

論文 異なる温度養生の影響を受けたモルタルの細孔構造からの強度推定式の検討

松沢 晃一*1・橋高 義典*2・塚越 雅幸*3・船越 貴恵*4

要旨: 本研究では、水セメント比 40, 50, 60, 80, 100%のモルタル供試体を作製し、材齢 4 週まで 20℃水中で標準養生、その後、20, 40, 60, 80℃と温度の異なる水中で 4 週間の温度養生を行なった場合の各供試体について圧縮強度および細孔構造を測定し、両者の関係性について検討を行なった。その結果、異なる温度養生の影響を受けたモルタル供試体の圧縮強度と細孔構造には高い相関性あり、細孔構造を測定することにより、強度推定を行うことが可能であることが示された。

キーワード: モルタル, 温度養生, 圧縮強度, 細孔構造, 強度推定

1. はじめに

高度成長期から続いてきたスクラップ・アンド・ビルドという考えから、構造物を長期に供用するという考えに改められてきている昨今、改修工事などを行う際、既存構造物の耐久性を適切に評価することが重要となっている。鉄筋コンクリート造構造物に関しては、コンクリート強度を評価する必要がある。一般的には、構造物からコア供試体を採取し、圧縮強度試験を行なうことで評価することが多い。この方法が構造物に使用されているコンクリートの強度特定に有効であることは言うまでもないが、コア供試体の採取が困難な部位などには適用できない。その様な場合には、コンクリート試料を少量採取し、細孔構造を測定することから強度を推定する手法も有効であると考えられる^(例えば 1),2)。この手法は、コンクリート試料を少量採取することで行なえ、構造物を傷つけることが少ない点からも有効性が高いと思われる。ただし、本手法を多くの構造物に適用するためには、様々な強度域のコンクリートに対応できること、多様な環境に曝された場合での検討なども必要であると考えられる。

本研究では、13.5N/mm²程度の低強度域から 60N/mm²程度までの高強度域のコンクリートを想定し、その前段として水セメント比が 40~100%のモルタル供試体を作製し、それらが 20~80℃と水温の異なる温度養生の影響を受けた場合の各供試体の圧縮強度および細孔構造の測定を行い、両者の関係性について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 に使用材料を示す。セメントは研究用セメント、細骨材は豊浦産硅砂を使用した。

表-2 に実験の要因と水準を示す。水セメント比は 40, 50, 60, 80, 100%の 5 水準、試験時の水温は、20, 40, 60, 80 の 4 水準とした。

表-3 に調査および基礎的性状を示す。供試体は寸法 φ50×100mm のモルタル供試体とした。調査はフロー値 (JIS R 5201) が 180±10mm となるように砂セメント比 (重量比) を設定した。4 週標準養生圧縮強度は、13.7~65.8N/mm²となっている。

表-1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	研究用セメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	硅砂 (豊浦産)	S	表乾密度 2.62g/cm ³

表-2 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	40, 50, 60, 80, 100
養生温度 (°C)	20, 40, 60, 80

表-3 調査および基礎的性状

水セメント比 (%)	砂セメント比 (wt.)	単位量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)	4 週標準養生圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S		
40	1.2	341	851	1022	184	65.8
50	1.8	333	665	1197	179	40.2
60	2.3	334	557	1282	177	32.0
80	3.0	354	442	1327	175	19.0
100	3.6	372	372	1338	178	13.7

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 助教 修士 (工学) (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域 教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソシオテクノサイエンス研究部 助教 博士 (工学)

*4 首都大学東京 都市環境学部建築都市コース

供試体作製は温度 20℃、湿度 60%R.H.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。セメント、細骨材をミキサに投入し空練りを 30 秒間、水を投入し 30 秒間練混ぜを行い、掻き落とし、さらに 60 秒間練混ぜを行なった後に型枠に打ち込んだ。なお、水セメント比 80、100%の供試体については、砂セメント比を調整することでブリージングを抑えられるものと想定したが、それでもブリージングが生じたため、30 分練り置き後に再度、30 秒間練混ぜを行ない型枠に打ち込み、ブリージングの影響が少なくなるよう配慮した。練混ぜ量は 1 バッチにつき 5 リットルである。また、供試体数は各調合につき、各試験条件 3 体とした。

