

# 論文 低温環境下における収縮ひび割れ低減に有効なコンクリートに関する研究

百瀬 晴基<sup>\*1</sup>・閑田 徹志<sup>\*2</sup>・鈴木 康範<sup>\*3</sup>・棚橋 達治<sup>\*4</sup>

要旨：低温環境下および凍結融解の危険性がある地域において適用できるひび割れ抵抗性の高いコンクリートを検討することを目的とし、膨張材と中庸熱ポルトランドセメント，膨張材と人工軽量骨材，膨張材と収縮低減剤塗布の組合せを検討した。養生温度 5 における拘束試験 B 法において，今回検討した 3 種類の中では最終的な収縮ひずみが最も小さい結果となった膨張材と中庸熱ポルトランドセメントを併用したコンクリートを対象として，養生温度 5 および 10 における拘束試験 A 法を実施し，低温時における強度発現および膨張特性を把握する共に，適正膨張材量の目安を得た。

キーワード：膨張材，中庸熱ポルトランドセメント，人工軽量骨材，収縮低減剤，養生温度

## 1. はじめに

近年，RC造建築構造物において，耐久性の低下，漏水の原因，美観の低下に大きく影響する収縮ひび割れへの関心が高まっており，ひび割れのないRC造建築構造物への需要が増大している。このような需要に応えるべく，高いひび割れ抵抗性を付加したコンクリートとして，膨張材と低熱ポルトランドセメントを併用したコンクリート(以下，LE)，膨張材と収縮低減剤を併用したコンクリート(以下，NES)を検討しその効果が高いことを確認している<sup>1)</sup>。しかしながら，LEでは低温時における初期の強度発現が乏しいことが懸念され，NESでは収縮低減剤による耐凍結融解性能の低下が懸念されることから<sup>2)</sup>，その適用範囲が限定されているのが実状である。

本論では，低温環境下および凍結融解の危険性がある地域において適用できるひび割れ抵抗性の高いコンクリートを検討することを目的とし，膨張材と中庸熱ポルトランドセメント，膨張材と人工軽量骨材，膨張材と収縮低減剤塗布の組合せを検討し，これらのコンクリートにおける低温時の膨張収縮挙動を確認した。

## 2. 養生温度 5 における拘束膨張収縮試験

### 2.1 実験概要

表 - 1 に実験要因と水準を示す。膨張材と中庸熱ポルトランドセメント，膨張材と人工軽量骨材，膨張材と収縮低減剤塗布の組合せを検討するべく，表 - 1 に示す計 7 調合について，養生温度 5 における拘束膨張収縮試験を実施した。

膨張材と人工軽量骨材の組合せでは，吸水率が違う 2 種類の骨材を使用し，混入量は粗骨材に対して 10%または 20%の容積置換とした。膨張材と収縮低減剤塗布の組合せでは，塗布量を 100g/m<sup>2</sup>，200g/m<sup>2</sup> とし，比較対象として収縮低減剤を混入した NES についても実験を実施した。

### 2.2 実験方法

本実験は，JIS A 6202 コンクリート用膨張材に明記される膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法 B 法(以下，拘束試験 B 法)に準拠した。試験体は，図 - 1 に示すネジ鉄筋と拘束端版から構成される 100 × 100 × 400mm の試験体とし，1 調合につき 3 体作製した。室温 5 の恒温室において練混ぜを行い，打設直後から 5 封緘養生，材齢 7 日以降は 5 RH60%の気乾養生とした。

\*1 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 研究員 (正会員)

\*2 鹿島建設(株) 技術研究所 建築生産グループ 上席研究員 Ph.D (正会員)

\*3 住友大阪セメント(株) セメントコンクリート研究所 グループリーダー 工博 (正会員)

\*4 住友大阪セメント(株) セメントコンクリート研究所 研究員

ネジ鉄筋の中央部にひずみゲージを貼付し、始発時刻を 0 日としてひずみの計測を行った。なお、収縮低減剤の塗布は、乾燥面 4 面を対象とし、材齢 7 日の乾燥開始時点で実施した。

