

論文 温度履歴を受けた高炉セメントコンクリートの諸性状

小野 聖久^{*1}・大城 壮司^{*2}・桐山 昭吾^{*3}

要旨：近年，高炉セメントは早期強度発現の要求が高まり，マスコンに対する温度応力抑制の効果が消失しているといわれている。そこで，実構造物の温度履歴条件下における高炉セメントを用いたコンクリートの，強度特性や耐久性について実構造物を模した大型供試体を用いて確認するとともに，温度応力ひび割れの抑制のために高炉セメントの高炉スラグ微粉末の混入率を増加させた高炉セメントの性状について検討を行った。結果，スラグの温度依存性による強度特性などへの影響が確認された。

キーワード：高炉セメント，強度特性，耐久性，温度履歴，マスコン

1. はじめに

高炉セメントを用いたコンクリートは，塩化物イオンの遮蔽性能，化学的抵抗性，アルカリ骨材反応抑制効果などの特性を有しており，また「国等による環境物品等の調達の推進等に関する法律」の対象となる低環境負荷材料でもあることから，より一層の使用が望まれる材料である。しかし，構造物の大型化や急速施工の増加といった社会情勢の変化とともに，高炉セメントにも早期強度発現の要求が高まったことから，高炉セメントの低発熱性が失われてきており¹⁾，また高炉スラグ微粉末（以下，高炉スラグという）の温度依存性により，普通ポルトランドセメントより温度応力によるひび割れが生じやすい場合があるといわれている²⁾。

そこで本研究では，実構造物の温度履歴を受けた場合の高炉セメントを使用したコンクリートの性状を確認するとともに，温度ひび割れ抑制のために高炉スラグの混入率を増加した場合の性状を把握するために，実構造物を模した大型供試体を用いて，強度特性，温度特性，耐久性などに着目して検討を行った。

2. 材料および供試体

2.1 使用材料および配合

本実験で使用した高炉セメントの材料物性を表-1に示す。また，その他の使用材料を表-2に示す。置換に使用した高炉スラグおよび普通ポルトランドセメントは，本実験で用いた

表-1 高炉セメントの材料物性

項目	試験成績
密度(g/cm ³)	3.04
スラグの混入率	41%
比表面積(cm ² /g)	3910(ベースセメント 3420, スラグ 4640)
凝結(h-min)	水量 28.1%, 始発 2-50, 終結 4-00
圧縮強度(N/mm ²)	3日:21.4, 7日:36.7, 28日:63.7, 91日:82.4
水和熱(J/g)	7日:287, 28日:344, 91日:373
化学成分(%)	酸化マグネシウム:3.65, 三酸化硫黄:2.02, 強熱減量 1.40, 塩化物イオン 0.008, アルカリ量 0.49(ベースセメント 0.52)

表-2 高炉セメント以外の使用材料

材料	品質等
普通ポルトランドセメント	表-1の高炉セメントに用いたベースセメントと同じ
高炉スラグ	表-1の高炉セメントに用いたスラグと同じ
細骨材	砕砂 (山梨県大月産)
混合比率	密度 2.62(g/cm ³), 吸水率 1.83(%)
砕石 80%	山砂 (千葉県富津産)
山砂 20%	密度 2.57(g/cm ³), 吸水率 2.38(%)
粗骨材	砕石 2005 (山梨県大月産)
	密度 2.63(g/cm ³), 吸水率 1.81(%)

*1 中日本高速道路 (株) 中央研究所 橋梁研究室 (正会員)

*2 中日本高速道路 (株) 中央研究所 橋梁研究室

*3 中日本高速道路 (株) 横浜支社 厚木工事事務所

表-3 コンクリートの配合

配合	W/C	s/a	単位量 (kg/m ³)						試し練り時	
			W	C	F	S	G	混和剤	スランプ (cm)	空気量 (%)
N	50.0	42.3	162	324(N)	—	762	1047	1.944 (SP)	11.5	5.2
BB	50.0	42.0	162	324(BB)	—	752	1047	1.013 (AE)	10.0	4.6
BB53%	50.0	41.9	162	259(BB)	65	750	1047	1.013 (AE)	9.5	4.7
BB59%	50.0	41.9	162	227(BB)	97	750	1047	1.013 (AE)	10.5	4.9

