

論文 版築ブロックの線膨張係数および乾燥収縮に関する基礎的研究

杉山 晴香*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨: 版築ブロックの体積変化について検討するために、版築供試体に対して線膨張係数測定試験および乾燥収縮試験を行い、使用したマグネシウム系硬化材に対して乾燥収縮試験を行った。その結果、本実験の範囲内では、版築供試体の線膨張係数は $5.5 \sim 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ となり、コンクリートの線膨張係数と比較し、小さい値が得られた。また、乾燥収縮試験の結果からマグネシウム系硬化材ペーストと比較し、版築供試体の乾燥収縮ひずみが大きくなることが分かった。さらに、セメントを結合材として用いた供試体と比較し、マグネシウム系硬化材を用いることで版築供試体の収縮が低減し、その値はおおよそ 1/2 倍であった。

キーワード: 版築ブロック, 荒木田土, マグネシウム系硬化材, 線膨張係数, 乾燥収縮ひずみ

1. はじめに

版築とは、土壁などの築造法の一つであり、土を主原料とし、締固めにより築造することから、環境への負荷が小さく、歴史的建造物のみならず現代建築の建築材料としても再認識されつつある。

本研究では、版築工法により作製した地産地消型の版築ブロックと鉄骨部材を融合させた新しい構造システムの開発を目指している(図-1)。本複合構造システムでは版築ブロックが鉛直力とせん断力を負担し、鉄骨部材が水平力を負担するものと考えている。そのため、版築ブロックおよび鉄骨部材が環境条件によりどのような挙動を示すか把握し、設計する必要がある。しかし、鉄骨部材については材料定数が既知であるのに対し、版築ブロックについては未知な部分が多い。

そこで、本論では、版築ブロックの収縮特性に着目し、線膨張係数測定試験および乾燥収縮試験から、版築ブロックの体積変化について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および調査

使用材料を表-1 に示し、使用した土の粒径加積曲線(JISA 1204)および土粒子の密度試験結果(JISA 1202)を図-2 および表-2 に示す。

本実験では、荒木田土に加え、大分県国東市にて採取した土(以下、大分土)を用い、結合材には高炉スラグ微粉末を含み、全体の 40 wt%以上が酸化マグネシウムである土壌硬化材(以下、マグネシウム系硬化材)および普通ポルトランドセメント(以下、セメント)を使用した。

図-2 および表-2 に示す、土の粒径加積曲線および土粒子の密度試験の結果から、粒径が細かく粘土質の荒

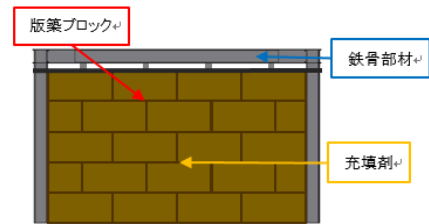


図-1 複合構造システムイメージ図

表-1 使用材料

使用材料	記号	備考
荒木田土	S(A)	埼玉県川越産
大分土 ^{*1}	S(O)	大分県国東産
マグネシウム系硬化材	B	密度: 3.2 g/cm ³
普通ポルトランドセメント	C	密度: 3.16 g/cm ³
水	W	上水道水

*1: 大分県国東市における実施工時に採取した現地の土 両子火山群の噴火による堆積地質(凝灰角礫岩)¹⁾

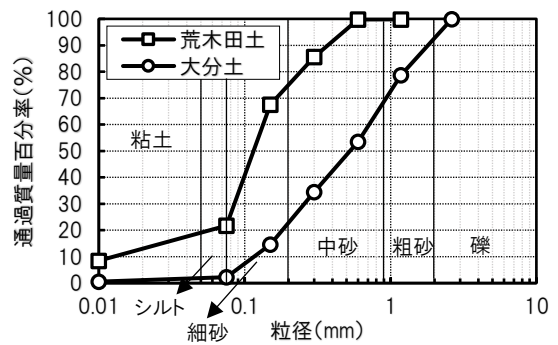


図-2 粒径加積曲線

表-2 土粒子の密度試験結果

	土粒子の密度(g/cm ³)
荒木田土	2.538
大分土	2.423

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部第二部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 工学部第二部建築学科 嘱託助教 博士(工学) (正会員)