また、1 調合につき 100×200mm の試験体を 9 体作製し、それぞれ材齢 3、28、91 日において、3 体ずつ圧縮強度試験(JIS A 1108)及びヤング係数試験(JIS A 1149)に供した。養生条件は、拘束試験 B 法と同じとした。

### 2.3 調合および使用材料

表 - 2 に計画調合を示す。水結合材比は 50%，単位水量は 170kg/m<sup>3</sup>，セメント量は 320kg/m<sup>3</sup>，膨張材量は 20kg/m<sup>3</sup> とし、全ての調合において同じとした。人工軽量骨材は粗骨材に対して 10% または 20%の容積置換とした。

表 - 3 に使用材料を示す。セメントは、MN では中庸熱ポルトランドセメント，その他の調合では普通ポルトランドセメントとし、粗骨材は硬質砂岩，膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型膨張材，収縮低減剤は低級アルコール系を使用した。人工軽量骨材は吸水率が 28%，18%の 2 種類の骨材を使用し、それぞれ十分吸水させ表乾状態として使用した。

### 2.4 実験結果

#### (1) 膨張挙動

図 - 2 および図 - 3 に最大膨張ひずみ結果を示す。収縮低減剤の塗布作業は乾燥開始時点で実施しており、図中の最大膨張ひずみは乾燥開始直前の値であるため NN100 および NN200 は膨張材のみを混入したコンクリートの膨張量を表す。

最大膨張ひずみ(以下、 $\epsilon_{EX}$ )は、NA20%が最も大きく、膨張材のみを混入したコンクリートの膨張量を表す NN100 および NN200 に対して 50  $\mu$  程度上回っていた。膨張材と人工軽量骨材を併用したコンクリートは  $\epsilon_{EX}$  が増大する現象が確認できた。また、吸水率の大きい人工軽量骨材 A の方が、B に比べて  $\epsilon_{EX}$  が大きく、人工軽量骨材量が多くなるに従って、その  $\epsilon_{EX}$  も増大する結果となった。この現象の要因として、人工軽量骨材によるヤング係数の低下が考えられ

表 - 1 実験要因と水準

NO	記号	セメント種類	膨張材 (kg/m <sup>3</sup> )	粗骨材	収縮低減剤	
1	MN	中庸熱ポルトランドセメント	20	普通骨材	-	
2	NA10%	普通ポルトランドセメント		人工軽量骨材A 10%容積置換	-	
3	NA20%			人工軽量骨材A 20%容積置換	-	
4	NB10%			人工軽量骨材B 10%容積置換	-	
5	NN100			普通骨材	100g/m <sup>2</sup> 塗布	
6	NN200					200g/m <sup>2</sup> 塗布
7	NN6					6kg/m <sup>3</sup> 混入

表 - 2 計画調合

記号	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
	水	収縮低減剤	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	軽量骨材
1	170	-	320	20	785	1007	-
2	170	-	320	20	780	906	75
3	170	-	320	20	780	806	150
4	170	-	320	20	780	906	43
5	170	-	320	20	780	1007	-
6	170	-	320	20	780	1007	-
7	170	6	320	20	780	1007	-

\*膨張材：セメント量の外割、収縮低減剤：単位水量の内割  
 軽量骨材：粗骨材量の外割、水結合材比：50%、目標空気量：4.5%

表 - 3 使用材料

種類	物性等
普通ポルトランドセメント	密度：3.16g/cm <sup>3</sup>
中庸熱ポルトランドセメント	密度：3.21g/cm <sup>3</sup>
細骨材	砕砂 表乾密度：2.64g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	奥多摩産硬質砂岩 表乾密度：2.65g/cm <sup>3</sup>
人工軽量骨材A	表乾密度1.98g/cm <sup>3</sup> 、吸水率28%
人工軽量骨材B	表乾密度1.12g/cm <sup>3</sup> 、吸水率18%
膨張材	エトリンガイト・石灰複合系 密度：3.20g/cm <sup>3</sup>
収縮低減剤	低級アルコール系
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