高炉セメントを製造するために混合しているものと同じのものをセメント工場から入手して使用した。

実験に使用したコンクリートの配合は、スラッグの混入率が0%(普通ポルトランドセメント)、41%(市販の高炉セメントB種)、53%(市販の高炉セメントB種を高炉スラッグで20%置換)、59%(市販の高炉セメントB種を高炉スラッグで30%置換)の4種類とした。それぞれの配合は、単位水量、単位結合材量および単位粗骨材量が同じとなるようにし、細骨材の量のみを変化させ、コンクリートの性状(スランプ 10±2.5cm, 空気量 4.5±1.5cm)は化学混和剤により調整を行った。決定した配合を表-3に示す。

2.2 大型供試体

大型供試体は図-1に示すように、コンクリートの部分が1m×1m×1mで、4面を30cmの断熱材で覆われ、側面のうち2面は合板型枠で所定の材齢で脱枠が可能な構造とした。大型供試体は表-3に示す配合毎により、夏期(2004年9月26日打設)にそれぞれ1体ずつ4体、冬期(2004年11月24日打設)にNとBBの2体作成し、型枠はすべて材齢7日で脱型してその後は雨掛りを設けて、材齢28日までは直接雨水が当たらないように気中養生した。

また、大型供試体には事前に図-2に示す位置に熱電対温度計を埋め込み、大型供試体の中心部付近や表面付近の温度履歴を測定した。

3. 試験方法

3.1 試験の概要

高炉セメントの高炉スラッグ混入率によるコンクリートの性状の差異を確認するため、大型供

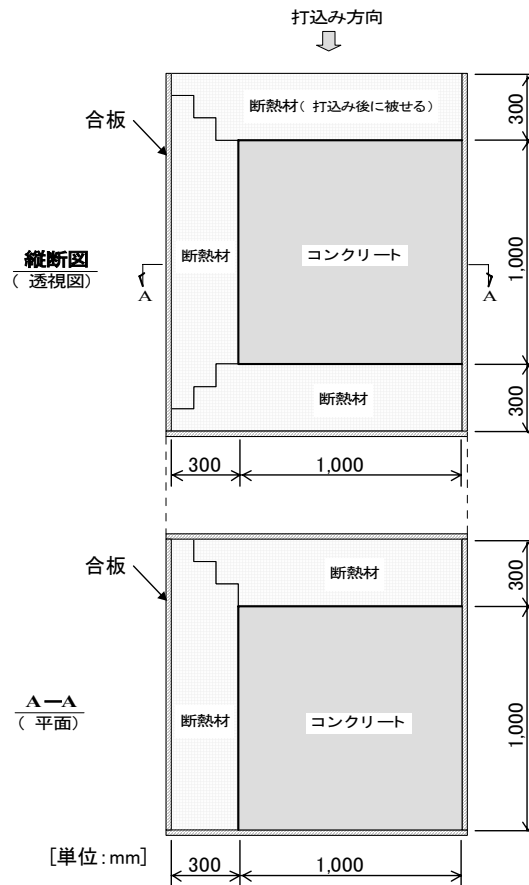
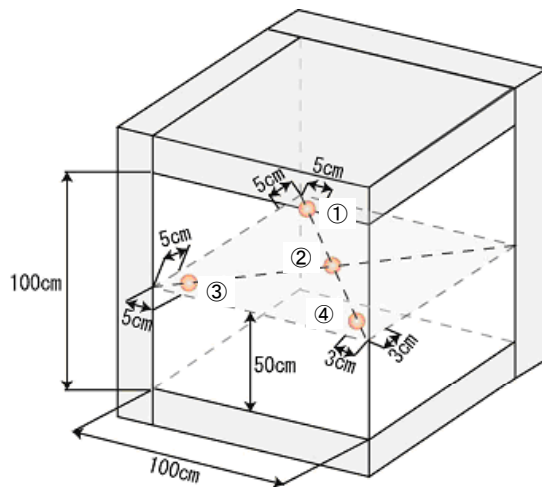


