

論文 混合セメントコンクリートにおける乾燥収縮ひび割れ特性に関する研究

今本 啓一*1・栗原 司*2

要旨: 地球温暖化の対策として、コンクリート材料にも種々の副産物および廃棄物の積極的使用が期待されている。しかし、このような材料を用いた際の各種性状などは必ずしも明らかとなっていない。本論文では、高温時の高炉セメント B 種コンクリートにおける収縮ひずみの増大現象に着目し、収縮低減剤及び膨張材を用いた場合の収縮ひび割れ抵抗性について検討を行った。比表面積の乾燥収縮への影響を評価した。その結果、収縮低減剤及び膨張材を用いることで、高炉セメントコンクリートの自由収縮ひずみの低減効果が認められた。一方、環境温度が高くなることによって比表面積と乾燥収縮ともに大きくなることを示した。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 高炉セメント B 種, 乾燥収縮, ひび割れ抵抗性, 養生温度, 等温吸着試験

1. はじめに

近年、地球温暖化問題の対策として、国ごとに CO₂ 削減目標を定めるなど、国際的な動きが加速しつつある。しかし、従来のコンクリートでは、大きな環境負荷を発生させているのが現状である。したがって、今後は新たなコンクリートを開発していく上で、「環境負荷低減」が新しい性能として要求される。

セメントについては、高炉セメントなどの所謂混合セメントを上部躯体への利用してゆくことが建築分野として必要な検討課題になるものと思われる。しかし、このような材料を用いた際の各種性状などは必ずしも明らかとなっていない。

既往の研究において、高炉セメント B 種を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性について検討が行われた¹⁾。その結果として、高炉セメント B 種コンクリート（以下、BFS-B）は普通コンクリート（以下、N）と比較して、30℃の高温において収縮ひび割れ抵抗性に劣り、養生温度の影響を受け易いことが明らかとなった。

建築においてはこの種のひび割れは新しいを材料の展開を図る上では避けるべきものであり、一方、通常の施工環境下において 30℃程度の温度環境となることもまた避けることができないのが現状である。

本論文では、BFS-B における収縮ひずみに着目し、収縮低減剤及び膨張材を用いた場合、BFS-B においてどの程度の収縮低減効果が発揮されるのかを把握するとともに、収縮ひび割れ抵抗性について検討を行った結果について述べる。また、細孔構造の観点から検討を行い、主として細孔の内部比表面積（比表面積）の違いにおける乾燥収縮への影響を評価した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 拘束ひび割れ試験

本論文では BFS-B、収縮低減剤添加型高炉セメント B 種コンクリート（以下、BSRA）、膨張材添加型高炉セメント B 種コンクリート（以下、BEX）及び N を用い、養生温度は 20℃・RH60% および 30℃・RH60% とした。

調査を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。結合材には BFS-B、BSRA 及び BEX において普通ポルトランドセメントの 42% を高炉スラグ微粉末（記号 BFS）で置換したもの（通常の高炉セメント B 種相当）を使用した。フレッシュコンクリートの計画スランプは 18±2.5cm、空気量は 4.5±1.5% とした。打設温度は、BFS-B : 14℃、BSRA : 14℃、BEX : 26℃ および N : 20℃ であった。

試験項目及び方法を表-3 に示す。拘束ひび割れ試験は試験体寸法を短くすることを目的とし、異形鉄筋 D16 を用いて、コンクリートの軸方向の自己収縮と乾燥収縮を拘束することとした（図-1、写真-1）。拘束応力は、試験体中央の鉄筋のひずみより、力の釣り合いに基づいて算出する。比較用の拘束試験としては図-2 に示す装置を用いた²⁾。この特徴は、拘束率（式(1)）を一定に制御しながら、その時発生する荷重（拘束応力）をリアルタイムで計測できる点にある。本研究では拘束率を拘束ひび割れ試験体の拘束率に近似させる目的で 45% とした。

