

細孔構造の可視化 (画像データからの細孔情報の抽出)

五十嵐 心 一*

1. 序 論

コンクリートはいままでもなく多くの細孔を含んだ多孔質材料であり、単純にコンクリートの要求性能を強度と耐久性の2つであると考え、そのどちらに注目したとしても、性能は細孔構造によって決まるという考え方に異論はないものと思う。よって、古くから数多く行われてきた細孔構造の観察とは、コンクリートの性能発現や劣化機構の解明に直結するものであって、まさにコンクリートの材料科学における問題解決のための正攻法的手段であるといえる。

図-1はIUPAC¹⁾(国際純正および応用化学連合: International Union of Pure and Applied Chemistry)が与えている多孔質材料の細孔径の区分を示したものである。ミクロ、メゾ、マクロの3つの区分があり、図中にはコンクリート工学の分野にて一般的に用いられる術語で表した細孔の区分と、それが主として関わるコンクリートの物性を併せて示している。コンクリート中の細孔の区分や定義は研究者により境界が若干前後したり、区分が細分化されたりするが^{2)~4)}、基本的には 10^7 オーダーの細孔径範囲の細孔が、全体の細孔構造を構成していると考えるのが一般的である。また、このような広範

囲の寸法にわたる細孔が存在することが、他の多孔質材料とコンクリートの際立った相違点でもある。

しかし、ここでもっと注目すべき点は、我々がコンクリートの物性として日頃考えている性質は、すべての細孔径範囲の細孔が一様に影響を及ぼして決定されているのではなく、その物性を主に決定づける細孔径の範囲が存在することである。つまり、クリープや乾燥収縮ではナノメートルレベルの細孔の関わりを無視しえない場合もあるだろうが、それ以外の強度特性や耐久性は比較的大きな毛細管空隙^{注)}、マイクロメートルレベルかそれ以上の大きさの細孔の存在により強く影響を受けるのである。このことは、微細なレベルに至るまでの個々の細孔をすべて特性化、定式化して、その影響を考慮するようなモデル化は不可能であったとしても、考察の対象とする物性に対応した細孔構造を観察し、それを特性化することができるならば、着目している物性の発現の推定やそれに応じた材料設計など、種々の工学的判断が可能になることを意味する。よって、細孔構造の可視化においては、物性に応じた観察手段を適切に選択することが大前提となる。

細孔構造の観測手段としてはこれまで多くの方法が用いられてきた。水銀圧入法、気体吸着法、ピクノメーター

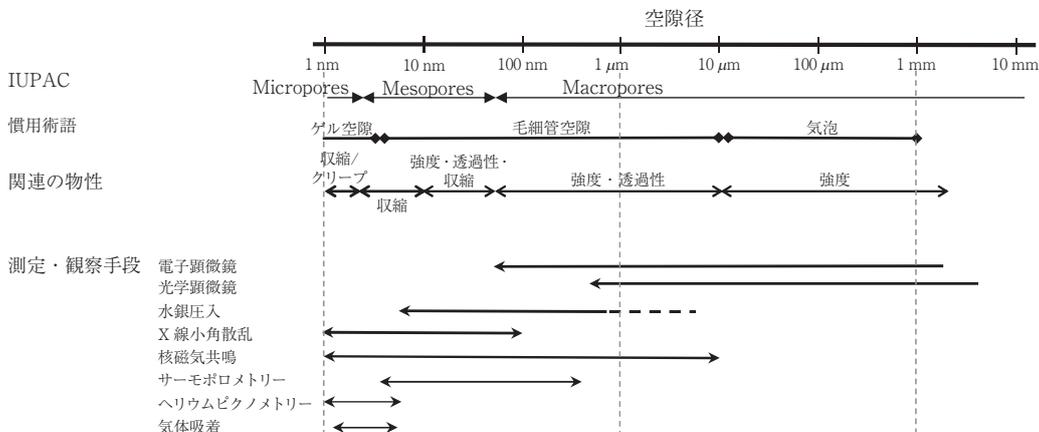


図-1 細孔の分類および測定方法と関連するコンクリートの物性

注) 本稿では用語として「細孔」を主として用いるが、毛細管細孔という言い方は一般的ではないので、慣用に従い「空隙」も使用する。本稿の範囲内では基本的に両者は同意である。