2.2 試験方法

図-1 に実験の流れを示す。供試体は打ち込み後 1 日で脱型し、材齢 4 週まで標準養生を行った。その後、20、40、60、80℃と水温の異なる水中で 4 週間の温度養生を行なった。温度養生を終えた供試体は水中から取り出し、温度 20℃、湿度 60%R.H.の恒温恒湿室に 1 日静置した後に圧縮強度試験を行なった。

圧縮強度試験を終えた供試体は 2.5~5mm の大きさに粉砕し、アセトン浸漬により水和を停止させ、塩化リチウムを用いて湿度 11%R.H.に調湿を行なった窒素ガス環境のデシケータ内で 2 週間乾燥させ、水銀圧入法（測定範囲は 5.5nm~500 μ m）により細孔構造の測定を行なった。なお、圧縮強度試験および細孔構造測定は材齢 4 週の標準養生供試体についても行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 供試体の外観

写真-1 に温度養生後の水セメント比 60% 供試体の外観を示す。養生温度の違いにより供試体表面の色に違いが見られる。温度 60℃までは温度が高くなるに伴い黄色が強くなっている³⁾。また、温度 80℃の供試体は表面に白みを帯びている。これは、カルシウム分が表面に析出したためであると考えられる。なお、本研究では養生を水中で行なっているため、80℃のような高温養生であっても供試体の乾燥による表面にひび割れの発生は確認されなかった。

3.2 圧縮強度試験結果

図-2 に温度養生後の圧縮強度試験結果を示す。養生温度に関係なく、水セメント比が高くなるに伴い強度が小さくなっている。また、養生温度が 40℃と 60℃の間で若干の強度低下が確認できる。これは、50℃以上で C-S-H が変化しているため⁴⁾だと思われる。しかし、既往の研究のように 50℃付近での著しい強度低下⁵⁾は見られなかった。本研究での試験が水中で行なわれているため、乾燥の影響を受けずに水和が進行したと思われる。

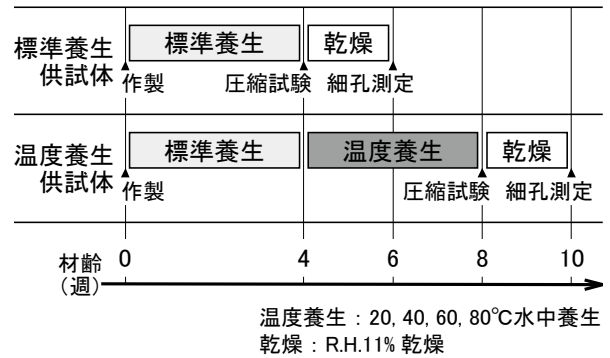


図-1 実験の流れ

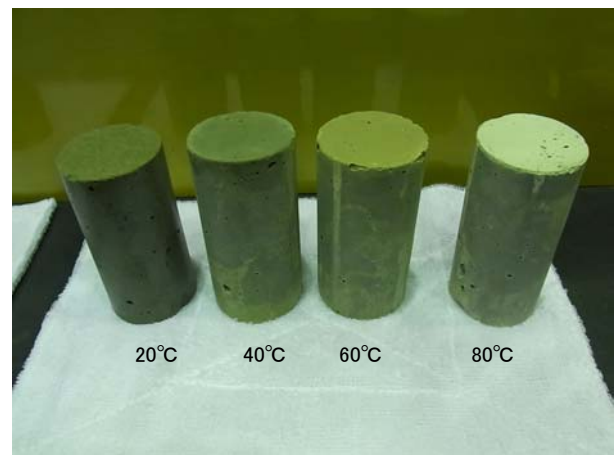


写真-1 温度養生後の供試体の外観
(水セメント比=60%)

