

湿潤養生期間が構造体コンクリートの品質に与える影響

The Effect of Termination Time of Moisture Curing on Quality of Concrete in Structure

西本 好克 YOSHIKATSU NISHIMOTO

松田 拓 TAKU MATSUDA

河上 浩司 HIROSHI KAWAKAMI

コンクリート工事において、初期の湿潤養生が構造体コンクリートの品質に影響を与えることが知られている。しかし、これまでの研究は、普通セメントを用いたコンクリートやテストピースによる検討が多く、中庸熱セメントや低熱セメントを使用した実物大模型での研究は少ない。そこで、これらのセメントを使用した実物大模型により、初期の湿潤養生期間が構造体コンクリートの品質に与える影響について検討した。

その結果、中庸熱セメントあるいは低熱セメントを使用した場合にも、普通セメントと同様、所定の強度が得られるまで湿潤養生を施せば構造体コンクリートの品質は確保されることが明らかとなった。

キーワード：湿潤養生、構造体コンクリート、中性化、品質管理

In concrete construction, it is known that quality of concrete is effected by moisture curing at early age. It was examined mostly by test pieces or using ordinaly portland cement. But, the number of examinations by the full-scale model made with moderate-heat portland cement or low-heat portland cement is little. So, the effect of moisture curing at early age is examined with the full-scale model made with these cement.

As the result, it is confirmed that if the structural concrete is under moisture curing until the strength developed necessary level, the quality of structural concrete made with moderate-heat portland cement or low-heat portland cement is obtained.

Key Words: Moisture Curing, Structural Concrete, Carbonation, Quality Control

1. はじめに

コンクリート工事において、構造体コンクリートの品質を確保するうえで初期の湿潤養生が重要であることは広く認知されている。しかし、実際の工事においては経済性の観点から施工を進めるため、コンクリートのせき板解体はセメントの水和が活発な若材齢で実施されることが一般的である。このような場合、コンクリートの表面より乾燥するため、表層部では水和に必要な水分が不足すると予想される。その結果、表層ほど内部と比較して乾燥の影響を受けコンクリートの含水率が低くなり、コンクリートの強度発現、耐久性に影響を及ぼすことが危惧される。普通ポルトランドセメント(Nセメント)を用いたコンクリートにおいて、一定値以上の圧縮強度が得られた時点で湿潤養生を打ち切っても、その後の強度発現や耐久性に及ぼす影響がないとの報告¹⁾がなされ、JASS5²⁾では普通セメントを使用した場合には初期

の湿潤養生期間を5日間、早強セメント(Hセメント)を使用した場合には3日間以上、または圧縮強度が10N/mm²以上得られた時期としている。しかし、近年ひび割れ抑制や高強度コンクリートへの対応を目的として使用例が増えている中庸熱ポルトランドセメント(Mセメント)や低熱セメントポルトランド(Lセメント)を用いたコンクリートへの影響についての研究は少ない。

このため、本研究ではMセメント、Lセメントを使用したコンクリートを用いて、初期の湿潤養生期間が圧縮強度および耐久性に与える影響について実験的に検証した。

2. 実験概要

(1) 試験体の種類

実験は表-1に示すように、Nセメントでは水セメント比を1水準、MおよびLセメントでは水セメント比を2

表-1 コンクリート調合

調合 種別	試験 時期	W/C (%)	SI (cm)	Air (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						C	W	S	G	Ad
N55	標準	55.0	18	4.5	47.0	327	178	827	946	3.24
	冬				47.6	316	174	845		3.16
M55	標準	55.0			47.6	318	175	845		3.18
	冬				48.0	311	171	861		3.11
M45	標準	45.0			44.6	409	184	749		4.09
	冬				45.1	400	180	764		4.00
L45	冬	45.0	45.7	391	176	783	3.91			

C: N=普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)
 M=中庸熱ポルトランドセメント(密度3.21g/cm³)
 L=低熱ポルトランドセメント(密度3.22g/cm³)
 W: 工業用水および上澄水
 S: 鹿島産砂(表乾密度2.59g/cm³, 吸水率2.35%)と
 鹿沼産砕砂(表乾密度2.62g/cm³, 吸水率1.98%)を容積比7:3で混合
 G: 鹿沼産2005砕石(表乾密度2.64g/cm³, 吸水率0.96%)
 Ad: AE減水剤

