

膨張材の種類・置換率を変化させた拘束モルタルの
ケミカルプレスによる圧縮強度への影響

Effect of chemical press of mortar with changed expansion material replacement rate on compressive strength

苫小牧工業高等専門学校 学生員 ○上田 大輔
苫小牧工業高等専門学校 正会員 渡辺 暁夫
苫小牧工業高等専門学校 正会員 土門 寛幸

1. はじめに

近年、コンクリート分野における設計方法は、従来の仕様規定型の設計から性能照査型の設計体系へと移行している。これに伴い、コンクリート構造物のひび割れは、機能性、耐久性、景観上の観点から重要な課題となっている。

膨張材は、ひび割れ低減や曲げ耐力向上といった観点から注目される混和材である。膨張材の利用方法は、主に2通りに大別できるが、その1つにケミカルプレストレスコンクリートがある。ケミカルプレストレスコンクリートは、セメント水和反応の過程で発生する収縮以上の膨張を付与することで、膨張性を有するコンクリートとなり、拘束条件下で利用するとケミカルプレストレスが得られる。このケミカルプレストレスでは、コンクリート内部組織の緻密化を促すことで、コンクリート自体の力学的特性を改善できる可能性（ケミカルプレス）がある。

本研究では、この膨張作用の拘束で生じる組織の緻密化による圧縮強度の増大について着目した。膨張材の置換率を変化させて三軸拘束型枠に膨張性モルタルを打設して、材齢7日まで拘束を与えた後に脱型し、圧縮強度を評価することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）およびセメント強さ試験用の標準砂（JIS R 5201）を使用して、水：セメント：砂=0.5：1：3の配合のモルタルを基準とした。このモルタルに対して、市販の膨張材をセメント量に対して0～8%の範囲で置換したモルタルを作製した。表-1に配合を示す。

膨張材は、T社製（以下、T）およびD社製（以下、D）の2種類を用いた。Tが石灰系の膨張材であるのに対し、Dはエトリンガイト・石灰複合系の膨張材である。

2.2 拘束供試体の作製

図-1の鋼鉄の拘束円柱型枠に離型剤を塗り、モルタルを打設する。打設後、拘束具をナットで固定した状態で材齢7日まで静置する。なお、この拘束型枠を3個用いて、供試体を3つ作製する。完成後の寸法は、直径50mm×高さ100mmの円柱供試体となる。



図-1 鋼鉄製拘束型枠

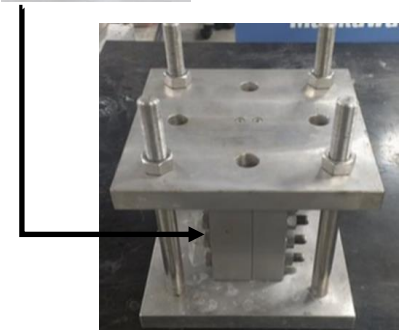


図-2 長さ変化試験装置

表-1 配合

置換率	W/C	水	セメント	膨張材 (T, D)	細骨材
(%)	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)
0	50	225	450	0	1350
2			441	9	
4			432	18	
6			423	27	
8			414	36	
10			405	45	

2.3 圧縮強度試験

材齢7日にて拘束円柱型枠の拘束具を取り外して、離型剤を塗布しながら押し抜き器具を用いて脱型した。端面処理を行い、直径 50mm の圧縮強度試験を実施した。

2.4 長さ変化試験

モルタルの練り混ぜ直後から材齢7日までの自由膨張量を計測する手法として、ASTM C1698 に準じたモルタルの長さ変化試験(図-2)を実施した。直径約 30mm、長さ約 425 mm のポリエチレン製コルゲートチューブを振動台の上に鉛直に設置し、振動を加えながらモルタルを上部から注ぎ込んだ。その後、コルゲートチューブにテフロン製の栓をして長さ変化測定用の供試体とし、これを 20°C の恒温室で 30° の角度に固定した台に設置した。レーザー変位計とデータロガーを用いて、30 分おきに長さ変化の測定を行った。