また、各試験体は打設後、型枠内で材齢 7 日まで封緘養生とし、脱型後は恒温恒湿室にて気中養生とした。

$$\text{拘束率} = \frac{(\text{自由収縮ひずみ}) - (\text{実ひずみ})}{(\text{自由収縮ひずみ})} \quad (1)$$

*1 東京理科大学 工学部建築学科 准教授 工博（正会員）

*2 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻

表-1 調査

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位重量(上段:kg/m ³ , 下段:l/m ³)						高性能AE減水剤 Ad(C×%)	SRA (C×%)
			W	C	BFS	EX	S	G		
BFS-B	50	45.7	175	203	147	0	787	957	0.59	-
			175	64	51	0	304	361		
BSRA	50	45.7	175	203	147	0	787	957	0.61	2.06
			175	64	51	0	304	361		
BEX	50	45.7	175	183	147	20	787	957	0.60	-
			175	58	51	6	304	361		
N	50	46.0	175	350	0	0	798	957	0.65	-
			175	111	0	0	308	361		

表-2 使用材料

使用材料	記号	種類及び主な物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm ³
高炉スラグ微粉末	BFS	高炉スラグ微粉末(4000), 密度2.86g/cm ³
細骨材	S	水系陸砂, 表乾密度2.59g/cm ³ , 吸水率2.04%, 含水率3.0%, FM. 2.66
粗骨材	G	青梅産砕石2005, 表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.60%, 含水率0.35%, 実績率58.3%
化学混和剤	Ad SRA	高性能AE減水剤(Ad):標準形一種, ポリカルボン酸系化合物 収縮低減剤(SRA):標準形一種, ポリカルボン酸系化合物とグリコールエーテル系誘導体
膨張材	EX	エトリンガイト・石灰複合系膨張材

表-3 試験項目及び方法

試験項目	測定内容	試験体形状	試験方法
フレッシュ試験	スランプ, 空気量, 温度, 単位容積質量	-	-
強度試験	圧縮強度	φ 100 × 200mm	拘束ひび割れ試験体及び自由収縮試験体と同じ養生。供試体数3。載荷材齢:3日(圧縮強度のみ),7日(乾燥開始時),28日(7日脱型気中養生),56日(圧縮強度のみ)
	割裂引張強度	φ 100 × 200mm	
拘束ひび割れ試験	収縮拘束ひずみ, ひび割れ材齢	100 × 100 × 700mm	供試体数2。材齢7日まで封緘養生後、脱型し、気中養生。
自由収縮試験	自由収縮ひずみ	100 × 100 × 400mm	供試体数1。材齢7日まで封緘養生後、脱型し、気中養生。
一軸拘束試験	一定拘束率ひずみ, ひび割れ材齢	100 × 100 × 945mm	供試体数1。材齢7日まで封緘養生後、脱型し、気中養生。



