

[98] 自動画像解析システムを用いた硬化コンクリートの気泡パラメータの測定方法について

正会員 太田 利 隆（北海道開発局土木試験所）
 正会員 大 橋 猛（北海道開発局土木試験所）
 正会員 ○小長井 宣 生（北海道開発局帯広開発建設部）
 正会員 根 本 任 宏（北海道開発局土木試験所）

1. ま え が き

冬期に厳しい凍結融解作用を受けるコンクリートについては、一般にAE剤を用いてコンクリート中に微細な空気泡（エントレインドエアー）を連行させ、耐凍害性の向上を図ることが必要とされている。このエントレインドエアーによる耐久性改善効果は、空気量および気泡間隔係数などの気泡パラメータにより評価される。気泡間隔係数は、気泡の平均的な分布状態を表わす指標であり1944年Powersにより示された概念である。

一般に、気泡間隔係数を200～250μ以下とすれば凍害に対して耐久的なコンクリートが得られるとされており、AEコンクリートの性能を確認するには硬化コンクリートの気泡特性を測定する必要がある。しかしながら、ASTM C-457¹⁾に定められた従来の肉眼による顕微鏡測定では、多大の時間と労力を要することが大きな問題となっており、実際には、フレッシュコンクリートの空気量を測定し、これが粗骨材の最大寸法に依じて3～6%あれば耐久的であると間接的に判断する方法が行われている。性能のよく知られた良質のAE剤等を用いる通常の施工ではこれでも十分であろうが、例えば、流動化剤やシリカフュームなどの新しい混和材料や新しい製造および施工法によるAEコンクリートの耐凍害性を確認する場合には、硬化コンクリートの気泡パラメータを直接測定することが必要となる。

そこで、従来の顕微鏡による方法を大幅に省力化し、さらに測定精度の向上を図ることを目的として自動画像解析システムを用いた方法について検討を行った。本文は、まず画像解析により得られる気泡断面積のデータからPowersの気泡パラメータを計算する理論的根拠を明確にした上で、実際にコンクリートの気泡パラメータを測定し検討を行った結果について述べるものである。

2. 測定システムの概要

2.1 ハードウェア

本システムは、顕微鏡、テレビカメラ、パーソナルコンピュータ、XYテーブル等から構成され画像データ入力、視野の移動、データ解析などをすべて自動化している。システムの全体を写真-1に、また機器の構成および仕様を図-1、表-1にそれぞれ示す。

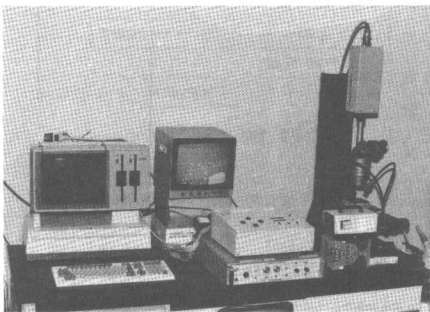


写真-1 測定システムの全体

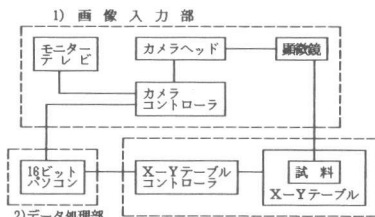


図-1 ハードウェアの構成

表-1 機器の仕様

1)画像入力部	実体顕微鏡	オリンパス製 S ₅ -Tr 倍率 7X～80X
	テレビカメラ	浜松ホトニクス製 C 1000 解像度 1024 × 1024 ドット
	モニターテレビ	12" 白黒
2)データ処理部	If 800/50 (16ビットcpu)	メインメモリ 640 KB 以上 高速演算プロセッサ 8087 漢字 ROM 記憶装置フロッピーディスク 2 MB
3)XYテーブル部	XYテーブル	移動量 180 ** 最小移動量 0.01 **
	テーブルコントローラ	パルスモータ付

システムは、大きく分けて 1)画像入力部、2)データ処理部、3)XYテーブル部の3つから成り、コンクリート試料面上の顕微鏡視野をテレビカメラにより入力し、この画像データをパソコンに転送した後、気泡が否かの判定および気泡パラメータの計算などのデータ処理を行う。また、視野の移動はXYテーブルの位置、移動速度をパソコンにより自動制御して行う。画像入力用のテレビカメラは、撮像管方式としては現在のところ最高の1024×1024ドットの高解像度で入力ができるものを使用している。ここで1ドットとは1画素のことで画像の最小の分割単位を表わす。