表 - 4 強度試験結果

記号	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			ヤング係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )		
	材齢(日)			材齢(日)		
	3	28	91	3	28	91
MN	7.9	24.7	36.0	14.0	26.2	29.6
NA10%	13.8	39.0	45.8	17.1	28.0	29.4
NA20%	13.5	39.3	48.2	18.4	25.5	27.9
NB10%	13.4	36.7	44.0	19.9	28.4	32.7
NN100 NN200	13.7	36.5	43.0	19.7	27.9	30.7
NN6	9.6	29.0	34.3	14.7	25.4	28.5

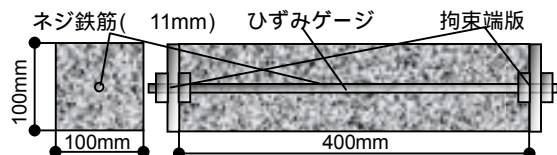


図 - 1 試験体詳細図

るが、本実験における人工軽量骨材の混入量は僅かであり、表 - 4 に示す様に材齢 3 日のヤング係数に対する人工軽量骨材の影響は小さく、ヤング係数以外の要因により膨張量が増加したと推測される。ヤング係数以外の要因として、軽量骨材の内部養生効果により膨張材の反応を促進したことも挙げられる。また、MN, NN6 は既往の文献にあるように NN100 および NN200 に比べて  $\epsilon_{EX}$  が大きいことが確認できた<sup>13)</sup>。

図 - 2 から、MN, NA10%, NA20%は材齢 7 日時点で  $\epsilon_{EX}$  の勾配が他の調合に対して大きく、養生期間を長く設定することにより、今後更なる  $\epsilon_{EX}$  の増大が期待できる。

### (2) 収縮挙動

図 - 4 および図 - 5 に収縮ひずみ結果を示す。図中に、最大膨張時を基点とした収縮ひずみ(以下、 $\epsilon_{sh}(t_{EX})$ )、材齢 0 日を基点とした収縮ひずみ(以下、 $\epsilon_{sh}(t_0)$ )を示す。

$\epsilon_{sh}(t_{EX})$ は NA20%が最も大きな値を示し、膨張材と人工軽量骨材を併用したコンクリートの中では、 $\epsilon_{EX}$  が大きいコンクリートほど、 $\epsilon_{sh}(t_{EX})$  が大きい結果となった。収縮低減剤を塗布した NN100 および NN200 は、収縮低減剤を混入した NN6 に比べて  $\epsilon_{sh}(t_{EX})$  が大きく、顕著な収縮低減効果が得られない結果となった。既往の文献<sup>4)</sup>では、厚さが 40mm を超えるモルタルにおいては、収縮低減剤を塗布することによる収縮低減効果は小さくなるとの報告があり、本実験における試験体は塗布面積に対する試験体断面積が大きく収縮低減剤の塗布が効果的でない体積表面積比であったと推測される。

### (3) 各種コンクリートのひび割れ抑制性能

本論ではひび割れ抑制の効果を  $\epsilon_{sh}(t_0)$  により評価するものとし、 $\epsilon_{sh}(t_0)$  が小さい調合程ひび割れ抑制の効果が高いと仮定した。一般的にコンクリートの乾燥収縮率と拘束条件下における乾燥収縮による発生応力は一定程度の相関関係があり、乾燥収縮率が小さいコンクリートは拘束条件下における発生応力も小さいと考えられる。

図 - 5 から、全ての調合の中では、比較対象で

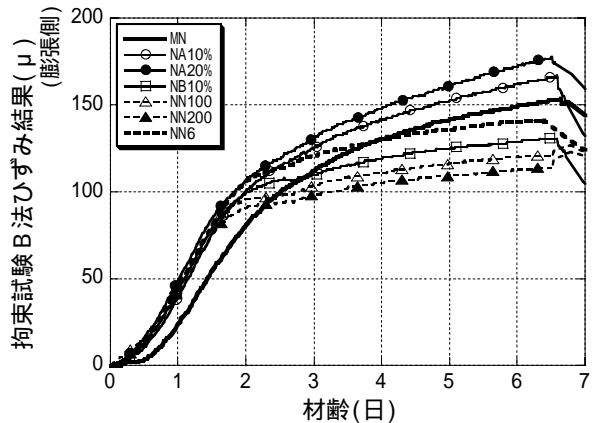


図 - 2 拘束試験 B 法ひずみ結果(膨張過程)

