板を作製し、これを躯体コンク リートにセメントペーストで接着した。その後、表面に タイルおよび目地を施工した。ここで、外気との接続有 の水準は、空洞欠陥の側面が外気と接続している状態を 指す。また、タイルと張付けモルタルの間の剥離として、 タイル裏面のみに剥離剤を塗布して施工したもの、およ びタイルの裏面および目地境界に剥離剤を塗布して施工 したものの2種類を用いた。

タイルの種類としては,表面形状,釉薬の有無(表面 の滑らかさ)に注目し、3種類を選定した。表-2にタイ ルの種類を示す。タイル a は薄茶色で表面は平滑だが釉 薬を用いていないために表面のテクスチャはざらついた ものとなっている。タイルbは表面に凹凸のある薄灰色 のタイルであり、釉薬が施されているために表面には光 沢がある。タイル c は他のものと比べて少し大きく, 白 色で表面は平滑で光沢がある。

タイル外装試験体の作製時期は, No.1,2 は 2014 年 10 月(本報の試験時の材齢:3年3か月), それ以外は2016 年9月(本報の試験時の材齢:1年4か月)であり、作 製後は水平に寝かせた状態(タイル面が上面)で屋外暴 露とした。このため、温度変化、乾湿の変化およびセメ ントの水和の状況などにより、材齢の経過とともに音響 特性は変化しており, 既報の結果 2-3)と本報の結果では欠 陥の検出結果が異なるものがある。

(2) コンクリート試験体

作製したコンクリート試験体の概要を図-2 に、コン クリートの調合表を表-3 に示す。コンクリート試験体 は、200×120×1700(mm)の単筋梁とし、200×1700(mm) の面を表面として,表面からの深さ 20,40,60(mm)の位置 に欠陥として 150×150×5(mm)の発泡ポリスチレン板を 埋め込んだ。試験体の作製手順は,配筋された型枠内に, 図-2(a)下段の面を打込み面としてコンクリートを打ち 込んだ後に,所定の位置に発泡ポリスチレン板を挿入し てそのままコンクリートを硬化させた。配筋は梁の下端 筋のみとし、欠陥を埋め込んだ側(上端側)は無筋とし た。コンクリート試験体の作製は2016年11月(本報の 試験時の材齢:2か月)であり、材齢7日で脱型し、材

表-1 欠陥の種類

記号	材質	位置	寸法	外気と の接続				
А	発泡スチロール シート(1.2mm厚)		300×150					
В	ビニルシート (0.3mm 厚)	躯体コンク リートと下 地モルタル の間	(mm)	無				
С	空洞 (1.2mm 厚)							
D			150×150					
Е			(mm)	右				
F			100×100	ΥH.				
G			(mm)					
Н		タイル裏面	たえれ	4117-				
Ι	離型剤	タイル裏面, 目地境界	タイル 1枚分	***				

表-2 タイルの種類







齢2週まで散水およびシート養生とし、その後は屋外暴 露養生とした。材齢6週におけるコンクリートの圧縮強 度は27.0N/mm²であった。

2.2 測定機器の概要

(1) 打音検査用 AR アプリ

本実験では、計測に iPhone7 を使用する。これは、iPhone 用に新たに公開された AR 開発用プラットフォームであ る ARKit⁴を利用して開発するためであり、これにより、 開発期間の短縮および開発コストを大幅に抑えることが できるだけでなく、既に広く普及している iPhone (6S 以 降)が AR を用いた測定にそのまま利用できるため、導 入コストを抑えられるという利点もある。

図-3 および写真-1 に、本研究で開発した打音検査 用 AR アプリによる測定手順を示す。iPhone の AR 機能 により、測定した TFFT 画像を測定した位置に仮想的に 貼り付けて表示することができる。また、TFFT 画像は始 点と終点を結ぶ直線上の結果であり、少しずれた位置も 測定する場合には幅のある TFFT 画像が重なってしまう ため、本アプリでは1回の測定毎に TFFT 画像から欠陥 を判定し、欠陥位置にマーカ(コーン)を表示させ、TFFT 画像を消去した後に次の測定を繰り返す仕様とした。

TFFT 画像は,縦軸を周波数(0~12kHz),横軸を時間 (0~計測終了)とし,時間軸の幅を調整して計測位置(始 点と終点の間)に一致させて表示したものであり,各座 標における音圧レベルは 0dB(黒色)~120dB(白色)の

W/C	単位量(kg/m ³)				HAE/C
W/C	W	С	S	G	(%)
0.56	182	325	804	924	0.46
[注]₩:7	水. C:セメ	ント.S:	細骨材.(}: 粗骨材.	HAE/C :

セメントに対する高性能 AE 減水剤の質量添加率



図-3 打音検査用 AR アプリの測定手順



(a)測定開始直後

(b)測定終了時 (c) TFFT 画像の表示 (d) TFFT 画像の遠景(e) マーカの設置状況 写真-1 打音検査用 AR アプリの画面の例(屋内廊下での測定例)



