

# 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの 収縮特性に関する検討

技術研究所	材工研グループ	鈴木雅博
技術研究所	材工研グループ	中瀬博一
技術本部	開発技術部	青山敏幸
技術本部	開発技術部	大柳修一

**概要:** 本研究では、早強ポルトランドセメントを高炉スラグ微粉末で 40%置換した結合材を用いたコンクリートの収縮特性を把握するため、収縮ひずみと鉄筋比 1.3%の拘束試験と早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの収縮ひずみと比較検討を行った。その結果、蒸気養生した水結合材比 29%の高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの収縮ひずみは、同一の水結合材比の早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートと比較して有効材齢 2 年で  $100 \times 10^{-6}$  大きくなった。また、拘束試験での引張応力は、 $0.8\text{N/mm}^2$  となったが、ひび割れ発生は認められない結果となった。

**Key Words:** 高炉スラグ微粉末、高耐久コンクリート、収縮ひずみ、拘束応力

## 1. はじめに

日本は周囲を海に囲まれているため、特に海岸部のコンクリート構造物の塩害が課題となっており、高耐久コンクリートとすることによる超寿命化技術の開発が要望されている。また、資源の枯渇化から、副産物の有効活用が求められている。銑鉄を製造する際に排出される高炉スラグ微粉末(以下 BS と略す)を用いたコンクリートは、潜在水硬性をとめない、より緻密な組織を生成するために塩分遮断性が高く、耐久性の高いコンクリートとなることが知られている。

しかし、BS の利用は、資源の有効活用と高耐久化との両者に優位性があるが、一方では、普通ポルトランドセメントおよび低発熱ポルトランドセメントを用い、それぞれのセメントを BS で 50%置換した結合材を用いたコンクリートは収縮量が大きくなることが報告<sup>2)</sup>されている。プレストレストコンクリート構造物を対象とした場合は、一般的に早強ポルトランドセメント(以下 H と略す)を使用するが、H と BS とを組合せた場合の基礎データはほとんどないのが現状である。H に BS を混入したコンクリートは、自己収縮ひずみによるひび割れに対するリスクが高くなる可能性があり、塩害劣化に対する耐久性の高いプレストレストコンクリート構造物を構築するためには、収縮ひずみによる影響の検討が必要である。

そこで、本研究では、H および H を比表面積  $6220\text{cm}^2/\text{g}$  の BS で 40%を置換した結合材を用いて、それぞれの結合材によるコンクリートの収縮ひずみ試験と鉄筋比 1.3%の拘束試験を実施した。そして、約 2 年間の収縮ひずみと拘束応力の測定結果とあわせて急速塩分試験についても報告し、両者の比較検討を行うことによって、自己収縮ひずみによるひび割れ発生を検討するための基礎データの収集を目的とした。



鈴木雅博



中瀬博一



青山敏幸



大柳修一

表-1 使用材料

	材料	性質	記号
セメント	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 4470cm <sup>2</sup> /g	H
	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 3250cm <sup>2</sup> /g	N
混和材	高炉スラグ微粉末	密度 2.88g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 6220cm <sup>2</sup> /g	BS
細骨材	砕砂 (岩間産)	表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.82%, F.M.3.10, 実積率 65.5%	S
粗骨材	砕石 (岩間産)	表乾密度 2.73g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.57%, F.M.6.54, 実積率 59.5%	G
混和剤	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	AE 助剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤	AE

表-2 配合

配合名	目標 スランプ フロー(cm)	空気量 (%)	W/B*	s/a (%)	セメント 種類	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					SP*** (%)	AE**** (%)
						W	C**	BS	S	G		
H-29	63±5.0	2	29	51.9	H	170	586	—	870	819	1.25	0.0015
H-32	63±5.0	2	32	52.7	H	173	541	—	901	819	1.05	0.0030
HB-29	63±5.0	2	29	51.3	H	170	352	234	852	819	0.80	0.0015
HB-32	63±5.0	2	32	52.3	H	173	324	216	884	819	1.20	0.0030
NB-32	63±5.0	2	32	52.3	N	173	324	216	886	819	1.10	0.0030

\* : B(結合材)=C+BS, \*\* : 各種セメント(セメント種類 H-早強ポルトランドセメント, セメント種類 N-普通ポルトランドセメント),

\*\*\* : SP/(C+BS)×100, \*\*\*\* : AE/(C+BS)×100 を示す.

配合名はセメント種類と混和材の組合せ-W/B(%)を示す.

## 2. 実験概要

試験は、チャンバーで温度と湿度を制御した環境での収縮試験(シリーズ1)と工場の蒸気養生システムで温度制御した環境での収縮試験と収縮拘束応力試験および急速塩分浸透性試験(シリーズ2)の2回に分けて実施した。シリーズ1は配合を決定するための基礎試験とし、シリーズ2は、決定した配合での確認試験とした。

### 2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。セメントは、早強ポルトランドセメント(記号 H)と普通ポルトランドセメント(記号 N)を使用した。混和材には、比表面積 6220cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグ微粉末(記号 BS)を使用した。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤と AE 剤を使用した。

### 2.2 配合

配合を表-2に示す。BSを用いたコンクリートの水結合材比は、鋼材のかぶり 75mm を想定し、塩害劣化に耐久年数 100 年間に満足するように水結合材比が 32%<sup>3)</sup>以下とした。結合材は、H、H+BS および N+BS の3種類を実施した。BSを用いたコンクリートは一般的に圧縮強度発現が遅くなるので、本試験では、プレレストコンクリート構造のプレテンション部材を対象とし、初期強度を確保するため、BSを用いたコンクリートでは、セメントを BS で 40%置換した。所定のスランプフローと空気量となるように混和剤を調整した。鉄筋透過性を考慮するため、土木学会高流動指針<sup>4)</sup>を参考に全ての配合で、単位粗骨材量を単位粗骨材の容積 300kg/m<sup>3</sup>にあたる 819kg とした。また、ワーカビリティを改善するため、単位水量を調整した。

