

論文 拘束を受けた膨張性モルタルの圧縮強度と初期膨張特性

上田 大輔*1・渡辺 暁央*2・土門 寛幸*3・近藤 崇*4

要旨：焼成したホッキ貝殻粉末および市販の膨張材をセメントの一部と置換したモルタルを拘束型枠に打設し、ケミカルプレストレスを与えた供試体を作製して圧縮強度特性の検討を試みた。置換率を変化させた拘束供試体の圧縮強度は、置換率が4%程度で最も強度が増大した。この4%程度の置換率はASTM C1698 に準じて、コルゲートチューブを用いた長さ変化試験を実施すると、初期収縮を補填する膨張量が与えられる置換率で拘束による圧縮強度が大きくなる。

キーワード：膨張性モルタル, 拘束供試体の圧縮強度, ケミカルプレストレス, 長さ変化試験

1. はじめに

近年、従来の仕様規定型の設計から性能照査型の設計体系への移行に伴い、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、コンクリートのひび割れを抑制する混和材として開発され、1968年に販売されて以降、広く普及してきた。その利用方法は、コンクリートの乾燥収縮を補償し、ひび割れ低減を目的とした収縮補償コンクリート、あるいは膨張力を鉄筋等で拘束し、ケミカルプレストレスを導入したケミカルプレストレスコンクリートに大別される¹⁾。

著者らは、苫小牧市の特産品であるホッキの貝殻を有効利用するための研究を進めている。ホッキ貝は、産地が限られているため、その貝殻が有効利用されることなく、廃棄されているのが現状である。著者らの研究では、焼成したホッキ貝殻粉末をセメントの一部に置換したモルタルが膨張反応を示すことが確認されている。焼成ホッキ貝殻粉末は、練り混ぜ直後等の水が多い環境で急激な膨張を示し、それ以降はほとんど変化しない。これは、焼成ホッキ貝殻粉末に含まれる酸化カルシウム CaO が水 H₂O と反応することで生成される水酸化カルシウム Ca(OH)₂が要因となっており、焼成ホッキ貝殻粉末が石灰系膨張材の原料として利用できる可能性を示した²⁾。焼成ホッキ貝殻粉末は、短期間で著しい膨張挙動を示すことから、ケミカルプレストレスが有効的に活用できる可能性がある。

ケミカルプレストレスの効果としては、拘束強度下におかれる部材の力学的特性の改善である。一方、膨張作用を拘束することにより発生する拘束圧力下において、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することができる可能性がある³⁾。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。また、ASTM C1698 に準じた長さ変化試験を行い、拘束を受けた膨張性モルタルの圧縮強度との対応を検討した。

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、焼成ホッキ貝殻粉末（HP）および市販の石灰系膨張材（EX）をそれぞれセメント量に対して0～10%の範囲で置換したモルタルを作製した。配合を表-1に示す。焼成ホッキ貝殻粉末は、貝殻を使用前に洗浄および乾燥後、粒径が75μm以下まで粉碎し、これを1000℃に設定した電気炉で、1時間以上焼成したものである。なお、HP焼成後に溶融して固着した粉末は、

表-1 配合

記号	W/C	水	セメント	置換量 (HP,EX)	標準砂
	(%)	(g)	(g)	(g)	(g)
N	50	225	450	0	1350
HP2,EX2			441	9	
HP4,EX4			432	18	
HP6,EX6			423	27	
HP8,EX8			414	36	
HP10,EX10			405	45	

*1 苫小牧工業高等専門学校 環境システム工学専攻 (学生会員)

*2 苫小牧工業高等専門学校 創造工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 苫小牧工業高等専門学校 技術教育支援センター (正会員)

*4 苫小牧工業高等専門学校 創造工学科 准教授 博士(工学)

ミルで再粉碎した。

2.2 拘束供試体による圧縮強度試験

図-1 に示すように供試体寸法が直径 50mm×高さ 100mm となる。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、20°Cの環境下に材齢 7 日まで静置する。なお、この拘束型枠は 3 個であり、供試体数は 3 個で圧縮強度試験を行った。

(1) 小径コアによる圧縮強度試験

拘束円柱型枠の拘束具を取り外して、直径 50mm×高さ 100mm の型枠の中の供試体から、直径 20mm×高さ 40mm のコアを乾式コアドリル機で採取した。両端を端面処理した後、圧縮強度試験を実施した。小径コアによる試験を実施した理由は、膨張圧力により通常の脱型手順では容易に脱型できなかったためである。

