

論文 X線CT画像を用いたコンクリート内部のひび割れ特性評価

山岸 俊太郎^{*1}・鈴木 哲也^{*2}・森井 俊広^{*3}

要旨：既設構造物の維持管理には、構造材料に内在するひび割れ損傷の可視化および定量的評価が不可欠である。本論では、ひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアにX線CT計測を適用し、空隙構造の形状と空間的分布の両観点からひび割れ特性について検討する。解析的検討では、コンクリート・コア断面の2値化画像からひび割れの空隙外周長を抽出し、空間的分布を区画法における集中度指数から評価した。検討の結果、ひび割れ損傷の顕在化したコンクリート・コアでは、空隙外周長の増大と集中度指数の低下が確認された。

キーワード：コンクリート, X線CT法, 2値化画像, ひび割れ損傷

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の長寿命化対策が技術的課題として着目されている。これに伴い、コンクリート材料の破壊挙動に基づく損傷度の定量的評価が重要視されている。コンクリート損傷の精緻な検討には、破壊挙動特性とともに、材料に内在するひび割れ・空隙構造の可視化および定量的評価が不可欠である。

X線CT法はひび割れ・空隙の可視化に適用されている。池田ら¹⁾や橋本ら²⁾の報告では、X線CT法による3次元立体画像からコンクリート内部の空隙構造や空間特性の可視化および定量化が試みられ、その適用性が確認されている。X線CT法は、材料内部の空隙やひび割れ損傷を可視化するとともに、X線吸収率をCT値として抽出することができる。CT値を用いることにより材料の密度分布の定量的評価が可能である。天明らの実験的検討では、コンクリートの材料構成³⁾や硬化コンクリートの特性⁴⁾とX線CT画像との比較検証が試みられ、その有効性が確認されている。筆者らは、X線CT法を用いて損傷を受けたコンクリート材料内部のひび割れを含む空隙構造の可視化および定量的評価について検討している^{5) 6)}。一連の研究成果から、ひび割れ損傷の進行したコンクリートの断面構造の詳細評価には、ひび割れや空隙の形状とともに、その空間的分布特性を定量的に評価することが不可欠であると推察される。

本論では、凍害損傷の進行したコンクリート・コアを対象に、2値化処理を施したX線CT画像からひび割れ損傷の特性評価について検討した結果を述べる。解析的検討では、コンクリート・コア断面の2値化画像からひび割れ・空隙の面積、長径および空隙外周長を抽出し、各パラメータの分布特性を評価した。ひび割れ・空隙の空間的分布特性は、区画法における集中度指数を用いて

評価した。コンクリート・コア断面における空隙構造の形状と空間的な分布特性の両観点からひび割れ損傷の特性評価について検討する。

2. 解析手法

2.1 X線CT計測によるコンクリートの空隙構造の可視化

コンクリート・コア内部のひび割れ損傷は、X線CT法により可視化した。X線CT法とは、X線を評価対象に透過し信号に変換することによって、可視画像化し評価を行う手法である。物体の密度の違いからX線吸収率の異なることを利用して、X線吸収率の単位は一般的に水を0、空気を-1,000としたHU (Hounsfield Unit) として定義されている。これらの透過率をCT値と呼び、CT値の定義は式(1)により評価される。

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (1)$$

ここで、 μ_t ：求める点のX線吸収係数、 μ_w ：水のX線吸収係数、 K ：人体や骨材などを撮影する場合である通常値の1,000に設定した。計測条件を表-1に示す。

本計測では、写真-1に示すX線CTスキャナを用いてコンクリート・コア断面の可視画像を取得した。X線CT画像の解像度は512×512 pixelであり、検討に用いたコンクリート・コアの直径はφ104 mmである。このため、各ピクセルの一辺の長さは0.2 mmとなる。以上のことから、X線CT画像の各ピクセルのCT値は、スライス厚(0.5 mm)を考慮した0.2×0.2×0.5 mmのボクセルにより与えられる。

図-1はX線CT計測により取得したコンクリート・コア断面のX線CT画像とひび割れ・空隙を対象とした2値化画像である。2値化画像では、粗骨材およびモルタルを黒色、ひび割れと空隙を白色に表示した。X線CT

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 新潟大学 自然科学系(農学部)准教授 博士(工学) (正会員)

