

解
説

特集 非破壊試験のための鉄筋コンクリート概論

非(微)破壊試験のための構造体コンクリートの物性解説

湯浅 昇 日本大学生産工学部

社団法人 日本非破壊検査協会

非(微)破壊試験のための構造体コンクリートの物性解説

湯浅 昇 日本大学生産工学部

Explanation of Physical Properties of Structural Concrete for Non- and Mini-destructive Testing Methods

Noboru YUASA College of Industrial Technology, Nihon University

キーワード コンクリート, 非破壊試験, 微破壊試験, 含水率, 細孔構造, 物性

1. はじめに

構造体コンクリートの非破壊及び微破壊試験の多くは、求めようとする強度等の品質をその品質に関連深い他のコンクリートの物性を測定することにより類推するものである。しかしながら、間接的であるがため、多くの場合、妨害要因が存在する。最も問題となるのは、「コンクリート中の水分」であろう。しかしながら、この水分の把握がまた困難である。

コンクリートは均質でない。センチメートルオーダーで表層から内部にわたり不均質性がみられる。まず、含水率が異なる。1cm層が変われば3%異なることもある。これにより、また組織も相違することになる。水セメント比20%の差に匹敵する組織の差が5cmの層の違いでみられると訴えることは、決して誇大な指摘ではない。

本稿は、非(微)破壊試験を行うにあたり、試験者がこれらの問題に対し、参考として頂きたく、①コンクリートの水和と組織の緻密化、②コンクリート組織と強度、耐久性、③コンクリートの乾燥と含水率、④コンクリート組織の不均質性を項立てし、解説するものである。

構造体コンクリートの実像を理解して頂けるよう記述したつもりである。建築・土木・セメント化学を学ばれた方には、多少くどいように思うが、コンクリートが全く専門ではない非破壊検査技術者に、特に役立って頂ければ本望である。

2. コンクリートの水和と組織の緻密化

コンクリートは、図1¹⁾(a)に示すように、基本は、セメント、水、細骨材、粗骨材と化学混和剤によって構成され、最近では必ずと言っていい程、化学混和剤が混入されている。混合練り混ぜ後、図1(b)に示すように、骨材の隙間に充填されたセメントペースト(セメントと水の混合物)の硬化によって骨材とともに一体化する。硬化はセメントの水和によるものである。水和生成物は、1nm~1μmであり、セメント粒子より非常に小さい。ただし、総体積はセメント粒子よりも大きくなる。従って、生成物は、セメント粒

子のあった場所の他、水が占めていた空間に生成する。図2²⁾は、セメントの凝結、硬化を模式的に示したものである。セメント粒子表面のゲル状の被覆層が互いに結合しあうと、凝結が起こり、さらにゲル状の構造が緻密化することにより硬化が進む。

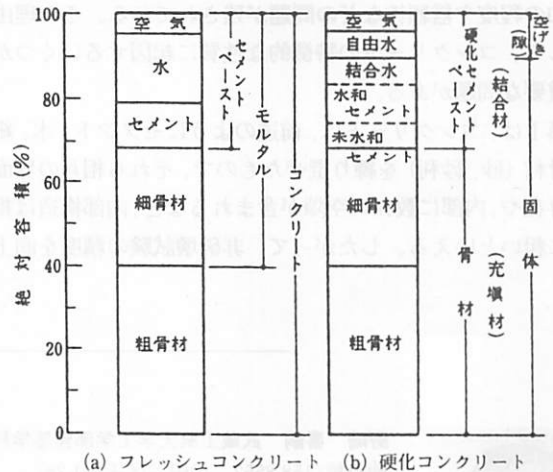


図1 コンクリートのおよその組成¹⁾

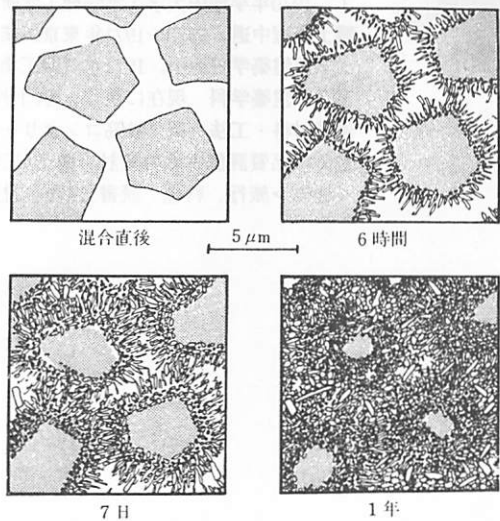


図2 凝結、硬化の模式図²⁾

図3³⁾は、水和の進行によるコンクリート組織の経時変化を示したものである(水セメント比60%, 20°Cで養生)。ここで示した細孔構造は、水銀圧入法により測定したものである。材齢経過に伴う変化は、次の通りであった。