* いがらし・しんいち／金沢大学理工学域 教授 (正会員)

法、サーモポロメトリー、核磁気共鳴法、X線小角散乱、顕微鏡観察、X線CT法など⁵⁾、それぞれの手段で観察対象とする細孔径は異なる。これらのうち画像として細孔の幾何学的特徴を直接観察できるのは、顕微鏡観察と近年研究報告が国内外で散見されるようになってきたX線CT法である。しかし、汎用性もしくは普及性という観点から、現時点では顕微鏡観察が圧倒的に身近な手段であり、高性能なデジタルマイクロスコープも安価に入手できる時代になっている。また、この顕微鏡観察の中でも、電子顕微鏡によって観察できる細孔径範囲は比較的広く、コンクリートの通常の興味の対象となる物性の主たる影響範囲である細孔径をほぼ網羅している⁶⁾ (図-1)。

本稿においては、電子顕微鏡観察における細孔構造の特徴量の評価法について説明する。ここで評価法と述べたのは、現代では、画像を取得して“見えた、見えない”の定性的な判断をするだけでなく、見えているものに対して画像解析を適用し、定量的な指標に基づいてその画像を評価、解釈することが求められるからである。前述の最先端技術であるX線CT法も、強力な画像解析技術があってこそその手段なのである。つまり、画像を取得するだけでは十分ではなく、その画像をいかに評価するか、その評価手法の開発も重要な研究テーマとなっている。以下においては、画像解析の適用を前提とする細孔構造の評価法について、その基本手順を振り返ってみることにする。

2. 画像から抽出される特性値

電子顕微鏡観察にて細孔構造の観察が目的である場合は、まず初めに、対象供試体から切り出した試料表面に、樹脂やその他の材料を含浸し、細孔をその材料で充填する。これによって、細孔と周囲の固体相が区別して認識できるようになる⁷⁻⁹⁾。例えば樹脂を充填した場合は、それが硬化した後に表面を丁寧に研磨し、研磨面の画像を観察することが行われる。そして、その平滑な表面内にて、他と明確に区別できる相として現れた細孔断面の幾何学的な特徴から、様々な特性値を求めることになる。この場合、一般には対象が3次元的に等方性を有し、均質でランダムな構造を有することを仮定する。そして、研磨面を観察するということが、3次元的に分布している対象要素の母集団の中から、2次元の断面(標本)を取り出して、その標本中に現れた要素の統計量から、3次元の微視的な構造の特徴を推定するという標本調査を実施することを意味する。例えて言うなら、中に含まれている対象が球であることを知らずに、試料を平行にスライスしていったとすると、大きさの異なる円形断面が現れる(図-2)。これを頭の中でつなぎ合わせて考えれば、対象物は球であることが推察される。また、ある試料をいろいろな断面で切ってその切断面を観察したとき、どんな断面でも円形の粒子しか見えなかったら、こ

の中に含まれる粒子としては、球状のものしかないと判断することができる。これと同様なことを細孔構造について行くと考えれば、そのプロセスがイメージしやすいかもしれない。ただし、断面に現れた対象物の幾何学的特徴(形)そのものを見るには限らず、その特徴の統計量を見る点がやや異なる。この2次元構造から3次元構造を合理的に推定することは、ステレオロジーと称される学問分野の主題であり、いかに“バイアスの入らない評価”を行うかが重要となる。

3次元的不規則ネットワーク構造を持つ細孔構造に対して、2次元の切断面画像が得られたとき、3次元の元の構造の情報は1次元小さくなった量として現れる(図-3)。これらの1次元低下した量(ステレオロジー量)の間には、様々な基本関係式がある。古くから用いられてきたステレオロジー基本式を、慣用的に用いられる文字式を用いて式(1)に示す¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} V_V &= A_A = L_L = P_P \\ S_V &= \frac{4}{\pi} B_A = 2I_L \\ L_V &= 2Q_A \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 V は体積、 A は面積、 L は長さ、 P は点の個数、 S は表面積、 B は境界長さ、 I は交点数、 Q は対象物数を表し、これらが添え字に現れるときは、参照空間がその文字に対応することを表す。例えば、式(1)1行目の V_V は、ある参照体積 V に対する対象の体積 V ということになり、 V_V は対象物の体積率を表し、長さ³/長さ³

