

論文 加熱および中性化の影響を受けた各種セメント硬化体の諸特性に関する基礎的研究

渡辺 創一郎*¹・松沢 晃一*²・橘高 義典*³・小川 由布子*⁴

要旨:本研究では、セメント種類、水セメント比の異なるセメントペースト供試体を作製し、温度 20℃・60℃、炭酸ガス濃度 0%・10%の異なる環境で試験した場合の各供試体の諸特性について基礎的検討を行った。その結果、温度 60℃での加熱の影響により強度発現がセメントの種類で異なった。また、セメントペーストの強度低下に及ぼす中性化の影響は小さく、加熱による影響の方が大きいことが明らかとなった。60℃で加熱の影響を受けたセメントペーストの中性化深さも、20℃の養生と同様に、中性化速度係数と圧縮強度の逆数の比例関係が成り立ち、強度により中性化の程度を評価できることが明らかとなった。

キーワード: 加熱, 中性化, セメントペースト, 力学特性, 細孔径分布

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート造は、様々な用途の建築物に用いられるようになったが、特殊な用途の建築物に用いられることも少なくない。発電所施設、焼却施設などに鉄筋コンクリート造が用いられる場合は、用途の特性上から長期に渡り 65℃前後の温度環境下にさらされることもある。コンクリートの高温加熱に関する研究は、多く行われているが、そのほとんどは火災の影響などを考慮して 100℃を超えるような高温の温度条件を対象とした検討であり、100℃以下の温度条件を対象とし¹⁾、様々なセメント種類についての検討は行われていない。

また、鉄筋コンクリート造構造物の安全性や耐久性を考慮する場合に検討しなければならない要因の 1 つに中性化がある。コンクリートの中性化に関する検討も多く行われているが、100℃以下の高温加熱および中性化の 2 つの要因が複合的に検討された例は少ない。

本研究では、セメント種類、水セメント比の異なるセメントペースト供試体を作製し、温度 20℃および 60℃、炭酸ガス濃度 0%および 10%の異なる環境で試験した場合の各供試体の諸特性についての基礎的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験要因と水準および使用材料

表-1 に本研究で行った実験の要因と水準、表-2 に使用材料を示す。セメントは 5 種類を使用した。なお、フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種は、供試体作製時に普通ポルトランドセメントにそれぞれフライアッシュを 20%、高炉スラグ微粉末を 40%内割り混合したものをを用いた。水セメント比は 40%、50%、60%とした。促進中性化試験時の温度は 20℃、60℃、炭酸ガス濃度は 0% (外気と同等)、10%とした。また、試験期間は 0 日、30 日、60 日である。

表-1 実験の要因と水準

要因	水準
セメント種類	普通ポルトランドセメント, 中庸熱ポルトランドセメント, フライアッシュセメント B 種, 高炉セメント B 種, 普通エコセメント
水セメント比 (%)	40, 50, 60
温度 (°C)	20, 60
炭酸ガス濃度 (%)	0 (外気と同等), 10
試験期間 (日)	0, 30, 60

表-2 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	NC	密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3300cm ³ /g
	中庸熱ポルトランドセメント	MC	密度 3.21g/cm ³ 比表面積 3180cm ³ /g
	フライアッシュセメント B 種	FB	密度 2.97g/cm ³ 比表面積 3426cm ³ /g フライアッシュ 20%置換
	高炉セメント B 種	BB	密度 3.04g/cm ³ 比表面積 3860cm ³ /g 高炉スラグ 40%置換
	普通エコセメント	EC	密度 3.15g/cm ³ 比表面積 4400cm ³ /g

*1 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学専攻 博士前期課程 (正会員)

*2 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学専攻 助教 修士 (工学) (正会員)

*3 首都大学東京 都市環境科学研究科建築学専攻 教授 工博 (正会員)

*4 首都大学東京 都市環境科学研究科都市基盤環境工学専攻 博士後期課程 修士 (工学) (正会員)

