

固化材の添加が版築の圧縮強度に及ぼす影響

日大生産工(PD) ○荒巻 卓見 日大生産工 湯浅 昇

1 はじめに

土を突き固めて築造される版築は、ブータン王国において現代でも写真1に示すような民家を中心として多く現存する伝統的建造物である。しかし、近年、国内外を問わず大規模地震が頻繁に発生し、伝統的建造物を含む多くの建造物に被害が生じている¹⁾。そのため、これらの補修や補強が、文化財の保存の観点から特に伝統的建造物である版築において急務になる一方、耐震性能を確保するための有効な技術が整備されていないのが実状である。

そこで、本研究は、伝統的建造物である版築の耐震性能の向上を図るために、版築の主原料である土の改良方法の提案を最終目的とした。ここでは、その基礎的段階として、水和反応による強度の向上が期待できるセメントおよび二酸化炭素との硬化反応による強度の向上が期待できる消石灰の添加が版築の圧縮強度に与える影響を実験的に検討した。

2 実験概要

実験の組合せを表1に示す。

2.1 実験の要因と水準

実験の要因は、固化材の種類と添加量とし、固化材にセメントおよび消石灰の2種類を用いて、それぞれ添加量を土に対する質量比で5%、10%および20%の3水準とした。また、比較用として、固化材を添加していない土のみを水準

に加えた。養生条件は、固化材の有無や種類ごとの強度発現機構に応じたものとし、表1に示すとおり定めた。

2.2 版築試験体の使用材料および作製方法

使用材料を表2に、版築試験体に用いた土の調合を表3に示す。版築試験体に用いた土は、質量比で粘土と珪砂を1:0.5で混合し、図1に示す予備検討の結果から乾燥密度が概ね最大となる含水率15%を目標に加水したものとした。なお、固化材には、普通ポルトランドセメントおよび工業用消石灰2号を用いた。

版築試験体の突固め条件を表4に、版築試験体の作製フローを図2に示す。版築試験体は、



写真1 ブータン王国における版築造の民家

表1 実験の組合せ

固化材	有無・種類	無し(土のみ)	セメント			消石灰		
	添加量*1		5%	10%	20%	5%	10%	20%
養生条件	気中養生*2	○	○	○	○	—	—	—
	封かん養生*2	—	—	○	—	—	—	—
	気中養生(促進炭酸化)*3	—	—	—	—	○	○	○
圧縮強度試験材齢*4		1日, 3日, 7日, 14日, 28日, 56日						

*1: 土に対する質量比, *2: 20±2°C, R. H. 60±5%, *3: 20±2°C, R. H. 60±5%, CO₂濃度5±0.2%

*4: 土+セメント10%の封かん養生は材齢28日まで

Effect of Admixture of Cement and Slaked Lime on Compressive Strength of Rammed Earth

Takumi ARAMAKI and Noboru YUASA

表2 使用材料

材料	種類・産地	性状
土	粘土	岡山県笠岡市産 密度: 2.45g/cm ³
	珪砂(6号)	愛知県岡崎市産 密度: 2.65g/cm ³
水	上水道水	—
セメント	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³
消石灰	工業用消石灰2号	JIS R 9001:2006に適合

表3 版築試験体に用いた土の割合

粘土:珪砂(質量比*)	加水量
1:0.5	図1より含水率15%を目標に加水

*: 気乾状態の質量比(絶乾状態の質量比で粘土:珪砂=1:0.54)

表4 版築試験体の突固め条件

試験体の寸法		Φ100×200mm
突固め条件	ランマー質量	2.5kg
	ランマー落下高さ	30cm
	突固め層数	6層
	突固め回数	25回/1層

寸法をφ100×200mmとし、ランマーを用いて同一の突固め条件で作製した。また、版築試験体は、突き固めて成形した直後に型枠を脱型し、各養生条件で養生を行った。なお、固化材を添加する場合、目標含水率15%に調整した土に対してセメントまたは消石灰を混合したものを試料土とした。

2.3 圧縮強度試験の方法

圧縮強度試験は、材齢1日、3日、7日、14日、28日および56日に行い、JIS A 1108:2006の方法を準用した。また、圧縮強度は、3体の平均値とした。

3 実験結果および考察

3.1 突固め時の試料土の含水率

突固め時の試料土の含水率試験結果を表4に示す。ここでは、突固め時の土のみ、土+セメントおよび土+消石灰の試料土について、固化材の添加前後の含水率を測定した結果を示している。

