

論文 各種セメント・コンクリートの脱枠時期が表層部の物性に及ぼす影響

原 健悟^{*1}・小川 洋二^{*2}・石川 雄康^{*3}

要旨：鉄筋コンクリート構造物の耐久性を考える上で、表層部から鉄筋位置までのかぶりコンクリートの物性変化に着目した。かぶり部を含む表層部のコンクリートは、外部からの塩分や二酸化炭素などの浸入に対し抵抗し、内部鉄筋を保護する役割を担う。このため初期養生が重要であるが現状では、型枠の脱枠時期はテストピースの圧縮強度により確認されることが一般的であり、表層部の初期養生が必ずしも配慮されていない可能性がある。本論文では、普通・高炉・低熱・早強セメントを用い、使用頻度の高い水セメント比を想定した汎用コンクリートにおいて、脱枠時期の違いが、強度発現や空隙構造に及ぼす影響を検討した。

キーワード：脱枠時期，空隙構造，圧縮強度，イオン透過性

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の劣化原因の一つとして、塩化物イオンおよび二酸化炭素ガスなどの劣化因子が外部より浸入し、鋼材腐食を促進させ、耐荷力が損なわれることがある。これらの劣化因子の浸入には、かぶりコンクリートの物質移動抵抗性が大きく影響する。表層コンクリートは周辺環境の影響を受けやすいので、型枠存置時から初期の養生が重要である。しかし多くの施工現場では、脱枠時の品質を確認する手法として最も汎用的に用いられているのは圧縮強度試験であり、脱枠後の構造物は気中養生状態にさらされることも多い。

既往の研究¹⁾によると、養生方法による圧縮強度への影響は小さいが、耐久性に関する物質移動抵抗性は大幅に向上すると報告されており、物質移動抵抗性は必ずしも圧縮強度により評価できるものではないことが報告されている。

鉄筋コンクリート構造物の早期劣化問題は依然として解決されておらず、高耐久な RC 構造物を構築するひとつの対策として、脆弱なかぶりコンクリートを生じさせないような初期養生の確保が重要であると考えられる。

本研究では、各種セメントを用いたコンクリート供試体を用いて、環境温度や脱枠時期が、供試体の強度発現や表層部の空隙構造の変化に及ぼす影響を検討した。

2. 試験概要

2.1 供試体および試験水準

図 - 1 に供試体概要図および表 - 1 に試験水準を示す。また、セメントの物性を表 - 2 に示す。表供試体は 100 × 200mm の円柱供

試体を用いた。試験は、水セメント比 (W/C=50%) を一定にした各種セメント {普通ポルトランド (記号 N)・早強ポルトランド (記号 H)・低熱ポルトランド (記号 L)・高炉セメント B 種 (記号 BB)} を対象として、セメントの違いによる表層部の物性変化への影響を検討した。また、脱枠材齢を N, BB, L では 2, 4, 8 日, H では 1, 2, 4 日とし、環境温度を 20 および 10 (湿度 60%) とした場合の影響をそれぞれ評価した。

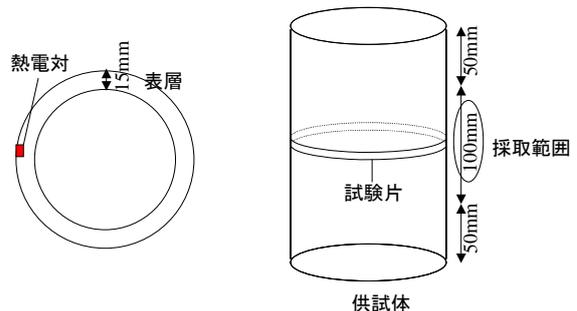


図 - 1 供試体概要図

表 - 1 試験水準

セメント	W/C	脱枠材齢 (日)	温度 ()	湿度 (%)
普通 N	50	2,4,8	10	60
			20	
高炉 BB		4,8	10	
		2,4,8	20	
低熱 L		4,8	10	
		2,4,8	20	
早強 H		1,2,4	10	
			20	