表-3 調合

使用セメント	水セメント比 (%)	記号	単位量 (kg/m ³)					
			W	NC	MC	FB	BB	EC
普通ポルトランドセメント (NC)	40	NC40	558	1396	—	—	—	—
	50	NC50	612	1225	—	—	—	—
	60	NC60	655	1091	—	—	—	—
中庸熟ポルトランドセメント (MC)	40	MC40	562	—	1405	—	—	—
	50	MC50	616	—	1232	—	—	—
	60	MC60	658	—	1097	—	—	—
フライアッシュセメント B 種 (FB)	40	FB40	543	—	—	1357	—	—
	50	FB50	598	—	—	1195	—	—
	60	FB60	641	—	—	1068	—	—
高炉セメント B 種 (BB)	40	BB40	549	—	—	—	1372	—
	50	BB50	603	—	—	—	1206	—
	60	BB60	646	—	—	—	1076	—
普通エコセメント (EC)	40	EC40	558	—	—	—	—	1394
	50	EC50	612	—	—	—	—	1223
	60	EC60	654	—	—	—	—	1090

2.2 調合

表-3 に調合を示す。本研究では、細孔径分布を測定するため、供試体はセメントペーストとした。

供試体作製は、温度 20℃、相対湿度 60%の恒温恒湿室で行った。練混ぜには容量 10 リットルのモルタルミキサを使用した。水、セメントを投入し 60 秒間、掻き落しを 30 秒間、さらに 90 秒間練混ぜを行った。練混ぜ量は 1 バッチにつき 6 リットルとし、2 バッチ分を合わせた後に型枠に打設した。本研究で使用した供試体はセメントペーストとしたため、材料分離が生じないように練り返しを行いながら練上りから 2 時間の範囲内で打設を行った。なお、中性化深さを測定したところ、打設上部と下部で中性化深さに差が見られなかったことから、本研究で使用した供試体は均一に練られたものと判断した。供試体数は各調合につき、各試験材齢 2 体とした。

2.3 試験方法

図-1 に実験の流れを示す。供試体は打設後 2 日で脱型し、材齢 4 週まで標準養生を行った。その後、供試体を水中から取り出し、表面が乾燥したのを確認し、供試体の小口 1 面 (40×40mm 面) のみから炭酸ガスが浸透するように、それ以外の 5 面をアルミテープでシールした。シール後、供試体を恒温恒湿槽および促進中性化試験機で各温度 (20℃, 60℃)、炭酸ガス濃度 (0%, 10%) で所定の試験期間 (30 日, 60 日) まで試験した。なお、試験時の相対湿度は各条件とも 60%一定である。

試験期間が終わった供試体はアルミテープを取り外し、供試体を 4 等分 (炭酸ガス浸透面から 40, 80, 120mm) するように割裂した。そして、4 等分した試験片を用いて圧縮強度試験 (圧縮面は 38×38mm) を行い、圧縮強度試験を終えた試験片を用いて 1%フェノールフタレイン溶液を用いて中性化深さを測定した。中性化深さは 1 側面につき 6 等分した 5 箇所とした。