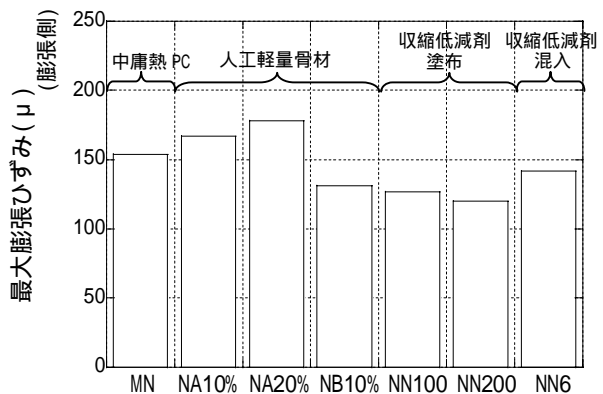


図 - 3 最大膨張ひずみ結果

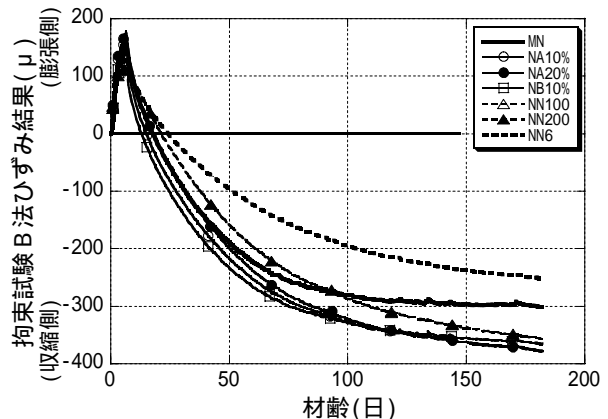


図 - 4 拘束試験 B 法ひずみ結果(収縮過程)

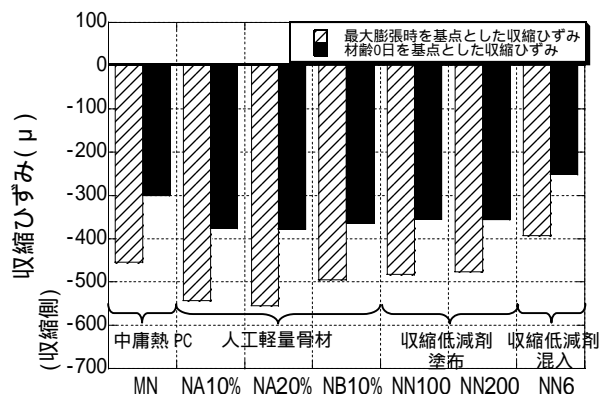


図 - 5 収縮ひずみ結果

ある NN6 が  $sh(t_0)$  が最も小さく、NN6 以外の 3 種類の中では、膨張材と中庸熱ポルトランドセメントを併用したコンクリートである MN が  $sh(t_0)$  が最も小さい結果となった。NN6 は耐凍結融解性能の低下が懸念されることから、凍結融解の危険性がある地域では、膨張材と中庸熱ポルトランドセメントを併用したコンクリートが適していると考えられる。

膨張材と人工軽量骨材を併用したコンクリートは  $EX$  が増加するものの  $sh(t_{EX})$  も増大し、最終的な  $sh(t_0)$  は今回検討した 3 種類の中では大きい結果となった。膨張材と収縮低減剤塗布の組合せは、顕著な収縮低減剤効果が得られず、最終的な  $sh(t_0)$  は膨張材と人工軽量骨材を併用したコンクリートと同程度であった。

