

論文 拘束した膨張性モルタルの圧縮強度に及ぼす初期膨張特性および毛細管空隙率との対応

土門 寛幸*1・渡辺 暁央*2・近藤 崇*3

要旨：拘束型枠に膨張材を置換したモルタルを打設した供試体について圧縮強度を測定し、置換率の相違による圧縮強度特性を明らかにした。膨張材の種類により強度特性は異なるものの、膨張材を適度に混入することにより拘束供試体の強度が増大した。この強度増大に与える要因として、ASTMC1698 に準じたコルゲートチューブ法による長さ変化試験において、初期の収縮を補填する膨張量となるよう膨張材を混入することが強度増大の一因となった。また、反射電子像の画像解析により、毛細管空隙率を測定すると、膨張材の種類で傾向は異なるものの、毛細管空隙率の減少が圧縮強度の増大に寄与していることを示した。

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、長さ変化試験、毛細管空隙率

1. はじめに

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、機能的、耐久性、景観上の観点から重要な課題となっている。ひび割れの防止には、膨張材や収縮低減剤などが広く使用されている。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。建築分野では工場の床コンクリートなどで、土木分野では道路橋の地覆・壁高欄などで膨張材が使用されている。膨張材によるひび割れ防止は、初期に膨張作用を与えることにより、最終的な収縮量を低減することで達成されている。また、我が国の膨張材は、混和材メーカーが指定する使用量を遵守すれば、強度や耐久性に悪影響を与えないように設計されており、現場サイドでは目的に応じて指定された使用量を生コンに混入すればよい。その一方で、膨張材を混入したコンクリートが拘束された場合は、ケミカルプレストレスが発生する。海外では、ひび割れ防止を目的とした膨張材の使用量は、構造物の拘束度に応じて決定することが提案されており¹⁾、今後我が国においても拘束環境における膨張材の作用について検討することが必要と考えられる。

著者らの既往の研究では、膨張性モルタルを拘束供試体に打設してケミカルプレストレスを与えることにより、内部組織構造の変化と強度特性の関係を評価した。拘束環境下においては膨張材の混入量を変化させたモルタル供試体を作製したところ、圧縮強度が最大になる膨張材混入量があり、その時の内部組織構造が緻密になっていることを観察した²⁾。この現象は、ケミカルプレストレスにおいて副次的に効果が期待されるコンクリート内部

組織の緻密化により、コンクリート自体の力学的特性を改善できるケミカルプレスの効果によるものと考えられる³⁾。しかし、拘束による圧縮強度の増大と内部組織構造の関係を的確に説明するまでには至っていない。また、ケミカルプレスによる強度増大は、打設直後から凝結までの収縮（自由ひずみ）を補填する膨張を与えることによって効果が得られる可能性が示されているが²⁾、その理由については明らかになっていない。

本研究では、国内で使用される代表的な膨張材の2種類について、セメント強さ試験用のモルタル供試体に混入することで膨張性モルタルを拘束型枠に打設して、拘束環境下におけるケミカルプレスによる圧縮強度の増大について検討する。拘束による圧縮強度の増大を初期の膨張特性および反射電子像の画像解析により得られる毛細管空隙率との関係を明らかに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

このモルタルに対して、市販の膨張材（JIS A6202 の膨張

表－1 モルタルの配合

置換率	W/C (%)	水 (g)	セメント (g)	膨張材 (T, D) (g)	細骨材 (g)
0%	50	225	450	0	1350
2%			441	9	
4%			432	18	
6%			423	27	
8%			414	36	
10%			405	45	
12%			396	54	
14%			387	63	
16%			378	72	
20%			360	90	

*1 苫小牧工業高等専門学校 技術教育支援センター（正会員）

*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 創造工学科教授 博士（工学）

材 20 型) をセメント量に対して 0~20%の範囲で置換したモルタルを作製した。なお、JIS A6202 膨張材置換率は 6.7%を標準としているため、その 3 倍程度の置換率の範囲で実験を行うこととした。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。なお、モルタル配合の呼称として、0%を標準モルタル、2~20%置換のモルタルを T2~T20 および D2~D20 と表記する。