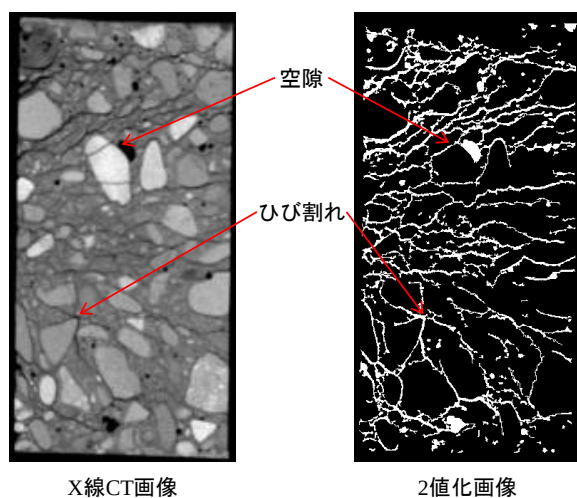
*3 新潟大学 自然科学系(農学部)教授 博士(農学) (非会員)

表-1 計測条件

ヘリカルピッチ	15.0
スライス厚	0.5 mm
速度	7.5 mm/rotation
照射線量	120kW and 210 mA
再構成マトリックス	512×512 pixel
有効視野	100-200mm

表-2 2 値化画像のしきい値

No.	サンプルタイプ	しきい値
1	Type A	92
2		98
3		99
4		40
5	Type B	92
6	Type C	74
7		65
8		75



X線CT画像

2値化画像

図-1 X 線 CT 画像とひび割れ空隙を対象とした 2 値化画像

計測では、1 本のコンクリート・コアに対して 2 つの断面の可視画像を取得した。図-2 は計測断面の概要図である。計測断面は断面 A と断面 A に対して垂直な断面 B である。

2.2.2 2 値化処理

X 線 CT 計測により取得したコンクリート・コア断面の可視画像に 2 値化処理を施し、ひび割れ・空隙の領域を評価した。2 値化処理では、X 線 CT 画像との整合性をひび割れ・空隙の面積により確認している。表-2 は 2 値化画像のしきい値である。表に明記したサンプルタイプ



写真-1 X 線 CT スキャナ

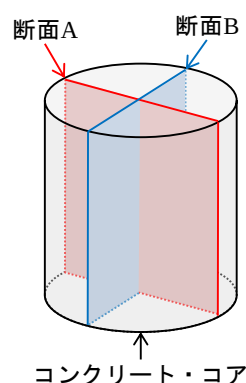


図-2 X 線 CT 計測の計測断面

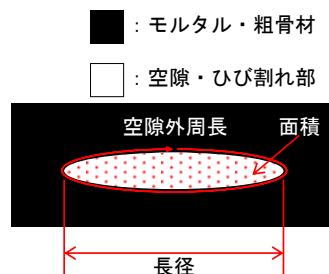


図-3 ひび割れ・空隙の評価指標

は後述するコンクリート・コアの種類である。本研究では、目視により正確なひび割れおよび空隙の同定を試みた。このため、サンプルごとにしきい値が異なる。これは、ひび割れ幅や深さにより透過率が異なることに起因している。特に、Type C では空隙が大部分を占めているため、他と比較してしきい値が小さい傾向にある。

本論では、コンクリート・コア断面の 2 値化画像からひび割れ・空隙の面積、長径および空隙外周長を抽出した。図-3 はひび割れ・空隙を楕円と仮定したモデルである。ひび割れ・空隙の長径は、図-3 に示した楕円の長軸方向の距離であり、空隙外周長は楕円の外周の長さである。本研究では、ひび割れおよび空隙を 1 つのパラメータで評価するために楕円をモデルとして適用した。ただし、ひび割れは連続しており、楕円近似の妥当性について

表-3 コンクリート・コアの力学特性

サンプル タイプ	圧縮強度 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)	初期接線弾性係数 (GPa)	割線弾性係数 (GPa)	サンプル サイズ
Type A	5.3	3,410	2.5	1.4	4
	[2.6~7.3]	[3,000~3,925]	[0.8~5.9]	[0.6~2.3]	
Type B	3.8	1,060	5.6	4.2	1
	[-]	[-]	[-]	[-]	
Type C	25.3	1,100	32.2	21.0	3
	[20.0~28.2]	[800~1,450]	[25.1~43.9]	[17.2~26.9]	