2.4 反射電子像の画像解析

圧縮強度試験終了後の供試体から、10mm² 程度の破片を切り出し、エタノールに浸漬して水和反応を停止させる。エタノール浸漬後の試料は、真空樹脂含浸装置を用いて樹脂含浸を行う。樹脂の硬化後、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーによる鏡面研磨を行い観察用の試料を作製した。

試料は、3 日以上真空乾燥を行った後、白金蒸着を施す。反射電子検出器を備えた電界放出型走査電子顕微鏡により、倍率 500 倍で反射電子像を取得した。汎用画像処理ソフトにより二値化処理を行い、毛細管空隙を抽出する。なお、反射電子像は 10 枚程度取得しており、それら平均値を空隙率とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度試験

図-3 は、T をセメントの一部に置換したモルタル供試体の圧縮強度である。標準モルタル(置換率 0%)と比べ、T 混入モルタルは、総じて圧縮強度が大きくなっている。これは、拘束型枠でケミカルプレストレスを導入したことにより、内部組織が緻密化したものと推察される。また、圧縮強度が最も大きな値を示したのは置換率 4%であった。このことから、膨張材の置換量をそれ以上あげても、強度増大への効果は限定的と思われ、ケミカルプレストレスによる組織の緻密化には、適切な膨張材混入量を設定する必要があると考えられる。

図-4 は、D をセメントの一部に置換した拘束モルタル供試体の圧縮強度である。置換率 0~8% の範囲では、標準モルタルと比較して、圧縮強度に大きな差はみられなかった。そこで、D の混入量を増大して追加で圧縮強度試験を行った。圧縮強度は、置換率 4%で若干の増加を示すがそれ以降の置換率 12~20%の範囲では、混入量を増大しても圧縮強度が減少する傾向にある。これは、過大な膨張作用により、セメント組織が自己崩壊を起こしたものと考えられ、電子顕微鏡による内部組織の観察をする必要がある。