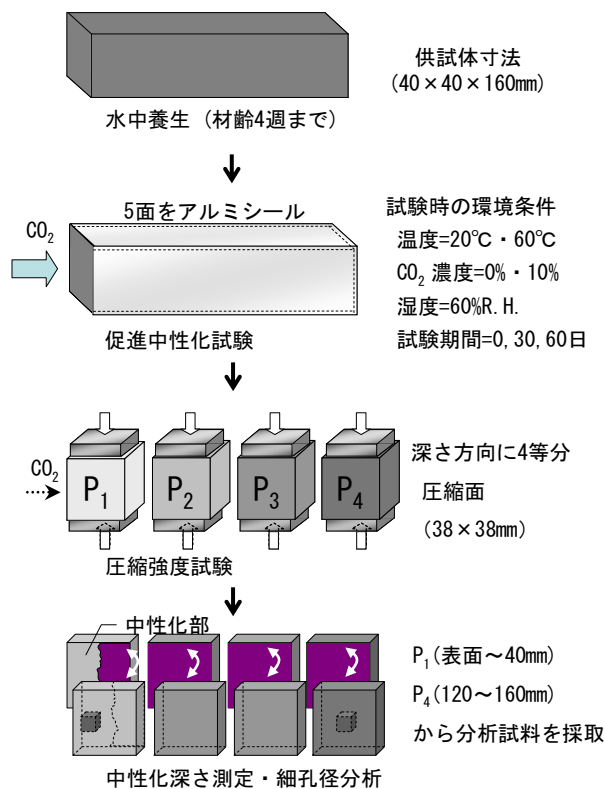


図-1 実験の流れ

水セメント比 50%で練り混ぜた試験片は、圧縮強度試験および中性化深さ測定後に、中性化している部分の試験片 (P1) および中性化がしていない部分の試験片 (P4) を 2.5mm 以上 5.0mm 以下に粉砕し、2 日間のアセトン浸漬により水和を停止させ、デシケーターにより相対湿度 11%条件下で重量変化がなくなるまで乾燥させた (2 週間程度)。重量変化がなくなるまで乾燥させた試験片は、水銀圧入法 (測定範囲は直径 5.5nm~500 μm) により、細孔径分布を測定し、中性化部分と中性化していない部分の微細構造を比較した。