木田土と比較し、大分土は粒径が粗く、土粒子の密度が低いことが分かる。また、既往研究から、土を採取した大分県国東市は両子火山群の噴火により堆積した凝灰角礫岩の地層であることが推測されている¹⁾。

表-3 に使用したマグネシウム系硬化材の成分を示す。

既往研究²⁾および昨年度の実験結果³⁾(結合材量と圧縮強度の関係を図-3 に示す)から、水分量 24 mass%未満では強度発現性が低いことが分かった。そこで、本実験では水分量 24 mass%で統一し、土やマグネシウム系硬化材の調合が異なる 6 種類の版築ブロックを作製した。

マグネシウム系硬化材ペーストおよび版築供試体の調合割合を表-4 および表-5 に示す。マグネシウム系硬化材に対しては、表-4 に示す 3 調合を作製し、乾燥収縮に関する検討を行った。

2.2 供試体作製方法

(1) マグネシウム系硬化材ペースト

モルタルミキサによる練り混ぜ後、Φ50×100 mm の円柱供試体を各 3 本作製した。また、3 本中 2 本に埋め込みゲージを埋設し、残りの 1 本はゲージなしとした。

(2) 版築供試体

モルタルミキサを用いて結合材、水の順に練り混ぜた後、土を加えさらに練り混ぜ、JIS R 5201 規定の 3 連式鋼製型枠を用いて、1 層 16 回の締固めを 4 層分行い 40×40×160 mm の角柱供試体を各条件に対し作製した。

(4 層各 16 回の締固めによる密度は 250 g/cm³) また、層間の密着性を高めるため、下の層に凹凸を付けた後、次の層を充填した⁴⁾。

2.3 実験項目

実験項目を表-6 に示し、各試験方法を以下に示す。

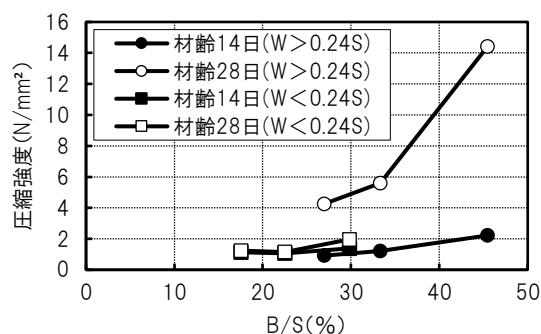


図-3 結合材量と圧縮強度の関係

表-3 マグネシウム系硬化材の成分

成分名	含有率 (wt%)	成分名	含有率 (wt%)	成分名	含有率 (wt%)
Na ₂ O	0.36	SO ₃	4.56	MnO	0.11
MgO	40.24	Cl	0.66	Fe ₂ O ₃	0.30
Al ₂ O ₃	8.02	K ₂ O	0.22	ZnO	0.01
SiO ₂	17.02	CaO	27.95	SrO	0.04
P ₂ O ₅	0.03	TiO ₂	0.35	ZrO ₂	0.02

表-4 調合割合 (マグネシウム系硬化材ペースト)

No.	W/B	B	W	養生方法	乾燥開始材齢(日)
1	0.40	1	0.40	封緘養生	14
2	0.60	1	0.60		
3	0.80	1	0.80		

表-5 調合割合 (版築供試体)

