

蛍光法による間隙および気泡の可視化と 軽量コンクリート評価への応用

VISUALIZATION AND EVALUATION OF AIR-VOIDS AND PORES IN LIGHTWEIGHT CONCRETE
USING A FLUORESCENT SUBSTANCE

楠田 啓*・西山 孝*・本居 孝治**

By Hiromu KUSUDA, Takashi NISHIYAMA and Koji MOTOI

1. はじめに

建設構造物の大規模化に伴って、建設用軽量材料の開発が重要な課題となってきた。コンクリートの分野では、内部に多数の気泡をもった軽量コンクリートが実用に供されている。この種のコンクリートに含まれている種々の気泡や微細な間隙は軽量化に貢献しているが、それらの性質や強度や耐久性などに及ぼす影響は判明していない^{1)~2)}。このことが新しい軽量コンクリートの開発の妨げとなっている。そこで、最近開発した蛍光法あるいは染色法^{3)~5)}と樹脂の充填法を工夫し、軽量コンクリート中の気泡や微細な間隙の評価を試みた。さらに画像処理を併用することによって、気泡の大きさ、量、連続性などの定量的な把握を検討した。

なお、軽量コンクリートには、多数の気泡を骨材中に含ませる場合、セメントペースト中に含ませる場合、さらに両方に含ませる場合の3種類がある。ここでは、骨材中およびセメントペースト中の2つについて調べ、両者が共存するときは両方の性質が表れるものと考えた。

2. 試料

供試試料としては、オートクレーブ養生により多数の気泡を発生させた気泡コンクリート(試料No.1)と、膨張頁岩を焼成した人工軽量骨材を粗骨材として用いた軽量骨材コンクリート(試料No.2)の2種類を使用した。

蛍光法では気泡や微細な間隙の観察に際して、前処理としてあらかじめ蛍光染料を添加した樹脂を充填する必要がある。この充填方法には大きく分けて2つの方法が提案されている。その一つは蛍光剤を添加したシアノアクリレートを切断表面から浸透させ、過剰の樹脂を削り取る方法で、もう一つは蛍光剤および赤色の染料を添加したメチルメタアクリレートを試料の外部から浸透させた後に切断する方法である^{3)~5)}。さらに後者については、樹脂を浸透させる段階で、浸透条件(加圧、減圧、常圧)に差をつけることができる。なお、図1は、常圧の状態と減圧した状態での充填方法である。

3. セメントペースト中および軽量骨材中の気泡の形状

セメントペースト中および軽量骨材中の気泡や間隙を蛍光法により可視化し、顕微鏡により観察した結果は次の通りである。

3.1 セメントペースト中の気泡の観察

気泡コンクリート(No.1)中の気泡の存在状況を知るために、試料表面からシアノアクリレートを浸透させ、紫外線照射により観察すると、図2aのようになる。気泡の部分のみが黄色に発光しており、気泡の分布状態を鮮明に把握することができる。また、試料の外部からメチルメタアクリレートを減圧状態で浸透させた試料では、気泡は蛍光剤と同時に樹脂に添加されている赤色の染料によって着色されているので、紫外線照射よりも可視光によって鮮明に識別できる(図2b)。なお、後に述べるように減圧状態で充填させると、樹脂はセメントペースト中に存在している微細な間隙のみならず気泡にまで充填されるので、全体が発光することになる(図4a)。したがって、セメントペースト部分と気泡との間の輝度の差が小さくなり、気泡の識別は困難である。

3.2 軽量骨材中の気泡の観察

軽量骨材(多量の気泡を含む)を使用したコンクリート(No.2)についても、減圧状態でメチルメタアクリレートを充填させ観察を行った。この場合は、軽量骨材の周囲が発光し、セメントペースト中の微細な間隙には樹脂が十分に充填しているにもかかわらず、軽量骨材の内部の気泡には樹脂がほとんど充填されない(図3b)。すなわち、軽量骨材中の気泡は連通性が乏しいことがわかる。

4. 気泡や間隙の連続性

すでに述べたように、気泡や間隙には連続性の異なるものが存在することが推察されたので、この点についてさらに検討した。まず、同一試料(No.1)についてメチルメタアクリレートを減圧状態および常圧状態のもとで充填させた2種類の試料を作製し、比較検討したところ、異なった現象が認められた。すなわち、図4aは減圧状態で、図4bは常圧で作製した試料を紫外線照射により観察したもので、いずれの場合もセメントペーストの部分にはメチルメタアクリレートが浸透している。しかし(図3、4は口絵写真3、4に掲載)

