

モルタル内部の不均質な多孔質領域の形成に関する一考察

金沢大学大学院

学生会員

○柴山 舞

金沢大学理工学域

正会員

五十嵐 心一

1. まえがき

コンクリートやモルタル中の骨材界面近傍には、一般的には遷移帯が存在すると考えられている。一方、Diamond[1]は、モルタルの反射電子像観察より、必ずしも骨材周囲の遷移帯は存在せず、セメントペーストマトリックス部分全体が極めて多孔質な領域(ポーラスパッチ)と緻密な領域が混在したパッチワーク構造であることを確認している。しかし、その一方で、ポーラスパッチの形成は人為的なものであって、モルタル固有な不均質性ではないとする指摘もなされている[2]。

本研究においては、モルタルの反射電子像観察により、ポーラスパッチの内部組織の特徴を明らかにし、ポーラスパッチの形成過程について検討することを目的とする。

2. 実験概要

2. 1 供試体の作製

普通ポルトランドセメント(密度: 3.15g/cm^3)の川砂(密度: 2.61g/cm^3)を使用して、JIS R 5201 に準拠して、水セメント比が 0.50、セメント砂比が 1:3 のモルタル円柱供試体(直径 50mm、高さ 100mm)を作製した。打設後 24 時間にて脱型し、材齢 28 日まで 20°C の標準水中養生を行った。なお、比較用として同一水セメント比のセメントペースト供試体(CP と記す)も作製した。

2. 2 反射電子像観察

材齢 28 日にて供試体中央部から厚さ 5mm、直径 25mm 程度の円盤型試料を切り出し、24 時間以上エタノールに浸漬して水和反応を停止させた。その後、t-ブチルアルコールを用いて凍結真空乾燥を行い、真空樹脂含浸装置を用いてエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後、表面を耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して注意深く研磨し、金-パラジウム蒸着を行い反射電子像観察試料とした。

2. 3 画像取得方法および画像解析

走査型電子顕微鏡を用い、観察倍率 100 倍にて無作為に抽出した 15 断面程度の反射電子像を取得した。得

られた画像は 1148×1000 画素からなり、1 画素は約 $1.1\mu\text{m}$ に相当する。取得した画像に対して目視にて骨材の抽出を行った。その後、平滑化処理を複数回施すことにより画像のノイズを除去した後、グレースケールに基づいた 2 値化を施し、画像解析ソフトウェアの機能を用いて、粗大毛細管空隙(径 $1.105\mu\text{m}$ 以上)および未水和セメント粒子を抽出した 2 値画像を得た。また、グレースケールに基づいて抽出された空隙の分布の特徴と原画像を比較し、膨張処理を行いながら全体として空隙の凝集した領域の抽出を試みた。さらに、骨材界面との分離を行うために収縮処理を施した。これらの処理を所定回数繰り返すことによって、空隙の凝集した周囲よりも明度の低い領域を抽出した。これが原画像と対応することを確認し、これをポーラスパッチとした。抽出した領域内の各相の画素数を計数することにより面積率(体積率)を求めた。

2. 4 2点相関関数

2 点相関関数(式(1))により、ポーラスパッチの空間分布の特徴を評価した。

$$S_2^{(P)}(r) = E[1(x_i \in P) \times 1(x_j \in P)] \quad (1)$$

ここに、 P は着目相であり、 x_i, x_j は任意の 2 点の座標で、距離 $r = |x_j - x_i|$ である。また、 $1(\cdot)$ は指示関数を意味し、 $(\cdot)$ 中の条件が正のときは 1、そうでない場合は 0 を与え、 $E[\]$ は期待値を表す。本研究では、ポーラスパッチ(Y)、粗大毛細管空隙(P)を着目相とした。2 点相関関数は、距離 $r=0$ のとき着目相の面積率 ϕ_0 を示し、理論上はある距離で ϕ_0^2 に収束する。この値を構造距離と称し、着目相の空間構造を特徴づける指標とした。

3. 結果および考察

写真 1 は、モルタルの反射電子像と画像演算手順に従い抽出されたポーラスパッチを示したものである。骨材周囲やそれに挟まれた領域にポーラスパッチが偏在する傾向が認められる。その厚さは数 $100\mu\text{m}$ にも達する部分もあり、明らかに遷移帯の概念とはその特徴は異なる。

