

反射電子像の画像解析による硬化コンクリートの水セメント比の推定

金沢大学工学部 学生会員 池谷 孝平

金沢大学理工学域 正会員 五十嵐 心一

中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 正会員 石川 裕一

1. 序論

コンクリートの維持管理の重要性が広く認識されるようになった今日において、品質管理や診断のための簡便で汎用的な水セメント比を推定する手法の確立が望まれている。著者らは実験室レベルで作製、養生を行ったセメントペースト供試体を対象として、反射電子像の画像解析によって水セメント比を推定する方法を提案してきた[1]。しかし、実際のコンクリート構造においては、構成相の多様性および材料寸法の不均質に加えて、種々の養生下での劣化要因も加わり、微視的構造は標準養生されたセメントペーストとは大きく異なると考えられる。

本研究は、著者らがこれまでに提案した手法を長期間の供用を経たコンクリートに適用し、硬化コンクリートの水セメント比を推定することの可能性およびその問題点について考察することを目的とする。

2. 実験概要

(1) 反射電子像観察試料の作製および画像の取得

供用 37 年を経た橋梁橋脚からコンクリートコア供試体(直径 100mm×高さ 300mm)を 3 本採取し、各コア中央部から所定の大きさに観察試料を切り出した。切り出した試料をエタノールと水を用いた傾斜溶媒置換により内部水分を徐々に除去した。その後 t-ブチルアルコールとエタノールを用いた傾斜溶媒置換を行った後に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、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを使用して表面を研磨し、

金・パラジウム蒸着を施し反射電子像観察試料とした。

走査型電子顕微鏡を用いて、1 試料につき観察倍率 500 倍にて無作為に 30 枚の反射電子像を取得した(写真-1(a))。このとき 1 画素当たりの寸法は約 0.22 μm である。

(2) 骨材および一部の粗大毛細管空隙の除去

取得した画像に対して、目視判断に基づいて骨材の除去を行い、その面積率を求めた。また、残りの画像に対してグレースケールに基づく 2 値化を行い、画素寸法以上の空隙を抽出した(写真-1(b))。写真-1(b)に示すように、抽出された空隙の中には毛細管空隙とは判断されない大きなものが存在する。これらは骨材粒子の崩落部分やジャンカや気泡等に起因するものと考えられ、これを以下の手順に従い除去した。

著者らのこれまでの水セメント比を種々に変化させて観察を行ってきたセメントペースト供試体の空隙径分布($W/C=0.25\sim W/C=0.60$)のデータを基に、粗大毛細管空隙の円相当径に関する累積空隙径分布を求めた。 $W/C=0.50$ のセメントペーストの例を図-1 に示す。図-1 より、セメントペーストにおける粗大毛細管空隙の最大径は 10 μm 程度と判断され、その他の配合でも同様であったことから、より長期材齢においては 10 μm 以上の粗大毛細管空隙は存在せず、画像中のコンクリートコアの反射電子像に現れたそのような空隙はすべて欠陥部であるとしてこれを除去した。また、一部の骨材粒子界面に認められた剥離部も目視判断に基づきこれを除去した。

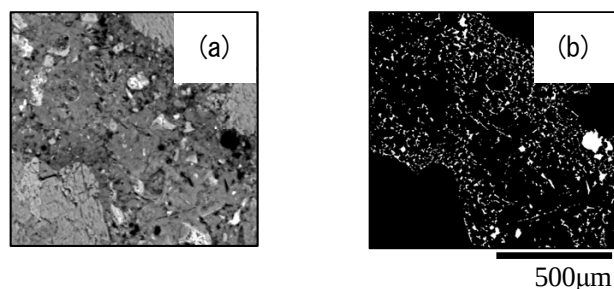


写真-1 コンクリートコアの粗大毛細管空隙抽出例 (a) コンクリートの反射電子像 (b) 粗大毛細管空隙の2値化画像

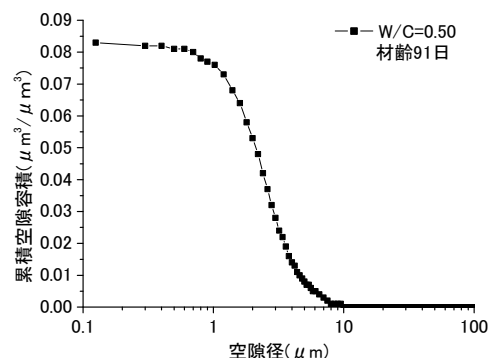


図-1 セメントペーストの累積空隙径分布

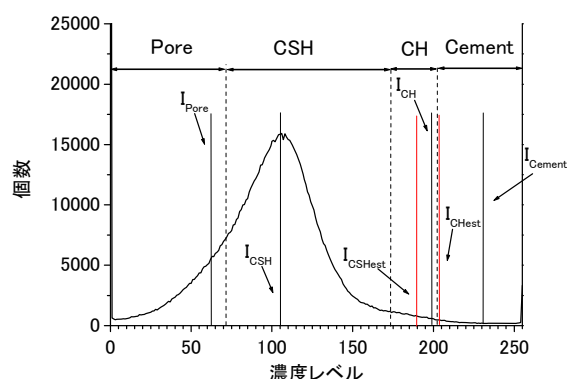


図-2 コンクリートグレーレベルヒストグラムの例

(3) グレーレベルシフト量の考え方[1]

