

論文 スラグ粒度と化学成分を調整した高炉セメントコンクリートと膨張コンクリートの一軸拘束下でのひずみ挙動

大友 健^{*1}・二戸 信和^{*2}・鯉淵 清^{*3}・宮澤 伸吾^{*4}

要旨：高炉スラグ微粉末の粒度と化学成分を調整した高炉セメントコンクリートと膨張コンクリートとについて、温度履歴を与えた封緘養生状態で一軸拘束下でのひずみ挙動を測定したところ、高炉セメントコンクリートにおいても、初期材齢において膨張コンクリートと同様に膨張ひずみが生じ、これが持続した。このひずみに対して有効ヤング係数を考慮し有効応力を算定したところ、拘束度あるいは有効ヤング係数の設定方法によっては、膨張コンクリートと同等の大きさの応力が生ずる場合があることを明らかとした。

キーワード：高炉セメント、膨張コンクリート、膨張ひずみ、一軸拘束膨張、拘束度、有効ヤング係数

1. はじめに

高炉セメントは、塩化物イオンの固定化能力に優れており、またアルカリ骨材反応抑制対策として有効であることからコンクリートの耐久性向上に有用とされている。また、高炉セメントの製造時における二酸化炭素排出量は普通ポルトランドセメントの約 60%程度であり、環境負荷低減の観点からもその使用がグリーン調達法などにより促進されている。

従来から、比表面積の大きい高炉スラグを用いたコンクリートでは自己収縮が大きくなると考えられていた¹⁾が、最近では、一般の高炉セメントを用いたコンクリートであっても、発熱量が普通ポルトランドセメントを用いたものより大きくなる場合があり、相対的に自己収縮も大きくなり、特に高温の温度履歴を与えた場合にその傾向がより顕著になるという報告²⁾がある。また、同じ高炉セメント B 種でも自己収縮の大小が異なる事例の報告³⁾もある。

このような背景から著者らは、発熱量および自己収縮を制御した高炉セメントの研究を継続している。これまでの研究により、高炉スラグ微粉末成分の比表面積を小さくしその置換率および SO₃ 量を大きくすることによって、断熱温度上昇量が低減され、自己収縮ひずみの最終値が抑制される⁴⁾ことを明らかとし、実構造物の施工に適用した場合の効果についても確認してきた⁵⁾。この中で、スラグ粒度と化学成分を調整した高炉セメントコンクリートでは、材齢の初期には膨張コンクリートに類似した膨張側の体積変化をすることが明らかとなっている。

本研究では、膨張コンクリートに用いられる一軸拘束膨張試験により、スラグ粒度と化学成分を調整した高炉

セメントコンクリートと膨張コンクリートの体積変化特性を相対的に評価した。

膨張コンクリートを、壁状構造物に代表される実際のマスコンクリートに適用した場合、必ずしもひび割れの発生を抑制するまでの効果が得られていない⁶⁾。この原因として、実際のマスコンクリートの内部では、初期に高温の履歴をうけること、水中養生供試体のように湿潤な状態で養生がなされないことが考えられる。そこで、ここで行なう一軸拘束膨張試験においては、試験体の養生条件を封緘とし、かつ一定の温度履歴を与えることで、実際のマスコンクリート中での挙動を考慮するものとした。

2. コンクリートの材料・仕様と特性

2.1 セメントの特性

実験に用いたセメントの性質を表-1 に、化学成分を表-2 に示す。ここで、普通ポルトランドセメントを NP、一般の高炉セメント B 種 (スラグ置換率 40%) を BB、スラグ粒度と化学成分を調整した高炉セメント (スラグ置換率 58%) を LBB と表記した。BB に用いている高炉スラグ微粉末の比表面積は約 4300cm²/g、LBB に用いている高炉スラグ微粉末の比表面積は約 3000cm²/g である。LBB の SO₃ 量は JIS の範囲内で調整したため、LBB も高炉セメント B 種の規格を満足するが、圧縮強度は従来の高炉セメント B 種より小さい値となる。また、凝結時間も従来の高炉セメント B 種と比べ 1 時間程度遅くなる。

2.2 コンクリートの仕様・配合・使用材料

表-3 にコンクリートの仕様・配合・使用材料を示す。コンクリートは、設計基準強度 35N/mm² (基準材齢 91 日) の高性能 AE 減水剤コンクリートとした。水セメン

