

コンクリート内部の不均一性に関する研究

—硬化セメントペーストの場所的不均一性に関する実験的検討—

A Study on Non-Uniformity of Concrete

—Experimental Results of Non-Uniformity of Hardened Cement Paste—

加藤 佳孝*・魚本 健人*

Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

現在、コンクリート分野において、水和反応のモデル化、強度のモデル化や硬化体の内部組織構造のモデル化など、様々なモデル化に関して研究が進められている。しかし、ほとんどのモデル化における初期条件は、非常に理想的な状態となっている。つまり、与えられた配合条件が、コンクリート構造物の全ての箇所に適用されているということである。個々の現象をモデル化するためには、理想的な状態として何の問題もない。しかし、実構造物を考えた場合、ブリーディングなどの影響により、構造物の場所によって W/C などの特性が異なるという既往の研究^{1),2)}からも、実構造物を対象に精度良く解析を行うには、実際の初期状態がどのようになっているか定量的に把握する必要がある。つまり、セメントが凝結する以前のコンクリート内部の構成材料の配置のモデル化を行うことが必要であると考えている。

そこで、コンクリート内部における構成材料の場所的不均一性のモデル化を目指し、まず基礎的現象の解明として、硬化セメントペーストの物性値の場所的特性に関して実験的検討を行った。

2. 実験概要

硬化セメントペースト中の場所ごとの物性値の差を比較するために、使用粉体として普通ポルトランドセメント(密度 3.15 g/cm^3)を用い、水セメント比(以下 W/C とする)を 30%・60%・100% の 3 水準に変化させて供試体を作成した。供試体は、 $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ のシリンダー供試体を用いて作成し、翌日脱型し 20°C 水中養生で 91 日間養生した。養生終了後、供試体を 1~2 cm ごとに切断し各供試体ごとに 9 つのサンプルを作成した。切断した試料をさらに粉

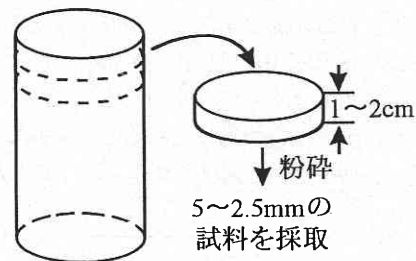


図1 供試体概略図

砕し、 $5 \text{ mm} \sim 2.5 \text{ mm}$ のふるいに留まる試料を採取した(図1参照)。この試料を用いて、以下に示す3種類の実験を行った。

① 強熱減量法による簡易的 W/C の測定

粉碎した試料を表乾状態にし、そのときの試料重量を計測する(Sとする)。試料をろつぽに入れ、恒量になるまで $950 \pm 50^\circ\text{C}$ で加熱し、加熱後の試料重量を計測する(Cとする)。セメントペースト中の空気量を0%、蒸発した水量が全てセメントペーストを作成したときの水量と仮定すると、W/Cは $(S-C)/C$ で求めることができる。

② 強熱減量法による水和率の測定

粉碎した試料を 105°C 炉乾燥し、試料中の自由水量を除去する。その後、乳鉢を用いて最大粒径が $88 \mu\text{m}$ 以下の全通まで粉碎し、JIS R 5202(ポルトランドセメントの化学分析方法)の強熱減量の定量方法に準拠して、強熱減量を測定し、求めた強熱減量から結合水量を求め、さらに水和率を推定した。

③ 水銀圧入法による細孔量の測定

粉碎した試料を 105°C 炉乾燥し、試料中の自由水量を除去する。この試料を用いて、水銀圧入式のポロシメータによって、圧入圧 $0.4 \text{ Pa} \sim 420 \text{ Pa}$ の範囲で、試料内部の全細孔量、細孔径分布および試料の見かけの密度

*東京大学生産技術研究所 第5部

研究速報

を測定した。

3. 実験結果と考察

① 強熱減量法による簡易的 W/C の測定結果

実験結果を図2に示す。各供試体において、ブリーディング水量を初期投入水量から差し引いた実質使用水量を用いて、供試体全体における実質 W/C を求めた結果を表1に示す。供試体全体で見ると、W/C 100%・60%はともに W/C が減少することが分かる。さらに、両者における高さごとの W/C の変化を見ると(図2参照)、底面付近で緩やかな変動ではあるが、実験による W/C の値が場所ごとに異なっていることが分かる。また、最上面付近では、その傾向が顕著になり急激な変動を確認することができる。W/C が30%の場合は供試体全体で見ると減少しない、つまりブリーディング水は生じていないことになるが、実際に場所ごとに W/C を計測してみると、微妙な変化ではあるが、100%や60%と同様な傾向を示すことがわかる。