### 3. 低温下における膨張ひずみと圧縮強度

#### 3.1 実験概要

今回検討した 3 種類の中で、ひび割れ抵抗性が最も高いと推測される膨張材と中庸熱ポルトランドセメントを併用したコンクリート(以下、ME)について、その強度発現および膨張特性を把握するべく、表 - 5 に示す計 20 ケースについて強度試験および拘束膨張試験を実施した。また、比較対象として、ひび割れ抵抗性が高いものの低温時における強度発現が乏しいことが懸念される膨張材と低熱ポルトランドセメントを併用した LE についても表 - 5 に示す計 9 ケースについて実験を実施した<sup>1)</sup>。

#### 3.2 実験方法

本実験は、JIS A 6202 コンクリート用膨張材に明記される膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法 A 法(以下、拘束試験 A 法)に準拠した。試験体は、図 - 1 に示す試験体とし、1 調合につき 3 体作製した。打設直後から 10 もしくは 5 における封緘養生とし、材齢 3 日以降は 10 もしくは 5 における水中養生とした。

また、1 調合につき 100×200mm の試験体を 3 体作製し、材齢 28 日において、圧縮強度試験(JIS A 1108)に供した。養生条件は拘束試験 A 法

と同じとした。なお、圧縮強度試験を実施する直前に、膨張材による有害なひび割れ発生の有無を目視により確認した。

#### 3.3 調合および使用材料

表 - 6 に計画調合を示す。水結合材比および膨張材量は表 - 5 に示す水準とした。単位水量は 165kg/m<sup>3</sup>、粗骨材量は 935kg/m<sup>3</sup>、空気量は 4.5% とし、全ての調合において一定とした。

表 - 7 に使用材料を示す。セメントは、ME で

表 - 5 実験要因と水準

調合	養生温度	水結合材比 (%)	膨張材量(kg/m <sup>3</sup> )				
			15.0	17.5	20.0	22.5	25.0
中庸熱PC+膨張材 (ME)	10°C	50	○	○	○	-	-
		45	○	○	○	-	-
		40	○	○	○	-	-
	5°C	50	○	○	○	○	○
		45	-	○	○	○	-
		40	-	○	○	○	-
低熱PC+膨張材 (LE)	10°C	50	○	○	○	-	-
		45	○	○	○	-	-
		40	○	○	○	-	-

表 - 6 計画調合

記号	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント+膨張材	膨張材	細骨材	粗骨材
ME-a-50%-b	165	330	15~25	879	935
ME-a-45%-c	165	367	15~22.5	850	935
ME-a-40%-c	165	413	15~22.5	812	935
LE-10-50%-d	165	330	15~20	879	935
LE-10-45%-d	165	367	15~20	850	935
LE-10-40%-d	165	413	15~20	812	935

\* a: 5~10, b: 15~25, c: 15~22.5, d: 15~20

表 - 7 使用材料

種類	物性等
中庸熱ポルトランドセメント	密度: 3.21g/cm <sup>3</sup>
低熱ポルトランドセメント	密度: 3.22g/cm <sup>3</sup>
細骨材	陸砂、表乾密度: 2.60g/cm <sup>3</sup>
	砕砂、表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	砕石、表乾密度: 2.65g/cm <sup>3</sup>
膨張材	エトリンガイト・石灰複合系 密度: 3.20g/cm <sup>3</sup>
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系