表-2 試験項目と組合せ

実験の種類	コンクリートの調合				
	N55	M55	M45	L45	L38
標準期	円柱供試体圧縮強度試験	2,4,7d	2,4,7d	2,4,7d	2,4,7d
	コア供試体圧縮強度試験	2d	2,4,7d	2d	-
	コア供試体促進中性化試験	2d	2,4,7d	2d	-
	含水率測定	2d	2,4,7d	2d	-
	表層強度	2d	2,4,7d	2d	-
冬期	円柱供試体圧縮強度試験	3,5,7d	3,5,7d	3,5,7d	3,5,7d
	コア供試体圧縮強度試験	5d	3,5,7d	5d	5,7d
	コア供試体促進中性化試験	5d	3,5,7d	5d	5,7d
	含水率測定	5d	3,5,7d	5d	5,7d
	表層強度/タイル接着強度	5d	3,5,7d	5d	5,7d
	細孔径分布	5d	3,5,7d	5d	5,7d

水準として5種類の調合のコンクリートを使用し、実験時期は標準期と冬期の2水準とし、各々湿潤養生の打ち切り時期を要因として表-2に示す組合せで実施した。

壁模擬試験体は、図-1に示すように実構造物の一部を取り出したモデルとし、□900×200mmの壁体に転倒防止のための200×450×1,100mmの台座を一体として製作した。また、壁模擬試験体の乾燥状態を模擬し、両面を開放したテストピース(以下、両面開放TP)(図-2)を作製し、壁模擬試験体から採取したコア試験体との比較を検討した。

(2) 試験方法

試験は壁模擬試験体より採取したコアによる圧縮強度試験と促進中性化試験を主体とし、これらの試験結果の妥当性を検証するために壁模擬試験体の含水率分布およびその経時変化、表層から深さ方向の結合水率と細孔径分布も併せて試験を行った。また、両面開放TPおよび標準水中養生したTPによる圧縮強度試験も行い、コア強度との比較検討を行った。

コアの圧縮試験は、JIS A 1107に準拠して行ったが、試験前に水中には漬けずに、コア採取後直ちに試験を行った。またコア、TPとも端面処理としてアンボンドキャッピングを使用した。

