

論文 膨張材の粒度がコンクリートの膨張特性に与える影響

栖原 健太郎^{*1}・芦田 公伸^{*2}・吉野 亮悦^{*3}・辻 幸和^{*4}

要旨：膨張材の粒度構成が膨張特性に与える影響を検討するため、膨張材の粒度を変化させてモルタルの長さ変化率を測定した。石灰アウイン複合系の膨張材は、その粒子の大きさに応じて長さ変化率が大きくなることが確認された。また、膨張材の粒度構成と膨張モルタルの膨張率との関係について整理した結果、膨張率は、粒子の個数と表面積との積に関係することが明らかとなった。そして、膨張材の最適な粒度分布についても考察した。

キーワード：膨張材，粒度分布，膨張特性，膨張率

1. はじめに

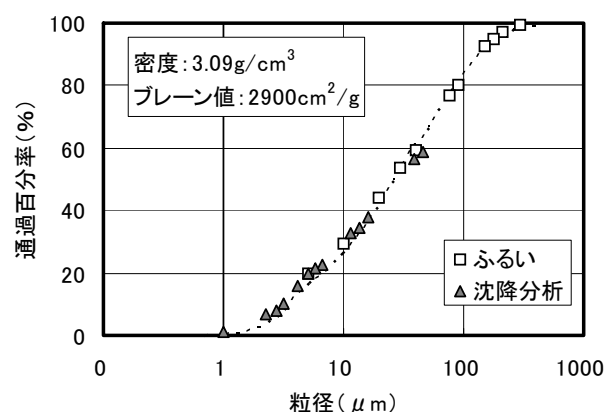
ひび割れ制御を目的としたコンクリート用膨張材は、これまでに 30 年以上の実績を持つ。膨張材を用いたケミカルプレストレスの導入によるひび割れ抑制を期待した 2 次製品用途、収縮補償を目的とした場所打ち用途など、実施工面および学術面のいずれにおいても、広く良好な評価を得ている。

近年、土木構造物においては性能照査型設計が取り入れられたこと、また、建築構造物においては「住宅の品質確保の促進などに関する法律」が制定されたことなどから、コンクリートのひび割れ制御に対する関心が高まっている。また、ひび割れ制御における膨張材の有用性についても、積極的に見直されている。

本文では、石灰アウイン複合系の膨張材の粒度構成が膨張特性に与える影響について実験的に検討し、粒度とモルタルの膨張特性との関連について整理した結果を報告する。また、最適な粒度分布に関する考察を行った。

分けによる直接的な方法、および光の回折や散乱などの物理現象や沈降速度等の粒子の動力学的性質などの粒子径に依存する物理量を測定して間接的に評価する方法¹⁾がある。

膨張材の粒度分布の測定は、(社)セメント協会による JCAS K-03-1996「エア・ジェット式ふるい装置によるセメントの粉末度試験方法」²⁾に従った。また、(社)地盤工学会 JSF T 131「土の粒度試験方法」³⁾による沈降分析により微粒子の測定を実施した。なお、膨張材の水和反応を生じさせないためのアルコール系溶剤を比重



図－1 膨張材の粒度分布

2. 膨張材の粒度分布

粉体の粒度分布を測定する方法には、ふるい

*1 群馬大学大学院 工学研究科 工修（正会員）

*2 電気化学工業（株） 無機材料研究センター 研究部長 工博（正会員）

*3 電気化学工業（株） 無機材料研究センター 主任研究員 工修

*4 群馬大学 工学部建設工学科 教授 工博（正会員）

表－１ 実験水準

記号	単位膨張材量 (kg/m ³)	粒子径 (μ m)	備考
H-0	0	—	比較
H-1	20	0-400	基準
H-2		0-45	
H-3		45-90	
H-4		90-400	
H-5		0-90	

表－２ 使用材料

項目	品名	産地またはメーカー
セメント	普通ポルトランドセメント	T 社製
膨張材	石灰アウイン複合系	D 社製
細骨材	川砂（密度：2.63g/cm ³ ）	姫川水系産
粗骨材	川砂利（密度：2.65g/cm ³ ）	姫川水系産
混和剤	A E 減水剤	N 社製
AE 剤	A E 調整剤	N 社製
水	上水	

