

論文 膨張材を混和した各種高流動モルタルの自己収縮

保利彰宏^{*1}・盛岡実^{*2}・坂井悦郎^{*3}・大門正機^{*4}

要旨： 結合材の異なる二種の高流動モルタルを調製し、これに二種類の膨張材を添加率を変えて添加することによる自己収縮の補償効果について実験的検討を行った。その結果いずれの膨張材にも自己収縮の補償効果が確認され、特に遊離石灰を多く含むカルシウムサルフォアルミネート系の膨張材が従来のカルシウムサルホアルミネート系の膨張材に比較して大きな自己収縮補償効果を持つことが明らかとなった。また、膨張材添加率が同一の場合でも、結合材の種類によって膨張量や水和発熱量への影響が異なることが明らかとなった。

キーワード： 自己収縮, 高流動モルタル, 膨張材

1. はじめに

高流動コンクリートは、高性能 AE 減水剤や分離低減剤（増粘剤）を使用することにより材料分離を生じることなく非常に高い流動性を持つため、施工性を大きく改善することが出来るコンクリートである。しかし、このようなコンクリートは一般に水結合材比が小さく粉体量が多いために自己収縮が大きくなる傾向がある¹⁾。

一方、自己収縮を低減する方法として膨張材の添加による収縮補償があり、低減方法としては最も効果が明確に現れる。これは、膨張材が水和の初期に膨張性水和物を生成し自己膨張を生ずるため、結果として自己収縮を大きく低減することが出来るためである²⁾。

本実験では各種高流動モルタルに膨張材を添加し、自己収縮の補償効果について実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメント及び

高ビーライト系セメントを用い、混和材料として高炉スラグ微粉末を使用した。また、細骨材には JIS R 5201-1997 に準拠するセメント圧縮強さ試験用標準砂を用い、高性能減水剤はポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用した。本実験において使用した膨張材は二種類であり、それぞれを膨張材 A 及び膨張材 B とした。膨張材 A は工業原料を用いてロータリーキルンによって製造した遊離石灰を多く含有した遊離石灰-アウイン-無水石膏系膨張材³⁾であり、膨張材 B は市販のカルシウムサルホアルミネート系膨張材である。

なお、表 1 に本実験にて使用した各材料の物理的性質及び化学組成を示した。

2.2 配合

モルタルの配合は水結合材比 35%, 砂結合材比 2 とし、結合材あるいは混和材料の異なるモルタルを表 2 に示すとおり二種類調製した。また、減水剤の添加率はフロー値（ノータップ）が 280~300mm となるよう調節した。

*1 電気化学工業㈱ 青海工場（正会員）

*2 電気化学工業㈱ 青海工場（正会員）

*3 東京工業大学助教授 工学部無機材料工学科 工博（正会員）

*4 東京工業大学教授 工学部無機材料工学科 工博（正会員）

表 1 各材料の物理的性質及び化学組成

材料	比重	比表面積 (cm^2/g)	lg. loss (%)	化学 組成 (%)							遊離 石灰 (%)
				SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	R ₂ O	
普通ポルトランドセメント	3.16	3270	2.1	21.2	3.0	5.2	64.4	0.9	1.9	0.64	—
高ビークライト系セメント	3.22	3470	0.8	26.4	2.5	3.0	64.1	0.4	2.3	0.16	—
高炉スラグ微粉末	2.90	5960	0.0	7.0	0.4	14.2	41.2	7.0	—	0.39	—
膨張材 A	3.04	2970	0.9	1.4	0.5	8.4	68.8	1.2	17.7	0.1	48.6
膨張材 B	2.86	3010	1.1	1.2	0.6	16.1	51.3	1.1	27.5	0.1	19.0

これら二種類のモルタルに、膨張材 A は 3%～7%の範囲で、膨張材 B は 7%～11%の範囲で添加率を変えて添加したものを供試体として実験に供した。膨張材は結合材に対して重量部内割り添加とした。また比較のため、各種モルタルについて膨張材を添加しない配合（以降プレーンモルタルと称する）についても実験を行った。