表に示した数値は平均値〔最小～最大〕である。

ては今後検討する必要がある。

2.3 集中度指数

ひび割れ・空隙の空間的分布の定量的評価には、区画法における集中度指数を用いた。区画法とは、空間を等面積の区画に分割し、各区画内に含まれる個体数を数える手法である（図-4）。区画内の空間的分布を明らかにするために、森下の集中度指数を用いた⁷⁾。

$$I_{\delta} = m \sum_{i=1}^m \{x_i (x_i - 1)\} / \sum_{i=1}^m x_i (\sum_{i=1}^m x_i - 1) \quad (2)$$

ここで、 x_i ：1つの区画内にある点の数、 m ：区画数である（図-4）。集中度指数は、各区画における点の数が一定もしくは同程度の場合、低下する。逆に、各区画における点の数が大きく異なる場合、集中度指数は増加する。集中度指数は、点の空間的分布がポアソン型、規則型、集中型に応じて $I_{\delta} = 1$, $I_{\delta} < 1$, $I_{\delta} > 1$ となる。図-5 は、集中度指数 I_{δ} と区画面積の関係を表したものである。区画面積ごとの集中度指数 I_{δ} を求めることによって点の空間分布を調べる区画法がある。各区画面積に対し集中度指数が一定の場合、点はランダムな分布となる。区画面積の増加に伴い集中度指数が1近傍に収束する場合、一様な分布と評価される（図-5(a), (b)）。区画面積の増加に伴い集中度指数が低下する場合、点の分布は小集団をもつ集中分布であると評価される（図-5(c)）。特定の区画面積において集中度指数が増加する場合、大集団をもつ集中分布であると評価される（図-5(d)）。

本研究では、2値化画像においてひび割れ・空隙を構成するピクセルを点として測定した。このため、集中度指数はコンクリート断面のひび割れ・空隙の分布と大きさに起因する。ひび割れ・空隙の面積が大きく、広範囲に分布する場合、各区画のピクセル数は同程度となる。このため、集中度指数は低下するものと示唆される。ひび割れ・空隙の面積が小さく、局所的に分布する場合、各区画のピクセル数が大きく異なるため、集中度指数は

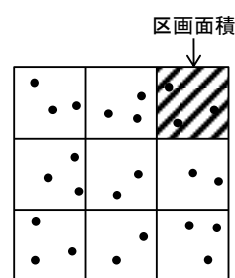
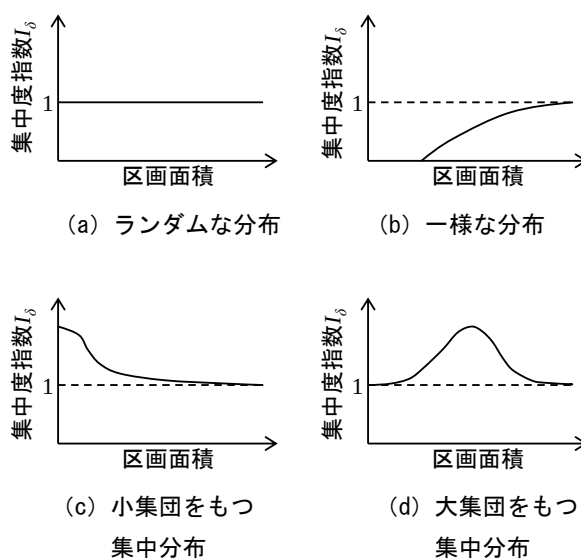


図-4 区画法

図-5 集中度指数 I_{δ} と区画面積の関係

増加するものと示唆される。

3. 実験方法

3.1 供試体

供試体は、寒冷地において長期間供用されたコンクリート製開水路の側壁部より採取したコア供試体である。同施設は、全長約 80 km の農業用開水路（水路幅：6.3～14.0 m、水路高：1.9～2.6 m）であり、凍害による剥離とひび割れが目視により確認された。特に、水流の影響を受けていない気中部においてコンクリート損傷が