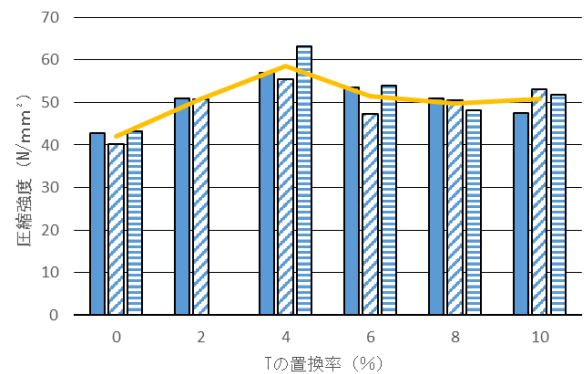


図-3 T の圧縮強度

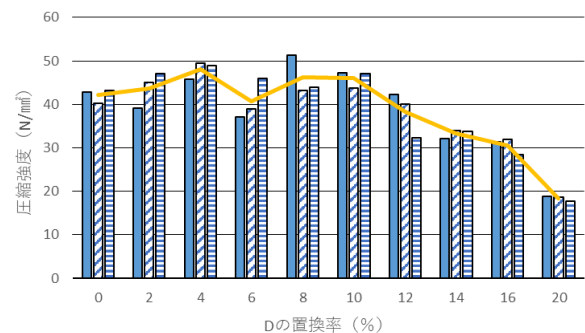


図-4 D の圧縮強度

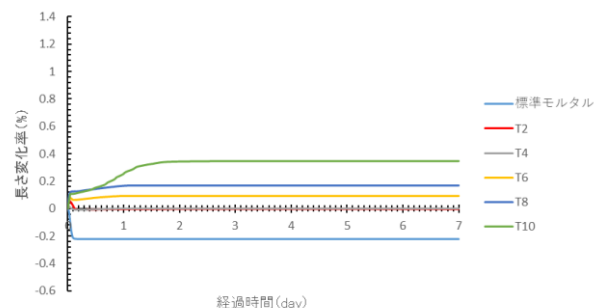


図-5 T の長さ変化

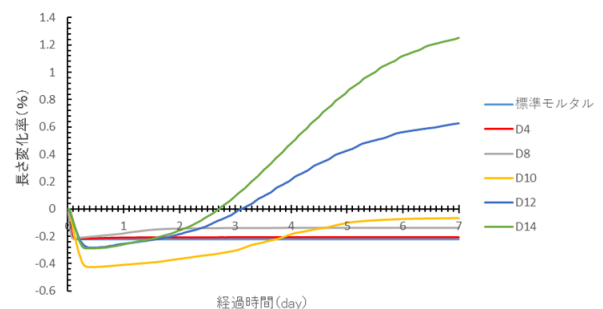


図-6 D の長さ変化

3.2 長さ変化試験

図-5 は、T 混入モルタルの長さ変化試験の結果である。凡例の数値は置換率を示している。標準モルタルでは、凝結終了までの約 3 時間の間に活発なセメント水和反応による収縮を確認できる。T2 および T4 では、標準モルタルで確認された収縮がほとんどみられず、セメント水和反応による収縮量を膨張量が相殺しているようである。T は、打設後 1 時間程度で急激な膨張を示しており、T の膨張のピークであると推定される。また、T2～T6 は、ピーク後から若干の収縮を示している。これは、凝結終了までの 3 時間程度の間、セメントの水和反応による収縮が卓越していると考えられる。一方、T8 および T10 では、打設後 1～3 時間程度に確認された収縮がみられず、初期の急激な膨張が終了すると、その後継続的な緩やかな膨張挙動へと変化している。また、T8 と T10 を比較すると、初期の急激な膨張は同程度の量である。このことから、初期の膨張は置換率に比例して増加するわけではなく、T8 程度で頭打ちになっており、それ以上置換率を増加させると 1 時間以降の膨張挙動が大きくなるようである。

図-6 は、D 混入モルタルの長さ変化試験の結果である。D4 および D8 は、凝結終了後から若干の膨張を示しており、D4 は打設後 24 時間程度、D8 は打設後 48 時間程度をピークにして、それ以降はほとんど変化がみられない。3.1 節において、D2～D8 と標準モルタルの圧縮強度に大きな差がみられなかったのは、D の膨張量が小さかったためであると考えられる。一方、D12 および D14 は、打設後 7 時間程度から緩やかな膨張を示し、打設後 48 時間程度から急激な膨張挙動がみられる。セメント水和反応による収縮を超える膨張量となっており、材齢 7 日以降も継続して膨張しているようである。D12 以降の圧縮強度は、標準モルタルと比較して低下している傾向にある。

T と D を比較すると、T は打設直後から急激な膨張を示すのに対し、D は凝結後から膨張が顕在化するようである。

3.3 拘束供試体圧縮強度と初期膨張の関係

図-7 は、長さ変化試験の材齢 7 日における変化率と拘束を与えた供試体の圧縮強度の関係を示したものである。長さ変化試験でセメントの水和反応によりフレッシュ時の収縮が発生する。それを補填する形で膨張を与えて長さ変化率が 0% 付近になると拘束時の圧縮強度が増大する傾向が認められる。一方、置換率が大きくなり長さ変化率が膨張側に大きくなると、拘束時の圧縮強度が減少するようである。以上のことから、過大な膨張は逆に圧縮強度の低下を促す可能性があるため、ケミカルプレスの組織の緻密化には、適切な膨張材混入量を設定する必要があるといえる。

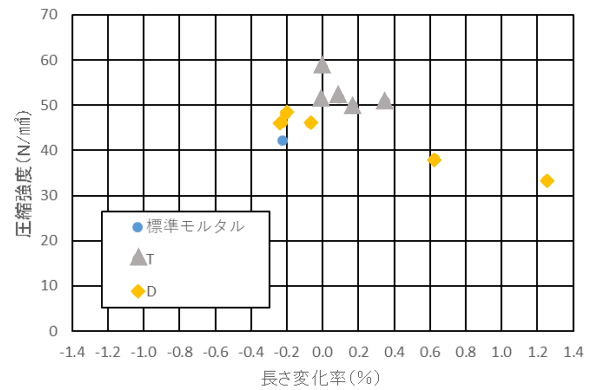


図-7 圧縮強度と長さ変化率

3.4 反射電子像の画像解析による評価

図-8 は、電子顕微鏡により取得した拘束供試体の反射電子像の例である。反射電子像は、256 段階のグレーレベルで構成されており、白色の粒子の相が未水和セメント、明るい灰色の相が水酸化カルシウムであり、黒色の相が粗大毛細管空隙である。

