

論文 高炉スラグ微粉末を用いた PC 用コンクリートの特性

谷口 秀明*1・渡辺 博志*2・田中 良樹*3・藤山 学*1

要旨：PC 部材への適用を目的に、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 を使用したコンクリートに関し、圧縮強度や塩分浸透性などを確認するとともに、施工時に重要な養生方法の影響について詳細な検討を行った。実験の結果、高炉スラグ微粉末の置換率 30% では初期強度を確保できること、高炉スラグ微粉末を使用した場合には湿潤養生および高温履歴が圧縮強度に大きく影響すること、さらに高炉スラグ微粉末の使用により塩分浸透抵抗性が改善されるものの、圧縮強度と同様に湿潤養生が重要であることなどが明らかになった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、プレストレストコンクリート、圧縮強度、塩分浸透性

1. はじめに

高炉スラグ微粉末は、セメントにプレミックされた高炉セメントとして国内セメント生産高の約 2 割を占めるほど一般的な混和材であり、これに関する指針類^{1,2)}も十分に整備されている。しかし、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートが橋りょうの上部構造に使用された事例は極めて少ない。これは、養生条件の違いが硬化コンクリートの品質に及ぼす影響が明確になっていないことや、初期強度が小さいことが作業効率を優先するこれまでの建設に適さないことなどに起因するものと考えられる。

近年はコンクリート構造物の LCC, LCA が重視される傾向にあり、これに相俟って耐久性の向上や環境負荷の軽減などが強く望まれる。産業副産物でありながら、アルカリ骨材反応の抑制、塩化物イオンや酸素の浸透に対する抵抗性の付与などの優れた性能を持つ高炉スラグ微粉末の活用はその有効な手段の一つと言える。

そこで、筆者らは、橋りょう上部構造の PC 部材を想定し、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 を使用したコンクリートの基礎性状を確認し、さらに実施工で重要な養生条件の影響について詳細な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料および配合

コンクリートの使用材料を、表-1 に示す。結合材は、初期強度の確保と汎用性を考慮し、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 を用いた。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と AE 剤を併用した。

コンクリートの配合を、表-2 に示す。水結合材比は、現場打ち PC 橋で多用されるコンクリート (40-8-20H) を想定した水結合材比 40% を基準に 30,40,55% の 3 水準とした。単位水量は同一の水結合材比では一定とし、細骨材率は

表-1 使用材料

材料名	種類、産地、物性、成分	密度	記号
水	水道水	1.00	W
セメント	早強ポルトランドセメント、比表面積 4460cm ² /g	3.14	C
混和材	高炉スラグ微粉末6000(せっこう添加タイプ)、比表面積6120cm ² /g、SO ₃ 量1.95%	2.88	BF
細骨材	混合砂 (混合 鬼怒川産川砂、吸水率1.66%、F.M2.71 比率 1:1)	2.58	S
	葛生産砕砂 (硬質砂岩)、吸水率0.9%、F.M2.96	2.64	
粗骨材	葛生産砕石2005 (硬質砂岩)、粒径判定実積率59.7%、F.M6.66	2.65	G
混和剤	高性能AE減水剤、ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体 (消泡タイプ)		SP
	AE剤、変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤		AE

(密度:単位:g/cm³、骨材の値は表乾密度を指す)

*1 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 (PC 建協) 工修 (正会員)

*2 独立行政法人 土木研究所 構造物マネジメント技術チーム 工修 (正会員)

*3 独立行政法人 土木研究所 構造物マネジメント技術チーム (正会員)

すべて 40%にした。高炉スラグ微粉末の置換率（以下、置換率と略す）は 0.50%を基準に、水結合材比 40%では 30%と 70%を加えた。高性能 AE 減水剤は同一水結合材比において同量で、スランブが $12 \pm 2.5\text{cm}$ （水結合材比 40.55%）および $18 \pm 2.5\text{cm}$ （水結合材比 30%）に入るよう、AE 剤の使用量は空気量がこれまでの研究^{3,4)}と同一の $4.0 \pm 0.5\%$ になるように調整した。