含水率測定は、壁模擬部材の上面に、表面から1,2,3,5および10cmの位置に電気抵抗式含水センサーを取り付

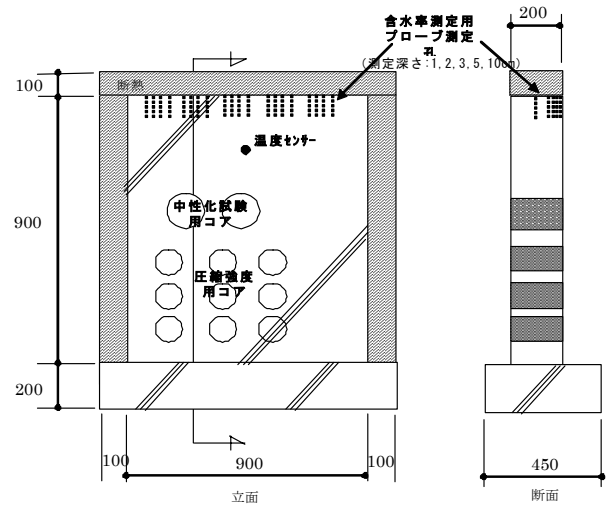


図-1 壁模擬試験体

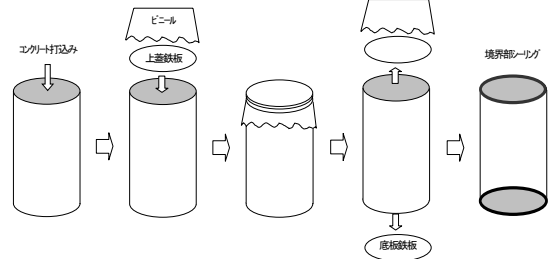


図-2 両面開放テストピース

け、そのカウント値から深度ごとの含水率を測定した。この際、カウント値と含水率との関係は、あらかじめ行ったモルタルおよびコンクリートでの校正式を用いている。

結合水率は冬期の壁模擬試験より材齢56日で採取したコアを、中心深さが表面より1,3,5および10cmとなるように1cm程度の厚さで切り出し、この部分から2.5mm以上5mm以下のモルタル塊を採取し、105℃乾燥質量と600℃強熱減量より算出した。この時、105℃乾燥質量より含水率も測定している。

細孔径分布は、結合水率と同様の手順で試料を採取し、アセトンで水和を停止後、D-乾燥を行い水銀圧入法により測定した。

中性化促進試験用のコアは、壁模擬試験体より材齢56日で採取したほか、標準期では材齢365日、冬期では材齢182日の2材齢で採取した。中性化試験は、採取したコアの側面をシールして7日間乾燥後、炭酸ガス濃度5%の環境下で促進中性化試験を行った。

3. 実験結果

(1) 圧縮試験結果

表-3に主な圧縮試験結果を示す。図-3に材齢とコア強

表-3 主な圧縮試験結果

試験時期	調査	湿潤養生 打ち切り材齢	標準養生 28日	脱型強度		コア強度		両端開放TP	
				28日	91日	28日	91日	28日	91日
標準期	M55	2日	25.4	6.36	25.2	33.7	24.0	29.8	
		4日		10.7	26.2	34.0	25.1	31.5	
		7日		15.0	29.0	33.9	26.0	31.7	
	M45	2日	40.2	11.3	36.6	46.7	33.2	42.4	
	N55	2日	33.8	9.66	31.3	35.1	28.5	33.2	
冬期	M55	3日	22.5	2.72	19.6	27.9	18.3	26.8	
		5日		5.29	20.0	30.6	19.6	28.1	
		7日		8.64	19.5	31.5	19.6	29.8	
	M45	5日	40.4	10.0	31.0	42.6	29.7	40.7	
	L45	5日	34.1	5.0	18.3	32.0	18.7	29.1	
		7日		6.6	19.2	33.9	18.6	30.0	
	N55	5日	36.1	9.8	31.8	38.8	30.4	37.3	

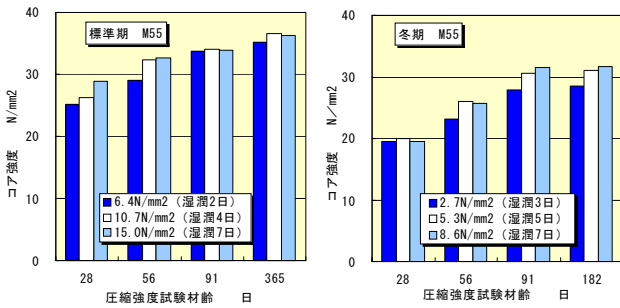


図-3 材齢とコア強度との関係

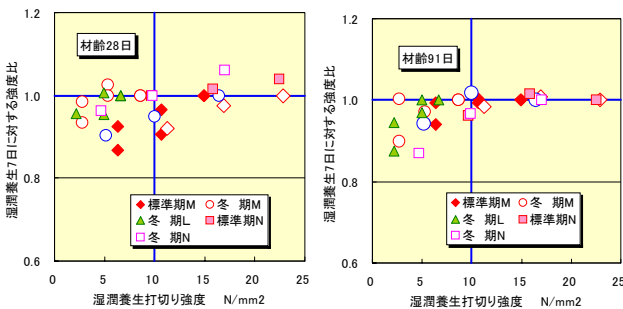


図-4 養生打ち切り時強度が圧縮強度に与える影響

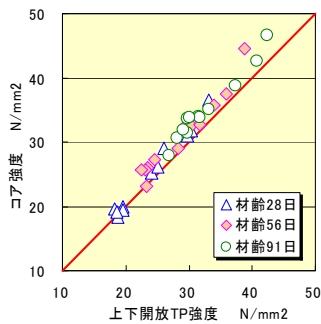


図-5 両面開放 TP とコア強度との関係

度との関係の一例を示す。図中に示す凡例は湿潤養生打ち切り時の圧縮強度（以下、養生打ち切り時強度）を示している。比較的養生打ち切り時強度が大きい標準期試験ではコア強度に与える影響は認められないが、養生打ち切り時強度が比較的小さい冬期試験結果では、湿潤養生期間が長いほどコア強度は大きくなる傾向であった。