標準モルタル（置換率 0%）と比較して、置換率が大きくなるほど水酸化カルシウムの生成量が多く、水和反応が活発に進んでいるようにみえる。また、標準モルタルでは、10 μ m 程度の比較的大きな空隙がみられる。水和反応による収縮を膨張量が相殺していた T4 は、相対的に標準モルタルでみられた粗大な空隙が少なくなっており、数 μ m の空隙が分散して存在している。T10 では、10 μ m 程度の円形の空隙が観察され、相対的に毛細管空隙の量が多いようにみられる。この丸い空隙は、シリカフューム混入のセメント硬化体などで観察されるハドリー粒子²⁾に類似している。ハドリー粒子とは、セメントなどの反応物の粒子が存在していた空間が、水和生成物により充填されずに残存する孤立した空隙と定義されている。これは急激な水和反応に起因すると考えられており、膨張材の反応過程で生成されたものと推察されるが、詳細は今後の検討課題である。一方、D4 は標準モルタルおよび T4 と比較して毛細管空隙が多く、D10 まで混入量を多くすると毛細管空隙が少なくなるようである。

表-2 は、画像解析により得た各供試体の毛細管空隙率の結果である。水和反応による収縮を補填する膨張が与えられた置換率では、無置換と比べ空隙率が小さくなる傾向となっており、ケミカルプレストレスによる組織の緻密化が確認できる。それ以降は空隙率が増加しており、過大な膨張作用によるセメント組織の自己崩壊が原因であると考えられる。また、図-9 は、画像解析により得た空隙率と拘束を与えた供試体の圧縮強度の関係を示したものである。空隙率が小さくなるほど圧縮強度が増大する傾向となっており、圧縮強度と毛細管空隙には強い相関関係があると考えられる。一般にコンクリートの圧縮強度は、毛細管空隙に依存すると考えられており、今回の結果と一致する。