図-1 大型供試体



①: 断熱材面から5cm ②: 供試体中央
③: 型枠面から5cm ④: 型枠面から3cm

図-2 熱電対温度計の設置位置

試体に使用した配合を用いて、圧縮強度、断熱温度上昇量、自己収縮の試験を行った。また、温度履歴を受けたコンクリートの性状として、大型供試体より採取したコアを用いて、圧縮強度、促進中性化試験、細孔径分布測定を行った。

3.2 圧縮強度試験

圧縮強度の測定は JIS A 1108 に準拠し測定した。なお、圧縮強度試験に用いた供試体は大型供試体作成時に、生コンプラントの実機で練り混ぜたコンクリートを使用した。

3.3 断熱温度上昇量試験

断熱温度上昇量試験は、大型供試体に使用した材料により別途試験室で練り混ぜたコンクリートを用いて、(社)日本コンクリート工学協会品質評価方法研究委員会「コンクリートの断熱温度上昇試験方法(案)」に従い行った。

3.4 自己収縮試験

供試体の寸法は 10×10×40cm とし、埋込み

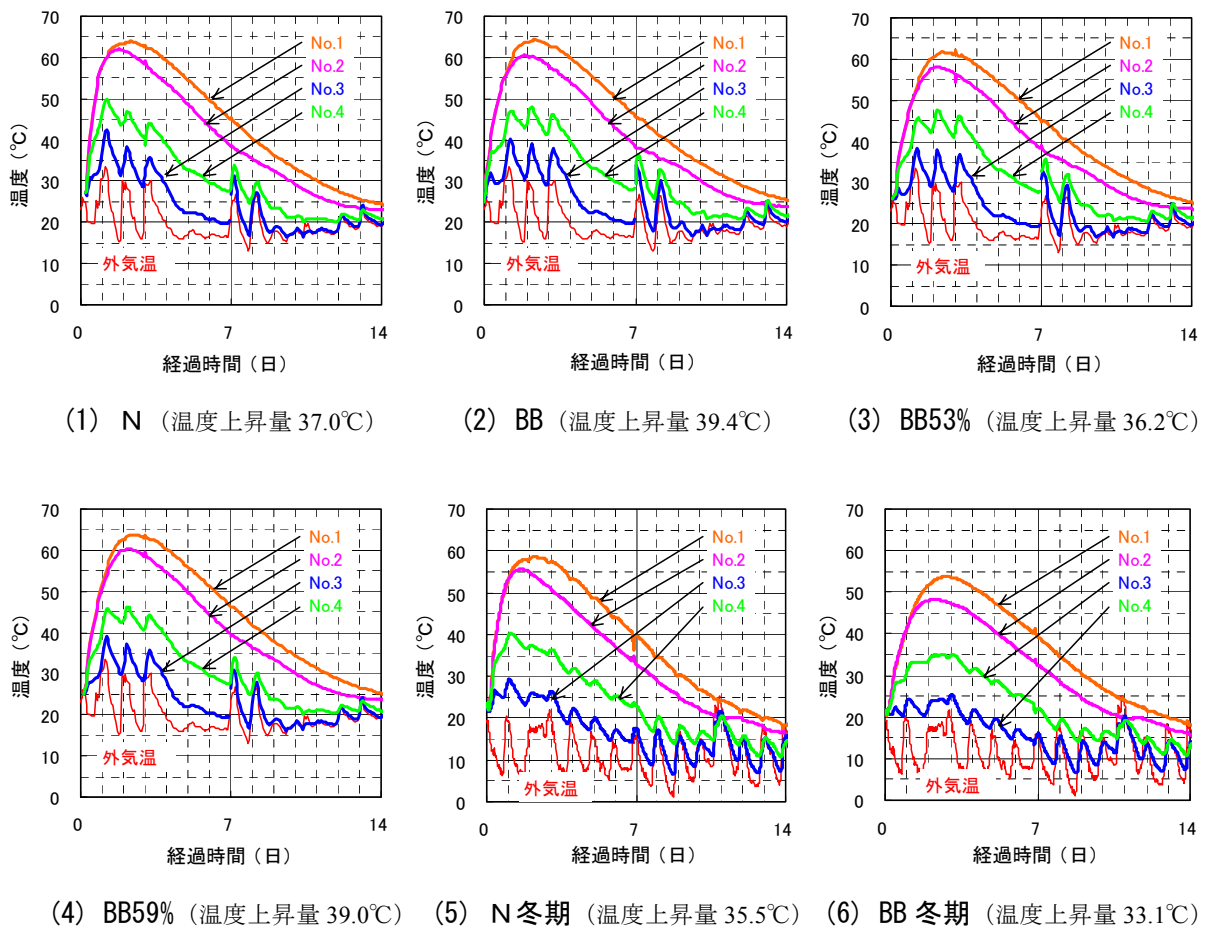
式ひずみゲージによって自己収縮ひずみを測定した。コンクリートは試験室で練り混ぜ、供試体打込み後直ちに水分の蒸発を防ぎ 20℃の恒温室に整置し、凝結始発時を基点として自己収縮ひずみのみを測定した。