次に、養生打ち切り時強度と湿潤養生期間を7日間実

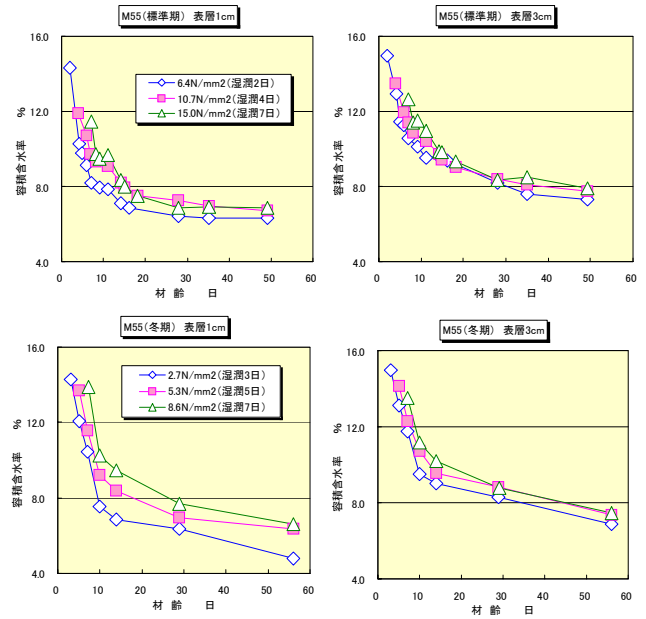


図-6 容積含水率測定例

施した場合を基準とした強度比との関係を図-4に示す。この結果、養生打ち切り時強度が10N/mm²以下の場合には、7日間湿潤養生を施した場合と比較して強度が低下することが明らかとなった。また、この傾向はセメント種類による相違は認められず、MセメントおよびLセメントを使用した場合でも、Nセメントと同様に湿潤養生を打ち切ることができる強度の目安として10N/mm²とすることができるかと判断された。

また、両面開放 TP 強度とコア強度との関係は図-5に示すように、ほぼ一致しており、構造体コンクリートの強度管理に両面開放 TP は有効である。

(2) 含水率および結合水率

壁模擬試験体に取り付けた含水率測定器により得られた壁体内の容積含水率分布の例を図-6に示す。また、養生打ち切り時強度と深さごとの容積含水率との関係を図-7に示す。

含水率は湿潤養生打ち切り後、表層より低下しはじめ、その変化は表層部ほど大きく、かつ養生打ち切り時強度が小さい程大きくなる傾向が認められる。また、養生打ち切り時強度との関係では、圧縮強度結果と同様、養生打ち切り時強度が10N/mm²以下では、表層1cm付近だけでなく深さ10cmにおいても含水率が低下する傾向が認められた。

次に、材齢56日で採取したコアより切り出したモルタルを105℃乾燥して得られた質量含水率を図-8、600℃乾燥により得られた結合水率を図-9に示す。質量含水率は、使用したコンクリートの調合により粗骨材量で補正した結果、含水率測定器で測定した結果とほぼ同程度で