*1 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主席研究員 博(学術) (正会員)

*2 (株) デイ・シイ セメント事業本部 工修 (正会員)

*3 (株) デイ・シイ 執行役員 事業開発部長 (正会員)

*4 足利工業大学 工学部 都市環境工学科 教授 工博 (正会員)

ト比が 55%以下の水密コンクリート仕様である。粗骨材には石灰岩質砕石を、細骨材には山砂と石灰岩質砕砂の混合品を使用した。

膨脹コンクリート（以下 NPEX と称する）は、普通ポルトランドセメントをベースとし、これに膨脹材を内割で 20kg/m³ 添加したものである。膨脹材には石灰系低添加型膨脹材として市販されているものを使用した。

2.3 コンクリートの物性

(1) 強度特性と発熱特性

コンクリートの収縮・膨脹特性の評価に係わる物性として、コンクリートの圧縮強度、コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係、断熱温度上昇特性、凝結特性、線膨脹係数を測定した。

積算温度軸上の圧縮強度発現曲線（材齢 28 日まで）を図-1 に、コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係を定式化したものを図-2 に示す。ここで、コンクリートのヤング係数と圧縮強度の関係は配合によらず一様であるとして単一の関数式とした。

圧縮強度の発現性について同じ水セメント比(55%)で比較すると、膨脹材を添加することにより、初期材齢に 2~3N/mm² の強度増進が見られた (NP と NPEX の比較)。BB は NP に比べ材齢 7 日の強度は小さいが材齢 28 日では NP を上回る強度となった。LBB では W/C を 50%としているが、材齢 28 日まで他のセメントよりやや強度が小さい状態となってい

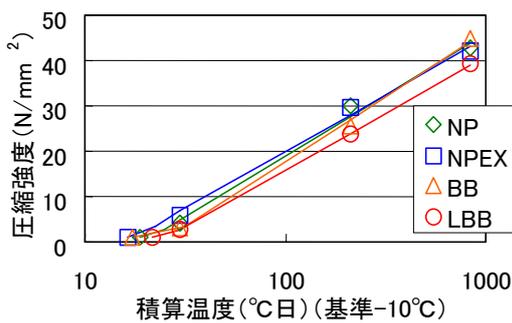


図-1 圧縮強度の発現状況

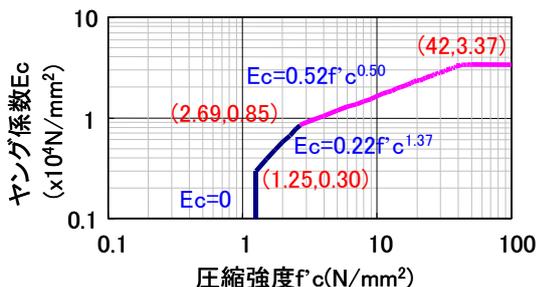


図-2 圧縮強度とヤング係数の関係

表-1 セメントの性質

セメント種類	密度	比表面積 (cm ² /g)	凝結(h-m)		圧縮強度(N/mm ²)			スラグ置換率(%)
			始発	終結	3日	7日	28日	
NP	3.16	3630	2-05	3-00	28.8	43.8	62.8	—
BB	3.04	3880	2-20	3-55	19.3	33.3	61.3	40
LBB	2.98	3330	3-50	5-30	12.2	24.8	43.9	58
JIS	—	3000≦	60m≦	10h≧	10.0≦	17.5≦	42.5≦	30<,60≧

表-2 セメントの化学成分

セメント種類	比表面積 (cm ² /g)	I _g loss	化学成分(%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
NP	3630	0.8	21	5.4	3.1	63.6	2.3	2.2
BB	3880	0.8	24.6	7.9	2.3	57.1	3.7	2.1
LBB	3330	0.6	26.9	10.1	1.5	50.5	4.6	3.9

表-3 コンクリートの仕様・配合・使用材料

配合種類	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					高性能 AE 減水剤 (wt%)
			水 W	セメント C	膨脹材 E	細骨材 S	粗骨材 G	
NP	55.0	48.0	170	309	0	853	966	Cx0.75
NPEX	55.0	48.0	170	289	20	853	966	(C+E)x0.80
BB	55.0	47.4	165	300	0	847	982	Cx0.75
LBB	50.0	47.7	158	316	0	853	977	Cx0.80

