

8. 高強度コンクリートの細孔径分布に関する研究 (その1. 高炉セメントB種を用いた場合)

Studies on Pore Size Distribution of High-Strength Concrete (Part 1. Case of Using Blast Furnace Cement Type B)

立松 和彦*

山崎 順二*

要 旨

建物の高層化によって高強度コンクリートの需要は近年ますます増加してきているが、化学抵抗性や水密性、アルカリ骨材反応抑制効果などに優れる高炉セメントを高強度コンクリートに使用する比率が増加していくと推測される。通常強度のコンクリートと高強度コンクリートとは、微細構造は、その形成過程、および微細構造そのものに違いがあると考えられることから、本研究では、高強度コンクリートに高炉セメントB種を用いた際、水和反応の進行過程で微細構造がどのように変化していくかについて検討を行った。その結果、長期の強度増進が期待できる高炉セメントを用いても、水セメント比25%ではその効果はあまり発揮されないが、30%、35%では材齢4週以後も活発な強度増進が期待できることを確認した。

キーワード：高強度コンクリート／細孔径分布／高炉セメント

1. はじめに

構造物の長大化や高層化が求められる中において、建物の構造形式も多様化し、コンクリートの高強度化が進むなど、近年、高強度コンクリートの需要はますます高まってきた。高強度コンクリートは、圧縮強度が高く、かつ耐久性に優れるという利点を有する反面、破壊形式が脆性的であり、また自己収縮ひずみが大きい、水和発熱や初期乾燥によるひび割れ発生の危険性がある、などの欠点も併せ持っている。

一方、高炉セメントは、潜在水硬性を持つ高炉スラグを粉砕してポルトランドセメントに混合したセメントであり、普通ポルトランドセメントに比べて初期強度はやや小さいが、長期強度は大きく、化学抵抗性や水密性、アルカリ骨材反応抑制効果などに優れている。また、粗鋼製造時の副産物である高炉スラグを利用することから、資源の有効活用を図れる材料でもある。環境先進国であるヨーロッパ諸国におけるセメントの使用状況からみても、今後日本でも高炉セメントの使用比率が増加していくものと推測される。

一般に、コンクリートの主要な物性のほとんどは、セメントが水和反応によって硬化し、水和物を生成することによって発揮される。硬化体の微細構造は、水和物、

未水和セメント、毛細管水、ゲル水および空隙よりなる。この空隙を細孔と呼び、その径の大きさの範囲、分布、および量などがコンクリートの強度や乾燥収縮、耐久性などと密接な関係を示す¹⁾²⁾³⁾ことが知られている。また、セメントの完全水和に必要な水量はセメント量の約40%であり、25%がセメントと化学的に結合し、残り15%がゲル水として吸着されているといわれている⁴⁾。高強度コンクリートの多くは水セメント比40%以下であるので、水和に必要とされる水量が最初から不足していることになる。そのため、水和反応の進行によって徐々に緻密になっていく硬化コンクリートの微細構造に関しても、通常強度のコンクリートの微細構造と高強度コンクリートのそれとは、その形成過程、および微細構造そのものが異なってくるものと考えられる。

本研究は、このような観点から、高強度コンクリートに、最も一般的な高炉セメントである高炉セメントB種を用いた際の、水和反応の進行過程における微細構造の変化について検討したものである。

2. 概 要

2.1 実験の要因および水準

実験要因として25%、30%、35%の3水準の水セメント

*建築工法・材料研究室

表－1 使用材料

材 料	種 類 ・ 品 質
セメント	高炉セメント B 種 密度 3.04g/cm^3
	普通ポルトランドセメント 密度 3.04g/cm^3
水	上水道水
細 骨 材	海砂・砕砂の混合（混合比70：30）
	表乾密度 2.69g/cm^3
粗 骨 材	山砂（50N, 50N-RG） 表乾密度 2.57g/cm^3
	砕石 表乾密度 2.69g/cm^3
混 和 剤	再生粗骨材 2 種 表乾密度 2.43g/cm^3
	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 SP-8S

比を設定した。記号は、25BB, 30BB, 35BBとした。細孔径分布の測定材齢を、練り混ぜ後1日, 3日, 7日, 28日, 56日, 91日とした。なお、比較用に、水セメント比50%の普通ポルトランドセメントを使用したものを作製し、記号を50N, 50N-RGとした。50N-RGは再生粗骨材2種（吸水率4.60%）を用いたものであり、資源の有効利用という観点から比較用に加えている。

2.2 使用材料および調合

表－1に使用材料を、表－2にコンクリートの調合を示す。なお、比較用の50N、50N-RGには、普通ポルトランドセメント、砕石（50N）または再生粗骨材2種（50N-RG）、山砂、高性能AE減水剤を用いた。