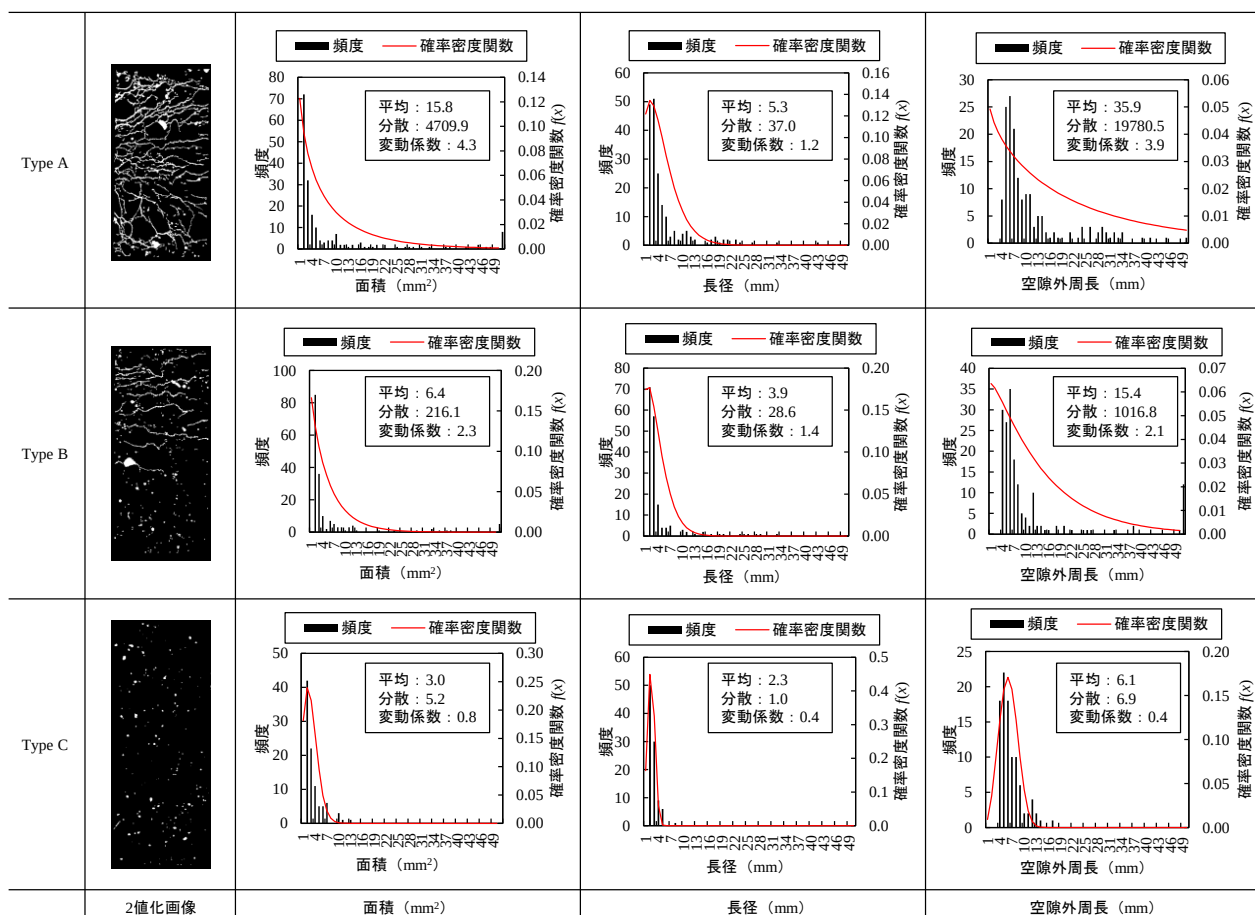


図-6 ひび割れ・空隙の分布特性

顕著であった。

本論では、採取したコンクリート・コアをひび割れ損傷の進展状況から Type A、Type B、Type C の 3 種類に分類した。コンクリート・コアの直径はφ104 mm である。Type A はひび割れがコンクリート・コア全域において顕在化した供試体であり、Type B はコア上層部分においてひび割れが顕在化した供試体である。Type C は目視によりひび割れが確認されなかった供試体である。表-3 は圧縮強度試験より得られたコンクリート・コアの力学特性である。ひび割れの顕在化した Type A および Type B の圧縮強度は、Type C と比較して極度に低下していることが確認され、Type A は Type C の 20.9 %、Type B は 15.0 % であった。初期接線弾性係数および割線弾性係数も同様の傾向であることが確認された。