- ①材齢1日:半径320~560nmを中心に極めて粗い径に細孔が分布している。
- ②材齢1日から材齢3日までの変化:見かけ上半径32nm以下の細孔は変化しないが,半径32nm以上の細孔が減少している。
- ③材齢3日から材齢7日までの変化:半径56nm以上の細孔が減少し,半径5.6~56nmの細孔が増加している。
- ④材齢7日から材齢14日までの変化:半径18~100nmの細孔が減少している。
- ⑤材齢14日から材齢28日までの変化:半径18nm以下の細孔が若干減少している。
- ⑥材齢28日から材齢3年までの変化:材齢28日までの変化に比べ,細孔径分布の変化は小さい。若干半径18nm以下の細孔が少なくなる程度である。

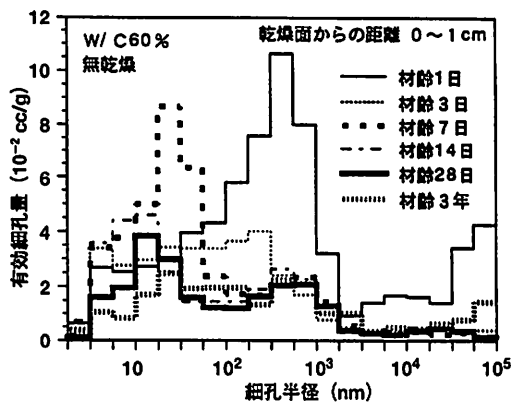


図3 水和に伴うコンクリートの細孔径分布の変化³⁾

3. コンクリート組織と強度, 耐久性

水和がコンクリート組織を緻密にすることから, 水和の進行は, 強度増進につながるようになる。図4は, 材齢とコンクリート強度の関係を水セメント比別に示したものである。ここには示されていないが, 材齢28日以降も強度は漸進する。ただし, JASS5(日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説「鉄筋コンクリート工事」)等により, 水セメント比は65%以下と規定されており, それ以上の水セメント比のコンクリートは使われていないはずである。

ここで示されているように, コンクリート強度は, 水セメント比で制御(D.A. Abramsの「水セメント比説」: 清浄で堅硬な骨材を用い, プラスチックでワーカブルなコンクリートを適切に締め固めた場合, そのコンクリート強度はセメントペーストの水セメント比によって支配される。水セメント比が小さいほど強度は大きい。)され, 材齢28日強度が構造計算上の強度を上回るよう計画されている。

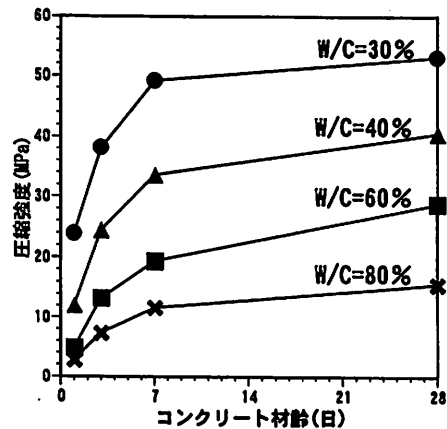


図4 材齢と圧縮強度の関係³⁾より作図(20°C, 封かん)

水和は, もちろん化学反応の一部であるため, 化学反応速度論に従うと考えられ, その速度の自然対数は実験的にも絶対温度の逆数に比例することが多くの研究者によって確認されている⁴⁾。コンクリート温度が高いほど, 水和・強度は早く増進する。

他方, 水和による組織の緻密化は, 物質透過性を低下させる。そして, 二酸化炭素, 塩化物イオン, 水, 酸素といった劣化因子の侵入に抵抗することになるので, コンクリート構造物の耐久性を高めることになる。

中性化の進行は, 二酸化炭素の侵入によるものであり, 塩害は, コンクリート内外からもたらされた塩化物イオンの存在によるものである。そして, それらを受けて鉄筋は, 酸素と水の存在下で腐食する。また, 凍害, アルカリ骨材反応による劣化は, 水の浸入及び存在が不可欠の劣化である。凍害は, 細孔内の水が凍る時の9%の体積膨張に起因したものであり, アルカリ骨材反応は, セメントのアルカリと化学的に不安定な骨材が反応してできた生成物が, 水によって膨潤するために起きる現象である。