2.3 試料の作製および測定

細孔径分布の測定試料は、練り混ぜたコンクリートを5mmふるいでウェットスクリーニングして作製した4×4×16cmのモルタル供試体である。材齢1日で脱型し、以後は所定の材齢まで20℃水中養生とした。細孔径分布の測定は、モルタル試料を所定の材齢でスライスし、約5mm角の測定用試料が得られるようにチップングした後、アセトンに浸けて水和反応を停止させ、その後、減圧乾燥を行い、水銀圧入式ポロシメータ（CE Instruments 社製 Pascal 140/440）を用いて行った。

圧縮強度および静弾性係数の測定試料はφ10×20cmのコンクリート供試体とした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および強度性状

表－3にフレッシュ試験結果を、表－4に圧縮強度試験結果を示す。W/C25%では、4週で94.0N/mm²、13週で99.3N/mm²の圧縮強度であった。材齢4週の強度に対する材齢13週の強度比率は、50Nおよび50N-RGでは1.18および1.12であるが、30BBおよび35BBでは1.24および1.23となり、材齢4週以後も強度の増進が活発に続くことを示している。しかし、25BBではその比率は1.06と小さい。潜在水硬性を示し長期間の強度増進が期待できる高

表－2 コンクリートの調合

記号	水セメント比(%)	細骨材率(%)	単 位 量 (kg/m ³)				
			セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
25BB	25.0	43.5	700	175	646	874	14.7
30BB	30.0	47.0	583	175	744	874	9.3
35BB	35.0	48.5	500	175	791	874	6.5
50N	50.0	46.7	360	180	793	952	4.3
50N-RG	50.0	44.5	360	180	757	891	4.0

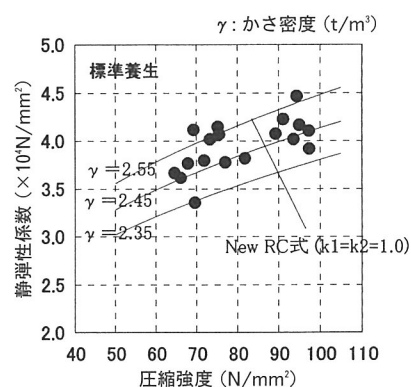
表－3 フレッシュ試験結果

記 号	スランブフロー/スランブ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)
25BB	68.5×64.0	0.7	24.0
30BB	65.5×65.5	0.8	24.0
35BB	65.5×64.5	0.9	24.0
50N	20.0	3.8	18.7
50N-RG	17.5	4.1	20.6

表－2 コンクリートの調合

記 号	圧 縮 強 度 (N/mm ²)				静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²) 標準養生4週
	標 準 養 生				
	1 週	4 週	8 週	13 週	
25BB	76.4	94.0	93.7	99.3	4.06
30BB	58.4	76.9	79.8	95.5	3.97
35BB	43.8	66.8	72.3	82.3	3.55
50N	34.4	43.7	—	51.4	3.08
50N-RG	27.5	34.5	—	38.5	2.44

φ10×20cm, 3本の平均



図－1 圧縮強度と静弾性係数

炉スラグであっても、水セメント比25%ではその効果はあまり発揮されていないが、30%、35%では材齢4週以後も活発な強度増進が期待できることが確認できた。

図－1に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。高炉セメントを用いた高強度コンクリートについても、New RC式ではほぼ評価できることが確認できた。なお、実際のかさ密度は2.45t/m³弱であった。