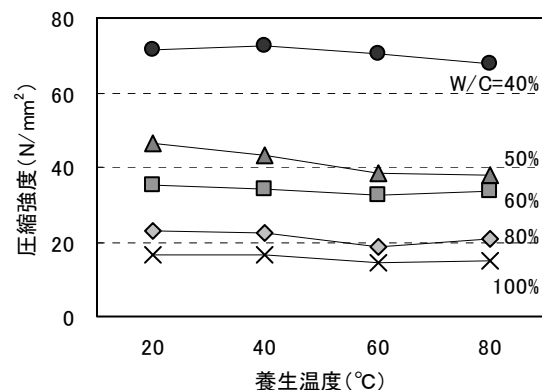


図-2 圧縮強度と養生温度の関係

3.3 細孔構造測定結果

図-3 に温度養生前の材齢 4 週標準養生後の細孔径分布測定結果を示す。水セメント比 40%では細孔径のピークが 20nm 付近にあるが、水セメント比 50、60%では 50nm 付近、水セメント比 80、100%では 200nm 付近と細孔直径の大きい方へシフトし、また、ピーク径での細孔量が増加している。これは、水セメント比が高くなるに伴い細孔構造が粗大になっているためである。

図-4 に温度養生前の材齢 4 週標準養生後の細孔量を示す。水セメント比が高くなるに伴い総細孔量が増加している。これは、水セメント比が高いほど余剰水が多く、水和後の空隙が多くなり、細孔量が増加する結果となったと考えられる。細孔量の分布は、細孔径 5.5~50nm の細孔量は水セメント比 40%が少ないが、その他はほぼ同じである。また、50~5000nm の細孔量は、水セメント比が高くなるに伴い増加している。5000nm 以上の細孔量も 50~5000nm 同様に水セメント比が高くなるに伴い増加するが、5.5~50nm 範囲を除く各範囲の細孔量増加率と比較すると、その増加量は少ない。

図-5 に温度養生後の細孔径分布測定結果を示す。水セメント比 40, 50%では細孔径分布に養生温度による顕著な変化は見られないが、水セメント比 60, 80, 100%では温度が高くなるに伴い若干ではあるが、細孔径のピークが径の大きい方へシフトしている。これは、水セメント比 40, 50%と比較して 60, 80, 100%の場合は温度の影響をより強く受けたものと考えられる⁹⁾。つまり、高水セメント比である 60, 80, 100%の供試体には余剰水が多く存在し、もともと粗大な空隙が多く存在しているが、それに熱の影響が加わることで細孔直径 200~300nm 付近の空隙がさらに増加したものと思われる。なお、水セメントが大きくなるに伴い径の大きい方へシフトし、ピーク径での細孔量が増加している。

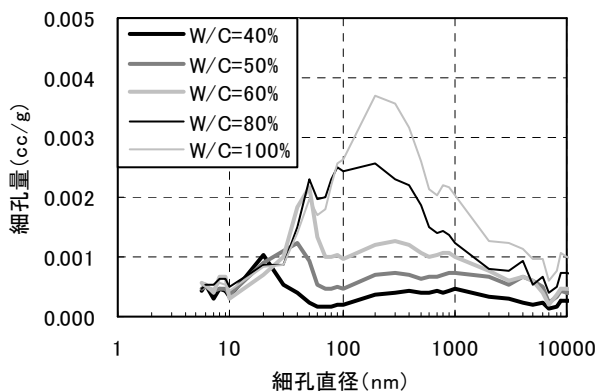


図-3 細孔径分布 (温度養生前)