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 CS チーム 工修 (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 CS チーム 工博 (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 技術企画部 CS チームリーダー 工博 (正会員)

表 - 2 セメントの物性

セメント種類	密度 g/cm ³	比表面積 cm ² /g
普通 N	3.16	3290
高炉 BB	3.04	3830
低熱 L	3.22	3420
早強 H	3.14	4540

なお、BB および L では環境温度 10 °C 下において 2 日脱枠時の試料採取が困難であったため試験水準から除外した。

各供試体はそれぞれの環境下に置き、脱枠時までは封緘養生、脱枠後は気中養生とし、脱枠時および材齢 28 日において表層部の物性を評価するための各種試験を行った。分析用の試験片は円柱供試体を円周方向に厚さ 7~10mm 程度でスライスし、直ちにアセトンに浸漬して水和反応を停止させた。水和を停止した試験片の表層部 15mm の範囲から 5mm 角の試料を採取し試験を行った。

2.2 各種試験

表層部の物性を評価するために行った各試験を下記に示す。

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は 100×200mm の円柱供試体を用いて JIS A 1108 に準じて行った。

(2) 温度履歴

円柱供試体表層部に設置した熱電対により、表層部の温度履歴を打設時から材齢 28 日まで計測した。

(3) 空隙構造

自由水を除去するため、5mm 角の試料を真空乾燥 5 日後に水蒸気圧 5×10⁻⁴mmHg 下(-80 °C の飽和水蒸気圧)で乾燥する D-乾燥 2 週間を行い、水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔径分布を測定し比較した。測定は各試料について 2 回を行い、その平均値により評価を行った。

3. 試験結果

3.1 圧縮強度

図 - 2 および図 - 3 に環境温度 20 °C および 10 °C 下の圧縮強度試験結果を示す。環境温度によらず、材齢 28 日の圧縮強度は、脱枠時期が遅いほど高くなった。環境温度 20 °C 下の材齢 28 日強度において N では脱枠材齢が 4 日から 8 日、H では 2 日から 4 日にかけての強度増加が小さくなった。一方、BB および L では、脱枠材齢 8 日までは、存置期間に比例して強度が増加した。環境温度 10 °C 下ではセメントの種類によらず脱枠材齢に比例して 28 日圧縮強度は増加した。

コンクリート標準示方書²⁾に記載されている、スラブおよびはりの底面に対する型枠および支保工の取外し

に必要なコンクリートの圧縮強度の参考値は 14.0MPa である。本実験においてこれを満たす脱枠時期をセメント種類で比較すると表 - 3 のようになる。養生期間の標準値²⁾と比較すると、表 - 3 の方が 2~3 日程度早い。

表 - 3 14MPa に到達する型枠存置期間 (日)

セメント種類	10	20
普通 N	4	2
早強 H	2	1
高炉 BB	8	4
低熱 L	8 では未達	8

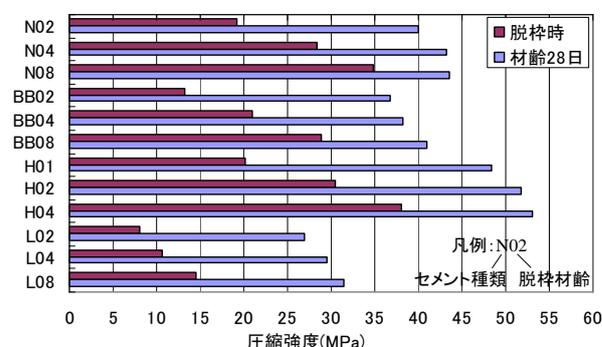


図 - 2 圧縮強度試験結果 (環境温度 20 °C)