2.2 測定の原理

システムのソフトウェアはC言語を基本とし画像データのパソコンへの転送および計算処理はアセンブラサブルーチンにより高速化を図っている。本測定法では、入力された気泡断面の形状係数を計算し、気泡とそれ以外のキズなどの凹部とを判別しているのが大きな特徴である。ここで、形状係数とはある断面形の重心に対する極慣性モーメントと、これと同一面積をもつ円の極慣性モーメントとの比であり、断面が真円の場合1.0となる。図-2に形状係数の例を示す。また、視野の端部にその一部がかかるような気泡の判別の信頼度ならびにこれらの形状係数の計算精度を保持するために、測定の対象とする気泡断面径の範囲を設定している。即ち、図-3のように入力視野の50%を有効処理領域とし入力視野との差 d_{max} を対象とする気泡断面の最大径としている。さらに、断面径が5ドット未満のものも計算精度を保つ意味から対象外としており、これが有効気泡断面の最小径となる。1024×1024ドットの高解像度モードでは有効気泡断面径の最大と最小の比は、視野の大きさを $L \times L$ mmとすると最大径/最小径 $= (L/4) / ((L/1024) \times 5) = 51.2$ となる。従って、入力視野を 4×4 mmとすれば有効気泡断面径の最大値は1000 μ 、最小値は $(4/1024) \times 5 = 19.5 \div 20 \mu$ となり、20~1000 μ が対象範囲となる。本システムによる1視野あたりの測定に要する時間は約30秒である。

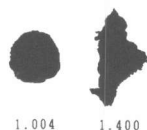


図-2 形状係数の例

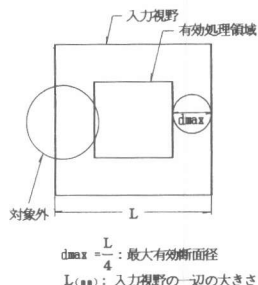


図-3 有効処理領域と最大有効断面径

3. 硬化コンクリートの気泡パラメータの測定試験

画像解析による気泡パラメータの測定方法のフローチャートを図-4に示す。

3.1 試料の準備

測定用試料として、10×10×40cmのコンクリート供試体から、10×10cmの測定面を持つ厚さ2cmの試料片を切り出した。なお、測定面は、打込面から2cm下の位置とした。試料表面をASTM C-457に定められた方法に準じて測定に適する滑らかさが得られるまで研摩した後、表面に黒色スタンプ液を塗布し、さらに気泡の凹部にZnOを混合したパラフィンを充填して気泡部とそれ以外の部分との間に白黒のコントラストが生じるようにした。試験に用いたコンクリートは、プレーンコンクリートおよびAE減水剤を用いたAEコンクリートとし、表-2にこれらの配合と凍結融解抵抗性を示す。

3.2 測定方法

測定視野については、コンクリート中の骨材や気泡分布の不均一性を考慮して連続した視野ではなく9×9cmの測定領域に

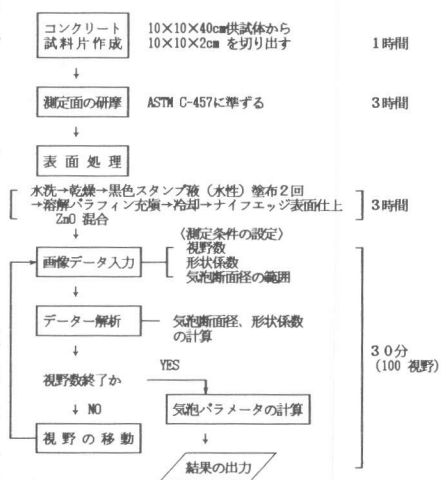


図-4 気泡パラメータ測定のフローチャート

表-2 コンクリートの配合と凍結融解抵抗性

	W/C (%)	単位セメント量 (kg / m³)	フレッシュ時空気量 (%)	耐久性指数 300 サイクル後 (%)
プレーン	5.2	30.0	1.9	7.7
AE	4.4	30.0	4.9	9.2