表－３ コンクリートの配合（27-12-25N）

	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	混和剤
普通コン	53.5	45.0	4.5	170	318	0	829	997	調整
膨張コン	53.5	45.0	4.5	170	298	20	829	997	調整

1.0 に調整して溶媒とした。

ふるい法および沈降分析法による粒度分布の測定結果を図－１に示す。図－１より、いずれの方法も同一の粒度分布を示したことから、本文では、この結果を対象とする膨張材の粒度分布として扱う。

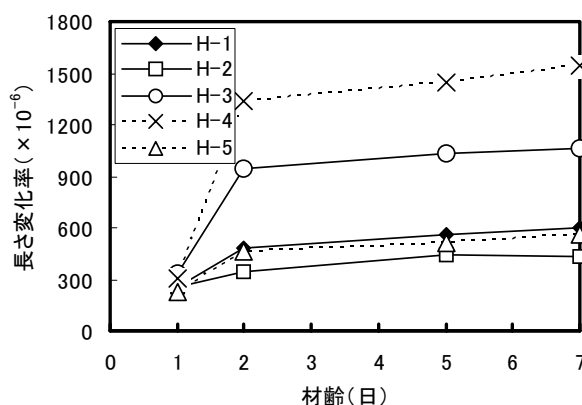
3. 異なる粒度を持つ膨張材の膨張特性

既往の研究では、膨張材の粒子が粗いほど膨張特性が大きくなるとしたもののや、ある範囲の粒度を持つ膨張材が最も膨張特性が大きいとした報告⁴⁾⁵⁾などがある。

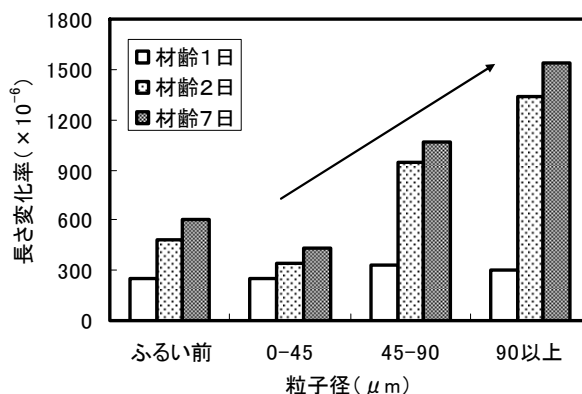
ここでは、石灰アウイン複合系の膨張材の粒度が膨張特性に及ぼす影響を知るために実験を行った。

3.1 実験概要

膨張材の粒度の影響を、JIS A 6202 によるモルタルの一軸拘束における長さ変化率によって測定した。ふるい目が 45 μ m と 90 μ m の網ふるいを用いて、図－１に示した粒度分布を有する膨張材を 3つの粒度範囲に分け、表－１に示す実験水準を構成した。使用材料を表－２に示す。セメントは市販の普通ポルトランドセメン



a) 長さ変化率の経時変化



b) 長さ変化率

図－２ 長さ変化率

トを、膨張材は市販の石灰アウイン複合系の低添加タイプを用いた。また、混和剤は市販のポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を用いた。なお、表－1に示す「粒子径」の表記は、「最小粒径－最大粒径」を意味する。

モルタルは、表－3の一般的な土木用途のコンクリートの配合をベースとして、粗骨材を除いた試料を用いた。表－3のコンクリートの配合は、水結合材比が53.5%で、砂セメント比が2.6のモルタルに相当する。

3.2 実験結果

試験結果を図－2に示す。この図より、石灰アウイン複合系の膨張材は、その粒子径が大きくなるに従い、長さ変化率が著しく大きくなることが確認された。特に90 μ m以上の粒子を集めたH-4は、材齢1日では他の粒子と大きな差は認められなかったが、材齢2日以降は、粒子径を調整しないH-1に比べて2.5倍の長さ変化率を示した。