固化材の添加前の含水率は、いずれの試料土においても、目標とした含水率15%程度であり、多少のばらつきが見られるものの圧縮強度に著しい影響を与えない範囲の変動と思われる。また、固化材の添加後の含水率は、固化材の種類によらず、固化材の添加前の含水率から添加

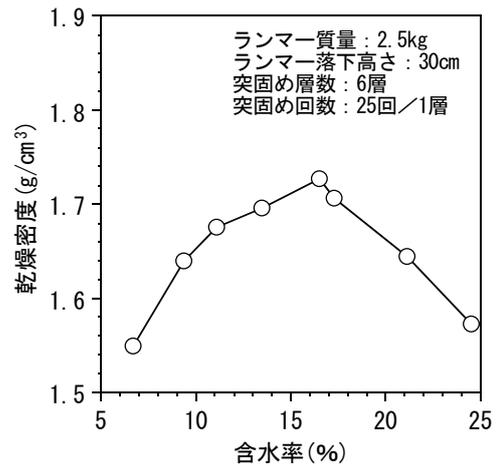


図1 土の含水率と乾燥密度の関係

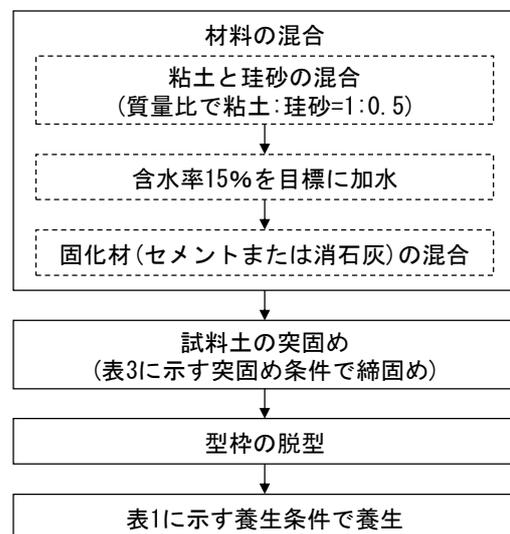


図2 版築試験体の作製フロー

表4 突固め時の試料土の含水率試験結果

試料土	突固め時の試料土の含水率 (%)	
	固化材の添加前 (土のみの状態)	固化材の添加後 (土+固化材の状態)
土のみ	14.9	—
土+セメント	5%	14.8
	10%	15.3
	20%	14.8
土+消石灰	5%	15.2
	10%	15.9
	20%	15.4