ある一定の間隔で分散させた視野とした。また、形状係数については、いくつかの気泡断面形状について検討した結果1.1以下を気泡として測定の対象とすることとした。既応の顕微鏡観察の結果からAEコンクリートの場合20 μ 以下の気泡も数%～数10%存在するとされているが、今回の測定では、表面研磨の仕上げ度や白黒の表面処理の仕上げの影響などによる誤差を除くため最小20 μ 以上の気泡断面を対象とした。

3.3 面積解析による気泡パラメータの計算法

画像解析により測定されるのは、図-5に示すように気泡のある断面についての2次元の情報であり、真のコンクリート中における気泡パラメータを求めるには、これら断面のデータから気泡の体積比率即ち空気を求める関係式を導く必要がある。

物質中に、ある粒子相 α が含まれるとき、ある1つの断面から得られる粒子相 α に関する点、線または面積に関するデータから3次元物質中での粒子の占める割合を求める。いわゆる体積比率の解析に関する基礎理論は、Hillardにより示されている。²⁾これによれば、従来のASTM C-457

に定められた顕微鏡によるリニヤトラバース法は線解析に、修正ポイントカウント法は点解析に、また、ここで述べる画像解析による方法は面積解析にそれぞれ対応する。これらの理論の詳細については、文献3)で既に述べている。これによれば、面積解析では次式が成り立つことを基本としている。

$$A = \frac{A_a}{A_t} \quad \begin{array}{l} A: \text{空気量} \\ A_t: \text{測定面積} \end{array}$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{6\pi}{a}} \quad \begin{array}{l} A_a: \text{面積} A_t \text{ 中の気泡断面積の総和} \\ \alpha: \text{気泡の比表面積} \\ \bar{a}: \text{気泡断面積の平均値} \end{array}$$

Powersの気泡間隔係数は、上式から求めた A 、 α を用いてASTM¹⁾で定義された算定式により求められる。

4. 試験結果

4.1 測定視野数の検討

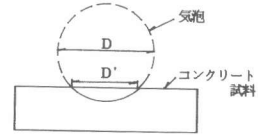
本システムによる、空気量、気泡間隔係数の測定の誤差を表わす指標として変動係数を用いて、これがある一定値以下となるように測定視野数を定めるための検討を行った。図-6に測定視野数と5回の測定値の変動係数との関係を示す。この図から、AEコンクリートの場合、視野数を100以上、また、プレーンコンクリートでは視野数を300程度とすれば、気泡パラメータの測定値の変動係数は5%以下になることがわかる。

4.2 気泡断面径の分布

良質のAE剤を用いたAEコンクリートと気泡断面径の頻度分布を図-7に示す。AEコンクリートでは50 μ 以下の微細な気泡が約50%を占めており、ほとんどの気泡断面が200 μ 以下である。

4.3 気泡断面径が気泡パラメータに及ぼす影響

気泡断面径が気泡パラメータの計算値に及ぼす影響を示したのが図-8である。これによれば、AEコンクリートの気泡間隔係数は200 μ 以下の気泡によって定まり、それ以上大きな気泡はほとんど影響しない。一方、空気量は計算に用いる気泡断面径が大きくなるにつれて漸増しており、比較的大きな気泡まで寄与していることが



