

脱型時期が各種セメント・コンクリートの空隙構造に及ぼす影響

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○原 健悟
 (株)太平洋コンサルタント 非会員 工博 小川 洋二
 太平洋セメント(株) 非会員 工博 石川 雄康

Considering durability of prestressed concrete structures, we have specifically examined the change of properties of cover concrete. Generally, it has resistance against chloride and carbon dioxide gas penetration. Thereby, it protects the internal tendons. Consequently, it is important to practice initial curing to produce durable concrete structures. Nevertheless, it is common to decide the timing of demolding formwork according to the cylinder compressive strength.

This paper presents discussion of effects of the timing of demolding formwork on development of strength and pore structure of the concrete. In the experiments, a general water-cement ratio of concrete was set and several types of cement were used: Normal, Blast-furnace slag, Low heat, and High-early strength.

Results show that the pore structure of the cover concrete can be improved by increasing the curing time; the effect depends on the cement type.

Keywords: Timing of demolding, Pore structure, Compressive strength, Ion permeability

1. はじめに

プレストレストコンクリート構造物の劣化要因の一つとして、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、表層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が、多くの施工現場では、脱型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、脱型後の構造物は気中養生状態にさらされることも多い。

岡崎らによると、養生方法を適切に設定することによって、圧縮強度への影響は小さいが、耐久性に関わる物質移動抵抗性は大幅に向上し、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¹⁾。

プレストレストコンクリート構造物は、早期に劣化する可能性もあり、高耐久な構造物を構築するひとつの方策として、脆弱な表層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。

本報告では、各種セメントを使用したコンクリート供試体を用いて、脱型時期が供試体の強度発現と表層および内部の空隙構造に及ぼす影響を検討した。

2. 試験概要

2.1 試験水準および供試体

試験水準を表-1に示す。試験は各種セメント {普通ポルトランド (記号N)・高炉セメントB種 (記号BB)・早強ポルトランド (記号H)・低熱ポルトランド (記号L)} を使用し、水セメント比 (W/C=50%) を一定にしたコンクリート供試体を対象として、

表-1 試験水準

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

セメントの違いによる強度発現と表層および内部の空隙構造への影響を検討した。また、脱型材齢を N, BB, L では 2, 4, 8 日, H では 1, 2, 4 日とし、環境温度を 20℃ (湿度 60%) とした場合の影響をそれぞれ評価した。使用したセメントの物性を表-2, コンクリートの配合を表-3 に示す。水は上水道水を使用し、骨材としては菊川市産山砂 (表乾密度 2.62g/cm³, 吸水率 1.22%, 粗粒率 2.67), 北九州市門司区産砕石 (表乾密度 2.87 g/cm³, 吸水率 0.28%, 粗粒率 6.72, 最大寸法 20mm) を用いた。混和剤としては、リグニンスルホン酸系 AE 減水剤およびアルキルエーテル系 AE 剤を用いた。

表-2 セメントの物性

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

表-3 コンクリートの配合

配合条件				単位重量 (kg/m ³)				混和剤 (C×%)		
スラブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	セメント	W	C	S	G	AE 減水剤	AE 剤
18.0	4.5	50	44.5	N	176	352	778	1065	0.25	0.0008
				BB	176	352	773	1059	0.25	0.0016
				H	176	352	778	1064	0.25	0.0024
				L	176	352	781	1069	0.25	0.0020

図-1 に供試体概要図を示す。供試体は剥離剤を塗布していないブリキ製の φ100×200mm のモールド缶を使用して製作した。各供試体は、脱型時までは封緘養生、脱型後は気中養生とし、脱型時および材齢 28 日において圧縮強度と空隙構造を評価した。空隙構造用の試験片は、円柱供試体を円周方向にスライスし、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 15mm および内部 15mm の範囲から粗骨材のみの試料は除去し、粗骨材を含む 5mm 角の試料を採取し試験に供した。温度測定用には、熱電対を中心および表層部に設置した円柱供試体を別途製作した。