設計基準強度: 35N/mm²(91日), 粗骨材の最大寸法: 20mm
スランブ: 18±2.5cm, 空気量: 4.5±1.5%

NP: 普通ポルトランド(T社製), BB: 高炉B種(T社製)
LBB: 低発熱・収縮抑制型高炉B種(D社製)
E: 膨脹材(低添加型石灰系)(TM社製)
細骨材: 山砂と石灰石砕砂の混合品(山砂: 砕砂=8:2)
粗骨材: 石灰石砕石

た。

コンクリートの断熱温度上昇特性を図-3 に、これを指数関数式で定式化した結果を表-4 に示す。断熱温度上昇曲線は、スタイロフォームにより断熱したマスプロ

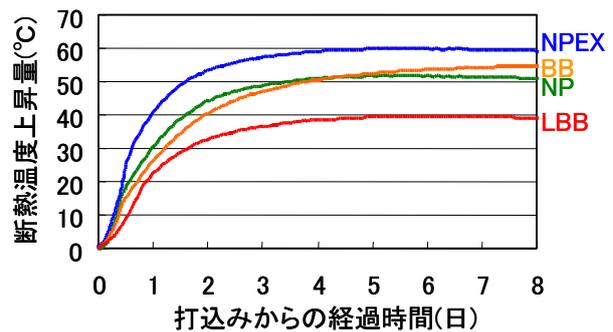


図-3 断熱温度上昇曲線

表-4 断熱温度上昇の特性値

発熱定数	配合種類				Q _∞ (°C)
	NP	NPEX	BB	LBB	
Q _∞	51.7	59.8	54.7	39.5	(°C)
γ	1.00	1.20	0.75	0.95	
β	1.05	1.00	0.95	1.05	
t ₀	0.07	0.08	0.11	0.14	(日)

Q(t)=Q_∞(1-exp(-β(t-t₀)^γ))

ックの中心部での温度履歴を断熱容器の放熱特性を考慮し放熱熱量を積算すること⁷⁾により得たものである。

膨張材の添加により、終局断熱温度上昇量は 8℃程度上昇し温度上昇速度も非常に大きくなった。BB の温度上昇速度は NP に比べ若干小さくなるが、終局断熱温度上昇量は 3℃程度高くなった。LBB では、単位セメント量が多いにもかかわらず、終局断熱温度上昇量は NP より 12℃程度小さく、従来の BB と比較して 15℃程度小さくなった。

(2) 凝結特性と硬化原点、線膨張係数

NP や BB などの通常の体積変化をするコンクリートでは、硬化原点を、温度変化量と全ひずみの関係において変曲点が生ずる点、すなわち見かけの線膨張係数が急激に変化する点と見ることができる⁸⁾。しかしながら膨張コンクリート (LBB を用いたコンクリートを含めて) では、まだ固まらない状態で大きく体積が変化するため、この硬化原点が温度変化量と全ひずみの関係からは明確にならない。拘束試験体でも、打込み直後から温度履歴を与えているので、コンクリートが硬化する以前から鋼材ひずみが測定されるが、硬化前にはコンクリートの線膨張係数が大きくかつ経時的に変化しているため、この温度影響成分を分離することはできない。

そこでここでは、同じ材料を用いた BB と LBB を用いたコンクリートにおいて測定した凝結試験における、貫入抵抗値と極初期材齢でのコンクリートの圧縮強度との関係から、硬化原点：コンクリートの圧縮強度が 1N/mm²となる時点を推定した。この 1N/mm²は、まだ固まらないコンクリートが硬化したコンクリートとして扱えるようになる時点の強度で、ヤング係数が 0.3 × 10⁴N/mm²程度に相当することがわかっている⁹⁾。