D: 気泡径
D': 気泡断面径
D' ≤ D

図-5 気泡径と断面径

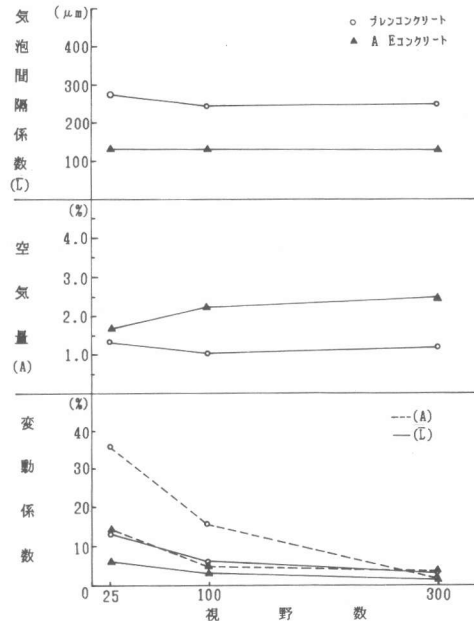


図-6 測定視野数と気泡パラメータの変動係数

わかる。以上のことから、耐凍害性の判定のため気泡間隔係数を求める場合には、測定の対象とする気泡断面の大きさをより小さく設定することが可能であり、これにより画像デ

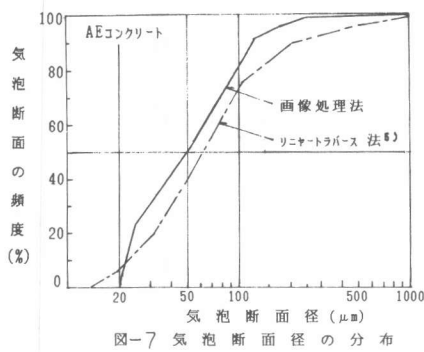


図-7 気泡断面径の分布

ータの処理時間をさらに短縮できると思われる。

4.4 従来のASTM法との比較

画像解析による測定値の変動係数は、同一試料で同一視野を5回繰り返し測定した場合1～2%であり、充分な再現性を持つ。表-3に示すように、従来法と比べて本方法によれば測定時間が大幅に短縮され、同時に測定者の負担を著しく軽減できるというメリットがある。さらに、AEコンクリートはもちろん、空気量の少ないブレンコンクリートの場合でも従来法と比べ変動係数が減少しており、測定の精度も向上している。ただし、表-4に示すように空気量の値は、対象とする気泡断面径に上限があること、形状係数による判定を導入していることなどにより、特にAEコンクリートではフレッシュ時に比べ少ない傾向にある。また、気泡間隔係数は従来法と比べやや小さい値となる傾向にある。

5. 結 論

- 1) 画像解析によるPowersの気泡パラメータの計算は面積解析の理論にもとづいて行うことができる。
- 2) 従来のASTM法と比べ本方法によれば、測定の大幅な省力化ならびに測定精度の向上が可能である。
- 3) 本システムは、将来の高解像度テレビカメラや高性能インターフェース等の開発によりさらに処理能力を向上させ得る。

6. あ と が き

今後の課題として、より多くのコンクリート試料について測定を重ね、表面処理等について検討が必要である。最後に、本システムのハードウェアおよびソフトウェアについては、工学社エンジニアリング(株)との共同開発によるものであることを記すとともに、試料の準備ならびに測定に携った方々に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) ASTM C-457-82²⁾: ASTM Standards Part 14
- 2) R.T. DeHoff & F.N. Rhines: Quantitative Microscopy, McGrawHill Inc. USA, 1968
- 3) 小長井, 大橋, 根本: 気泡断面積測定による硬化コンクリートの気泡パラメータの解析理論, 土木試験所月報 №396 1986
- 4) H. Sommer: The Precision of the Microscopical Determination of the Air Void System in Hardend Concrete, CEMENT CONCRETE AND AGGREGATES, 1980
- 5) J.E. Backstrom & others: Origin, Evolution and Effects of the Air Void System in Concrete Part 2, ACI Journal, 1958

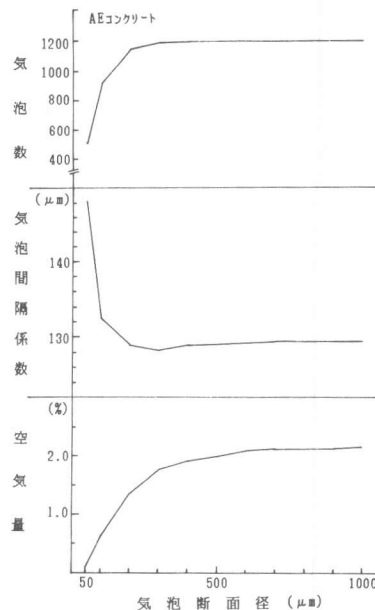


図-8 気泡断面径が気泡パラメータに及ぼす影響

表-3 従来法との測定時間、精度の比較

	従 来 法 ASTM C-457	画 像 解 析 法 100 視野
1 試料あたりの測定時間	3~4 時間 *1 4~6 時間 *2	0.5 時間
変動係数	25%	16%
空気量 (A E)	19%	5%

*1: ASTM リニャートラバース法による
*2: ASTM 修正ポイントカウント法による
従来法の測定時間は文献 4) による

表-4 従来法との気泡パラメータの比較

	修正ポイントカウント法 空気量 (%)	画 像 解 析 法 L (μ)	空気量 (%)	L (μ)
ブレン	1.5	280	1.2	254
AE	3.5	170	2.2	132

L: 気泡間隔係数
画像解析法でブレンは 300 視野, AE は 100 視野とした