研　究　報　告

令和　7　年　4月　5日

公益財団法人　前田記念工学振興財団

理 事 長　　岸　　利 治　　殿

研究代表者

所　属　：　室蘭工業大学大学院工学研究科

氏　名　：谷口　円

研究課題名：硬化コンクリートの新たな気泡特性値に関する検討

助成金額：100 万円

研究実施期間：自　令和６年４月１日　～　　至　令和７年３月 31 日

研究報告　令和６年度　建築分野 No.9

硬化コンクリートの新たな気泡特性値に関する検討

Study on new air-void system index of Hardened Concrete

室蘭工業大学大学院工学研究科もの創造系領域　教授　谷口　円

（研究計画ないし研究手法の概略）

寒冷地のコンクリート構造物の長寿命化には，凍結融解抵抗性の向上が必須である．有効な対策は，適切な空気泡を必要量コンクリート中に連行し，細孔中の水分の凍結により発生する膨張圧を緩和することである．昨今では，硬化後の空気量確保のため，フレッシュコンクリートの空気量を 7%まで増加させる凍害対策が示された（国土交通省　東北地方整備局（平成 31 年 3 月））．しかしながら，空気を多く連行することは，様々な弊害を生む．有効な気泡を必要最小限連行することが効率的であり，そのためには硬化コンクリートの気泡組織の計測手法の信頼性を向上させることが喫緊の課題である．

以上をふまえ本研究は，コンクリートの凍結融解抵抗性を支配する気泡組織について，簡便かつ信頼性の高い新たな計測手法を提案するため，X 線 CT 等による撮影画像に五十嵐らの提案する気泡特性値の解析手法を適用，検討を行った．

（実験調査によって得られた新しい知見）

○実験概要

日本コンクリート工学会「コンクリート中の気泡の役割・制御に関する研究委員会 TC141A」において，ラウンドロビン試験が実施され，その際にコンクリートの気泡組織計測のための標準サンプル（φ100×厚さ 10 ㎜）２種類（記号：SL8,SL18 と表す）が作製された．本研究では，そのサンプルを用いて検討を行った．

はじめに，X 線ＣＴによる断層画像および三次元画像を取得するための撮影条件を明らかにした．使用した X 線 CT 装置は，Nikon XTH-225ST であった．管電圧を 220kV，管電流を 0.2mA とし，幾何倍率（被検体から検出パネルまでの距離を X 宣言から被検体までの距離で除したもの）を 2，3.5，5.0，8.0 の 4 水準とした．撮影後の画像は，装置付属の画像解析ソフトである VGSTUDIO MAX3.1.1 に組み込まれた欠陥解析アルゴリズムにより，空隙を検出し，球形度が 0.6 以上の空隙を気泡として抽出し，撮影条件の検討を行った．

次に五十嵐らの提案する気泡特性値の解析手法を適用し，気泡の保護領域の数値化を試みた．

図１に保護領域の解析手順を示す．取得した CT 画像から，気泡を検出し，その重心点座標を取得した．同一画像から，ImageJ により骨材を抽出し，二値化画像を作成した．R を用い，骨材部を除したセメントペースト領域について，気泡重心点からディリクレ分割を行った．

図２にディリクレ分割と保護特性値の算出方法について示す．ディリクレ分割は，点同士を結んだ垂直二等分線によって，領域を分割する．気泡重心点 x_i の集合を点過程 X＝｛x_i：i＝1，…j，…n｝とし，セメントペースト領域中の任意の位置 u∈W＼X（W：観察領域内）を考えたとき，その位置から最も近接した点x_i∈X を示すディリクレ分割を行った．式（1）に点を最近傍点とする点 u の集合の定義を示す．

$$C_i(x_i|\mathrm{X}) = \left\{ \mathrm{u} \in \mathrm{W} : \| \mathrm{u} - x_i \| = \min_j \| \mathrm{u} - x_i \| \right\} \quad (1)$$

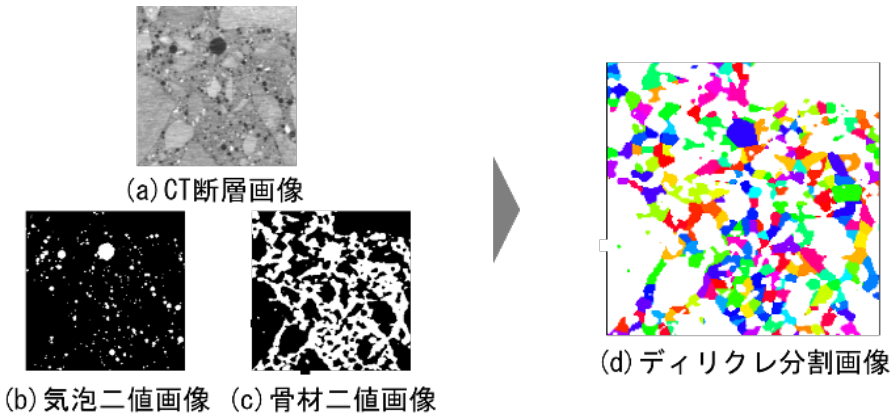

図 1　保護領域の解析手順

気泡重心点ごとに分割された多角形領域（以下タイル）$C_i(x_i|X)(i=1, \cdots, n)$をその タイル内にある気泡が保護を担うべき領域（保護領域）とした．