4. 結果および考察

4.1 ひび割れ・空隙の特性評価

2 値化画像より空隙・ひび割れの面積、長径、空隙外周長を算出した。図-6 はワイブル分布を用いた各パラメータの分布特性である。同図では、各分布の平均値、分散および変動係数を明記した。いずれのパラメータにおいても Type A の平均値が高いことが確認された。

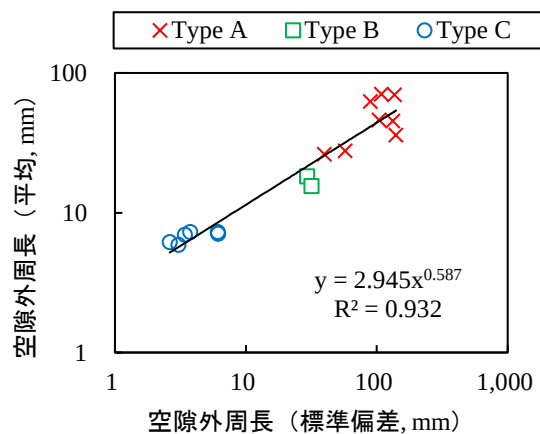


図-7 空隙外周長の平均値と標準偏差の関係

面積の場合、1.0 mm² 以上～2.0 mm² 未満の範囲で頻度が最も卓越していることが確認された。微小なひび割れや空隙の面積が同程度であったため、各サンプルタイプの相違がないものと推察された。各サンプルタイプの平均値は Type A で 15.8 mm²、Type B で 6.4 mm²、Type C で 3.0 mm² となった。Type C の平均値は Type A の 19.0 % であり、Type B の 45.5 % であった。面積の平均値では各サンプルタイプとも明確な相違が確認された。

長径の場合、面積と同様にいずれのサンプルにおいても 1.0 mm 以上～2.0 mm 未満で頻度が最も卓越していることが確認された。平均値では Type A で 5.3 mm, Type B で 3.9 mm, Type C で 2.3 mm であった。Type C は Type A の 43.4 %, Type B の 59.0 % であることが確認された。各サンプルタイプにおいて相違が確認されたものの、その差は面積の場合と比較して小さいことが明らかとなった。

空隙外周長の場合、Type A および Type B では 5.0 mm 以上～6.0 mm 未満で頻度が高く、Type C では 4.0 mm 以上～5.0 mm 未満の範囲において頻度が卓越していた。最頻値において明確な相違は確認されなかったものの、分布範囲はサンプルタイプごと異なることが明らかとなった。

平均値の場合、Type A で 35.9 mm, Type B で 15.4 mm, Type C で 6.1 mm となった。Type C は Type A の 17.0 %, Type B の 39.6 % であった。面積や長径の場合と比較して、各サンプルタイプの相違が最も大きいことが確認された。ひび割れ損傷の進行に伴い、空隙外周長のばらつきが大きくなることが明らかとなった。このことから、空隙外周長はひび割れ損傷の特性を評価する上で有効な指標であると推察された。

本論では空隙外周長に着目し、コンクリート内部に発達したひび割れ・空隙の特性評価を試みた。図-7 は、空隙外周長の平均値と標準偏差の関係を示した両対数グラフである。Type A の平均値は 26.2～70.1, 標準偏差は 39.9～140.6 の範囲に分布し、Type B は平均値 15.5～18.1, 標準偏差 29.5～31.9 の範囲に分布した。これに対して、Type C の平均値は 5.9～7.3, 標準偏差は 2.6～6.2 の範囲に分布していることが確認された。ひび割れ損傷の発達により空隙外周長の平均値と標準偏差は、累積的に増加することが明らかとなった。

4.2 ひび割れ・空隙の空間的な分布特性

本論では、集中度指数 I_δ を用いて、ひび割れ・空隙の空間的な分布特性を評価した。図-8 は Type B のひび割れ・空隙を対象とした集中度指数 I_δ と区画面積の関係である。図-8 (a) はひび割れ損傷の発達した上層部 (以後、Type B-1 と記す)、図-8 (b) はひび割れの進展していない下層部 (以後、Type B-2 と記す) の 2 値化画像である。図-8 (c) (d) は (a) (b) の抽出画像である。同図から Type B-1, Type B-2 とともに区画面積の増加に伴い集中度指数 I_δ は低下する傾向にあることが確認された。中田ら⁸⁾の検討では、小集団をもつ集中分布において同様の傾向であることが確認されている。これらの要因として、コンクリートに内在する微小な空隙が強く影響しているものと推察された。区画面積 8 pixel の集中度指数 I_δ に着目すると Type B-1 の集中度指数 I_δ が 7.3, Type B-2 は 24.9 であった。Type B-2 は Type B-1 と比較して 3.4 倍大