### 2.3 練混ぜ方法

練混ぜは 2 軸ミキサを用いて実施する。練混ぜ方法を図-1に示す。練混ぜはモルタル先練りにより行う。

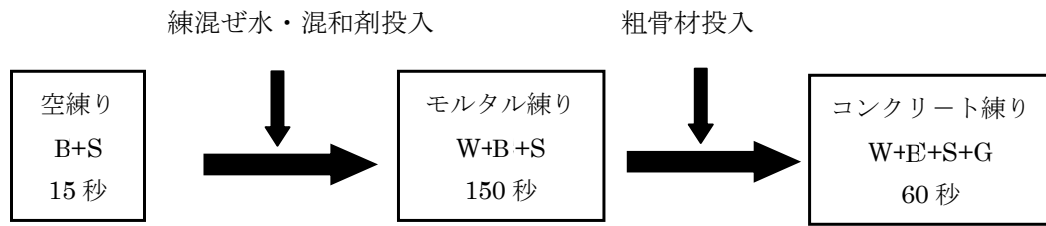


図-1 練混ぜ方法

2.4 養生方法

材齢 15 時間までの初期養生は、シリーズ 1 では模擬蒸気養生と 20℃室内の封緘養生とし、シリーズ 2 では蒸気養生とした。ここで、模擬蒸気養生とは、プログラム制御により、湿度 95%、所定の槽内温度とすることが可能なチャンバを用いた養生方法である。図-2 に、温度設定パターンを示す。蒸気養生供試体の養生設定は、シリーズ 1 では 3 時間の前養生後に 2 時間で 50℃まで上昇し、6 時間 50℃を保持し、その後 2 時間で 20℃とした。シリーズ 2 では 3 時間の前養生後に 2 時間で 40℃まで上昇し、4 時間 40℃を保持し、6 時間で 20℃とした。脱枠は材齢 15 時間とした。脱枠後の養生は、自己収縮ひずみと自己応力測定供試体では全面を厚さ 0.05mm のアルミ箔テープで覆い封緘養生とし、鉄筋拘束収縮ひずみ供試体では全面乾燥の気乾養生とし、温度 20℃、湿度 60%の室内に静置した。

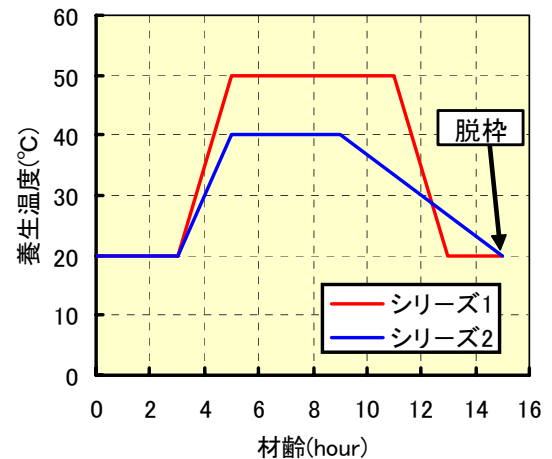


図-2 養生温度の設定

20℃室内の封緘養生は、温度 20℃、湿度 60%の室内に 24 時間静置後に脱枠し、アルミ箔テープで覆い封緘養生した。

2.5 試験方法

2.5.1 試験体諸元

供試体諸元を表-3 に示す。試験は各条件で 3 本として実施した。水結合材比 29%の試験は、初期養生方法の収縮特性の差を比較するために、材齢 15 時間までの養生を蒸気養生と 20℃室内の養生の 2 種類の養生方法を実施した。

2.5.2 フレッシュ試験

フレッシュコンクリートの性状を把握するためスランプフロー、空気量、練り上がり温度を測定する。スランプフローおよび空気量についてはそれぞれ JIS A 1150, JIS A 1128 に準拠して行い、練り上がり温度は棒状温度計で測定した。

表-3 供試体諸元

	シリーズ 1							シリーズ 2
	H-29-S	H-29	H-32-S	HB-29-S	HB-29	HB-32-S	NB-32-S	HB-32-S
自己収縮ひずみ	蒸封	封緘	蒸封	蒸封	封緘	蒸封	蒸封	蒸封
自己応力試験	—	封緘	—	—	封緘	蒸封	—	蒸封
鉄筋拘束収縮試験	—	—	—	—	—	—	—	蒸乾
急速塩分浸透性試験	—	—	—	—	—	—	—	蒸気・標準

注) 蒸封は蒸気養生後に封緘養生を、封緘は蒸気養生せずに材齢 1 日後に封緘養生を、蒸乾は蒸気養生後に気乾養生を実施したことをそれぞれ示す

### 2.5.3 凝結試験

JIS A 1147 に準拠して実施した。試験材料は採取したコンクリートを、棒状バイブレータを用いて 5mm ふるいを通過したモルタルとした。

### 2.5.4 圧縮強度試験および割裂引張強度試験

圧縮強度試験は  $\phi 100 \times 200\text{mm}$  の供試体を用いて、JIS A 1108 に準じて試験を行った。圧縮ヤング係数を算出するため、圧縮強度試験体にワイヤストレンゲージ(60mm)を貼付し、JIS A 1149 に準じて試験を行った。割裂引張強度試験は  $\phi 150 \times 200\text{mm}$  の供試体を用いて、JIS A 1113 に準じて試験を行った。

### 2.5.5 自己収縮ひずみ

自己収縮ひずみ供試体の寸法は、シリーズ1では  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$  とし、シリーズ2では  $150 \times 150 \times 530\text{mm}$  とした。自己収縮ひずみの測定は、JCI の「セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの自己収縮および自己膨張試験方法」<sup>5)</sup> に準拠し、供試体中央部に埋設した低弾性型(弾性係数：約  $40\text{N/mm}^2$ )の埋込みひずみ計によって測定した。打設後、ポリエステルフィルムで供試体上面を覆い、コンクリート表面の乾燥を防止した。図-3 に試験状況を示す。脱枠後は収縮の拘束を防止するため、丸棒の上に供試体を置き、計測した。測定時間の間隔は、材齢7日まで12分とし、それ以降は12時間とした。

自己収縮ひずみの始発点を JCI の自己収縮研究委員会の報告では凝結の始発点と定義されている。本研究では、構造用解析のデータ収集を目的としているため、応力発現開始時点自己収縮ひずみの時間軸原点とした。応力発現開始時点は、ヤング係数や収縮応力の起点が凝結の終結時間と見なせるとする報告<sup>6)</sup>から、凝結終結時間を時間軸原点とした。また、コンクリート温度変化に伴う体積変化は、線膨張係数  $10 \times 10^{-6}/\text{C}$  と仮定し、温度変化による変形を差し引くことにより自己収縮ひずみを算出した。