(2) 拘束型枠から脱型した円柱供試体の圧縮強度試験

拘束円柱型枠の拘束具を取り外して、直径 50mm×高さ 100mm の型枠の中の供試体に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。

2.3 長さ変化試験

モルタル膨張量を定量評価する手法としては、拘束膨張試験が一般的である。しかし、この試験では、モルタルの練り混ぜ直後から脱型するまでの詳細な膨張量を計測することができない。そこで本研究では、硬化過程の体積変化を測定する方法として、ASTM C1698 に準じてコルゲートチューブを用いたモルタルの長さ変化試験を実施した。この試験は、低水セメント比のセメントペーストあるいはモルタルの自己収縮を測定することを目的とした試験である。凝結終了後の長さを基準として、ダイヤルゲージを使用して収縮量を測定するものである。この試験装置を改良し、レーザー変位計による自動計測を行うことにより、フレッシュ時からの硬化過程を評価することが可能である。また、密閉環境下にあるセメントペーストあるいはモルタルの長さ変化を測定するため、純粋に水和反応による体積変化を評価することができる。膨張材は、焼成ホッキ貝殻粉末 (HP) および市販の石灰系膨張材 (EX) をモルタルに混入して、膨張材の置換量の相違による硬化過程の長さ変化を比較検討する。

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た。これを図-2 に示すように、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 分おきに長さ変化を測定する。

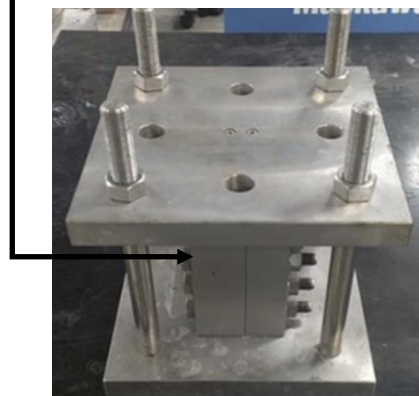


図-1 鋼鉄製拘束型枠

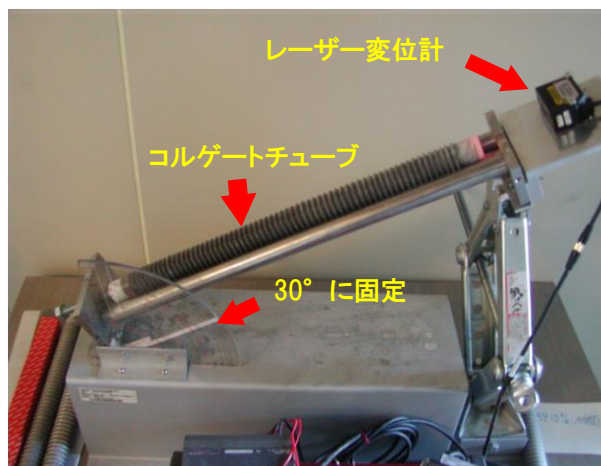


図-2 長さ変化試験装置

傾斜角 0° の水平に設置した供試体で長さ変化を測定する場合、自動計測で用いるレーザー変位計を両端部に設置する必要がある。既往の研究では、傾斜角 30° による測定値の影響はほとんどみられないことが確認されている⁵⁾。そのため、レーザー変位計が一台で済むことで測定データの解析処理が容易となる供試体を 30° 傾斜させて測定する手法を採用した。

3. 拘束を受けた膨張性モルタルの圧縮強度

3.1 焼成ホッキ貝殻粉末混入モルタルの圧縮強度

(1) 直径 20mm の小径コアによる方法⁴⁾

図-3 は、既往の研究で実施した拘束型枠に打設したモルタル供試体から直径 20mm、高さ 40mm 程度の小径

コアを採取した圧縮強度試験の結果である。標準モルタル (N) は 30N/mm²以上の強度が得られているが、膨張材を混入すると強度が低くなり、特に HP2 および HP6 は 20N/mm²より低い結果となった。また、HP8 および HP10 はコア採取時にコアが崩壊し、試験の実施ができなかった。HP の置換率と圧縮強度との対応に一定の関係性が認められず、小径コアによる強度試験に課題がある可能性が考えられる。