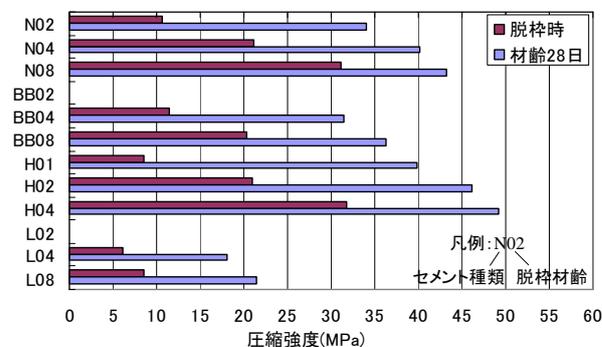


図 - 3 圧縮強度試験結果 (環境温度 10 °C)

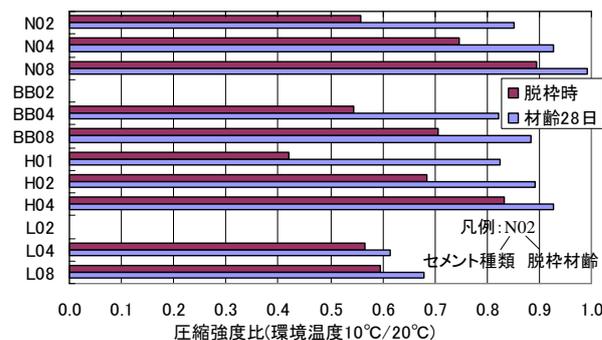


図 - 4 圧縮強度比 (環境温度 10 °C / 環境温度 20 °C)

図-4に環境温度20℃に対する10℃下の圧縮強度の比を示す。図よりNとHでは脱枠時期が遅いほど環境温度20℃および10℃下での強度差が小さくなる傾向が見られたが、BBとLには明確ではなかった。Nでは影響が特に顕著に現れており、脱枠時期を長くすることで環境温度10℃下でも20℃下とほぼ同等の材齢28日強度が得られることがわかる。

Lは今回使用したセメントの中ではすべての水準で10℃下での強度比が小さく、低温環境下での強度発現性は劣る。

3.2 温度履歴

供試体表層部に取り付けた熱電対により計測した環境温度20℃下でのN、BB、L、Hの温度履歴を図-5~8にそれぞれ示す。図より脱枠時に一時的に急激な温度低下が生じていることがわかる。これは表層からの水分の逸脱に伴う水の気化熱（潜熱）の影響と考えられ、Nでは2日脱枠の供試体では約4℃の温度低下、4日では約2℃、8日では約1℃と脱枠時期が遅いほど、温度低下量が小さくなっている。図-6に示すBBもNとほぼ同様な挙動を示し、2日脱枠の供試体では約4℃、4日では約2℃、8日では約1℃の温度低下を示した。一方、HとLとはこれとは異なる挙動を示し、試験範囲での脱枠時期の違いによる低下温度の差異は小さかった。Hは約1.5℃の、Lは約4℃の温度低下をそれぞれ示した。Hでは早期に水和反応が進行し、その後緩慢になる。一方Lは水和反応が遅く、脱枠材齢8日まででは脱枠材齢2日の供試体との差異が明確に表れなかったと考えられる。

環境温度20℃下での水の気化熱は約2.45kJであり、コンクリートの密度を2.3ton/m³、比熱を1.05kJ/kgとすると、円柱供試体の温度が約4℃低下した場合、約6gの水が失われたことになる。

半井らの研究⁴⁾によると乾燥開始が早くなるほど、開始時の空隙構造が粗大であり、水分逸散によりその後の水和進行が阻害されるために空隙構造が緻密化することができず、逸散水量が増加すると報告されている。

本研究での脱枠時に生じた水分の逸脱は表層部の細孔構造が大きく影響していると考えられ、一般的に脱枠時期が遅いほど強度が高く、表層部の空隙構造が緻密になる傾向があるのとNおよびBBはよく符合するが、HとLとは傾向が異なった。