更に言えば, 細孔内の水は細孔が小さくなればなる程, 凍りにくい(凍結温度が低下する)ので, 組織の緻密化は, 凍害回避に有効となる。

4. コンクリートの乾燥と含水率

コンクリートにとって, 水和を進め強度を発現させるためには, 水が不可欠である。しかしながら, コンクリート構造物の実際では, 材齢28日にはほど遠い材齢1日, 3日といった材齢初期に脱型されることが頻繁であり, その後, 散水やシート養生など湿潤養生が施されていればいいのだが, そうではないことが多いのも現実である。これは, 水和の阻害を意味する。「化学」における真の現象は, 「工学」においては理想にすぎないことが多い。水和の阻害に関しては, 次に述べるとして, ここでは, コンクリートの乾燥, 含水率の実態について述べる。

図5³⁾は, 厚さ40cmの模擬部材において, 両表面から

コンクリートを乾燥させた時のコンクリート乾燥前総質量に対する乾燥後総質量の経時変化を示したものである(20℃, R.H.60%)。質量変化率は、水セメント比が80, 60%の場合、乾燥開始直後より著しく減少し、材齢が1年経過した後も質量の低下がみられる。これらの試験体では、乾燥開始材齢が早い程、質量減少率は大きい、その差は材齢の経過とともに小さくなっている。一方、水セメント比30%の場合、乾燥開始直後の変化量が小さいばかりでなく、材齢の経過とともに質量の減少もほとんどみられない。

この結果をコンクリートの乾燥表面から内部までの含水率勾配からみると、図6³⁾となる。コンクリートの分野では、含水率を絶乾(105℃)質量に対する含水量の百分率と定義している。どの試験体も乾燥開始とともに、乾燥面に近い部分から比較的急激に含水率が低下する傾向を示している。材齢28日(○印)において、含水率が内部に比べ著しい低下がみられる範囲は、水セメント比によらずおおむね表層5cmまでである。現在一般に市販されている普通ポルトランドセメントは、材齢28日を過ぎると、水和が鈍くなる傾向があることを考慮すると、内部に比べ水和がとりわけ阻害されると予想される範囲は、乾燥面から5cmまでと考えられる。ただし、例えば水セメント比60, 80%, 乾燥開始材齢が1日の試験体のように、水セメント比が大きく、乾燥の開始が早いと、表層から5cmより深い部分の含水率も、乾燥面からの距離に応じてなだらかに変化している。また、長期的には、含水率分布は乾燥開始材齢による相違があまりみられなくなり、周囲の温・湿度及び表面からの距離に応じて、つり合った含水率に収束する傾向にある。1年間、20℃、相対湿度60%の環境に静置した結果、含水率は、表層部(0.5cm)で水セメント比、乾燥開始材齢によらず2.2%前後、中心部(20cm)では、水セメント比が大きくなるにつれて含水率は大きくなり、水セメント比30%で4.6%前後、水セメント比80%で5.5%程度である。これらの値は、長期的には、細孔構造と周囲の温湿度に応じた平衡な状態として定まるものと考えられる。自然環境下では決して0%となることはない。

ところで、乾燥開始前にも表層から内部にわたり均一に含水率の低下がみられる。この現象は、水セメント比が小

さくなる程顕著であり、水和により自己乾燥(自由水が水和物に取り込まれ減少し、見かけ上乾燥する現象)したものである。従って、ここで述べている含水率の低下は、乾燥面からの水分蒸発と水和による自由水の減少が複合した結果である。

コンクリートの主な物性値に及ぼすコンクリート水分の影響をまとめると、表1の通りになる。図6に示したように、コンクリートの含水率は表層と内部では異なる分布を示すのが一般的である。試験の目的によっては、測定の方法や試験体の取り方に応じて含水率の影響を考慮する必要がある。

一方、コンクリートの含水率の影響が強いがゆえ、逆にとって含水率を測定しようという技術がある。鎌田は、2本の電極をコンクリート中に埋め込み、電極間の比抵抗を測定し、あらかじめ同一調合のコンクリートにより求めた比抵抗との関係から含水率を求める方法を提案している⁵⁾。また、湯浅・笠井は、吸水率約20%のセラミックをコンクリート中に埋め込み、セラミックを挟んで焼成された電極間の抵抗及び誘電率をあらかじめ求めた含水率との関係に対応させ含水率を測定する方法を提案している⁶⁾。