(2) 直径 50mm 供試体の押し抜き脱型による方法

図-4 は、拘束型枠から離型剤を使用して押し抜き脱型した供試体の圧縮強度試験の結果である。標準モルタル (N) は、45N/mm²程度の圧縮強度であり、この値はセメント強さ試験で得られる強度とほぼ同程度である。膨張しないモルタルでは、拘束を行っても強度特性に与える影響はないと推察される。そのため、セメント強さ試験と同程度の強度が出ることは当然といえる。したがって、図-3 に示す小径コアによる強度試験で、強度が低く出たことは、小径コアの採取に問題があったことが考えられる。焼成ホッキ貝殻粉末を 2~4% 置換したモルタルは、圧縮強度が 50N/mm²を超えており、ケミカルプレストレスによる緻密化が、強度を増大させたと考えられる。しかし、置換率が 6% から 8% と増加していくと、圧縮強度が低下しており、置換率が多すぎると膨張力が大きくなり自己崩壊が発生している可能性がある。なお、置換率 10% は、膨張力があまりに大きく、離型剤を使用した押し抜き脱型が不可能であったため、試験ができなかった。

3.2 石灰系膨張材モルタルの圧縮強度試験

図-5 は、市販の石灰系膨張材をセメントの一部に置換したモルタル供試体で、圧縮強度試験を実施した結果である。標準モルタルと比べ、膨張材を混入した供試体は、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、内部組織が緻密になったためであると考えられる。また、圧縮強度が最も大きな値を示したのは置換率 4% (EX4) 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いえる。置換率によって圧縮強度にピーク値が出ることは、焼成ホッキ貝殻粉末の場合も同様であり、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。

4. 初期の膨張特性

4.1 焼成ホッキ貝殻粉末の長さ変化試験

図-6 は焼成ホッキ貝殻粉末 (HP) を混入したモルタルの長さ変化試験の結果である。HP を添加していない標準モルタル (N) は、凝結終了までの約 3 時間の間に、

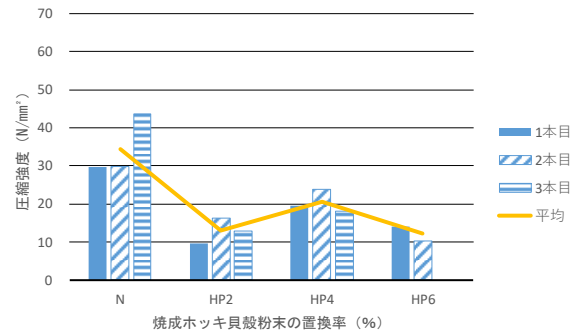


図-3 HP コアの圧縮強度試験結果⁴⁾

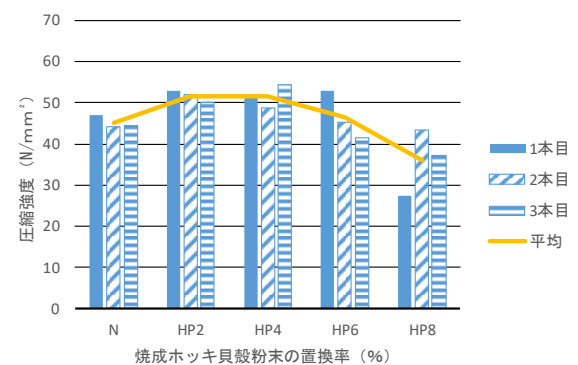


図-4 HP の圧縮強度試験結果

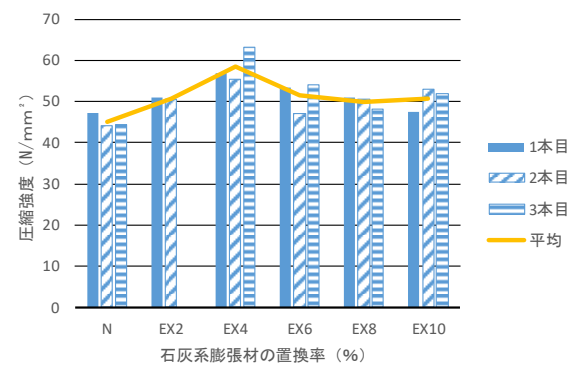


図-5 EX の圧縮強度試験結果

活発な水和反応による大きな収縮が発生していると推察される。既往の研究により、自己収縮が発生しない水セメント比が 40% 程度以上の配合の初期収縮は、打設から終結までの間のフレッシュ時に発生することが分かっている⁵⁾。この収縮は、建設現場で沈下ひび割れの要因となる収縮であると推定され、硬化過程における大きな収縮 (沈下) として現場技術者の間で認識される現象と合致している。本研究で使用している水セメント比が 50% のような高水セメント比の配合では、凝結終了後の長さ

