

# 論文 低熱ポルトランドセメントとフライアッシュおよび膨張材を使用したコンクリートの特性に関する基礎的検討

長塩 靖祐<sup>\*1</sup>・杉橋 直行<sup>\*2</sup>・名倉 健二<sup>\*3</sup>・郭 度連<sup>\*4</sup>

**要旨:** 低熱ポルトランドセメントとフライアッシュおよび膨張材を使用したコンクリートの基本特性について検討を行った。本研究では、低熱ポルトランドセメントとフライアッシュを組み合わせた場合に適した膨張材を新たに試製して評価を実施した。その結果、低熱ポルトランドセメント、フライアッシュおよび試製膨張材を使用したコンクリートの基本特性は、環境温度 10~30℃において、単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> で材齢 7 日の拘束膨張ひずみが所要の品質を満足することが確認された。また圧縮強度は、膨張材無混和の場合とほぼ同等であることも確認された。

**キーワード:** 低熱ポルトランドセメント、フライアッシュ、膨張材、拘束膨張ひずみ、圧縮強度

## 1. はじめに

低レベル放射性廃棄物のうち、比較的放射能レベルの高い放射性廃棄物を対象とした余裕深度処分施設については、実現に向けた環境整備が進められている<sup>1)</sup>。その施設では、埋設対象廃棄物を長期にわたり閉じ込めるとともに、移行抑制が必要な放射性核種が含まれているため、数万年単位での性能評価が求められている<sup>2)</sup>。

このような背景の中、これらの施設へモルタルやコンクリートを適用するための材料や配合検討も既に開始されている<sup>3)</sup>。その報告の中では配合設計の方針として、強度発現性、物理・化学的性能、ひび割れの抑制および施工性を特性とし、例えば、圧縮強度を大きくする、適切な凝結時間とする、乾燥収縮を抑制するなどの具体点を掲げて検討が実施されている。その配合設計方針を満足するための構成材料として、セメントには水和熱や自己収縮抑制の観点から低熱ポルトランドセメントを、混和材には断熱温度上昇量や水の拡散係数の観点から、フライアッシュをセメントの30%置換で使用することを選定している。これら材料を使用したコンクリートの特性についての報告<sup>4)</sup>も行われており、余裕深度処分施設適用に向けたデータ蓄積も進められている。

一方、上記材料の検討の中でひび割れ抑制を目的として、膨張材の評価も実施されている。しかしながら、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを30%置換した場合、従来の低添加型膨張材を使用すると過膨張となり圧縮強度が低下したことが判明したために、膨張材の改良を実施し、それをういた特性について検討を行い、その結果が報告されている<sup>3)</sup>。過膨張や強度低下といった現象は、今回の材料の組み合わせ以外にも報告がなさ

れており、例えば、中庸熱ポルトランドセメントとフライアッシュの組み合わせに膨張材を使用した場合<sup>5)</sup>や、環境温度 5℃ではあるが低熱ポルトランドセメントや中庸熱ポルトランドセメント単独に膨張材を使用した場合<sup>6)</sup>など、主として低発熱形の結合材料と膨張材を使用する場合にその現象が見受けられることが報告されている。その対策としては膨張材の単位量を低減することが考えられている<sup>5)</sup>が、膨張材の単位量に対する膨張ひずみの発現が敏感という課題が挙げられる。そのため、従来の低添加型膨張材と同量の使用量で所要の品質が得られる膨張材が望まれているのではないかと考えられる。

そこで本研究では、低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを30%置換した場合、従来の低添加型膨張材の標準使用量となる単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> で所要の品質が得られるように、新たに膨張材を試製し、その評価を行い、それらを使用したコンクリートの環境温度 10~30℃における基本特性について検討を行った。また試製した膨張材の検討およびそれを選定する中で、過膨張の原因についての一考察も行った。本研究は、低レベル放射性廃棄物処分施設等における低発熱形の結合材料を使用する場合の膨張材の適用に資することを目的としたものである。

## 2. 実験概要

本検討ではまず膨張材の試製をし、その評価を行い選定した。その選定した膨張材と低熱ポルトランドセメントにフライアッシュを30%置換した場合のコンクリートの基本特性について、単位膨張材量および環境温度の影響について検討した。なお、ここではコンクリートの基

\*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 混和材料グループ 主任研究員 博 (工) (正会員)