### 2.5.6 自己応力試験

図-4 に自己応力試験状況を示す。供試体の寸法は、シリーズ1では、 $100 \times 100 \times 1500\text{mm}$  とし、シリーズ2では  $150 \times 150 \times 1500\text{mm}$  とした。埋設する鉄筋の中央の 300mm の区間は、リブとふしを取り除いた円形断面とした。自己収縮応力の測定は、JCI の「コンクリートの自己応力試験方法」<sup>5)</sup> に準拠し、鉄筋に貼付したストレンゲージを用いて測定した。拘束用の鉄筋は、シリーズ1では、D13(鉄筋比 1.3%)を用い、シリーズ2では、D16(鉄筋比 1.3%)を用いた。打設後、ポリエステルフィルムで供試体上面を覆い、コンクリート表面の乾燥を防止した。測定時間の間隔は、材齢7日まで12分とし、それ以降は12時間とした。

### 2.5.7 鉄筋拘束による収縮ひずみ試験

鉄筋拘束による収縮ひずみ試験の供試体寸法は  $150 \times 150 \times 1500\text{mm}$  とし、拘束する鉄筋は D16(鉄筋比 1.3%)とした。コンクリートの乾燥面は供試体全面とし、コンクリートのひずみを測定した。

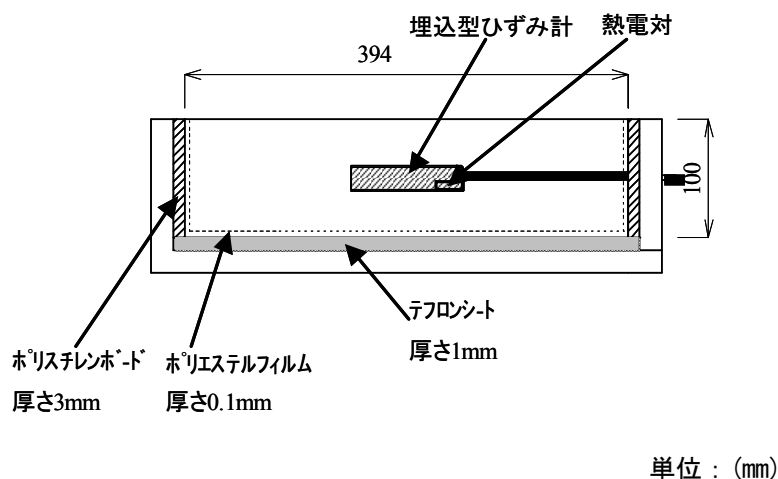


図-3 自己収縮ひずみ

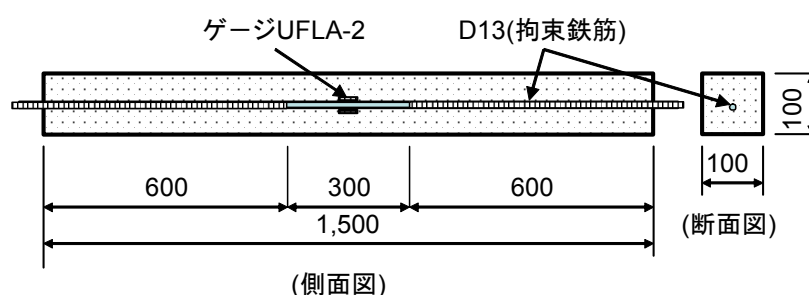


図-4 自己応力

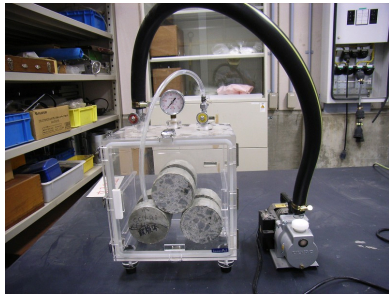


写真-1 真空処理状況

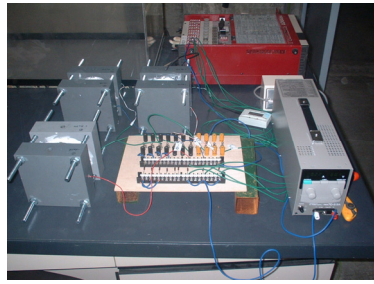


写真-2 通電状況

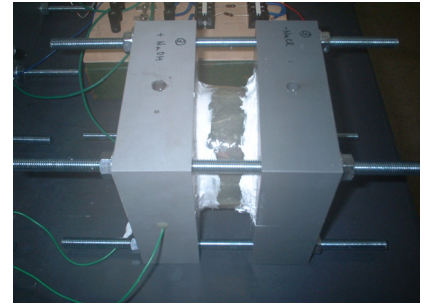


写真-3 拡散セル装置

### 2.5.8 急速塩分浸透性試験

蒸気養生の有無による塩分遮断性を把握するため、急速塩分浸透性試験を実施した。試験状況を写真-1から写真-3に示す。厚さ 5cm の円盤状に切断し、ASTM C 1202 に準拠して真空飽水処理を行った。陰極側に 0.3mol/l (1.20 mass %) の NaOH 溶液とし、陽極側に 0.5mol/l (2.92 mass %) の NaCl 溶液とした。電気回路を作製後に一定電圧 60V で 6 時間通電し、30 分ピッチで電流量を測定した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 シリーズ 1

#### 3.1.1 温度履歴

図-5に、配合 HB-32 の模擬蒸気養生した 3 体の自己収縮ひずみ供試体の温度とチャンバー内温度の経時変化を一例として示す。コンクリート温度最大値は、設定したチャンバー内の温度設定より約 8℃高くなる結果となった。この傾向は、他の供試体でも同様の結果となった。チャンバー内温度は、ほぼ設定した温度となり、チャンバーで蒸気養生を模擬できると考える。

#### 3.1.2 フレッシュコンクリート性状

表-4にフレッシュコンクリート試験結果を示す。全ての配合でスランプフローと空気量の規格値を満足する結果となった。

#### 3.1.3 凝結試験結果

凝結試験結果を表-5に示す。

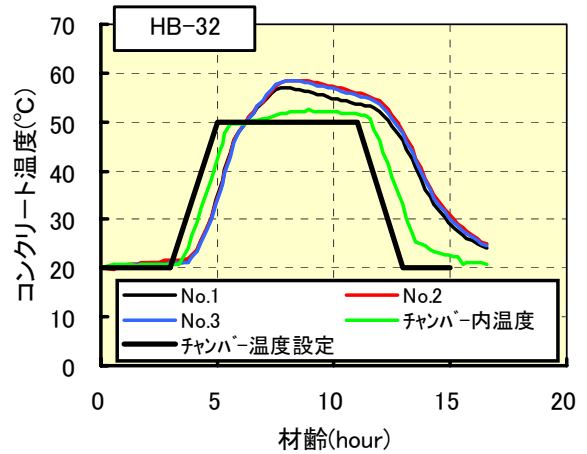


図-5 コンクリート温度履歴

表-4 フレッシュコンクリート試験結果(シリーズ 1)