なお、コンクリートの製造には容量 100 リットルの強制 2 軸ミキサを使用し、1 バッチ当たり 40～70 リットル、180 秒間の練混ぜを行った。

2.2 コンクリートの品質に関する試験

(1) フレッシュ性状および凝結硬化性状

フレッシュコンクリートに対し、スランブ試験(JIS A 1101 に準ず)、空気量試験(JIS A 1128 に準ず)およびコンクリート温度の測定(棒状温度計による)を行った。また、JIS A 6204 附属書 1 に定められるプロクター貫入による凝結試験により、ウェットスクリーニングモルタルの凝結の始発と終結の時間を確認した。

(2) 圧縮強度発現性状

JIS A 1108 に準じ、 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を使用し、各配合のコンクリートに対して任意の材齢（1～365 日）と養生条件（後述の 6 種類）下の圧縮強度を測定した。

また、 $500 \times 500 \times 400\text{mm}$ （容積 100 リットル）のコンクリートを発泡スチロール（厚さ 200mm）によって断熱状態とした断熱試験体⁵⁾を作製し、供試体中心部の温度とコア強度（直径 $\phi 100\text{mm}$ ，端部 100mm ずつ切断して中央部のみを供試体として使用）を測定した。

(3) 塩分浸透性

塩分浸透性の評価には、ASTM C 1202 に定められた急速塩分透過性試験を用いた。これは、図-1 に示すように円盤状のコンクリート供試体を介して陽極側に 0.3N-NaOH 水溶液を、陰極側には 3%NaCl 水溶液を充てんした試験装置を使用し、60V の直流電圧を 6 時間印加するものである。すべての供試体を 1 度に試験できないので、強度増進が小さくなった材齢 2 ヶ月前後

表-2 コンクリートの配合

配合名	W/B (%)	s/a (%)	BF/B (%)	単位量 (kg/m ³)					SP (B × Wt%)
				W	B		S	G	
					C	BF			
H1	30	40	0	150	500	0	678	1036	1.5
BF1			50		250	250	671	1023	
H2	40		0	173	433	0	678	1036	0.7
BF2-30			30		303	130	674	1028	
BF2			50		217	216	671	1023	
BF2-70			70		130	303	668	1020	
H3	55		0	196	356	0	678	1036	0
BF3			50		178	178	674	1026	

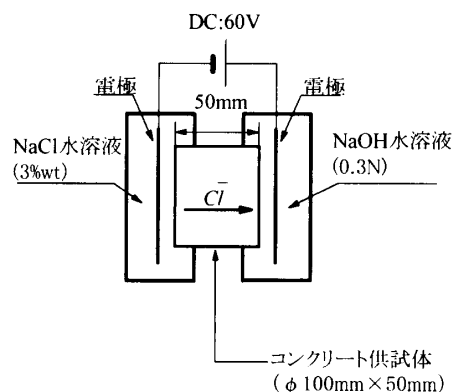


図-1 急速塩分透過性試験装置

表-3 コンクリートの養生方法

養生名	記号	養生方法
標準水中養生	CN	試験室において打込み翌日まで湿潤養生、脱型後は養生水槽内 (20℃)
室内気中養生A	CA	試験室において湿潤養生3日、以降は所定の材齢まで気中養生 (20℃, 60%)
室内気中養生B	CB	試験室において湿潤養生5日、以降は所定の材齢まで気中養生 (20℃, 60%)
室内気中養生C	CC	試験室において湿潤養生なしで気中養生 (20℃, 60%)
蒸気養生	CS	プレテンションPC桁の製造ラインで蒸気養生、以降は気中養生 (20℃, 60%)
断熱養生	CI	500x500x400mmの供試体を厚さ200mmの発泡スチロールで被覆

湿潤養生：養生マットに散水後、養生シートで被覆

に真空飽水処理を行った後、試験に供した。筆者らは電流量を評価値にしてきた⁴⁾が、高炉スラグ微粉末の影響が明らかではないこと⁶⁾から、本論文では通電終了後の供試体を割裂し、割裂面に 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧して塩分浸透深さを測定し、これによって塩分浸透性を評価した。