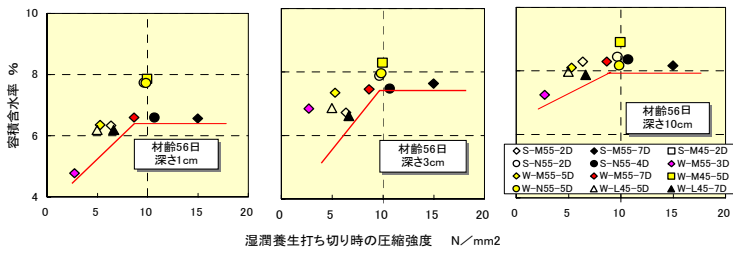


図-7 養生打ち切り時強度が容積含水率分布に与える影響

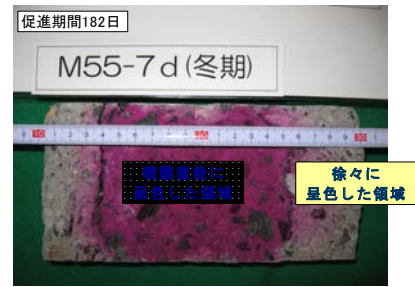


写真-1 中性化試験結果の例

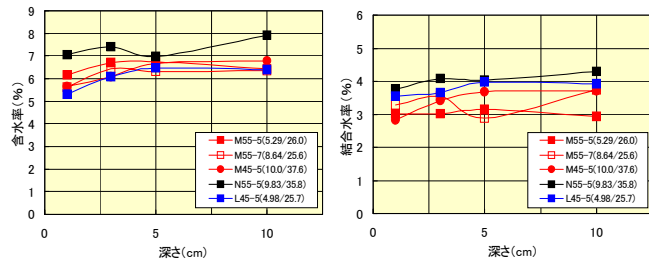


図-8 質量含水率分布

図-9 結合水率分布

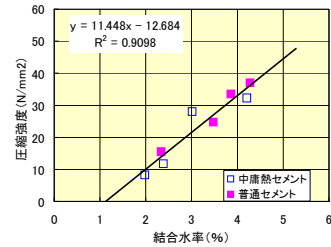


図-10 強度と関係

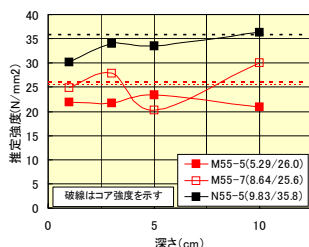


図-11 推定強度

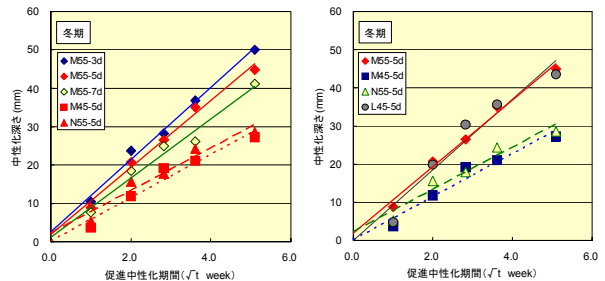
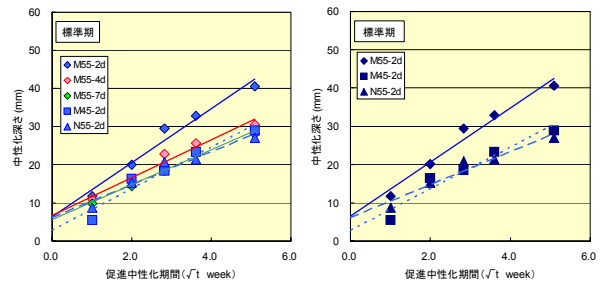


図-12 中性化期間と中性化深さ

ある。表層からの影響については、養生打ち切り時強度が小さい L45-5 では深さ 3cm まで含水率および結合水率とも低下が認められたが、その他のケースでは表層 1cm まで低下が認められているが 3cm 以深での低下は認められなかった。また、あらかじめ行った試験により求めた結合水率と圧縮強度との関係 (図-10) を用いて深さごとの強度を推定した結果を図-11 に示す。この結果、深さ 3cm 以深では、推定強度はコア強度とほぼ一致している。

(3) 中性化

促進中性化試験は、標準期および冬期に行った壁模倣試験体より採取したコアを用いて行っている。このなかで、標準期の M55-7d と N55-2d はフェノールフタレイン溶液を噴霧後の赤紫色部に変化は見られなかったが、その他のケースでは噴霧直後に赤紫色に呈色していなかった部分が数分後徐々に呈色する傾向を示した。そこで、本検討では数分後に薄く赤紫色に呈色した部分も中性化の領域として検討を行った。中性化試験結果の例を写真-1 に示し、中性化期間と中性化深さとの関係を図-12 に示す。なお、図-12 の左図は全ケースを表し、右図は

