

報告 脱型時期が高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの圧縮強度, ヤング係数, 中性化抵抗性に及ぼす影響

松下 哲郎*1・辻 大二郎*2・井上 和政*3・関田 徹志*4

要旨: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの圧縮強度, ヤング係数の発現状況や中性化促進試験による中性化抵抗性に脱型時期が与える影響に関する検討はこれまでほとんどされていない。そこで本研究では, 高炉スラグ高含有セメントの型枠の脱型時期の影響に関して普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種と比較実験を行い検討した。その結果, 脱型時期が高炉スラグ高含有セメントの諸性能に与える影響は, 高炉セメント B 種と大きな差異はなく, JASS5 に示される高炉セメント B 種と同様のせき板の存置, 湿潤養生期間を設定すれば, 所要の性能を確保できる可能性が高いことが分かった。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 高炉スラグ高含有セメント, 脱型時期, 強度発現性, 中性化抵抗性

1. はじめに

資源循環型社会の構築の必要性が叫ばれる昨今, 製鉄所や火力発電所からの副産物である高炉スラグやフライアッシュなどを混合セメントやコンクリート用混和材として使用を進めるための研究が活発に進められている。著者らのグループも, 既報^{1,2)}において, 高炉スラグ高含有セメントを用いた普通強度から高強度域までのコンクリートのフレッシュ性状, 圧縮強度, 耐久性に関して報告している。

コンクリートが硬化後に本来の性能を発揮するためには, 打設直後からある一定期間において十分な養生を行う必要がある。そのため, 現行の JASS5³⁾では, せき板の存置期間や湿潤養生期間に関して, 計画供用期間, 使用セメント, 温度に対して, 期間や圧縮強度によって決められている。混合セメントに関しては, 高炉セメント・フライアッシュセメント B 種の養生期間に関する記述があるものの, 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートに関する規定はされておらず, 高炉セメント高含有セメントの利用拡大を図る上では合理的で実用的な初期養生方法の確立が必要である。

本報は, 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの圧縮強度, ヤング係数の発現状況や中性化促進試験による中性化抵抗性に脱型時期が与える影響に関して, 普通ポルトランドセメント, 高炉セメント B 種との比較実験を行い, 検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 使用材料, 調査

本実験における使用材料を表-1に, セメントの化学

成分を表-2に, コンクリートの調査を表-3に示す。セメントは, 比較用の普通ポルトランドセメント(以下, N), 高炉セメント B 種(以下, BB), 比表面積 4410cm²/g と 6240cm²/g の高炉スラグ微粉末を 60~65% 含んだ高炉スラグ高含有セメント(以下, BC4, BC6), を用いた。BC4, BC6 は, 初期強度発現性を改善するために SO₃ 量を 3.6% まで増加させた JIS の高炉セメント C 種に適合したセメントである。細骨材, 粗骨材は, 各調査で同種の

表-1 使用材料

分類	記号	名称	概要
セメント	N	普通ポルトランドセメント	市販品 D社製
	BB	高炉セメントB種	市販品 D社製
	BC4	高炉スラグ高含有セメント(スラグ4000級)	試作品 高炉スラグ含有率60~65% 高炉スラグの比表面積:4410cm ² /g
	BC6	高炉スラグ高含有セメント(スラグ6000級)	試作品 高炉スラグ含有率60~65% 高炉スラグの比表面積:6240cm ² /g
細骨材	S	千葉県君津産山砂	表乾密度:2.62g/cm ³ , 吸水率:1.28%
粗骨材	G	東京都八王子産硬質砂岩碎石	表乾密度:2.67g/cm ³ , 吸水率:0.66% 実積率:59.1%
混和剤	Ad1	高性能AE減水剤	市販品
	Ad2	高性能AE減水剤	BC用開発品

表-2 セメントの化学組成

記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
BC4	2.98	4000	28.1	10.9	49.1	4.62	3.60
BC6	2.98	4920	28.2	11.1	48.7	4.72	3.60
N	3.16	3390	21.8	5.47	63.7	2.00	2.28
BB	3.04	3900	26.1	9.25	53.9	3.68	2.22