表 2 モルタルの種類

モルタルの種類	使用セメント	使用添加材（添加率）
BS	普通ポルトランドセメント	高炉スラグ微粉末(40%) *
HB	高ビークライト系セメント	—

*：セメントに対して重量部内割りで添加

2.3 練り混ぜ方法

モルタルの練り混ぜはホバート型ミキサーを用いて行い、練り混ぜ方法は ISO に準拠した。また、試料の練り上がり温度が 20℃になるよう材料温度を調節した。

2.4 自己収縮測定方法

2.4.1 材齢 24 時間以前

作製した試料は、あらかじめ底面にテフロンシートを敷き、内側面にポリエステルフィルムを敷き詰めたモルタルバー型枠に打設した。その後直ちに打ち込み面をポリエステルフィルム及び濡れ簀で覆い、乾燥を防いで養生を行った。長さ変化の測定は 20℃一定に保たれた室内にて非接触式のレーザー型変位測定器

（KEYENCE 社製、分解能 2 μm ）を用いて行った。測定開始材齢は 4 時間とした。装置の概略図を図 1 に示す⁴⁾。この装置は、変位測定器と反射板との距離をレーザーにて計測することで、供試体の長さ変化を測定する。また、測定結果は直接コンピューターに取り込むことが出来るため、連続自動測定が可能である。

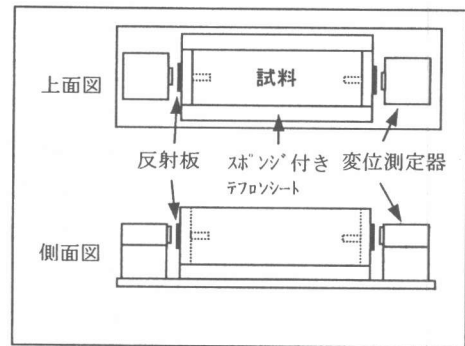


図 1 装置概略図

2.4.2 材齢 24 時間以降

材齢 24 時間以降、長期にわたる自己収縮測定は自己収縮委員会報告書⁵⁾に準拠した。なお、測定に用いる供試体は 2.4.1 にて用いた供試体とは別途作製した。また、自己収縮の測定期間中供試体は常に 20 $\pm$ 1℃、80 $\pm$ 5%R. H. の恒温恒湿室内にて養生を行った。

2.5 断熱温度上昇試験

膨張材にはセメントの水和を促進する性質があると言われており⁶⁾、これによって水和熱が増大することが考えられる。過度の水和熱は、

コンクリート構造物に致命的な温度ひび割れを生じさせるため、各種モルタルに膨張材 A を 3% 添加した配合及びプレーンモルタルについて断熱温度上昇試験を行い、膨張材の添加による水和熱への影響について検討した。試験はφ150×200mm の鋼製容器にモルタルを密閉し、コンクリート用断熱温度上昇測定装置(空気循環式)により、材齢 4 日まで行った。なお、練り上がり温度は 20℃とした。

2.6 圧縮強度測定方法

圧縮強度の測定は、JIS R 5201-1997 に準拠して行った。また、測定材齢は 28 日とした。

3 実験結果

3.1 自己収縮測定結果

モルタルの種類ごとの自己収縮測定結果を図 2 及び図 3 に示す。図は横軸が材齢、縦軸が自己収縮である。図中、実線が膨張材を添加した配合、破線がプレーンモルタルの測定結果であり、添え字が膨張材の添加率を示す。

膨張材の種類が異なる供試体の自己膨張特性については本来であれば結合材を含めた水和反応の定量的な検討や、水和収縮等を明らかにした上で議論する必要があるが、膨張材を用いた材料を使用して構造物を設計する際、膨張材を添加することでどれだけ効果があるかを具体的な数値で示すことが重要となる。従って本実験においては膨張材の添加による効果を評価する方法として供試体の長さ変化のみに着目した「自己収縮補償」を定義し、主にこの値によって検討を行った。

自己収縮補償＝

(膨張材を添加した際の自己収縮)－
(膨張材無添加の場合の自己収縮)

図 2 は BS (高炉スラグ含有) モルタルに膨張材を添加した際の自己収縮測定結果である。プレーンモルタルの自己収縮が材齢 91 日において 500×10^{-6} と非常に大きくなっているが、これは今回高流動モルタルを調整するために粉末度が大きな(6000cm²/g)高炉スラグ微粉末を使用したため、セメント硬化体組織が緻密になったことが原因と考えられる。膨張材を添加した配合を見ると、材齢 3 日付近まで自己膨張を生じ、その後は徐々に自己収縮が進行して膨張は失われてゆくが、プレーンモルタルと比較して自己収縮補償効果は明らかに現れている。また、膨張材 A を添加した配合が膨張材 B を添加した配合に比較して低添加率で同等の自己収縮補償効果が得られることは明らかである。これは既往の報告³⁾と同様の結果となっている。高流動コンクリートは一般に単位結合材量が多く、従って所定の効果を得るために必要な膨張材の添加量も増大する。しかし膨張材 A のように低添加率で効果を得ることが出来る膨張材を使用することにより、一般的なコンクリートと同程度の添加量で高流動コンクリートの自己収縮補償を行うことができる。