* 京都大学工学部資源工学教室(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 積水化学工業(株)京都技術センター

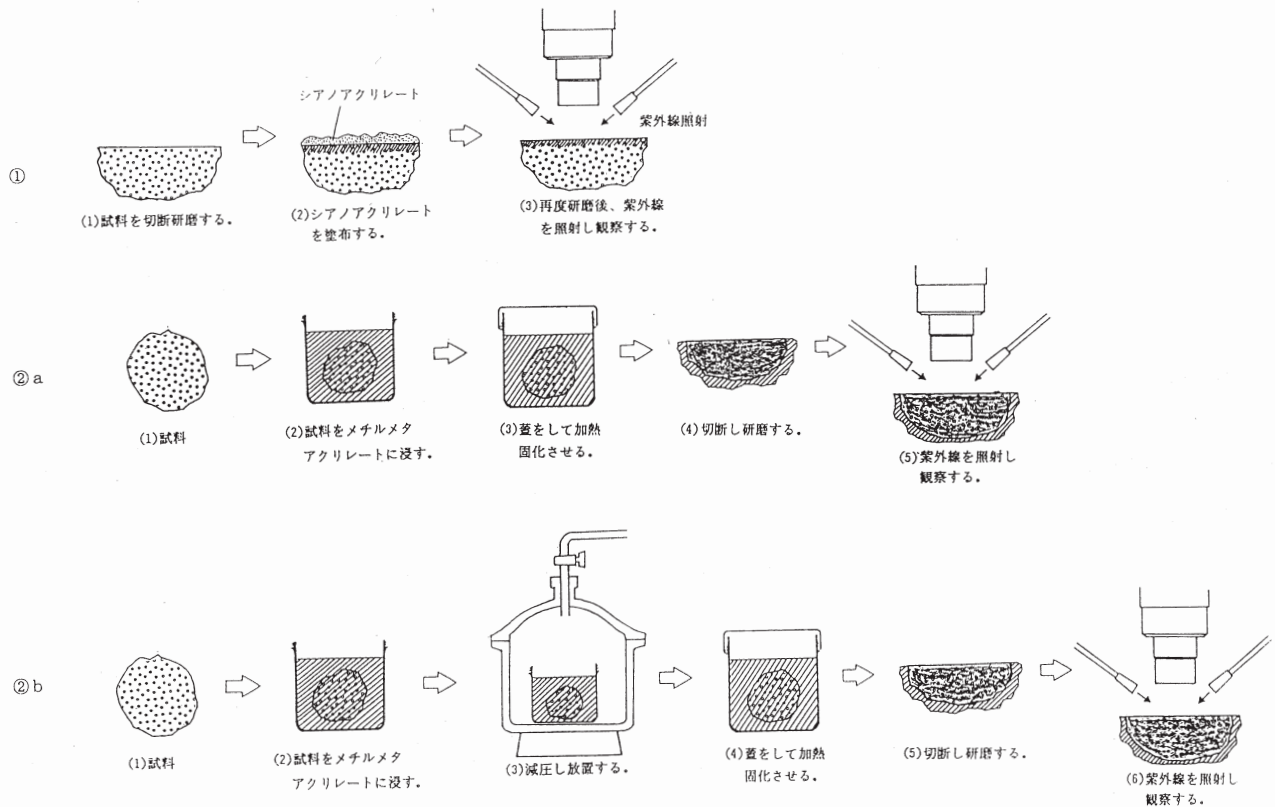


図1 試料の作製方法

① : シアノアクリレートを充填する方法

②a : メチルメタアクリレートを常圧状態で充填する方法

②b : メチルメタアクリレートを減圧状態で作製する方法

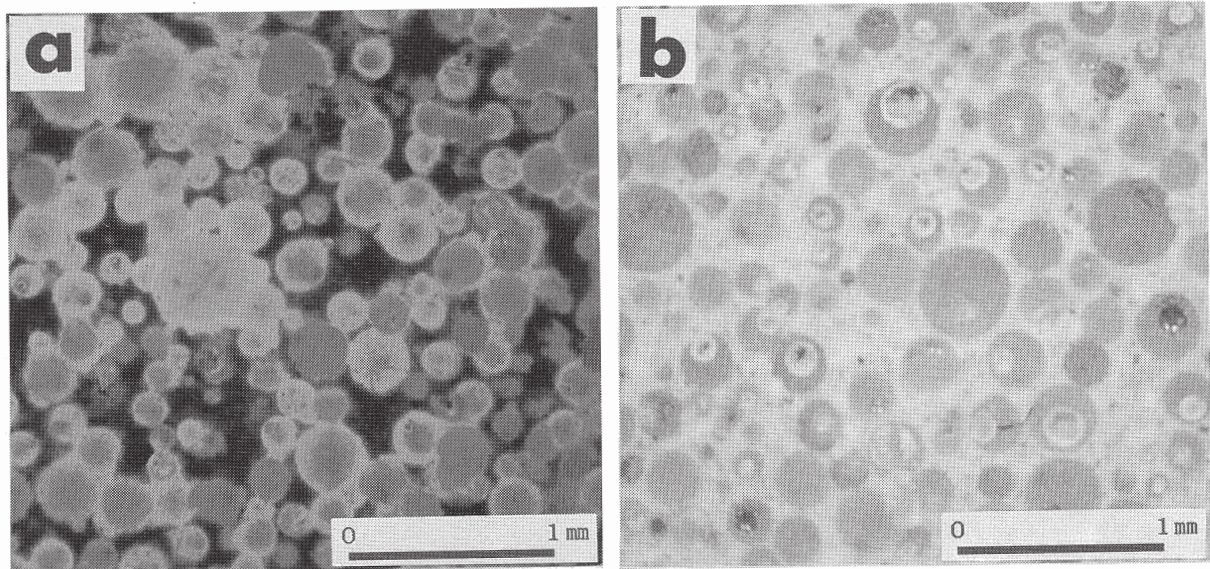


図2 樹脂を充填した気泡コンクリート (試料No.1)

a : シアノアクリレートを表面から充填させた試料 (紫外線)

b : メチルメタアクリレートを外部から減圧状態で充填させた試料 (可視光)

気泡の部分を見ると図4 aではほとんどの気泡が樹脂で充填されているのに対し、図4 bにおいては樹脂は気泡へ浸透していない。

軽量骨材 (No.2) 中の気泡については、先に述べたように減圧状態でもメチルメタアクリレートが十分に浸透していない部分が認められた。そこで、試料を切断し、

切断面にシアノアクリレートを塗布することにより外部と連続していない気泡の可視化を試みた (図4 c, d)。図4 dにおいて青色に発光している部分は外部からメチルメタアクリレートが浸透した部分で、連続した気泡であることを示している。一方、黄色に発光している部分は切断後にシアノアクリレートが充填した部分で、外部

(図3、4は口絵写真3、4に掲載)

とは連続していない独立した気泡と推測される。このように蛍光法では独立した気泡と連続した気泡とを樹脂の種類と浸透条件を変えることによって識別することが可能となる。

5. 軽量コンクリートの凍結融解に対する耐久性

樹脂の浸透がセメントペースト中の微細な間隙と気泡の部分とは異なった挙動を示すことが明らかとなった。一方、凍結融解に対する耐久性に関する気泡の役割は、岡田らによると、まずセメントペースト中の水の凍結膨張によって発生する氷圧により凍結していない水が気泡へと押し出され、氷圧が緩和されることによって、耐久性が向上すると考えられている⁶⁾ (図5)。すでに述べたように、樹脂はセメントペースト中の微細な間隙へは容易に浸透するが、気泡では空気が満たされていると浸透しにくく、減圧すると初めて空気と樹脂とが置き換わるのが認められた。この現象は岡田らの考えを裏付けるものであり、その理由としては、気泡の周囲には気泡剤やAE剤などの影響でセメントペーストの部分より浸透性が低くなっているか、あるいは樹脂の浸透によって気泡中の空気が封じ込められ、気泡内の圧力が上がるため充填が妨げられるものではないかと思われる。