5. コンクリート組織の不均質性

先に示したように、水和の進行に伴い、組織の緻密化が図られ、強度が発現する。しかしながら、前述のように、建設現場においては、早期に脱型が行われ、その後も十分な湿潤養生が施されないことが多いのが現状である。この場合、水和は乾燥表面に近いほど強く阻害される。図7³⁾は、乾燥の開始が各層の細孔径分布(20℃, 材齢28日)に及ぼす影響を示したものである。同一試験体内において、乾燥面からの深さ方向に細孔径分布の相違をみると、乾燥面に近い程、細孔が大きな径に偏るとともに全体の細孔量は増大する。乾燥開始材齢が早い程、水セメント比が大きい程、これらの傾向は顕著にあらわれている。

図8³⁾に、乾燥面からの距離と総有効細孔量との関係を示す。総細孔量はこれまでの多くの研究からも水セメント比によって大きく変化することが知られているが、本実験に

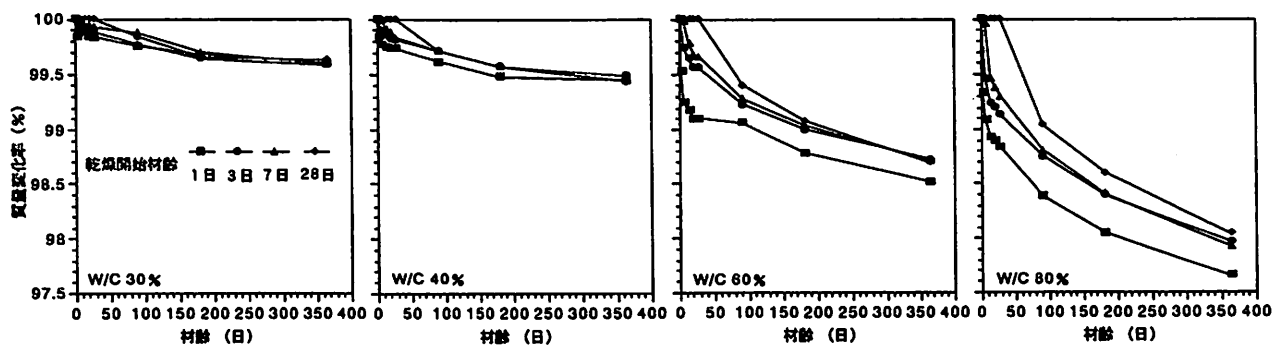


図5 乾燥前総質量に対する乾燥後総質量の変化³⁾(20℃, R.H.60%, 厚さ40cm部材の両表面より乾燥)