表-3 コンクリートの調査

調査名	セメント	W/C (%)	空気量 (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)			
					W	C	S	G
BC4-50	BC4	50	4.5	48.2	170	340	844	928
BC4-40	BC4	40	4.5	45.9	170	425	770	928
BC4-30	BC4	30	4.5	43.6	170	567	677	896
BC6-50	BC6	50	4.5	48.2	170	340	844	928
N-50	N	50	4.5	48.7	170	340	861	928
BB-50	BB	50	4.5	48.4	170	340	850	928

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 研究主任 博士(工学)(正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 研究主任 工修(正会員)

*3 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 グループリーダー 博士(工学)(正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産 Gr. グループ長 PhD(正会員)

骨材を用い、混和剤は、N、BBは既製の高性能AE減水剤を、BC4、BC6は開発中の高性能AE減水剤を用いた。

コンクリートの調合は、全てのコンクリートで単位水量を170kg/m³で固定とし、空気量4.5%、スランブ18cmとなるように調整した。

2.2 実験の因子と水準

本実験における因子と水準を表-4に示す。

シリーズIでは、200mm厚の壁部材を想定して20℃一定環境下で脱型時期の影響を、シリーズIIではマス部材を想定して初期に高温履歴を受けた場合の脱型時期の影響を確認した。シリーズIでは、W/C50%で4種のセメントの圧縮強度、ヤング係数、中性化に与える影響を、脱型時期1、3、7、10日で確認した。シリーズIIでは、図-1の温度履歴を与えた場合の圧縮強度とヤング係数に与える影響を脱型時期1、3、7日で確認した。BC4においては、W/C50%、40%、30%の3水準でW/Cが異なる場合の脱型時期の影響を確認した。

2.3 試験体の作製方法及び試験方法

本実験における試験体の打設及び養生方法は、和泉ら⁴⁾の手法を参考とし、図-2のように行った。コンクリートの練混ぜは20℃環境下で行い、フレッシュ状況を確認後にブリキ製簡易型枠に打込んだ。打込み直後に打込み面の乾燥及びブリージングの影響を防ぐ目的で、鋼板とラップフィルムにて保護し、ビニールテープで封緘し、脱型まで各温度にて横置き封緘養生とした。

200mm厚の壁部材を想定したシリーズIでは、養生温度20℃で養生し、脱型後に打設面、底面の2面を乾燥させた。マス部材を想定したシリーズIIでは、別途実施した1mマス角の表層近傍の温度履歴から設定した温度履歴を初期養生時に与え、脱型後に打設面の1面を乾燥させた。各脱型材齢で乾燥面以外はアルミテープで封緘し、その後は試験材齢まで20℃、相対湿度60%の乾燥環境下で養生した。なお、シリーズIIの高温履歴を受けた試験体は、高温養生からの急激な温度低下を防ぐため、20℃、相対湿度60%環境下におかれた発泡スチロール製の簡易断熱箱にて1面乾燥状態で内部温度が20℃程度に低下するまで静置した後に、所定の材齢まで養生した。

圧縮強度は、JIS A 1108 (コンクリートの圧縮強度試験方法)に準拠し、シリーズIは1日、3日、7日、10日、シリーズIIは1日、3日、7日に脱型を行い、それぞれの調合に対して、脱型時及び脱型後に所定の養生を継続した28日、56日に測定を行った。強度試験時にJIS A 1149 (コンクリートの静弾性係数の測定方法)に準拠し、コンプレッションメーターを用いてヤング係数の測定を行った。

促進中性化試験は、各脱型時期から初期養生を行った後に材齢56日まで養生温度20℃、相対湿度60%の環境下で乾燥させ、その後JIS A 1153 (コンクリートの促進

中性化試験方法)に準じ、20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%環境下で中性化を促進させた。試験材齢、0(促進開始材齢)、4、13週で試験体を割裂し、割裂面に1%フェノールフタレイン溶液を噴霧し、コンクリート割裂面から着色部までの平均距離を中性化深さとした。シリーズIの各材齢で2体の試験体を割裂し、試験体の打設面と底面の2面の平均から中性化深さを算出した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