配合名	スランプ フロー(mm)	T <sub>50</sub> (S)	T <sub>end</sub> (S)	空気量 (%)	C.T.* (°C)	A.T.** (°C)
HB-29	640×625	15.8	76.4	1.7	20.2	19.0
HB-32	640×625	12.3	63.3	2.1	20.7	20.2
NB-32	595×575	16.3	58.0	2.1	20.4	19.6
H-29	630×615	19.2	75.2	1.8	21.6	20.3
H-32	600×590	18.5	55.0	2.2	21.5	21.5

規格値 - スランプフロー：630±50mm，空気量：2±1%

\*C.T.：コンクリート練り上がり温度，A.T.：室温

表-5 凝結試験結果(シリーズ 1)

配合名	始発時間 (時間：分)	終結時間 (時間：分)
HB-29	6：27	9：58
HB-32	6：08	9：03
NB-32	6：06	9：35
H-29	5：30	9：01
H-32	5：45	8.20

### 3.1.4 圧縮強度, ヤング係数および割裂引張強度

図-6に圧縮強度発現を示す. 材齢0.63日の圧縮強度は, 全ての配合においてプレテンション桁の試験練り時に設定する導入時強度(配合導入時強度) 40N/mm<sup>2</sup>以上(設計導入時強度 35N/mm<sup>2</sup>)であるので, 導入時強度を満足する. また, 設計基準強度は, 50 N/mm<sup>2</sup>であるので, すべての配合はプレテンション桁にも適用することができる配合である.

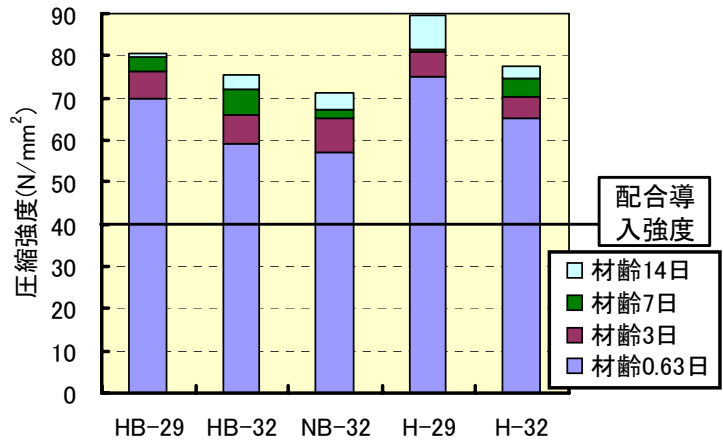


図-6 圧縮強度発現(シリーズ1)

表-6にヤング係数と割裂引張強度の結果を示す.

### 3.1.5 自己収縮ひずみ

蒸気養生を実施した供試体の自己収縮ひずみ発現の用いる材齢は式(1)のアーレニウス式の有効材齢とした.

$$t = \sum \Delta t_i \cdot \exp \left\{ 13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i) / t_0} \right\} \dots \dots (1)$$

ここに,

$t$  : 有効材齢(日)

$\Delta t_i$  : 温度が T°Cである期間の日数

$t_0$  : =1°C

蒸気養生した同一配合の自己収縮ひずみ供試体3体のコンクリート温度は, ほとんど同一とみなせることから, 3供試体の平均値を用いて有効材齢を算出した. 凝結終結時間も同様に有効材齢で表-5に示す凝結終結時間となる時点とした.

模擬蒸気養生した BS の混入と無混入とした供試体の自己収縮ひずみの差を比較するため, HB-29-S と H29-S を図-7に,

HB-32-S と H32-S を図-8に経時変化を示す. 水結合材 29%, 32%いずれの場合も, 高炉スラグ微粉末を混入した供試体の自己収縮ひずみは, 早強ポルトランドセメント単身の供試体と比較して, 計測終了時点で約  $100 \times 10^{-6}$  大きくなる結果を示した. また, 早強ポルトランドセメント単身の水結合材比 29%と 32%の計測終了時点の自己収縮ひずみは, それぞれ  $470 \times 10^{-6}$ ,  $415 \times 10^{-6}$  であり, 水結合材を 3%小さくすることにより,  $55 \times 10^{-6}$  大きくなる結果となった. 同様に BS を混入した供試体は, 水結合材を 3%小さくすることにより,  $40 \times 10^{-6}$  大きくなる結果となった.

次に封緘養生した場合の BS の混入と無混入による自己収縮ひずみ量を比較するため, 図-9に HB-29 と H29 の自己収縮ひずみの経時変化を示す. 封緘養生した供試体における自己収縮ひずみの発現は蒸気養生した供試体とは異なり, 有効材齢 10 日以前では高炉スラグ部粉末を混入した供試体の方が早強ポルトランドセ

表-6 ヤング係数と割裂引張強度(シリーズ1)

配合名	養生方法	材齢 (day)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
HB-29	製品同一	0.63(15h)	24.4	3.95
		3	-	4.10
		7	27.8	5.14
		14	29.4	-
HB-32	製品同一	0.63(15h)	24.0	-
		3	-	-
		7	28.0	-
		14	29.1	-
NB-32	製品同一	0.63(15h)	23.8	-
		3	-	-
		7	27.0	-
		14	28.2	-
H-29	製品同一	0.63(15h)	28.1	4.40
		3	-	5.07
		7	33.6	5.36
		14	30.6	-
H-32	製品同一	0.63(15h)	26.0	-
		3	-	-
		7	31.3	-
		14	30.3	-