タイルを同面積の円としたときの半径から気泡半径を差し引いた距離を P とし，セメントペーストの 50%，95%を保護可能である場合の P を保護特性値 P_{50}，P_{95} とそれぞれ定義した．

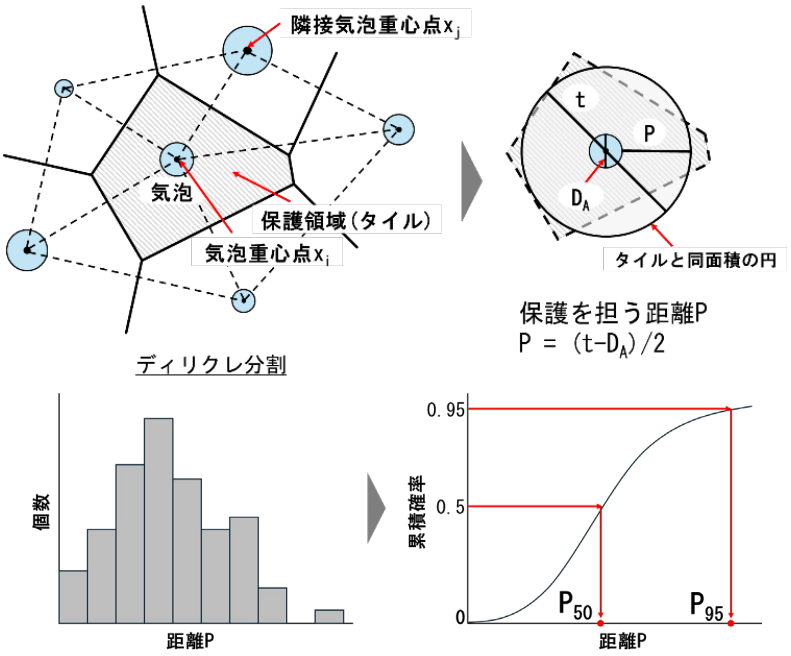

図 2　保護特性値の算出方法

○結果

図３に気泡直径と検出された気泡数を撮影倍率ごとに示す．

幾何倍率により撮影領域のサイズが異なり，2.0 倍，3.5 倍は試験体全体，5.0 倍は 79×79㎜，8.0 倍は 49×49㎜であった．

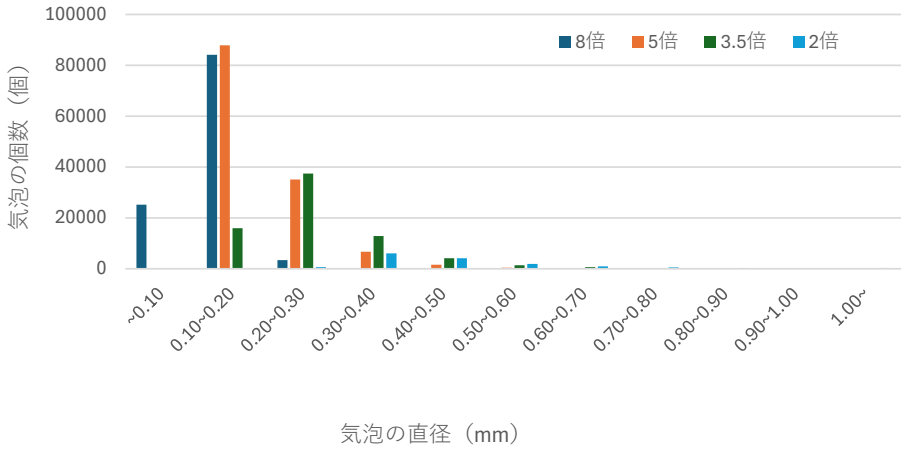

図３　気泡直径と検出された気泡数（SL8）

幾何倍率 2.0 倍では，0.3㎜以下の気泡が検出されていなかった．3.5 倍では，0.2-0.3 ㎜がピークとなり，0.1 ㎜以下は検出されなかった．5.0 倍では，0.1-0.2 ㎜がピークとなるが，0.1 ㎜以下は検出されなかった．8.0 倍では，0.1-0.2 ㎜がピークで，大きいものは 0.2-0.3 ㎜までが検出され，0.1 ㎜以下も検出された．