2.2 拘束供試体の作製

図-1 に示す特注の鋼型枠を使用する。この型枠は RPC (Reactive Powder Concrete) を作製するにあたり、フレッシュコンクリートの余剰水除去を目的に 50N/mm^2 の耐荷力に耐える性能を有しており⁴⁾、膨張材による膨張に対して変形を許さない構造となっている。こ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 20°C の環境で静置する。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。また、比較のため、直径 50mm × 高さ 100mm の鋼製軽量型枠にも打設してラップで密封して同様に静置した。

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たのち脱型が容易でないため、潤滑材を塗布しながら押し抜き器具を用いて脱型した。また、鋼製軽量型枠の供試体も脱型した。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 425mm 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 の恒温室内で 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、供試体設置後 (注水 10 分後) を変化率ゼロとし、30 分おきに長さ変化の測定を行った。

2.5 反射電子像の画像解析⁵⁾

各配合の供試体から、 10mm^2 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た。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った。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

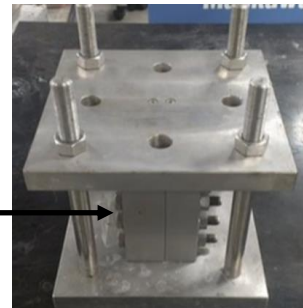


図-1 鋼鉄製拘束型枠



図-2 長さ変化試験装置

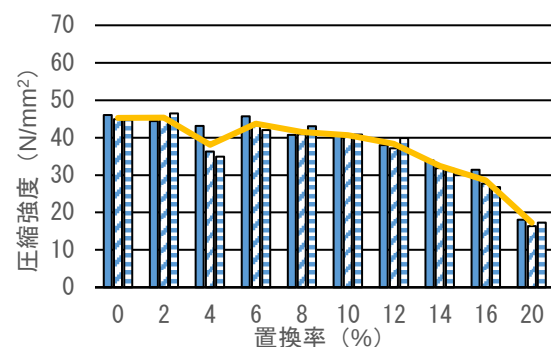


図-3 T の鋼製軽量型枠の圧縮強度 (N=3)

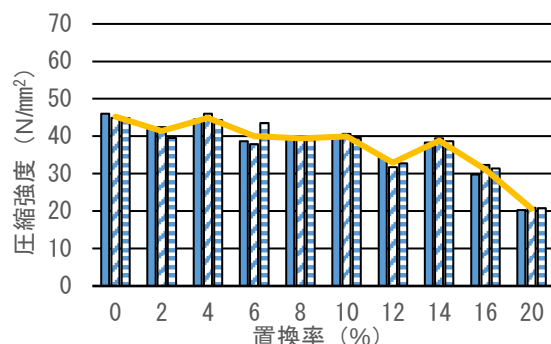


図-4 D の鋼製軽量型枠の圧縮強度 (N=3)

た。白金蒸着を施した後、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、毛細管空隙を抽出した。なお、反射電子像は 10 枚取得しており、それら平均値を毛細管空隙率とした。

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度

図-3 および図-4 は、鋼製軽量型枠における材齢 7 日の圧縮強度試験の結果である。なお、置換率の増大による強度変化を明確にするため、置換率を 20% まで設定して供試体を作製し、圧縮強度試験を行っている。ばらつきはあるが T および D とともに置換率 10% までは大きな強度低下もなく、概ね標準モルタルと同程度の圧縮強度が発現している。しかし、置換率が 10% 以上の供試体では圧縮強度が低下する傾向にあり、置換率が 20% では標準モルタルの半分以下の強度となっている。鋼製軽量型枠にも膨張を拘束する効果があるが、型枠上部開口部をラップで覆っただけでは、ケミカルプレスによる強度増大を得るほどの拘束は得られていないようである。