\*2 清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部 課長 工修 (正会員)

\*3 清水建設株式会社 土木技術本部 基盤技術部長 (正会員)

\*4 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 混和材料グループ サブリーダー 博 (工) (正会員)

本特性に関する実験概要について述べ、膨張材の試製に関する内容については後述する。

## 2.1 使用材料

表-1 に使用材料を示す。セメントには低熱ポルトランドセメント（以下、LC）を、混和材料にはフライアッシュ（セメントの内割 30% 置換、以下 FA）、膨張材（以下、LR）および石灰石微粉末（以下、LS）を使用した<sup>3)</sup>。細骨材には石灰石砕砂（以下、S）を粗骨材には石灰石砕石（以下、G）を使用した。混和剤にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。表-2 に LC および FA の化学成分を、表-3 には骨材の物理的性質を示す。

## 2.2 コンクリート配合<sup>3),4)</sup>

表-4 にコンクリート配合を示す。コンクリート配合は、水結合材比 45% とし、単位水量を固定して、目標スランプフロー 650±50mm、目標空気量 4.5±1.5% となるように、混和剤添加量の調整により決定した。

## 2.3 試験項目とその方法

### (1) スランプフローおよび空気量

スランプフローは JIS A 1150、空気量は JIS A 1128 に準拠した。

### (2) 凝結時間

凝結時間は JIS A 1147 に準拠した。試験は単位膨張材量 0 および 20kg/m<sup>3</sup> の 2 水準とした。

### (3) 拘束膨張ひずみ

拘束膨張ひずみは JIS A 6202 付属書 2（参考）の A 法に準拠して行った。測定材齢は 1, 2, 3, 7 および 14 日とした。環境温度 10℃ は材齢 28 日も測定した。養生条件は所定の材齢までその環境温度下での水中養生とした。

### (4) 圧縮強度

圧縮強度は JIS A 1108 に準拠して行った。測定材齢は 2, 7, 28 および 91 日とした。供試体の脱型は材齢 24 時間で行い、その間の養生は各環境温度下での封かん養生とした。脱型後の養生は、所定の材齢までその環境温度下での水中養生とした。

## 2.4 実験水準

表-5 にコンクリートの基本特性に関する実験水準を示す。単位膨張材量の影響については 0, 15, 20 および 25kg/m<sup>3</sup> の 4 水準、環境温度の影響については 10, 20 および 30℃ の 3 水準とした。

表-1 使用材料

セメント	LC：低熱ポルトランドセメント (密度：3.22g/cm <sup>3</sup> )
フライアッシュ	FA：フライアッシュ（JIS II 種品） (密度：2.18 g/cm <sup>3</sup> )
膨張材	LR：試製膨張材（密度：3.16 g/cm <sup>3</sup> )
石灰石微粉末	LS：石灰石微粉末 (密度：2.70g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S：青森県産石灰石砕砂
粗骨材	G：青森県産石灰石砕石
高性能 AE 減水剤	SP：ポリカルボン酸系
空気量調整剤	AE：界面活性剤

表-2 LC および FA の化学成分

種類	化学成分 (%)						
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O
LC	26.4	2.7	2.5	63.8	0.6	2.5	0.4
FA	57.8	24.3	5.7	3.3	1.8	0.6	1.8

表-3 骨材の物理的性質

骨材種類	表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	粒形判定実積率 (%)	粗粒率	微粒分量 (%)
S	2.67	1.03	56.8	2.70	2.1
G	2.70	0.41	59.9	6.57	0.7

表-5 実験水準

環境温度 (°C)	単位膨張材量 (kg/m <sup>3</sup> )	試験項目			
		フロー空気量	凝結	拘束膨張ひずみ	圧縮強度
20	0	○	○	○	○
	15	○	—	○	○
	20	○	○	○	○
	25	○	—	○	○
10,30	0	○	○	—	○
	20	○	○	○	○

表-4 コンクリート配合

環境温度 (°C)	スランプフロー (mm)	Air (%)	W/B (%)	W/P (%)	LS/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
							W	粉体 P			S	G
								結合材 B				
								LC	FA	LR		
20	650 ± 50	4.5 ± 1.5	45	30	50	53.4	160	107	—	178	838	780
									15			
									20			
									25			
									—			
10,30								—				
								20				