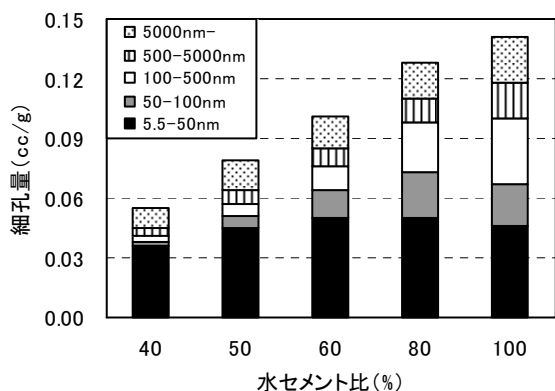


図-4 細孔量 (温度養生前)

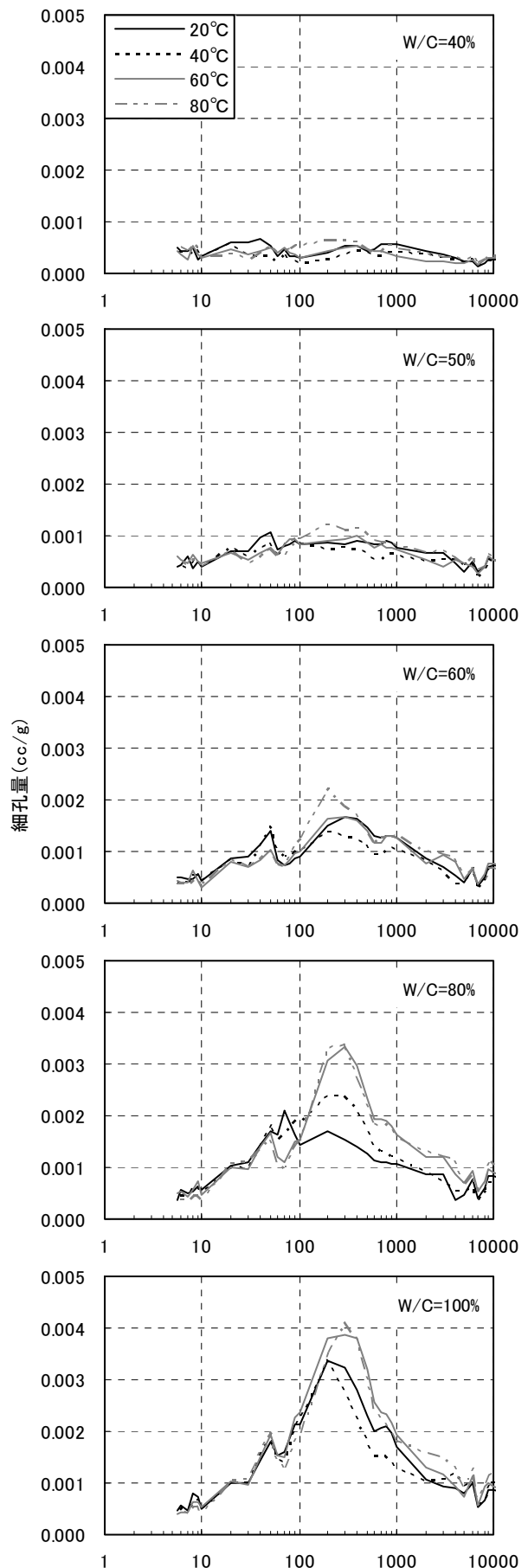


図-5 細孔径分布 (温度養生後)