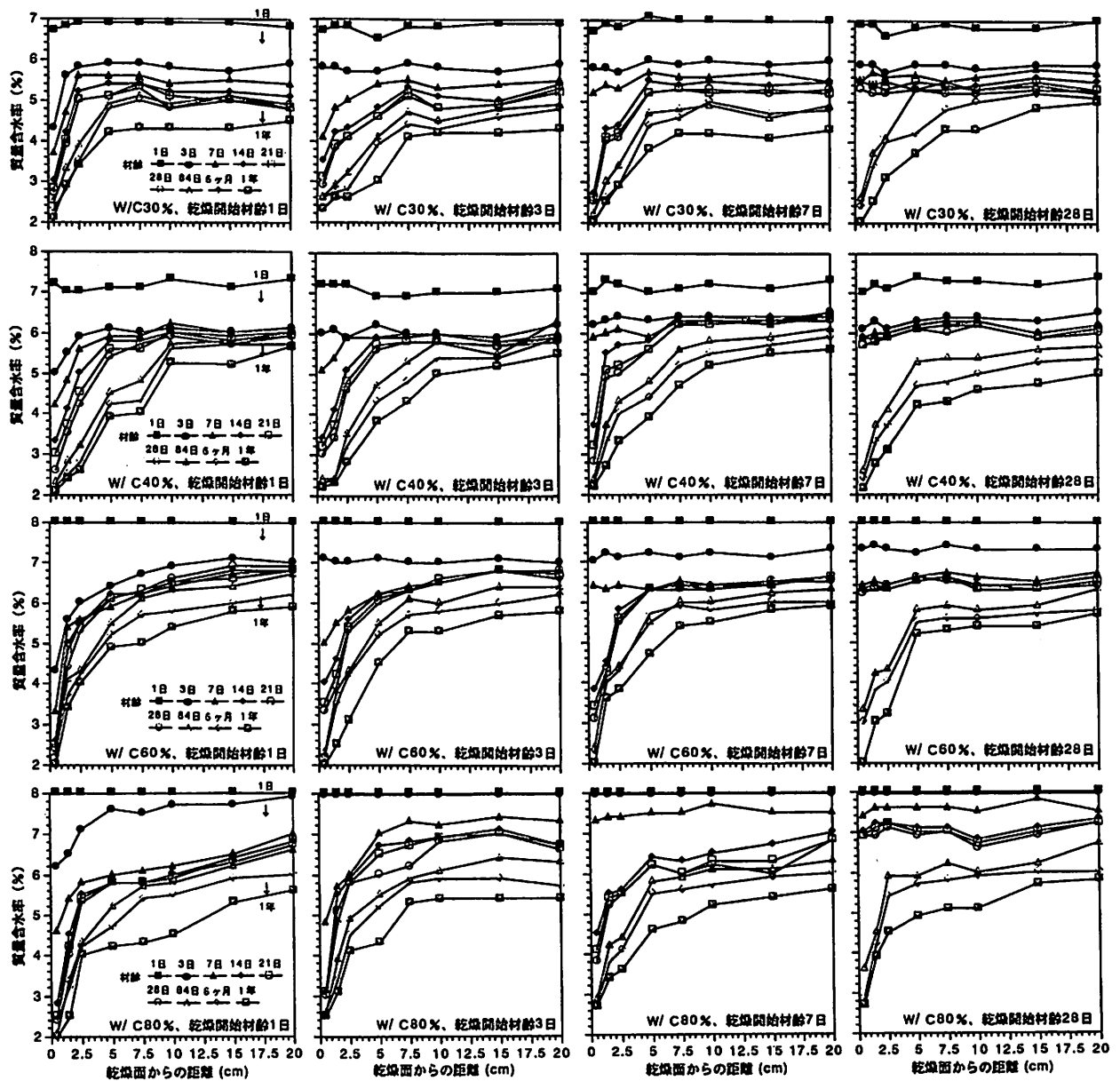


図6 乾燥表面から内部にわたる含水率分布³⁾ (図5に対応)

表1 コンクリートの諸物性値に及ぼす含水率の影響

| 物性 | 含水率 | |
|--------|-----|---|
| | 小 | 大 |
| 強度 | 大 | 小 |
| 硬度 | 大 | 小 |
| 音速 | 遅 | 速 |
| 誘電率 | 小 | 大 |
| 電気抵抗 | 大 | 小 |
| 自然電極電位 | 貴 | 卑 |
| 熱伝導率 | 小 | 大 |

よる結果は、乾燥を受けた場合、無乾燥の場合に比べ、乾燥開始材齢が早い程、また乾燥面に近い程、総細孔量は多くなることを示している。この総細孔量が増加する範囲は乾燥

面から、水セメント比30%では約2.5cm、水セメント比40%及び60%では約5cm、水セメント比80%では約10cmである。水セメント比30%で乾燥開始材齢1日の表層0~1cmの総有効細孔量は、水セメント比40%の無乾燥の場合とほぼ等しく、また水セメント比60%で乾燥開始材齢1日の表層0~1cmは、水セメント比80%の無乾燥の場合とほぼ等しい。

図9³⁾は、乾燥開始材齢及び乾燥面からの距離ごとに、細孔構造(水セメント比60%)の経時変化を示したものである。

表層部(0~1cm)をみると、乾燥開始材齢1日の場合は、乾燥を開始しても材齢3日までに細孔量の減少がみられる。ただし、その細孔分布のピークは、材齢1日と同様、半径320~560nmの大きな径である。その後の細孔径分布の変化は、材齢の経過にもかかわらず僅かである。