20℃一定環境下で行ったシリーズIの脱型時期と脱型時強度の関係を図-3に、部材表面温度履歴を与えたシリーズIIの脱型時期と脱型時強度の関係を図-4に示す。シリーズI、シリーズIIともに全ての条件で脱型時期が遅くなれば脱型時強度が大きくなっていった。シリーズIIでは初期の高温履歴の影響で、脱型時期を3日、7日と変化させてもその差異は小さくなっていった。

セメント種別に比較を行うと、シリーズIでは、N>BC6>BB>BC4の関係となっており、スラグ粉末度を6000としたBC6は、BBより初期の強度発現量は大きくなっていった。シリーズIIでは、セメント種別の強度発現

表-4 実験の因子と水準

(1) シリーズI (2) シリーズII

因子	水準	因子	水準
セメント	BC4、BC6、N、BB	セメント	BC4、BC6、N、BB
W/C	50%、40%、30%	W/C	50%、40%、30%
初期養生温度	20℃一定	初期養生温度	図-1の温度履歴
脱型時期	1、3、7、10日	脱型時期	1、3、7日

※圧縮強度、ヤング係数、中性化 ※圧縮強度、ヤング係数

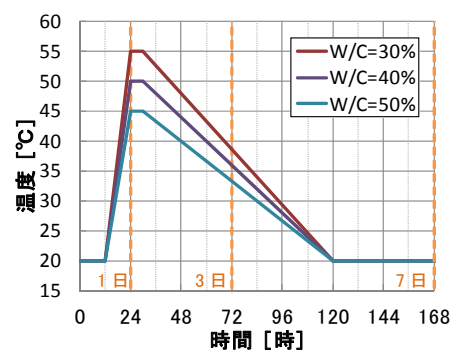


図-1 シリーズIIの初期養生温度履歴

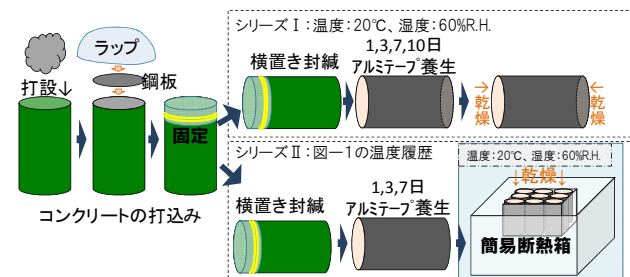


図-2 試験体の作製方法

性は各材齢で異なっており、材齢 1 日においては、BC6 > N > BC4 > BB, 材齢 7 日では N > BB > BC6 > BC4 の関係であった。BC4, BC6 は、初期強度発現性を改善するためにセッコウ量を増やしていることから、温度依存性の大きいアルミネート系の反応が高温時に活性化し、材齢 1 日の強度発現量が多くなったものと推察される。BC4 にて行った水セメント比を変化させた実験結果から、水セメント比を変化させてもシリーズ I の BC4 の材齢 1 日の圧縮強度に大きな差異はなかった。材齢 3 日以降は脱型時期を遅くするほど圧縮強度は高くなっており、水セメント比が小さいものほど圧縮強度が高くなっていった。

各グラフに挿入した湿潤養生期間を終了してもよいとされる 10N/mm² のライン⁴⁾から、20℃一定の場合は全てのセメントで 1 日から 3 日の間に、部材表面温度履歴を受けた場合は、BC4-50 と BB-50 が 1 日から 3 日の間に、その他の条件は 1 日以前に 10N/mm² を超えることを確認した。

20℃一定環境下で行ったシリーズ I の脱型時期と 28 日圧縮強度の関係を 図-5 に、部材表面温度履歴を受けたシリーズ II の脱型時期と 28 日圧縮強度の関係を 図-6 に示す。全てのセメントで脱型時期が 1 日の場合は圧縮強度が低下する傾向にあるが、3 日以降とした場合には 28 日圧縮強度に脱型時期が与える影響は小さくなることが確認された。

シリーズ I とシリーズ II の比較から初期の高温養生の影響をセメント種別で比較すると、N や BC6, BC4 は高温履歴の影響を受けて 28 日圧縮強度が同程度か低下しているが、BB に関しては初期の高温履歴によって