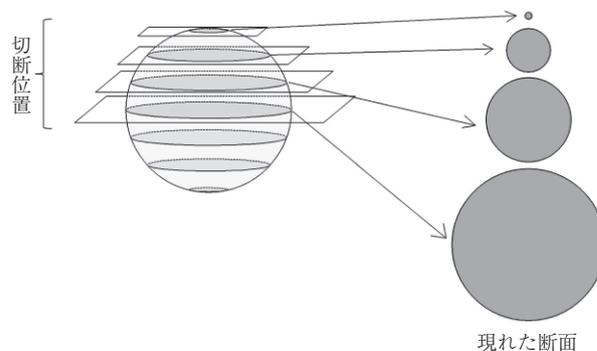


図-2 切断面の形状からの元の球の推定

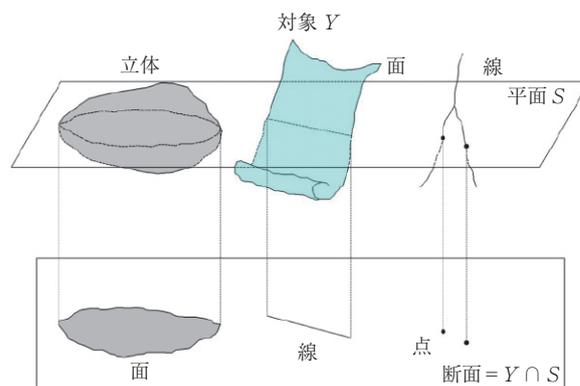


図-3 切断面に現れる1次元小さい情報

で無次元となり、1行目のステレオロジー基本量はすべてこの次元となる。2行目も同様に考えると、 S_V は参照空間単位体積 V 当たりの表面積 S 、つまり比表面積を表し、長さ²/長さ³=長さ⁻¹の次元を持つ。また $V_V=A_A$ をDelesseの法則と呼び、体積率は面積率に等しいことを表し、画像解析にて最もよく用いられる関係式である。さらに、 $V_V=L_L=P_P$ は、走査線を何本も引いたときの全線分長さに対する対象物を横切った線分長さの割合(L_L)、および観察領域内に複数の点をばらまいたとき、ばらまいた全点数に対する対象物中に載った点の割合(P_P)が、それぞれ評価対象物の体積率 V_V に等しいことを表している。これは従来、コンクリート中の気泡体積と気泡間隔係数の測定におけるリニアートラバース法とポイントカウント法にて用いられてきたので、コンクリート工学分野においては、比較的馴染みの深い関係式であると思う。

これらの式を用いて、画像から細孔構造を特徴づける細孔量(ポロシティー)、細孔寸法、細孔比表面積および細孔径分布を求めることになる。これらは、比較的単純に画像から求められるものもあれば、ある程度の仮定を必要とするものもある。以下に、これらをどのように求めていくか、手順の概略を述べる。

3. セメントペースト中の細孔構造

(1) 細孔量(ポロシティー)

図-4は水セメント比が0.40で、水中養生を行った普通ポルトランドセメントペーストの材齢7日の電子顕微鏡像(反射電子像)を示している。反射電子像ではその固体の平均原子番号が大きいほど明るく映るグレースケール像であるので、白い部分が未反応セメントで、黒い部分は細孔(細孔に充填されているエポキシ系樹脂の平均原子番号が他よりも小さい)、それらの中間のグレー部分は反応生成物である。通常の画像解析の手順に従ってしきい値を決め、黒い部分である細孔を抽出すると、いわゆる2値画像(白と黒、つまり1と0の2つの値で表されている)を得る(図-4(b))。あとはこの黒い部分の面積率を画像解析ソフトウェアに必ず備わっている計

数機能を使って求めればよい。このとき、画像内の面積率は3次元構造の体積率に等しいという前述のDelesseの法則により、細孔量が得られたことになるのはいうまでもない。