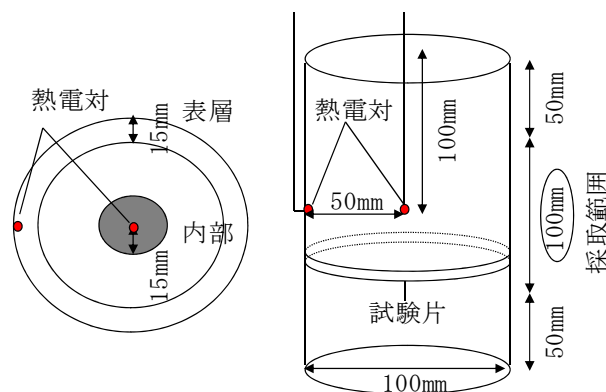


図-1 供試体概要図

2. 2 各種試験

実施した各試験方法を下記に示す。

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は φ100×200mm 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

円柱供試体の高さ方向の中央で、断面の表面および中心の位置に設置した熱電対により、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℃の飽和水蒸気圧) で乾燥する D-乾燥を 2 週間行い、水銀圧入式ポロシメータを用いて細孔径分布を測定した。測定は各水準について表層は 2 回、内部は 1 回とした。

3. 試験結果

3. 1 圧縮強度

図-2に圧縮強度試験結果を示す。材齢 28 日の圧縮強度は、脱型時期が遅いほど高くなった。材齢 28 日強度は、N では脱型材齢が 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、脱型材齢 8 日までは、型枠存置期間に比例して材齢 28 日強度が増加した。

コンクリート標準示方書に記載されている、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²⁾。本実験においてこれを満たす脱型時期をセメント種類で比較すると表-4のようになる。表-5に示す養生期間の標準値²⁾と比較すると、表-4の方が2~3日程度早い。

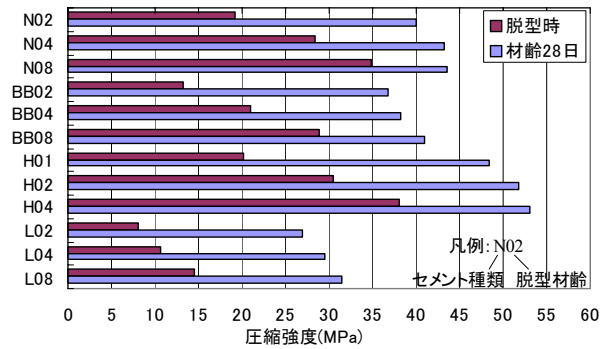


図-2 圧縮強度試験結果

表-4 14MPa に到達する型枠存置期間

セメント	普通 N	高炉 BB	早強 H	低熱 L
日数	2 日	4 日	1 日	8 日

表-5 養生期間の標準値

日平均気温	普通 N	高炉 BB	早強 H
15°C以上	5 日	7 日	3 日
10°C以上	7 日	9 日	4 日
5°C以上	9 日	12 日	5 日

3. 2 温度履歴

供試体に取り付けた熱電対により計測した N, BB, H, L の温度履歴を図-3~6にそれぞれ示す。表層および内部の温度履歴が同じであったため、表層部のみを示す。図より水和反応により温度が上昇し、封緘養生中は、緩やかに室温へと近づくが、脱型時には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逸散に伴う水の気化熱 (潜熱) の影響と考えられ、その後は水分逸散と室温に戻ろうとする温度上昇が相互に作用し、緩慢に室温まで上昇していると考えられる。Nでは2日脱型の供試体で約4°Cの温度低下、4日では約2°C、8日では約1°Cと脱型時期が遅いほど、温度低下量が小さくなっている。BBもNとほぼ同様な挙動を示し、2日脱型の供試体では約4°C、4日では約2°C、8日では約1°Cの温度低下を示した。一方、HとLにおいてはこれとは異なる挙動を示し、試験範囲での脱型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°C、Lは約4°C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、脱型材齢8日まででは脱型材齢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。