3.5 促進中性化試験

採取したコアの型枠に接していた面以外の側面・端面をエポキシ樹脂で被覆し、被覆後1週間後に、中性化促進装置に入れて促進養生を行った。中性化の促進条件は、JIS A 1153 に従い 20℃、RH60%、CO₂ 濃度 5.0%の促進条件とし、測定方法は JIS A 1152 に準拠した。

3.6 細孔径分布測定

採取したコアの 3~4cm の位置をスライスし粗粉碎して 2.5~5mm に留まるモルタル部分を取り出して、水銀圧入式試験機によって細孔径分布の測定を行った。



図一 3 大型供試体の内部温度測定結果

4. 大型供試体試験結果

4.1 コンクリートの温度上昇

大型供試体の打設から材齢 14 日までのコンクリート温度測定の結果を図-3に示す。ここで、図中の No1~No4 は図-2に示す測定の位置を、外気温は大型供試体近傍の直接日光が当たらない箇所の外気温を示す。

夏期(1)~(4)の N, BB その他高炉スラグを混入した配合による中心部の温度上昇に大きな差は見られず、表面付近でも N が若干高い程度であった。一方、N と BB について夏期と冬期を比較すると、構造物中心温度 (No.1 の位置) は、N では夏期と冬期の最高温度上昇量の差は 1.5°C であったのに対し、BB では 6.3°C であった。また、最高温度となる時期も冬期は夏期に比べ半日以上遅くなった。これらの理由の一つとして高炉スラグの発熱反応に温度依存性があるためと考えられ、高炉スラグを含む場合は、打設時の温度や外気温によっては、普通ポルトランドセメントを用いた場合より中心温度が上昇し、温度応力ひび割れが生じやすい温度分布となる可能性があるといえる。

また、中心部と表面付近の温度差を比較すると、冬期の方が若干温度差が大きかった。これは冬期では打込み温度が低いため発熱速度が低い、外気温も低いためコンクリートの発熱速度と外気と接する面からの放熱速度のバランスが夏期と異なるためと考えられる。