さて、ここでより微細な特徴が見えることを期待して、例えば、もっと高倍率にして図-4(b)の一部分を全視野として観察したとする((i)拡大図)。すると、黒い部分の面積率は数10%になり、さらには高倍率にすることによって、それまでは見えていなかったもっと小さな細孔も見えてくるであろうから、結果としてポロシティーは数10%以上ということになる。このような判断が誤りであることは明らかであるが、ではいったいどれぐらいの視野を観察すればよいのか、つまり細孔構造の評価に対する適性倍率はどれぐらいかという疑問が浮かぶ。これに対する一つの目安が代表体積要素(Representative Volume Element)という考え方である^{11),12)}。RVEは系全体の特徴を反映した領域で、この範囲の視野(標本)を複数にとって平均化すれば、それが求めようとしている系全体(母集団)の特徴量に収束しうような大きさのことである。一般的に毛細管空隙として細孔量を求めることが目的の場合には、400~600倍ぐらいで観察すればRVEを十分に含み、その画像には図-1に示した物性との関連で決まる主たる関心領域の細孔径も含まれる。さらには、毛細管空隙と他の構成相との関係において解釈すべき微視的構造の特徴も十分に観察できるので、この程度の倍率を採用する場合が多い¹³⁾。

(2) 細孔寸法と細孔径分布

図-4(b)の細孔を抽出した像を見ると、黒い部分は不規則形状の領域状のものもあれば、小さな粒子形状のものもある。ここで注意しなければならないのが、これらがすべて大小様々な大きさの毛細管空隙であるとは言いきれないことである。例えば、図-4(a)で破線で囲んだ部分の原画像を見ると、その周囲を縁取りするような環状の反応生成物に囲まれた黒色粒子が所々に認められ、これはHadley粒子と称されるものである¹⁴⁾。内側の黒色部分は、本来セメント粒子(固体)が占めていた場所が、まだ反応生成物にて充填されることなく残っていると

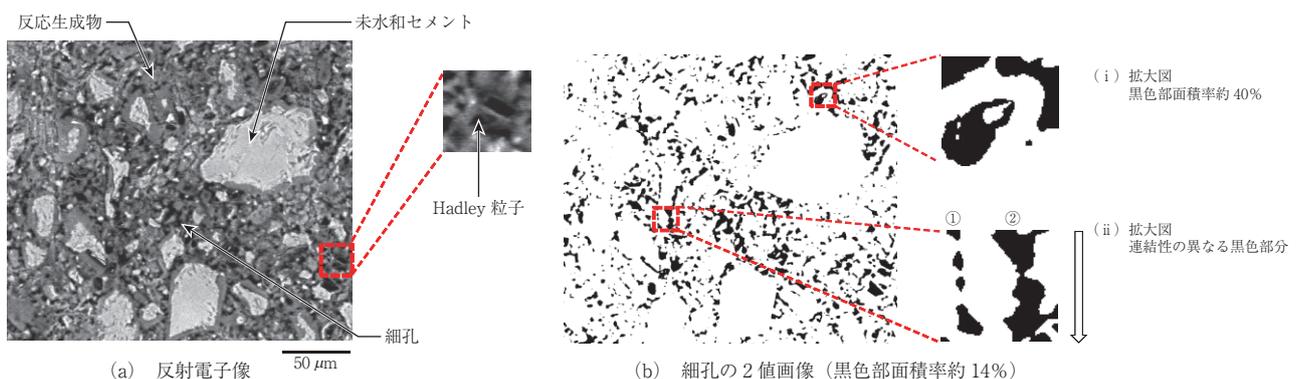


図-4 反射電子像とその2値画像の例 (W/C=0.40, 水中養生材齢7日)

ろである。一方、毛細管空隙は初めに練り混ぜ水が占めていた空間が、その後反応生成物によって充填されることなく残存した空隙である。よって、毛細管空隙の幾何学的な特徴としては、粒子としての輪郭を持たないような不規則形状の隙間のように見え、その成因は Hadley 粒子とは本質的に異なる。画像にて個々の黒色部分を Hadley 粒子なのか毛細管空隙なのか個別に判断していくことは不可能である。よって、黒色部分はすべて毛細管空隙であるとみなして計数することが一般的であり、黒色部分抽出のための 2 値化処理が行われる。