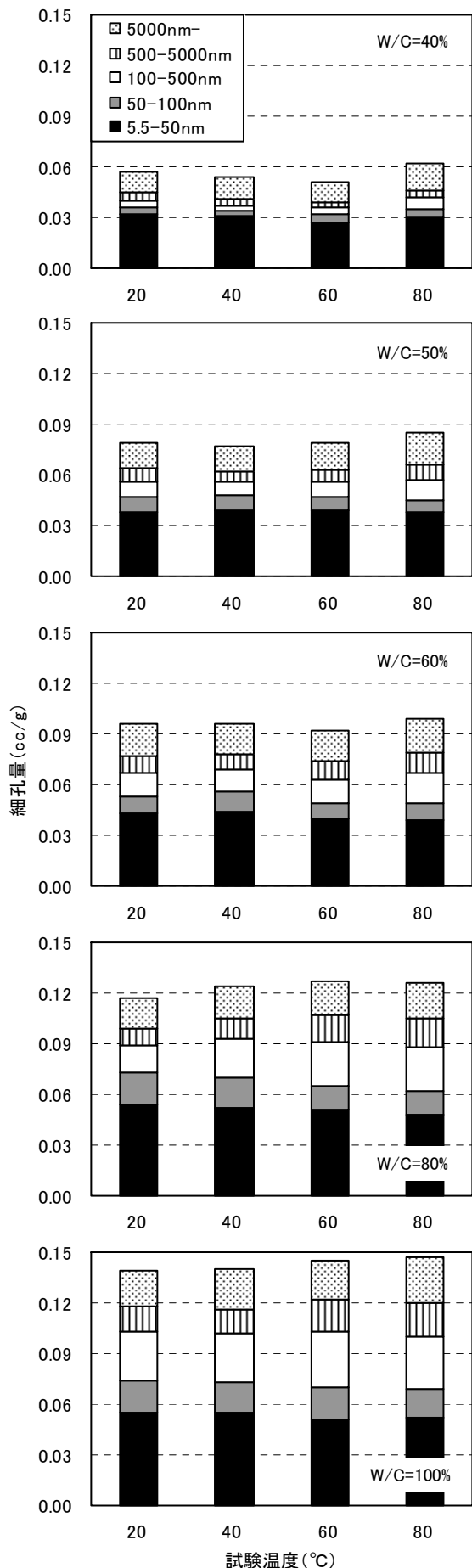


図-6 細孔量 (温度養生後)

図-6 に温度養生後の細孔量を示す。標準養生の期間が長くなるに伴い、総細孔量は減少する傾向にあるが、養生温度が高くなると、総細孔量の減少が少なく、ほとんど変わらない傾向にある。また、細孔量の分布は、温度が高くなるに伴い5.5~50nmの細孔量が減少し、50nm以上の細孔量が増加している。しかし、それらの変化は小さい。水セメント比で比較すると、水セメント比が高くなるに伴い細孔量も増加している。これは、高水セメント比の供試体中には水分が多く存在し、温度の影響に関わらず粗大な空隙形成につながったと思われる。

3.4 圧縮強度と細孔構造の関係性

本研究では対象としている水セメント比が40~100%と多岐にわたっており、検討する細孔径もそれぞれの水セメント比で異なると思われたが、既往の研究²⁾にならい、対象とする細孔直径を50~5000nm(以下、本研究における有効細孔量ETPVとする)とし、有効細孔量と圧縮強度との関係性について検討を行うこととした。

図-7 に温度養生前の材齢4週標準養生後の圧縮強度と有効細孔量の関係を示す。水セメント比が高くなるに伴い圧縮強度が低下し、有効細孔量が増加している。

図-8 に温度養生後の各供試体の圧縮強度と有効細孔量の関係を示す。温度が高くなるに伴い有効細孔量が若干ではあるが増加し、強度が低下する傾向にある。そして、有効細孔量も細孔量同様に、水セメント比が高くなるに伴い増加しているのが分かる。

図-7 および図-8 より、温度養生の影響を受けたセメント硬化体においても圧縮強度と有効細孔量(細孔直径50~5000nmの細孔量)には関係性があることが示された。そこで、図-9 に本研究で温度養生を行なった全ての供試体についての圧縮強度と有効細孔量の関係を示す。また、以下に図-9 より得られた回帰式を示す。

$$F_c = -31.083 \ln(ETPV) - 68.976 \quad (1)$$

$$(R^2 = 0.938)$$

ここに、 F_c : 圧縮強度 (N/mm²)

$ETPV$: 有効細孔量 (50~5000nmの細孔量) (cc/g)

