

論文 ひび割れ画像と均質化法を用いた ASR に起因した材料劣化推定に関する基礎研究

富山 潤*1・古田 泰祐*2・須田 裕哉*3・堀口 賢一*4

要旨：近年、インフラ構造物の点検に対して、UAV(Unmanned aerial vehicle)やロボットを用いた点検技術が試行されている。特に、UAV を用いた点検は、近接目視点検が困難な離島架橋や橋梁の狭隘部など、点検者のアクセスが困難なコンクリート構造物のひび割れ点検に適している。UAV 点検の結果、ひび割れが多く、変状が顕著である場合には、構造物からコンクリートコアを採取し、ひび割れの原因を診断し、材料劣化（強度、弾性係数の低下）を把握することになる。しかし、コア採取の困難な場合も多いため、本研究は、撮影されたコンクリート表面のひび割れ画像と均質化理論を利用した材料劣化推定法に関する基礎的検討を行った。

キーワード：アルカリシリカ反応，材料劣化推定，デジタル画像解析，均質化法

1. はじめに

近年、インフラ構造物の点検に対して、UAV(Unmanned aerial vehicle)やロボットを用いた点検技術が試行されている。特に、UAV を用いた点検は、近接目視点検が困難な離島架橋や橋梁の狭隘部など点検者のアクセスが困難なコンクリート構造物のひび割れ点検に適している。UAV 点検の結果、ひび割れが多く、変状が顕著である場合には、構造物からコンクリートコアを採取し、ひび割れの原因を診断し、材料劣化（強度、弾性係数の低下）を把握することになる。しかし、コンクリートコア採取の困難な場合も多いため、UAV などで撮影したコンクリート表面のひび割れ画像から材料劣化を推定する技術は有力であると考えられる。そこで本研究では、コンクリート表面の平面的なひび割れ情報を入力データとした均質化法²⁾により、コンクリート劣化部の弾性係数が推定可能か検討を行う。

本研究では、コンクリート表面のひび割れ画像を解析する技術として、戦略的イノベーション創造プログラム(Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program：以下、SIP と称す)の課題のひとつである「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(以下、SIP インフラと称す)³⁾で開発された技術(「画像解析技術を用いた遠方からの床版ひび割れ定量評価システムの構築」、以下、ひび割れ画像解析と称す)⁴⁾を採用した。

本論文では、最初にひび割れ画像解析技術の概要と精度評価について示し、次に、その結果を入力データとした材料劣化推定法の検討結果を示す。劣化現象はアルカリシリカ反応(ASR)を対象とし、材料劣化推定では、均質化法²⁾の均質化過程で用いる微視構造(マイクロ構造)の

ユニットセルに、ひび割れ画像解析の結果を採用し、健全部とひび割れ部の非均質性を考慮した均質化弾性係数を求めることで材料劣化を評価した。ASR を対象に平面的なひび割れ情報と均質化法を用いて材料劣化推定を試みる理由は、ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に対する数値解析的検討⁵⁾において、仮想的なひび割れ分布を入力データとした均質化法から得られる均質化弾性係数により健全状態からの弾性係数の低減率を評価し、良好な結果を得ているためである。

2. ひび割れ画像解析

2.1 ひび割れ画像解析技術概要

本技術は、デジタル画像データにガボールフィルタに基づいたウェーブレット変換を適用し、画像データの濃淡情報に関するウェーブレット係数を求めてひび割れ判定を行い、ひび割れを検出するものである⁴⁾。

ひび割れ画像解析の手順を図-1 と併せて以下に示す。

- 1) デジタルカメラにて、調査対象を撮影する。
- 2) 撮影画像をあおり補正、画像合成などの前処理し入力画像を作成する。
- 3) 入力画像のひび割れ解析範囲を指定し、ウェーブレット変換する。
- 4-1~2) ひび割れ画像およびひび割れ幅毎のひび割れ長さ分布図を出力する。

本手法は、コンクリートの汚れや色の濃淡によるばらつきの影響を低減し、また、空間分解能の 1/4 以上のひび割れ(例えば、空間分解能 0.8mm/pixel の画像の場合は幅 0.2mm 以上のひび割れ)を検出できる特徴を持つ。また、ひび割れ画像解析により得られるひび割れ密度、

*1 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース 准教授 (正会員)

*2 琉球大学 理工学研究科博士前期課程 環境建設工学専攻 (学生)