凝結特性の測定結果を図-4 に、凝結特性から推定した圧縮強度の発現状況を図-5 に示す。この考察から推定した硬化原点材齢は、表-5 に示すものである。

表-5 には、線膨張係数の測定結果も示している。この線膨張係数は、硬化原点以降に全ひずみから温度ひずみ成分を分離するために使用した。埋込み型ひずみ計を中央部に設置した φ10cm × 20cm の試験体 (材齢 35 日経過以降) に 30℃から 60℃の温度履歴を与えて長さ変化を測定した。測定は温度上昇降下を 2 回繰り返す、この平均のひずみの変化量から線膨張係数を算定した。

3. 無拘束および一軸拘束下の体積変化の測定

3.1 測定方法

NP, NPEX, BB, LBB の 4 配合のコンクリートについて、マスコンクリートの構造体中での温度履歴を与えた場合の、無拘束状態でのひずみ挙動 (いわゆる自己収縮試験に相当) を、NPEX, LBB についてはさらに、異な

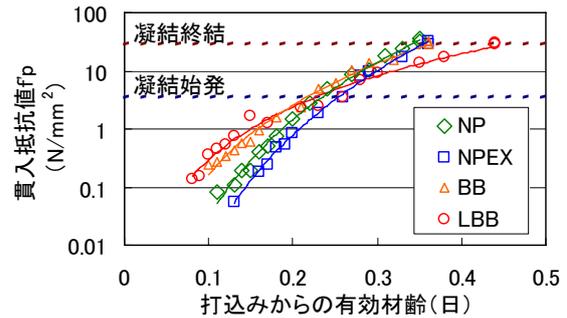


図-4 凝結特性

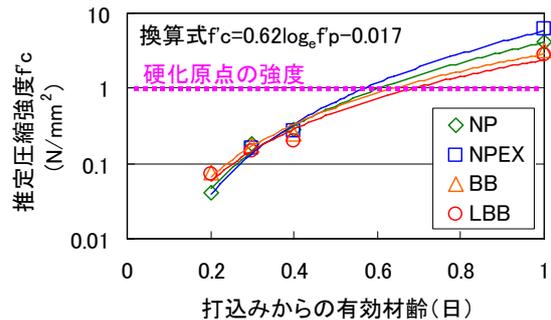


図-5 凝結特性から推定した圧縮強度

表-5 凝結特性と線膨張係数の測定値

配合種類	凝結特性			線膨張係数 (x10 ⁻⁵ /℃)
	凝結時間 始発 (hr)	凝結時間 終結 (hr)	硬化 原点 (hr)	
NP	0.23	0.34	0.61	0.63
NPEX	0.26	0.37	0.56	0.67
BB	0.22	0.36	0.63	0.72
LBB	0.23	0.45	0.71	0.81

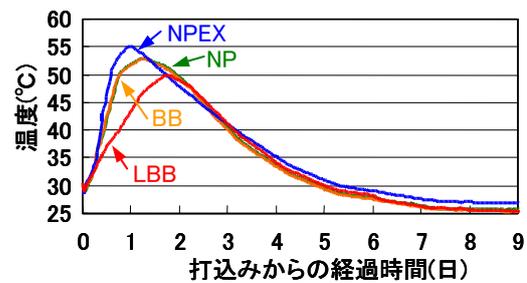


図-6 試験体に与えた温度履歴

った 3 水準の拘束を受ける一軸拘束状態でのひずみ挙動を測定し、結合材の相違と拘束状態がコンクリートの体積変化に及ぼす影響を評価した。

試験体に与えた温度履歴を図-6 に示す。図-3 に示す発熱特性のコンクリートを、厚さ 50cm の上下面放熱のスラブに打ち込んだ時の部材中心部での温度履歴を算出し (打込み温度 30℃, 外気温 25℃, 表面熱伝達率 10W/m²℃の条件)、この履歴を温度可変養生槽内で与えた。NP と BB はおおむね同等の温度履歴となったため、同じ温度変化設定の養生槽を用いた。

無拘束状態での体積変化は、JCI: 超流動コンクリート

委員会報告書に準拠し、埋込みひずみ計を中心部に設置した 10×10×40cm 試験体により測定した。

一軸拘束状態下での体積変化は図-7 に示す治具により測定した。PC 鋼材の径は 9.2mm, 11mm, 17mm の 3 種類とした。泊ゲージを貼付した PC 鋼材の線膨張係数は $12.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ である。計器の線膨張係数とコンクリートの線膨張係数を補正して一軸拘束下におけるコンクリートの体積変化を算出した。無拘束試験体、一軸拘束試験体とも、打込み直後から封緘状態の養生としている。