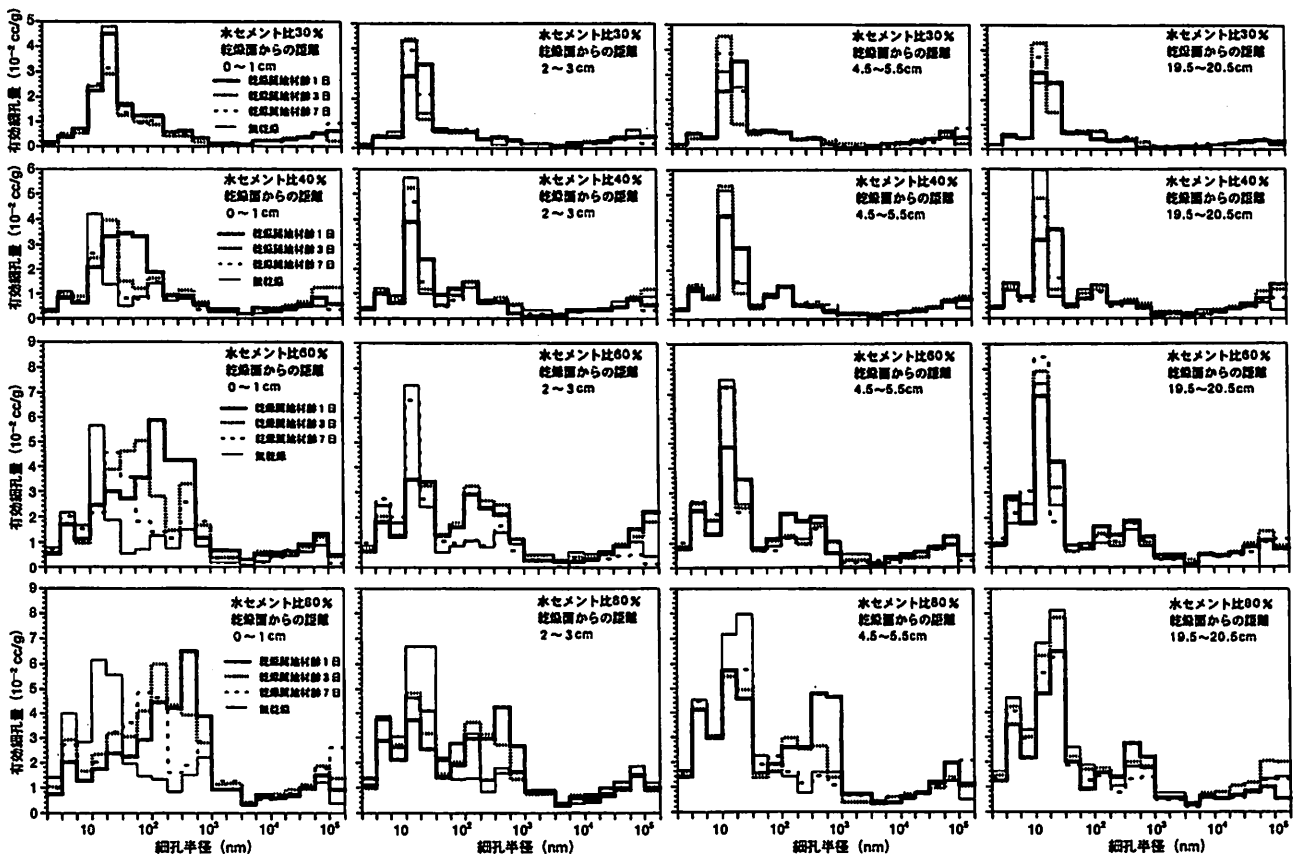


図7 乾燥開始材齢が細孔径分布におよぼす影響³⁾ (材齢28日)

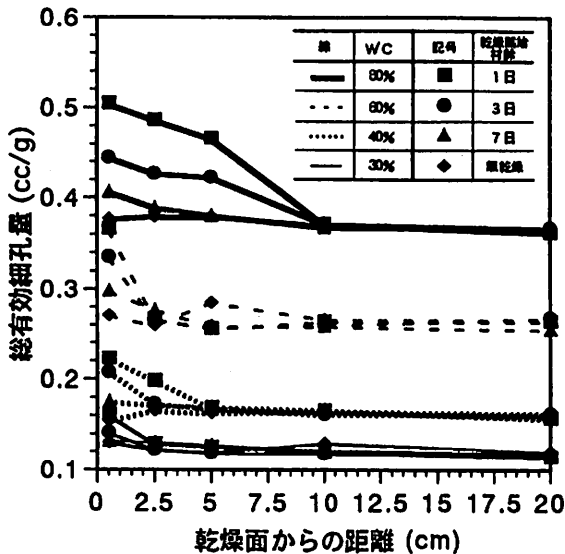


図8 総有効細孔量分布³⁾ (材齢28日)

乾燥開始材齢3日の場合、乾燥を開始した材齢3日から材齢7日の間に、乾燥開始材齢1日の場合に、乾燥を開始しても材齢1日から材齢3日にみられたような、著しい細孔量の減少はみられず、細孔の分布の変化も極めて緩慢である。これは、前者の場合、材齢1日から材齢3日までの期間はセメントの水和が活発であるため、材齢1日で乾燥を

受けても水和は若干進むが、後者の場合、材齢3日から材齢7日の間は、セメントの水和が前者程活発でないと思われる。また、乾燥開始材齢7日の場合、材齢7日まで封緘養生(無乾燥状態)を保ったため、小さい径に偏った細孔の分布は、その後の乾燥により、半径56nm以上の細孔はほとんど変化しないが、半径56nm以下の細孔は減少している。