変化は発生していない。HP2 および HP4 では、収縮量が小さく、長さ変化がほとんどみられないことから、セメント水和反応による収縮と同程度の膨張が発生し、互いに打消しあっていると推察され、収縮と膨張のバランスがとれているといえる。HP6 以降から打設後 12 時間程度で著しい膨張を示し、それ以降ほとんど長さ変化はみられなかった。このことから、HP は打設後 12 時間程度が膨張のピークであると推定される。

4.2 石灰系膨張材の長さ変化試験

図-7 は、市販の石灰系膨張材 (EX) を混入したモルタルの長さ変化試験の結果である。EX4 では、長さ変化がほとんどみられず、HP2 および HP4 と同様にセメントの水和反応による収縮量を相殺しているようである。EX6 以降から、打設後 1 時間程度で急激な膨張を示しており、EX の膨張のピークであると推定される。また、EX4 および EX6 は、ピーク後から若干の収縮を示す。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、EX8 および EX10 では、打設後 1~3 時間程度に確認された収縮はみられず、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、EX8 と EX10 の初期の急激な膨張を比較すると、同程度の膨張量である。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、EX8 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っている。

HP および EX を比較すると、膨張量は HP が優れており、瞬間的に著しい膨張を示すことから、当初は HP が拘束型枠で導入したケミカルプレストレスによる組織の緻密化が期待できると考えられていた。しかし、圧縮強度試験で最も大きな強度が得られたのは、長さ変化がほとんど発生しなかった HP2、HP4 および EX4 であった。これは 3.1 節で述べたように、過大な膨張作用によって組織が内部崩壊を起こした可能性が考えられ、電子顕微鏡を用いて内部組織を観察する必要がある。