4.2 強度発現

材齢 7, 28, 91 日で大型供試体から採取したコアの強度と標準養生の円柱供試体の強度をあわせて図-4に示す。ここでコアの強度は、大型供試体から採取した $\phi 10\text{cm} \times 1\text{m}$ のコアを 20cm ずつ 5 本に切断したものの平均とした。

夏期では、標準養生の供試体は高炉スラグの置換率が大きくなるほど強度が低くなっているが、大型供試体のコアでは高炉スラグの混入率が大きくなるほど強度が高くなっている。また、大型供試体では材齢 28 日から 91 日までの強度の伸びがほとんど見られない。

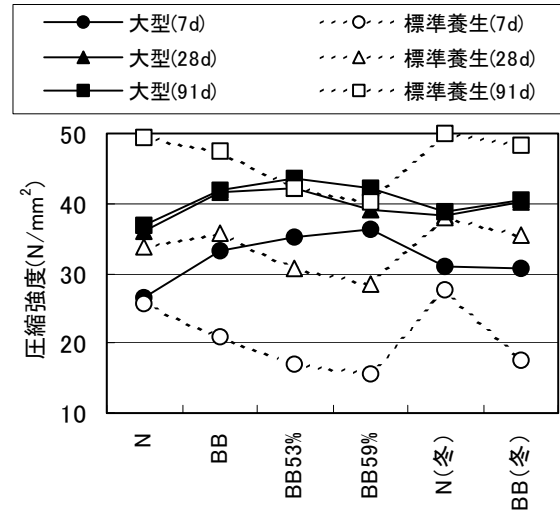


図-4 コアと標準養生の圧縮強度

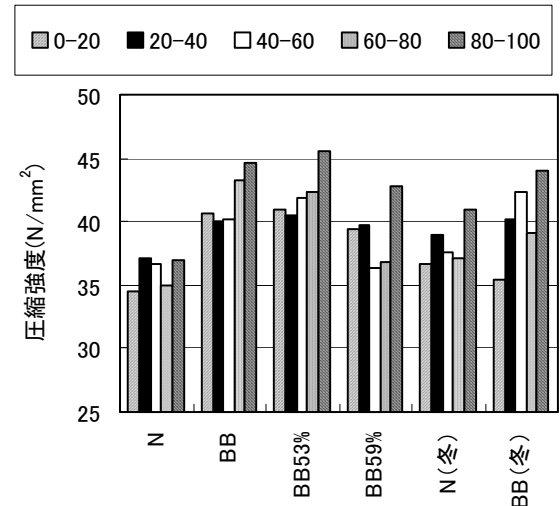


図-5 深さ方向の圧縮強度

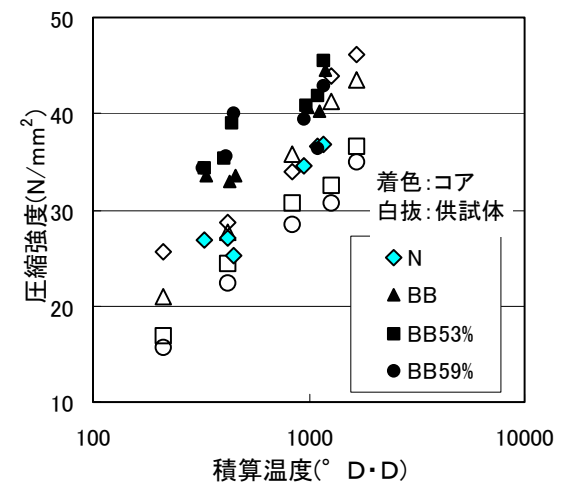


図-6 積算温度と圧縮強度の関係

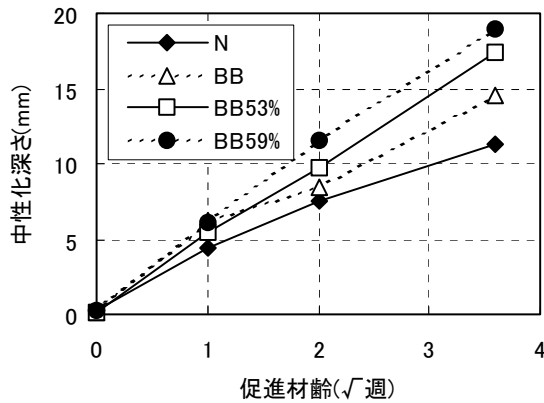


図-7 コアの促進中性化試験結果

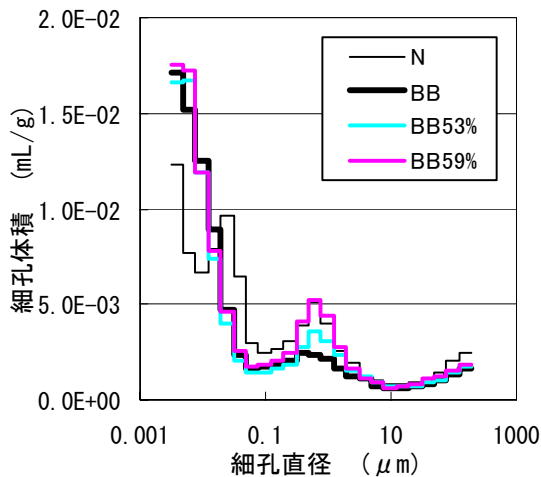


図-8 コアの細孔径分布測定結果