量5%で約1%、添加量10%で約2%、添加量20%で約3%の低下が見られた。

3.2 版築試験体の圧縮強度

(1) 土のみの版築試験体の圧縮強度

土のみの版築試験体の材齢と圧縮強度の関係を図3に示す。

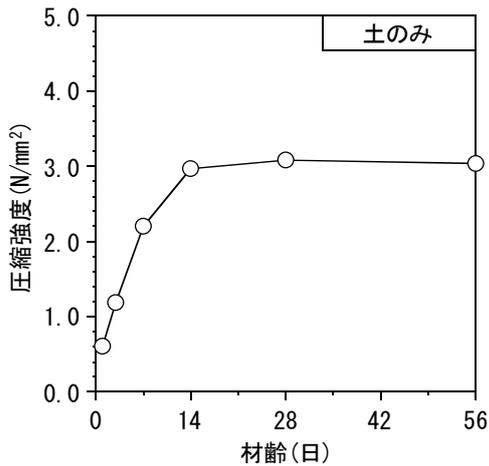


図3 土のみの版築試験体の材齢と圧縮強度の関係

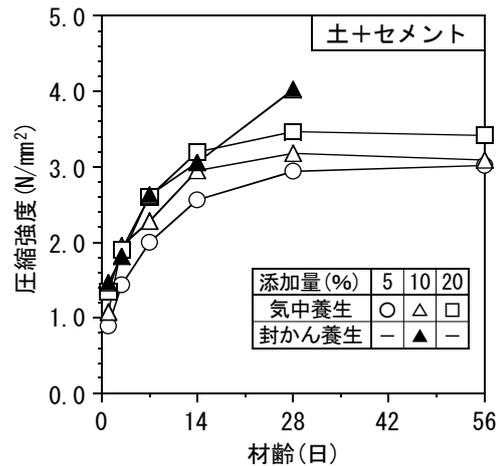


図5 セメントを添加した版築試験体の材齢と圧縮強度の関係

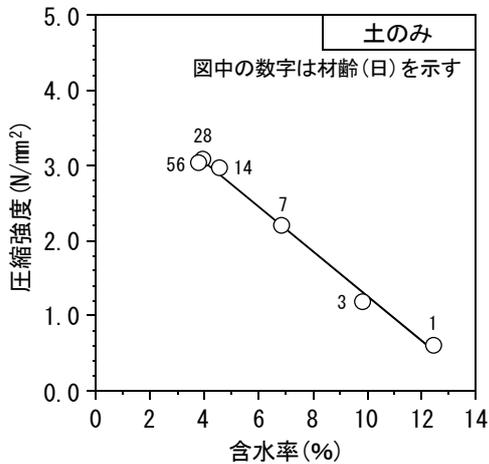


図4 土のみの版築試験体の含水率と圧縮強度の関係

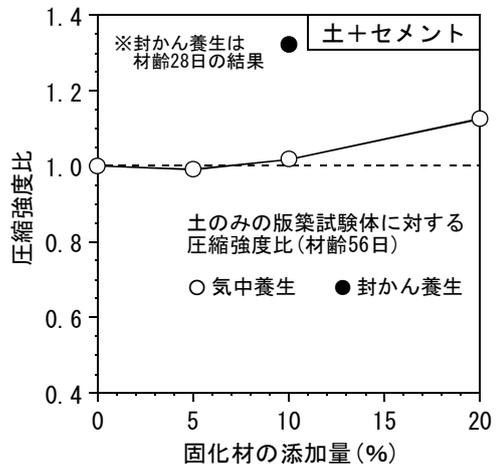


図6 セメントを添加した版築試験体の固化材の添加量と圧縮強度比の関係

固化材を添加していない土のみの版築試験体の圧縮強度は、概ね材齢14日で一定となる傾向を示し、最大で約3.0N/mm²であった。材齢初期の強度増進は、材齢の経過に伴う乾燥により、間隙水が減少したことで土粒子間の結合力が高まったためと考えられる。なお、含水率と圧縮強度の関係は、図4に示すように密接な関係となり、含水率の低下に対して直線的に圧縮強度が大きくなる傾向を示した。

(2) 固化材を添加した版築試験体の圧縮強度

セメントを添加した版築試験体の材齢と圧縮強度の関係を図5に、セメントを添加した版築試験体の固化材の添加量と圧縮強度比の関係を図6に示す。

固化材としてセメントを添加した版築試験体の圧縮強度は、気中養生とした場合、固化材の添加量によらず、概ね材齢28日で一定となる傾向を示した。これは、普通ポルトランドセ

メントの水和反応による強度発現が材齢28日で80%程度に達するためと考えられる。また、セメントの添加量の違いでは、添加量が多いほど圧縮強度が僅かに大きくなるものの、土のみの版築試験体と比較して、添加量が5%および10%の場合同等程度であり、添加量が20%の場合約1.1倍であった。この点については、本実験の固化材の添加方法が最適含水率に調整した試料土に対して固化材を添加しているため、セメントを添加した試料土の含水率が低下し、密実に締め固まらなかったことが原因と考えられる。一方で、養生条件の違いでは、気中養生とした試験体よりも封かん養生とした試験体の方が顕著に大きくなる傾向を示した。これは、気中養生とした場合、乾燥によりセメントの水和反応に必要な水分が不足したことで、セメントの硬化による強度増進の効果が十分に得られなかったものと考えられる。また、セメ

