

X-CT を用いた細骨材周りの遷移帯の同定手法の検証

名古屋工業大学大学院 正会員 ○吉田 亮

1. はじめに

複合材料であるコンクリートは材料間に界面をもつ。そのなかのひとつである骨材周りの遷移帯は、コンクリートの硬化体物性に大きな影響を与えている<sup>1)</sup>。これまでの研究では、走査電子顕微鏡などにより遷移帯の構造、位置の情報は報告されてきたが、遷移帯の量の情報、硬化体物性との関係が明らかになっていない。

本研究では水銀の圧入履歴により同定した細骨材周りの遷移帯を X-CT により検証し、得られた遷移帯量と硬化体物性の関係を検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料と配合

コンクリート供試体の配合を表 1 に示す。本研究では、天然細骨材 (S1)、高炉スラグ細骨材 (SgS1) の 2 種類の細骨材を用いることで、遷移帯の量に変化を与えた。また、天然細骨材に高炉スラグ微粉末を加えて (S1-SgP2) 同種の細骨材と比較し、微粉末の影響範囲を特定した<sup>2)</sup>。細骨材周りに遷移帯があることを元素分析で確認し、圧縮強度試験、透気試験、乾燥収縮および質量減少試験を実施した<sup>3)</sup>。また、空隙構造分析は、同一試料に対し圧入を繰り返す水銀繰返し圧入法を用いてインクボトル空隙を抽出し、X-CT によりインクボトル空隙を観察した。

3. 実験結果および考察

図 1 の累積空隙量曲線に示すように、普通細骨材

を用いたモルタルにおける高炉スラグ微粉末の影響は、直径 400 nm 以下に確認できた。また、図 2 の元素分析に示すように、普通細骨材を用いたモルタルの細骨材周りには、Ca に富み、Si が乏しい遷移帯の特徴を示す領域が確認できる。一方で、高炉スラグ細骨材まわりの領域には、上述した遷移帯の特徴は確認できない。

図 3 に水銀繰返し圧入法による圧入・再圧入曲線を示す。細骨材の種類によらず、第一圧入曲線のしきい空隙径は、直径 1000 - 2000 nm 以下に確認できる。また、再圧入曲線のしきい空隙径は、直径 200 nm 以下であり、図 1 で確認された遷移帯の影響範囲(直径 400 nm 以上) よりも小さい。そのため、第一圧入曲線と再圧入曲線の差として検出されるインクボトル空隙は、水銀が試料に圧入されたしきい空隙径より小さい全測定範囲 (直径 10 - 1000、2000 nm) に確認できる。前述の遷移帯の影響範囲 (直径 400 nm 以上) を照らし合わせると、遷移帯はインクボトル空隙として検出されることがわかった。細骨材とセメントペーストに含まれる空隙よりも、大きな空間と報告される遷移帯には、水銀圧入・排出の際に水銀が留まることは妥当である。

図 4 に X 線透過像を示す。ここで示したのは、水銀圧入試験後の試料であり、内部にはインクボトル現象により水銀が留まっている。試料の経験最高圧入圧力は、400 MPa であり、直径 400 nm 以上の空隙

表 1 配合

| specimen   | W/C  | [kg/m <sup>3</sup> ] |     |     |     |     |      |
|------------|------|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|
|            |      | W                    | C   | S1  | SgS | SgP | G    |
| S1         | 0.50 | 175                  | 350 | 671 | 0   | 0   | 1072 |
| S1-SgP2    |      |                      |     | 658 | 0   | 15  |      |
| SgS1       |      |                      |     | 0   | 715 | 0   |      |
| SgS1w      |      |                      |     |     | 701 | 15  |      |
| SgS1w-SgP2 |      |                      |     |     | 680 | 38  |      |
| SgS1w-SgP5 |      |                      |     |     | 713 | 0   |      |
| SgS2       |      |                      |     |     |     |     |      |
| SgS2w      |      |                      |     |     |     |     |      |

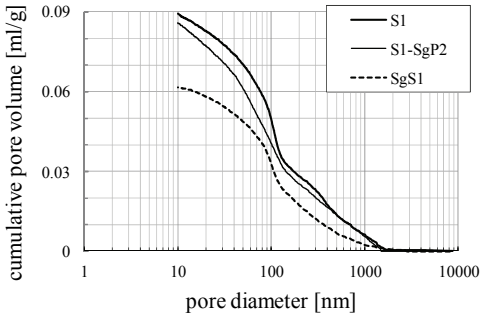


図 1 累積空隙量曲線 (細骨材の種類と微粉末の影響)