4. 膨張材の粒子が膨張量に寄与する割合

4.1 寄与率の定義

膨張材の粒子径が D_i の場合の長さ変化率を ε_i とし、膨張材全体の長さ変化率 ε に対する粒子径 D_i の重みを α_i とすれば、膨張材全体の長さ変化率 ε は、式(1)で表される。

$$\varepsilon = \sum \alpha_i \cdot \varepsilon_i \quad (1)$$

したがって、式(1)における寄与率 α_i を見出すことで、膨張材の粒子径が長さ変化率に及ぼす影響を評価することが可能である。前章の実験結果に対応させた場合、式(1)は、式(2)または式(3)に書き直せる。

$$\varepsilon = \alpha_{0-45} \cdot \varepsilon_{0-45} + \alpha_{45-90} \cdot \varepsilon_{45-90} + \alpha_{90-400} \cdot \varepsilon_{90-400} \quad (2)$$

$$\varepsilon = \alpha_{0-90} \cdot \varepsilon_{0-90} + \alpha_{90-400} \cdot \varepsilon_{90-400} \quad (3)$$

なお、添え字は粒子径の範囲を表す。

式(2)はH-2、H-3およびH-4がH-1に相当す

る場合を表し、式(3)はH-4およびH-5がH-1に相当する場合を表したものである。

式(2)および式(3)の各寄与率の算定に際して、膨張材を構成する粒子に対して幾つかのケーススタディを実施した。なお、各粒子径における粒子の個数は、粒子が球状であり、かつ粒子の大小によらず密度は一定であるものと仮定⁴⁾して、図－1に示した粒度分布から式(4)を使用して算出した。

$$n_i = \frac{6M_i}{\rho\pi D_i^3} \quad (4)$$

ここに、 n_i : 粒子径が D_i の膨張材粒子の個数(個)、 ρ : 膨張材の密度(g/cm³)、 M_i : 粒子径が D_i の膨張材粒子の質量(g)である。

4.2 構成する粒度の質量の影響

寄与率 α は、膨張材粒子の質量による加重平均であると仮定し、式(5)で定義した。

$$\alpha_i = \frac{M_i}{\sum M_i} \quad (5)$$

ここに、 M_i : 粒子径が D_i の膨張材粒子の質量(g)である。算定結果を図－3 a)に示す。この図より、推定値は実測値を過大に評価する結果となった。なお、石灰アウイン複合系の膨張材は、焼成した膨張材クリンカーを粉砕しているため、粒子径によって構成される鉱物組成は一定⁴⁾である。すなわち、粒子の大小に関わらず密度は一定値をとるとの仮定から、図－3 a)の結果は、膨張材の粒子の体積による加重平均でも同様であることが推察できる。

4.3 膨張材粒子の個数と表面積との積

膨張材の反応は、膨張材粒子の表面から生じるものとして、「膨張材粒子の単位面積当たりの長さ変化率に与えるポテンシャルは、粒子の大きさに関わらず一定である」とした仮説に基づいて、寄与率を定義した。すなわち、膨張材の粒子1個に着目し、長さ変化率に与えるポテンシャルは一定とし、全体の膨張はその総和に等価であると考えた。また、関係するパラメータ

は、膨張材粒子の個数と表面積の積と仮定した。
したがって、寄与率 α_i は式(6)で表される。

$$\alpha_i = \frac{n_i \cdot S_i \cdot E}{\sum n_i \cdot S_i \cdot E} = \frac{n_i \cdot S_i}{\sum n_i \cdot S_i} \quad (6)$$

ここに、 n_i : 粒子径が D_i の膨張材粒子の個数(個)、
 S_i : 粒子径が D_i の膨張材粒子の表面積 (m^2)、
 E : 膨張材粒子の単位表面積当たりの長さ変化率に与えるポテンシャル ($1/\text{m}^2$) である。
なお、単位表面積当たりの長さ変化率に与えるポテンシャルは、式(6)から消去することができる。したがって、式(6)の分母および分子は、粒子の個数と表面積との積となり、粒子径 D_i の粒子のブレン比表面積に相当する。すなわち、ブレン比表面積の比で寄与率を定義したことになる。

図-3 b) に算定結果を示す。この図より、式(2)では実測値を下回る結果となったが、式(3)ではほぼ実測値に一致する結果を得た。このことから、長さ変化率は、膨張材の粒子の個数と表面積に大きく関係することが推定できる。