*3 琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース 助教 (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター 社会基盤技術部 材工研究室 先端施工チーム 主任研究員 (正会員)

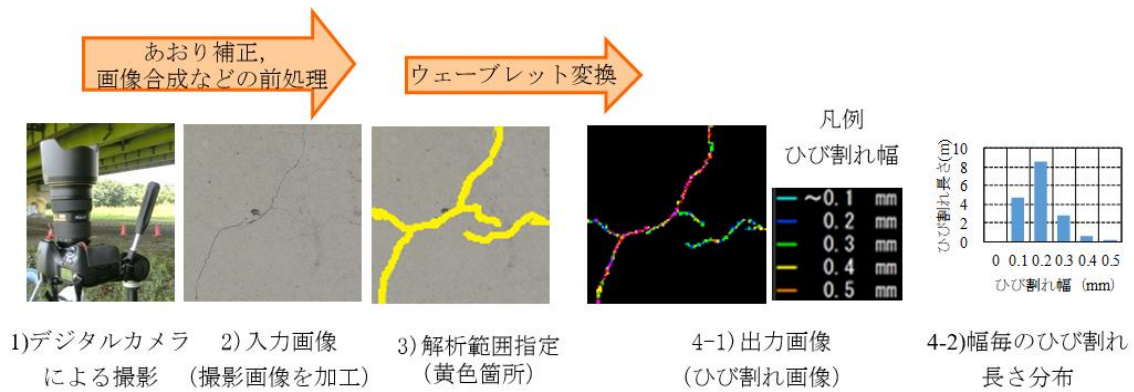


図-1 ひび割れ画像解析の解析手順

平均ひび割れ幅およびひび割れ幅毎のひび割れ長さ分布といった定量データにより、詳細なコンクリート構造物の補修、補強計画を立案することが可能である。

2.2 精度検証

ここでは、ひび割れ画像解析技術の解析精度として、ひび割れ幅について調査を行った結果を示す。ひび割れ解析対象は、琉球大学暴露試験場にある暴露試験体である。暴露試験体表面には、亀甲状のひび割れが多数生じている。図-2 に試験体およびひび割れ解析結果(ひび割れのマッピング)を示す。精度評価のため、図-2(b)に示した 10 カ所のひび割れ幅に対して、クラックスケールによる測定結果とひび割れ解析結果の比較を行った。

図-3 に実測値と解析値の比較を示す。この結果から、実測値と解析値は、おおむね良好に一致している。このことから、本技術によるひび割れ幅の検出精度は非常に高いことが確認できる。

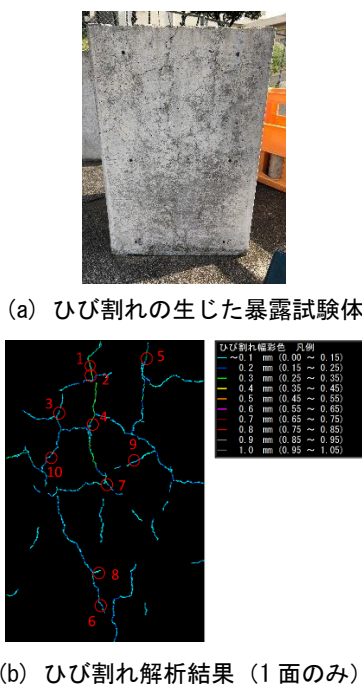


図-2 精度検証に用いた試験体および解析結果

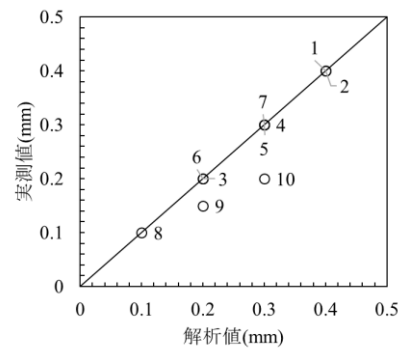


図-3 ひび割れ幅の精度検証

3. デジタル画像解析と均質化法による材料劣化推定

3.1 均質化法概要

均質化法²⁾は図-4(a)に示すような周期性を持った非均質なマイクロ構造からなる構造物を、それと等価な均質な構造物として数学的に置き換えることで、マイクロ構造を考慮したマクロ構造の解析を行うことができる。この周期的なマイクロ構造をユニットセルと呼ぶ(図-4(b)参照)。ここで、図中の x は巨視的な座標系を、 y は微視的な座標系を表し、二つのスケールは、パラメータ ϵ を使って、 $y = x/\epsilon$ によって関連付けられる。