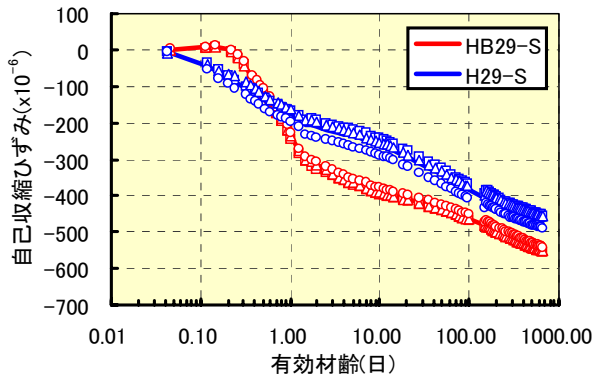


図-7 自己収縮ひずみ(W/B=29%)(蒸気養生)

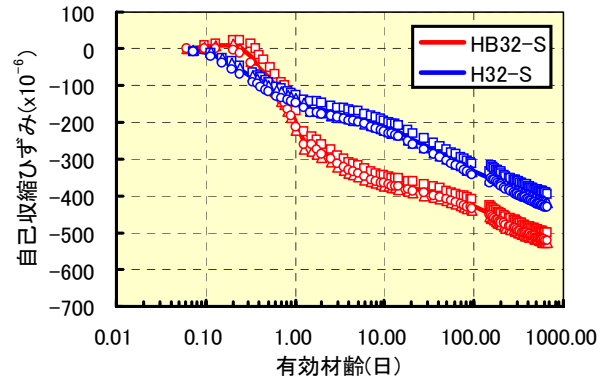


図-8 自己収縮ひずみ(W/B=32%)(蒸気養生)

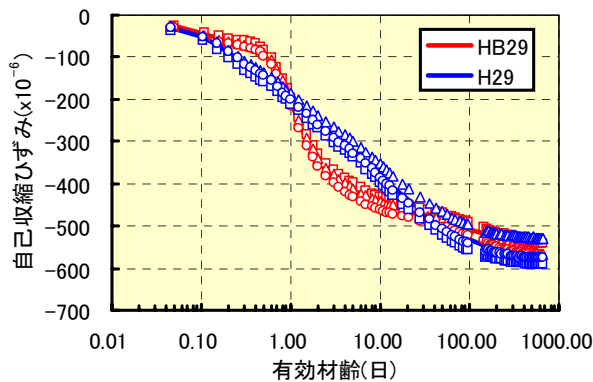


図-9 自己収縮ひずみ(W/B=29%)(封緘養生)

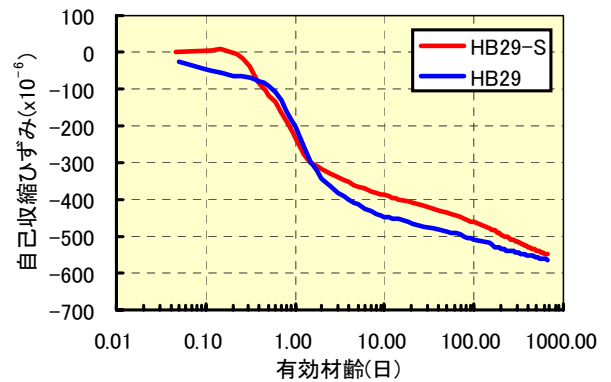


図-10 養生方法の差異による自己収縮ひずみ発現の比較(H+BS)

メント単身と比較して、大きな自己収縮ひずみの発現となったが、計測終了時点では、ほぼ等しい結果となった。以上を図-7~9をBSの混入と無混入の観点から自己収縮量を統括すると、計測終了時点の自己収縮ひずみ量は、蒸気養生した場合にはBSを混入した場合の方が大きくなり、封緘養生した場合にはBSの混入の有無にかかわらずほぼ等しいなる結果となり、養生方法によりBSの混入と無混入とで自己収縮ひずみ量に差が生じることが明らかになった。

同一配合における蒸気養生と封緘養生の差違を比較する。自己収縮ひずみを水結合材比29%の場合の平均値を図-10に、水結合比29%の場合の平均値を図-11にそれぞれ示す。高炉スラグ微粉末を混入した供試体では、蒸気養生供試体と封緘養生供試体の計測終了時点のひずみ量はほぼ同じになったが、一方で、早強ポルトランドセメント単身では蒸気養生供試体の方が封緘養生供試体と比較して小さな自己収縮ひずみ量となった。

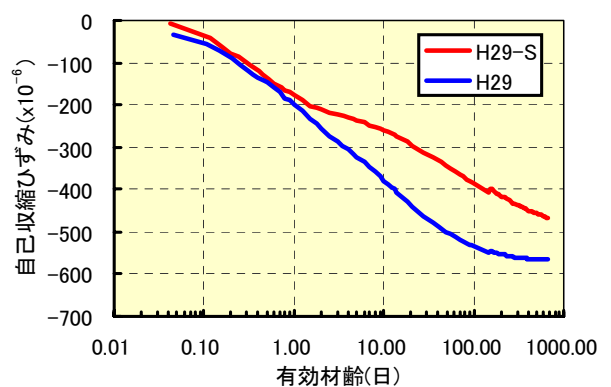


図-11 養生方法の差異による自己収縮ひずみ発現の比較(H)

この結果は、ポルトランド系セメントを用いた供試体の高温履歴を受けた場合の自己収縮ひずみは、20℃封緘養生した自己収縮ひずみと比較して小さくなり、高炉セメントB種(比表面積3700cm<sup>2</sup>/g)を用いた場

表-7 自己収縮ひずみ結果総括表

比較対象	条件	自己収縮ひずみの大きさ
結合材	蒸気養生	$H < H+BS$
	封緘養生	$H = H+BS$
養生方法	H+BS	蒸気養生 = 封緘養生
	H	蒸気養生 < 封緘養生
ベースセメント	蒸気養生	$H+BS < N+BS$

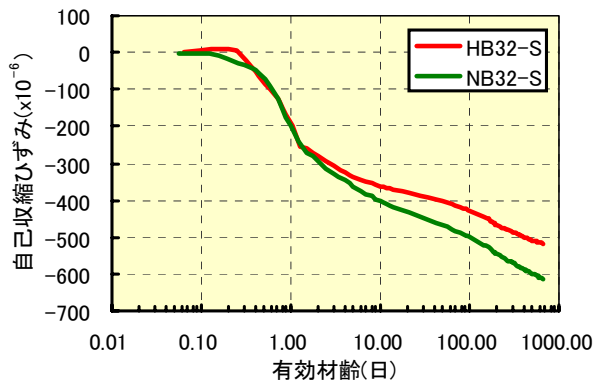


図-12 ベースセメント種別による自己収縮ひずみ発現の比較(蒸気養生)