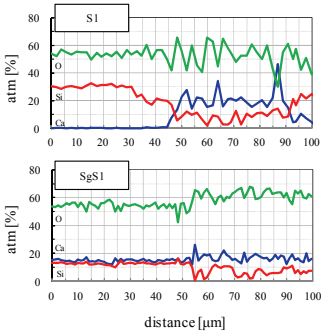


図 2 細骨材周りの元素濃度

キーワード：遷移帯，空隙構造，インクボトル，水銀圧入，X-CT

連絡先：〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学大学院 TEL 052-735-5125

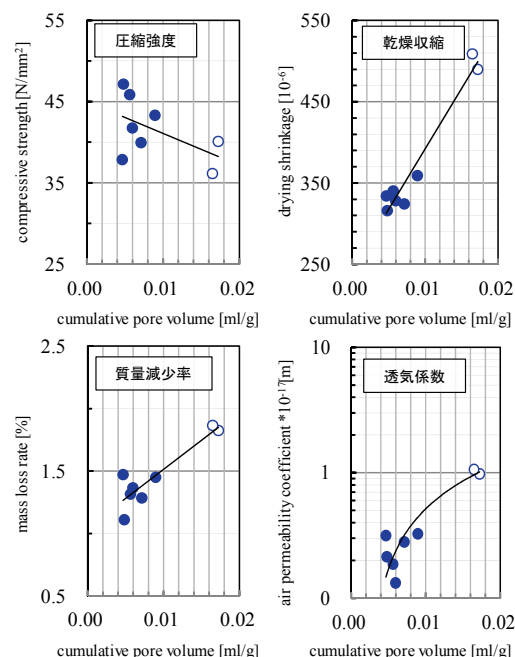
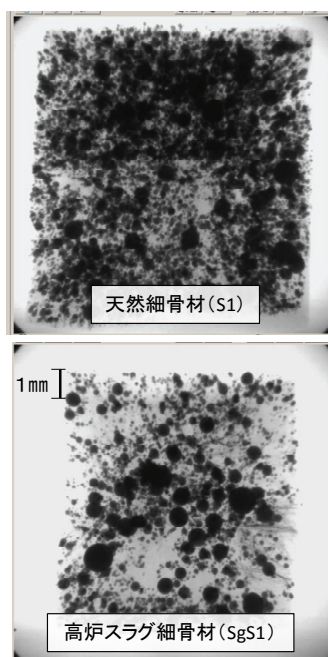
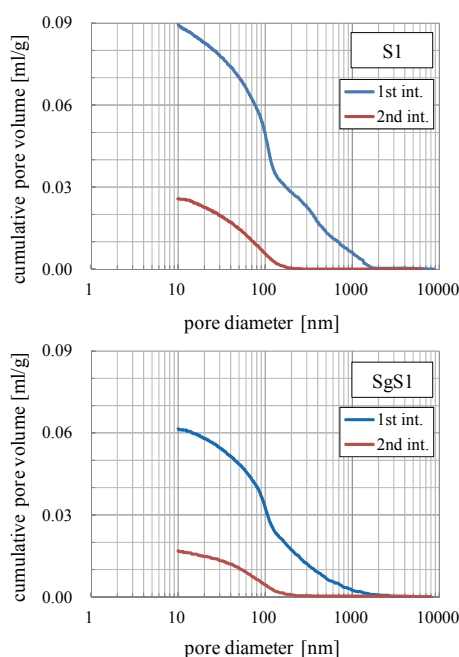


図3 累積空隙量曲線（第1、第2圧入曲線の差がインクボトル空隙）

図4 X線透過像（球形：空気泡、角形：遷移帯）

図5 遷移帯量（空気泡含む）と硬化体物性の関係

には水銀が圧入され、ボトルネックに閉ざされた空隙に水銀が留まっている。図の黒い影が、水銀が留まっている箇所である。天然細骨材では、球形の影（空気泡：150～900 $\mu$ m）以外に、角張った影が多く確認できる。一方で、高炉スラグ細骨材では、球形の影が多く、角張った影はわずかに確認される。同定されたインクボトル空隙には、遷移帯と空気泡の両方が含まれていることが示唆される。

図5にインクボトル空隙として同定した細骨材周りの遷移帯（直径400nm以上）の累積空隙量とコンクリートの各種硬化体物性の関係を示す。図中の白抜きマーカーは天然細骨材を、塗りつぶしマーカーは高炉スラグ細骨材を示す。圧縮強度を除き、透気係数、乾燥収縮および水分逸散の結果は、細骨材周りの遷移帯の量に応じて硬化体物性値も変動している。これらの関係から、圧縮強度には粗骨材周りの遷移帯が、その他の硬化体物性には細骨材周りの遷移帯が関与していると考察できる。

#### 4. まとめ

本研究では水銀の圧入履歴を用いた細骨材周りの遷移帯の同定を試み、得られた遷移帯量と硬化体物性の関係を検討した。水銀圧入試験の特性上、既往研究で報告される遷移帯の厚さや位置などの情報は検出できない。しかし、遷移帯が連結するセメント

ペースト中の毛細管空隙の上限値は、しきい空隙径として捉えた。また、遷移帯をインクボトル空隙として捉えたることができた。この遷移帯量と硬化体物性にはある程度の強い相関が確認された。同様にインクボトル空隙として捉えられる空気泡との分離、遷移帯が検出される空隙直径の下限値の判定方法も今後の課題である。

謝辞：本研究は、水銀圧入試験は名古屋工業大学先進セラミックス研究センター藤正督教授のご厚意により試験機を拝借させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 内川浩ほか：硬化モルタル及びコンクリート中の遷移帯厚さの評価並びに遷移帯厚さと強度との関係の検討、コンクリート工学論文集、Vol.4、No.2、pp.1-8（1993）
- 2) 吉田亮ほか：高炉スラグ細骨材によるコンクリートの乾燥収縮・透気性向上メカニズムに関する空隙構造に基づいた検証、セメントコンクリート論文集、Vol.71、（2018）
- 3) 齊藤和秀ほか：高炉スラグ細骨材のコンクリートの硬化物性向上効果、土木学会論文集 E2、社団法人土木学会、Vol. 72、No. 4、pp.335-367（2016）