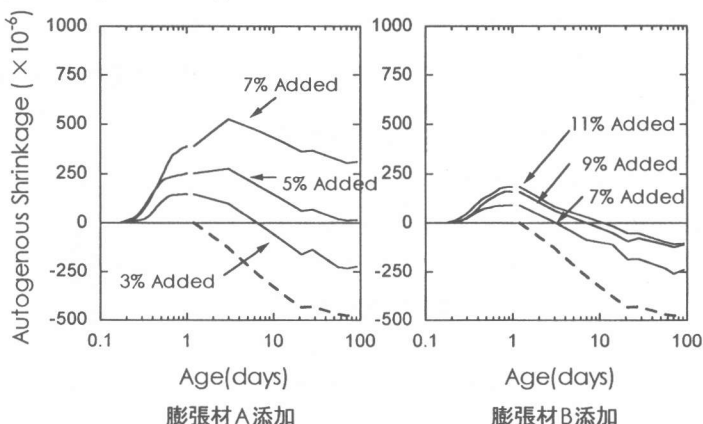


図2 自己収縮測定結果 BSモルタル

図 3 は HB (高ビーライト系セメント) モルタルに膨張材を添加した際の自己収縮測定結果である。プレーンモルタルの自己収縮が BS モルタルの場合と比較して非常に小さく、材齢 91

日において 200×10^{-6} 程度である。膨張材を添加した場合 BS モルタルと同様、初期材齢において自己膨張を生じるが、BS モルタルとの違いはその後自己収縮による自己膨張の損失がほとんど無い点にあり、たとえば BS モルタルに膨張材 A を 5% 添加した配合において、材齢 3 日と材齢 91 日での自己収縮ひずみの差を取ると約 250×10^{-6} であるのに対し、HB モルタルに膨張材 A を 5% 添加した配合について同様の計算を行った場合はわずか 70×10^{-6} 程度である。また、同量の膨張材を添加した配合を HB モルタルと BS モルタルについて比較すると、BS モルタルに比較して HB モルタルの自己膨張が大きくなっていることがわかる。このように高ピーライト系セメントを用いた高流動モルタルは、膨張材の添加による自己膨張が大きく、さらにその損失が少ないことから、ケミカルプレストレスを導入する部材への適用が有効であると考えられる。

図 4 は横軸に膨張材の添加率、縦軸に材齢 28 日における自己収縮補償量をとったものであるが、この図から HB モルタルが BS モルタルに比較して自己収縮補償に対する膨張材の添加率効果が顕著であることがわかる。また、BS モルタルについて見ると、膨張材 B の自己収縮補償効果が膨張材 A に比較して明らかに小さい。従って BS モルタルに対しては膨張材 A の使用が有効であると思われる。膨張材 A が低添加率で自己収縮補償に有効である点については HB モルタルにおいても同様であるが、HB モルタルに添加した場合添加率効果が極端に大きく、実用においてはわずかな計量誤差がコンクリート躯体に致命的な影響を及ぼすおそれがある。従って HB モルタルに用いる膨張材としては、ある程度添加率効果の緩慢な膨張材 B が適していると思われる。また、高炉スラグ微粉末を含有したコンクリー

トに、遊離石灰を多く含む遊離石灰-アウイン-無水石膏系膨張材（本実験にて使用した膨張材 A と同一の系）を使用すると中性化が抑制されるとの報告もあり⁷⁾、目的に応じた膨張材、セメント、あるいは添加材料の選定が重要であると考えられる。

ところで膨張材を同一量添加した場合、BS モルタルに比較して HB モルタルの自己膨張が大きくなる傾向は膨張材 A、B いずれを添加した場合についても共通して現れる。従って、この現象は膨張材の種類ではなく、セメント（あるいは結合材）の種類によるものであると考えられる。原因は膨張圧が生じる材齢と硬化体が強