### 3. 膨張材の試製およびその評価

#### 3.1 膨張材の試製

LCに膨張材を混和した場合、LCは普通ポルトランドセメントに比較して強度発現が遅いため、膨張力を拘束するマトリックスの強度が小さいため、大きな膨張ひずみを発現すると報告されている<sup>7)</sup>。今回検討対象としたLC+FAの組み合わせにおいても同様な現象によるものではないかと推察し、強度発現が遅いと考えられる材料に膨張材を混和した場合の水和反応にも着目し、膨張材の試製とその評価をすることとした。膨張材の試製にあたっては、従来の石灰系低添加型膨張材（以下、EX）を混和した場合および膨張材を混和しない場合（以下、PL）の性状把握も踏まえて実施した。

LC+FAに膨張材を混和した場合の評価には、材齢初期の反応性を連続的に測定できる伝導式微少熱量計による水和発熱を選定するとともに、コンクリートによる拘束膨張ひずみおよび圧縮強度試験も実施した。その両結果を踏まえて膨張材を選定した。水和発熱特性の検証はセメントペーストを用いて試験し、LCにFAを30%置換、膨張材は単位膨張材量20kg/m<sup>3</sup>相当を混和、水結合材比はコンクリート配合と同様に45%とし、材齢48時間まで測定した。なお、表-1に示すように混和材料としてLSも使用しているが、LSの有無に関係なく過膨張による強度低下現象が起きていることから、水和発熱の評価はLC+FAに着目して行った。一方、コンクリート試験は実配合による過膨張の現象を把握するために、表-4に示す単位膨張材量20kg/m<sup>3</sup>の配合を使用、SP添加量は一定(P×0.6%)とし、材齢7日の拘束膨張ひずみ(JIS A 6202 付属書2(参考)のA法)と圧縮強度試験(JIS A 1108, 材齢1, 2および28日)を実施した。なお、本研究では2水準の膨張材（以下、AおよびB）を試製して評価を行った。表-6には本研究で使用した膨張材の物理化学的性質を示す。

#### 3.2 水和発熱性状

図-1に水和発熱曲線を、表-7に水和発熱曲線の結果を取りまとめたものを示す。表中の立上り時間は発熱ピークに向けて曲線が立ち上がり始めた時間を、到達時間はそのピークに達した時間を示している。LC+FAに膨張材を混和した場合、PLと比較して、いずれの膨張材も反応が促進しており、LC単味に膨張材を混和した既往の報告<sup>8)</sup>と同様な結果になった。EXを混和した場合にはより反応が促進されており、水和発熱ピーク後の発熱量も大きい結果になった。試製した膨張材は、反応が促進されているが、その後の反応はEXよりも緩やかなものであった。材齢24および48時間の積算発熱量は、EXが最も高く、次にA、Bの順となり、BはPLに近い結果にあった。

#### 3.3 拘束膨張ひずみおよび圧縮強度

図-2に拘束膨張ひずみの試験結果を示す。EXを混和した場合には最も大きな膨張ひずみを示し、従来から報告<sup>3)</sup>されている結果と同様であった。試製した膨張材Aは膨張ひずみが300×10<sup>-6</sup>程度、Bは200×10<sup>-6</sup>程度となった。試製した膨張材においても拘束膨張ひずみは異なるものであった。一方、図-2から大きな膨張ひずみを示したものは、材齢1日から2日にかけての膨張ひずみの伸びが大きい傾向にある。図-3には材齢1日から2

表-6 膨張材の物理化学的性質

種類	化学成分 (%)					比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	
EX	4.6	1.2	0.8	76.2	16.0	3450
A	6.9	1.7	1.0	65.5	23.4	4320
B	8.7	2.1	1.3	65.6	20.4	4210

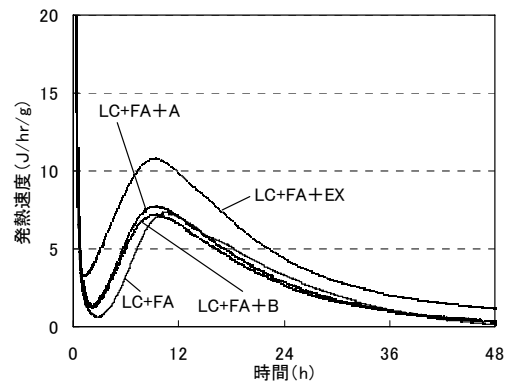


図-1 水和発熱曲線

表-7 水和発熱曲線試験結果

水準	立上り時間 (h)	到達時間 (h)	発熱速度ピーク値 (J/hr/g)	積算発熱量 (J/g)	
				24h	48h
EX	1.5	9.2	10.7	188	242
A	2.7	9.8	7.6	143	178
B	2.8	9.4	7.2	125	151
PL	3.1	11.1	7.3	122	154