次に、膨張材の粒子径 D_i を持つモルタルの長さ変化率は、式(7)に示すように、膨張材粒子の個数と表面積および単位面積当たりの長さ変化率に与えるポテンシャルの積の平方根と仮定した。すなわち、粒子の表面積を平均粒子径に換算¹⁾したものである。

$$\alpha_i = \frac{\sqrt{n_i \cdot S_i \cdot E}}{\sum \sqrt{n_i \cdot S_i \cdot E}} = \frac{\sqrt{n_i \cdot S_i}}{\sum \sqrt{n_i \cdot S_i}} \quad (7)$$

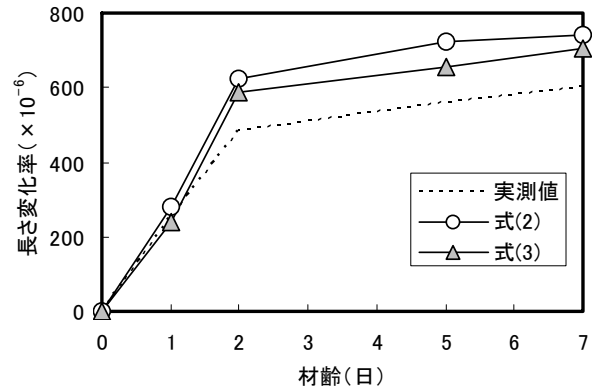
図-3 c) に算定結果を示す。この図より、式(2)および式(3)ともに、実測値に近い結果を得た。すなわち、膨張材の粒子径 D_i の長さ変化率は、膨張材粒子の個数と表面積および単位面積当たりの長さ変化率の積の平方根によって、整理することが可能である。

4.4 膨張材の粒子と長さ変化率

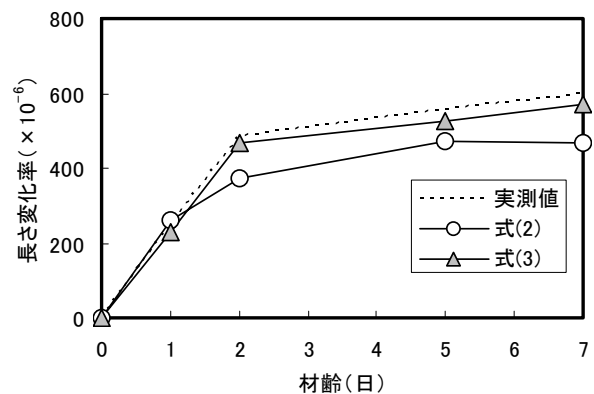
式(7)を式(1)に代入して、整理すると、式(8)を得る。

$$(\sum \sqrt{n_i S_i}) \cdot \varepsilon = \sum \{ (\sqrt{n_i S_i}) \varepsilon_i \} \quad (8)$$

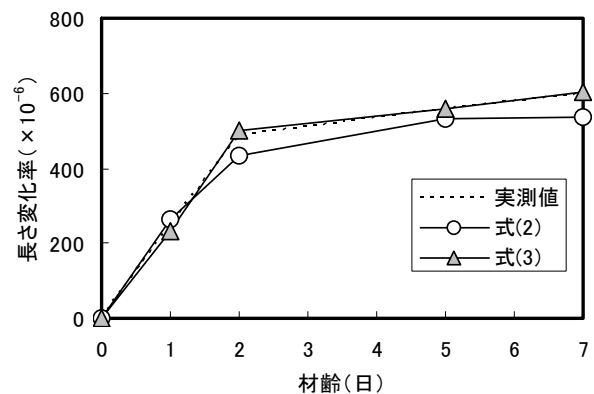
すなわち、全体の長さ変化率にブレン比表面積を乗じたものは、膨張材粒子 D_i のブレン比表面積と膨張材粒子 D_i の長さ変化率の積を、構成するすべての粒子径で総和したものに等しい



a) 質量(体積)による加重平均



b) 粒子の個数と表面積との積による手法



c) 粒子数と表面積との積の平方根による手法

図-3 長さ変化率の比較

ことを意味する。

式(8)から、粒子径 D_i の膨張材粒子を集めた場合の材齢 7 日における長さ変化率を逆算し、全体の膨張に対する比で整理した結果を図-4 に示す。図-4 より、ある範囲で粗粒子を集めた場合、長さ変化率が 5～7 倍にもなることが推察される。