5. 拘束供試体圧縮強度と初期膨張の関係

図-8 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低下するようである。

図-9 は、拘束供試体の圧縮強度試験後の供試体から試料を切り出し、樹脂含浸および鏡面研磨後の反射電子

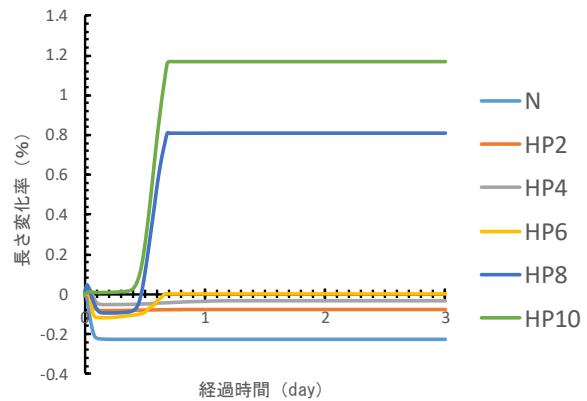


図-6 HP の長さ変化試験結果

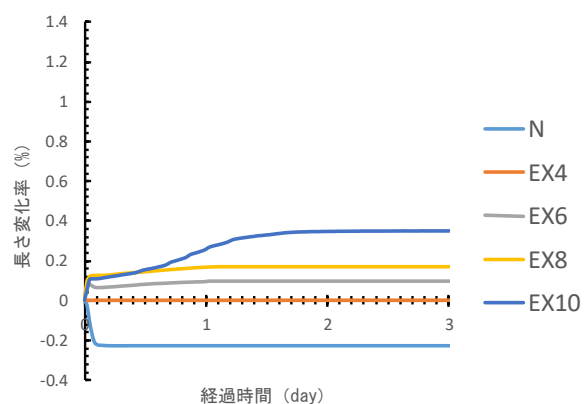


図-7 EX の長さ変化試験結果

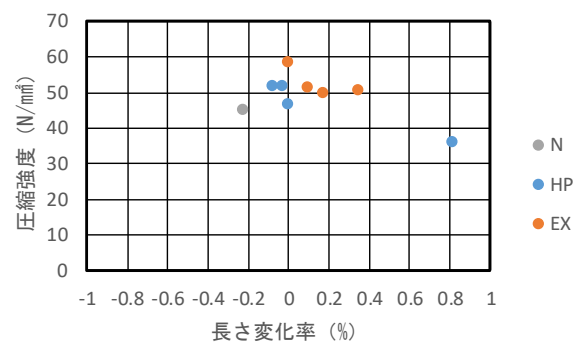
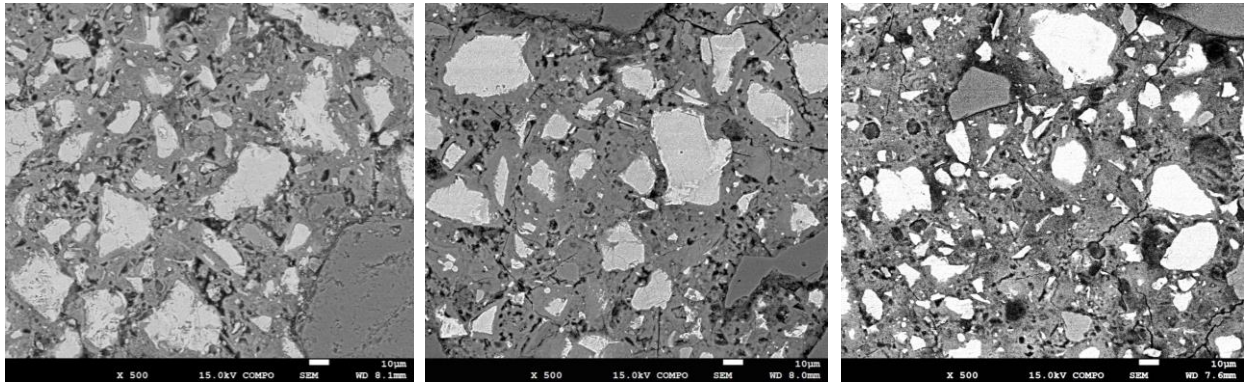


図-8 長さ変化率と拘束の圧縮強度

像の観察を行って得た代表的な画像の例である。N および EX4 は黒色の相で示される毛細管空隙の量が同程度であるが、EX10 は約 $10\mu\text{m}$ 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と判断される。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⁹⁾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



(a) N

(b) EX4

(c) EX10

図-9 拘束供試体の圧縮強度試験後の供試体による反射電子像の例

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。膨張材の置換率が大きくなると、拘束を与えたとしても、空隙構造が粗になる傾向にあり、膨張圧力によるセメント硬化体の緻密化には適切な膨張材置換率の設定が必要と考えられる。

6. 結論

本研究では、セメントの一部に焼成ホッキ貝殻粉末および市販の石灰系膨張材を置換したモルタルについて、長さ変化試験、圧縮強度試験を実施し、焼成ホッキ貝殻粉末の膨張特性について調べた。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 拘束型枠から離型剤を塗布しながら押し抜き脱型することにより得られた供試体の圧縮強度は、小径コアを採取して得られた圧縮強度より大きい値となり、小径コアによる手法が容易でないことが分かった。
- (2) 拘束供試体の圧縮強度は、焼成ホッキ貝殻粉末では置換率 2~4%、石灰系膨張材では置換率 4%で最も大きな値が得られた。
- (3) 膨張材を使用していない標準モルタルは、打設後から 3~4 時間程度の間、急激な収縮を示す。
- (4) 焼成ホッキ貝殻粉末混入モルタル、石灰系膨張材混入モルタルともに、打設直後の標準モルタルで発生した収縮が抑制され、膨張挙動を示す。
- (5) 焼成ホッキ貝殻粉末混入モルタルおよび石灰系膨張材混入モルタルの置換率 10%を比較すると、焼成 HP が材齢 1 日経過以降ほとんど変化しないのに対し、石灰系膨張材は材齢 1 日経過以降にも微量な膨張を示す。

- (6) 長さ変化試験において、体積変化がほとんど発生しない HP2、HP4 および EX4 において、圧縮強度が最も大きな値が得られた。

謝辞

本研究を行うにあたり、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(C)、研究課題番号:18K04336、研究者代表:渡辺暁央)の交付を受けた。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- 1) 辻幸和:コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究, 土木学会論文報告集, 第 235 号, pp.111-124, 1975
- 2) 石井允都, 廣川一巳, 渡辺暁央:焼成ホッキ貝殻粉末および焼成ホタテ貝殻粉末混入モルタルの膨張特性の相違について, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1567-1672, 2013
- 3) 辻幸和, 丸山久一:膨張コンクリートの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
- 4) 土門寛幸, 渡辺暁央, 近藤崇:反射電子像の画像解析による拘束した膨張性モルタルの空隙率評価, プレストレストコンクリート工学会 第 28 回シンポジウム論文集, pp.727-730, 2019.11
- 5) 渡辺暁央, 近藤崇, 廣川一巳:水セメント比が異なるセメントペーストのフレッシュ時の収縮現象に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.547-552, 2015
- 6) Kjellsen, K.O. and Atlassi, E.H.: Pore structure of silica fume systems, Presence of hollow-shell pores, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.1, pp.133-142, 1999