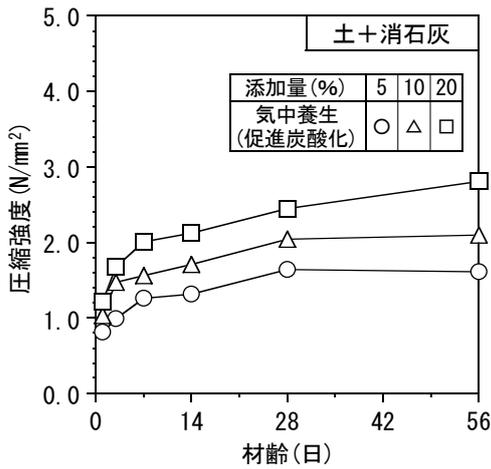


図7 消石灰を添加した版築試験体の材齢と圧縮強度の関係

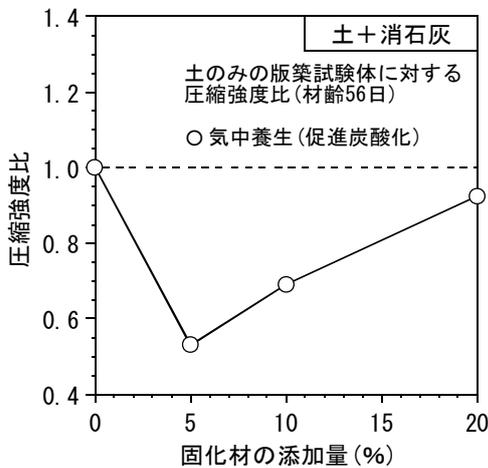


図8 消石灰を添加した版築試験体の固化材の添加量と圧縮強度比の関係

ントを添加して封かん養生した版築試験体の圧縮強度は、土のみ版築試験体の約1.3倍であり、強度の向上が認められた。

消石灰を添加した版築試験体の材齢と圧縮強度の関係を図7に、消石灰を添加した版築試験体の固化材の添加量と圧縮強度比の係を図8に示す。

固化材として消石灰を添加した版築試験体の圧縮強度は、固化材の添加量によらず、材齢の経過に伴う緩やかな強度増進が見られ、促進炭酸化の環境下 (CO_2 濃度 $5 \pm 0.2\%$) において、材齢56日以降も僅かに大きくなることが示唆される。これは、消石灰と二酸化炭素との反応が非常に遅いためである²⁾。また、消石灰の添加量の違いでは、添加量が多いほど圧縮強度が大きくなるもの、土のみの版築試験体と比較して、消石灰の添加による強度の低下が見られた。これは、セメントを添加した場合と同様に、最

適含水率に調整した試料土に対して固化材を添加しているため、消石灰を添加した試料土の含水率が低下し、密実に締め固まらなかったことに加え、消石灰の添加が土粒子間の結合力を阻害したものと考えられる。

以上のことから、固化材としてセメントまたは消石灰を添加する場合、乾燥密度が最大となる含水率に調整した土に対して単に固化材を添加するだけでは強度の向上がほとんど得られず、土のみよりも強度が低下する場合もあることが示唆される。これは、固化材の添加による含水率の低下により密実に締め固まらなかったことに加え、固化材の種類によっては土粒子間の結合力を阻害したことによるものと考えられる。

4 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) セメントを添加した版築試験体は、材齢28日程度で強度増進が停滞する傾向を示した。また、セメントを添加する場合、封かん養生とすることで強度の向上が認められた。
- (2) 消石灰を添加した版築試験体は、促進炭酸化の環境下 (CO_2 濃度 $5 \pm 0.2\%$) において、材齢56日までの緩やかな強度増進が認められた。
- (3) 乾燥密度が最大となる含水率に調整した土に対して固化材を添加した場合、セメントおよび消石灰の添加量によらず強度の向上がほとんど見られなかった。

「謝辞」

本研究は、JSTとJICAが共同で実施している地球規模課題対応国際科学技術協力プログラムにおける研究課題「ブータンにおける組積造建築の地震リスク評価と減災技術の開発」(研究代表者:名古屋市立大学 青木義孝教授)の一環で行ったものである。ここに記して、関係各位に謝意を表す。

「参考文献」

- 1) Division for the Conservation of Heritage Sites, Department of Culture, Ministry of Home and Cultural Affairs, Royal Government of Bhutan : Damage assessment of rammed earth buildings after the September 18, 2011 earthquake, (2011)
- 2) Gernot Minke著, 興石直幸, 藤田香織監訳: 土・建築・環境 エコ時代の再発見, 西村書店, (2010)