また、軽量骨材中の独立した気泡と連続した気泡については、蛍光法によって鮮明に識別されたが、当然のことながら独立し、吸水率に関係のない気泡が多いほど軽

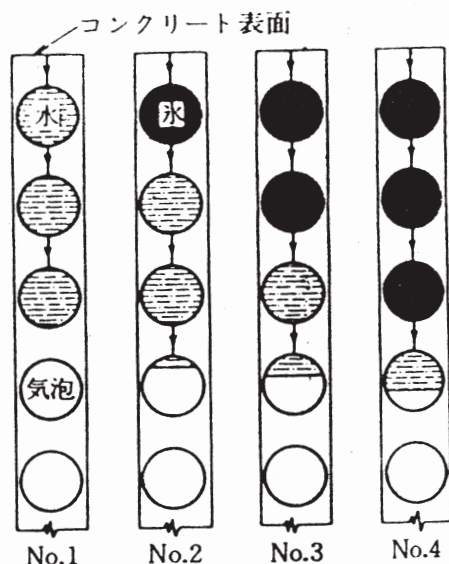


図5 凍結融解作用の機構 (岡田, 明石, 小柳(1990)⁶⁾)

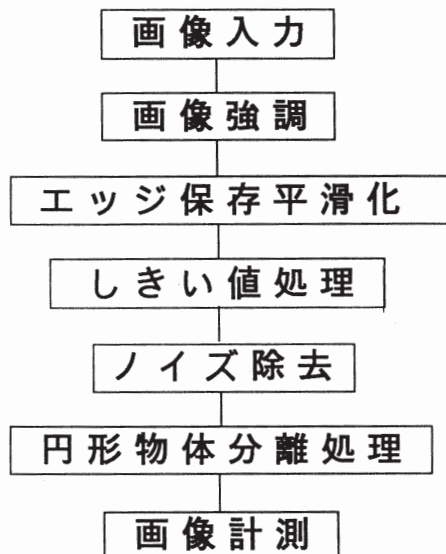


図6 画像処理フロー

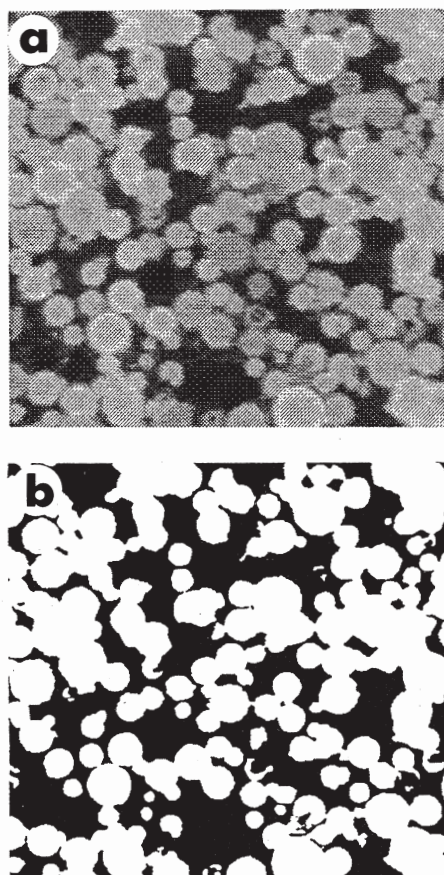


図7 画像処理によって抽出された気泡
a: 紫外線照射により入力した濃淡画像,
b: 抽出された気泡の2値画像 (白色部が気泡)

表1 画像処理結果

	気泡量 (面積%)	気泡量 (体積%)	気泡数 (個/mm ²)	気泡の平均 面積(mm ²)	気泡の最大 面積(mm ²)	気泡の平均 等価円直径(mm)	気泡の最大 等価円直径(mm)
No.1	65.4	52.9	7.5	0.06	0.37	0.27	0.61
No.2	58.4	44.6	2.7	0.19	1.81	0.38	1.52

量骨材としては好ましいことになる。このことは、これまでの経験から、軽量骨材は軽く、かつ吸水率の小さいものが凍結融解の耐久性に優れているという報告⁶⁾とも一致している。

6. 画像処理

以上のことから、軽量コンクリートの耐久性を具体的に評価するためには、連続性のある気泡と独立した気泡を個別に扱い、その量を求める必要がある。そこで、まず気泡コンクリート中のすべての気泡にシアノアクリレートを充填させ、画像処理により気泡を抽出し、定量した。画像処理の手順は図6に示すとおりで、画像強調、エッジ保存平滑化、しきい値処理などの手法を組み合わせた。気泡のみを抽出した画像は図7の通りである。また、画像解析計算機能を利用すると、気泡の量を求めることができる。たとえば、図7bのような画像では、気泡量は体積比に換算すると52.9%となる。その他に、単位面積当りの気泡の個数、気泡の最大面積や等価円直径（面積値で等価円としたときの直径）などのパラメータを求めると表1のようになる。