20℃養生より 28 日圧縮強度が増加していることが確認された。

3.2 ヤング係数

20℃一定環境下で行った場合の脱型時期と脱型時ヤング係数の関係を 図-7 (左: シリーズ I, 右: シリーズ II) に示す。圧縮強度と同様に脱型時期が遅くなるほど、脱型時のヤング係数が大きくなっているが、その影響は圧縮強度ほど大きくないことが確認された。セメント種別のヤング係数の関係は、圧縮強度とは異なり、シリーズ I, シリーズ II 共に、N > BC6 ≒ BC4 > BB の関係であり、BC6, BC4 は BB よりもヤング係数が大きかった。

BC4 の水セメント比を変化させた場合の実験結果から、圧縮強度と同様にシリーズ I の BC4 の材齢 1 日のヤング係数に大きな差異はなかった。また、材齢 3 日以降は脱型時期が遅いものほどヤング係数が大きく、水セメント比が小さいものほどヤング係数が大きくなっていった。

脱型時期が 28 日のヤング係数に与える影響を 図-8 (上: シリーズ I, 下: シリーズ II) に示す。グラフより、脱型時のヤング係数は脱型時期の影響を受けていたが、28 日のヤング係数は有意な差異は確認されず、脱型時期を変化させても殆ど変わらないことが確認された。

材齢 28 日圧縮強度と材齢 28 日ヤング係数の関係を 図-9 に示す。脱型時期を変化させた場合も圧縮強度が高いほどヤング係数が高い傾向を示した。同一強度レベルでセメント種別の比較を行うと BC6, BC4 は BB と比較してヤング係数が大きい傾向を示した。BC4 に関して水セメント比の影響を確認してみると、同一強度レベルで

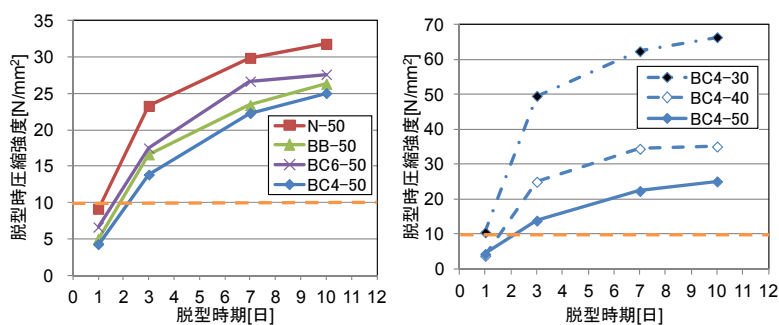


図-3 脱型時期と脱型時圧縮強度の関係(シリーズ I)

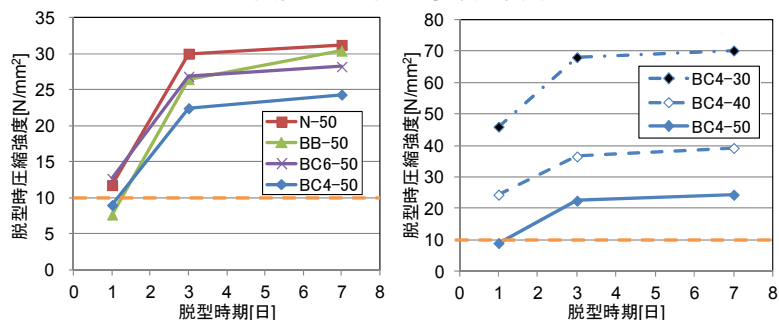


図-4 脱型時期と脱型時圧縮強度の関係(シリーズ II)

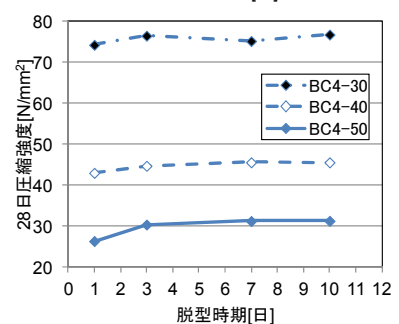
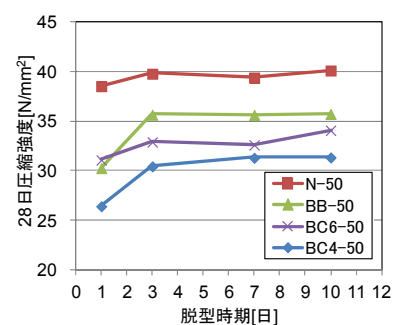