写真-1 (左) 拘束ひび割れ試験体



写真-2 (右) ひずみ制御型拘束ひび割れ試験装置

異形鉄筋D16 ひずみゲージ

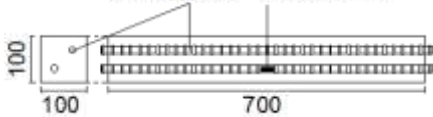


図-1 拘束ひび割れ試験体

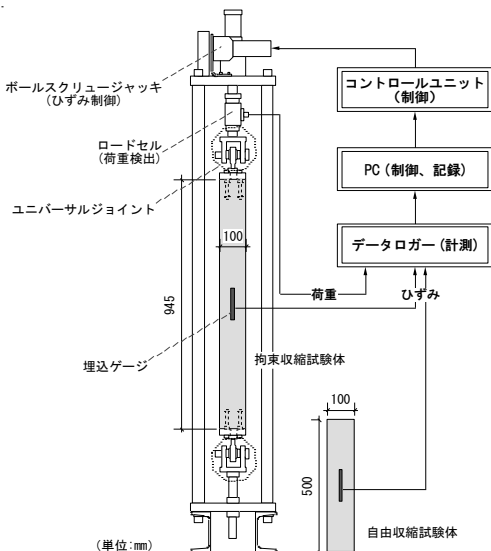


図-2 拘束ひび割れ試験装置

2.2 比表面積の測定及び算出方法

ここで、比表面積とは主に材料の内部空隙を構成する壁の面積を指し、図-3 にその模式図を示す。また、比表面積と収縮ひずみの関係については、図-4 より比表面積が大きいほど材料中の微細な内部空隙が多く存在すると考えられることから、その結果、分離圧の作用により膨張が生じ、収縮時の体積変化も大きくなるのが想定される。

比表面積の測定は吸着質として水蒸気を用い、写真-3 に示す Hydrosorb 試験機を用いて実施する。試料を設置したセル内部の水蒸気の圧力変化を測定することで、各相対圧による吸着量から比表面積を取得することができる。本試験では、相対圧を 0.05 (5%) ~ 0.99 (99%) の範囲で、0.05 刻みで圧力を設定した。なお、比表面積は相対圧で 0.3 (30%) の時点の吸着量から BET 理論を用いて導くものとする。

試料は BFS-B30 (数字は養生温度を示す), BFS-B20, BSRA20, BEX30, BEX20, N30 及び N20 の計 7 種のセメントペーストを φ3×5cm のプラスチック型枠に打設し、材齢 7 日まで各恒温恒湿にて封緘養生したものを用いた。また、前処理として、脱型後に木槌にて破砕し、2 日間アセトンに浸漬後、真空乾燥機にて -48℃ の乾燥空気による脱水を 7 日間行い、試験に供した。

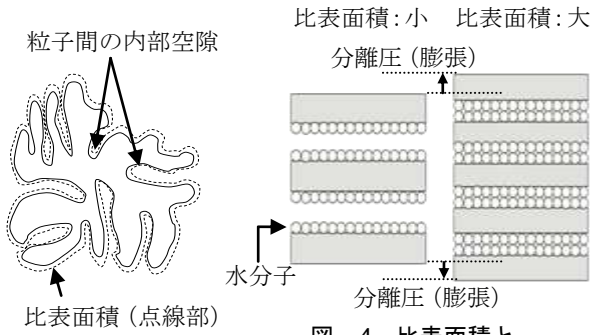


図-3 比表面積の模式図

図-4 比表面積と分離圧の概念図

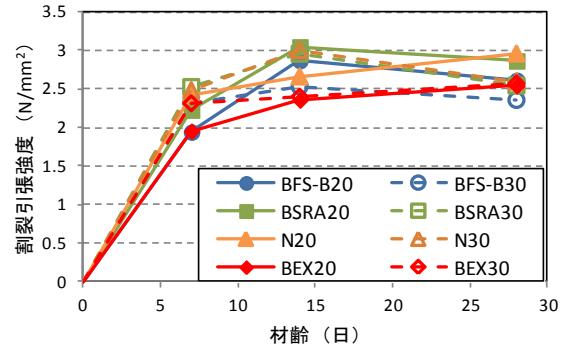


図-6 割裂引張強度



写真-3 Hydrosorb 試験機

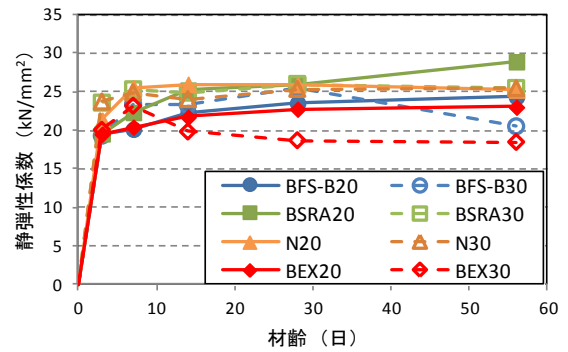


図-7 静弾性係数

3. 拘束ひび割れ試験結果及び考察

3.1 フレッシュ性状

スランブ(BFS-B: 17.0cm, BSRA: 20.0cm, BEX: 19.0cm, N: 18.5cm), 空気量(BFS-B: 5.6%, BSRA: 3.6%, BEX: 3.6%, N: 5.6%)はいずれも目標値を満足した。