合には逆に高温履歴を受けた場合の方が大きくなるとする報告<sup>6,7)</sup>があり、ポルトランドセメント単身とBSを混入した結合材では、自己収縮ひずみの蒸気養生による温度履歴による影響(温度依存性)が異なる点で合致した。自己収縮ひずみ量は、コンクリート内の微細空隙内にある未反応水の表面張力による影響があり、表面張力が大きくなるほど大きくなる<sup>8)</sup>。BSを混入した供試体の自己収縮ひずみ量が既報と異なりほぼ等しくなった点については、高炉セメントB種で使用されている高炉スラグの比表面積は一般的に4000cm<sup>2</sup>/gであり、今回使用した高炉スラグの比表面積は6220cm<sup>2</sup>/gであるため、微細空隙径が小さくなり発生する自己収縮量が異なる点やより密実な組織となった場合の蒸気養生による温度履歴の影響が異なるなどが考えられるが、いずれも明確になっていない。今後さらに高炉スラグ微粉末の置換率や比表面積による蒸気養生による温度履歴による影響についてさらにデータを蓄積が必要であると考え。

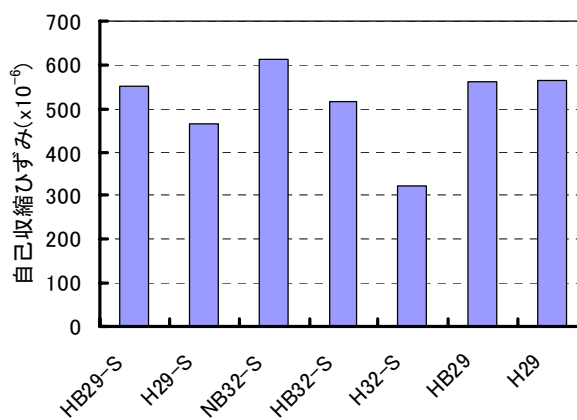


図-13 各供試体の自己収縮ひずみ量(有効材齢650日)

図-12に蒸気養生した供試体のBSを混入するセメント(以下、ベースセメントと略す)種別による自己収縮ひずみ量の発現の差異を示す。計測終了時点の自己収縮ひずみ量は配合NB32が最も大きく、配合H32が最も小さくなった。セメントに含有するビーライト量が多いほど高温履歴による自己収縮ひずみの20℃封緘養生に対する差は大きくなる<sup>6)</sup>。早強ポルトランドセメントのビーライト量は普通ポルトランドセメントと比較して少ないことから、蒸気養生供試体の自己収縮ひずみ量は「H+BS」より「N+BS」の方が大きくなったと考えられる。

これまで述べてきたこと試験結果一覧表を表-7に、図-13に全供試体の終結時間を原点とした有効材齢600日の自己収縮ひずみの変化量を示す。



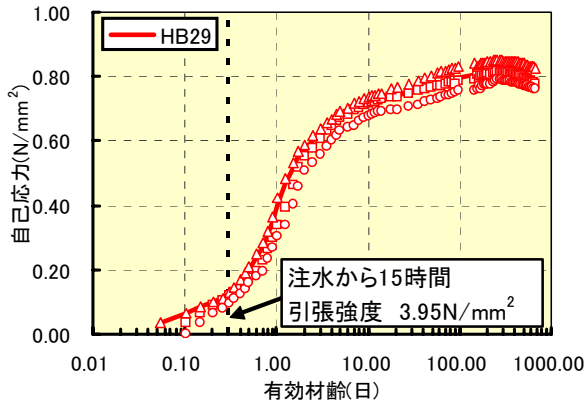


図-14 自己応力の経時変化(HB29)

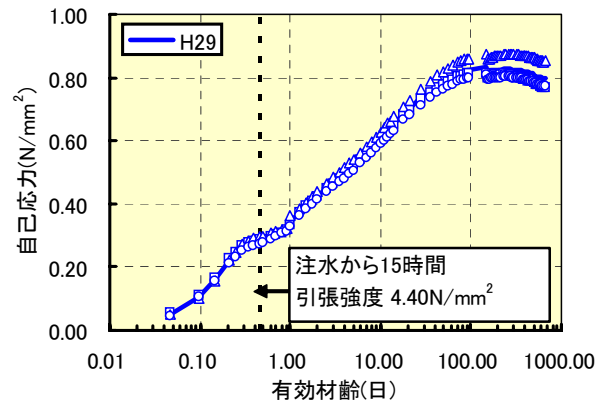


図-15 自己応力の経時変化(H29)

### 3.1.6 自己応力

図-14と図-15にそれぞれの HB-29 と H29 の自己応力の経時変化と材齢 15 時間の割裂引張強度を示す。自己収縮ひずみを鉄筋により拘束することにより、HB-29、H-29 両供試体で約  $0.8\text{N/mm}^2$  の引張応力が発生する結果となった。HB-29 と H-29 の自己収縮ひずみがほぼ一致しており、自己応力と自己収縮ひずみの傾向がほぼ合致する結果になった。

両配合の供試体ともひび割れは発生しなかった。このことは、材齢 15 時間でコンクリートの引張応力が約  $4\text{N/mm}^2$  であることから判断できる。ただし、自己収縮ひずみによりすでに割裂引張強度の約 20% の引張応力が発生していることから、部材の使用限界状態におけるひび割れ発生断面力を算定するには自己応力の影響を考慮する必要があると考える。

## 3.2 シリーズ2

シリーズ2では、シリーズ1の結果、BSを置換した結合材による蒸気養生したコンクリートは、導入時強度や設計基準強度  $50\text{N/mm}^2$  とした場合の圧縮強度が十分に確保できる点および水結合材比の大きくすることにより自己収縮ひずみが小さくなるなどを踏まえて配合 HB32 とし、自己収縮ひずみ試験、自己応力試験、鉄筋拘束による収縮ひずみ試験および急速塩分浸透性試験を実施した。なお、養生は、工場で使用している蒸気養生システムを用いた実施した。

### 3.2.1 温度履歴

蒸気養生の設定は、シリーズ1において、導入時強度を十分に確保できている点および製品脱枠時の温度応力に伴うひび割れを防止する観点から、図-16に示すように最高温度を  $40^\circ\text{C}$  として実施した。