それらの不規則形状の黒色部分（細孔）の寸法を表すには、ちょっとした工夫が必要である。まずは大小様々な粒子があるのだから、粒子径の各区間の頻度に応じたヒストグラム、もしくは加積曲線で表すのが自然である。このとき、そのような不規則形状の粒子のどこを粒径として採用するかを考えねばならない。フェレ径と称される一定方向の最大幅が用いられる場合もあるが、一番直観的に理解しやすいのが円相当径と言われるもので、不規則形状の粒子をそれと面積が等しい円に置き換え、そのときの直径をその細孔の径として用いる（図-5）。これを大きさに応じて並べ替えれば細孔径分布が得られる。この円相当径計算も、画像解析ソフトに付属している基本機能である。このとき、不規則形状の粒子の 2 次元面内での分布に関して、粒子を表す画素の連結の状況を合理的に判断して、あるところからあるところまでを一つの粒子として認識し、同じ粒子内の画素には同じ番号（ラベル）を付けるという重要な操作がなされる。これを計数すればステレオロジー量としての粒子個数が得られることになる。これに関わる一連の画像演算も画像解析ソフトの中で行われるので、通常は、ユーザーである我々がアルゴリズムなどを意識する必要はない。図-6 に図-3 の 2 値化像について求めた円相当径に基づく細孔径分布を示す。図-6 の細孔径分布をよく見ると、例えば直径 $10\mu\text{m}$ 以上の大きな細孔が存在していることになっている。しかし、図-3 を見れば明らかなように、必ずしもそのような大径の細孔が存在するのではなく、細長く連結した細孔のせいで得られる場合もあることに留意せねばならない。また、細孔径分布といえば、一般的に水銀圧入法の結果を思い浮かべるが、水銀圧入法で有意とされる細孔径範囲 ($\leq 10^{-1}\mu\text{m}$ オーダー) とは、測定範囲が大きく異なることにも注意しなければならない。

このようにして画像情報をもとに得られた細孔径分布の意味をどう考えればよいのか、これに答えるのは簡単ではない。例えば、水銀圧入法のように細孔に対して円筒仮定をおき、図-4 (b) に関して単位厚さを考え、大小様々な円筒が紙面手前から奥に向かって貫通している（スイスチーズのような状態；ただし単位厚さでは貫通していると考え、それ以上の長距離にわたって貫通しているとは限らない）とする。そして、紙面直角方向

の透過経路の断面がちょうど見えていると仮定することは可能である。しかし、実際には図-4 (a) の画像は、セメントペーストが等方性で均質にランダムであることを仮定して、そこから任意の位置で切り出した面に過ぎない。つまり、特定の物質透過方向に直角な断面を観察しているわけではない。例えば、図-4 (b) の白抜き矢印で示したように ((ii) 拡大図)、上方から下方へ向かう 1 次元的な物質透過を考える。この図が透過方向と平行な任意の断面とすれば、①の細孔は数 μm 進んで行き止まりになるが、②の細孔は途中曲がりくねったり細くなったりしながらも、より長い距離を進むことができる。いずれもより長い経路として連続域を形成するためには、ここでは見えていない分解能以下の微細な細孔と連結していなければならない。単純な直線的貫通孔と考えたのでは、このような幾何学的な特徴が反映されていないことになる。その一方にて、例えば 2 値画像内の小さい粒子や曲がりくねった粒子は、これとつながる別の断面では、それぞれ大きい粒子であったり、スイスチーズ状の円形断面であったりしたかもしれない。そもそも微細な細孔にも繋がらずに、途切れてしまっていることも十分ありえる。つまり、この断面からある距離前後した断面を切り出したら、この断面と全く同じ細孔構造が現