3.2 強度試験

BFS-B, BSRA, BEX, Nの打設日を材齢の基準とした圧縮強度試験結果を図-5に、割裂引張強度試験結果を図-6に、静弾性係数を図-7に示す。圧縮強度は各々の種類で比較すると、BFS-B, BSRA, 及びBEXの30℃は20℃に比べ材齢初期の強度発現が早く、長期材齢での強度増進が見込めない特徴を有している。

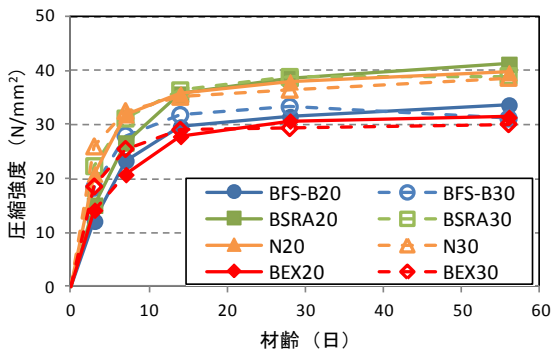


図-5 圧縮強度

3.3 自由収縮試験

自由収縮ひずみの経時変化を図-8, 各材齢での比較を図-9及び図-10に示す。計測の開始点は拘束鉄筋にひずみが生じた時点とした。既往の研究¹⁾に示されるように、BFS-Bは30℃の環境下において20℃と比較して著しく収縮ひずみが大きくなっているが、材齢50日では収縮低減剤の使用により、収縮ひずみが約17%低減し、20℃においても収縮ひずみが約25%低減している。また、膨張材を使用することによって、乾燥開始前の自己収縮にあたる収縮(材齢7日)を30℃で約65%, 20℃で約47%低減し、材齢50日においても30℃では24%程度低減する結果となった。なお20℃における低減効果はみられなかった。