No.	記号	含水比	W/B	B/S	質量比					単位量(kg/m ³)				
					S(A)	S(O)	B	C	W	S(A)	S(O)	B	C	W
1	AM50	0.86	0.50	1.71	0.28	—	0.48	—	0.24	434	—	745	—	372
2	AM60	0.67	0.60	1.11	0.36	—	0.40	—	0.24	520	—	578	—	347
3	AM70	0.41	0.70	0.58	0.59	—	0.34	—	0.24	668	—	385	—	272
4	AM100	0.46	1.00	0.46	0.52	—	0.24	—	0.24	660	—	305	—	305
5	AC100	0.46	1.00	0.46	0.52	—	—	0.24	0.24	659	—	—	249	304
6	OM100	0.46	1.00	0.46	—	0.52	0.24	—	0.24	—	727	336	—	336

※荒木田土の最適含水比 (乾燥密度が最大となる水分量) 24%を基準とし、W/Bを変化させ供試体を作製。

※大分土:凝灰角礫岩の強度調査結果をもとに土の単位体積当たりの質量である湿潤密度 1.3 g/cm³を用いて単位量を計算⁵⁾

表-6 実験項目

実験項目	寸法(mm)	本数	養生方法	試験材齢および測定開始材齢(日)
マグネシウム系硬化材ペースト	乾燥収縮試験	φ50×100	封緘養生	14
	質量変化	φ50×100		14
版築供試体	圧縮強度試験	40×40×80*2	封緘養生	14, 28
	線膨張係数試験	40×40×160		28
	乾燥収縮試験	40×40×160		21
	質量変化	40×40×160		21

*2: JIS R 5201 セメントの物理試験方法に準拠し、曲げ強度試験実施後の寸法



写真-1 線膨張係数測定試験

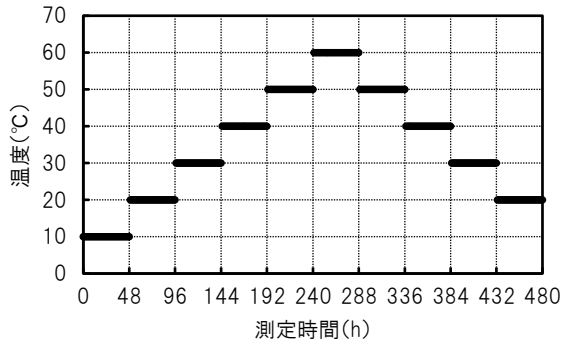


図-4 温度変化

(1) 圧縮強度試験

打込み直後から封緘養生とし、表-6 に示す材齢で圧縮強度試験 (JIS R 5201) を行った。

(2) 線膨張係数測定試験

試験状況および温度変化を写真-1, 図-4 に示す。

本試験では、水分の蒸発を防ぐために 6 面全面にシールを施した供試体に対して冷蔵庫および乾燥炉を用いて 20 °C から 10 °C まで降温し、その後 10 °C から 60 °C に温度を上昇させた後、20 °C まで降温し、10 °C ずつ温度上昇・降下させたときのひずみを測定した。また、供試体内部まで同一温度とするために、2 日間一定温度とした。

(3) 乾燥収縮試験

表-6 に示す材齢まで封緘養生とした後、マグネシウム系硬化材ペースト供試体は脱型し、版築供試体は脱型後、両側面にひずみゲージを貼り付け、それぞれ 20 °C, 60 %R.H. の恒温恒湿室にて静置した。

(4) 質量変化

マグネシウム系硬化材ペースト供試体および版築供試体ともに乾燥収縮試験開始と同時に 20 °C, 60 %R.H. の恒温恒湿室にて静置し、質量変化を記録した。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を図-5 に示す。