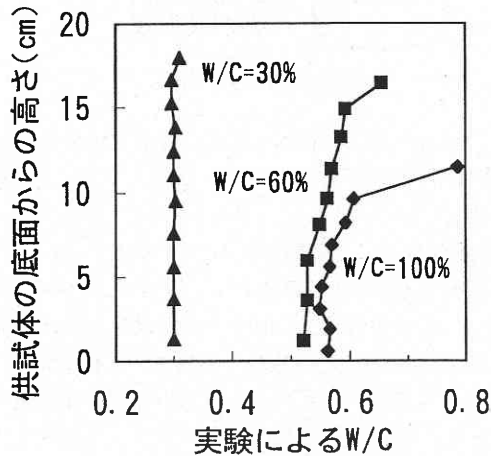


図2 場所ごとの W/C の測定結果

② 強熱減量法による水和率の測定

各供試体の上部・中部・下部の試料に関して実験を行った。結果を表1に示す。今回の実験では、91日間水中養生を行ったものを使用しているため、各試料ともにほぼ完全水和であると考えられる。セメントが100%水和した時の理論結合水量は Powers の研究³⁾によると22.7%である。本実験では、W/C 100%・60%の場合の結合水量は28.3~29.7%となり、Powers の理論結合水量を上回っている。しかし、結合水量の算定は、実験操作のいかんによって著しく変動するという既往の研究⁴⁾から考えても、理論結合水量の値も絶対的な値でないことが分かる。そこで、本研究では水和率を相対比較するというので、結合水量が最も多い W/C 100%の上部の値を仮の理論結合水量として、水和率を算定した(表1参照)。W/C 100%・60%はセメントが反応するのに十分な水量が存在するために水和率は約100%であり、実測 W/C の結果(図2参照)と比較すると、場所ごとにおける差はほとんど見られない。これに対して W/C 30%の場合は、実測 W/C の結果では、ほとんど差が見られなかったのに対し、水和率を見ると67%・69%・72%と場所ごとの違いが現れているのが分かる。試料が完全水和していると考えると、水和率が異なるということは、場所ごとにセメントペースト中のセメントと水の割合が異なっていることを示している。つまり、セメントが多くてブリーディング水が生じない場合においても、セメントペースト中では、重力によって粉体の移動現象が生じていると考えられる。

③ 水銀圧入法による細孔量の測定

水和率の測定と同様に、各試供試体の上部・中部・下部に関して実験を行った。各試料の見かけの密度および

表1 実験結果

W/C	測定位置	W*/C	結合水量 (%)	水和率 (%)	密度 (g/ml)	細孔量 (ml/ml)	W/C(①)	W/C(②+③)
100%	上部	65	29.7	100	1.171	0.462	0.786	0.790
	中部		28.9	97	1.459	0.345	0.566	0.563
	下部		29.1	98	1.480	0.335	0.564	0.555
60%	上部	55	29.3	99	1.478	0.360	0.654	0.557
	中部		28.9	97	1.608	0.304	0.561	0.484
	下部		28.3	95	1.652	0.267	0.520	0.459
30%	上部	30	21.3	72	1.896	0.163	0.312	0.322
	中部		20.4	69	1.972	0.166	0.299	0.293
	下部		19.8	67	1.992	0.134	0.298	0.284

W*は実質使用水量 (ブリーディング水量を使用水量から差し引いた水量)

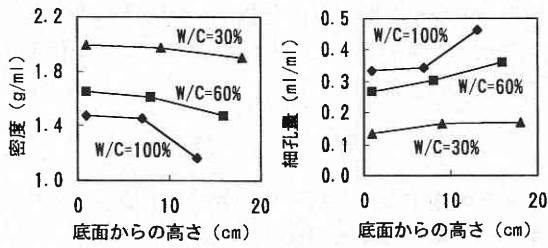


図3 場所ごとの密度・全細孔量の結果

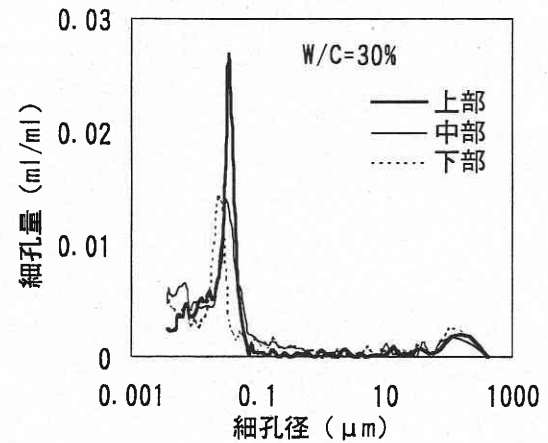
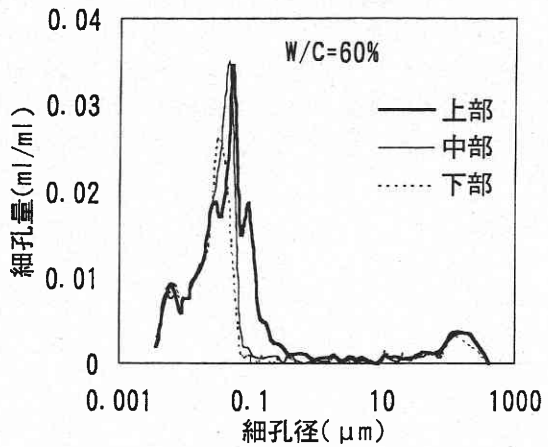
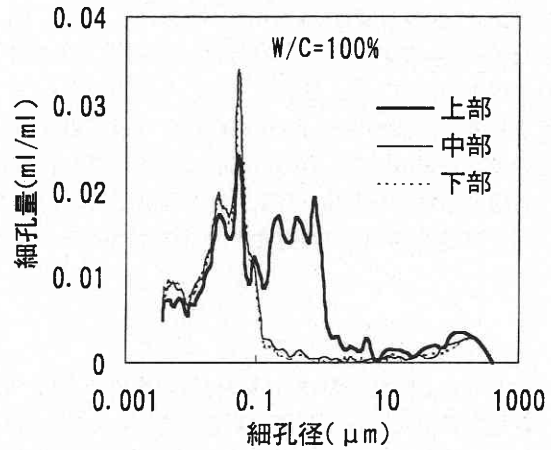