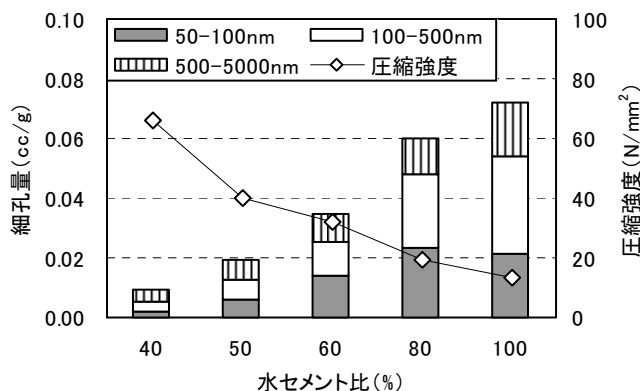


図-7 圧縮強度と有効細孔量の関係 (温度養生前)

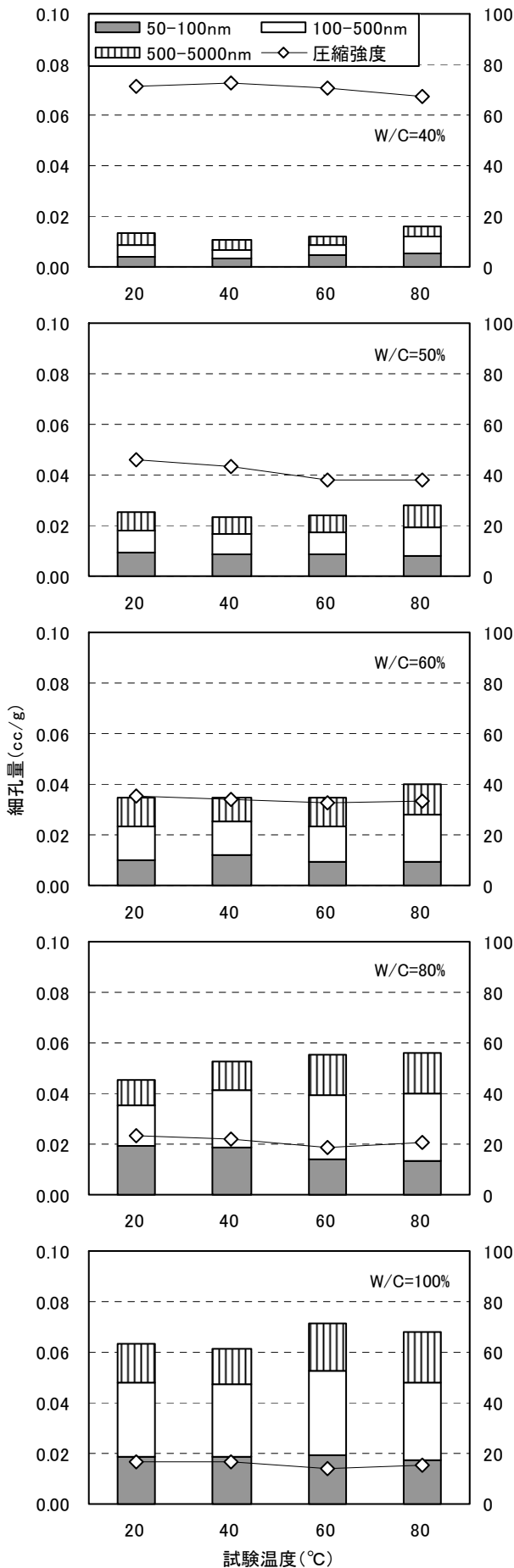


図-8 圧縮強度と有効細孔量の関係（温度養生後）

式(1)によると、圧縮強度と有効細孔量との間に高い相関があることを示していることが分かる。 $(R^2=0.938)$ 。そのことから、様々な温度養生の影響を受けたセメント硬化体であっても、その細孔構造を測定することにより、強度を推定することが可能であると考えられる。また、本式は、低強度域から高強度域を精度良く表現している。