荒木田土とマグネシウム系硬化材を用い、水結合材比 (以下、W/B) を 50, 60, 70, 100 % と変化させた供試

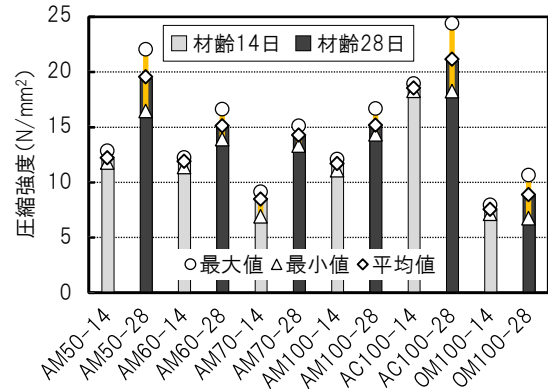
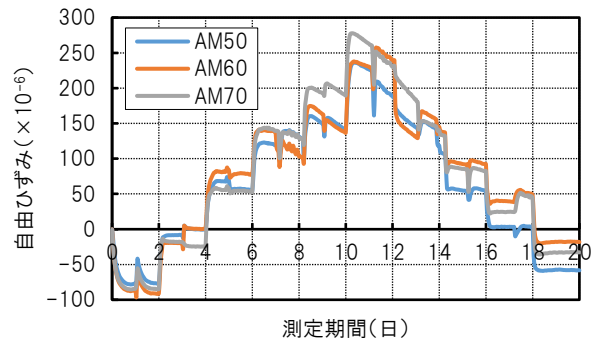


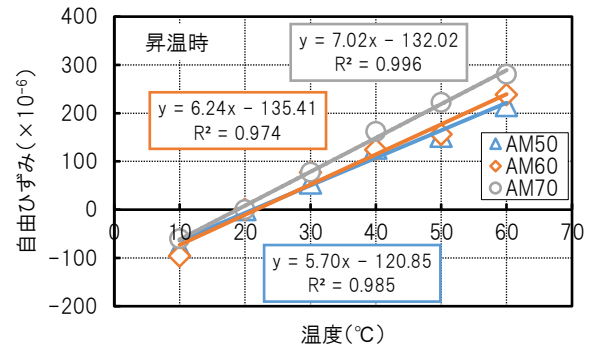
図-5 圧縮強度試験結果



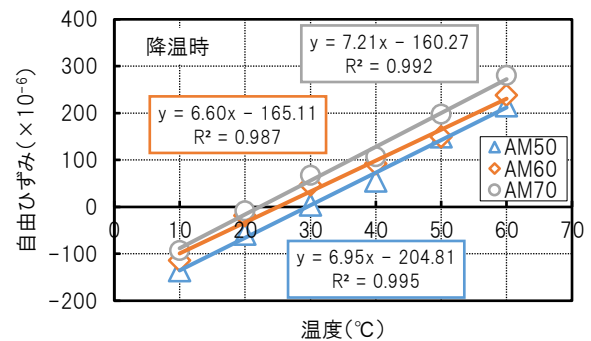
※測定に伴う扉の開閉により、同一温度の中間時期に自由ひずみが大きく変動

図-6 測定期間と自由ひずみの関係

(a) 昇温時における温度と自由ひずみの関係



(b) 降下時における温度と自由ひずみの関係



※正/負：膨張/収縮

図-7 温度と自由ひずみの関係

体 (AM50, AM60, AM70, AM100) では、材齢 14 日のとき、W/B=70%を除き、どの調合も 12 N/mm²程度の圧縮強度が得られた。また、材齢 28 日のとき、全調合において強度の向上を確認することができ、材齢 14 日に対する圧縮強度の増加率は、W/B=50%で約 1.6 倍、W/B=70%で約 1.7 倍、W/B=60, 100%で約 1.3 倍であった。なお、本実験の範囲内では、W/B=70%よりも W/B=100%の圧縮強度が高くなった。この要因として、既往の研究結果³⁾より、わずかな水分量の差で圧縮強度が変動することを確認しており、その影響が圧縮強度の誤差として現れたものと考えられる。マグネシウム系硬化材を用いた版築ブロックの強度発現メカニズムについては今後も検討する必要がある。

W/B=100%とし荒木田土にマグネシウム系硬化材またはセメントを用いた供試体 (AM100, AC100) では、材齢に関わらずセメントを用いた供試体の方が高い強度が得られることが確認できた。また、セメントを用いた供試体 (AC100) における圧縮強度の増加率は、約 1.1 倍であった。