5. 膨張材の粒度調整による長さ変化率

4 章に提示した概念に基づいて、膨張材を構成する粒子の中から、大きい粒子を順次除去した場合の長さ変化率を試算した結果を図-5 a) に示す。なおこの図では、最大粒子径が $400\mu\text{m}$ の基準とした膨張材の長さ変化率を 1 とした場合の比で整理した。同様に、微粒子を除去した場合の試算結果を図-5 b) に示す。

図-5 より、膨張材の粗い粒子を除去した場合には、最大で 2 割程度の範囲で長さ変化率が小さくなる。一方、微粒子を除去した場合には、長さ変化率が著しく増加する。

このことより、石灰アウイン複合系の膨張材は、粗粒子がモルタルの長さ変化率に大きく寄与し、微粒子は粗粒子に比べて長さ変化率に寄与する割合が小さい。

6. 粒度を調整した膨張材の長さ変化率

6.1 実験概要

4 章で示した概念を検証するため、膨張材の粒度分布を任意に調整し、それをを用いたコンクリートの長さ変化率を測定した。

図-1 に示した粒度分布を有する膨張材を表-4 の粒度範囲となるように分級機を用いて調整した後、表-2 に示す配合のコンクリートを作製し、JIS A 6202 の B 法による長さ変化率を測定した。なお、調整した各膨張材の粒度分布を図-6 に示す。

6.2 実験結果

材齢 7 日における長さ変化率を図-7 に示す。図-7 より、 $5\sim 45\mu\text{m}$ の粒子範囲を多く含む H5-30 および H5-45 は、基準とした膨

張コンクリートの長さ変化率を下回る結果を得た。長さ変化率に対する寄与率の高い粗粒子を除去したためである。粒子範囲が $5\sim 60\mu\text{m}$ で

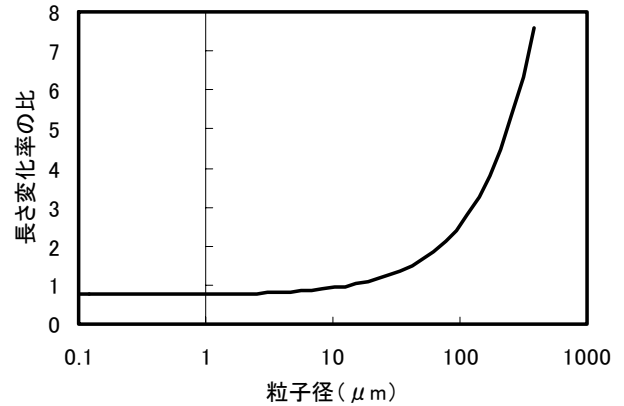
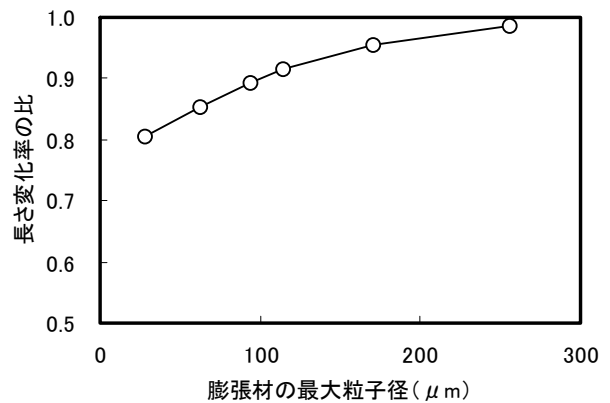
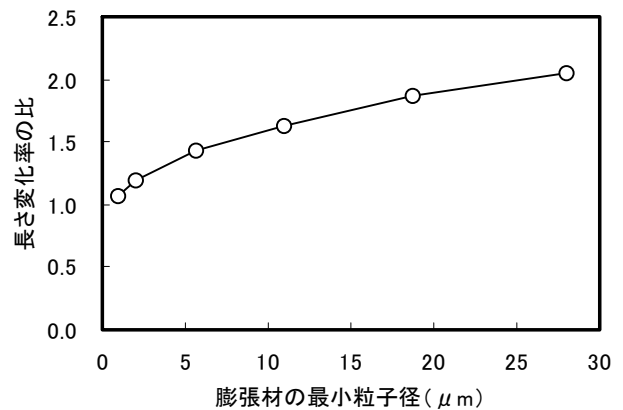