範囲を段階的に色の変化として表示している。また,高 速フーリエ変換の条件は,サンプリング周波数:44100Hz, FFT サイズ:2048,時定数:125ms(Fast),フィルタ特性: z (Flat)である。現状のアプリでは,音の検出から高速フ ーリエ変換のタイムラグが 0.2s 程度発生しており,打診 装置の移動速度が速くなると AR 画像の位置の誤差が大 きくなる。

(2) 振動機付き打診装置

本実験で使用した打診装置の構成を写真-2 に示す。 本実験では、凹凸のある外装タイルだけでなく、表面が 平滑なコンクリート試験体も対象とするため、鋼球を押 し付けて滑らせる擦過音では欠陥を検出できない。また 後述するように、単発的な打撃の結果では、TFFT 画像か らの欠陥の検出が難しいため, 連続的な打撃が与えられ る手法が望ましい。このため、打診棒の先端に小型の振 動機(約 6000rpm, 偏心錘 5g, 電源 3V)を固定すること で、鋼球による連続的な打撃が加えられる打診装置を試 作して用いた。これにより、外装タイルの測定において も装置の移動速度を抑えた測定が可能となる。振動機付 き打診装置の質量は433g(iPhone 含まず)で、打音計測 時には、打診装置を試験体に押し付けるのではなく、持 ち手部分を軽く保持した状態で打診装置の自重のみで試 験体表面に接触させた。振動機作動前の静的な鋼球の接 地荷重をはかりで計測した結果は約2Nであった。

打音の測定には、小型のモノラル超指向性マイクロホン(周波数特性:70~15000Hz,正面感度:-34dB)を iPhone に接続して使用した。写真-3 に、タイル試験体表面付近で振動機のみ作動させた時の TFFT 画像を示す。

2.3 測定方法

測定は試験体を水平に寝かせた状態で,水平面に対し て行った。測定の様子を**写真-4**に示す。測定の進行方 向は論文に表示した TFFT 画像に対して右向きとした。

(1) 外装タイル試験体

図-1 に示したように、外装タイル試験体は幅方向に



写真-5 打撃方法による TFFT 画像の比較

4~5行のタイルが並んでいる。本実験では、全てのタイ ルを打診するために、供試体ごとにタイルの行数分の繰 返し測定を行った。各測定における TFFT 画像から欠陥 部の判定およびマーカの表示を行った後に、マーカのみ を残して次の行の TFFT 測定を行い、最終的に全ての行 の欠陥位置のマーカを重ね合わせた結果を得た。打診装 置の移動速度は約 5cm/s であった。

(2) 鉄筋コンクリート試験体

鉄筋コンクリート試験体は,表面中央を材軸方向に 1 回だけ測定し,欠陥位置の判定を行った。打診装置の移 動速度は約7cm/s であった。

3. 実験結果とその考察

3.1 外装タイル試験体

(1) 単発打撃と連続打撃の比較

写真-5に、市販の打診棒を用いて No.1 試験体の下から3行目のタイルを1回/1 枚で打撃(単発打撃)した時の測定結果と、振動機付き打診装置で連続して打撃した時の測定結果の比較を示す。画像はいずれも試験体表面に AR 機能で貼られた TFFT 画像をスクリーンショットで撮影した結果で示す。



(a) TFFT 画像の一覧
(d) 測定終了後のマーカ(欠陥検出部)
写真-6 試験体 No.1の測定結果の例

全体的な背景色の違いは、写真-3 に示した振動機の 音の有無による。単発/連続の何れも試験時に欠陥部の 音の違いは認識できたが,写真-5(a)の単発打撃のTFFT 画像では、欠陥部分の判別は非常に難しい。これは、単 発打撃では音の検出される時間が短く、打音が幅の狭い 線として表示されてしまうためである。また、打撃位置 の間のデータも得られないため, 連続打撃と比べると大 幅なデータの欠損が生じていることになる。写真-5(b) の連続打撃の結果からは、振動機の音の下でも欠陥位置 に高周波数領域に至る音圧レベルの高い領域が視認でき, 前後の健全部との違いも明らかである。本報では、この 健全部と異なるパターンが検出された領域を欠陥の存在 範囲と判断し、その領域にマーカを配置した。また、AR により実試験体の位置に対応させて貼り付けられた TFFT 画像であるため、実際の欠陥位置の特定も非常に 容易となる。ただし、測定位置は TFFT 画像の両脇に黒 丸で示された計測の始点と終点を結んだ直線上であり, 本測定結果が面測定ではなく線測定の結果であることに