W/B=100%とし荒木田土または大分土にマグネシウム系硬化材を用いた供試体 (AM100, OM100) では、材齢に関わらず、荒木田土を用いた供試体の方が、1.6~1.7 倍程度、高い強度が得られることが確認できた。

3.2 線膨張測定試験

測定期間と自由ひずみの関係を図-6 に示し、温度と自由ひずみの関係を図-7 に示す。なお、ここでは測定開始時の温度 20℃の時点を開始点とし、膨張側を正、収縮側を負の値で示している。

本実験は、荒木田土とマグネシウム系硬化材を用いて、W/B の異なる 3 調合に対し実施した。図-6 の測定期間とひずみの関係から、調合による違いは見られず、20℃から 10℃へ温度が低下するにつれて収縮傾向を示し、その後温度上昇とともにひずみが増大する結果が得られた。

各調合の昇温時および降温時における傾きを線膨張係数として算出した。その結果を図-8 に示す。昇温時は W/B が大きくなるほど線膨張係数が大きくなったが、降温時は W/B の影響は見られなかった。また昇温時に比べて降温時の線膨張係数が若干大きくなっており、その差は W/B が低いほど大きく、W/B=50%で $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であった。温度制御後の 20℃におけるひずみ変化が見られることから、温度変化を受け版築ブロック内で水分移動が生じ、見かけ上異なる線膨張係数値となった可能性も考えられるが原因は不明である。本実験の範囲内では、版築供試体の線膨張係数は $5.5 \sim 7.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ に分布する結果となり、コンクリートの線膨張係数 $7 \sim 13 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ (一般値: $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)⁶⁾ と比較し、小さい値であるこ

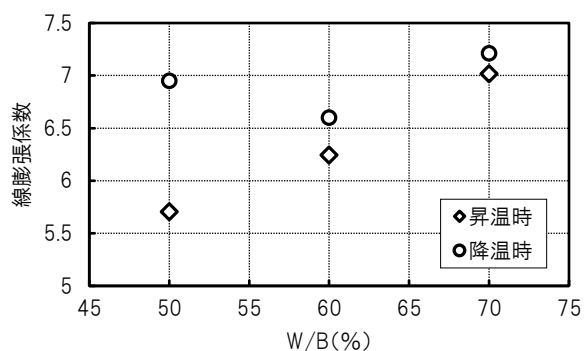
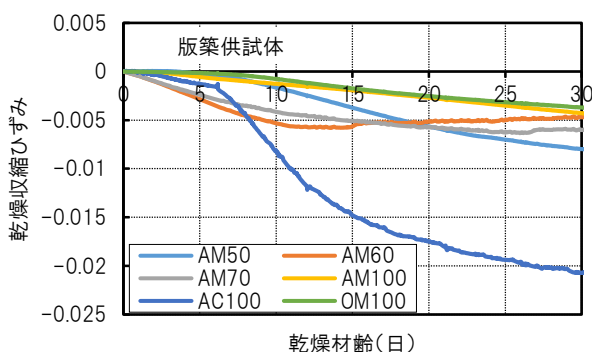
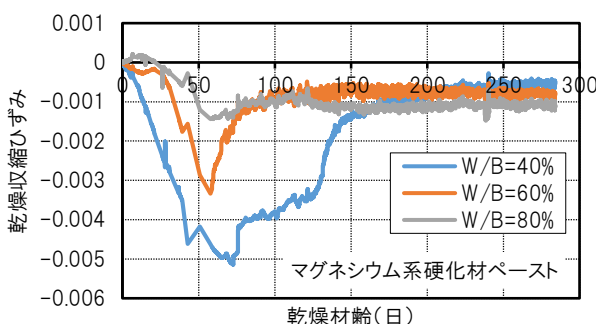