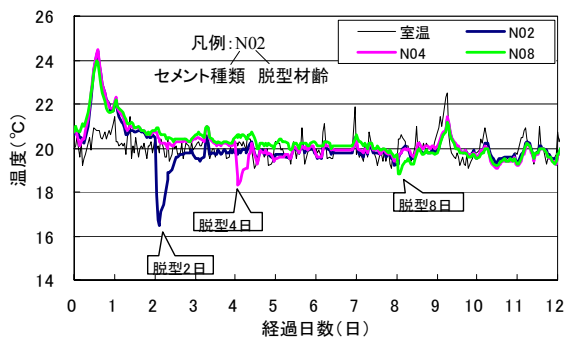


図-3 普通セメントの温度履歴

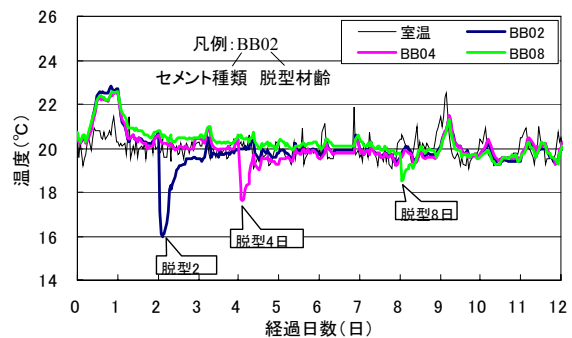


図-4 高炉セメントの温度履歴

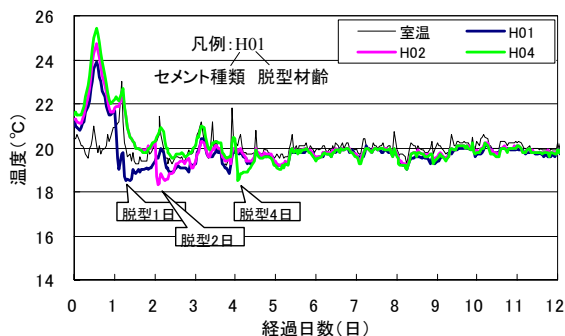


図-5 早強セメントの温度履歴

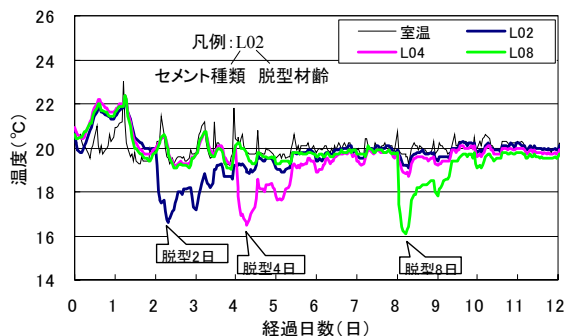


図-6 低熱セメントの温度履歴

半井ら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³⁾。

本報告での脱型時に生じた水分逸散による温度低下は、表層部の空隙構造が大きく影響していると考えられ、一般的に脱型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 においては明確で無かった。

3. 3 空隙構造

(1) 積算空隙量および細孔径分布

脱型時と材齢 28 日における、N の見なし細孔直径に対する積算空隙量をそれぞれ図-7 に示す。材齢 28 日における積算空隙量は、表層部では脱型時期が遅いほど減少する傾向にあるが、内部では表層部と比較して脱型時期による差異が明確でない。また、図-8 に細孔径分布を示すが、材齢 28 日における見なし細孔直径 0.01 μm 近辺の空隙量は、表層および内部とも脱型時期による差が小さい。しかしながら、見なし細孔直