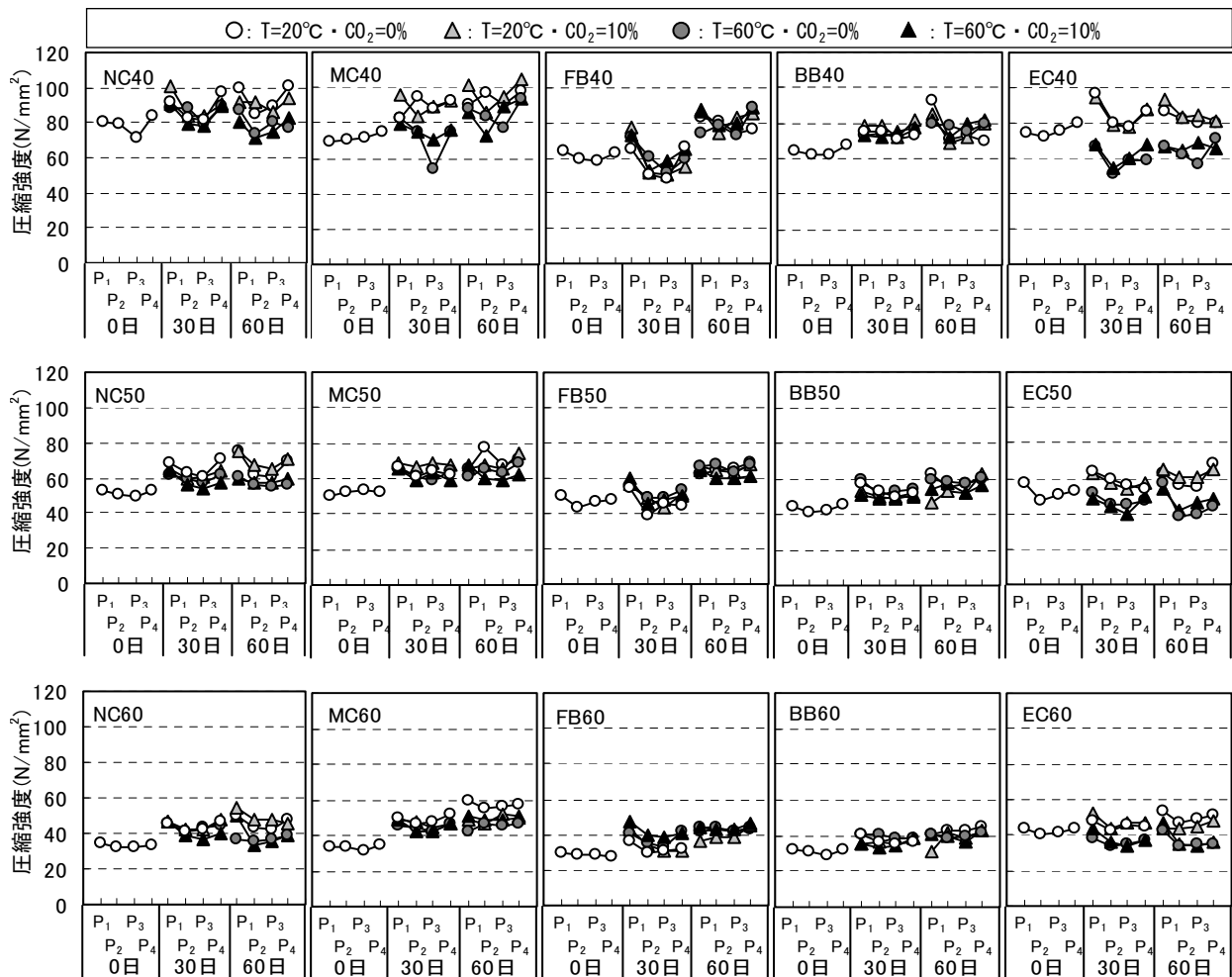


図-2 圧縮強度と試験期間の関係

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験結果

図-2 に圧縮強度と試験期間の関係を示す。試験期間が経過するにつれて、圧縮強度も増加する傾向にあるが、普通エコセメントの試験片強度は、温度を 60°C とした場合で強度が低下した。また、各セメントの試験期間 0 日の温度 20°C を基準とした場合、普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメントの試験片強度は 60°C では強度増加が小さくなった。しかし、フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種を用いた試験片強度は温度による差がほとんどなく、若干ではあるが温度 60°C の強度増加が大きくなる傾向が見られた。これは、加熱の影響によりフライアッシュや高炉スラグ微粉末のポゾラン反応、潜在水硬性による反応が促進されたと思われる。

各供試体の深さ方向の圧縮強度分布を見ると、表面付近 (P1) と最奥部 (P4) の強度が高くなる傾向が見られた。特に、水セメント比が小さくなるにつれて、その傾向は大きくなった。これは、加熱による表面部分の乾燥や、それに伴う水分移動、また、炭酸ガスの影響によるものと考えられる。

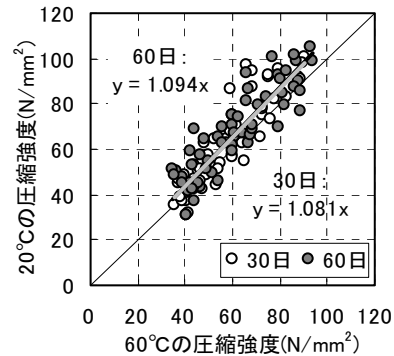


図-3 温度による圧縮強度の比較

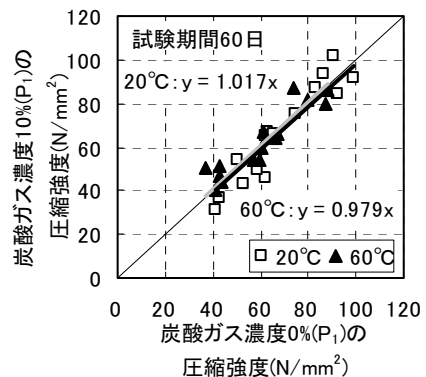


図-4 中性化の影響による圧縮強度の比較

図-3 に温度の違いによる圧縮強度の比較を示す。直線近似した結果、温度 60℃より 20℃の圧縮強度が若干高くなった。60℃では加熱により水分が損失し、強度に影響を及ぼしたのではと考えられる²⁾。