3.2 無拘束状態での体積変化

図-8 には、無拘束試験体における打込み直後からの温度と全ひずみとの関係および硬化原点以降の温度と全ひずみとの関係とを示す。硬化原点以降については、線膨張係数と温度変化量との関係で示される温度ひずみ成分、全ひずみから温度変化の影響を除して算出した自己収縮に相当する体積変化 (NPEX と LBB については長さが伸びる方向であるので自己膨張ということになる) も示した。図中の ↓ は、設定した硬化原点を示すものである。

NPEX では、最大で 750×10^{-6} 程度の全ひずみを示すが、この長さ変化の半分程度は硬化原点材齢以前に生じているものである。したがって、さらに温度変形分を除いて、コンクリートの応力発生に寄与できる膨張ひずみ成分は、おおむね 200×10^{-6} であると見積られる。LBB も同様に打込み直後からの全ひずみは 450×10^{-6} 程度であるが、このうち温度変形分を除いて、コンクリートの応力発生に寄与できる膨張ひずみ成分は、 100×10^{-6} 程度であると考えられる。NP, BB は当然のことながら、硬化

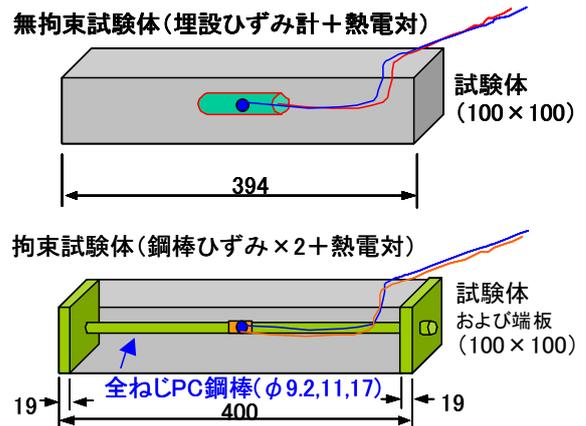


図-7 無拘束膨張・一軸拘束膨張の試験体

原点以降自己収縮を示している。

図-9 には、温度変化を補正した体積変化を打込み時点からの有効材齢 (CEB-FIB モデルコード 90 式) 軸上に示す。NP と NPEX の差分が膨張材添加の効果、BB と LBB の差分が高炉セメント B 種のスラグ粒度と化学成分を調整したことによる効果と解釈できる。ひずみ量だけで見れば、BB を LBB にする効果は、NP に膨張材を添加する効果のおおよそ 1/3 と見込まれることになる。LBB は膨張コンクリートではないが、この測定条件においては、硬化原点以降から膨張傾向を示しこれが材齢 28 日まで持続することが認められた。