3.3 空隙構造

(1) 積算空隙量および細孔径分布

環境温度20℃の脱枠時と材齢28日における、Nの見なし細孔直径に対する積算空隙量と、細孔径分布とをそれぞれ図-9および図-10に示す。

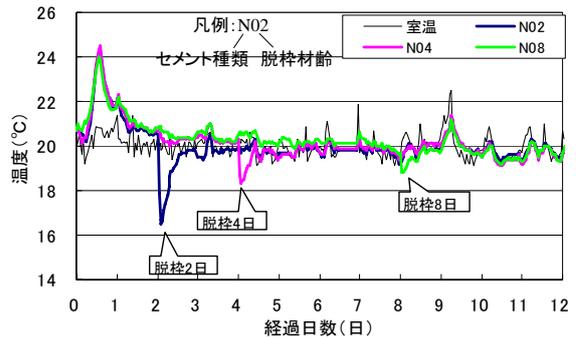


図-5 普通セメントの温度履歴

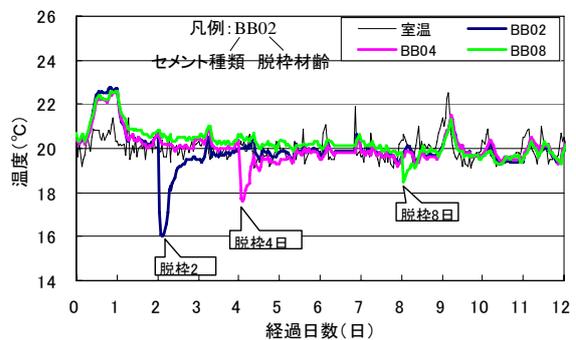


図-6 高炉セメントの温度履歴

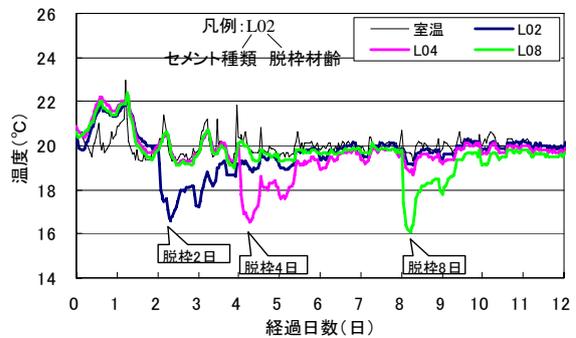


図-7 低熱セメントの温度履歴

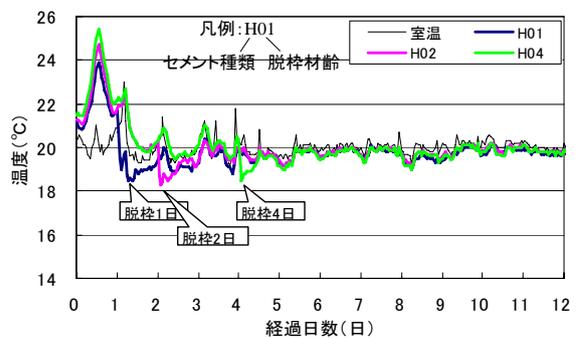


図-8 早強セメントの温度履歴

図 - 9 より、脱枠時期が遅いほど積算空隙量が減少する傾向にあり、曲線が立上る空隙量が増加する径は小さくなっている。また、脱枠時から 28 日までの変化量も小さくなる傾向にある。図 - 10 を見ると、脱枠時から材齢 28 日にかけて見なし細孔直径 $0.01 \mu\text{m}$ 近辺の空隙量は、脱枠時期に関わらず一様に減少しているが、見なし細孔直径 $0.1 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ の空隙量は、脱枠時期が遅いほど減少する傾向にある。したがって脱枠時期の差異は、 $0.1 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ の範囲にある空隙構造の生成に特に影響すると考えられる。

環境温度の違いによる、材齢 28 日における N の見なし細孔直径に対する積算空隙量と細孔径分布をそれぞれ図 - 11 および図 - 12 に示す。また、図 - 13 に環境温度 20 下および 10 下の総空隙量、図 - 14 に環境温度 20 下での脱枠時における温度低下と材齢 28 日の総空隙量の関係を示す。図 - 11 と図 - 13 より、積算空隙量は、環境温度 20 下の方が、10 下と比べて減少する傾向にある。特に N と BB では脱枠時期の影響が大きい。一方、H と L とはこの傾向が小さく、脱枠時期による積算空隙量の差異が小さい。このことは 3.2 で示した温度履歴の結果とも一致している。図 - 14 より、総空隙量と温度低下とは比例傾向が見られ、積算空隙量が 20% 程度で 4 の、16% 程度で 1 の温度低下を起こす水分移動が生じた可能性がある。水分移動を小さくするためには、表層部の空隙構造を緻密にすることが有効であり、セメント種類に応じた十分な初期養生が必要であると考えられる。