2.3 コンクリートの養生方法

養生方法は、表-3 に示す 6 種類である。図-2 は養生 CS の材齢 1 日までの温度履歴を表したものであるが、今回の実験では ACI-517⁷⁾を参考に凝結の始発時間を前養生時間の目安とし、

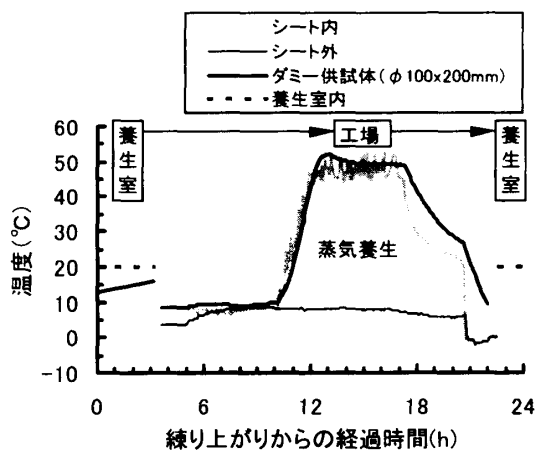


図-2 蒸気養生(養生CS)の温度履歴

表-4 フレッシュ性状および凝結硬化性状に関する試験結果

配合名	BF/B (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	凝結時間 (時-分)			
				始発	遅延	終結	遅延
H1	0	19.5	3.9	7-40		10-02	
BF1	50	20.5	3.6	9-38	1-58	11-28	1-26
H2	0	10.5	4.1	6-29		8-16	
BF2-30	30	10.0	3.5	6-59	0-30	8-29	0-13
BF2	50	12.0	3.8	7-13	0-44	8-55	0-38
BF2-70	70	10.0	3.7	7-26	0-58	9-44	1-27
H3	0	12.5	4.2	6-49		8-22	
BF3	50	11.0	3.5	7-11	0-22	8-56	0-34

凝結の遅延時間: BF/B=0%の値を基準

さらに工場内の温度が低いことも考慮して試験室の始発時間よりも若干延ばした。

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状および凝結硬化性状

単位水量および高性能 AE 減水剤の使用量を一定にした条件下では、表-4 に示すとおり、高炉スラグ微粉末の使用がスランブの値に及ぼす影響は小さい。指針¹⁾では単位水量を置換率 10% 当たり 1.5kg/m^3 減少させることになっているが、試験結果から同指針の配合修正方法に基づいて計算した低減量は $0.1\sim 0.9\text{kg/m}^3$ になった。よって、高性能 AE 減水剤を使用した配合が多いことを加味しても、今回の実験条件の範囲では高炉スラグ微粉末の使用による単位水量の低減効果はあまり期待できないと言える。

一方、凝結時間は、置換率が大きいほど、あるいは水結合材比が小さいほど、遅延する傾向

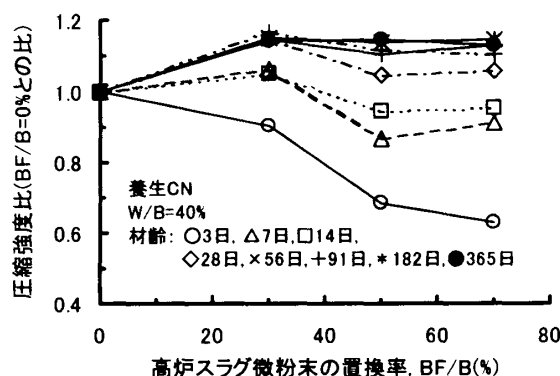
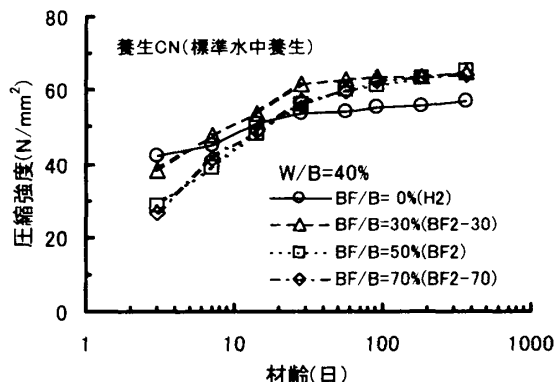