図-2 は、取得した反射電子像のコンクリートのグレーレベルヒストグラムを示したものである。図中の I_{Cement} 、 I_{CH} 、 I_{CSH} および I_{Pore} はそれぞれ画像から求めた未水和セメント相、CH 相、CSH 相および粗大毛細管空隙相の中心位置である。反射電子像の濃淡レベルと平均原子番号との線形的な対応より、セメントと粗大毛細管空隙のグレーレベルが決定されるなら、中間の濃淡レベルを持つ CH 相および CSH 相のグレーレベルは理論的に求めることができる。しかし、図-2 にて実際に測定された I_{CSH} 、 I_{CH} は理論的に求めたグレーレベル I_{CSHest} 、 I_{CHest} より小さく、この差を CH 相および CSH 相内に画素寸法以下の微細な毛細管空隙が含まれることによるグレーレベルシフト量とした。式(1)により CH 相内の画素寸法以下の微細毛細管空隙率 δ を求めた。なお、CH 相と CSH 相を合わせてセメントゲル相として取り扱うこととし、両者の微細毛細管空隙率 δ は同一であるとした。

$$\delta = (I_{\text{CHest}} - I_{\text{CH}}) / (I_{\text{CHest}} - I_{\text{Pore}}) \times 100 \quad (1)$$

(4) Powers モデルを用いた水セメント比の推定

(3)より求めた微細毛細管空隙率と、画像解析により直接求めた粗大毛細管空隙率および未水和セメント面積率を用いて、生成されたセメントゲル体積を決定した。Powers[2]のモデルを用いて、そのセメントゲルを生成するのに必要なセメント体積率を求め、これと未水和セメント体積率の和を初期セメント体積率とした。セメントペースト空間から初期セメント体積を差し引くことによって初期水量を決定し、水セメント比を求めた。

3. 結果および考察

表-1 は、推定した初期の水セメント比と配合値を示したものである。表-1 より、推定値は配合値よりも

表-1 水セメント比の推定結果

試料名	推定値(%)	配合値(%)
No.1	58	46~47
No.2	62	
No.3	73	

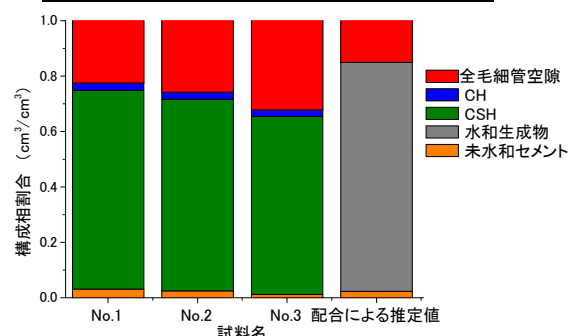


図-3 構成相割合の比較

10%以上高くなり、非常に大きな誤差を生じている。

図-3 は、本手法により推定したコンクリート供試体中のセメントペーストマトリックスの構成相割合を示したものである。図中、全毛細管空隙は画像から直接求めた画素寸法以上の粗大な毛細管空隙と、グレーレベルのシフト量から推定した微細な毛細管空隙の和である。いずれの供試体も残存セメントはわずかであり、ほぼ完全に水和は進行している。よって、初期セメント体積は反応生成物量でほぼ決定されることになる。しかし、本手法では毛細管空隙が過大に評価されているようであり、結果としてその補集合空間としての反応生成物体積が小さくなり、初期セメント体積が小さく評価されたと考えられる。これは、図-2 に示すようにグレーレベルヒストグラムにおいて明確なピークを示さない粗大毛細管空隙と CSH 相のしきい値の決定が、粗大毛細管空隙率のみならず画素寸法以下の毛細管空隙率の決定に敏感に影響を及ぼしたためと考えられ、しきい値の決定をより精度良く行う必要があることを示している。

4. 結論

既設コンクリートに対してグレーレベルのシフト量を用いて水セメント比を推定した。推定値は配合値よりも高い値を示し、粗大毛細管空隙のグレーレベルしきい値の決定の重要性が示唆された。

参考文献

- [1]DANG Giang Hoang: 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp.525-526,2010.3
- [2] Powers,T.C: ASTM Bulletin, No.158, pp.68-76, 1949