図-8 線膨張係数測定結果



※正/負：膨張/収縮

図-9 乾燥収縮試験結果

とが分かった。一方、本実験の範囲内では、版築供試体の線膨張係数と鉄骨部材の線膨張係数の差は小さく、複合構造システムの開発における影響は小さいと考えるが、この点についてはさらに検討を進めたい。

3.3 乾燥収縮試験

マグネシウム系硬化材ペーストおよび版築供試体の乾燥収縮試験結果を図-9 に示す。ここでは、測定開始時点を乾燥収縮ひずみ 0 とし、膨張側を正、収縮側を負の値で示している。

(1) マグネシウム系硬化材ペースト

マグネシウム系硬化材ペーストでは、乾燥材齢 60 日程度までは W/B が低いものほどひずみが大きく、その後は膨張傾向を示すことが見て取れる。酸化マグネシウムは水和反応過程において、膨張することは知られており、その影響が表れたものと考えられるが、マグネシウム系

硬化材の反応過程と自由収縮ひずみの関係は不明であり、これらのメカニズムの解明は今後の課題としたい。

(2) 版築供試体

版築供試体では、乾燥開始後1日で、マグネシウム系硬化材を用いた供試体（AC100以外）にひび割れを確認した（写真-2）。また、全ての調合において収縮傾向を示し、同期間における収縮に寄与するひずみはマグネシウム系硬化材ペーストよりも版築供試体の方が大きいことが確認できた。既往研究から、土の収縮における主要因は土の物理的性質と水分であり、粘土含量が高いものほど収縮が大きくなる⁷⁾ことが知られている。本実験では、粘土質の荒木田土を用いているため土の物理的性質の収縮率が高く、版築供試体となることで土含有量が増加するためにマグネシウム系硬化材ペーストと比較し、乾燥収縮ひずみが大きくなったと考えられる。

また、土の構造と収縮の関係について異なる粘土鉱物をもつ3種類の試料（白狐山土、関東ローム、八郎ヘドロ）に対し締固め土の収縮特性について検討を行った既往研究⁸⁾から乾燥収縮ひずみと含水比の関係を図-10に示す。既往研究⁸⁾では、サンプラーに入れた試料を一定回数たたきつけたのちに上面をジャッキで締固めてΦ5.0×5.0cmの円柱供試体を作製しており、乾燥時の収縮に伴う供試体底面の摩擦を軽減させるために供試体底部に細いガラス棒のコロを入れて乾燥収縮試験を実施している（実験時の室温：20～25℃）。既往研究⁸⁾の結果から、乾燥が進み含水比が低下するにつれて収縮ひずみが増大することが判明し、図-10から読み取った絶乾状態における乾燥収縮ひずみは、関東ロームで0.076、八郎ヘドロで0.124、白狐山土で0.20であった。

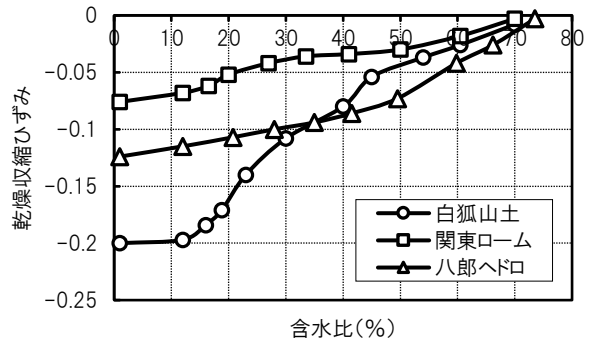
本実験では、鉱物は異なるもの、粘土質の荒木田土を用いており、版築供試体の乾燥収縮ひずみは0.025以下の範囲に収まっている。