図-3 標準水中養生(養生CN)下の圧縮強度発現性状

が表-4 の結果から把握できる。ただし、水結合材比 40% 以上、置換率 50% 以下の遅延時間は 0.5 時間前後と短く、現場打ち工法ではあまり支障がないものと思われる。なお、今回の試験は練り上がり温度が $12\sim 13^\circ\text{C}$ と低く、ダミー供試体 ($100\times 100\times 400\text{mm}$) の温度は 20°C に達するまでに 7~8 時間要したことを付記する。

3.2 圧縮強度発現性状

(1) 標準水中養生下の圧縮強度発現性状

図-3 は、養生 CN、水結合材比 40% において置換率に着目した圧縮強度試験の結果である。置換率が大きいほど、初期強度が小さく、長期強度が大きくなる傾向は、普通ポルトランドセメントを使用した既往の結果¹⁾と同様である。置換率 50% 以上では、材齢 14~28 日において置換率 0% と同等の強度を発現する。しかし、置換率を 30% に抑えれば、置換率 0% に対して材齢 3 日で 0.9 倍程度となり、現状の PC 工事のサイクルにも十分に適用可能であるとともに、材齢 7 日以降では置換率 0% よりも圧縮強度が

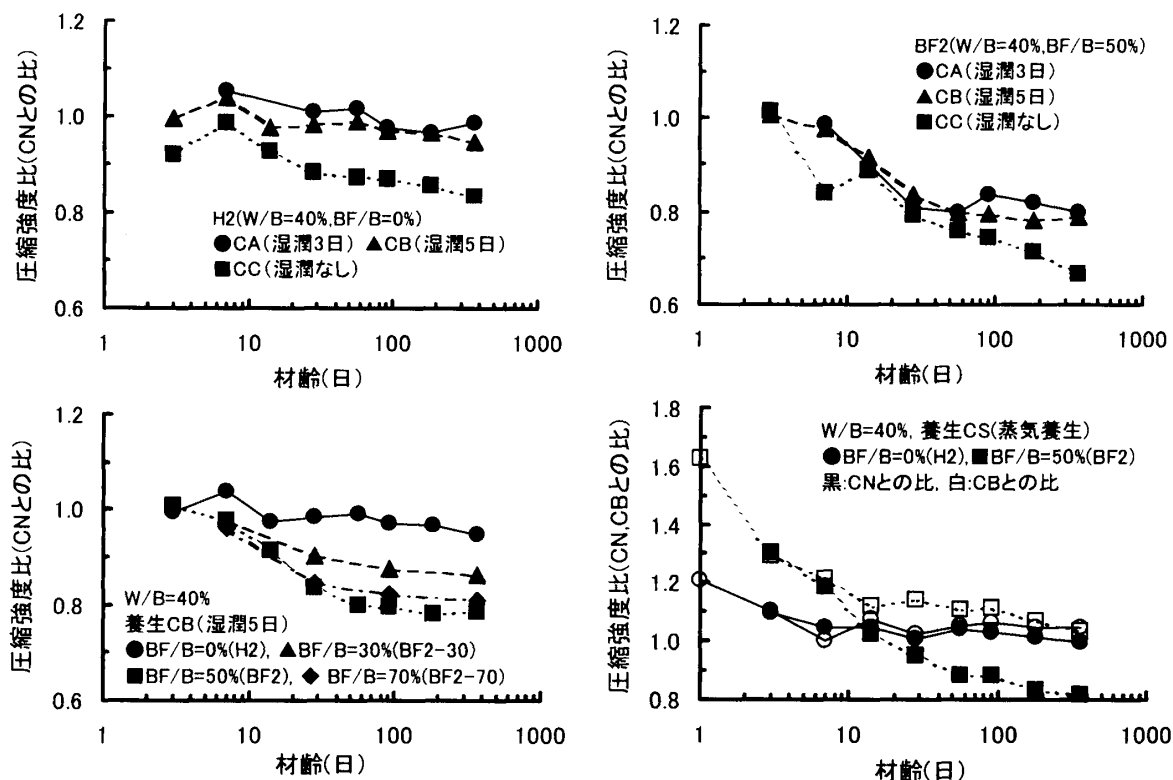


図-4 湿潤養生および蒸気養生が圧縮強度発現性状に及ぼす影響

増大するという効果も見られる。

(2) 湿潤養生および蒸気養生の影響

図-4 は、水結合材比 40% のコンクリートに対し、4 種類の養生を施した場合の材齢と圧縮強度比の関係を表したものである。ここで、圧縮強度比とは、各種養生下の圧縮強度を養生 CN (一部、養生 CB) の値で除したものである。