3.2 細孔径分布

図－2に細孔径分布を示す。50N、50N-RGについては、材齢26週の測定結果である。

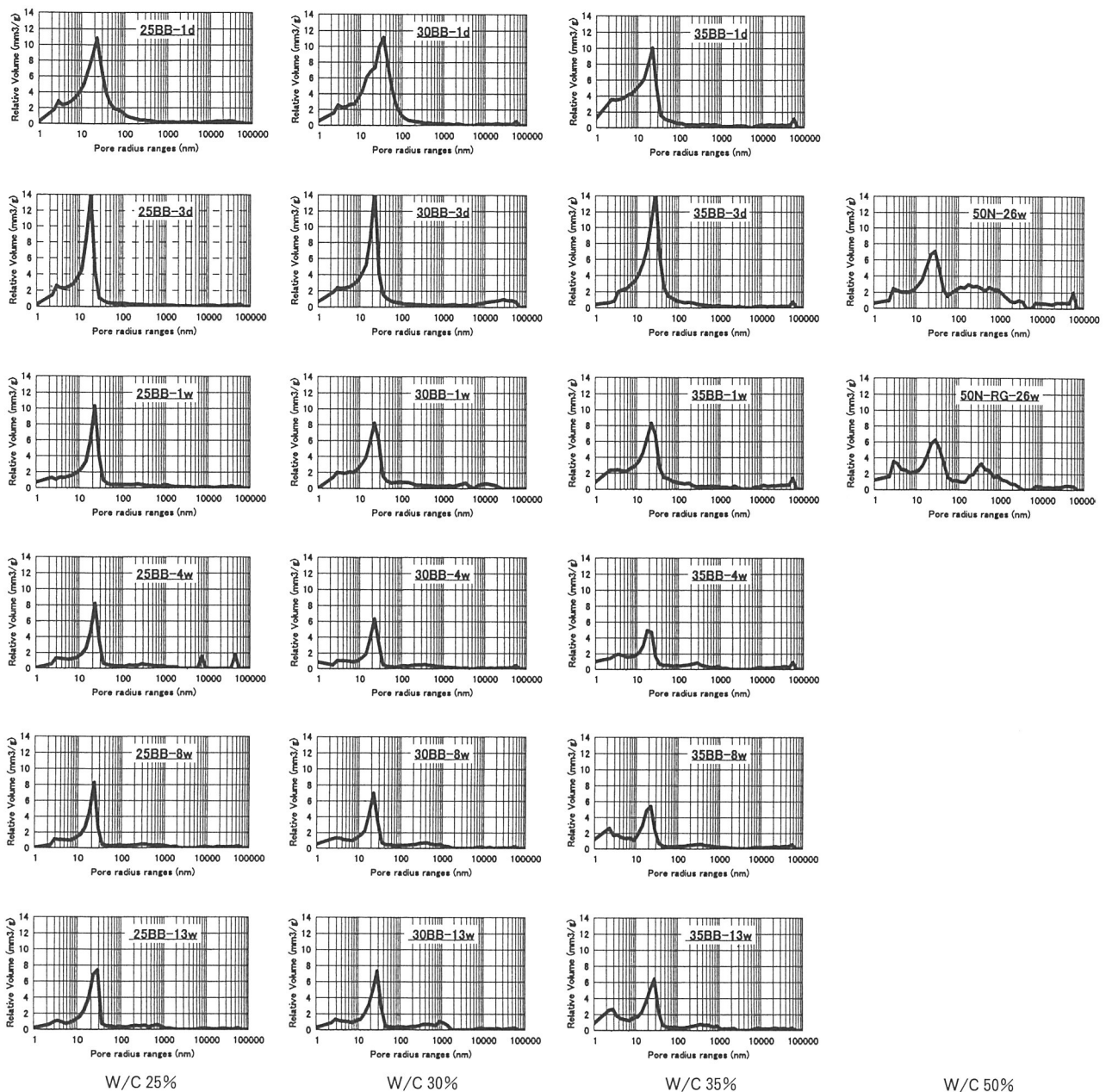


図-2 細孔径分布

図-3に、各水セメント比ごとに、材齢の進行にともなって細孔量がどのように変化しているかを、細孔の径ごとに区分して示す。細孔量は材齢の進行とともに減少し、材齢28日以降では、材齢1日での細孔量の約 $\frac{1}{2}$ に減少している。減少は主として半径3-25nmおよび半径25-50nmの細孔が減少することによる。また、W/C50%の細孔量と比べると、W/C25%,30%,35%では、50-1000nmの細孔が少ない。この範囲の細孔の大部分は、硬化コンクリートの骨材-セメントペースト界面の遷移帯を構成す

る細孔であるが、今回実施したような低水セメント比では遷移帯はほとんど形成されていないことを示している。

図-4に、細孔量と圧縮強度の関係を示す。

一般に、細孔量と圧縮強度の関係は、半径25-1000nmの細孔量と高い相関を示す⁹⁾とされている。また、橋田¹⁾は、W/C55%の普通強度コンクリートおよびW/C30%の高強度コンクリートの細孔空隙構造を検討し、普通強度コンクリートの圧縮強度は、直径50-5000nmの細孔空隙のうち、主に骨材-セメントペースト界面の遷移帯を形