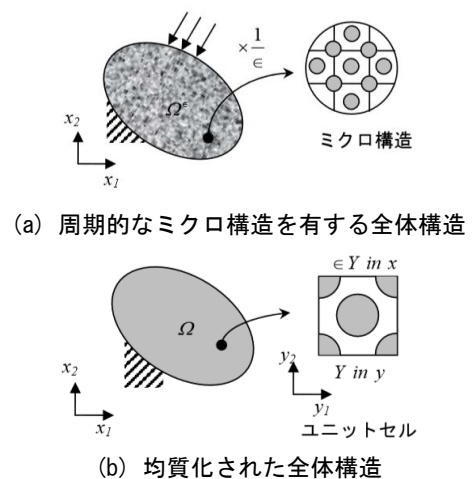


図-4 均質化法概念図

3.2 ひび割れデジタル画像解析とユニットセル

ひび割れ画像解析では、ひび割れ幅、分布および長さが定量的に得られる。また、図-2(b)に示したようにひび割れの分布として、ひび割れ幅ごとに色別されデジタル画像を得ることができる。得られた画像のピクセルには、座標値とひび割れ幅としての色情報がある。

本研究では、ユニットセルの1要素（四角形要素）を1ピクセル（画素）としているため、デジタル画像との相性がよい。

実際の解析では、図-5に示すようにひび割れ画像解析から得られた画像の一部を切り取り、それをユニットセルとして計算している。その際、非均質性として健全部とひび割れ部が存在するが、その不均質性を数値解析で考慮するために、健全部とひび割れ部の要素に与える弾性係数を変えている。さらにひび割れ幅ごとに与える弾性係数を変えることも可能である。均質化弾性係数は、式(1)に示す均質化弾性行列 D^H から求めることができる。

$$D^H = \langle D(I - BX) \rangle \quad (1)$$

ここで、 D は、材料ごとの弾性行列、 I は単位行列、 BX は、特性変位 X から求まるマクロひずみである。また、解析は2次元であり、平面ひずみ問題として計算した。

ひび割れが生じるすべての劣化現象に対して、表面のひび割れ発生状況からコンクリートの弾性係数を推定することが困難であると考えられる。しかし、ひび割れ密度と弾性係数の関係^{5,6)}が確認されているASR劣化については、表面ひび割れの状況から弾性係数の推定が可能であると考えられる。

本研究は、ASR劣化に起因した表面ひび割れから弾性係数の推定が可能かの基礎的検討を行うため、無筋コンクリートを対象とする。なお、鉄筋コンクリートなどへの適用については、今後の課題とする。

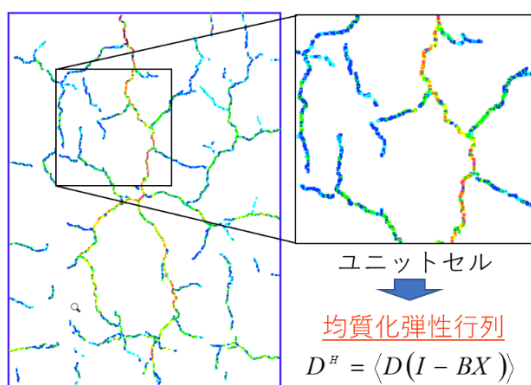


図-5 ユニットセルの作成概念図

3.3 ひび割れパターンと均質化弾性係数

ここでは、本手法の感度を確認するため、仮想的に作成したひび割れに対して、ひび割れ密度とひび割れ部の

弾性係数をパラメータに均質化弾性係数に関する数値実験を行なった。

(1) ひび割れ方向が卓越する場合（水平方向）

図-6(a)に示す 50×50 分割したユニットセルに水平ひび割れが卓越する場合を考え、ひび割れ率（ここでは、ひび割れ要素数を全体要素数(2500)で除した値と定義）を、3.68%(#1)、7.36%(#2)、11.04%(#3)の3水準の模擬ひび割れユニットセルを仮定した。また、ひび割れ部の弾性係数として、健全部の弾性係数 $E_c(33,000\text{N/m}^2)$ を基準に表-1に示す6水準を設定した。結果は、水平方向の均質化弾性係数 E_{y1} および鉛直方向の均質化弾性係数 E_{y2} の低下の程度や2方向の関係について整理した。なお、ひび割れ部の弾性係数の影響を検討するため、ポアソン比はゼロを用いた。