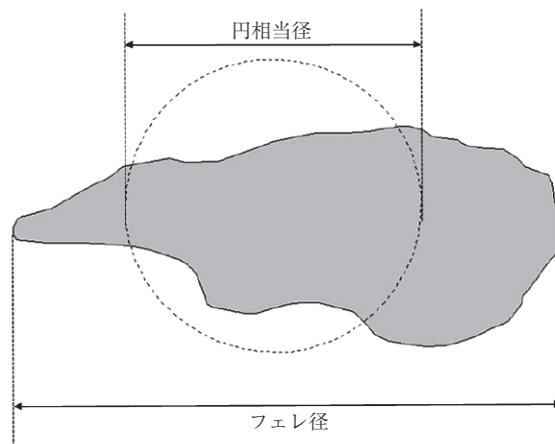


図-5 不規則粒子の円相当径とフェレ径

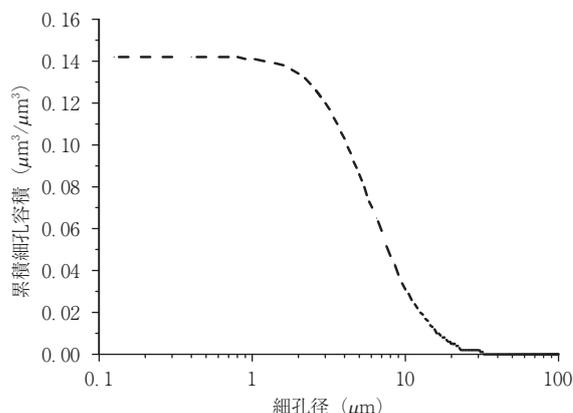


図-6 円相当径で表した細孔径分布 (W/C=0.40, 水中養生材齢 7 日)

れることはないと言断できる。それでも、先の等方、均質、ランダムな仮定から、統計的には同じような性質を持つ断面が現れると考えることは妥当である。すると、この断面の2値画像は、この断面に至るまでの細孔の3次元的な変化の来し方、もしくはこの先の行く末の情報も含むことになる。よって、図-4の結果をもとに物質移動に関してモデル化を考える場合には、これらの点を考慮して、画像から面積率以外の有用な幾何学的な情報を読み取り、それをモデルに反映していくことが必要となる。しかし、少なくとも図-6の細孔径分布は配合や材齢によって異なるので、定量的な比較の一手段としては有用であると考えられる。また実際に、このような電子顕微鏡観察にて抽出しうるある特定範囲（比較的径の大きな毛細管空隙）の細孔量が、コンクリートの物質透過性評価の有用な入力パラメーターになることも指摘されている^{15),16)}。つまり、材料科学の見地から物性発現の詳細メカニズムを考えたら、もっと微細な細孔が関与しているかもしれない(図-1)。しかし、材料工学的見地から、物性を推定し、材料設計に反映させていくことが目的ならば、例えば従来の水銀圧入法の結果に基づく“径が数10 nm以上の細孔量と相関する”という知見を受け入れて、ナノメートルレベルまでの小さな細孔を可視化しようとしなくても、大きな細孔の特徴さえ捉えられれば目的が達せられる場合があることを認識しておきたい。

(3) 細孔比表面積

コンクリートの物質透過性やその他の特性を考えるときに重要なパラメーターが細孔の比表面積である。この値も2次元断面から比較的簡単に求められる。例えば、図-7に示すように、一定方向の走査線を適当に引いて、この走査線が黒色粒子表面を横切っている箇所を数える。走査線の単位長さあたりの表面を横切る点の数を求め、それを2倍すると単位体積当たりの細孔の面積(比表面積) S_V が得られる ($S_V=2L$; 式(1))。つまり必ずしも円や球状ではない粒子に対して、2次元断面から簡

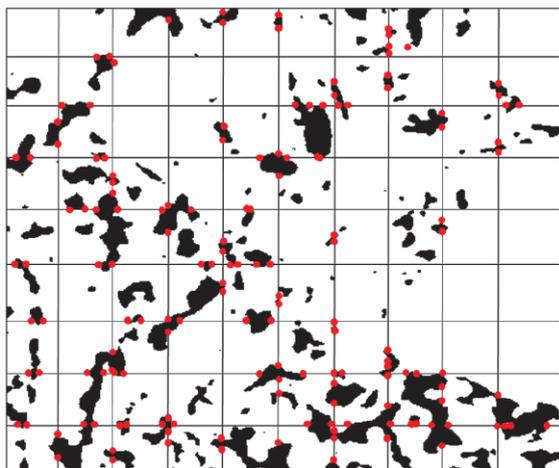


図-7 走査線と着目粒子との交点

単に表面積を求めることができる。一方、円筒仮定をすれば、(2)の細孔径分布から単位厚さあたりの細孔壁の面積が求められるので、比表面積が計算できることになる。また、これに関連して、単純に(2)で求めた細孔の面積率から、固体部分の体積率が計算され、これらを使って水理半径として細孔間隔(つまり細孔間の固体壁の厚さ)の概略を知ることができる。さらには、画像から2次のステレオロジー量と呼ばれる統計量を求めて、比表面積を求めることもできる¹³⁾。これらの点は、パーコレーションやフラクタルといった概念とも結びついて、活発に研究が行われている分野である。興味のある方は成書にあたってみることをお勧めする¹⁷⁾。