図-5 脱型時期と 28 日圧縮強度の関係(シリーズ I)

は水セメント比の高いほうがヤング係数は大きくなる傾向が確認された。

3.3 中性化深さ

シリーズ I の 20℃一定環境下で行った脱型時期が中性化深さに与える影響に関する試験結果を図-10に示す。コンクリートの中性化速度係数 A を、 $X=A\sqrt{t}$ (X : 中性化深さ, A : 中性化速度係数, t : 促進試験材齢) の関係を用いて、中性化促進期間 4 週, 13 週の結果から算出した結果を表-5に示す。表中には、脱型材齢 7 日を基準とした中性化速度係数比を示した。

今回の中性化試験の精度の確認のために BC4 の同一バッチのコンクリートで行った JIS に規定されている標準養生 (4 週水中→4 週乾燥) を行った試験体の促進材齢 13 週における中性化深さは 16.8mm であり、脱型 3~7 日と同程度であった。

脱型後から促進中性化前の材齢 56 日の 20℃, 相対湿度 60%環境下での前養生で、全てのセメントで脱型 1 日

の試験体は中性化促進試験前に 2~5mm 程度中性化が進行していた。中性化促進試験材齢 4 週, 13 週では、全てのセメントで脱型時期が遅くなるほど中性化深さが小さくなっており、脱型時期が 1 日の場合の中性化速度係数は大きい、3 日以上の場合には次第に安定していく傾向が確認された。

セメント種別で中性化抵抗性を比較すると、 $N > BC6 > BB > BC4$ の関係であり、高炉スラグ微粉末が混入されたセメントの中性化抵抗性は普通セメントより小さかった。BC では、高粉末度の BC6 は、低粉末度の BC4 よりも中性化抵抗性が高く、BB とほぼ同等の中性化深さであった。BC4 で行った水セメント比を変化させた場合の試験結果より、BC の中性化抵抗性は、水セメント比の低減により改善し、W/C を 50% から 40% に低減することで、BB の W/C=50% と同程度の中性化抵抗性を示した。W/C を 30% まで低減することで、中性化抵抗性は更に改善していることから、セメントの含有量が少ない BC に

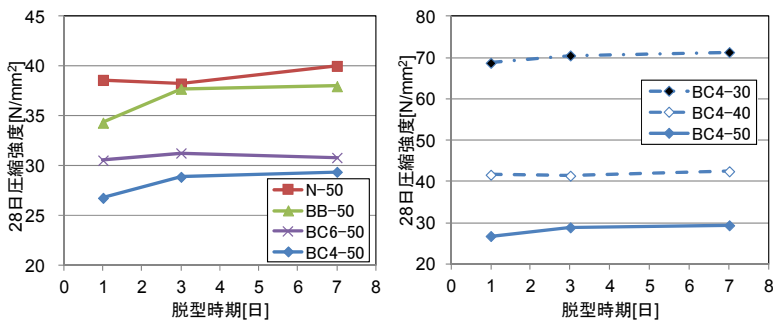


図-6 脱型時期と 28 日圧縮強度の関係(シリーズ II)

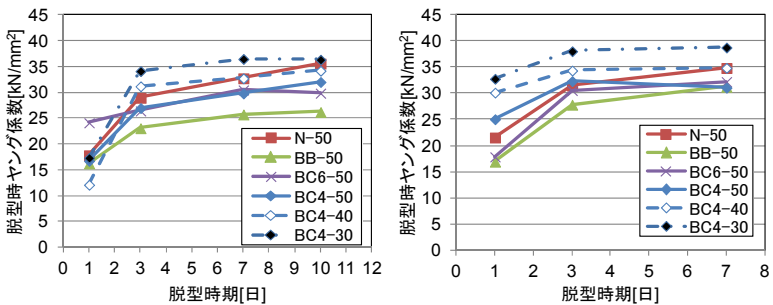


図-7 脱型時期と脱型時ヤング係数の関係 (左: シリーズ I, 右: シリーズ II)