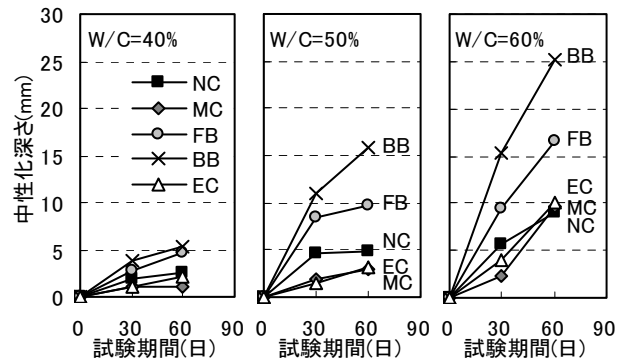
図-4 に中性化の影響による圧縮強度の比較を示す。温度 20℃と 60℃の強度がほとんど同じ直線で近似でき、試験期間 60 日では中性化の影響はほとんどなかった。セメントペーストの強度低下は、中性化による影響よりも加熱による影響の方が大きい。

3.2 中性化深さ測定結果

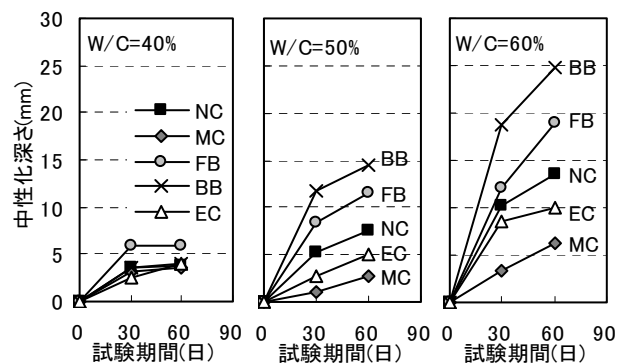
図-5 に中性化深さの測定結果を示す。セメント種類で比較すると、普通ポルトランドセメントの試験片と比較して、混和材が混入されているフライアッシュセメントB種、高炉セメントB種の試験片の中性化が大きくなる傾向にあった。逆に、中庸熱ポルトランドセメント、普通エコセメントの試験片は小さくなる傾向を示した。温度 20℃の中性化深さは、既往の研究³⁾と同様の傾向となった。普通ポルトランドセメント、普通エコセメントを比較すると、エコセメントの中性化深さが大きくなるという報告もある⁴⁾。しかし、本研究の温度 60℃の場合は、普通エコセメントの中性化深さが小さくなる傾向にあった。

加熱の影響による中性化深さの違いは、水セメント比 40%では、フライアッシュセメント B 種の試験片が最も大きくなり、その他のセメントの試験片は 5mm 以下でほぼ同等であった。水セメント比 50%では、温度 20℃の中性化深さとほぼ同程度であった。水セメント比 60%では、温度 20℃の傾向とは異なり、60℃で中庸熱ポルトランドセメント、普通エコセメント、普通ポルトランドセメントの試験片の順で中性化深さが大きくなった。フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種では、温度 20℃と 60℃でほぼ同等の中性化深さとなり、加熱の影響による中性化深さの差は見られなかった。

図-6 に中性化速度係数を示す。中性化速度は \sqrt{t} 則に基づくとし、 $C=A\sqrt{t}$ (C: 中性化深さ(mm), t: 期間(週))の係数A (mm/ $\sqrt{週}$)によって比較した。普通ポルトランドセメントの中性化速度係数は、温度 20℃より 60℃の方が大きく、加熱により中性化速度が大きくなった。しかし、中庸熱ポルトランドセメントでは温度 20℃に比べ 60℃での中性化速度係数が小さく、加熱による中性化速度係数への影響はなかった。フライアッシュセメントB種、高炉セメントB種では普通ポルトランドセメントに混和材を内割り混合しているため、単位セメント量が減少し、生成するCa(OH)₂量も減少するため、中性化速度係数は大きくなっている⁵⁾。普通エコセメントでは、加熱により水セメント比 40%、50%の中性化速度係数が大きくなった。