### 3.2.2 フレッシュコンクリート性状

フレッシュコンクリートは、スランブフロー  $345\text{mm} \times 325\text{mm}$ 、空気量 1.7% および練り上がり温度  $26^\circ\text{C}$  であった。

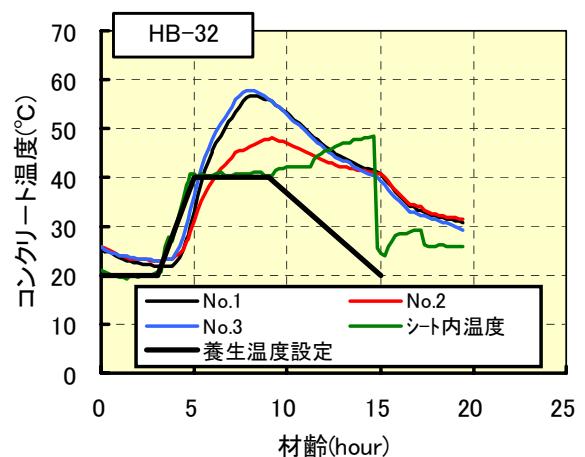


図-16 コンクリート温度履歴

3.2.3 圧縮強度, ヤング係数および割裂引張強度

表-8に圧縮強度, ヤング係数および割裂引張強度の結果を示す.

表-8 強度試験結果(シリーズ2)

材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
0.63	34.9	23.8	3.30
3.00	51.1	28.6	4.19
7.00	58.3	—	4.74
14.00	63.2	31.7	4.57

3.2.4 自己収縮ひずみ

図-17にシリーズ1とシリーズ2の蒸気養生した供試体 HB-32-S の自己収縮ひずみの経時変化を示す. 本試験結果は, シリーズ2の自己収縮ひずみ発現量は, シリーズ1と比較して約 50×10<sup>-6</sup>小さくなる結果となった. これは, 蒸気養生の設定を 40°Cとしたことによる影響と考えられる.

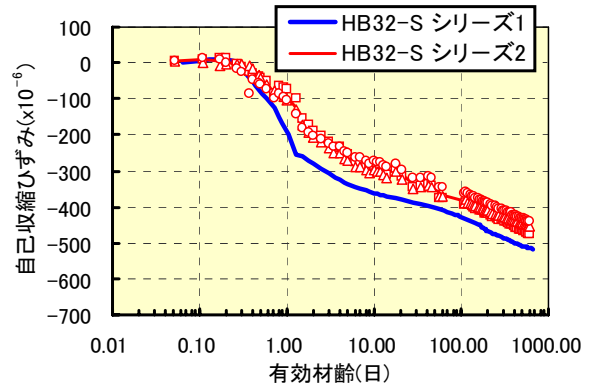


図-17 自己収縮ひずみ経時変化

3.2.5 自己応力

図-18に自己応力の経時変化を示す. 配合 HB-32 の自己応力は, 計測終了時点で約 0.6N/mm<sup>2</sup>発生した. 表-6および表-7から計測終了時点では, シリーズ1の HB29-S とシリーズ2の HB-32 のヤング係数はほぼ等しいと考えられることから, クリープの影響を無視すれば, 自己収縮ひずみに対する発生応力は一次関数で表現できると考えられる.

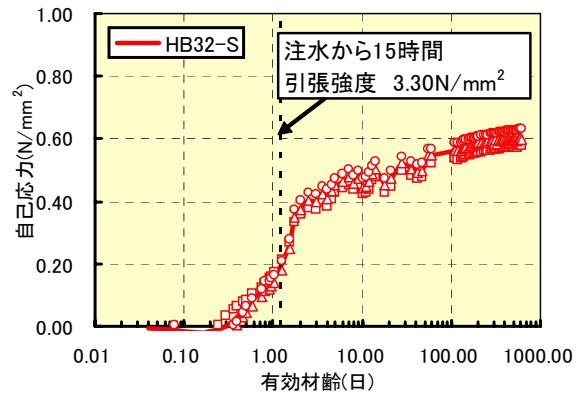


図-18 自己応力経時変化

図-19に計測終了時点の自己収縮ひずみと自己応力の関係を示す. HB29-S の自己収縮ひずみ 550×10<sup>-6</sup>に対して自己応力 0.8N/mm<sup>2</sup>であり, シリーズ2の HB32-S では 450×10<sup>-6</sup>に対して自己応力 0.6N/mm<sup>2</sup>となった. このことから, 鉄筋比 1.3%の場合には, 自己収縮ひずみが 100×10<sup>-6</sup>大きくなると概ね自己応力が 0.2 N/mm<sup>2</sup>大きくなる結果となった. 本試験の範囲では, 自己収縮ひずみを約 150×10<sup>-6</sup>まで膨張材や収縮低減剤などで抑制すれば引張応力を 0とできると考えられる. 使用限界状態の検討においてひび割れを部材に許容できない場合に, 自己収縮ひずみが主たるひび割れ要因であると判断された場合には, 自己収縮ひずみをなんらかの手段で抑制することが望まれる. このことから, 自己収縮ひずみの抑制する方法を検討する必要があると考える.

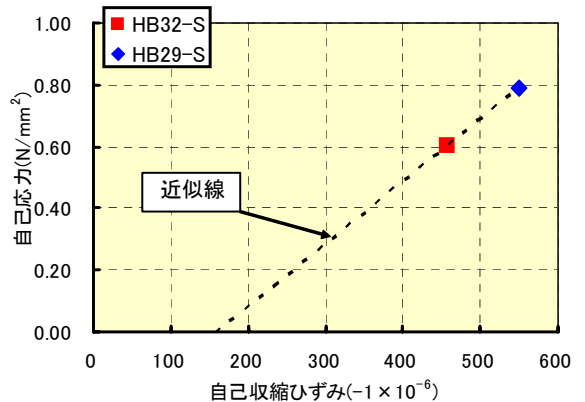


図-19 自己収縮ひずみと自己応力の関係

### 3.2.6 鉄筋拘束による収縮ひずみ

図-20に全面乾燥した鉄筋比1.3%で拘束した供試体の収縮ひずみと自己収縮ひずみの経時変化を示す。ここで、赤線の全面乾燥のひずみは自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみと弾性ひずみおよびクリープひずみの和である。本配合では、自己収縮ひずみが全ひずみの約80%を占めており、無視できないことが分かる。