養生 CB は湿潤養生の日数を養生 CA よりも 2 日間を延ばしたが、両養生の圧縮強度比には配合 H2, BF2 とともに差異が認められない。また、配合 H2 では初期の湿潤養生によってその後の乾燥の影響を受けず、長期にわたって圧縮強度比は約 1.0 であるのに対し、高炉スラグ微粉末を用いた配合 BF2 では、材齢 7 日以降に材齢とともに低下し、材齢 28 日以降は約 0.8 になった。養生 CC では、配合 H2, BF2 とともに初期材齢での変動が大きく、長期材齢では強度が低下しており、圧縮強度に対する湿潤養生の有無の影響は明らかである。次いで、置換率に着目した場合、養生 CN に対する圧縮強度比は置換率 50% と 70% に相違は見られず、材齢 28 日以降は約

0.8 となった。置換率 30% の値は初期材齢では置換率 50, 70% と差異がないものの、長期材齢では置換率 0% と 50, 70% の中間的な値である。これらの結果によれば、高炉スラグ微粉末の有無に関わらず、湿潤養生が重要であるとともに、高炉スラグ微粉末の置換率によって初期の湿潤養生のみでは標準水中養生下の長期強度を期待することが難しくなるものと判断される。

一方、養生 CS の養生 CB に対する圧縮強度比は、材齢 1 日では配合 H2 が約 1.2 であるのに対し、配合 BF2 は約 1.6 に達している。また、長期強度においても、養生 CN に対する圧縮強度比は 1.0 を下回るものの、養生 CB に対しては 1.1 程度を確保している。すなわち、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの圧縮強度には蒸気養生は効果的であり、長期強度をほとんど犠牲にすることなく、初期強度を大きくすることが可能である。