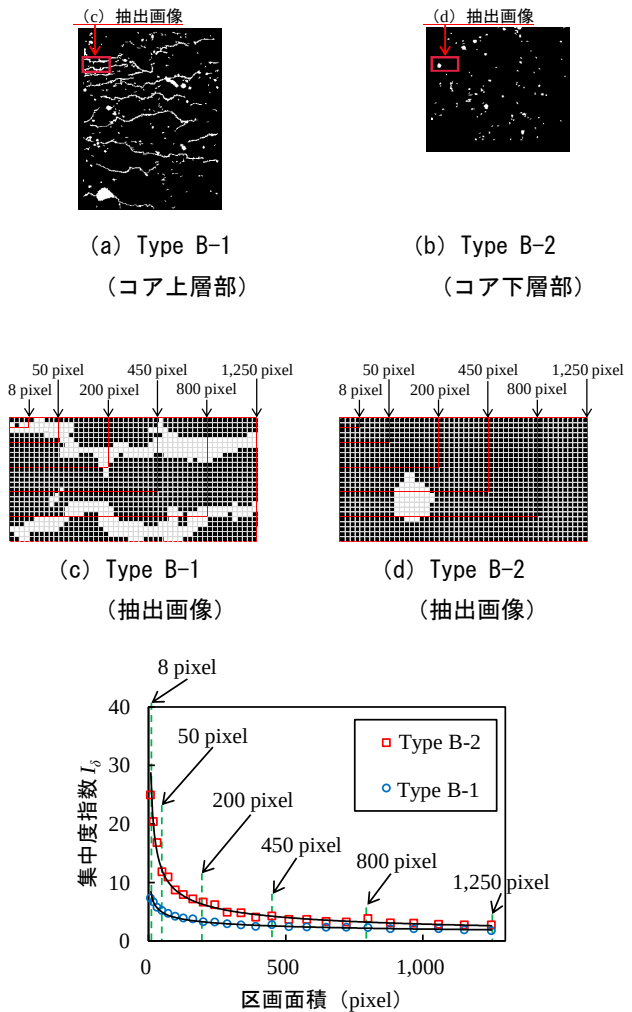


図-8 集中度指数 I_δ と区画面積

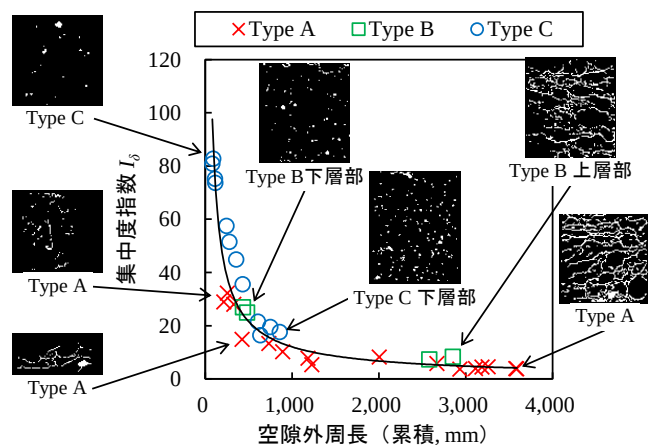


図-9 集中度指数 I_δ と空隙外周長

きい値を示すことが確認された。図-8 (c) から、各区画においてひび割れ損傷が広範囲に分布していることが確認された。このため、各区画のピクセル数が同程度となり、Type B-1 の集中度指数は低下したものと推察された。図-8 (d) から、空隙が局所的に分布していることが確認

された。このことから、各区画のピクセル数が大きく異なり、Type B-2 の集中度指数が Type B-1 と比較して増大したものと推察された。以上の結果から、ひび割れ損傷の発達したコア断面では、集中度指数が低下するものと示唆された。