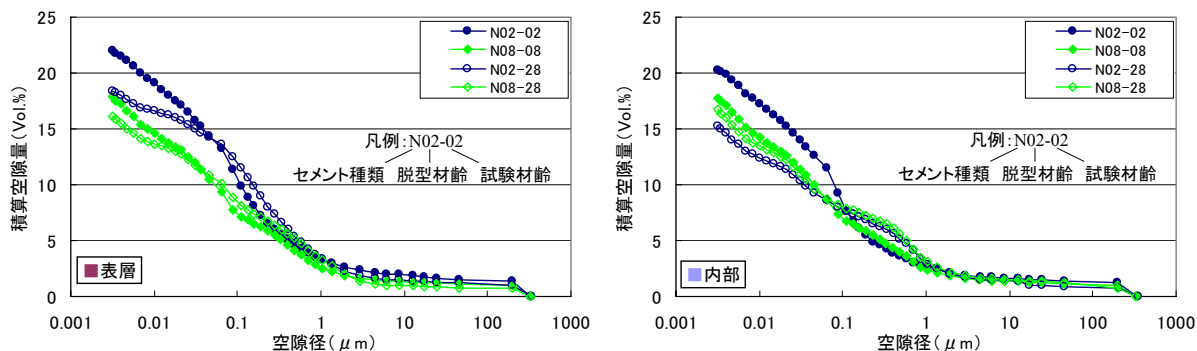


図-7 普通セメントの積算空隙量

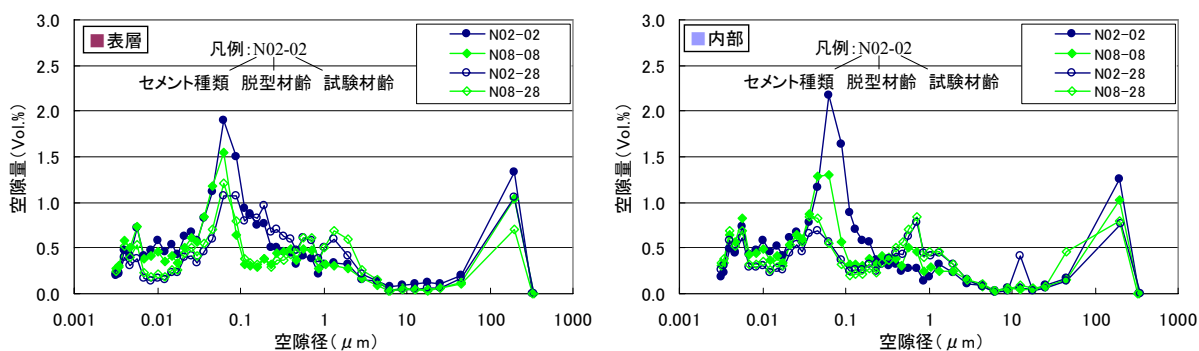


図-8 普通セメントの細孔径分布

径 $0.1\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ の空隙量は、内部は脱型時期による差が小さいが、表層部は、脱型時期が遅いほど減少する傾向にある。したがって脱型時期の差異は、 $0.1\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ の範囲にある表層の空隙構造の生成に特に影響すると考えられる。

(2)イオン透過性に及ぼす硬化体の性質

内川らにより、コンクリートの物性に及ぼす硬化体の性質として、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) が特に影響を及ぼし、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報告されている^{4),5)}。

図-9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。内部は、セメントの種類によらず脱型時期による空隙量への影響が小さい。

表層は、脱型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、脱型時期が遅いほど表層の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可能性がある。特に N と BB では脱型時期の影響が大きい。H と L においては脱型時期による差異が小さい。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。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。

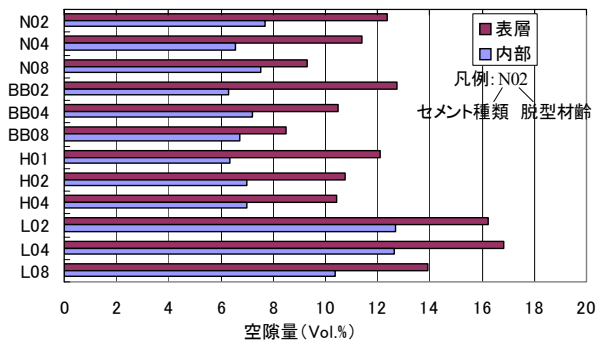


図-9 0.05 μm~30 μm の空隙量

図-10に材齢 28 日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示す。内部は L を除いて強度によらずほぼ空隙量が等しい。表層の N の脱型材齢 2 日および BB の脱型材齢 8