図-5 および図-6 は、拘束供試体における材齢 7 日の圧縮強度試験の結果である。図-5 の T 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について、標準モルタルと比べ、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% であり、標準モルタルより 20N/mm² 程度大きくなっている。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る。ケミカルプ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-6 の 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について、置換率 0~10% の範囲では、標準モルタルと比較して、圧縮強度が 10N/mm² 程度大きい傾向があるものの、T のような明確な強度のピーク値は認められなかった。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。しかし置換率 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り、鋼製軽量型枠による圧縮強度と同様の傾向を示した。

3.2 長さ変化試験

図-7 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。本試験では打設直後のフレッシュ状態において収縮が観測され、この収縮が終了した時点が凝結（始発）となる⁹⁾。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

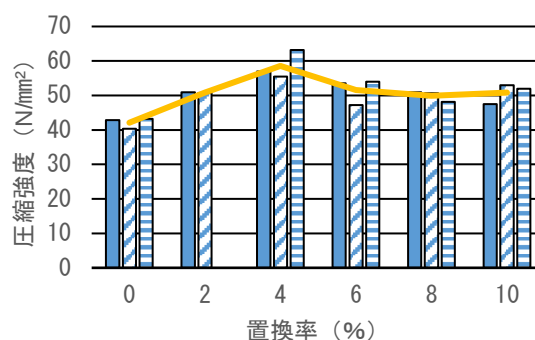


図-5 T の拘束供試体の圧縮強度 (N=3)
(T2 の 3 本目は脱型時に破損)

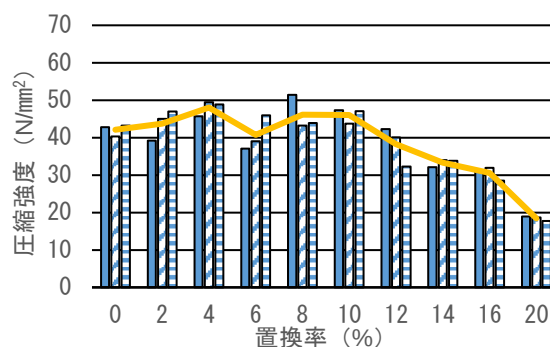


図-6 D の拘束供試体の圧縮強度 (N=3)

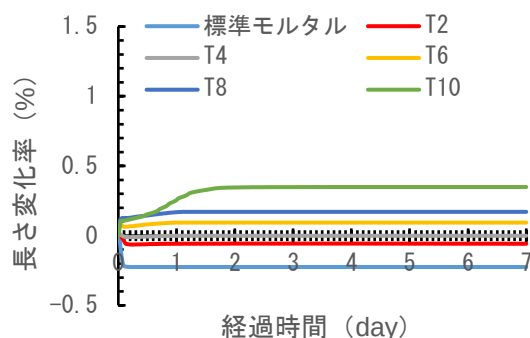


図-7 T の長さ変化試験の結果

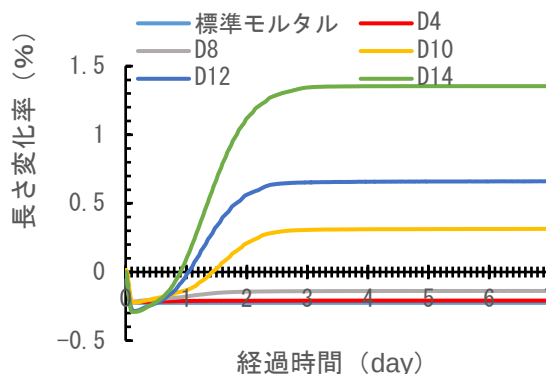
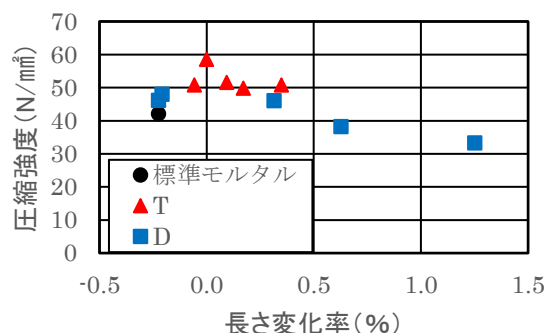