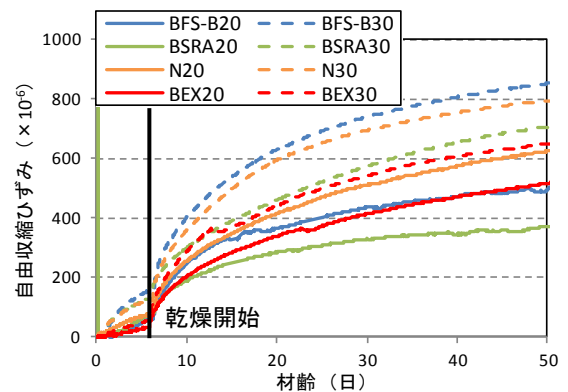


図-8 自由収縮ひずみ

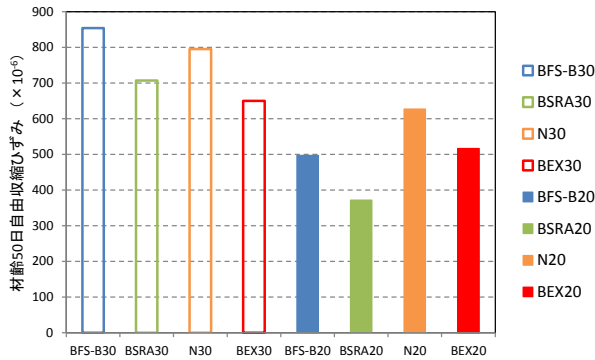


図-9 材齢 50 日自由収縮ひずみ

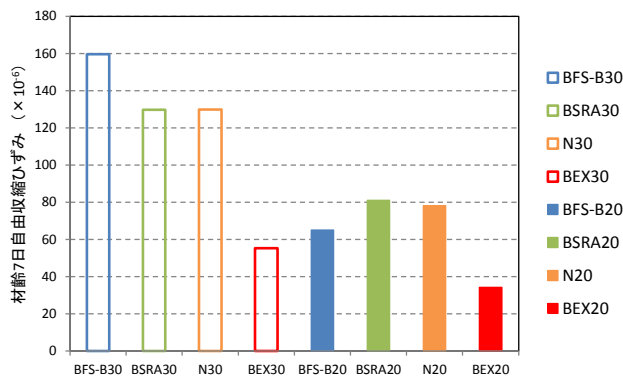


図-10 材齢 7 日自由収縮ひずみ

3.4 一軸拘束試験

BFS-B20における一軸拘束試験と拘束ひび割れ試験を比較し、あわせて一軸モデルによる有効ヤング係数法³⁾によって算出した収縮拘束応力の経時変化を図-11に示す。ここで、有効ヤング係数法における収縮ひずみ増分は実測値、ヤング係数は圧縮強度を CEB-FIP1990 モデルコード式*)でフィッティングして、NewRC 式**)で算出し、クリープ係数については拘束ひずみから弾性ひずみを差し引いて算出した値を双曲線式でフィッティングし、任意の載荷材齢毎に平行移動させることによって、計算用のクリープ曲線を得た。

拘束ひび割れ試験における拘束率は 50%程度であり、45%と設定した一軸拘束試験よりも若干大きい値となったが、一軸拘束試験と拘束ひび割れ試験による収縮拘束応力は、ほぼ同等の値を示しており、本研究で用いた簡易な拘束試験であっても、コンクリートの収縮拘束応力特性を正しく評価できることが明らかとなった。また、有効ヤング係数法による算出値は拘束ひび割れ試験による収縮拘束応力とほぼ一致していることから、鉄筋の定着が十分にとれていると考えることができる。このことから、本研究において試験体寸法を小さくしても正しく評価をすることができることを確認した。

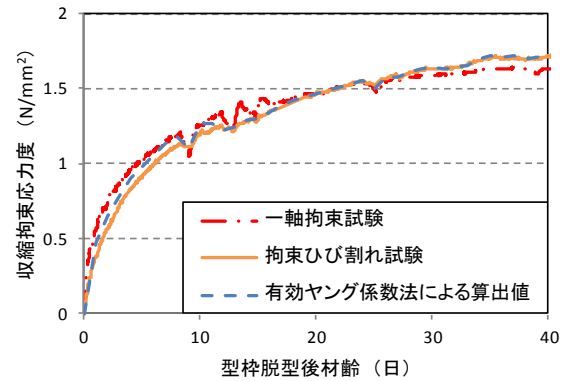


図-11 BFS-B20 における収縮拘束応力の比較

3.5 拘束応力

収縮拘束応力の経時変化を図-12、各材齢における比較を図-13に示す。図-13では各材料の応力低減効果を相対比較するため、BFS-B30の試験体にひび割れが生じた材齢(材齢 23 日)において評価を行う。BFS-B30の収縮拘束応力は 20℃と比較して大きくなるが、収縮低減剤の使用により拘束応力が約 22%低減し、BSRA20の拘束応力と同程度となった。また、膨張材を使用することで乾燥開始前(材齢 7 日)の拘束応力を 30℃において約 35%低減したが、乾燥開始後の応力には影響はなかった。このことから、高温下における高炉セメントコンクリートの収縮拘束応力の低減には、収縮低減剤は非常に有効であり、特に、この効果は乾燥開始後の応力上昇の抑制として効果的であることがわかる。