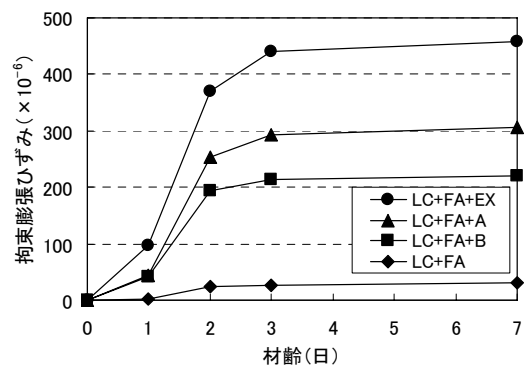


図-2 拘束膨張ひずみ(膨張材種類)

日にかけての膨張ひずみの伸びを示す。大きな膨張ひずみを示したものは、その伸びが  $200 \times 10^{-6}$  を超える。この伸びの大きさは膨張材の反応と関連していると推察され、水和発熱結果と関連させた場合、反応速度の速いもの、発熱量の高いものほどその傾向にあった。

図-4 に圧縮強度試験の結果を示す。材齢 28 日圧縮強度は大きな膨張ひずみを示したもののほど、PL に対する強度比が低い結果であった。初期強度は EX が材齢 1 日では試験実施が不可能であり、材齢 2 日でも非常に低い結果であった。試製した膨張材は材齢 1 日では PL と同程度かやや小さく、材齢 2 日では A は PL もよりも低い結果となり、B はほぼ同程度であった。水和反応の結果から、反応が促進されたために圧縮強度が高くなることも予想されたが、そのような結果とはならず、材齢初期に低い強度結果を示したものは材齢 28 日の圧縮強度も低い結果にあった。膨張材の混和により水和が促進しているものの、マトリックス強度を高くするほどの LC+FA 自体の反応は促進していない可能性があるものと考えられる。

以上の試験結果を踏まえ、LC+FA に適切な膨張材を選定するために、過膨張の原因についての考察を行った。

LC+FA に膨張材を混和すると、PL と比較し反応が促進した。本研究の範囲内では、材齢初期での拘束膨張ひずみの伸びの顕著なものが所定の材齢において過膨張となっており、膨張材の反応と関連しているものと考えられる。その一方で反応が促進し発熱量が高くなっているものの、圧縮強度は高くなっておらず、材齢初期ではその反応による膨張力を拘束するほどの LC+FA のマトリックス強度は得られていないことが推察され、膨張材の反応が上回っているのではないかと考えられた。そのためここでは膨張材の反応を PL との差として考えた場合に、膨張材を混和した場合の水和速度や発熱量について、膨張材種類で比較してみると、その差が大きいものほど過膨張になる傾向が見受けられた。膨張挙動は膨張成分とセメントマトリックスの水和速度のバランスに依存することが指摘されている<sup>9)</sup>。本結果をこの報告内容と照らし合わせて考えてみると、そのバランスに大きな相違があった場合に過膨張するのではないかと考えられ、本検討内では膨張発現速度がセメントマトリックス強度の発現速度を上回ったために、硬化体の組織形成に影響を及ぼし、その後の組織の密実化に結び付かなかったのではないかと推察され、その結果、過膨張および圧縮強度の低下を引き起こしたものと考えられた。したがって LC+FA に混和する膨張材としては、PL と比較して水和発熱や発熱量の差が小さくなるよう緩やかに反応する膨張材が適していると考えられ、本検討内においては表-6 に示すように、化学成分の調整およびその調整に伴う比

表面積の最適化を行い、EX や A と比較して、その反応が抑制された膨張材 B のようなものが適切なのではないかと考えられた。ただし本検討では、例えば水和速度の絶対値や水和物の影響などとの関連性までには至っておらず、この過膨張を引き起こす機構を明確にするには、それらと関連させたデータ蓄積が必要であり、今後の検討課題であると考えられる。