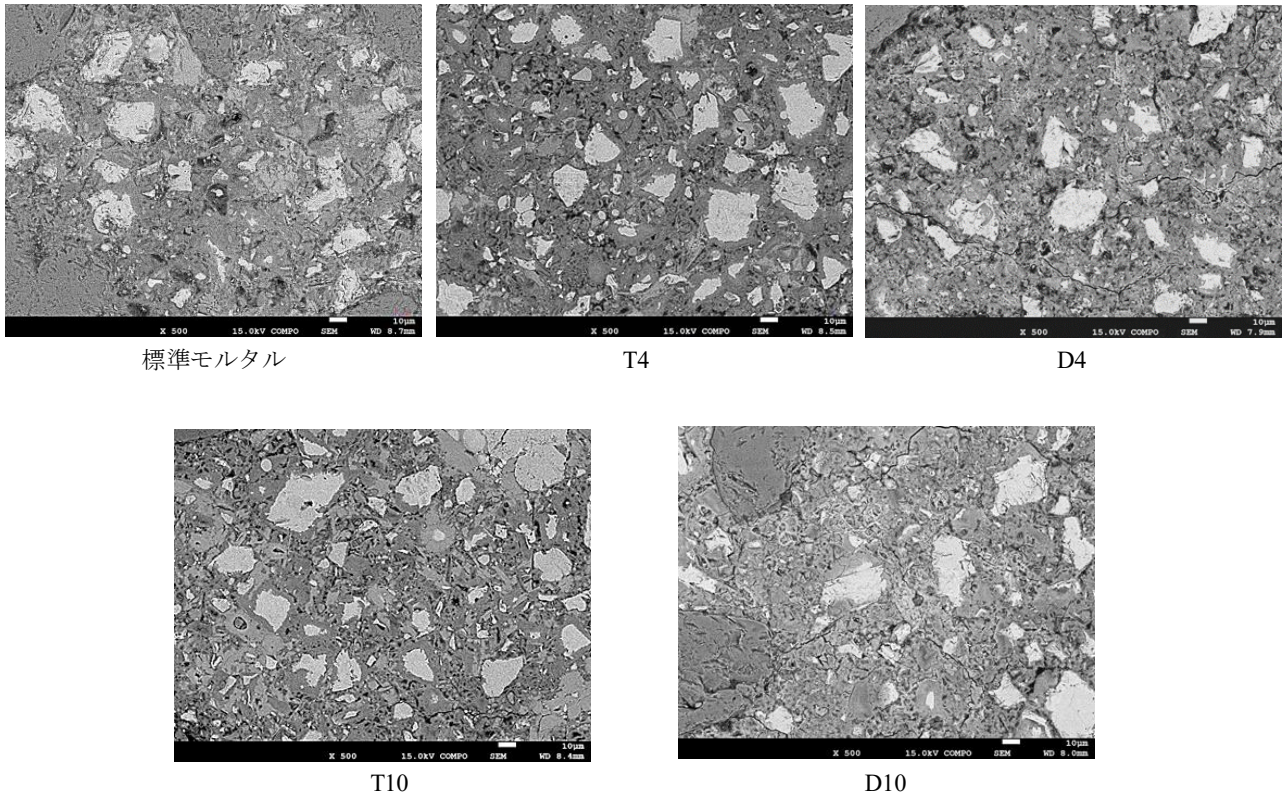


図-8 反射電子像の例

表-2 拘束供試体の毛細管空隙率 (%)

置換率(%)	T	D
0	7.422	7.422
2	7.161	8.329
4	6.636	8.203
6	6.987	8.473
8	8.927	8.340
10	8.487	8.117

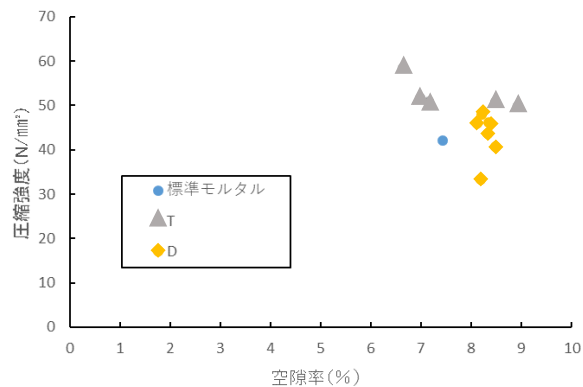


図-9 圧縮強度と空隙率

4. まとめ

本研究は、拘束型枠に打設した膨張性モルタルの圧縮強度特性を評価することを目的に、2種類の膨張材を用いて圧縮強度試験、ASTM C1698に準じた長さ変化試験および反射電子像の画像解析を行った。得られた結果は以下の通りである。

- (1) T を混入したモルタルの圧縮強度は、総じて普通モルタルより増大しており、収縮と膨張が互いに打消し合う置換率4%で最大となった。
- (2) D を混入したモルタルの圧縮強度は、普通モルタルと大きな差はみられず、膨張作用も小さな反応を示した。混入量を上げると、収縮と膨張が互いに打消し合う置換率10%で最大となった。
- (3) 拘束を受けた膨張性モルタルは、空隙率が小さくなるほど圧縮強度は増大する傾向にあり、空隙率と圧縮強度には相関関係がみられる。

参考文献

- 1) 辻幸和, 丸山久一: 膨張コンクリートも力学的特性に及ぼす拘束方法の影響に関する基礎研究, コンクリート工学会年次論文集, Vol.6, pp.341-344, 1984
- 2) Kjellsen, K.O. and Atlassi, E.H.: Porestructure of silica fume systems, Presence of hollow shell pores, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.1, pp.133-142, 1999