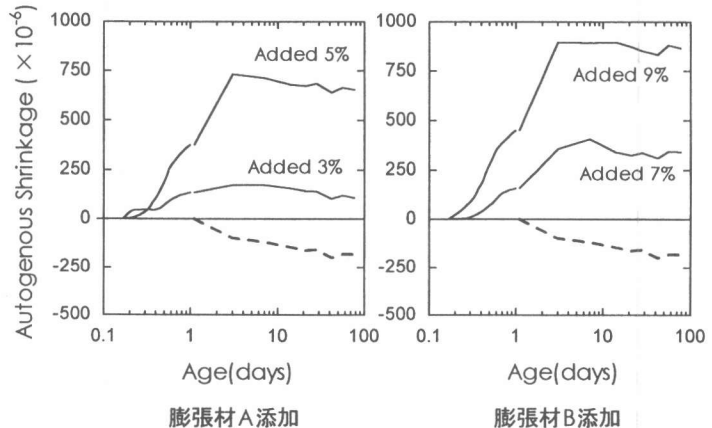


図3 自己収縮測定結果 HBモルタル

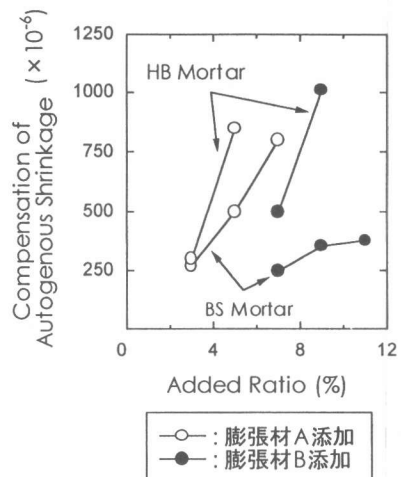


図4 膨張材添加率と自己収縮補償量の関係

度を発現し始める材齢との兼ね合いが良いことにあるとも考えられるし、膨張性水和物の量もしくは水和物そのものが BS モルタルと HB モルタルでは異なっているとも考えられる。いずれにせよこの点については今後もさらに検討を重ねる必要がある。

また、本実験に使用した高ピーライト系セメントは一般低発熱型のものであり、これ以外にも C_2S 含有率の異なる種々の高ピーライト系セメントが市販されている。高炉スラグ微粉末についても本実験では汎用性の低いものを使用しているため、鉱物組成の異なる高ピーライト系セメントや、粉末度や添加率の異なる高炉スラグ微粉末含有セメントについても今回と同一の結果が得られるか調べる必要がある。

3.2 断熱温度上昇試験結果

3.1 の結果より、膨張材 A を 3% 添加することにより自己収縮補償に効果があることが明らかとなった。しかし、2-5 に示したように膨張材は水和熱を促進する性質を持つし、実構造物においては水和発熱に起因する温度応力についての考慮が不可欠であることから、それぞれのモルタルに膨張材 A を 3% 添加した配合とプレーンモルタルについて断熱温度上昇試験を行った。

結果を図 5 に示す。実線が膨張材 A を 3% 添加した配合、破線がプレーンモルタルの結果である。

一般に断熱温度上昇曲線は下に示す式 1 にて近似される。

一般に断熱温度上昇曲線は下に示す式 1 にて近似される。

$$\Delta T = K(1 - e^{-at}) \quad \dots \dots \text{式 1}$$

ただし

ΔT : 断熱温度上昇量(°C)

a : 実験定数

K : 最高温度上昇量(°C)

t : 材齢

本実験についても結果から K 及び a を求め、図 5 中に併記した。BS モルタルは膨張材の添加による値の変化がほとんど無かったが、HB モルタルは膨張材を添加することによる K 値の増加量が大い結果が得られた。しかしその絶対値は BS モルタルに比較して小さく、15°C もの差が見られる。また、現在では水和熱抑制型の膨張材も実用化されており⁸⁾今後このような膨張材との組み合わせについても検討を行う必要がある。また、本実験は膨張材を同一添加量で比較しているが、今後は同一の膨張を得るために必要な添加率によって比較する必要もあると思われる。