乾燥材齢30日における版築供試体の乾燥収縮ひずみを図-11に示す。これによるとW/Bが大きいほど、収縮ひずみは小さくなり、結合材が同一の場合は土の種類が異なっても同様の収縮ひずみになるが、結合材の種類が異なると収縮ひずみの差が大きくなっている。本実験では、土の含水比を24%としていることから図-10における最も収縮ひずみが小さい関東ローム（0.05）と比較し、約1/10の収縮率となっており、版築供試体に含まれる結合材が土の収縮を拘束する役割を果たしているのではないかと考える。そのため、土の収縮試験を行い、土単体の収縮率と版築供試体の収縮率の違いについて検討を行い、また結合材の影響についても検討を行う必要があると考える。

図-9に示す版築供試体の結果から、土の違いによる差は見られないものの、セメントではなくマグネシウム



写真-2 乾燥収縮試験・供試体状況



※既往研究⁸⁾内の「図-10. 各試料土の収縮率－含水比の関係(乾燥過程)」を引用し、乾燥による収縮率³⁾を乾燥収縮ひずみに置換した図を作成

*3:
$$\frac{\text{実験開始時の供試体長} - \text{それぞれの乾燥状態での供試体長}}{\text{実験開始時の供試体長}} \times 100(\%)$$

図-10 乾燥収縮ひずみと含水比の関係

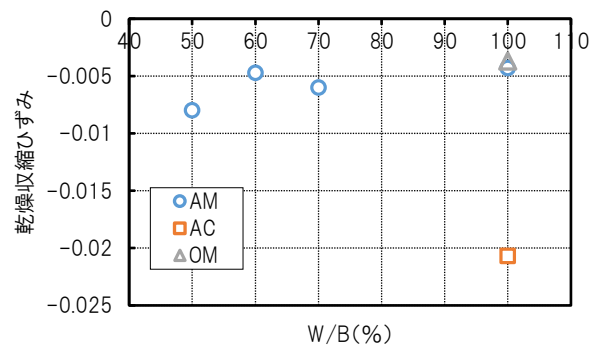


図-11 W/Bと収縮ひずみの関係（乾燥期間30日）

系硬化材を用いることで乾燥収縮ひずみは1/2倍程度抑えられることが確認できた。本実験では、版築供試体の乾燥期間が短いため、引き続き経過測定を行い、検討を行う予定である。

3.4 質量変化

マグネシウム系硬化材ペーストおよび版築供試体の質量減少率と乾燥材齢の関係を図-12に示す。

(1) マグネシウム系硬化材ペースト

マグネシウム系硬化材ペーストでは、W/Bが高いものほど質量減少率が高いことが図-12から見て取れる。また、調合によらず乾燥材齢が50日を経過すると供試体

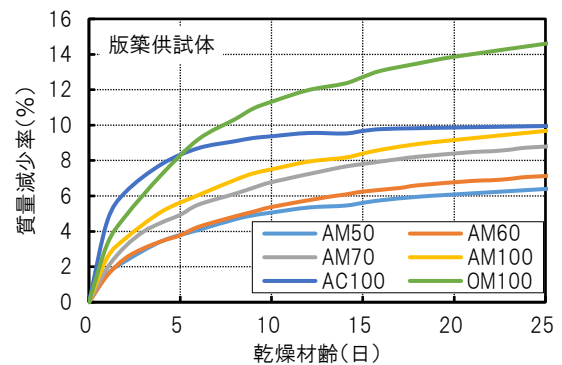
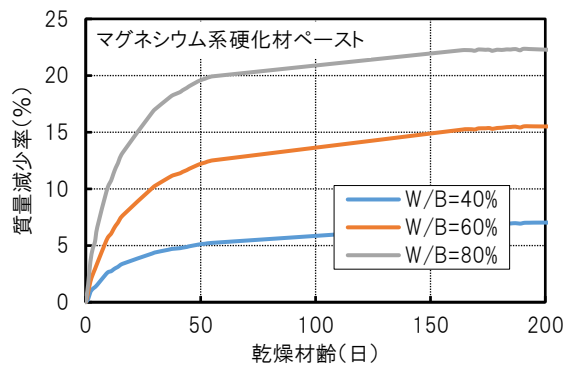