図4 細孔径分布結果

び全細孔量を表1と図3に示す。各試料の細孔径分布を図4に示す。見かけの密度(図3参照)は、各供試体ともに上部に行くほど小さくなっていることが分かる。つまり、上部ほどセメントペースト中の水量の割合が多いということである。ここで、全細孔量の測定結果を見てみると(図3参照)、上部に行くほどポーラスな状態になっていることが分かり、密度の測定結果と同様な傾向を示している。W/C 100%の場合、密度と全細孔量の結果を見ると(図3参照)、中部から上部の間において急激な変動が見られる。また、細孔分布の結果を見ても(図4参照)、中部および下部においては、ほぼ同様な細孔分布であるのに対し、上部ではピークの位置は同様であるが、0.1~1 μmの細孔径が他と比較して、非常に多いことが分かる。これは、フレッシュ状態の初期において、水量が多いために粉体が移動しやすく、粉体が水中を沈降し、ある程度まで充填されてくると、下部の方は移動不可能になり、結果として、上部付近のみの移動現象が残ってしまい、下部と比較して粉体粒子が浮遊した状態になり、その後硬化していくためであると考えられる。W/C 60%・30%の場合、密度および全細孔量の変化は100%と比較して急激な変動はみられず(図3参照)、連続的に変動していることが分かる。さらに、細孔径分布の結果を見ても(図4参照)、場所ごとの分布の形態の変化はそれほど見られず、下部に行くほど全体的に小径側にシフトしている現象が見られる(例えば、60%の場合ピークの値が、0.0525→0.0455→0.0298 μmと下部に行くほど減少している)。これは、100%とは違い水量がそれほど多くないために粉体が移動しにくく、ある一定の層ごとに沈降しているために、連続した変化をしているのではないかと考えられる。

実験概要で示したように簡易的 W/C の実験では、試料を表乾状態にして計測を行っているが、実際設定した状態が表乾状態であるか判定することは困難である。そこで、実験②・③の結果を用いて W/C を算定し、簡易試験の結果の妥当性の確認を行った。実験③から、ふるいわけした

各試料の見かけの密度が求まるため、②で求めた各試料の全体積が分かる(V_s とする)。ここで、結合水量(V_{cw} とする)と乾燥後の試料の重量をセメントの密度で除したものの(V_c とする)を用い、さらに試料中の空気量を0%と仮定すると、試料中の自由水量が($V_s - V_{cw} - V_c$)として求ま

研究速報

る(ただし、水の密度は 1g/cm^3 とする)。これにより、算定したW/Cの結果を表1中のW/C(②+③)として示す。同表中のW/C(①)は、簡易的に求めた結果である。この結果を見ると、簡易的に求めたW/Cはほぼ妥当な値を示していることが分かる。60%の場合のみ値が異なっているが、各層の相対的な関係は等しく、校正係数を設けることによって簡易的W/Cの算定で十分計測が可能であると考えられる。

4. おわりに

コンクリート内部における構成材料の場所的不均一性のモデル化を目指し、まず基礎的現象の解明として、硬化セメントペーストの物性値の場所的特性に関して実験的検討を行った。その結果、ブリーディング水が生じる100%および60%だけでなく、ブリーディング水が生じない30%の場合においても、場所ごとにおける物性の明確な違いが見られることが分かった。今後は、フレッシュな状態におけ

る粉体の移動現象を解明し、今回行った物性結果を用いてフィードバックさせていくことによって、モデル化を実現させていきたいと考えている。

謝 辞

本研究を実施するにあたって、実験を手伝ってくれた千葉工業大学4年生の荒川和宣君に感謝の意を表す。

(1996年9月30日受理)

参 考 文 献

- 1) 町田篤彦編：現代土木材料，オーム社，pp. 109.
- 2) 辻正哲ら：ブリーディングの発生機構に関する基礎的研究，セメント技術年報 37, pp 229-232, 1983年.
- 3) T.C. Powers: The Chemistry of Cement, edited by H.F.W. Taylor vol. 1, pp 391-416, 1964年.
- 4) 藤井欽二郎：結合水の状態と性質，セメント・コンクリート No. 469, pp 2-pp 9, 1986年.