本論では、4. 1において用いた空隙外周長と集中度指数 I_d の両観点から、コンクリート断面の空隙構造を評価した。検討の結果を図-9 に示す。同図では、ひび割れ・空隙の特性を詳細に評価するため、図-8 と同様に各供試体の 2 値化画像を上下 2 分割し、空隙外周長および集中度指数を算出した。集中度指数 I_d は区画面積を 8 pixel とした値である。同図から空隙外周長の低下に伴い集中度指数は累進的に増加する傾向にあることが確認された。空隙外周長が 2,000 mm 以上の範囲では、コア断面にひび割れ損傷の発達が確認された。空隙外周長が 200～1,000 mm 未満の範囲では Type A、Type B-2、Type C のサンプルが重複していることが確認された。Type A では、微小なひび割れがコア断面の全域に分布していることが確認された。Type B-2 と Type C では、空隙がコア全域において発達していることが確認された。ひび割れ・空隙の空間的分布が類似しているため、集中度指数が同程度の値を示したものと推察される。空隙外周長 200 mm 以下の範囲では、空隙が局所的に分布していることが確認された。以上の結果から、集中度指数の変動から空隙の分布特性を詳細に評価できることが確認された。ひび割れ損傷の発達した断面では、空隙外周長が増大し、集中度指数は低下するものと示唆された。

5. おわりに

本論では 2 値化画像を用いてコンクリート・コア断面に発達したひび割れ・空隙の特性評価を試みた。検討の結果を以下に列挙する。

- (1) ひび割れ・空隙を対象とした 2 値化画像より、空隙・ひび割れの面積、長径、空隙外周長を抽出し、各サンプルタイプの分布特性を評価した。検討の結果、ひび割れ損傷の進行したコンクリートではの平均値と分散が最も高いことが確認された。
- (2) ひび割れ損傷の進行に伴い、空隙外周長のばらつきは増大することが明らかとなった。このことから、空隙外周長はひび割れ損傷の定量的指標に有効であると考えられた。
- (3) ひび割れ・空隙の空間的な分布特性を評価するため区画法における集中度指数 I_d を用いた検討を行った。各区画面積における集中度指数 I_d の変化は Type B-1 と Type B-2 とで同様の傾向であることが確認され、分布パターンは小集団をもつ集中分布と評価された。

- (4) Type B-2 の集中度指数 I_d は Type B-1 の 3.4 倍大きい値を示すことが確認され、ひび割れ・空隙の空間的分布を定量的に評価する上で有用な指標であると推察された。
- (5) 空隙外周長と集中度指数の関係から各サンプルタイプのひび割れ損傷の特性を評価した。検討の結果、双方の関係は累積近似することが明らかとなった。
- (6) 空隙外周長と集中度指数の関係からひび割れ損傷の進行と、空隙の分布特性を定量的に評価できる可能性が示唆された。

引用文献

- 1) 池田隆徳, 濱田秀則, 佐川康貴, 多田昂平: 鉄筋周囲に形成される空隙の X 線 CT スキャナによる定量評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1085-1090, 2011.7
- 2) 橋本勝文, 横田弘, 杉本隆文, 吉川昂純: 凍結融解作用を受けたモルタルの X 線 CT 撮影による空隙構造評価, 材料, Vol.62, No.8, pp.492-497, 2013.8
- 3) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008.7
- 4) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治: X 線 CT 法による硬化コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.545-550, 2010.7
- 5) Suzuki, T. , Ogata, H. , Takada, R. , Aoki, M. and Ohtsu, M. : Use of Acoustic Emission and X-ray Computed Tomography for Damage Evaluation of Freeze-Thawed Concrete, *Construction and Building Materials*, 24, pp.2347-2352, 2010.8
- 6) 鈴木哲也, 緒方英彦, 高田龍一, 佐藤周之: 凍結融解損傷が進行したコンクリートの材質評価, セメント・コンクリート論文集, Vol.63, No1, pp.204-211, 2010. 2
- 7) 石原外美, 塩沢和章, 宮尾嘉寿, 神島裕児: 炭素鋼平滑試験片の平面曲げ疲労過程における複数き裂の空間分布 (応力振幅および繰返し数依存性), 日本機械学会論文集 (A 編), 56 巻, 523 号, pp.494-500, 1990.3
- 8) 中田淳二, 柴田俊夫: 発露点分布モデルパターンの画像解析による評価, *Zairyo-to-Kankyo*, Vol.45, No.8, pp.467-472, 1996.