写真-1に試験状況を示す。本試験の範囲内ではひび割れの発生は認められなかった。

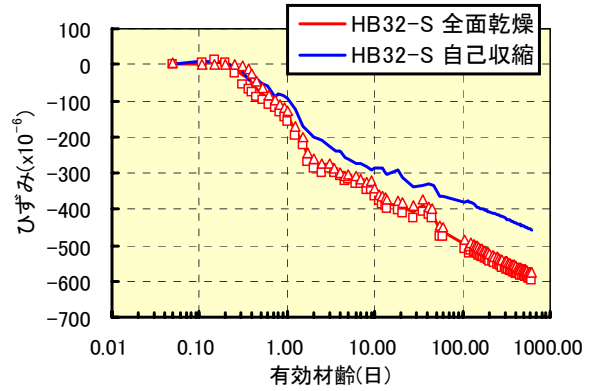


図-20 収縮ひずみの経時変化

### 3.2.7 急速塩分浸透性試験

浸透性を評価する。結果は、式(2)を用いて算出した。

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + I_{330} + I_{360}) \dots \dots (2)$$

ここに、 $Q$  : 通過電荷量 (クーロン)

$I_0$  : 印加直後の電流量 (A)

$I_t$  : 印加 t 分後の電流量 (A)



写真-1 鉄筋拘束試験状況

表-9に試験結果と ASTM C 1202 の判定基準を示す。配合 HB32 における塩分浸透性評価は、蒸気養生供試体では「非常に低」となり、標準養生供試体では「低」となり、塩分遮断性に優れていると考えられる。

## 4. まとめ

結合材を早強ポルトランドセメントおよび早強ポルトランドセメントを BS で 40%を置換した結合材を用いたコンクリートの収縮ひずみ試験と鉄筋比1.3%の拘束試験を実施し、両者の比較検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 高炉スラグ微粉末を混入した水結合材比 32%と 29%のコンクリートは、導入時強度および設計基準強度を満足した。
- (2) 蒸気養生した供試体の自己収縮ひずみは高炉スラグ微粉末を混入することにより、ポルトランドセメント単身と比較して大きくなった。このことから、高炉スラグ微粉末を混入する場合にはひび割れに対するリスクが高くなるので十分に留意する必要がある。
- (3) 20℃封緘養生した供試体の計測終了時点の自己収縮ひずみは、高炉スラグ微粉末を混入した供試体と混入しない供試体はほとんど差がない。

表-9 塩分浸透性試験結果と評価

HB32-S(蒸気養生)		HB32(標準養生)	
通過電荷量 Q (クーロン)	判定	通過電荷量 Q (クーロン)	判定
No.1-789	非常に低	No.1-1277	低
No.2-825		No.2-1319	
No.3-795		No.3-1765	

通過電荷量 Q (クーロン)	塩化物イオン浸透性
>4,000	高
2,000-4,000	中
1,000-2,000	低
100 -1,000	非常に低
<100	ごくわずか

- (4) 20℃封緘養生供試体の自己収縮ひずみに対する蒸気養生供試体のひずみの差は早強ポルトランドセメントの方が大きくなった。
- (5) 蒸気養生した場合に、高炉スラグ微粉末を混入した供試体の自己収縮ひずみ量は、ベースセメントを早強ポルトランドセメントとした方が普通ポルトランドセメントした場合と比較して小さくなった。
- (6) 自己応力は発生する自己収縮ひずみの増大で大きくなる。本試験で実施した1.3%の鉄筋比の範囲において、蒸気養生を実施しない配合HB-29の供試体は約0.8N/mm<sup>2</sup>の引張応力発生が認められ、蒸気養生を実施した配合HB-32の供試体は約0.6N/mm<sup>2</sup>の引張応力発生が認められた。
- (7) 高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの収縮ひずみの80%は自己収縮ひずみであるため、内部応力に発生する応力予測には自己収縮ひずみを無視できない。
- (8) 配合HB-32の供試体は、ASTM規格に基づいた塩化物イオン浸透性は蒸気養生供試体で「非常に低」あり、標準供試体では「非常に低」となり、塩分浸透遮断性に優れている。

鉄筋比1.3%の範囲ではひび割れ発生が起きず、また、急速塩分試験結果からも高い耐久性を有しており、実部材への適用も可能である。しかし、高炉スラグ置換率や蒸気養生温度の最大値および練り上がり温度などが自己収縮ひずみに与える影響については明らかになっておらず今後の課題として残った。また、高炉スラグ微粉末を混入したコンクリート部材の収縮ひずみの多くは自己収縮ひずみであることから、ひび割れリスクを低減するために、自己収縮ひずみの抑制対策を検討していく必要があると考える。さらに、鉄筋比が異なる場合の内部応力予測には、自己収縮ひずみが材齢初期に生じることから若材齢時のクリープ性状の把握の必要であると考えられる。

## 謝辞

本試験の実施にあたり、宇部三菱セメント株式会社、株式会社ポゾリス物産および新日鐵高炉セメント株式会社に多くの技術支援や材料提供をして頂きました。また、開発技術部の桐川技師(現 大阪支店)および川畑技師に協力を頂いた。材工研グループの穴沢主任研究員(現 株式会社宇部三菱セメント研究所 主席研究員)には高炉スラグ微粉末を使用する際の留意点を頂きました。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 例えば、前田悦孝・松下博通・近田孝夫・佐川康貴：高炉スラグ部粉末を混入した高強度コンクリートの塩化カルシウム溶液に対する劣化抵抗性，コンクリート工学論文集，Vol.26, No.1, pp.765-770, 2004
- 2) 三浦智弥・田澤榮一・宮澤伸吾・保利彰宏：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響，コンクリート工学論文集，Vol.17, No.1, pp.359-364, 1995
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002
- 4) 土木学会：高流動コンクリート施工指針 コンクリートライブラリー93，1998.7
- 5) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996 および 2002
- 6) 橋田浩・山崎庸行：自己収縮と水和熱膨張による高強度コンクリートの連成ひずみ特性に関する検討，コンクリート工学論文集，Vol.13, No.1, pp.25-32, 2002
- 7) 丁海文・河野広隆・渡辺博志・鈴木雅博：水和熱による高温履歴が高強度コンクリートの自己収縮ひずみに及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, No.2, pp.1117-1122, 1999
- 8) 例えば、平尾宙・内川浩・羽原俊祐：硬化セメントペーストの湿度および硬化体構造の変化と自己収縮，コンクリート工学論文集，Vol.18, No.1, pp.705-710, 1996