(a) 温度 20℃



(b) 温度 60℃

図-5 中性化深さ測定結果

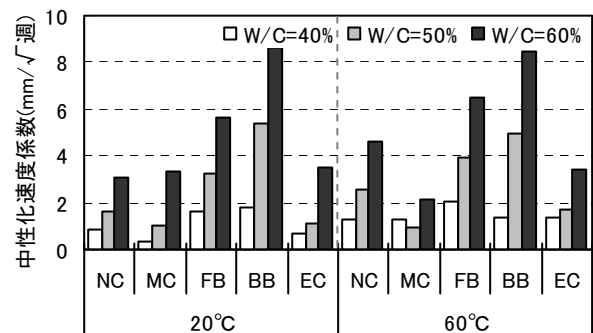
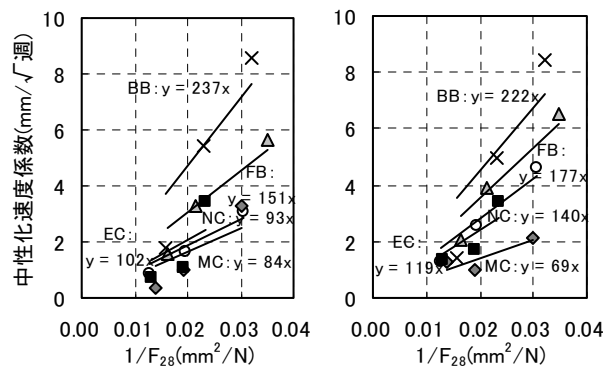


図-6 中性化速度係数



(a) 温度 20℃

(b) 温度 60℃

図-7 中性化速度係数と 28 日圧縮強度の逆数の関係

和泉ら⁶⁾は促進中性化試験において、中性化速度係数と試験開始時の圧縮強度の逆数が直線関係にあると報告している。本研究でも、この関係が成立するか考察した。図-7に中性化速度係数と28日圧縮強度の逆数の関係を示す。温度20℃と60℃では、普通ポルトランドセメントでは20℃の傾きが小さくなったものの、その他はほぼ同様な直線の傾きを示した。セメント種類に関わらず、比較的相関がよく、本実験においても中性化速度係数と28日圧縮強度の逆数の関係は直線近似が可能であった。加熱の影響を受けたセメントペーストの中性化深さも、中性化速度係数と圧縮強度の逆数によって関係付けられる。

3.3 細孔径分布測定結果

図-8に水セメント比50%、試験期間30日の細孔径分布を示す。50nm~2000nmの毛細管空隙は加熱、中性化により水和の促進や乾燥により状態が変化する可能性がある⁷⁾。普通ポルトランドセメントでは20℃の細孔径分布は20nm付近に細孔のピークが存在し、炭酸ガスの影響を受けても同じ分布を示している。しかし、60℃ではP1が加熱による乾燥の影響で50nm以上の空隙が急激に増加した。中庸熟ポルトランドセメントでは、20℃と60℃ともに同じ20nm付近にピークを持つ分布を示し、加熱と中性化による細孔の変化は見られなかった。フライアッシュセメントB種では、20℃の炭酸ガス10%のP1とP4を比較すると、P1の細孔容積が少ない。これは中性化の影響により、水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化し、組織が緻密化したものと思われる。また、60℃ではP1の細孔のピークが大きい径へとシフトし、加熱による空隙の粗大化が確認された。高炉セメントB種では、60℃のP1で100nm付近ピークがあった細孔が小さい径へとシフトし、中性化により緻密化したことが考えられる。普通エコセメントの20℃では20nm付近に細孔のピークが存在したが、60℃では100nm付近に細孔のピークが大きい径へとシフトし、空隙が粗大化したことが確認できる。

表-4に水セメント比50%、試験期間30日における細孔容積の割合を示す。内川ら⁸⁾は50nm以上の空隙がコンクリート強度や耐久性に大きく影響を与えると報告している。本研究では直径5.5nm~10000nmの範囲で50nm以上の空隙が総細孔径容積に占める割合を求めた。総細孔容積は0.094~0.143mL/gの範囲に存在し、普通エコセメントで20℃と比較して60℃の総細孔容積が増加しているが、その他のセメントはほとんど変化していない。50nm以上の空隙割合は、P4と比較してP1で増加する傾向にある。また、炭酸ガスの有無に関わらず、20℃と比較して60℃の空隙割合が増加している。P1のような表層部は乾燥しやすく、60℃加熱により、さらに乾燥が進行したものと考えられる。