図-7に解析結果を示す。当然であるが、ひび割れ部の弾性係数を低下させるごとに均質化弾性係数の値が低下し、弾性係数がゼロとした場合の均質化弾性係数に収束している。また、その残存率(均質化弾性係数/ E_c と定義)はひび割れ方向に依存し、ひび割れ方向と直交方向の均質化弾性係数の残存率は、ひび割れ率が大きくなるほど、小さく、かつ、急激に低下していることがわかる。

引張に弱いコンクリートに対して、ひび割れが、ある方向に卓越する場合、それと直交する方向の剛性は、ひび割れ幅が大きくなるにつれ低下していくが、ひび割れ幅の影響をひび割れ部の弾性係数で表現した本手法により、このような現象を表現できる可能性が示された。

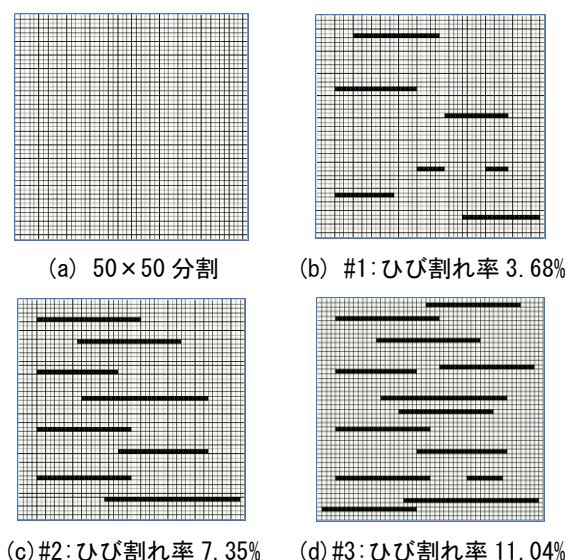


図-6 模擬ひび割れユニットセル (50×50)

表-1 解析ケース

	1	2	3	4	5	6
弾性係数	E_c	$E_c/10$	$E_c/100$	$E_c/1000$	$E_c/10000$	0

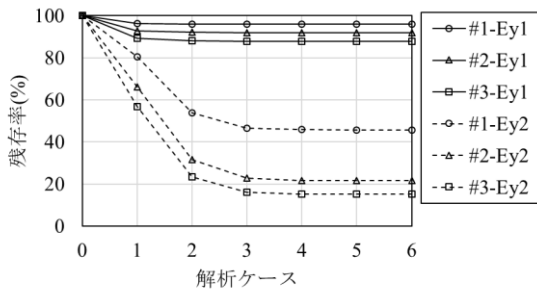


図-7 弾性係数の残存率

(2) ひび割れ方向が卓越する場合 (斜め 45° 方向)

つぎに、図-8 に示す斜めひび割れ(45°)のユニットセルについて、表-1 に示す解析ケースを検討する。ひび割れ密度は、(1)の最も大きい#3 と同じ 11.04%とした。

図-9 に結果を示す。45° の斜めひび割れに対して、Ey1 および Ey2 は、ひび割れ部の弾性係数の低下に対して、同程度の残存率であり、低下の割合も 13%程度に留まっており、水平ひび割れの場合と大きく異なる。

ASR 劣化した構造物の弾性係数を調査する場合、コンクリートコアを採取する方向で、得られる値が異なることが知られているが、以上の数値実験から、ひび割れ方向に応じて均質化弾性係数の値が異なることから、本解析結果は、妥当な結果であると考えられる。