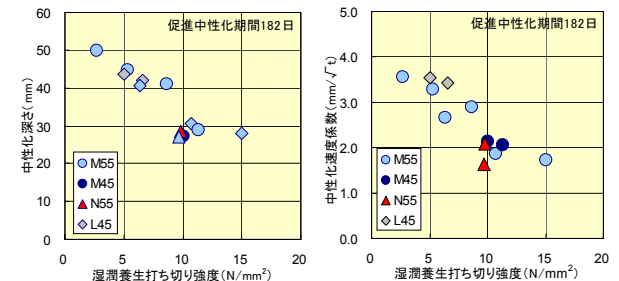


図-13 養生打ち切り時強度と中性化深さとの関係

同じ湿潤養生期間 (標準期: 2 日間, 冬期: 5 日間) のケースを取り出したものである。各試験ケースとも促進中性化期間と中性化深さとの関係には良い相関が認められるが、標準期, 冬期とも中性化深さ (縦軸) の切片が存在するものとなっている。この原因については、初期乾燥の影響を受けていると思われるが、詳細については不明である。また、同一期間湿潤養生を施したケースの中性化を比較すると、比較的初期に強度が得られた N-55, M-45 あるいは L-45 と比較して初期強度の発現が遅い M-55, L-55 は中性化深さが大きくなっている。

次に、養生打ち切り時強度と促進期間 182 日の中性化深さとの関係を図-13 に示す。この図から明らかなよう

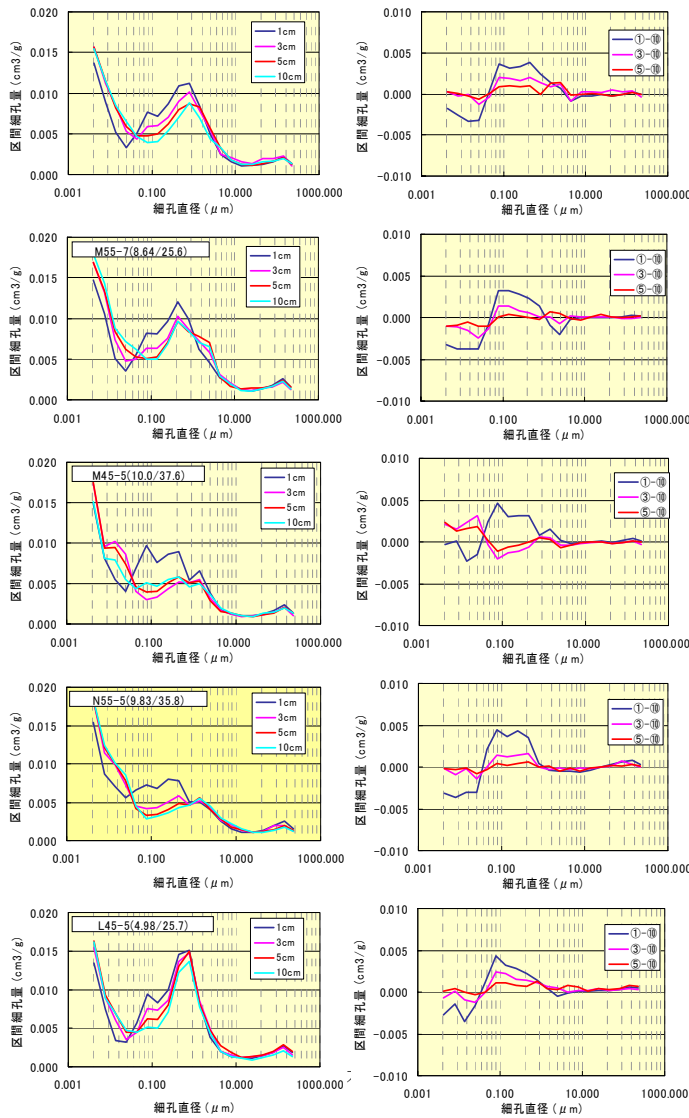


図-14 細孔径分布測定結果

に、セメント種別に関わらず、養生打ち切り時強度が 10N/mm^2 以下の場合には打ち切り時の強度が低いほど中性化深さは大きくなっている。しかし、打ち切り時に強度が 10N/mm^2 以上では、多少中性化深さは大きくなるが、その傾きが明らかに 10N/mm^2 以下より緩やかなものとなっている。