キーワード 反射電子像, 画像解析, パッチワーク構造, ポーラスパッチ

連絡先 〒920-0092 石川県金沢市角間町 金沢大学自然科学研究科社会基盤工学専攻 TEL 076-264-6373

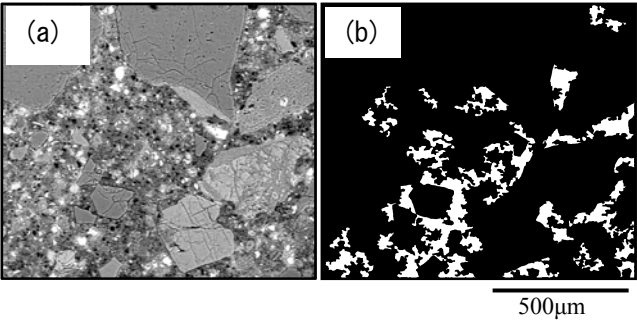


写真 1 ポーラスパッチ抽出の例 (a) モルタルの反射電子像 (b) 抽出されたポーラスパッチ

表 1 モルタルの内部組織の各領域の面積率

相の種類	マトリックス全体	ポーラスパッチ	緻密な領域
未水和セメント(%)	3.87	0.13	4.84
粗大毛細管空隙(%)	5.36	15.12	3.03

表 1 はモルタルの内部組織の各領域の面積率を示したものである。ポーラスパッチはモルタル中の他の領域に比べ、明らかに空隙率が高く、未水和セメント粒子がほとんど存在しない。一方、反射電子像中にて明度の高い緻密と考えられる領域は、マトリックス全体の平均的な値に比べて明らかに低水セメント比の領域の様子を示している。

図 1 は、ポーラスパッチの 2 点相関関数を示したものである。ポーラスパッチはマトリックス全体の約 20%を占めることが認められる。また、ポーラスパッチの構造距離は 130μm 程度である。

表 2 は、セメントペースト供試体の画像を一边の距離が 130μm の正方形領域としてランダムに分画した領域内の各構成相の面積率と変動係数を示したものである。骨材を混入することにより、練り混ぜ時のせん断効果によりセメント粒子のブロックが破壊され、セメント粒子の分散性が良くなり、水和反応の進行の程度もより均質化すると期待される。確かに、未水和セメントの面積率はモルタルの方が小さく水和度は高い。しかし、局所的な不均質性に関しては、セメントペースト中の各構成相も同様であり、多孔質領域の存在はモルタル固有のものではないようである。

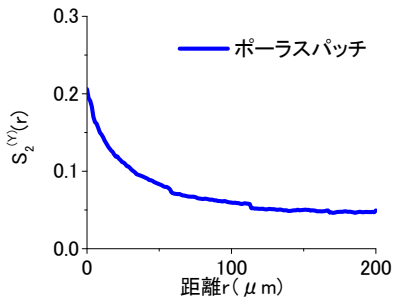


図 1 ポーラスパッチの 2 点相関関数

表 2 セメントペースト供試体中における各内部構成相面積率と変動係数

着目相		未水和セメント	粗大毛細管空隙
CP(130μm 四方領域)	面積率(%)	5.94	4.31
	変動係数(%)	42.48	37.96

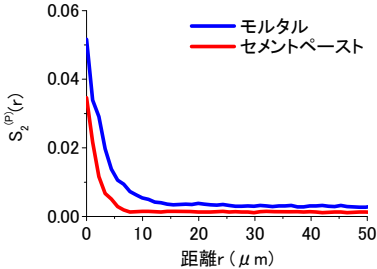


図 2 各供試体中の粗大毛細管空隙の 2 点相関関数

図 2 は、モルタル及びセメントペースト供試体中の粗大毛細管空隙の 2 点相関関数を示したものである。モルタル中の空隙の方がセメントペースト供試体の空隙に比べ構造距離が大きい。即ち、セメントペースト中の粗大空隙は、モルタルに比べて相関性を有する距離が短く、連続した空隙相を形成するか否かは、体積率により強く依存している。

以上の結果より、セメントペーストであってもモルタルであってもマトリックス中に不均質な多孔質領域が存在することは同様であり、骨材がポーラスパッチを形成させているとは限らないようである。しかし、セメントペーストとモルタルではその空間配置に相違があり、セメントペーストでは、それらがランダムな配置をとり得るが、モルタルの場合、骨材の存在により骨材以外の領域内に分布が限定される。このため、ポーラス領域が互いに連結しやすくなり、それがポーラスパッチとして認識されたものと考えられる。

4. あとがき

モルタルの反射電子像観察より、ポーラスな領域のパッチワーク構造が確認された。その形成においては、セメントペースト内部組織の不均質性に加え、骨材による不均質領域の分布の制限が関わると考えられる。

参考文献[1]Diamond,S. : Cement and Concrete Research, Vol.33, No.7, pp.949-955, 2003 [2] Wong, H.S., Buenfeld, N.R. : Cement and Concrete Research, Vol.36, No.5, pp.990-997, 2006