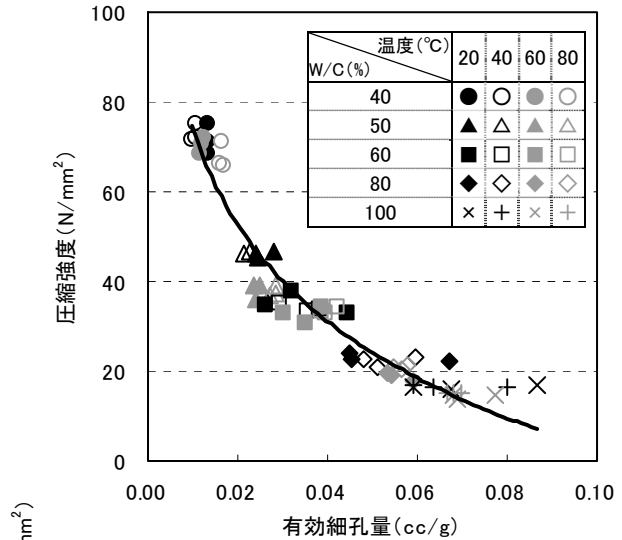


図-9 圧縮強度と有効細孔量の関係（温度養生後）

4. まとめ

本研究では、 13.5N/mm^2 程度の低強度域から 60N/mm^2 程度までの高強度域のコンクリートを想定し、その前段として水セメント比が40~100%のモルタル供試体を作製し、それらが20~80°Cと水温の異なる温度養生の影響を受けた場合の各供試体の圧縮強度および細孔構造の測定を行い、両者の関係性について検討を行った。その結果、本研究の範囲内で以下のことが明らかとなった。

- (1) 供試体の外観は、温度60°Cまでは温度が高くなるに伴い黄色が強くなり、温度80°Cの供試体は表面に白みを帯びる。
- (2) 圧縮強度は、水セメント比が高くなるに伴い小さくなり、また、試験温度が40°Cと60°Cの間で若干の強度低下がおきる。
- (3) 温度養生前の細孔構造は、水セメント比が高くなるに伴い細孔径のピークが細孔直径の大きい方へシフトし、ピーク径での細孔量も増加する。
- (4) 水セメント比40, 50%では細孔径分布に養生温度による顕著な変化は見られないが、水セメント比60, 80, 100%では温度が高くなるに伴い若干ではあるが、細孔径のピークが径の大きい方へシフトしている。また、養生温度が高いと、温度養生前と比較して総細孔量に変化はほとんど見られないが、養生温度が低くなるに伴い、総細孔量が減少する傾向にある。

- (5) 異なる温度の影響を受けたセメント硬化体であっても、圧縮強度と有効細孔量（細孔直径 50～5000nm の細孔量）との間には高い相関がある。

参考文献

- 1) 吉野利幸, 鎌田英治, 田畑雅幸, 柳敏幸: 空隙構造依存性に基づくコンクリート強度推定法に関する研究—第1報 圧縮強度と空隙構造の関係—, 日本建築学会論文報告集, 第312号, pp.9-17, 1982.2
- 2) 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, 1996.4
- 3) 金津努, 松村卓郎, 西内達雄: 高温下に長期暴露したコンクリートの力学的性質の変化, 電力中央研究所報告, 研究報告:U95037, 1996.3
- 4) 廣永道彦, 蔵重勲, 井元晴丈: セメント硬化体の熱影響に関する検討—温度 65°Cにおけるセメント系材料の変質状況について—, 電力中央研究所報告, 研究報告: N04013, 2004.11
- 5) 岸谷孝一, 嵩英雄, 奥山治也, 奥野亨: 20～300°Cの高温にさらされたコンクリートの諸性質に関する研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.143-144, 1972.10
- 6) 近藤連一, 後藤政史, 大門正機, 保坂義公: セメントの水和に及ぼす加熱養生の影響, セメント技術年報 27, pp.45-50, 1973