材齢 28 日におけるコアの深さ方向の強度を図-5 に示す。高炉スラグを用いた配合は N に比べ、表面付近のコア強度と内部のコア強度に大きな差があり、特に冬期では表面付近のコア強度が小さく、高炉スラグを用いた配合ではかなり温度履歴が影響することが確認された。

コアの採取位置に温度がほぼ等しいと思われる温度計の計測結果からコアの積算温度を算出したものと圧縮強度の関係を図-6 に示す。N はコアと標準養生の積算温度による強度発現が比較的一致したが、高炉スラグが混入したものは、コアの強度発現が大きかった。しかし、積算温度が大きくなるにつれて、その差は小さくなっており、材齢初期に実構造物と標準養生の強度差が大きいのが確認された。

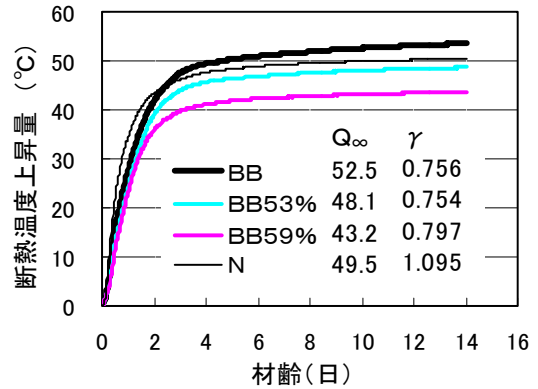


図-9 断熱温度上昇量試験結果

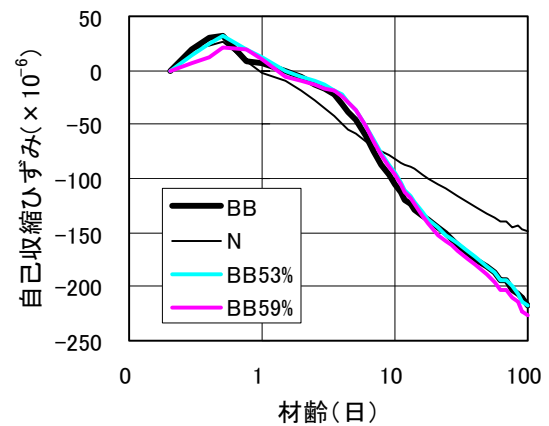


図-10 自己収縮試験結果

4.3 耐久性

材齢 28 日に採取したコアの促進中性化試験結果を図-7 に、細孔径分布測定結果を図-8 に示す。

中性化の進行は、高炉スラグの混入率が大きいほど大きく、BB59%では N の 1.5~2 倍程度の中性化深さとなっている。

細孔径分布測定の結果、BB は N に比べて細孔体積は小さくなっているが、高炉スラグの置換率さらに大きくなるにつれ細孔体積は大きくなっている。しかし混入率 59% (BB59%) であっても、N と同程度であった。