(4) 細孔径分布

図-14にコアより採取したモルタル部分の細孔径分布の測定結果(左図)と深さ10cmでの細孔径分布を基準とした各深さでの細孔径の相違(右図)を示す。いずれのケースも表層1cmにおいて細孔直径 $0.044 \sim 2.47 \mu\text{m}$ の細孔量が増加している。しかし、表層3cmでは上記範囲での細孔量の増加が緩やかになり、深さ5cmでは表面からの乾燥の影響を受けていないと思われる深さ10cmでの細孔量とほぼ一致している。このことから、表層か

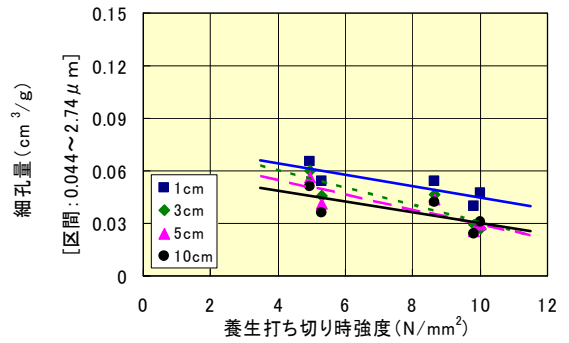


図-15 養生打ち切り時強度と細孔量との関係

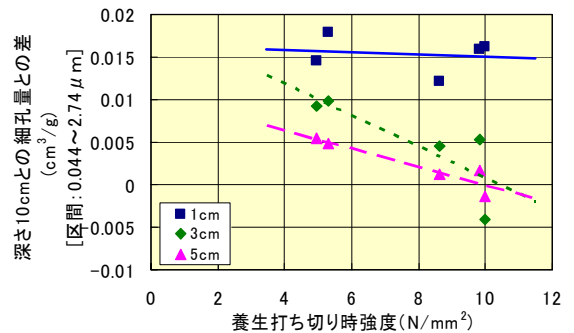


図-16 養生打ち切り時強度と細孔量の差との関係

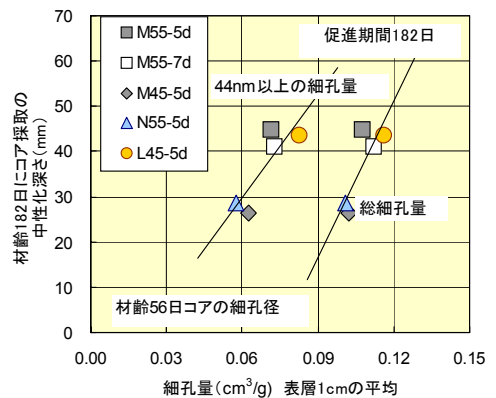


図-17 細孔量と中性化深さとの関係

らの乾燥の影響は1cmまでは顕著であるが、それ以深では影響度合いは小さいと判断された。

湿潤養生打ち切り時強度と細孔直径 $0.044 \sim 2.47 \mu\text{m}$ 区間の細孔量との関係を図-15に示す。この結果、細孔量は湿潤養生打ち切り時強度が高いほど、減少する傾向が認められる。その減少率は表面から1cmと10cmとはほぼ同様であるが、深さ3cmおよび5cmではその変化量は大きくなっている。そこで、深さ10cmを基準とした細孔量の差を図-16に示す。表層1cmでは湿潤養生打ち切り時の強度に関係なく、深さ10cmと比較すると細孔量は増加している。しかし、深さ3cmおよび5cmでは湿潤養生打ち切り時の強度が高いほど、細孔量の増加量は小さくなり、強度が 10N/mm^2 では乾燥の影響を受けて