一方、乾燥面から深さ方向に細孔構造の経時変化をみると、乾燥面からの距離が大きくなるにつれて、乾燥後も水和が進行し、経時的に組織が緻密化している。これは、乾燥の影響があらわれるまでに時間差があり、また含水率の低下も表層に比べ緩慢であるためと考えられる。

コンクリートの主な物性値に及ぼすコンクリートのポロシチー(細孔構造)の影響をまとめると、表2の通りになる。図10⁷⁾に示すように、表層部の圧縮強度は、内部に比し極めて低い構成になっている。コンクリート構造物に非(微)破壊試験を実施する時、このことへの配慮が重要である。例えば、圧縮強度試験を小径コアで行うからといって、コンクリート表層部からのみの小径コアと表層部を破壊し内部から作製した試験体では、試験の意味が違うことを意識しなければならない⁴⁾。

これまで述べてきたように、表層と内部ではポロシチーが異なるのが一般的である。試験の目的(調合に応じたまたは内部として強度・耐久性を調べたいのか、コンクリート

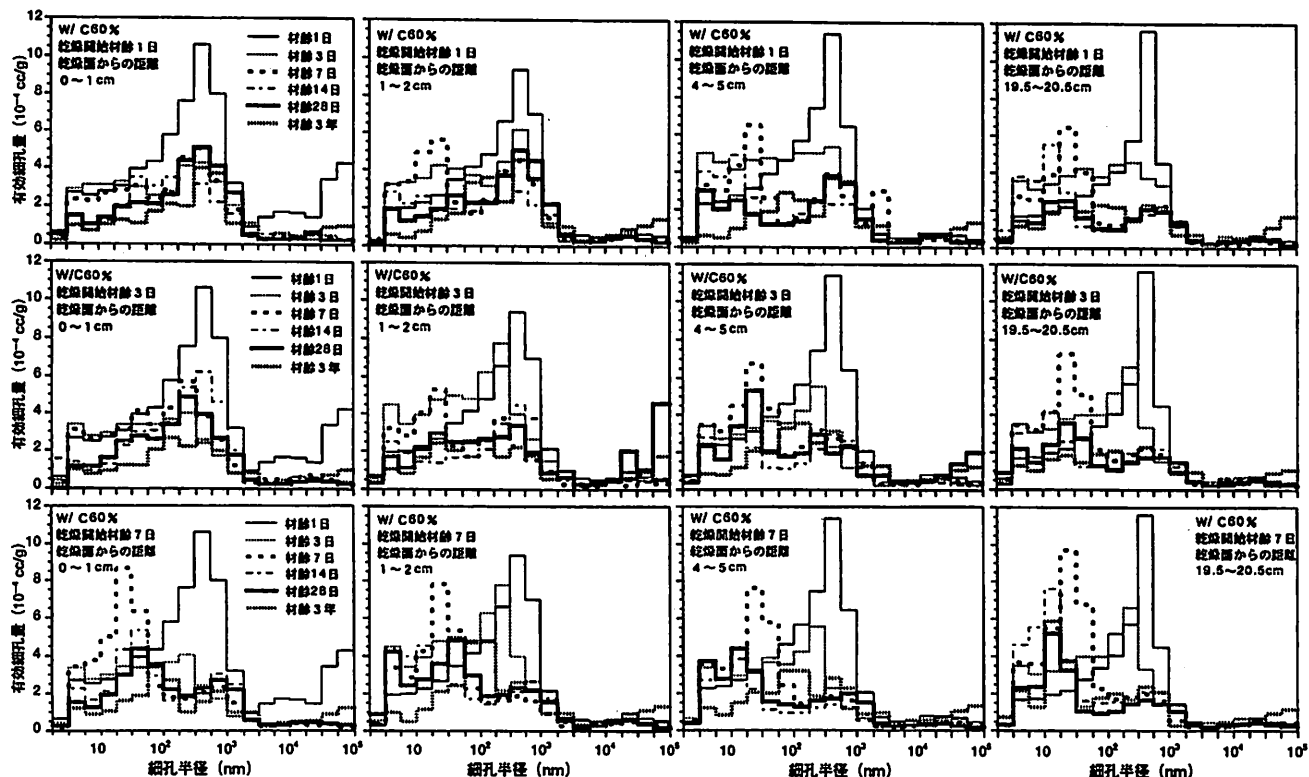


図9 乾燥コンクリートの細孔径分布の経時変化³⁾

表2 コンクリートの諸物性値に及ぼすポロシティーの影響

| 物性 | ポロシティー | |
|---------|--------|-----|
| | 粗 ← | → 密 |
| 強度 | 小 ← | 大 → |
| 硬度 | 小 ← | 大 → |
| 切削抵抗 | 小 ← | 大 → |
| 音速 | 遅 ← | 速 → |
| 衝撃弾性波速度 | 遅 ← | 速 → |
| 共鳴振動数 | 小 ← | 大 → |
| 透気性 | 大 ← | 小 → |
| 透水性 | 大 ← | 小 → |
| 毛細管圧力 | 小 ← | 大 → |