(2)物性に及ぼす硬化体のキャラクター

羽原の研究³⁾により、コンクリートの物性に及ぼす硬化体のキャラクターとして、イオン透過性に対しては $0.05 \mu\text{m}$ 以上の粗大毛細管空隙量 ($30 \mu\text{m}$ 以下) が、また、透気性・透水性に対しては $0.1 \mu\text{m}$ 以上の粗大毛細管空隙量 ($30 \mu\text{m}$ 以下) が特に影響をおよぼし、それぞれ空隙量が減少すると耐透過性が向上することが知られている。

図 - 15 に各セメントの材齢 28 日における $0.05 \mu\text{m}$ から $30 \mu\text{m}$ の空隙量を示す。セメントの種類に関わらず脱枠時期が遅いほど空隙量が小さくなる傾向にある。したがって、脱枠時期が遅いほどイオン透過性に影響する空隙量が減少し、イオン透過性に対する抵抗が向上していると考えられる。特に N と BB は脱枠時期の影響が大きい。H は早期に空隙量が減少している。L は脱枠時期による変動が小さく、空隙量が多い。

図 - 16,17 に材齢 28 日での環境温度 20 および 10 下におけるイオン透過性に影響する $0.05 \mu\text{m}$ から $30 \mu\text{m}$ の空隙量と圧縮強度の関係をそれぞれ示す。

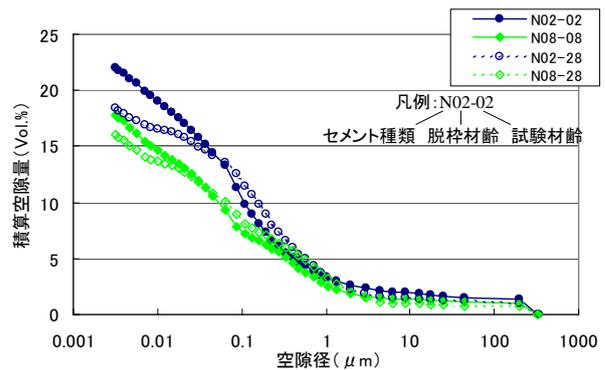


図 - 9 普通セメントの積算空隙量 (環境温度 20)

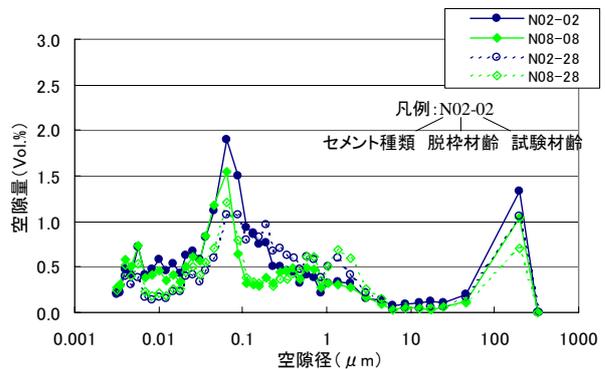


図 - 10 普通セメントの細孔径分布 (環境温度 20)

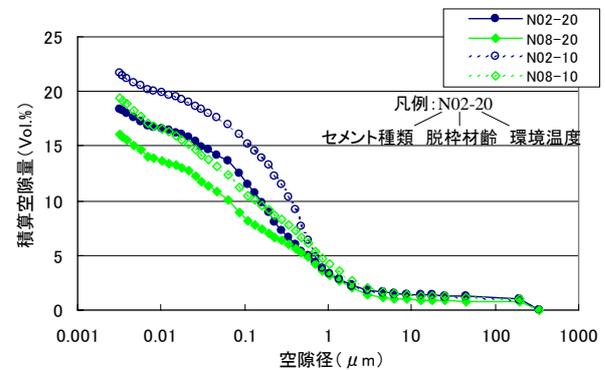


図 - 11 普通セメントの積算空隙量 (材齢 28 日)