図-8 D の長さ変化試験の結果

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 日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を大きくすれば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 日以降の膨張挙動が大きくなるようである。

図－8 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、D2～D10 では、材齢 7 日までの間は測定開始（打設直後）の長さより収縮側の値となったため、追加して D12 および D14 の長さ変化試験も実施した。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



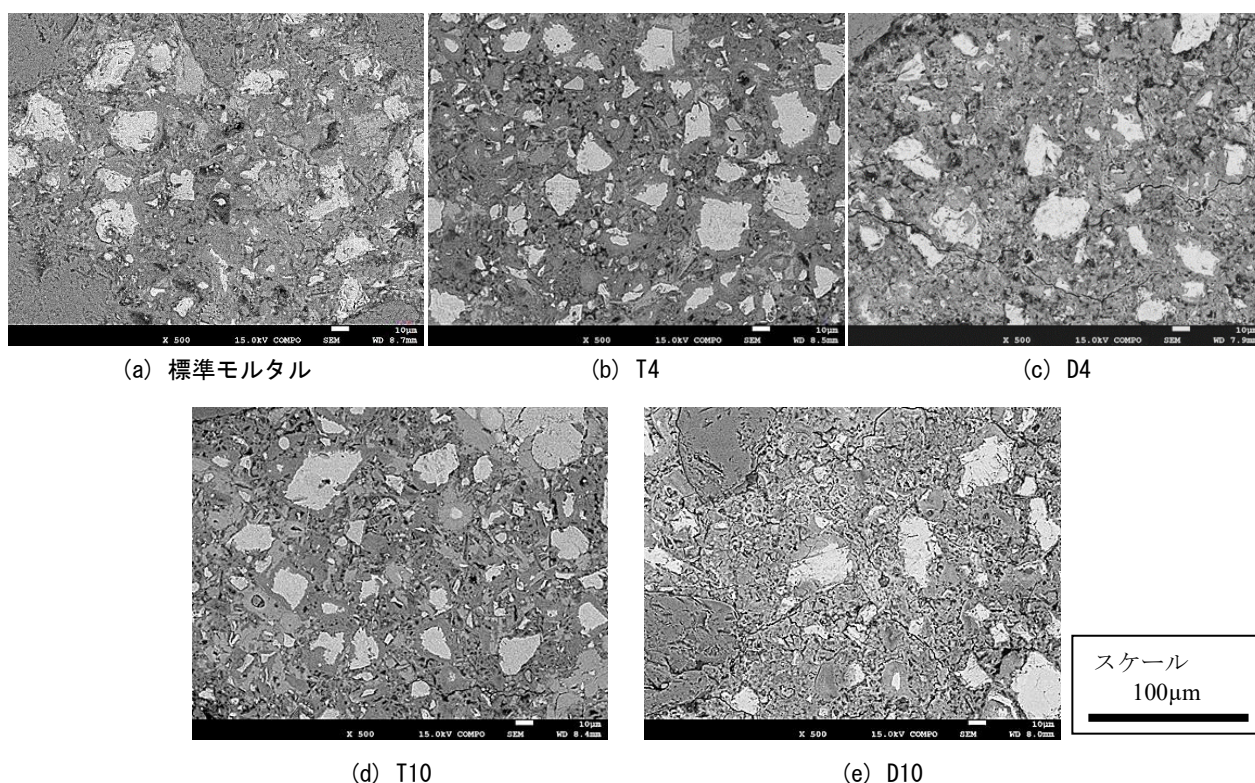
図－9 圧縮強度と長さ変化率の関係

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く傾向にある。

T と D を比較すると、T は打設直後から急激な膨張を示し、材齢 1～2 日程度で収束するのに対し、D は凝結後から材齢 2 日程度まで緩やかな膨張を示し、それ以降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－9 は、図－7 および図－8 に示す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。標準モルタルは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。膨張材を混入するとそれを補填する形で膨張を与えられ、長さ変化率が 0.5% のあたりまで圧縮強度が