本検討結果から、LC に FA を 30% 置換した場合の適切な膨張材としては、PL と比較して、水和速度や発熱量の差が小さい膨張材 B (以降、LR) を選定し、それを使用したコンクリートの基本特性について検討を行った。

#### 4. LC+FA+LR を使用したコンクリートの基本特性

##### 4.1 フレッシュ性状および凝結時間

表-8 にフレッシュ性状試験の結果を示す。スランプフローおよび空気量は所要の品質を満足する結果であった。SP 添加量は LR を使用することにより、PL の場合よりもやや増加する結果であった。一般に膨張材の使用の有無により、混和剤の使用量に差は認められないとしている<sup>10)</sup>。本検討で使用した LR は従来の EX と比較して、ブレーン比表面積がやや高いものであり、その影響を受けた結果とも推察されるが、混和剤との相互作用も含め、この点は今後の検討課題であると考えられる。

図-5 に凝結試験の結果を示す。凝結時間は LR を使用した場合、環境温度によらず PL と同程度であった。

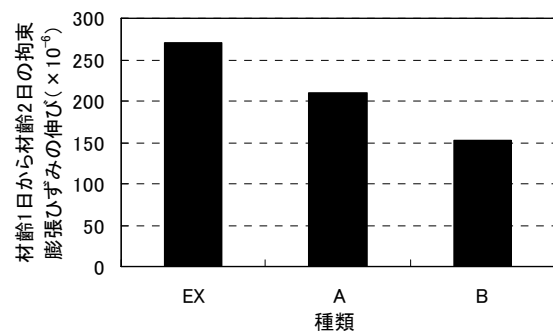


図-3 拘束膨張ひずみの伸び (材齢 1 日から 2 日)

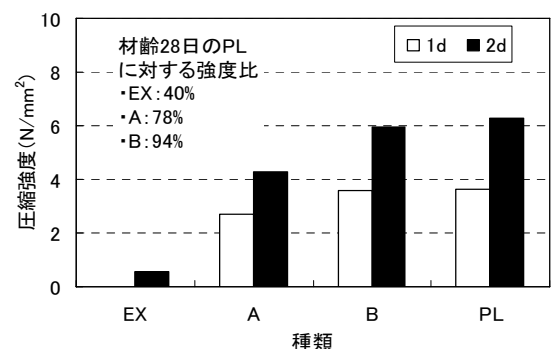


図-4 圧縮強度 (膨張材種類)

水和発熱の検証においては混和剤を使用していないが、膨張材を混和することで、PLと比較して水和反応がやや促進しているため、凝結時間は早くなることも考えられた。しかし、表-8 に示すようにコンクリート試験においては、所要の流動性を確保するためのSP添加量がLRの方がPLよりもやや多くなっており、本結果はこの影響を受けたものではないのかと考えられる。

#### 4.2 拘束膨張ひずみ

図-6 に環境温度 20°C で LR の単位膨張材量を変化させた場合の材齢 14 日までの拘束膨張ひずみを示す。なお、本検討では実製造における別計量によるミキサ投入への施工性や均一に練り混ぜられる量などを考慮し<sup>11)</sup>、単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> で土木学会が定める収縮補償用コンクリートの標準値<sup>12)</sup>である材齢 7 日で 150×10<sup>-6</sup>~250×10<sup>-6</sup> が得られることを目標としている。単位膨張材量が 25kg/m<sup>3</sup> では拘束膨張ひずみは 300×10<sup>-6</sup> を超える結果であった。単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> では拘束膨張ひずみが 219×10<sup>-6</sup>、単位膨張材量 15kg/m<sup>3</sup> では 150×10<sup>-6</sup> であった。単位膨張材量 25kg/m<sup>3</sup> では過膨張となり、収縮補償用コンクリートの標準値である 150×10<sup>-6</sup>~250×10<sup>-6</sup> を満たしたのは単位膨張材量 15~20kg/m<sup>3</sup> であった。単位膨張材量 15kg/m<sup>3</sup> においても、上記収縮補償の範囲内ではあったが、本検討では前述した背景を踏まえ、単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> での使用を目標として掲げていることから、環境温度の影響では単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> で検討を実施した。