注意が必要である。

(2) 各試験体の測定結果

写真-6に,試験体 No.1 の測定結果の例を示す。**写真** -6(a)にはタイルの各行で測定された TFFT 画像を示す。 測定順は同図の下段から上段の順であり,TFFT 画像の 測定後に欠陥と判断された位置にマーカを配置した後に 写真を撮影している。その後,マーカを残したまま次の 測定を行っているため,それ以前の測定結果のマーカは 表示されたままになっている。

写真-7 欠陥の検出結果(No. 2-5)

本開発アプリ上で表示される TFFT 画像およびマーカ は、AR により実画像(試験体)に固定されているため、 写真-6(b),(d)に示すように、カメラの角度や位置を変 えることで自由な角度から視認することができる。

写真-6(c)および写真-7に、本アプリで検出された 欠陥位置(緑色の円錐型のマーカ)を示す。また、同写 真中には、図-1に示した試験体作製時の欠陥の設置位 置も赤色の領域で示す。これらの結果からは、試験体 No.1,2,3のタイル剥離(欠陥記号:H,I)が検出されてい ないが,これは試験体作製後のセメントの水和の進行等 により付着または空隙の充填状況が改善され,検出され なかった可能性が考えられる。また,試験体 No.2 のビニ ルシートの欠陥(欠陥記号:B)は,既報²⁾においては検 出されていなかったが,本実験では部分的に欠陥が検出 されている。これは,試験体作製後の経年劣化により下 地モルタルの浮きが発生した可能性が考えられる。他の 欠陥については,概ね良好な検出精度が得られていると 言えるが,全体的に欠陥位置が写真の右側にずれる傾向 がある。これは,前述した高速フーリエ変換時のタイム ラグに起因するものと考えられ,今後の対策が課題とな る。

3.2 コンクリート試験体

写真-8 に、コンクリート試験体の測定結果の例を示 す。欠陥の深さが 20mm および 40mm では TFFT 画像に よる欠陥の検出が可能であるが、深さ 60mm では欠陥は 検出されなかった。また、TFFT 画像に基づき設置したマ ーカの位置との比較からは、先述の外装タイル試験体と 同様に、マーカの位置が写真の右方向にずれる傾向が見 られた。

4. まとめ

本報では,新たに打音検査用 AR アプリを開発し,外 装タイルおよびコンクリートの欠陥検出に対する適用性 の検証を行った。得られた知見を以下に示す。

- 開発した打音検査用 AR アプリは、外装タイルおよび コンクリートの欠陥検出に適用可能であり、TFFT 画 像を AR 技術により試験体表面に貼り付けることで、 診断の大幅な効率化が可能となる。
- TFFT 画像による欠陥の検出には、本研究で試作した 振動機付き打診装置などにより連続的な打撃を与え る必要がある。
- 現状のアプリでは高速フーリエ変換時のタイムラグ により欠陥の検出位置が測定方向の後方にずれる誤 差が発生する。

5. おわりに

本報では要因としなかったが,打撃の強さ等により TFFT 画像は変化すると考えられ,振動機付き打診装置 の仕様については今後さらに検討を進める必要がある。

本開発アプリの現在の仕様では、欠陥位置は TFFT 画 像から人間が判断してマーカを設置する方式をとってい るため、欠陥の存在範囲の判断基準となる周波数や音圧 レベルの閾値は曖昧である。今後はこの判断に AI など の導入も検討されるが、現在の仕様においても既に、欠



(a) TFFT 画像およびマーカ



(b)マーカのみ(試験体側面に欠陥位置を加筆) 写真-8 コンクリート試験体の測定結果

陥のおおよその位置を簡易に診断するという本研究の目 的においては,充分にその要件を満たしていると言える。 また,構造物の欠陥や劣化に対しては,使用材料や環境 要因などの状況が多岐にわたり,かつ想定外の状況が発 生し得る事象においては,それらの状況を全て機械学習 用のデータとして取り込むには多大な労力と時間を要す るため,現時点では AI による判定を参考としつつも,最 終的には人間が状況等を加味して判定するシステムを残 しておく必要があると考える。その意味では,本報で示 した AR による実構造物とリンクした打音の画像化手法 は,人間が必要な情報を容易に認識する手段として極め て有効かつ実用的な手法と言える。

参考文献

- 谷川恭雄(監修):コンクリート構造物の非破壊検 査・診断方法,セメントジャーナル社,2004.9
- 2) 三島直生,畑中重光,寺島貴根,中島圭二:擦過音 および表面温度計測による外装タイルの簡易な剥 離検知手法に関する基礎的研究,コンクリート工学 年次論文集, Vol.38, No.1, pp.2091-2096, 2016.7
- 3) 三島直生:タイル外装の擦過音および表面温度に及 ぼす欠陥種類の影響に関する基礎的研究,日本建築 学会大会学術講演梗概集(中国),pp.577-578,2017.8
- 4) https://developer.apple.com/arkit/ (閲覧日:2018.1.9)