一方、同じ試料について従来の測定方法により有効間隙率を求めると、減圧した状態では77.1%、常圧では36.5%となる。先に述べたように、減圧した状態での有効間隙率は、セメントペースト中の微細な間隙と気泡とを合わせたものであり、常圧での有効間隙率はセメントペースト中の間隙のみを表していると推察されるので、気泡による間隙率はそれらの差、すなわち40.6%となる。一方、画像処理により求めた気泡量は52.9%であり、有効間隙率から推定した値の1.3倍で、ほぼ一致しているとみなされる。

7. 水と樹脂の浸透性の比較

以上の実験は2種の樹脂と3通りの充填方法を使い分けて軽量コンクリート中の気泡の性質を調べたものであるが、水と樹脂では表面張力も異なり、水についても樹脂と同様の浸透現象が起こっているかどうかの問題である。水の場合は樹脂のようにうまく蛍光剤を固定する方法がないので、概略の傾向をみるために水に溶ける蛍光剤を試料に浸透させて同様の実験を行ってみた。図8は紫外線照射により観察したもので、セメントペースト部分の小さな間隙に浸透した水に含まれていた蛍光剤が残留し、発光しているものと思われる。一方、比較的大きな間隙である気泡では水が充填されていたか、あるいは充填されていなかったかを判定する基準はみつからない。しかしながら、すでに述べたように、従来の方法により推測された気泡の量と画像処理によって求められた気泡量との間には比較的良好な一致が得られていることと、微細な間隙にみられる水と樹脂の類似性を考え合わせると、

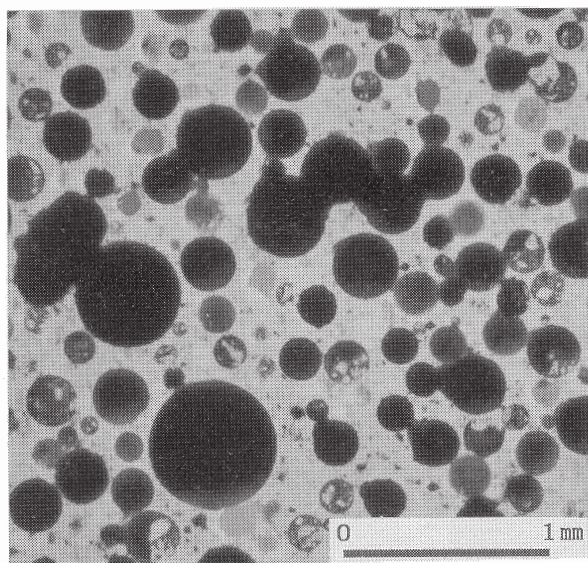


図8 水溶性の蛍光剤を浸透させた試料（紫外線，試料No.1）

水と樹脂の浸透現象には大きな差はないようである。

8. おわりに

軽量コンクリート中の気泡や間隙の状況を明らかにするために、蛍光剤や染料を添加した樹脂を気泡コンクリートおよび軽量骨材コンクリートに充填し、気泡や間隙を可視化し、評価を試みた。まず、セメントペースト中の気泡については、ペースト中の微細な間隙は樹脂が充填されるが、比較的大きな間隙である気泡は樹脂が充填されにくい状況にあることが判明した。また、軽量骨材中の気泡は樹脂の浸透法を変えることによって外部と連続したものと独立したものとに区別できることも明らかになった。さらに、蛍光法と画像処理を併用することにより気泡の量や形状を容易に定量的に把握することが可能となった。今後、耐凍害性能の実用評価と関連づけることにより軽量コンクリートの有効な評価法への応用が期待される。

参考文献

- 1) 千歩 修，鎌田英治：第44回セメント技術大会講演集，478，1990．
- 2) 中村雅彦，大西孝明，神谷昌岳：セラミックス論文誌，37-42，1991．
- 3) T.Nishiyama, S.Maekawa, Y.Kusakabe and K.Nakano : CAJ Review, 170-171, 1988.
- 4) 西山 孝，前川慎喜，楠田 啓，北川元紀，中野欽一：セメントコンクリート論文集，590-593．
- 5) 西山 孝，楠田 啓，北川元紀：資源と素材，106，10，573-580，1990．
- 6) 岡田 清，明石外世樹，小柳 治 編：土木材料学，国民科学社，1987．