図-7 に単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> における環境温度の影響を示す。環境温度 10~30°C の範囲では材齢 7 日の拘束膨張ひずみは上記の収縮補償となる標準値の範囲内であった。また材齢 7 日以降も拘束膨張ひずみもほぼ一定であることも確認された。

#### 4.3 圧縮強度

図-8 に単位膨張材量を変化させた場合の圧縮強度を示す。過膨張を示した単位膨張材量 25kg/m<sup>3</sup> では膨張材無の水準と比較すると、材齢 28 日および 91 日での圧縮強度の低下が認められた。一方、単位膨張材量 15kg/m<sup>3</sup> および 20kg/m<sup>3</sup> では圧縮強度の低下は生じておらず、膨張材無の場合と同程度であった。

図-9 に単位膨張材量 20kg/m<sup>3</sup> において環境温度を変化させた場合の圧縮強度を示す。環境温度 10~30°C の範囲内では、いずれも LR を使用した水準では圧縮強度の低下は認められず、膨張材無の場合と同程度であることが確認された。

以上のように、LC、FA および試製した膨張材を使用したコンクリートの基本特性について検討を行った結果、拘束膨張ひずみは所要の範囲内にあることが確認され、圧縮強度は膨張材無の場合と同程度であった。今後は、

表-8 フレッシュ性状

環境温度 (°C)	単位膨張材量 (kg/m <sup>3</sup> )	スランブフロー (mm)	空気量 (%)	SP 添加量 (P×%)
20	0	690×680	5.5	0.57
	15	695×670	5.1	0.57
	20	660×650	5.3	0.60
	25	655×640	6.0	0.60
10	0	660×630	5.5	0.57
	20	655×610	5.5	0.60
30	0	670×670	5.5	0.57
	20	690×690	6.0	0.60

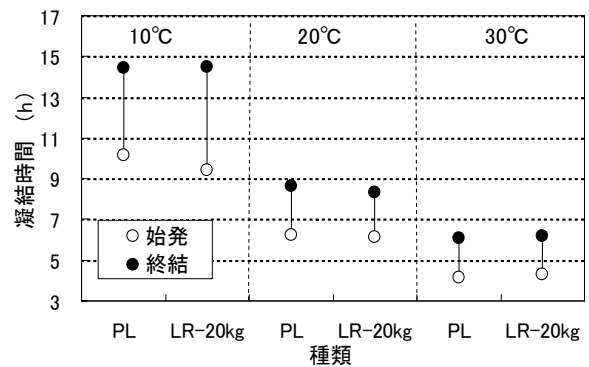


図-5 凝結時間

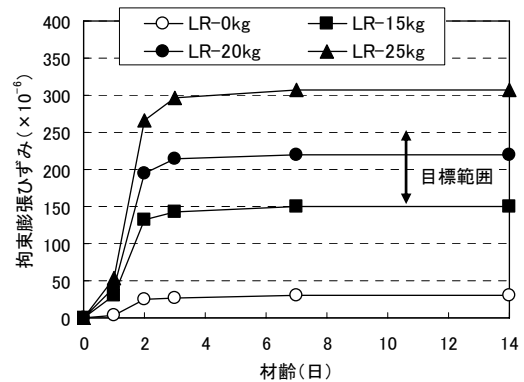


図-6 拘束膨張ひずみ (膨張材量の影響)

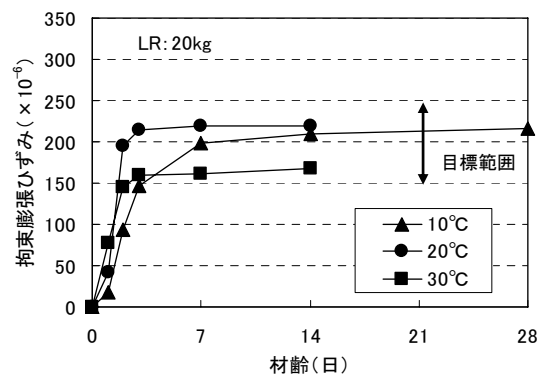


図-7 拘束膨張ひずみ (環境温度の影響)