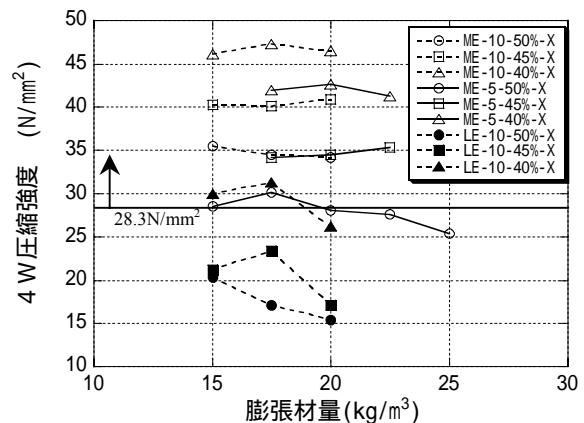


図 - 6 膨張材単位量と 4W 圧縮強度の関係

は中庸熱ポルトランドセメント，LE では低熱ポルトランドセメントとし，膨張材はエトリンガイト・石灰複合系の低添加型膨張材を使用した。

### 3.4 実験結果

#### (1) 強度発現性の検討

図 - 6 に材齢 28 日圧縮強度結果，表 - 8 に各検討結果の一覧を示す。本論では，強度発現性能を満足する値を，材齢 28 日圧縮強度が  $28.3\text{N/mm}^2$  以上とした。これは  $F_c 21\text{N/mm}^2$  を満足する 4W 現場水中養生強度を模擬した値であり，JASS 5 から式(1)，式(2)によって算定される大きい方の値とした。

$$F = F_c + F + 1.73 \quad (1)$$

$$F = 0.85(F_c + F) + 3 \quad (2)$$

ここで， $F$ ：調合強度， $F_c$ ：設計基準強度， $F$ ： $3\text{N/mm}^2$ ， $F$ ：標準偏差  $2.5\text{N/mm}^2$  を表す。

図 - 6 から，養生温度 10 においては，ME では全ての調合において，LE では W/B40% の調合の一部において所要の強度を満足する結果となった。また，養生温度 5 においては，ME では W/B50%，膨張材量  $20\text{kg/m}^3$  以上の調合では所要の強度を満足しない結果となった。

#### (2) 膨張特性の検討

図 - 7 に材齢 7 日膨張ひずみ，図 - 8 に材齢 28 日膨張ひずみを示す。過去の研究において，拘束試験 A 法における適正な膨張範囲として，材齢 7 日における膨張ひずみ  $150 \sim 700 \mu$  を提案している<sup>3)</sup>。この適正範囲は，ひび割れ低減効果を確保する観点から下限値を，膨張材の影響による有害なひび割れおよび強度低下を防止する観点から上限値を設定している。本実験は低温環境下における拘束膨張試験であり，材齢 28 日程度まで膨張挙動は収束しないことから，膨張性能を満足する範囲として，材齢 7 日における膨張ひずみが  $150 \mu$  以上，材齢 28 日における膨張ひずみが  $700 \mu$  以下とした。

図 - 7 から，材齢 7 日膨張ひずみは，ME では膨張材量  $17.5\text{kg/m}^3$  以下の調合において  $150 \mu$  以下のケースがあること，LE では全てのケースにおいて  $150 \mu$  を満足していることが確認できた。