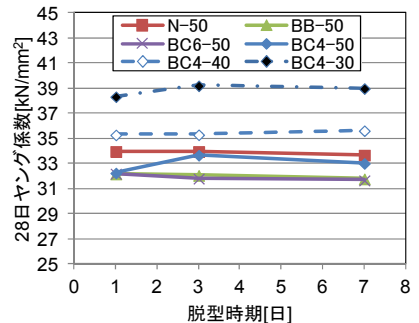
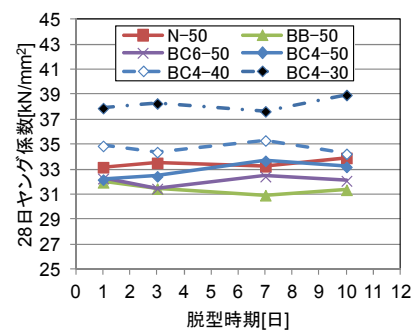


図-8 脱型時期と 28 日ヤング係数の関係 (上: シリーズ I, 下: シリーズ II)

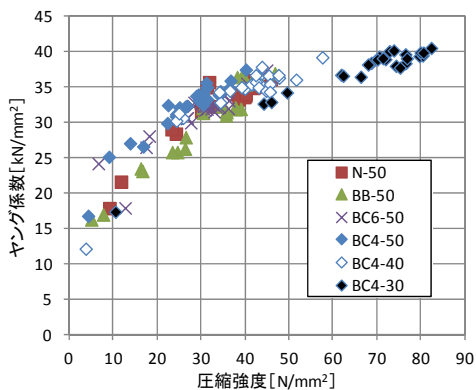


図-9 圧縮強度とヤング係数の関係

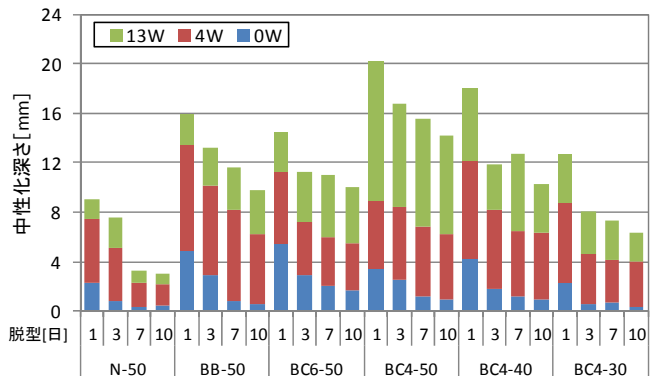


図-10 脱型時期と中性化深さ(シリーズ I)

においても、スラグの粉末度と水セメント比の調整により必要な中性化抵抗性を持たせることが可能であることが確認された。

材齢4週から13週の材齢の進行とともにBCやBBはNより長期材齢の中性化深さの進行量が増加した。これは、伊代田ら^{5),6)}が指摘する高炉セメントの場合の高濃度CO₂環境下での炭酸化に伴うバテライトの生成が起因していると推察される。炭酸化によるバテライトとカルサイトの生成比率は、スラグの混合量によって異なるとされており、BC>BB>Nの関係でバテライトの生成量が多く、C-S-Hの崩壊による空隙の粗大化が起こり、長期材齢での炭酸化の進行量が増加したものと推察される。

4. 脱型時期、脱型時強度に関する考察

脱型時期を1~10日とした場合の脱型時強度と、脱型材齢を7日とした場合を基準とした材齢28日の圧縮強度比を図-11に示す。セメント種が異なる場合も概ね同様の傾向を示しており、BCを用いた場合にも、既往の文献⁴⁾に言われているように、脱型時強度を10N/mm²以上とすれば、脱型7日に対する強度比は90%以上を確保できることが確認された。水セメント比の小さいW/C=40%および30%では、5N/mm²以上の脱型時強度とすることで、7日存置に対する強度比を90%以上確保されることが確認された。また、BC6とBC4の比較より、スラグ粉末度の大きいBC6はBC4よりも7日存置に対する強度比が大きい傾向が確認された。