いないと思われる。このことから、養生打ち切り時強度として $10\text{N}/\text{mm}^2$ を確保すれば、初期乾燥の影響は表面 1cm までであり、深さ 3cm 以深では影響を受けていないと判断された。

次に、細孔量と促進中性化深さとの関係を図-17に示す。総細孔量および $0.044\ \mu\text{m}$ 以上の細孔量とも中性化深さとの相関が認められ、細孔量が多いほど中性化深さは大きくなっている。この傾向は、セメント種別および試験時期による相違が認められるMセメント、Lセメントを用いた場合でも、Nセメントと同様であった。また、この結果より、促進中性化期間と中性化深さとの関係において中性化深さ（縦軸）の切片が存在した理由として表層 1cm の乾燥の影響が示唆された。

4. まとめ

本報では、低熱系のセメントを主体として初期の湿潤養生期間が構造体コンクリートに与える影響について検討した。限られたデータの範囲であるが、得られた知見を以下に示す。

- ① 湿潤養生打ち切り時の強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以下では、打ち切り時の強度が低いほど構造体コンクリートの強度が低下する。しかし、打ち切り時強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であれば、構造体コンクリートの強度に与える影響はない。
- ② 構造体コンクリートの強度管理には、両面を開放したテストピースが有効であり、その強度は構造体強度と一致する。
- ③ コンクリート表面からの乾燥の影響は、湿潤養生打ち切り時の強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であれば、表層 1cm 程度であり、深さ 3cm 以深への影響は少ない。この傾向は結合率も同様であり、深さ 3cm 以深では水和に与える影響は少ない。
- ④ 中性化についても、湿潤養生時の打ち切り強度が低いほど中性化深さは大きくなる。しかし、打ち切り時強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であれば、その影響は小さくなる。
- ⑤ 細孔径分布の結果からも、初期乾燥の影響は表層 1cm 程度であり、中性化深さの結果と一致している。
- ⑥ これらの結果より、中庸熱セメントあるいは低熱セメントを用いた場合でも、これまで普通セメントに適用されている養生打ち切り時の強度（ $10\text{N}/\text{mm}^2$ ）管理規定を適用することが可能である。

本報は、宇都宮大学 梶田佳寛教授の技術指導の下、長谷工コーポレーション、安藤建設、大木建設、西武建設、銭高組、大末建設、鉄建建設、東亜建設工業、東洋建設および当社の10社で実施した共同研究結果を再編集したものである。この共同研究では本報に記述した以外に、湿潤養生期間が乾燥収縮、質量変化、表層品質およびタイルの付着強度に与える影響についても検討している。これらの結果については参考文献8)、9)を参照していただければ幸いである。

謝辞：本研究に対してご指導を頂いた梶田佳寛教授、共同研究各社メンバー、さらに実験にご協力頂いたセメント各社、混和材各社および生コン工場の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5, 2003
- 2) 土木学会：コンクリート工事標準示方書【2002年制定】，平成14年3月
- 3) 和泉ほか：せき板の存置期間および初期養生が構造体コンクリートの品質に及ぼす影響に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No.449, pp1993.7
- 4) 太田ほか：かぶりコンクリートの性状に及ぼす各種要因に関する実験的研究，日本建築学会論文報告集，No.572, pp.1-8, 2003.10
- 5) 太田ほか：せき板存置期間が中庸熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの強度性状と耐久性に及ぼす影響，日本建築学会論文報告集，No.589, pp.7-14, 2005.3
- 6) 湯浅ほか：乾燥条件が微少セメントペーストの水和・細孔構造および強度に及ぼす影響，日本建築学会論文報告集，No.505, pp.15-21, 1998.3
- 7) 郭ほか：養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価，土木学会論文集，NO.718 V-57, pp.59-68, 2002.11
- 8) 大倉ほか：各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験（その1～8），日本建築学会学術講演梗概集（関東），pp.325-340, 2006.9
- 9) 大倉ほか：各種セメントを用いたコンクリートの合理的な湿潤養生期間に関する実験（その9～14），日本建築学会学術講演梗概集（九州），2007.8