4. 細孔構造を変化させる要因と観察レベル

コンクリートの物性はある寸法範囲の細孔構造によって強く決定づけられ、その範囲の細孔構造の基本的な特徴は画像から評価できることを述べた。しかし、厳密な品質管理の下で生産され、適正な粒度分布を有しているセメントを使用し、標準的な養生を行ったならば、上述の特徴は水セメント比を決定した段階で決まっている部分を観察しただけのようにも思える。だからこそ、この範囲の細孔構造の画像情報と配合やコンクリートの物性との間に良好な対応が得られたのだともいえそうである。つまり、これまで述べてきた細孔構造の特徴とは、水セメント比を決めた段階で決定論的に決まるランダム構造の特徴であると言い換えることができるかもしれない。

しかし、その一方において、決定論的に決まるであろう細孔構造を変化させることが、コンクリートの性能改善であったり逆に劣化過程であったりすると考えることもできそうな気がする。例えば、混和剤(材)を使用して初期のセメント粒子の空間的な配置が変化したり、コンクリートが置かれている環境(養生条件)が変化したりすれば、細孔構造は変化しうる。セメントの水和反応以外の化学的な反応系が加わる場合には、当然のことながら細孔の充填のされ方も異なってくるであろう。また、コンクリート内外の温湿度条件により、不均一な乾燥を生じて水分分布が局所的に変動したならば、結果として組織としての統計的な均質性が、観察レベルで異なってしまう場合などがある。そのような場合では、標準的な状況、もしくは健全な状況とは異なる特徴が観察されることが、物性変化の原因を教えてくれることになる。また、少なくともある観察レベルでは細孔構造に変状は認められないのに、巨視的な性能が異なることが明らかになったとすれば、性能発現や性能劣化の原因が、その観察レベルの組織変化にないことを示唆する。すなわち、数百倍という比較的低倍率での形態を観察し、決定論的な組織形成の特徴を明らかにしておくことは、比較の基準を観察するという意味も持ち合わせていて、観察の意義は大きいように思う。

5. 結 論

コンクリートの物性に強く関わる細孔構造を観察することについて、その背景や意義について説明してきた。現在では画像取得にとどまらず画像解析と一体となって画像を評価することが当然となっている。画像解析手法そのものは何も細孔に限ることはなく、特定の反応生成物や構成粒子の特徴抽出などの評価にも適用できる。無論もっと低倍率の画像内での空孔（気泡）や、直線的もしくは平面的な連続空孔としてのひび割れの特徴評価などに応用することも可能である。かつてはかなり高額であった画像解析ソフトも、信頼できるフリーソフトウェアが簡単にダウンロードできる（例えば、画像解析ソフトとしては、ImageJ、<http://seesaawiki.jp/w/imagej/>、ステレオロジーソフトとしては、STEPanizer、<http://www.STEPanizer.com> など）。手元に何かの画像があったら、その中の適当な特徴を評価するための試用、練習もすぐにできる。ただ、画像解析そのものは身近で単純な手段になったとしても、試料調整や画像取得等にはある程度の時間を要することは避けられないし、また、あくまでも標本調査であるので、推定精度の面から相応の標本数が必要であることに留意しなければならない^{15), 18)}。

3次元画像の取得も可能な今日においては、非常に精細で複雑な形状の細孔構造の画像を短時間に複数得ることも可能である^{19), 20)}。今後の観察技術の発展に伴い、ますます高精細、高分解能の画像が得られるようになるであろう。もう“見える化”の時代から“見えて当たり前”の時代になりつつある。しかし、どのような複雑な形状の細孔の精細画像が得られたとしても、それをいかに評価すべきか、数理工学的な裏付けの下で、有意な統計量を明確にしておくことが必要である。医療現場における画像診断のように、それが明日の命に関わるというような緊急性はコンクリートの世界ではないと思うが、物性に関わる特徴が見えているのに、その特徴を見落としたではせっかく高度な画像を取得した意味がない。だからと言って、高度で複雑すぎる解析手法や評価法では、簡便で誰もが使える“見える化”手段にはならない。