図－10 反射電子像の例

増大する傾向にある。それ以上の長さ変化率になると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いえる。

3.4 反射電子像の画像解析による評価

図-10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、T の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、 $10\mu\text{m}$ 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 μm の空隙が分散して存在している。T10 では、 $10\mu\text{m}$ 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ようにみられる。この丸い空隙は、シリカフェ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⁷⁾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 は標準モルタルと類似した毛細管空隙構造となっており、 $10\mu\text{m}$ 程度の比較的大きな空隙が見られる。D10 まで混入量を多くすると毛細管空隙の細分化が進むが、T4 と比較すると毛細管空隙量が多いようである。

図-11は、置換率が 0~10% のモルタルについて、圧縮強度と画像解析により得た毛細管空隙率の関係を示したものである。標準モルタル（圧縮強度が 42N/mm^2 、毛細管空隙率が 7.4%）と比較すると、T は毛細管空隙率が大きくなっても小さくなくても圧縮強度が高い。一方、D はいずれの置換率においても毛細管空隙率が 8.2~8.4% と標準モルタルより大きい値を示しているが、圧縮強度は標準モルタルより同程度か若干大きいものとなっている。一般に圧縮強度は毛細管空隙率と相関性があり、T あるいは D のみに着目すれば、毛細管空隙率の減少が圧縮強度の増大につながっているといえる。しかし、膨張材の有無や種類の違いによる強度特性を毛細管空隙率だけで説明するのは困難であり、膨張材の反応機構の相違により関係性が異なる可能性が示唆される。

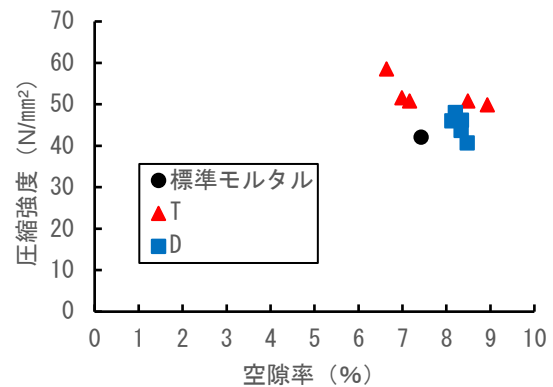


図-11 圧縮強度と毛細管空隙率の関係

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、長さ変化試験における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、置換率が 2~10% で標準モルタルより若干大きくなり、それ以上の置換率では強度が低くなった。長さ変化試験では置換率が 10% 未満の場合、大きな相違が認められなかった。
- (3) 拘束を受けた膨張性モルタルは、膨張材の種類により傾向が異なるものの、毛細管空隙率が小さくなるほど圧縮強度は増大する傾向にある。

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、研究代表者：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) ACI 223R-10, Guide for the Use of Shrinkage-Compensating Concrete, American Concrete Institute, 2010
- 2) 上田大輔, 渡辺暁央, 土門寛幸, 近藤崇：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, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.377-382, 2020.7
- 3) 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, 1984.7

- 4) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀: 加圧処理を施した繊維補強 RPC の微視的構造と力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.309-314, 2004.7
- 5) 渡辺暁央, 五十嵐心一, 川村満紀: 鉱物質混和材を混入したセメントペーストおよびモルタルの毛細管空隙構造の特徴と力学的特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.483-488, 2002.7
- 6) 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, 2015.7
- 7) Kjellsen, K.O. and Atlasi, E.H.: Porestructure of silica fume systems, Presence of hollow shell pores, Cement and Concrete Research, Vol.29, No.1, pp.133-142, 1999