材齢7日に脱型した場合の材齢28日の圧縮強度を基準にして材齢56日における圧縮強度比と脱型時強度との関係を図-12に示す。図-11と図-12の比較から、材齢28日圧縮強度では脱型強度を10N/mm²以上とした場合も7日脱型とした場合の強度を下回るものが散見されたが、材齢56日圧縮強度では、その後の強度増進により28日強度を下回るものがほとんどなくなっていた。28日から56日までの強度増進量はセメントによって異なるが、全体の平均では6%程度大きくなり、脱型時強度10N/mm²以前に脱型されたものも7日脱型の28日強度に対する強度比は90%を上回っていた。また、W/C50%の各セメントの強度増進量はBC-40、BC-30よりも多い傾向があり、早期脱型により乾燥を受けても、内在する水分が多いためその後の水和が進行したものと

推察される。

脱型時期を1~10日とした場合の脱型時強度と脱型材齢を7日とした場合を基準とした材齢28日のヤング係数比を図-13に示す。グラフより、脱型時強度が低い場合には若干のばらつきも確認されるが、ヤング係数は圧縮強度ほど脱型時期の影響を受けずに、脱型時期を変化させても28日ヤング係数は7日脱型の場合と同等であることが確認された。

表-5に示した各コンクリートの中性化速度係数を用いて促進材齢26週の中性化深さを推定した結果と脱型時強度の関係を図-14に示す。全てのセメントにおいて、脱型時強度が高いほど中性化深さが小さくなることが確認された。温度20℃、相対湿度60%、CO₂濃度5%の環境下で促進試験を行った場合に、日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート設計施工指針(案)・同解説⁷⁾で要求されている材齢26週の中性化深さの目標品質25mm

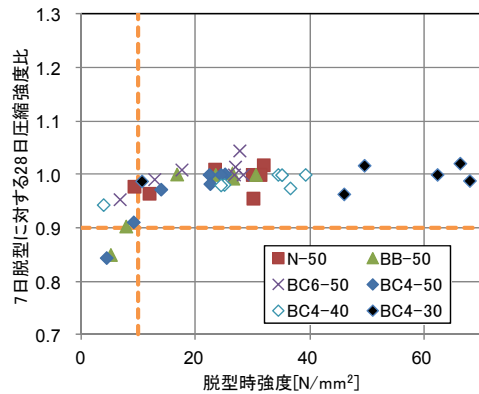


図-11 脱型時強度と7日脱型を基準とする28日圧縮強度比の関係

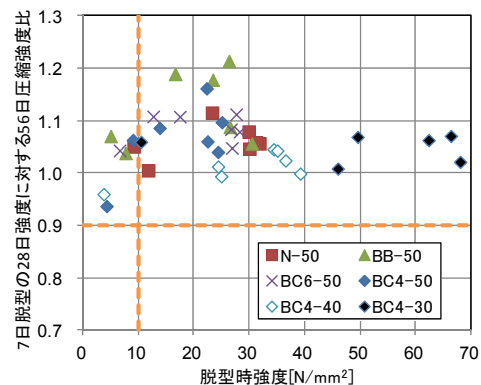


図-12 脱型時強度と7日脱型の28日強度を基準とする56日圧縮強度比の関係

表-5 中性化速度係数(mm/√週)

記号	N-50	BB-50	BC6-50	BC4-50	BC4-40	BC4-30
脱型1日	2.79 (2.94)	4.97 (1.45)	4.38 (1.45)	5.32 (1.30)	5.23 (1.52)	3.72 (1.84)
脱型3日	2.20 (2.32)	3.98 (1.16)	3.23 (1.07)	4.53 (1.11)	3.47 (1.01)	2.25 (1.11)
脱型7日	0.95 (1.0)	3.42 (1.0)	3.02 (1.0)	4.09 (1.0)	3.45 (1.0)	2.02 (1.0)
脱型10日	0.89 (0.94)	2.87 (0.84)	2.77 (0.92)	3.74 (0.91)	2.92 (0.85)	1.82 (0.90)

※ () の数字は、脱型7日を基準とした中性化速度係数比

をグラフ中に示した。BC4, BB の脱型時強度が 10N/mm^2 以下の場合を除いて、中性化深さが目標品質の 25mm を確保できる可能性があることが確認された。