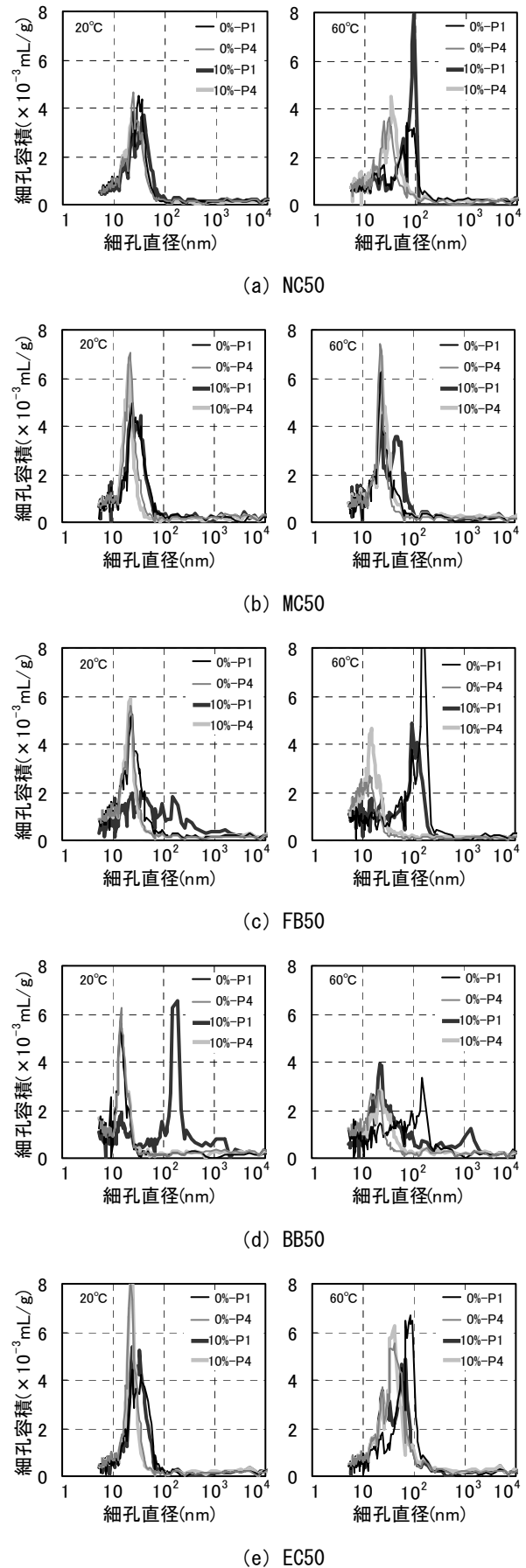


図-8 細孔径分布

表-4 細孔容積の割合 (W/C=50%・試験期間 30 日)

環境条件	細孔容積の割合	NC		MC		FB		BB		EC	
		P1	P4	P1	P4	P1	P4	P1	P4	P1	P4
20℃, CO ₂ =0%	総細孔容積 (mL/g)	0.112	0.105	0.125	0.128	0.136	0.120	0.116	0.126	0.116	0.122
	50nm 以上 (%)	7.1	7.1	10.7	5.8	7.5	5.0	20.7	20.3	29.1	18.2
	50nm 未満 (%)	92.9	92.9	89.3	94.2	92.5	95.0	79.3	79.7	70.9	81.8
20℃, CO ₂ =10%	総細孔容積 (mL/g)	0.103	0.106	0.127	0.112	0.094	0.122	0.102	0.125	0.117	0.117
	50nm 以上 (%)	12.9	7.2	9.7	5.0	30.1	5.7	56.1	21.8	26.2	18.9
	50nm 未満 (%)	87.1	92.8	90.3	95.0	69.9	94.3	43.9	78.2	73.8	81.1
60℃, CO ₂ =0%	総細孔容積 (mL/g)	0.100	0.104	0.117	0.115	0.119	0.111	0.099	0.104	0.130	0.143
	50nm 以上 (%)	39.6	9.8	9.2	6.2	48.7	3.6	51.0	26.3	65.0	39.0
	50nm 未満 (%)	60.4	90.2	90.8	93.8	51.3	96.4	49.0	73.7	35.0	61.0
60℃, CO ₂ =10%	総細孔容積 (mL/g)	0.120	0.116	0.129	0.128	0.122	0.137	0.116	0.107	0.127	0.140
	50nm 以上 (%)	48.9	12.7	20.7	8.8	36.8	4.5	35.6	26.1	44.9	35.4
	50nm 未満 (%)	51.1	87.3	79.3	91.2	63.2	95.5	64.4	73.9	55.1	64.6