3.3 一軸拘束状態での体積変化

一軸拘束下の体積変化を図-10 に示す。拘束鋼材径が大きくなるにしたがい、当然のことながら膨張ひずみ量は減少する傾向にある。NPEX では有効材齢 2 日程度ま

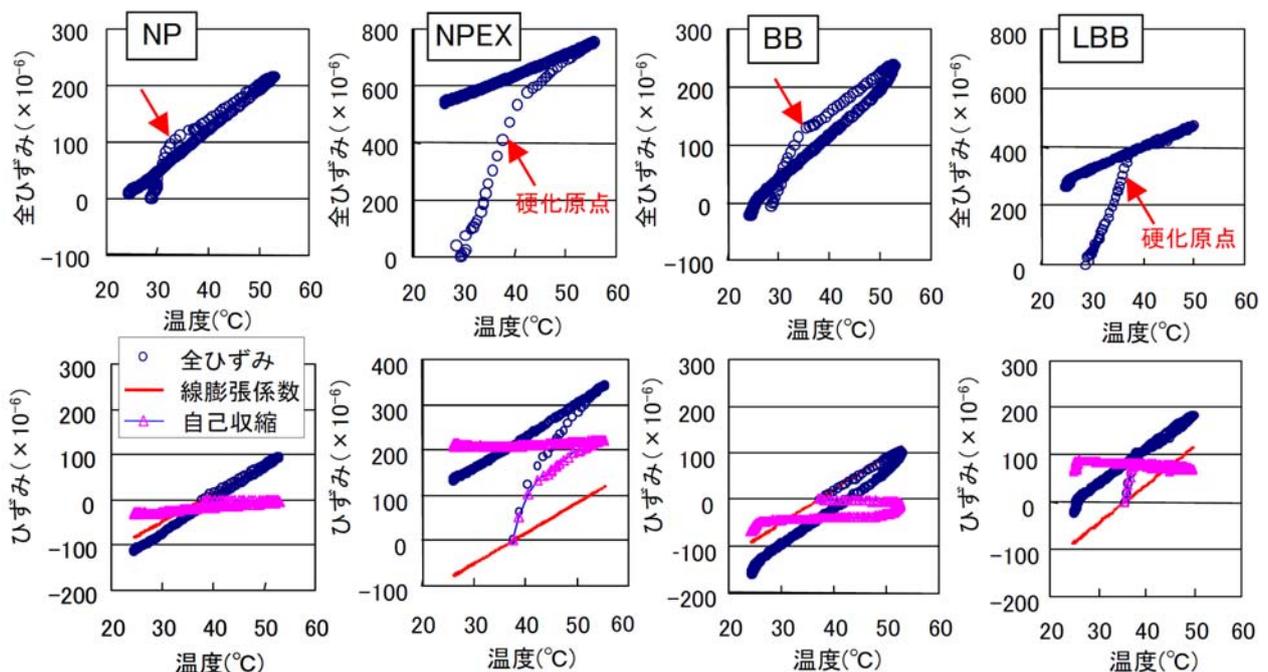


図-8 無拘束試験体における温度と全ひずみとの関係 (上段: 打込み時原点, 下段: 硬化原点以降)

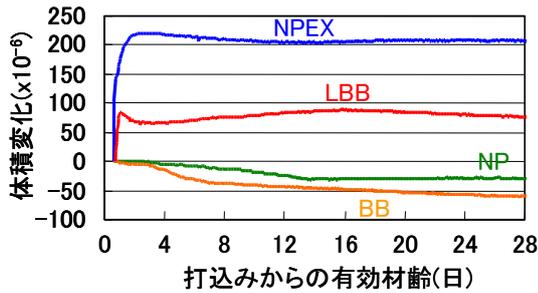


図-9 無拘束試験体の体積変化

で膨張した後で、徐々に膨張ひずみが小さくなる傾向があるが、拘束が大きい場合には、膨張ひずみの減少の程度が大きくなる。

一般の膨張コンクリートでは、収縮補償用の膨張コンクリートの膨張率（一軸水中膨張:材齢7日）は、おおよそ 200×10^{-6} であることが知られている。また材齢の進行により膨張ひずみが小さくなることはない。ここで、測定されているひずみの特性には、初期に高温履歴を受けることあるいは封緘養生により外部から水分が供給されないことが影響しているのではないかと考えられる。

LBBはNPEXに比べて相対的に膨張ひずみ量は小さい。極初期に膨張のピークがあるが、有効材齢4日以降8~16日まで膨張が継続する傾向がある。拘束が大きいと膨張傾向の継続期間が短縮されるようである。

3.4 有効応力履歴としての比較

図-11は、図-10のひずみの測定値に対して、材齢ごとのひずみ変化差分に、その材齢における有効弾性係数を掛け合わせて、これを積算することにより有効応力の履歴を算出したもの（いわゆる増分法によるもの）である。すなわち、ある拘束下で発生している膨張ひずみそのままコンクリートに発生して有効応力が発生している状態を想定している。圧縮強度の材齢による変化を図-1により、ヤング係数はこの圧縮強度から図-2のように与え、みかけのクリープ係数 ϕ （ヤング係数の低減係数： $\Phi=1/(1+\phi)$ ）は、JCI：コンクリートのひび割れ制御指針に準じて温度上昇時1.0、温度降下時0.5を設定した¹⁰⁾。

一般の膨張コンクリートにおいては、温度上昇時のクリープが大きくなる現象が報告されており、この時、温度上昇時のみかけのクリープ係数は普通のコンクリートの2.5倍になるとされていた¹¹⁾。これは、初期膨張時の組織のゆるみに起因するのではないかとと思われる。図-12においては、この特性を考慮して、みかけのクリープ係数 ϕ 温度上昇時2.5、温度降下時0.5を各々設定した場合の有効応力の履歴を示した。