BC の圧縮強度、ヤング係数、中性化抵抗性に与える脱型時期（脱型時強度）の影響に関する N, BB との比較実験から、BC の諸性能に与える脱型時期の影響は、N や BB と大きな差異はなく既往の研究と同様の傾向を示すことが確認された。また、BC4, BC6, BB を用いた場合の脱型時強度と諸性能の関係は、ほぼ同様の傾向を示すところから、JASS5 に示される BB と同様のせき板の存置、湿潤養生期間を設定すれば、所要の性能を確保できる可能性が高いことが分かった。

脱型時期が BC のその他の性能に与える影響や BC の低温環境下のコンクリートの諸性能に与える影響などに関しては、今後の検討が必要である。また、伊代田ら⁶⁾が示すように、高炉スラグ含有セメントに対しては高濃度の促進中性化による中性化抵抗性の評価は、過度に安全側の評価となることから、BC の実環境での中性化抵抗性などに関する検討を行い、合理的な初期養生方法を設定する必要があると考えている。

5. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) 脱型時期が BC の圧縮強度発現に与える影響は、N, BB と大きな差異はなく、脱型時強度を 10N/mm^2 以上とすれば、所要の強度が得られることが分かった。
- (2) 脱型時期が BC のヤング係数発現に与える影響は、N, BB と大きな差異はなく、脱型時期を変えても 28 日ヤング係数はほとんど変わらないことが分かった。
- (3) 脱型時期が BC の中性化抵抗性に与える影響は、BB と大きな差異はなく、脱型時強度を 10N/mm^2 以上とすれば、所要の中性化抵抗性を得られる可能性が高いことが分かった。

謝辞: 本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の助成による「省エネルギー革新技术開発事業/実用化開発/エネルギー・CO₂ ミニマム (ECM) セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として実施した。共同研究者である東京工業大学 坂井悦郎教授をはじめ、(株) デイ・シイ、日鉄住金高炉セメント (株)、太平洋セメント (株)、日鉄住金セメント (株) および竹本油脂 (株) の関係各位に紙面を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1,

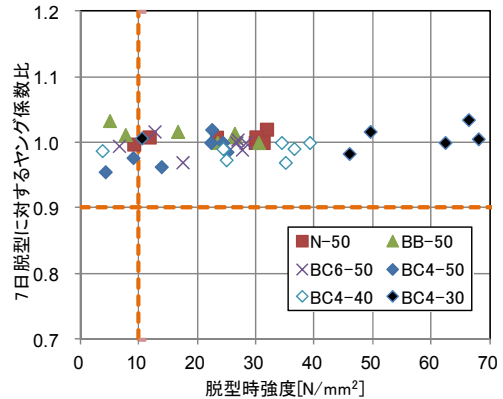


図-1 3 脱型時強度と 7 日脱型を基準とする 28 日ヤング係数比の関係

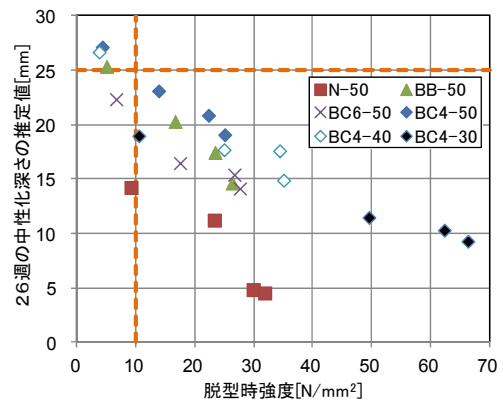


図-1 4 脱型時強度と中性化深さの関係 (促進材齢 26 週における推定値)

pp.485-490, 2010.7

- 2) 辻大二郎, 小島正朗, 黒田萌, 坂田昇: 高炉スラグ高含有セメントを用いた高強度コンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.145-150, 2013.7
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2009.2
- 4) 和泉意登志ほか: 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集, No.449, pp.35-45, 1993.7
- 5) 伊代田岳史, 豊村恵理: 異なる CO₂ 濃度下での高炉セメントの炭酸化メカニズムに関する一考察, 第 67 回セメント技術大会講演要旨, pp.230-231, 2013.5
- 6) 豊村恵理, 伊代田岳史: 異なる二酸化炭素濃度環境下における炭酸化メカニズムに関する一検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.769-774, 2013.7
- 7) 日本建築学会: 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針 (案)・同解説, 1991.7