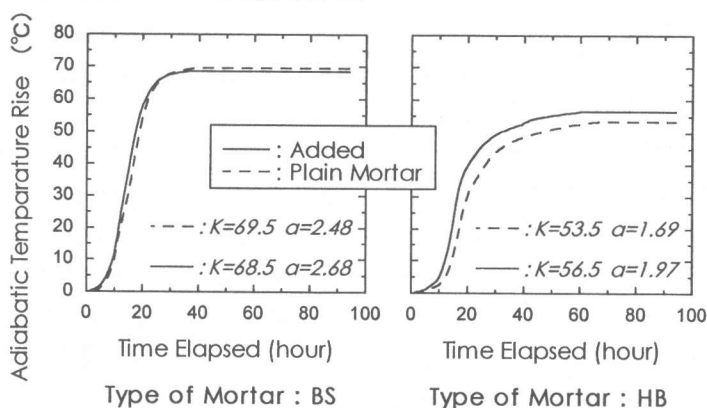


図5 断熱温度上昇試験結果

3.3 圧縮強度

図 6 に材齢 28 日における圧縮強度と自己収縮の比較を示す。BS モルタル、HB モルタルいずれも自己膨張の増大に伴い圧縮強度が低下する。しかし、同等の自己膨張において比較した場合、HB モルタルに比較して BS モルタルは高強度を示す。よって、高炉スラグ微粉末を含有したコンクリートは高流動及び高強度を求められる用途に適していると考えられる。また、高炉スラグ微粉末に加えて石灰石微粉末やフライ

アッシュ等の無機粉末を添加し、高ピーライト系セメントと同等の圧縮強度を持つように調整した配合については、自己収縮ひずみや水和熱を抑えることが出来ると思われ、今後このような観点からの実験も必要であると思われる。

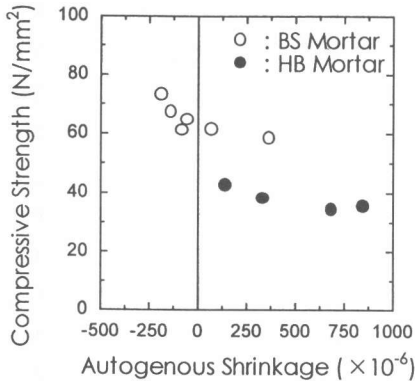


図6 圧縮強度と自己収縮の比較

4 結論

膨張材を添加した各種高流動モルタルの自己収縮を検討し、以下に示す結論を得た。

- 1) 膨張材の添加は高流動モルタルの自己収縮補償に効果的である。また、遊離石灰を多く含有したカルシウムサルホアルミネート系膨張材は従来のカルシウムサルホアルミネート系膨張材と比較して低添加率でも自己収縮補償に同等の効果を持つ。
- 2) 結合材の種類によって膨張材による自己収縮補償効果は異なり、高炉スラグを含有する結合材を用いた場合、自己収縮補償効果は小さく、高ピーライト系セメントでは自己収縮補償効果が大きいことが明らかとなった。
- 3) 断熱温度上昇量は高ピーライト系セメントに比較して高炉スラグを含有した結合材は大きくなる。一方、高ピーライト系セメントの場合には断熱温度上昇量の絶対値は小さいものの、膨張材の添加による温度上昇が認められた。
- 4) 圧縮強度は高炉スラグ含有セメントが高ピーライト系セメントに比較して大きく、高強度及び高流動を要求される用途に有用であることが示唆された。

謝辞

本実験を行うにあたり(株)KEYENCE 川久保氏及び星野氏、(有)ジグデザイン藤田氏より多大なご協力を賜りました。ここに御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田澤栄一・宮沢伸吾・佐藤剛・小西謙二郎，コンクリートの自己収縮，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.561-566，1992
- 2) Tazawa,E.・Miyazawa,S., Autogenous Shrinkage Caused by Self Desiccation in Cementitious Material, 9th International Congress on the Chemistry of Cement, IV, pp.712-718, 1992
- 3) 盛岡実他，遊離石灰－アウインー無水セッコウ系膨張材の膨張特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，pp271-276，1997
- 4) JCI-AutoShrink'98 投稿中
- 5) 自己収縮委員会（委員長：田澤栄一），自己収縮委員会報告書，pp.195-198，1996
- 6) 日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御指針，pp209-220，1991
- 7) 盛岡実・二階堂泰之・久保田賢・浅賀喜与志，各種刺激材を添加した高炉スラグセメント硬化体中の中性化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，pp741-746，1996
- 8) 安藤哲也，水和熱抑制型膨張材のマッシブなコンクリートへの適用，コンクリート工学，1981