図-4 膨張材の粒子の長さ変化率の比



a) 粗粒子を除去した場合の長さ変化率

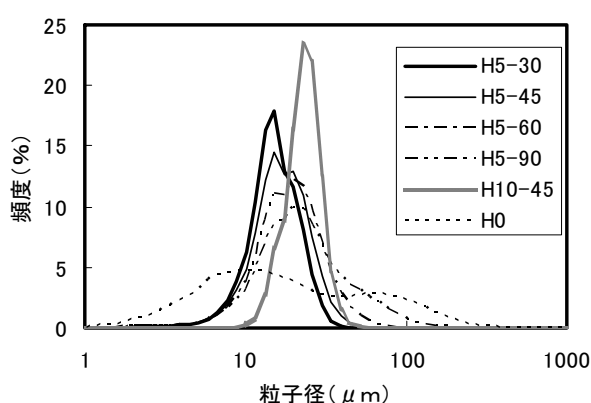


b) 微粒子を除去した場合の長さ変化率

図-5 膨張材の粒度調整による長さ変化率

表－４ 膨張材の粒子径範囲

記号	最小粒子径 (μm)	最大粒子径 (μm)
H0	調整なし	調整なし
H5-30	5	30
H5-45	5	45
H5-60	5	60
H5-90	5	90
H10-45	10	45



図－６ 調整した膨張材の粒度分布

は、基準とした膨張コンクリートと同程度の膨張を示した。

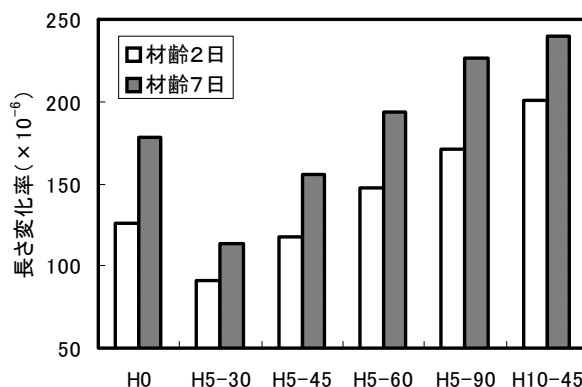
5～90 μm の範囲のように、最大粒子径の上限値を広くとった H5-90 では、基準とした膨張コンクリートの 1.2 倍の長さ変化率を示した。また、10～45 μm の粒子範囲とした H10-45 は、粗い粒子を大幅に除去したが、併せて、膨張の寄与率の小さい微粒子も除去したため、1.4 倍の長さ変化率を示した。

これらの実験結果から、粒度分布をより適切に管理することで、大きな膨張率を得ることが確認された。

7. まとめ

石灰アウイン複合系の膨張材の粒度が膨張特性に与える影響について実験的に検討した結果、以下の知見を得た。

(1) 膨張コンクリートの長さ変化率は、同一



図－７ 調整した膨張材の長さ変化率

配合であれば、膨張材の粒子の数と表面積との積あるいはその平方根で整理できる。

(2) 膨張材の粒子の数と表面積との積は、ブレーン比表面積を意味し、全体の長さ変化率にブレーン比表面積を乗じたものは、膨張材の粒子径が D_i のブレーン比表面積と膨張材の粒子径が D_i の長さ変化率との積を、構成するすべての粒子径で総和したものに等しいことが確認された。

(3) 膨張材の粗い粒子を除去することで、長さ変化率は小さくなる。また、微粒子を除去することで、長さ変化率は反対に大きくなる。

(4) 膨張材の微粒子を除去し、粒度分布の範囲を狭くすることで、大きな膨張率を生じさせる膨張材を得ることができる。

参考文献

- 1)粉体工学会：粒子径計測技術，日刊工業新聞社，1998
- 2)セメント協会：「エア・ジェット式ふるい装置によるセメントの粉末度試験方法」，1996 年
- 3)地盤工学会：土質試験の方法と解説，地盤工学会，1996
- 4)盛岡実：セメント系膨張材の水和反応と材料設計，東京工業大学提出学位論文，1999
- 5)中村孝則，深谷泰文：膨張材によるセメント硬化体の膨張変形，セメント技術年報，XXVI，pp.158-162，1972