図-12 質量減少率

の質量減少率は収束傾向を示すことが分かる。図-9 と比較すると質量変化率が大きいものほど膨張ひずみが小さい傾向を示した。

(2) 版築供試体

版築供試体では、荒木田土とマグネシウム系硬化材を用いた供試体 (AM50, AM60, AM70, AM100) の場合、W/B が高くなるほど質量減少率が高くなるが見て取れる。セメントを用いた供試体 (AC100) はマグネシウム系硬化材を用いたものより初期材齢における質量減少率が最も高いが乾燥材齢 10 日頃から収束傾向を示すことが確認できた。また、大分土では、乾燥収縮試験における収縮ひずみは最も小さいものの、質量減少率で見ると減少率が高いことが分かった。乾燥収縮試験同様、引き続き経過測定を行う予定である。

4.まとめ

- (1) 圧縮強度試験の結果、荒木田土にマグネシウム系硬化材を用いた供試体は材齢 28 日までに 1.3~1.7 倍程度の強度増加が確認でき、大分土およびセメントを用いた供試体と比較し強度発現性が期待できる可能性を示唆した。
- (2) 本実験の範囲内では、版築供試体の線膨張係数は $5.5\sim 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ であり、コンクリートの線膨張係数と比較し、小さい値であった。
- (3) 乾燥収縮試験の結果、マグネシウム系硬化材ペーストと比較し、版築供試体の乾燥収縮ひずみが大きい。このことから、マグネシウム系硬化材の収縮力に対し、土の収縮力が強いと考えられる。
- (4) 粘土鉱物が異なる 3 種類の土の乾燥収縮ひずみの中で最も乾燥収縮ひずみが小さい関東ロームと比較し、版築供試体の収縮率は約 1/3 倍以下であることから、版築供試体に含まれる結合材が土の収縮を拘束する役割をしていると考えられる。
- (5) マグネシウム系硬化材を用いることで版築ブロックの乾燥収縮ひずみは 1/2 倍程度低減することを確

認した。

謝辞

本研究に取り組むにあたり、多大なるご助言をいただいた、東京理科大学非常勤講師の薩田英男先生に心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 堀川義之, 永尾隆志, 奥野充: 国東半島, 両子火山群一岡ノ岳火山の噴火活動, 日本火山学会・火山, 第 61 巻, 第 1 号 pp.225-236, 2016.3
- 2) 赤谷樹一郎, 大塚秀三, 竹村雅行, 遠野未来: 荒木田土を用いた版築壁の強度性状に及ぼす調査および施工要因の影響に関する研究, 日本建築学会・関東支部研究報告集I, pp.41-44, 2012.3
- 3) 杉山晴香, 今本啓一, 清原千鶴: 版築ブロックの強度特性に関する基礎的研究, 日本コンクリート工学年次論文集, vol.40, No.1, pp.1905-1910, 2018
- 4) 中村航, 奥石直幸: 戸建住宅の組積耐力壁に用いる非焼成土ブロックの材料・調査および製造条件に関する検討, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 47 号, pp.17-21, 2015.2
- 5) 凝灰角礫岩の強度調査, 石材の調査結果について: http://www.bunka.go.jp/seisaku/bunkashingikai/kondankaito/takamatsu_kitora/takamatsukento/04/pdf/takamatu_duka_kentoukai4-4-2.pdf (閲覧日: 2018 年 12 月 28 日)
- 6) 長瀧重義 編: 平成 8 年制定 コンクリート標準指図書 [設計編], 社団法人 土木学会, pp.25-26, 1996
- 7) 野澤典子, 佐藤一良, 浅野真澄, 斉藤公夫: 土層の収縮, 亀裂形成に関する要因の解析, 東北農業研究, 第 43 号, pp.51-52, 1990.12
- 8) 吉田力: 土の収縮特性に及ぼす土壌構造の影響, 山形大学紀要 (農学), 第 11 巻, 第 4 号, pp.871-878, 1993.1