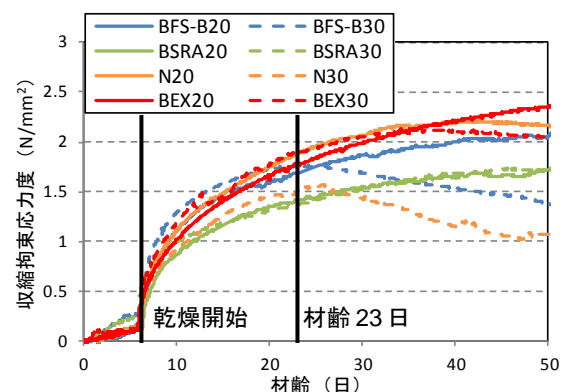


図-12 収縮拘束応力

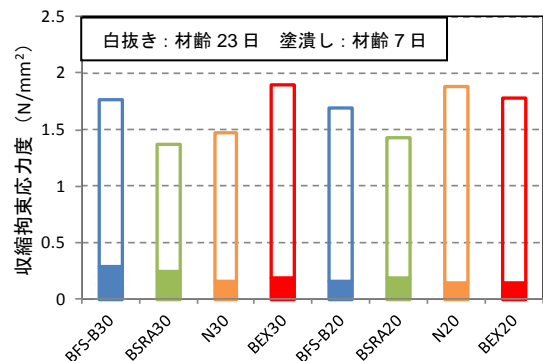


図-13 収縮拘束応力の比較

3.6 収縮応力強度比

収縮応力強度比は、収縮拘束応力をその材齢の割裂引張強度（実験値を材齢間で線形補間）で除した値である。ここで、該当材齢における割裂引張強度は推定式により導いたものを用いた。一般に、コンクリートのひび割れは引張強度よりも低い応力で発生し、応力強度比にして0.7程度とされている。また、ひび割れ発生材齢が遅くなるほどその値は大きくなる傾向があるとされている³⁾。

収縮応力強度比の経時変化を図-14に示す。BFS-B30において収縮応力強度比の発現は、Nに比べ早い傾向にあるが、収縮低減剤及び膨張材を用いることによって、発現を遅くすることができている。特にBSRAはNよりも発現を遅らす結果となり、非常に効果的であると考えられる。しかし、BSRAはNに比べ低い収縮応力強度比で収束する結果となった。

各種混和材を用いたコンクリートの収縮応力強度比の最大値（型枠脱型後）と型枠脱型後材齢の関係（図-15）は、バラつきがあるものの概ね既往の研究⁴⁾の傾向の群に存在する（なお、BSRA20の収縮応力強度比が極大値を取らないことからデータから除外している）。

最大応力強度比の比較を図-16に示す。各々の種類で比較すると、全てのコンクリートで30℃のものは20℃より応力強度比が低い値で最大収縮応力強度比を示す結果となった。今後の展望として、さらに多くのデータを集積して検討を進めていきたい。