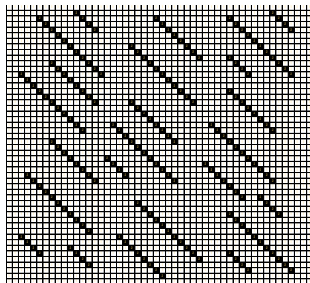


図-8 斜めひび割れユニットセル

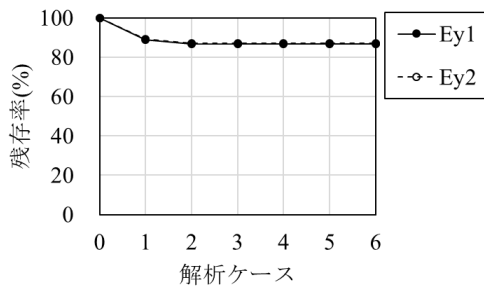


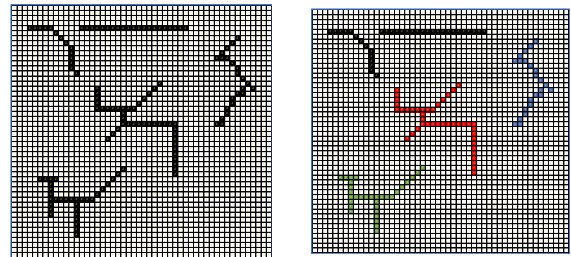
図-9 弾性係数の残存率

(3) ひび割れ幅を考慮した弾性係数の設定

本手法ではひび割れ幅に応じたひび割れ部の弾性係数の設定が可能である。ここでは、図-10 に示すひび割れ分布に対して、ひび割れ幅が同じ場合の#1 (図-10(a))

と同じひび割れ分布で 4 水準のひび割れ幅を設定 (青, 緑, 赤, 黒の順にひび割れ幅が大きいくとする) した場合の#2 (図-10(b)) を仮定し、それぞれの弾性係数として、表-2 の値を設定した。

図-11 に表-1 の条件で求めた#1 の均質化弾性係数とひび割れ幅ごとに表-2 の弾性係数で求めた#2 の均質化弾性係数を示す。この結果から本手法ではひび割れ幅の影響も間接的に考慮可能であると考えられる。



(a) ひび割れ幅一定 (b) 4 水準のひび割れ幅

図-10 ひび割れ幅を考慮した均質化弾性係数

表-2 解析ケース(ひび割れごとの弾性係数)

	白	青	緑	赤	黒
弾性係数	E_c	$E_c/10$	$E_c/100$	$E_c/1000$	$E_c/10000$

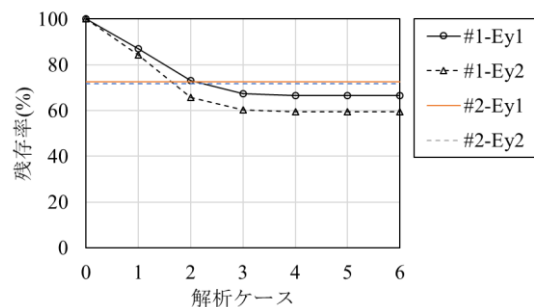


図-11 弾性係数の残存率

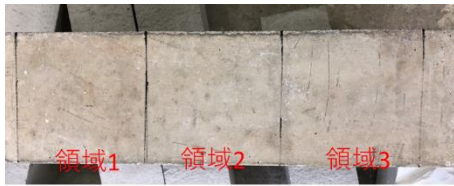
4. ASR 試験体を用いた検証

4.1 試験体概要

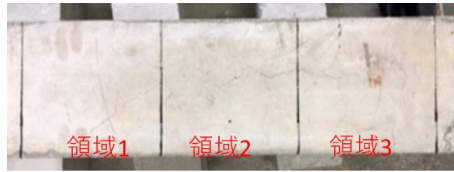
本手法の実現象への適用性を検討するため、同配合 (W/C=50%) で、ひび割れが生じていないコンクリート試験体 (15×15×53cm) (以下、A 試験体) とひび割れが生じているコンクリート試験体 (15×15×53cm) (以下、B 試験体) を用い、弾性係数の推定を行なった。図-12 に示した試験体は、ASR 膨張を反応性骨材ごとに評価するため同日に作製し、約 3 年間屋外暴露したものである。

A 試験体は、遅延膨張性骨材 (粗骨材) が使用され、未だひび割れは生じていない外観上健全な状態である。それに対して B 試験体は、急速膨張性骨材 (粗骨材) が使用され図のように亀甲状のひび割れが全域に生じてい

る。したがって、A 試験体は健全な状態の弾性係数が得られ、B 試験体は ASR に起因したひび割れの影響を受けた弾性係数が得られることになる。



(a) A 試験体 (ひび割れなし)



(b) B 試験体 (ひび割れあり: 図-14 参照)