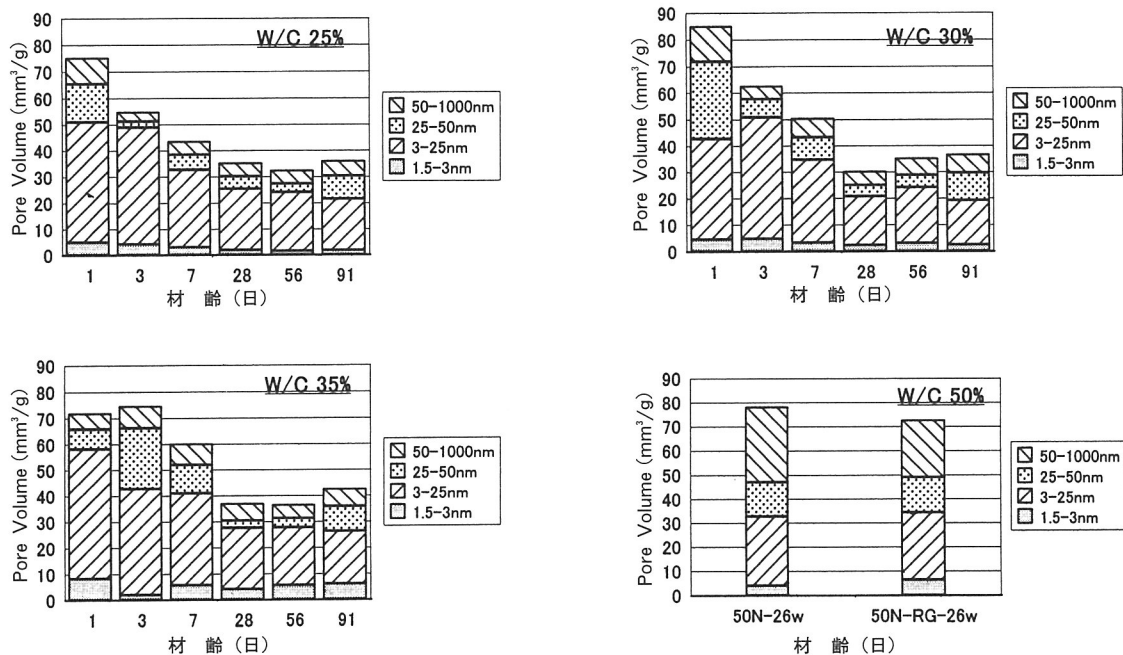


図-3 細孔量の経時変化

成する空隙量に依存し、高強度コンクリートの圧縮強度は、遷移帯が形成されないで、全毛細管空隙量（直径4-5000nmの細孔空隙量）に依存する、とした。今回の実験の範囲では、W/C25%,30%,35%のデータに関して、細孔量と圧縮強度の関係は、全空隙量に相当する半径1.5-10000nmの細孔量との相関（相関係数 $r=0.761$ ）および、1.5-3nm, 3-25nmの小さな細孔との相関性が同程度に高く、相関係数 r は0.654(1.5-3nm), 0.778(3-25nm)であった。高強度コンクリートであるため、遷移帯がほとんど形成されないこと、および潜在水硬性を示す高炉スラグによって、より緻密な硬化体が形成されていることが小さな細孔との相関性が高い理由として考えられる。

4. まとめ

高炉セメントB種を用いた高強度コンクリートの細孔径分布について検討した結果、長期の強度増進が期待できる高炉スラグであっても、水セメント比25%ではその効果はあまり発揮されていないが、30%、35%では材齢4週以後も活発な強度増進が期待できること、遷移帯がほとんど形成されていないこと、圧縮強度は全空隙量に相当する半径1.5-10000nmの細孔量との相関および、1.5-3nm, 3-25nmの小さな細孔との相関性が同程度に高いことが今回の実験で確認できた。

なお、シリカフェームセメントや低熱セメントなどを用いた高強度コンクリートの細孔径分布についても、引き続き検討していく予定である。

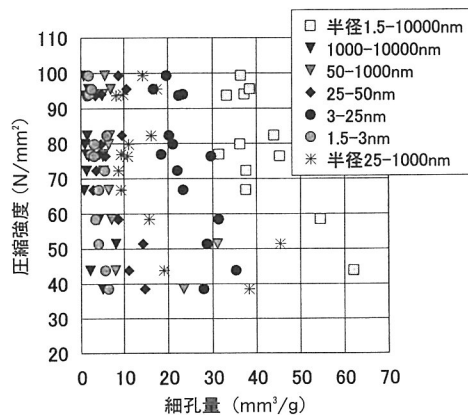


図-4 細孔量と圧縮強度

[参考文献]

- 1) 橋田浩：細孔空隙構造からのコンクリートの各種特性の形成機構に関する検討、清水建設研究報告、第63号、pp.1-9、1996.4.
- 2) 長瀧重義、米倉亜洲夫：高強度コンクリートの乾燥収縮及びクリープの特性、コンクリート工学論文、No.82.4-1、pp.1-13、1982.4.
- 3) 羽原俊祐：わかりやすいセメント科学 No.9-1, 9-2 コンクリートの構造とその物性、セメント・コンクリート、No.549-550、1992.
- 4) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート技術の要点 '95、1995.9.
- 5) H.Uchikawa：Engineering Foundation Conference "Advances in Cement Manufacture and Use" (Potosi, Missouri), pp.271-294, 1988.