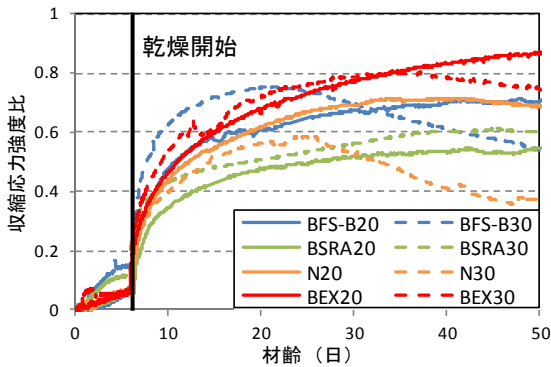


図-14 収縮応力強度比

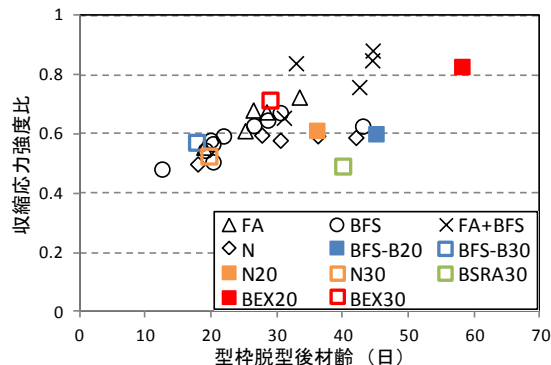


図-15 収縮応力強度比（型枠脱型後）と材齢の関係

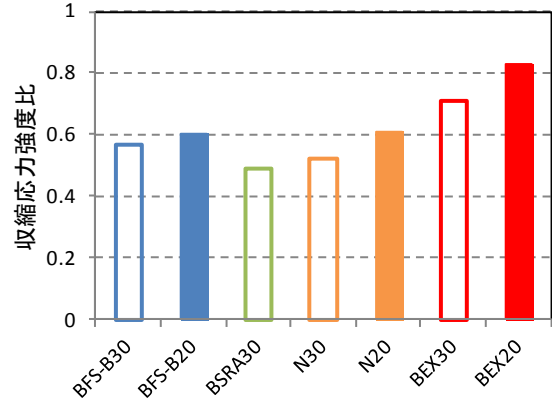


図-16 最大収縮応力強度比（型枠脱型後）の比較

4. 水蒸気吸着試験結果及び考察

4.1 吸着等温曲線

吸着等温曲線は、表面上の吸着質の量を一定の温度で広範囲の相対圧力にわたって測定して得られるグラフである。Hydrosorb 試験機により平衡圧力を設定することにより、各相対圧における吸着量を一点ずつ得ることができる。

本研究における等温吸着曲線を図-17に示す。図に示されるように、各試料の等温吸着曲線は相対圧0.7程度から吸着量が增大する傾向を示している。養生温度を30℃としたもの（BFS-B30およびBEX30）についてはいずれも等温吸着曲線が全体に高めにシフトしており、水蒸気によって得られる細孔の情報としては、養生温度が高くなることによってその内部細孔の面積や量が增大していることが示唆される。

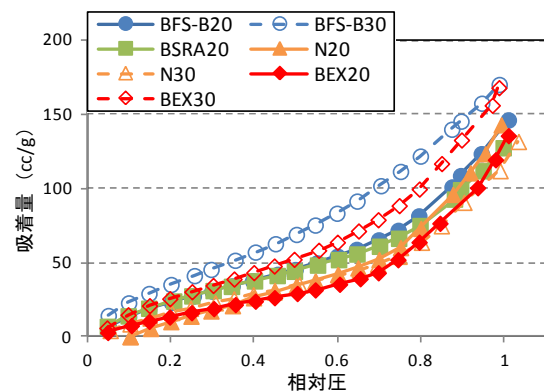


図-17 吸着等温曲線

4.2 比表面積

比表面積の算出は BET 一点法（式(2)）によった。本理論は相対圧0.05~0.30の範囲で成り立つものであり、式(3)により算定される。なお、(P/P₀)は相対圧、V_aは相対圧の下で吸着されるガスの重量を示す。

$$V_m = V_a \{1 - (P/P_0)\} \quad (2)$$

比表面積(m²/g)

$$= \{V_m / 18.015 \times (6.023 \times 10^{23}) \times 10.8 \text{Å}^2\} / M \quad (3)$$

算出した比表面積の比較を図-18に示す。各々の種類で比較すると、BFSの比表面積はNよりも若干大きいものとなった。また20℃に比べ30℃の比表面積が大きくなる結果となった(BFS, BEXシリーズ)。一方、BSRA20とBFS20が同程度の比表面積を有していることから、収縮低減剤を用いてもBFSの組織構造を変化させるものではなく、別の作用により収縮を低減しているものと推察される。今後の展望として、さらに多くのデータを集積して検討を進めていく必要であると考えられる。