NPEXの場合には、初期材齢に大きく膨張ひずみを生ずるが、この時の有効ヤング係数は小さいので、圧縮応力

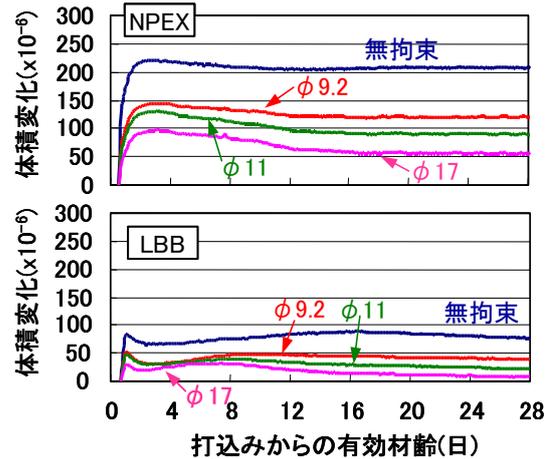


図-10 一軸拘束試験体の体積変化

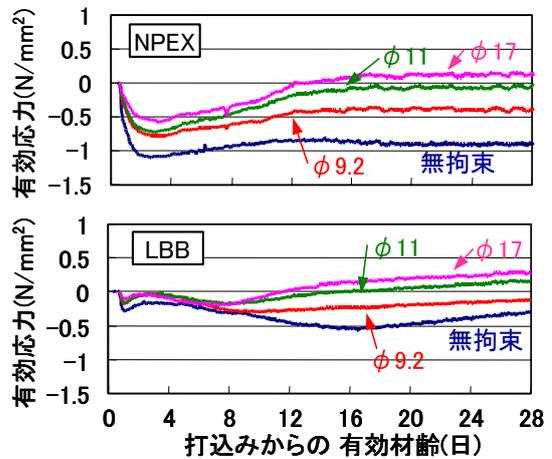


図-11 有効応力の履歴（みかけクリープ係数 ϕ :温度上昇1.0,温度降下0.5の設定）

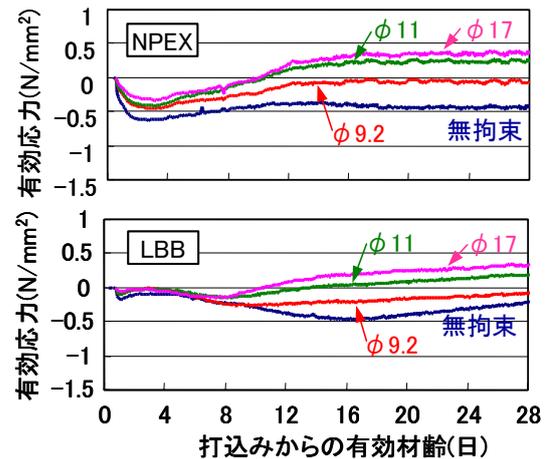


図-12 有効応力の履歴（みかけクリープ係数 ϕ :温度上昇2.5,温度降下0.5の設定）

はそれほど小さくなり、むしろ有効材齢2日以降ひずみが収縮側に移行する影響により有効応力が引張側に増大する傾向が認められる。LBBの場合、初期には圧縮応力がほとんど発生しないが、有効材齢8日~16日まで膨張が持続することから、この間の膨張ひずみが有効

応力として作用できるようである。

温度上昇期の ϕ を1.0とした場合、拘束の小さい場合（無拘束または ϕ 9.2）にはNPEXの圧縮側の有効応力はLBBに比べて相当大きい、拘束度が大きい場合（ ϕ 11または ϕ 17）には、NPEXとLBBの有効応力の差はほとんどなくなっている。温度上昇期の ϕ を2.5とした場合には、一軸拘束の大小のいかんにかかわらずLBBのひずみ変化により得られる有効応力はNPEXのそれとおおむね同等といえる大きさとなっている。