(3) 断熱養生の影響

断熱試験体では、寒中コンクリートを想定して練り上がり温度を 5~10℃ に調整した上、外

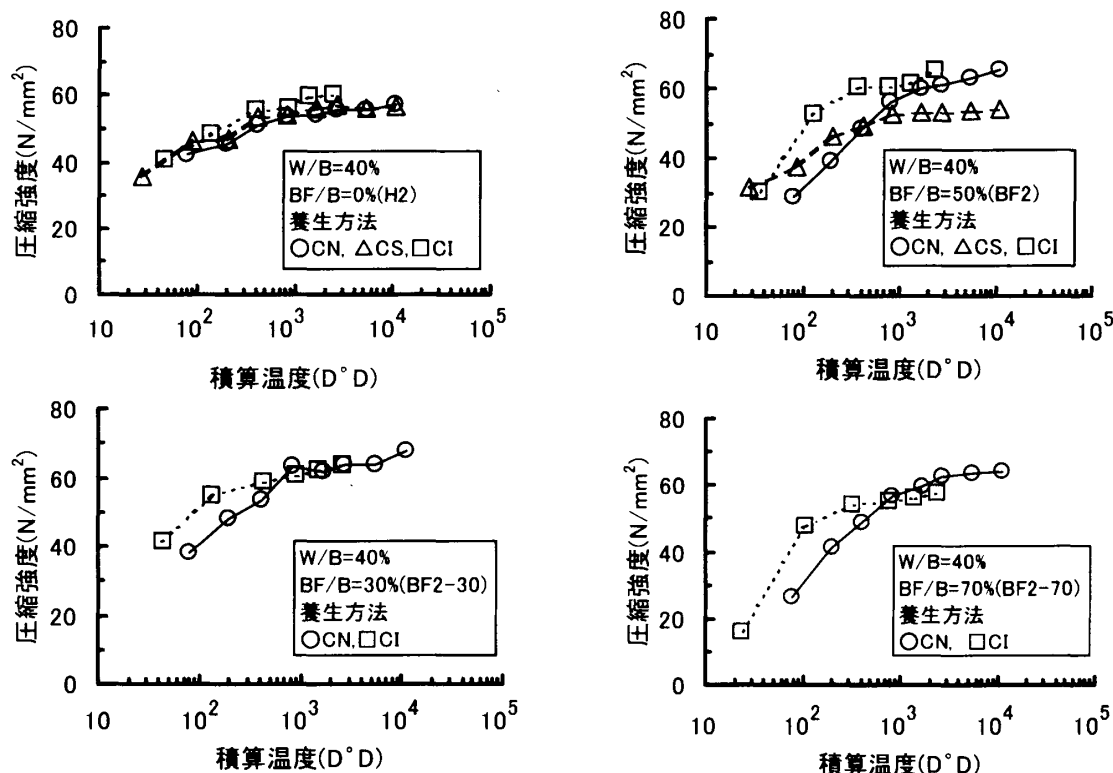


図-5 高炉スラグ微粉末の置換率および養生方法に着目した場合の積算温度と圧縮強度の関係

気温(試験体をブルーシートで覆った内部の温度、範囲-2~22℃、平均 5.9℃)の屋外に設置したものである。そこで、材齢ではなく、積算温度を用いて圧縮強度との関係を調べた。

図-5 に示すとおり、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの強度発現は養生の影響を大きく受け、特に養生 CI では置換率に関わらず、明らかに養生 CN とは異なる変化を示し、配合 H2 のように積算温度で評価することが難しい。概略的な傾向を言えば、積算温度 $1 \times 10^2 \text{D}^\circ\text{D}$ 前後の圧縮強度が養生 CN に比べて最も大きくなる傾向があり、同一積算温度において 10~20N/mm² の差が生じている。蒸気養生(養生 CS)および断熱養生(養生 CI)の結果は、高炉スラグ微粉末の水和反応が温度依存性の高いこと⁸⁾を裏付けるものと考えられる。

3.3 塩分浸透性

図-6 は、急速塩分透過性試験における塩分浸透深さの測定結果である。置換率 0%の供試体には養生 CA に施したので厳密には養生 CB の結果とは異なるが、置換率 0%の養生 CS 以外

の値や試験材齢の圧縮強度に相違が見られないことから、概ね同等に扱えるものと判断した。

置換率 50%のコンクリートにおいて、塩分浸透深さは、結合材水比が大きくなるほど小さく、結合材水比 1.8 (水結合材比 55%) では、湿潤養生の程度に応じて顕著に大きくなる傾向が見られる。しかし、結合材水比を 2.5 以上 (水結合材比を 40%以下) にすれば、養生の影響を抑制することができ、本研究が対象とする PC 部材での影響は小さいものと判断される。

一方、置換率に着目した場合、養生 CN, CA・CB の塩分浸透深さは置換率の増加に伴って小さくなるものの、養生 CC, CS では置換率 70%の値が 50%の値よりも大きい。すなわち、置換率がある程度大きくなると、湿潤養生の影響を受けやすくなり、実験の範囲ではその境界が置換率 50%である。また、筆者らは、高温履歴を受けた高強度コンクリート (水セメント比 25%) の塩分浸透に対する抵抗性が低下することを確認し、空隙の粗大化やマイクロひび割れの発生と関連付けた⁴⁾。蒸気養生(養生 CS)の結果は、