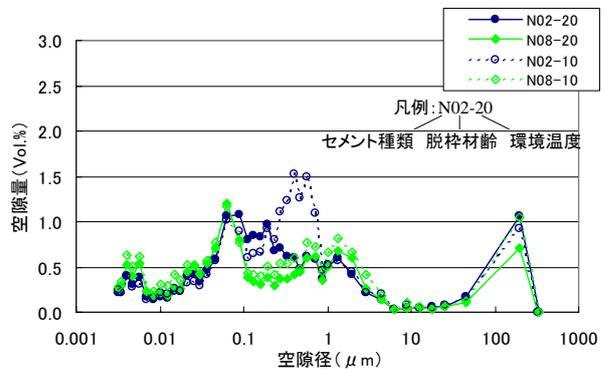


図 - 12 普通セメントの細孔径分布 (材齢 28 日)

環境温度 20 で N の脱枠材齢 2 日および BB の脱枠材齢 8 日の圧縮強度は約 40MPa とほぼ等しいが、空隙量はそれぞれ約 12.4% および約 8.5% であり BB の方が少ない。同様に環境温度 10 で N の脱枠材齢 4 日および H の脱枠材齢 1 日の圧縮強度は約 40MPa であるが、空隙量はそれぞれ約 13.8% および約 14.7% であり N の方が少ない。

したがって、イオン透過性に影響を与えるとされる空隙率の総量は、圧縮強度の大きさとは必ずしも一致しない。圧縮強度が同等であれば BB, N, H の順に空隙量が少なくなり、耐イオン透過性が優れる可能性がある。

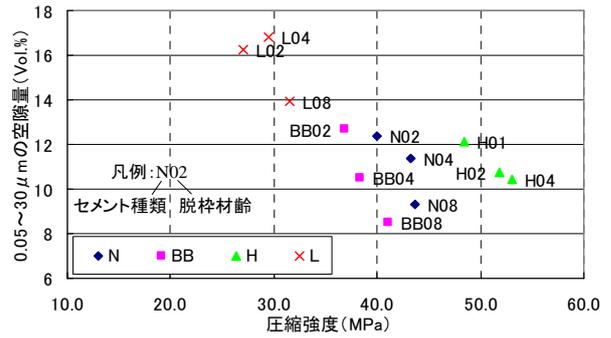


図 - 16 0.05 μm ~ 30 μm の空隙量と圧縮強度の関係 (材齢 28 日：環境温度 20)

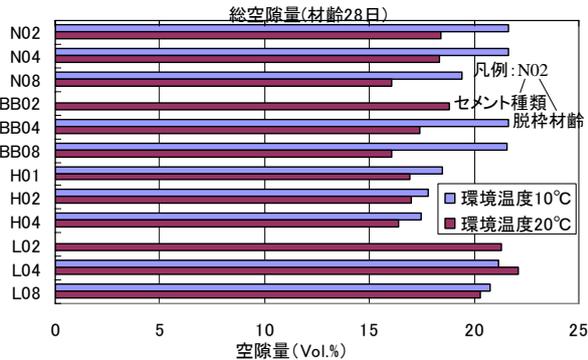


図 - 13 総空隙量 (材齢 28 日)

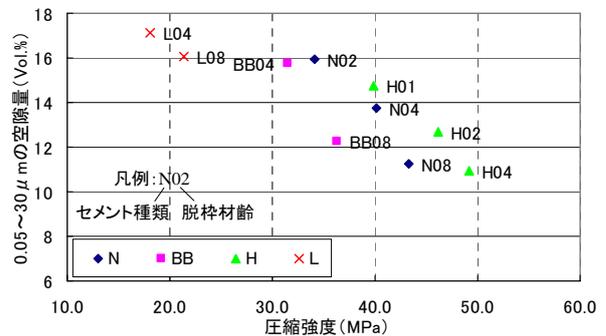


図 - 17 0.05 μm ~ 30 μm の空隙量と圧縮強度の関係 (材齢 28 日：環境温度 10)