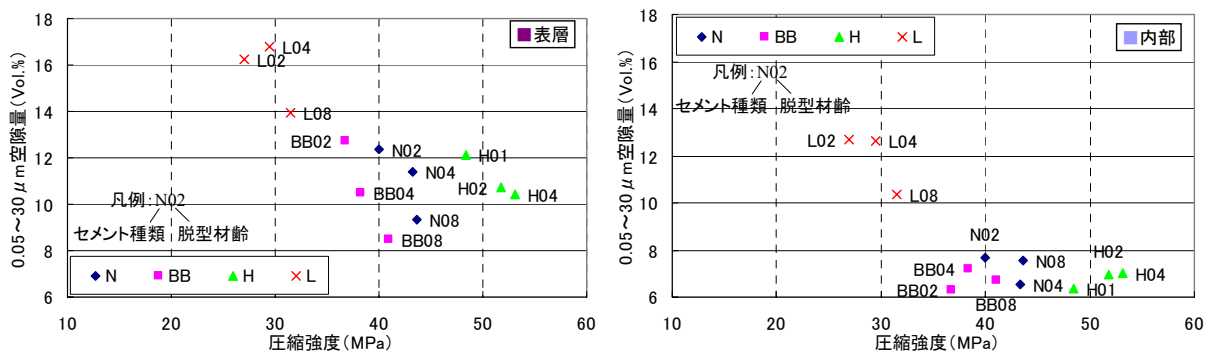


図-10 0.05~30 μm の空隙量と圧縮強度

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。また、各セメントの脱型材齢 2 日 (H は 1 日) に対する圧縮強度の増加率および表層の $0.05\mu\text{m}$ から $30\mu\text{m}$ の空隙量の減少率の関係を図-11に示す。L を除き強度の増加率は、セメントの種類によらず脱型材齢 8 日 (H は 4 日) で約 1.1 倍と小さいが、空隙量の減少率は BB, N, H の順に 0.67, 0.75, 0.86 と圧縮強度の増加率以上に変動が大きくなっている。したがって、イオン透過性に影響を与えるとされ

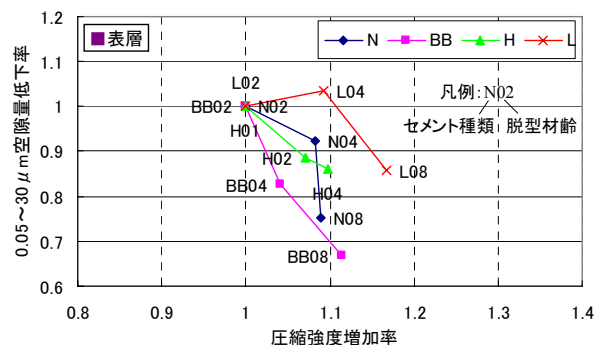


図-11 空隙量の低下率と圧縮強度の増加率

る空隙量と圧縮強度の関係は、セメントの種類により異なる。また、脱型時期は強度以上に空隙量に影響し BB, N, H の順に耐イオン透過性が優れる可能性がある。

4. まとめ

各種セメントを用い、脱型時期の違いによる、圧縮強度発現性、温度履歴および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) 脱型時期が材齢 28 日強度に及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、脱型時期による強度増進への影響が小さくなる。
- (2) 脱型によりコンクリートに温度低下が生じた。これは表層から逸散する水分の気化熱による影響と考えられ、普通と高炉 B 種は、脱型時期が遅いほど温度低下の度合いが小さくなった。こ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、脱型時期による温度低下の度合いに変化が無かった。
- (3) 脱型時期は内部よりも特に表層の空隙構造の生成に影響し、脱型時期が遅いほど表層の $0.1\mu\text{m}$ から $1.0\mu\text{m}$ の空隙量が少なくなり、緻密な空隙構造となる。また、脱型時期の影響はセメントの種類により異なるため、セメント種類に応じた十分な初期養生をする必要がある。
- (4) 脱型時の温度低下は、水分逸散量と等価であると考えられ、脱型時期が遅いほど温度低下が小さく、表層部の空隙量が減少した。
- (5) イオン透過性に影響を与えるとされる空隙量と圧縮強度の関係は、セメントの種類により異なる。また、脱型時期は強度以上に空隙量に影響し、高炉 B、普通、早強、低熱の順に影響が大きく耐イオン性に優れる可能性がある。

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) 【2007 年制定】コンクリート標準示方書 [施工編], 土木学会, 2008. 3
- 3) 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
- 4) H. Uchikawa, S. Uchida, S. Hanehara, 8th International conference on Alkali-aggregate reaction (Kyoto-Japan), Vol. 1, pp. 121-128, 1989
- 5) H. Uchikawa, 8th International Congress on the Chemistry of cement (Rio de Janeiro), Vol. 1, pp. 249-280, 1986