

## モルタル中に形成される不均質な多孔質領域の特徴

金沢大学 学生員 柴山 舞

金沢大学 正会員 五十嵐 心一

### 1. 序論

コンクリートやモルタルの内部構造に関して、骨材の周囲に骨材界面の影響を受けない領域(バルクセメントペースト)よりも多孔質な遷移帯と呼ばれる領域が存在するとの考え方がある。その一方で、そのような遷移帯は存在せず、全体に比べて非常に空隙率の高い多孔質領域(以後、ポーラスパッチと称す)がペーストマトリックス中でパッチワークのように分布した構造を形成しているとの指摘もある[1]。いずれの考え方であっても、そのような多孔質領域の存在とその特徴は、コンクリートやモルタルの力学的特性のみならず、耐久性にも影響を及ぼすと考えられるが、実際にポーラスパッチの分布やパッチ内の組織の特徴を明らかにした例はない。本研究においては、低倍率にて取得したモルタルの反射電子像から多孔質領域の存在と分布特性を明らかにし、その内部の組織の特徴について論ずることを目的とする。

### 2. 実験概要

#### (1) 供試体の作製

普通ポルトランドセメント(密度:  $3.15\text{g/cm}^3$ )と手取川産の川砂(密度:  $2.61\text{g/cm}^3$ )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7日まで $20^\circ\text{C}$ の標準水中養生を行った。

#### (2) 反射電子像観察

材齢7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することで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、真空樹脂含浸装置に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。

#### (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断面の反射電子像を取得した。得られ

た画像は $1148 \times 1000$ 画素からなり、1画素は約 $1.105\mu\text{m}$ に相当する。取得した15枚の画像に対して目視にて骨材の抽出を行った。その後、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、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き空隙の抽出を行った。いずれの空隙も個々に独立して存在していることから、膨張処理を行うことで空隙の密集した領域の抽出を試みた後、骨材界面と分離する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、空隙の密集した周囲よりも暗い領域を抽出し、これが原画像と対応することを確認して、これをポーラスパッチとした。抽出した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。

#### (4) 初期水セメント比の推定

未水和セメント体積率 $VC_{BEI}$ と初期の未水和セメント体積率 $VC_0$ から、式(1)により水和度 $\alpha$ を算出した。

$$\alpha = 1 - (VC_{BEI}/VC_0) \quad (1)$$

ポーラスパッチもそのまわりのセメントペーストも、同じ供試体で同じ養生条件のもとで形成された領域であることから、水和の進行の程度はセメントペーストマトリックス全体と等しいと仮定した。この仮定のもと、各領域における初期の未水和セメント体積率 $VC_{T0}$ を式(2)より算出した。

$$VC_{T-0} = VC_{T-BEI}/(100 - \alpha) \quad (2)$$

なお、 $VC_{T-BEI}$ は各領域の未水和セメント体積率を表す。求められたそれぞれの領域の初期の未水和セメント体積率 $VC_{T0}$ と、セメントの周囲の補集合領域の面積を初期水量が占めていた部分と考え、その面積から初期水セメント比を推定した。

### 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って抽出されたポーラスパッチを示したものである。写真1(a)の右端の中央部に存在する骨材の間には多孔質領域が存在する一方で、上部にある骨材の左上領

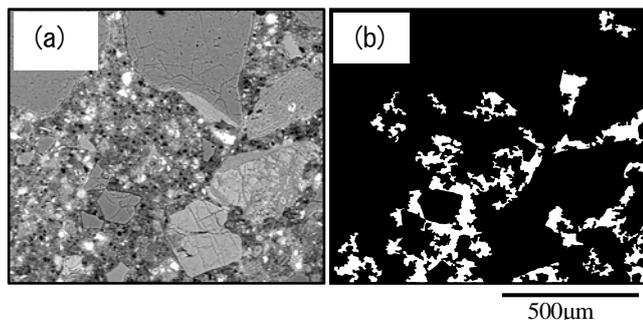


写真1 ポーラスパッチ抽出の例 : (a) モルタルの反射電子像 (b) 抽出されたポーラスパッチ

表1 モルタル中の各相の面積率

相の種類	ペーストマトリックス	ポーラスパッチ	緻密な領域
モルタル中の面積率(%)	44.06	—	—
ペーストマトリックス中の面積率(%)	—	20.66	79.42

表2 モルタルの内部組織の面積率

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

域は緻密であり、多孔質領域が遷移帯として連続するのではなく、その分布がパッチワーク構造であることは明らかである。このような不連続なパッチワーク構造はいずれの画像にも確認されたことから、モルタル中の組織の特徴といてよいと思われる。

ポーラスパッチはおおよそ骨材の周囲に存在し、骨材の混入がポーラスパッチの形成にかかわることは明らかであるが、写真1(a)の画像中央部のように、骨材が周囲に存在しないような比較的広い範囲にわたって多孔質領域が存在する場合や、写真1(b)にて明らかのように、画像左下から右上へと画像全体を横切るような連続性を有したポーラスパッチも存在した。

表1は、モルタル中の各相の面積率を示したものである。本研究で用いたモルタルの配合上のペーストマトリックス体積率は約42%であり、画像解析により得られた体積率が44.06%であることから、その差は2%程度しかなく、適切にペーストマトリックス相の抽出ができていたものと思われる。そのペーストマトリックス全体のうち、約20%がポーラスパッチと考えられる領域であった。この値はパーコレーションクラスタ

表3 モルタルの水和度および各相の初期水セメント比の推定値

相の種類	モルタル全体	ポーラスパッチ	緻密な領域
水和度(%)	89.32		
初期水セメント比	0.55	63.46	0.38

一閾値よりも低いため、この領域だけで連続したパスを形成できない。しかしながら、写真1に示すように、ポーラスパッチは骨材周囲や骨材間の狭い領域に存在する確率が高いことから、骨材体積を加えた相として系全体が連続することも考えられる。

表2は、モルタル中のセメントペースト相全体とポーラスパッチおよび緻密な領域内での未水和セメント体積率と粗大毛細管空隙率を比較したものである。ポーラスパッチはセメントペースト全体の平均的な空隙率の約3倍の空隙率を示し、残存未水和セメントは極端に少ない。

表3は、モルタルのペーストマトリックスの水和度から各相の局所的な初期水セメント比を推定したものである。ペーストマトリックス内の緻密な領域では、推定水セメント比は0.38と低く、多量にセメント粒子が配置された領域であったことになる。写真1より、そのような領域は骨材間の比較的大きな空間に存在する 경우가多く、セメント粒子の凝集域の残存の可能性もあると考えられる。一方、ポーラスパッチの水セメント比は63.46と他の相と比較して極めて高い。表2に示したように、残存セメントがほとんどないポーラスパッチになりうる領域は、元々セメント粒子がほとんど存在しない練り混ぜ水が主体の領域であったと考えられる。このような領域は力学的にも物質移動の観点からもコンクリートの性能に悪影響を及ぼすと考えられ、この領域の空間構造、例えばその連続性などを明らかにしていく必要があるものと考えられる。

#### 4. 結論

走査型電子顕微鏡観察より、モルタルの内部には、ポーラスパッチが存在することが確認された。その分布は、骨材で挟まれた領域に多く偏在する一方で、骨材間距離の広い領域にも存在し、それらが連続する場合もあることが明らかとなった。

参考文献[1]Diamond, S. et al., Cem Con Com, Vol.28, No.7, pp.606-612, 2006.