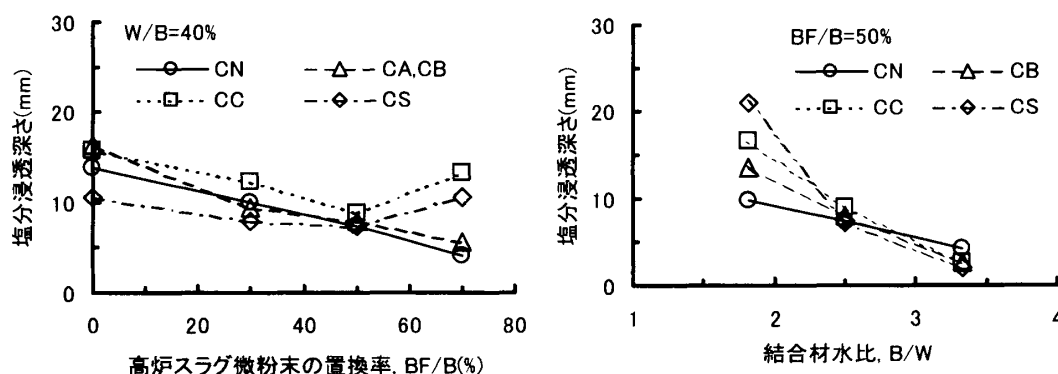


図-6 水結合材比、高炉スラグ微粉末の置換率および養生方法が塩分浸透深さに及ぼす影響

他の養生に比べて変動が大きく、強制的に高温を受けた供試体の緻密性にばらつきが影響しているものと推測される。

4. まとめ

早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末 6000 を使用したコンクリートについて、本実験の結果から以下のことが言える。

- (1) 高炉スラグ微粉末の使用によって凝結は遅延する傾向にあるが、水結合材比 40%以上、高炉スラグ微粉末の置換率 50%以下ではその影響は小さい。
- (2) 高炉スラグ微粉末の使用によって初期強度は低下するが、その置換率が 30%の場合には置換率 0%の圧縮強度に対し、材齢 3 日で約 90%を確保し、材齢 7 日以降ではそれを上回る。
- (3) 高炉スラグ微粉末の有無に関わらず、圧縮強度を確保する上で湿潤養生は重要であるが、高炉スラグ微粉末を使用した場合には、初期の湿潤養生のみでは標準水中養生下の長期的な強度発現が期待できない。
- (4) 高炉スラグ微粉末を用いた場合の圧縮強度は、高温履歴によって 20℃環境下よりも大きくなる傾向があり、高炉スラグ微粉末の水和反応における温度依存性が確認された。
- (5) 水結合材比を小さく、高炉スラグ微粉末の置換率を大きくすることにより、塩分浸透抵抗性が向上するが、養生が不適切な場合にはその効果を期待できないことがある。

なお、本研究は土木研究所と PC 建協による「PC 部材の軽量・高耐久性化に関する共同研究」の活動の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針，1996.6
- 2) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説，1996.1
- 3) 田中良樹ほか：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性に関する検討，第 23 回日本道路会議一般論文集(B)，pp.338-339，1999
- 4) 丁海文ほか：高強度コンクリートの塩分浸透性に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.348-353，2000
- 5) 河上浩司ほか：高強度コンクリートの初期発熱と強度発現性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.1057-1062，2001
- 6) 渡辺博志ほか：コンクリートの急速塩分透過性試験の適用性，土木技術資料，44-1，pp.32-37，2002
- 7) ACI-517: Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure of the Art Report, 1987
- 8) P. J. Wainwright et al.: Properties of slag cement concretes subjected to adiabatic temperature rise, 土木学会高炉スラグ微粉末のコンクリートへの適用に関するシンポジウム論文集，pp.59-66，1987.3.24