図-12 ひび割れなし・ひび割れあり試験体

4.2 弾性波速度を用いた弾性係数推定

平面的な情報を用いた本手法による均質化弾性係数と内部の状況から得られる弾性係数の関連を考察するために、弾性波速度を用いて試験体の弾性係数を算出した。

(1) 理論概要

弾性体を伝わる波は、式(2)の波動方程式⁷⁾から、体積変形成分およびせん断弾性成分の伝達速度を導出すると、それぞれ式(3)、式(4)の伝搬速度が得られる。式(3)は P 波（縦波）の伝搬速度(V_p)、式(4)は S 波（横波）の伝搬速度(V_s)である。本研究では、式(3)の P 波の伝搬速度(V_p)を変形して得られる式(5)を用いて弾性係数を求めた。

$$\frac{E}{2(1+\nu)(1-\nu)} u_{j,ji}(x,t) + \frac{E}{2(1+\nu)} u_{j,ji}(x,t) = \rho \frac{\partial^2 u_i(x,t)}{\partial t^2} \quad (2)$$

ここで、E は弾性係数、 ρ は密度、 ν はポアソン比、 t は時間、 x は空間、 i および j は方向、 $u(x,t)$ は、変位である。

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (3)$$

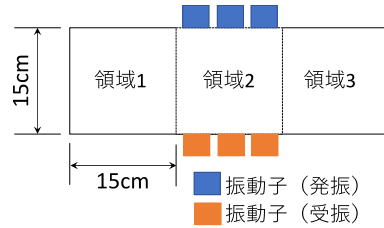
$$V_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (4)$$

$$E = \frac{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu} (V_p)^2 \quad (5)$$

(2) 測定方法および結果

試験体は、図-13(a)に示すように 15×15×15cm の 3 つの領域に分け、領域ごとに 3 箇所、1 箇所 2 回ずつ、マルイ製ウルトラソニックテスター（測定法: 二深触子法、時間測定範: 0.1~9999 μ sec, 読み取り精度: $\pm 0.1 \mu$ sec) を用い伝搬速度を測定し弾性係数を算出し、それらを平均した値を各領域の弾性係数とした。図-13(b)に伝搬速度の測定の様子を示す。

表-3 に伝搬速度から求めた弾性係数を示す。ただし、ポアソン比は、数値実験と併せて 0.0 とした。表中に示した残存率は、B 試験体の各領域の弾性係数を A 供試体の 3 領域の平均値で除した値である。この結果から、B 試験体は、76~88%程度まで弾性係数が低下している可能性があることがわかる。なお、得られた弾性係数は、W/C から予想される弾性係数より大きな値を示しているが、劣化の程度の割合としては、正しいものと判断し、以降に示す解析結果との比較対象とした。



(a) 伝搬速度測定位置



(b) 測定の様子

図-13 伝搬速度測定

表-3 伝搬速度から求めた弾性係数 (N/mm²)

	A 試験体	B 試験体	残存率(%)
領域 1	51345	41152	83.10
領域 2	47606	37903	76.54
領域 3	49607	44028	88.91

4.3 均質化法による弾性係数推定

(1) 計算領域 (ユニットセル)

図-14 にひび割れ画像解析結果を示す。なお、入力画像の分解能は、0.02mm/pixel である。この 3 領域のひび割れ画像解析結果をユニットセルとして、それぞれの均質化弾性係数を求める。しかし、解析結果の画像の解像度は、2500×2500 であり、計算負荷が大きいため、今回の解析には、350×350 まで解像度を下げた画像をユニットセルとした。なお、解像度を下げることによって、主要なひび割れが抜け落ちていないことを確認している。また、本手法は解像度に応じてひび割れ部の弾性係数を設定する必要がある。図-15 に解析に用いた画像を示す。また、ひび割れ幅のほとんどが 0.1mm 以下という結果であったため、今回はひび割れを一種類の弾性係数で表現した。