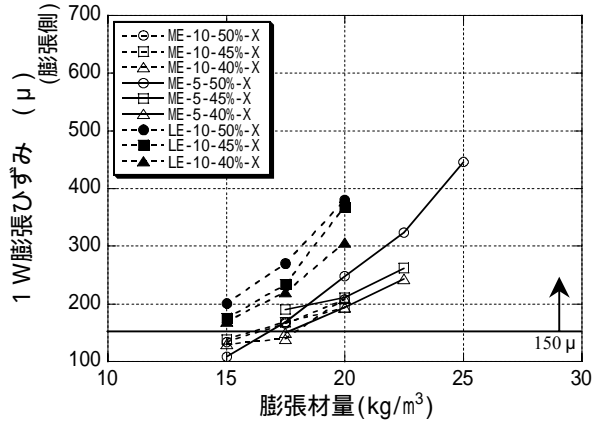


図 - 7 膨張材単位量と 1W 膨張ひずみの関係

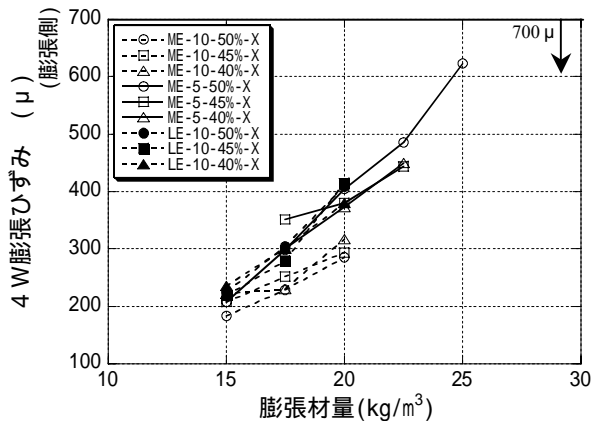


図 - 8 膨張材単位量と 4W 膨張ひずみの関係

表 - 8 各試験結果一覧

記号	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		膨張量 (μ)		ひび割れ有無
	4W	1W	4W	1W	
ME-10-50%-15	○:35.5	×:134	○:184	○:無し	○:無し
ME-10-50%-17.5	○:34.5	○:166	○:229	○:無し	○:無し
ME-10-50%-20	○:34.2	○:208	○:286	○:無し	○:無し
ME-10-45%-15	○:40.3	×:139	○:208	○:無し	○:無し
ME-10-45%-17.5	○:40.1	○:168	○:252	○:無し	○:無し
ME-10-45%-20	○:40.9	○:194	○:294	○:無し	○:無し
ME-10-40%-15	○:46.1	×:130	○:222	○:無し	○:無し
ME-10-40%-17.5	○:47.3	×:140	○:230	○:無し	○:無し
ME-10-40%-20	○:46.5	○:209	○:317	○:無し	○:無し
ME-5-50%-15	○:28.5	×:108	○:208	○:無し	○:無し
ME-5-50%-17.5	○:30.2	○:168	○:298	○:無し	○:無し
ME-5-50%-20	×:28.1	○:249	○:405	○:無し	○:無し
ME-5-50%-22.5	×:27.6	○:324	○:486	○:無し	○:無し
ME-5-50%-25	×:25.4	○:446	○:623	○:無し	○:無し
ME-5-45%-17.5	○:34.2	○:190	○:351	○:無し	○:無し
ME-5-45%-20	○:34.5	○:211	○:381	○:無し	○:無し
ME-5-45%-22.5	○:35.3	○:262	○:444	○:無し	○:無し
ME-5-40%-17.5	○:42.0	○:150	○:301	○:無し	○:無し
ME-5-40%-20	○:42.7	○:194	○:373	○:無し	○:無し
ME-5-40%-22.5	○:41.3	○:244	○:450	○:無し	○:無し
LE-10-50%-15	×:20.4	○:201	○:225	○:無し	○:無し
LE-10-50%-17.5	×:17.1	○:271	○:304	○:無し	○:無し
LE-10-50%-20	×:15.4	○:381	○:409	○:無し	○:無し
LE-10-45%-15	×:21.2	○:176	○:220	○:無し	○:無し
LE-10-45%-17.5	×:23.4	○:235	○:280	○:無し	○:無し
LE-10-45%-20	×:17.1	○:369	○:415	○:無し	○:無し
LE-10-40%-15	○:30.0	○:170	○:236	○:無し	○:無し
LE-10-40%-17.5	○:31.3	○:221	○:300	○:無し	○:無し
LE-10-40%-20	×:26.2	○:307	○:381	○:無し	○:無し

\* 4W 圧縮強度 - ○:  $28.3\text{N/mm}^2$  以上  
 1W 膨張量 - ○:  $150 \mu$  以上  
 4W 膨張量 - ○:  $700 \mu$  以下  
 ひび割れの有無 - ○: 無し

図 - 8, 表 - 8 から, 材齢 28 日膨張ひずみは全てのケースにおいて  $700 \mu$  以下を満足しており, 強度試験体における目視観察においても全ケースにおいてひび割れは認められなかった。

### (3) 膨張材量の適正範囲

図 - 9 に養生温度 10 における ME の適正膨張材量, 図 - 10 に養生温度 5 における ME の適正膨張材量を示す。

図 - 9 から, 養生温度 10 では本実験の範囲において強度発現性に問題がなく, 最低膨張量を確保するため膨張材量  $20\text{kg/m}^3$  または  $17.5\text{kg/m}^3$  を下限値とする必要があることが確認できた。また, 図 - 10 から, 養生温度 5 において水結合材比 45%以下では本実験範囲の膨張材量は全て適正範囲であり, 水結合材比 50%では強度発現および最低膨張量の確保から膨張材量は  $17.5\text{kg/m}^3$  に設定する必要があることが確認できた。以上のことから, 本実験により強度及び膨張量を満足する適正膨張材量の目安を得た。