本稿にて触れたステレオロジーの分野でよく引用される言葉に“Do more less well”という格言がある。過剰な標本抽出を行うことなく、形態評価すなわち目的とする構造評価において最大の効果を得るよう、最適化された標本調査を行うことを勧めるものである。コンクリートの物性理解、推定に関して、過剰で面倒なサンプリングに陥ることなく、それでいて高い精度での推論を可能とするような画像評価、診断技術の開発は、コンクリート材料技術者が負うべき責務であると思う。

参考文献

- 1) Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units - Appendix II definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry, Part 1, International Union of Pure and Applied Chemistry, Division of physical chemistry, Washington, DC, prepared for publication by D. H. Everett, L. K. Koopal, 1971
- 2) Mindess, S. and Young, J. F. : Concrete, Prentice-Hall, Engelwood Cliffs, 1981
- 3) Mehta, P. and Monteiro, J. M. : Concrete, microstructure, Properties, and Materials, McGraw-Hill, New York, 2006
- 4) Daimon, M. et al : Pore structure of calcium silicate hydrate in hydrated tricalcium silicate, Journal of the American Ceramic Society, Vol.60, No.3-4, pp.110-114, 1977
- 5) Handbook of analytical techniques in concrete science and technology, (Eds. V. S. Ramachandran and J. J. Beaudoin), Noyes Publications, 2001
- 6) Aligizaki, K. K. : Pore structure of cement-based materials, Testing, interpretation and requirements, Taylor and Francis, 2006
- 7) Scrivener, K. L. and Pratt, P. L. : Backscattered electron images of polished sections in scanning electron microscope, Proc. 6th International Conference on Cement Microscopy, New Mexico, pp.145-155, 1984
- 8) Tanaka, K. and Kurumisawa, K. : Development of technique for observing pores in hardened cement paste, Cement and Concrete Research, Vol. 32, No.9, pp.1435-1441, 2002
- 9) Willis, K. L., Abell, A. B. and Lange, D. A. : Image based characterization of cement pore structure using wood's metal intrusions, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.12, pp.1695-1705, 1998
- 10) Baddeley, A. and Vedel Jensen, E. B : Stereology for statisticians, Chapman & Hall/CRC, 2005
- 11) 寺田賢二郎・菊池 昇 : 均質化法入門, 丸善, 2003
- 12) Uchikawa, H. : Similarities and discrepancies of hardened cement paste, mortar and concrete from the standpoint of composition and structure, Advances in cement manufacture and use (Ed. Gartner, E.), Engineering Foundation, New York, pp.271-294, 1989
- 13) 五十嵐心一・米山義広・渡辺暁史 : 水和反応の進行にともなうセメントペースト構成相の空間分布構造の変化, 土木学会論文集, Vol.63, No.3, pp.444~458, 2007
- 14) Hadley, D. W., Dolch, W. L. and Diamond, S. : On the occurrence of hollow-shell hydration grains in hydrated cement paste, Cement and Concrete Research, Vol.30, No.1, pp.1-6, 2000
- 15) Wong, H. S., Buenfeld, N. R. and Head, M. K. : Estimating transport properties of mortars using image analysis on backscattered electron images, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.8, pp.1556-1566, 2006
- 16) Wong, H. S., Zimmerman, R. W. and Buenfeld, N. R. : Estimating the permeability of cement pastes and mortars using image analysis and effective medium theory, Cement and Concrete Research, Vol.42, No.2, pp.476-483, 2012
- 17) Torquato, S. : Random Heterogeneous Materials: Microstructure and Macroscopic Properties (Interdisciplinary Applied Mathematics), Springer, 2013
- 18) Wong, H. S., Head, M. K. and Buenfeld, N. R. : Pore segmentation of cement-based materials from backscattered electron images, Cement and Concrete Research, Vol.36, No.6, pp.1083-1090, 2006
- 19) Promentilla, M. A. B., Sugiyama, T., Hitomi, T. and Takeda, N. : Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography, Cement and Concrete Research, Vol.39, No.6, pp.548-557, 2009
- 20) Gallucci a. E., et al : 3D experimental investigation of the microstructure of cement pastes using synchrotron X-ray microtomography (μ CT), Cement and Concrete Research, Vol. 37, No.3, pp.360-368, 2007