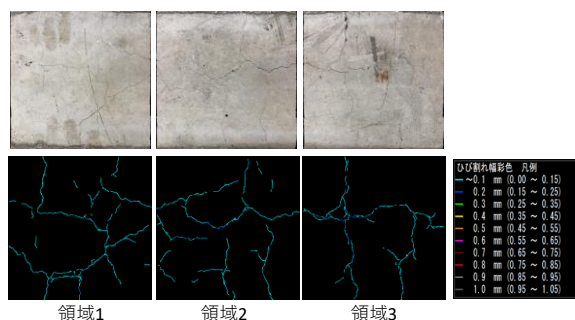


図-14 ひび割れ画像解析結果

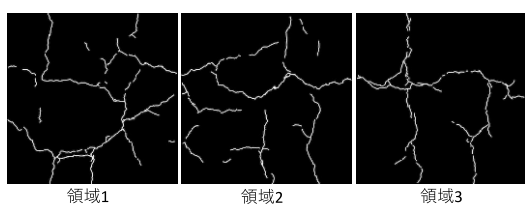


図-15 ユニットセルに用いたひび割れ画像

(2) 計算結果および考察

ひび割れ部の弾性係数が本解析の重要なパラメータとなる。また、このパラメータは、内部のひび割れ発生状況やひび割れ幅に対して影響を受ける。さらに解析処理として入力データであるユニットセルの解像度にも影響を受けるが、今回は、前述したように、ユニットセルのサイズは、350×350 (約 0.42mm/pixel) を用いた。また、ひび割れ部の弾性係数は、健全部 E_c を 3 領域の平均 (49,520N/mm²) とし、予備解析の結果、ひび割れ部の弾性係数として、 $E_c/30$ を採用した。これは領域 1 の残存率が測定値と概ね一致するように設定し、他の 2 領域の測定値と解析値の残存率の整合性を確認するためである。

表-4 にひび割れ画像解析から得られた「ひび割れ総延長(m)」、「平均ひび割れ幅(mm)」、「ひび割れ密度(m/m²)」および測定した弾性係数(N/mm²)と併せて、本手法から得られた均質化弾性係数(N/mm²)と測定および解析の弾性係数の残存率(%)を示す。この結果から、領域 3 は領域 1 を基準として求めたひび割れ部の弾性係数を用いて測定値を推定できているといえる。しかし、領域 2 は測定よりも高くなっている。この原因は、ひび割れの発生状況として、領域 2 は領域 1 に比べ、0.2mm 以上のひび割れの割合が多く、平均ひび割れ幅も大きい。解析ではひび割れ幅を同じと仮定をしているためだと考えられる。従って、ひび割れ幅の影響については今後の課題であるが、本解析は概ね良好な結果を得たと考える。なお、パラメータとなる実構造物の健全部の弾性係数は、設計値を用いるか、あるいはコア採取が容易でかつ健全な箇所からコアを採取することで求めることができる。

表-4 解析結果

項目	領域 1	領域 2	領域 3
ひび割れ総延長(m)	0.87	0.81	0.7
平均ひび割れ幅(mm)	0.08	0.09	0.09
ひび割れ密度(m/m ²)	38.71	36.2	31.18
測定弾性係数(N/mm ²)	41152	37903	44028
均質化弾性係数(N/mm ²)	41907	42914	44504
測定：残存率(%)	83.10	76.54	88.91
解析：残存率(%)	84.63	86.66	89.87

5. 最後に

本研究で得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) ひび割れ画像解析技術の結果と均質化法を組み合わせた本手法により、ASR に起因したコンクリートの材料劣化 (弾性係数の低下) 推定の可能性が示された。
- (2) 今後は、ひび割れ部のひび割れ幅に応じた弾性係数の決定法、ポアソン比の影響および計算速度の向上、検証対象を増やすことが課題として挙げられる。

謝辞：本研究は SIP および沖縄しまたて協会「技術開発支援」の補助の一環で行なった。琉球大学 藍檀オメル教授に多くのご助言を頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 蓮池里菜, 木下幸治, 羽田野英明, 六郷恵哲: 長大コンクリート橋におけるロボット技術を取り入れた橋梁点検の試み, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1345-1350, 2018
- 2) 寺田賢二郎, 菊池昇: 計算力学レクチャーシリーズ 1 均質化法入門, 丸善, 2003.
- 3) JST: SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術, HP(<http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>)
- 4) 小山哲, 丸屋剛, 堀口賢一, 澤健男: ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発, 土木学会論文集 E2, Vol.68, No.3, pp.178-194, 2012.
- 5) 金城和久, 富山潤, 金田一男, 車谷麻央: ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.970-975, 2012.
- 6) 廣井幸夫, 山本貴士, 戸田圭彦, 高木祐介: ASR 劣化した PC 梁構造におけるひび割れ密度, 採取コアの力学特性を用いた曲げ耐荷評価に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.73, No.3, pp.191-206, 2017.
- 7) 鎌田敏郎, 内田慎哉: コンクリートの非破壊試験の理論と実際, 1 弾性波法 (超音波法・衝撃弾性波法) の理論と実際, コンクリート工学, Vol.51, No.4, pp.340-347, 2013.4