なお, 本論では膨張材の異常膨張を防止する観点から最大膨張量の上限值として  $700 \mu$  と仮定したが, 実構造物に適用する際には安全側の設計を行うため最大膨張量の限界値を  $700 \mu$  より小さく設定する方が望ましいと考えられる。

## 4. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) 養生温度 5 における拘束試験 B 法の結果から, 今回検討した 3 種類の中では, 膨張材と中庸熟ポルトランドセメントを併用したコンクリートが低温環境下におけるひび割れ抵抗性が高いと推測される。
- (2) 膨張材と人工軽量骨材を併用したコンクリートは膨張量が増大する現象が確認できた。
- (3) 収縮低減剤を塗布したコンクリートは, 収縮低減剤を混入したコンクリートに比べて顕著な効果が得られない結果となった。
- (4) 膨張材と中庸熟ポルトランドセメントを併用したコンクリートについて, 養生温度 5 および 10 における拘束試験 A 法を実施し,

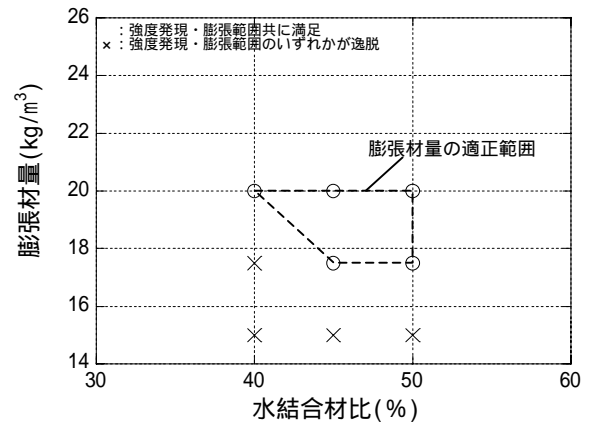


図 - 9 膨張材量の適正範囲 (ME-10 )

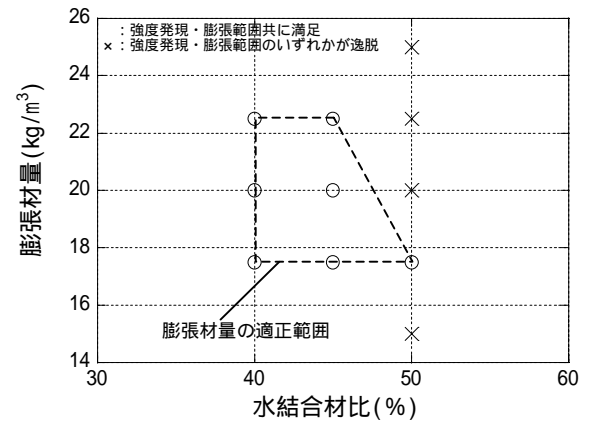


図 - 10 膨張材量の適正範囲 (ME-5 )

低温時における強度発現および膨張特性を把握する共に, 強度および膨張量を満足する適正膨張材量の目安を得た。

## 参考文献

- 1) 百瀬晴基ほか: 膨張材及び収縮低減剤を併用したコンクリートのひび割れ抵抗性に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.587, pp.7-14, 2005.1
- 2) 杉山雅ほか: 乾燥収縮を低減する混和剤を用いたコンクリートの基礎的性状, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, 1986
- 3) 小田部裕一ほか: 各種セメントを用いた膨張コンクリートのひび割れ抵抗性, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.419-424, 2003
- 4) 大濱嘉彦ほか: 収縮低減剤塗布モルタルの長期材齢における乾燥収縮, 日本材料学会学術講演会前刷, Vol.37, No.431, pp.320-321, 1988