表層部の強度・耐久性を調べたいのか) によっては、測定の方法や試験体の採取の仕方に工夫が必要である。

更に、ここでは紙面の都合上、詳細は省かせて頂くが、同じコンクリートでも打設位置からの距離や高さによってコンクリートの品質が異なることが知られている⁹⁾。これもまた不均質性といってよいと思うが、測定する場所・位置が、どういう意味でその周囲のコンクリートを代表しているかを常に考える必要がある。

6. おわりに

非破壊試験、微破壊試験では、取りあえず推定した値が得られることが多い。しかしながら、目的に応じた精度の高

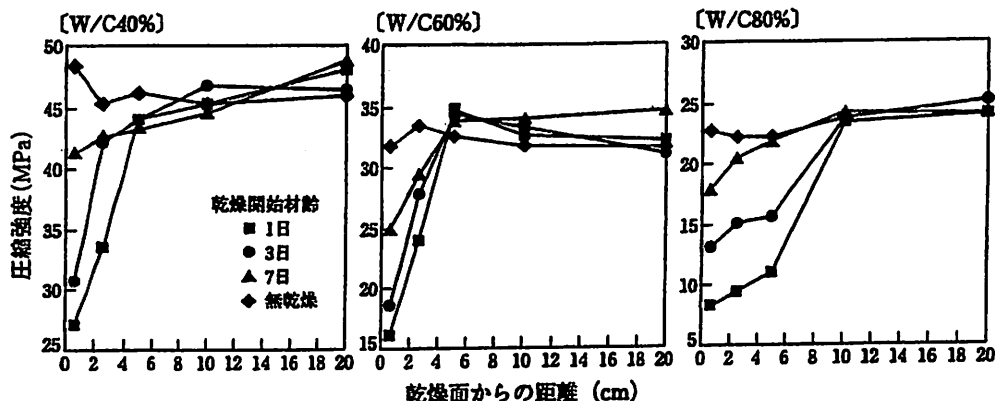


図10 圧縮強度分布⁷⁾ (材齢28日)

い推定のためには、検査技術者の検証が不可欠である。構造体コンクリートの実像(含水状態、細孔構造、それらの不均質性(深さ方向、高さ方向、横方向))と試験方法・測定器の原理・影響要因(電気的な方法等では含水状態に影響を受けるものが多い)を理解しようとする姿勢と努力を望みたい。

参 考 文 献

- 1) 田村 恭：建築材料要説，産業図書，p.82，(1981)
- 2) 大門正機：セメントの科学—ポルトランドセメントの製造と硬化—，内田老鶴園，p.73，(1989)
- 3) 湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇：乾燥を受けたコンクリートの表層から内部にわたる含水率，細孔構造の不均質性日本建築学会構造系論文集，第509号，pp.9-16，(1998)
- 4) 鎌田英治，洪 悦郎，林 直樹：各種セメントを用いたコンクリートの強度増進性状，セメント協会，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.360-365，(1990)
- 5) 鎌田英治，田畑雅幸，中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定，セメント技術年報XXX，pp.288-292，(1976)
- 6) 湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇：埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会構造系論文集，第498号，pp.13-20，(1997)
- 7) 湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇：構造体コンクリートの表面から内部にいたる圧縮強度分布，セメント協会セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.840-845，(1997)
- 8) 湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇：小径コアによるコンクリートの圧縮強度試験方法の提案，日本非破壊検査協会，シンポジウム「コンクリート構造物の非破壊検査への期待」論文集，Vol.1，pp.75-82，(2003)
- 9) 篠崎幸代，湯浅 昇，笠井芳夫，松井 勇，山田 徹：構造体コンクリート壁の不均質性に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1，pp.141-142，(2001.9)



湯浅 昇 日本大学生産工学部(275-8575 習志野市泉町1-2-1)建築工学科・助教授，博士(工学)
 1990年東京工業大学大学院修士課程修了。
 研究テーマ：表層コンクリートの品質に関する研究，構造体コンクリートの品質評価方法に関する研究，解体コンクリート塊(特に微粉)の再利用。
 <趣味>アウトドア，鮭釣り