本実験では型枠脱型を材齢 7 日とすべて同じ養生で行ったが、市販の高炉セメント B 種より高炉スラグの混入率を大きくした配合の場合においては、耐久性を同等程度とするためには湿潤養生の期間を長くするなどの対策が必要と思

われる。

5. 物性試験結果

5.1 断熱温度上昇量

断熱温度上昇試験結果を図-9に示す。また、試験結果を式1による近似式³⁾で近似した場合の Q_{∞} と γ の値を、図-9に併せて示す。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (\text{式1})$$

最終温度上昇量 Q_{∞} は、BBがNよりも高かったが、BB53%、BB59%と混入率を増加するに従い低くなった。一方、温度上昇勾配 γ は高炉スラグにより緩やかとなったが、混入率の違いによる差は混入率が40~60%程度の範囲ではあまり影響は見られなかった。高炉セメントをマスコンの温度ひび割れ対策として用いる場合は、中心温度上昇の抑制の面から考えても、高炉スラグの混入率を60%近くにしないと効果が小さいと思われる。

5.2 自己収縮量

自己収縮量試験の結果を図-10に示す。試験材齢10日頃までは、各セメントでの大きな違いは見られないが、材齢が進むにつれてNに比べて高炉スラグを含むセメントの自己収縮ひずみが大きくなった。高炉セメントを用いた温度ひび割れの検討では、自己収縮ひずみもある程度考慮する必要があるといえる。しかし、高炉スラグを混入したものについて、41~59%の混入率ではその影響がほとんどみられなかった。

6. まとめ

本研究は、大型供試体を用いて、実構造物の温度履歴を受けた高炉セメントの性状を確認するとともに、温度ひび割れ対策などを目的に高炉スラグの混入率を増加させた高炉セメントの性状も確認した。結果として以下の知見を得ることができた。

- (1) 打込み温度が20℃程度の断熱温度上昇量試験では、高炉スラグの混入率が50%程度以上の高炉セメントは、普通ポルトランドセメントより最終温度上昇量が小さくなったが、打込み温度が25℃程度の大型供試体の温度上昇量はほとんど差が見られなかった。
- (2) 実構造物の温度履歴を受けた高炉セメント内部の圧縮強度発現は、普通ポルトランドセメントに比べ初期強度の強度増進が著しく増加し、標準養生の温度履歴を受けた供試体と積算温度で比較しても異なる結果であった。
- (3) 高炉スラグの混入率40~60%程度の範囲では、高炉スラグの混入率が大きくなるほど中性化速度は大きくなるが、7日間型枠で養生されたコンクリートの細孔径分布は混入率40%で最も緻密な構造であり、混入率60%でも普通ポルトランドセメントと同程度である。
- (4) 高炉セメントの自己収縮量は普通ポルトランドセメントより50 μ 大きいですが、高炉スラグの混入率が40~60%の範囲ではその差はみられなかった。

謝辞：本実験を行うにあたり、多大なるご協力をいただいた、「コンクリートの耐久性に関する技術検討（委員長：小林一輔 東京大学名誉教授）」の各委員の方々には心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 國府，村田，高橋，安斎：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇量と水和性状に関する研究，土木学会論文集，第396号/V-9，pp. 39-48，1988
- 2) 佐藤，鈴木，原田，堀口，横田：高炉スラグ微粉末がコンクリートの温度応力に及ぼす影響，セメント技術年報，第42号，pp. 100-103，1988
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，pp. 87，2002