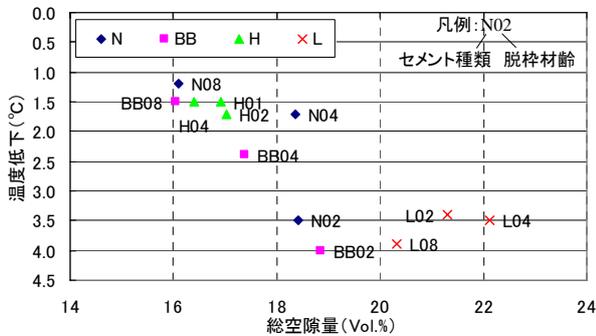


図 - 14 温度低下と総空隙量の関係 (材齢 28 日：環境温度 20)

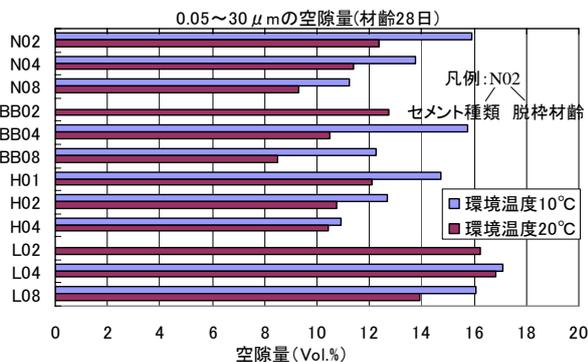


図 - 15 0.05 μm ~ 30 μm までの空隙量 (材齢 28 日)

4. まとめ

各種セメントを用い、脱枠時期の違いによる、圧縮強度発現性、表層部の温度履歴、および表層部の空隙構造の変化を定量的に評価した。得られた試験結果から以下のことが明らかとなった。

- (1) 脱枠時期が材齢 28 日強度におよぼす影響はセメントの種類によって異なり、早強、普通、高炉 B、低熱の順に、脱枠期間による強度増進への影響が小さくなる。この傾向は環境温度も影響し、10 環境下では、すべてのセメントにおいて脱枠期間が長くなるに従い 28 日強度は早期に脱枠するよりも高くなった。
- (2) 脱枠によりコンクリート表層部に温度低下が生じた。これは表層から逸脱する水分の気化熱による影響と考えられ、環境温度が 20 の場合、普通と高炉 B とは、脱枠時期が遅いほど温度低下の度合いが小さくなった。それに対し早強は早期に水和反応が進行し、低熱は水和反応が遅いため、脱枠時期による温度低下の度合いに変化がなかった。
- (3) 総空隙量が増加すると温度が低下しているため、水分移動のしやすさと総空隙量とは相関がある。
- (4) 脱枠時期の差異は、空隙径が 0.1 μm ~ 1 μm の範囲にある空隙構造の生成に特に影響すると考えられ、脱

悴時期が遅いほど $0.1\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$ の空隙量が少なくなり、緻密な空隙構造となる。また、脱悴時期の影響はセメントの種類により異なる。

- (5) イオン透過性に影響を与えるとされる空隙径の総量と圧縮強度の大きさは符合しない。セメントの種類により傾向が異なった。

参考文献

- 1) 岡崎慎一郎，八木 翼，岸 利治，矢島哲司：養生が強度と物質移動抵抗性に及ぼす影響感度の相違

に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.227-234，2006

- 2) 【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編]，土木学会，2002.3
- 3) 三浦宏一編：わかりやすいセメント科学，社）セメント協会，pp.102-103，1993.3
- 4) 半井健一郎，石田哲也，李 春鶴，三浦廣高：異なる養生下での各種コンクリート材料の空隙構造変化に基づく物質移動解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.723-728，2007