すなわち、LBBの初期膨張ひずみ量はNPEXに比べて小さいが、このひずみにより発生する有効応力を比較すると、拘束鋼材量によっては、LBBとNPEXの膨張応力が同等となる場合があることが推察された。

実際の構造物では、コンクリートが受ける拘束の状態は、構造物の形状寸法・部位、拘束体との関係、経過時間やコンクリートの物性経時変化との関係で著しく変化する。また、膨張コンクリートにおいては、鋼材によるプレストレインの影響もあるとされているので、この試験体のように簡単な状態ではなく評価が難しいが、収縮を制御した高炉セメントLBBを用いたコンクリートにおいても膨張コンクリートに類似した収縮補償性能が得られる可能性もあるものと考えられる。

4. 結論

マスコンクリート内部での挙動を考慮して、マス養生温度履歴を与えた封緘条件により、無拘束および異なった一軸拘束条件下での膨張特性を測定した。この結果、以下が明らかとなった。

- (1) スラグ粒度と化学成分の異なる低発熱高炉セメントB種を用いたコンクリートは、一般の高炉セメントB種に比べ断熱温度上昇量が30%程度小さくなる。膨張コンクリートでは、膨張材の添加によっては15%程度大きくなる。
- (2) 無拘束条件において、膨張コンクリートは打込みから 750×10^{-6} の全ひずみを示すが、硬化原点以降の有効な膨張ひずみ成分は 200×10^{-6} 程度であった。収縮制御型低発熱高炉セメントB種も、硬化原点以降から膨張傾向を示しこれが材齢28日まで持続する傾向を示した。有効膨張ひずみ成分は 100×10^{-6} 程度となった。
- (3) 拘束膨張時の膨張コンクリートでは、有効材齢2日程度まで膨張した後で、徐々に膨張ひずみが小さくなる傾向がある。拘束度が大きい場合には、膨張ひずみの減少の程度が大きくなる。
- (4) 拘束膨張時の収縮制御型低発熱高炉セメントB種では、極初期に膨張のピークがあるが、有効材齢4日以降8~16日まで膨張が継続する傾向がある。拘束

が大きいと膨張傾向の継続期間が短縮されるようである。

- (5) 測定された拘束ひずみに対して、有効ヤング係数を考慮した増分法によって有効応力を算出した場合、拘束度の条件やクリープ係数の与え方によっては、膨張コンクリートと収縮制御型低発熱高炉セメントB種とがおおむね同じ有効応力を示す場合があることが推察された。これは、膨張時の拘束が大きい場合や膨張時のみかけのクリープを大きくとった場合である。

参考文献

- 1) 田澤栄一、宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響、土木学会論文集、No.502, V-24, pp.43-52, 1994.11
- 2) 二戸信和ほか：高炉セメントの特性を活かす《低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの性能と実施工》、セメントコンクリート、No.722, pp.10-16, 2007.4
- 3) 大友健ほか：マスコンクリートに生じている自己収縮の実態とその制御対策の一例、コンクリート工学、Vol.43, No.3, pp.26-33, 2006.3
- 4) 宮澤伸吾ほか：高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究、セメント・コンクリート論文集、Vol.58, pp.154-159, 2004.2
- 5) 大友健ほか：収縮を抑制した高炉セメントB種を用いた低発熱コンクリートの特性と実構造物への適用、大成建設技術センター報、Vol.38, pp.26-1-10, 2005.12
- 6) 日本コンクリート工学協会：膨張コンクリートによる構造物の高機能化／高耐久化研究委員会報告書、2003.9
- 7) 大友健ほか：鋼管・コンクリート複合構造橋脚における温度ひび割れ発生機構とその評価方法に関する研究、コンクリート工学論文集、Vol.13, No.3, pp.91-103, 2002.9
- 8) 田澤栄一：コンクリート硬化時温度応力の問題点、コンクリート工学、Vol.24, No.12, pp.11-20, 1986.12
- 9) 二戸信和ほか：スラグ粒度と化学成分の異なる高炉セメントB種を用いたコンクリートの特性、セメント・コンクリート論文集、Vol.59, pp.231-238, 2005.2
- 10) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ制御指針、1986.3
- 11) 三谷裕二ほか：マスコンクリート様の温度履歴を受けた膨張コンクリートの応力評価法、マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム論文集、pp.49-56, 2005.8