耐凍害性に影響を及ぼす気泡の直径は 0.15 ㎜～0.05㎜ 未満とされる．直径 0.15㎜ 未満の気泡が検出されたのは，5.0 倍と 8.0 倍で 0.1㎜ 以下の気泡を検出できたのは，8.0 倍のみであった．ここでは，幾何倍率 8.0 倍での撮影が適していると判断した．また，CT 画像には画像中心部と周辺部の輝度が均一でなくなるアーチファクトが認められた．そのため，以降の解析は幾何倍率 8.0 倍（分解能 25μm/ピクセル）で撮影された画像の中心部分(20㎜×20㎜)で行った．

図４に SL8，図５に SL18 で算出した保護特性値 P_{50}，P_{95} と気泡数および平均値を示す．

幾何倍率 8.0 倍で撮影した Z 軸位置が異なる断層画像 4 枚を用いて，保護領域の推定を行った．SL8 は平均で P_{50} が 0.175 ㎜，P_{95} は 0.311 ㎜，702 個， SL18 は平均で P_{50} が 0.197 ㎜，P_{95} は 0.352 ㎜，547 個であった．

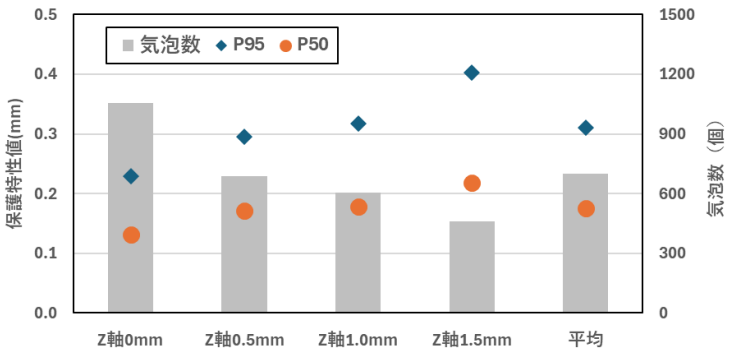

図４　画像 4 枚の保護特性，気泡数と平均値（SL8）

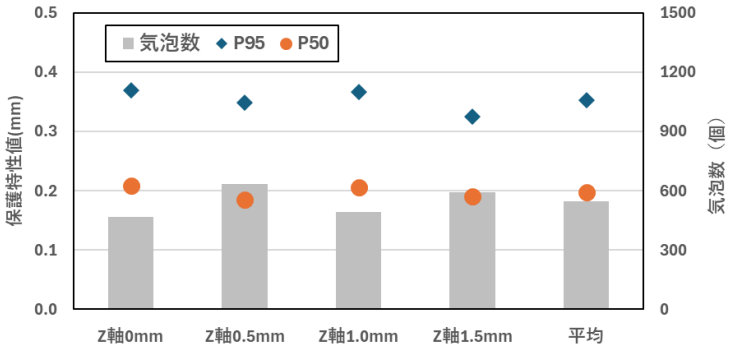

図５　画像４枚の保護特性，気泡数と平均値（SL18）

図 6 に本研究で算出した保護特性値の平均値とラウンドロビン試験において得られた気泡間隔係数と比較して示す．保護特性値 P_{50} は，気泡間隔係数と同等か小さい値となった．P_{95} は気泡間隔係数より大きな値となった．いずれの保護特性値も試験体ごとの気泡間隔係数の大小関係と相違はなく，SL18＞SL8 となった．

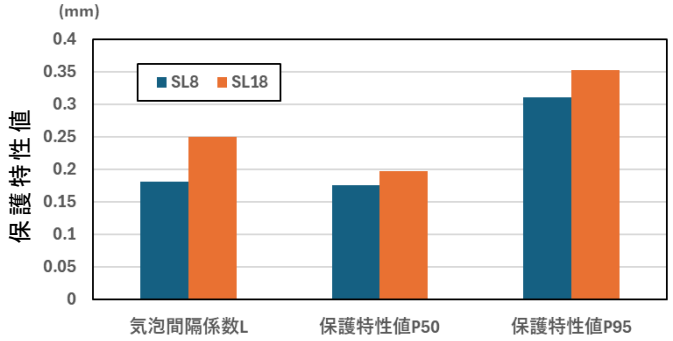

図６　保護特性値と気泡間隔係数

○まとめ

国内で実施されたラウンドロビン時の標準試験体を用いて，X 線 CT 画像と撮影画像を用いたによるディリクレ分割による保護領域の解析により気泡組織の評価を行い，既存手法による計測結果と比較した．X 線 CT 画像の撮影条件を明らかにし，保護特性値 P_{50} は，気泡間隔係数と同等か小さい値となり，P_{95} は大きな値となった．いずれの保護特性値も試験体ごとの気泡間隔係数の大小関係と相違はない結果であった．

今後，３次元での保護領域の検討を行い，凍結融解試験結果等の関係を求め，新たな評価手法としての検討を進める予定である．

（ 発 表 論 文 ）

1)小杉智哉，谷口円，濱幸雄：硬化コンクリートの新たな気泡計測手法に関する基礎的検討，2025 日本建築学会大会（九州）学術講演会（投稿中）