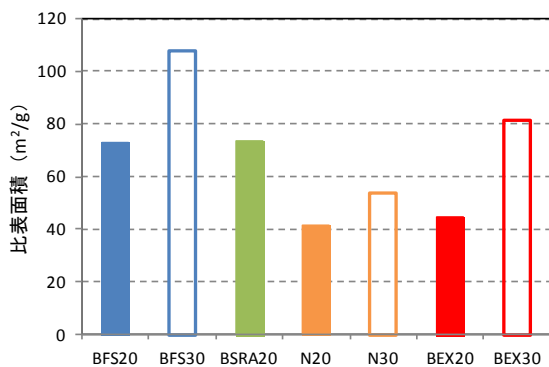


図-18 比表面積の比較

4.3 比表面積と乾燥収縮ひずみの関係

比表面積と型枠脱型後の材齢50日時点の自由収縮ひずみの関係を図-19に示す。養生温度の上昇によって比表面積と乾燥収縮ひずみも双方連動して増大するという傾向がみられた。しかしその傾向は材料の種類に関わらず普遍的なものではない。温度が高くなると比表面積が増大し、それに伴って乾燥収縮ひずみも増大することが示唆される結果ではあるが、この点についてはさらに今後検討してゆきたい。

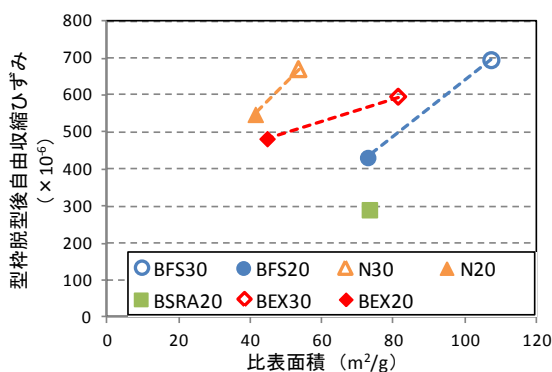


図-19 比表面積と乾燥収縮ひずみの関係

5. まとめ

本研究で得た知見を以下に示す。

- 1) 自由収縮試験において、収縮低減剤及び膨張材を用いることで、収縮ひずみを低減させる効果が認められた。
- 2) 本研究で用いた簡易な試験体であっても、本研究においてコンクリートの収縮拘束応力を正しく評価できることを示した。
- 3) 収縮低減剤を用いることで、高温下(30℃)の収縮拘束応力を低減し、20℃における収縮拘束応力と同程度とすることができると示した。この効果は特に乾燥開始後の応力上昇の抑制として効果的であることが明らかとなった。
- 4) 収縮低減剤及び膨張材を用いることで、収縮応力強度比の発現を遅くすることができると示した。特にBSRAはNよりも発現を遅らす結果となり、非常に効果的であると考えられる。しかし、BSRAはNに比べ低い収縮応力強度比で収束する結果となることが明らかとなった。
- 5) BSRA20とBFS20が同程度の比表面積を有していることから、収縮低減剤を用いてもBFSの組織構造を変化させるものではなく、別の作用により収縮を低減しているものと推察される。
- 6) 養生温度の上昇によって比表面積と乾燥収縮ひずみも双方連動して増大するという傾向がみられた。

謝辞

収縮低減剤は(株)フローリックより提供頂きました。膨張材は電気化学工業(株)より提供頂きました。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 新谷彰, 閑田徹志, 百瀬晴基, 今本啓一, 小川亜希子: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの拘束ひび割れ実験, 日本建築学会学術講演梗概集. A-1, 材料施工 2010, 947-948, 2010.7
- 2) 濱永康仁ほか: ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発, 日本建築学会構造系論文, No.616, pp.1-7, 2007.6
- 3) (社)日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ-メカニズムと対策技術の現状-, 2003.5
- 4) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford.
- 5) 日本建築学会編: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 丸善, pp.72-78, 2006.2
- 6) (社)日本コンクリート工学協会: 混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会, 2010.9