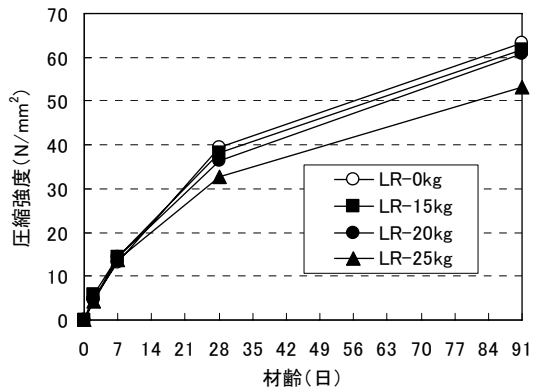


図-8 圧縮強度（膨張材量の影響）

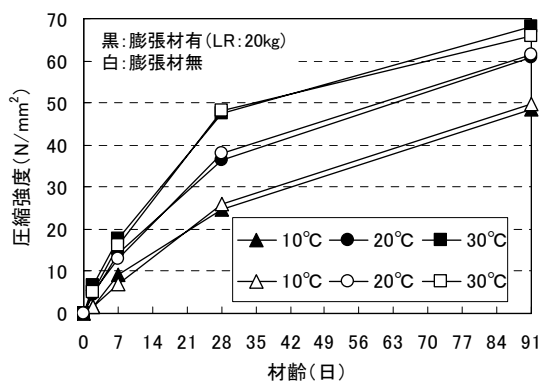


図-9 圧縮強度（環境温度の影響）

これらを使用したコンクリートの特性について更なる検証を行い、データ蓄積とその拡充を行う予定である。

## 5. まとめ

本報告は、低発熱形の結合材料を使用する場合の膨張材の適用を資することを目的に、LCにFAを30%置換した場合、単位膨張材量  $20\text{kg/m}^3$  で所要の品質が得られるように、新たに膨張材を試製し、その評価を行い、それらを使用したコンクリートの基本特性について検討を行った。その結果、従来の低添加型膨張材と比較して、その反応を緩やかになるように試製された膨張材を適切に使用することにより、拘束膨張ひずみは所要の品質を満足し、圧縮強度は膨張材無の場合と同程度であることが確認できた。

謝辞：本研究を行うにあたり BASF ポゾリス株式会社馬場勇介氏、太平洋セメント株式会社谷村充氏にご助力頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 社団法人土木学会エネルギー委員会：余裕深度処分における地下施設の評価，品質管理の考え方，pp.38-40，2009
- 2) 庭瀬一仁，杉橋直行，辻幸和：低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層の実規模試験による初期性能の設定，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.3，pp.53-61，2010
- 3) 庭瀬一仁，杉橋直行，辻幸和：低レベル放射性廃棄物処分施設の低拡散層に用いる高流動モルタルの室内配合選定，コンクリート工学論文集，Vol.21，No.3，pp.43-51，2010
- 4) 岡本大，杉橋直行，庭瀬一仁，西川洋二，枝松良展，山本武志：品質の異なるフライアッシュを使用したモルタルの諸特性について（その1,その2），土木学会第65回年次学術講演会，CS部門，pp.73-76，2010
- 5) 工藤淳，宮田修司，橋本秀一，金澤亮一，横関康祐，佐々木敏幸，佐々木崇：低発熱型混合セメントと膨張材を使用したコンクリートの諸特性，土木学会第66回年次学術講演会，CS部門，pp.95-96，2011
- 6) 棚橋達治，西元央：高性能膨張材を用いた各種コンクリートのひび割れ抵抗性，第61回セメント技術大会講演要旨，pp.222-223，2007
- 7) 狩野周，細田暁，八巻大介：低熱セメント系膨張コンクリートの膨張性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.221-226，2006
- 8) 串橋和人，石田積，三原敏夫，萩原広俊：新規膨張材を添加した各種セメントの特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.307-312，1997
- 9) M.D.Cohen and B.Mobasher：Effects of Sulfate and Expansive Clinker Contents On Expansion Time of Expansive-Cement Paste，Cement and Concrete Research，Vol.21，pp.147-157，1991
- 10) 公益社団法人日本コンクリート工学会：高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書，2011
- 11) 庭瀬一仁，杉橋直行，矢ノ倉ひろみ，辻幸和：低レベル放射性廃棄物処分施設に用いる低拡散層のひび割れ制御に関する研究，高性能膨張コンクリートの性能評価とひび割れ制御システムに関する研究委員会報告書，シンポジウム論文集，pp.415-422，2011
- 12) 社団法人土木学会：コンクリートライブラリー75，膨張コンクリートの設計施工指針，1993