20℃の普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、エコセメントでは炭酸ガスの影響を受けても、細孔量はほとんど変化がなかった。これは中性化深さが小さく、露出表面付近のみにとどまっており、炭酸ガスが供試体内部の細孔を変化させるまでの影響を及ぼしていないことが考えられる。全体的に P4 は 50nm 未満の細孔径の割合が高く、加熱や中性化の影響を受けにくく、安定して水和反応が進んでいると考えられる。エコセメントの 60℃、炭酸ガス 0% では、50nm 以上の細孔が総細孔容積の 65.0% と最大となった。このことが、加熱による圧縮強度の低下に繋がったものと思われる。

4. まとめ

加熱および中性化の影響を受けた各種セメント硬化体の諸特性に関する基礎的研究を行った結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) 温度 60℃ の場合、普通エコセメントは、普通ポルトランドセメントより強度が低下する傾向にある。
- (2) 普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、普通エコセメントでは温度 60℃ より 20℃ の圧縮強度が若干高いが、フライアッシュセメント B 種、高炉セメント B 種では温度による強度差は小さい。
- (3) セメントペーストの強度低下は、中性化による影響よりも加熱による影響の方が大きい。
- (4) 中性化速度係数は、普通ポルトランドセメントでは温度 20℃ より 60℃ が大きくなり、中庸熱ポルトランドセメントでは、20℃ より 60℃ の方が小さくなる。
- (5) 加熱の影響を受けたセメントペーストの中性化深さも、中性化速度係数と圧縮強度の逆数の関係が成り立つ。
- (6) 細孔径分布は、加熱の影響により粗大化する傾向にある。

謝辞

本研究の一部は、平成 20 年度経済産業省高経年化対策強化基盤整備事業の一環として行ったものである。また一部は、太平洋セメント株式会社との共同研究により行ったものである。

参考文献

- 1) 蔵重勲, 千田太詩, 吉田崇宏, 杉山大輔: 各種温湿度雰囲気暴露したセメント硬化体の細孔構造, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, pp.615-620, 2008
- 2) 嵩英雄, 大野定俊: 高温下のコンクリートの物性, コンクリート工学, Vol.22, No.3, pp.13-20, 1984.3
- 3) 杉田英明, 御手洗泰文: 各種セメントを用いたコンクリートの中性化に関する一考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.405-406, 1988 年 10 月
- 4) 早川光敬: エコセメントを使用したモルタルの物性に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.245-246, 2006 年 9 月
- 5) 守屋健一, 全洪珠, 嵩英雄: コンクリートの単位水量と乾燥収縮に及ぼすフライアッシュおよび高性能 AE 減水剤の影響に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.245-250, 2006
- 6) 和泉意登志, 嵩英雄, 押田文雄, 西原邦明: コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調査および養生条件の影響について, 第 7 回コンクリート工学年次論文集, pp.117-120, 1985.6
- 7) 横関康祐, 渡邊賢三, 安田和弘, 坂田昇: 炭酸ガスによるコンクリートの高耐久化, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.555-560, 2002
- 8) 内川浩, 羽原俊祐, 沢木大介: 混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現性状におよぼす影響, セメント・コンクリート論文集, Vol.44, pp.330-335, 1990