

## 加水量および乾燥温度が版築の圧縮強度に及ぼす影響

日大生産工 (PD) ○申 相澈 日大生産工 湯浅 昇 名古屋市立大 青木 孝義

### 1 はじめに

版築は、土を主原料として締固めた構造体を構築する工法であり、世界各地で古来から伝わる伝統的な築造技術である。ブータン王国においては、首都ティンプーの市街地では鉄筋コンクリート建築や煉瓦建築が使われるが、それ以外のほとんどの地域では民家と公共施設が伝統建築である版築により建てられている。こういう版築造は地震に弱く、過去にはブータン東部 (2009年9月21日M6.1) とインドネパール国境地域 (2011年9月18日M6.9) で発生した地震により、多くの建物が倒壊・半壊した<sup>1,2)</sup>。そのため、伝統建造物や文化財の耐震性能向上のための研究が不可欠との認識が広がっているが、ブータンの伝統建築に適した耐震化指針は作成されておらず、インド等の海外の既存の指針を流用しているのが現状である。

筆者らは、ブータンにおける組積構造建築の地震リスク評価と減災技術の開発に関する研究の一環として、版築の材料特性及び改質方法について検討を行ってきた。既往の研究から、版築の強度発現メカニズムは乾燥によること、固化材としてセメントの添加は乾燥が緩やかとなる版築内部で強度向上の効果が期待できるが、消石灰の添加は対策とならないこと、強度向上を目指した最適な突き固め回数及び層数などを明らかにした<sup>3)</sup>。その成果に引き続き本研究では、セメント、石灰等の改良材を混合しない版築材料を対象とし、加水量および乾燥温度が版築の材料特性に及ぼす影響について実験的に検討した。

### 2 実験計画及び方法

#### 2.1 実験概要

版築材料の強度特性は試験体の含水比と乾燥条件にあることを想定して行った本実験の概要を表1に示す。まず、加水量の変化が強度性状に及ぼす影響を検討するために、土 (粘土+珪砂) に対して7, 11, 15, 19%の加水量と混

合・作製し、いずれも20°C・60%の恒温恒湿室で養生した。ここで、土は図1に示している予備実験の結果から乾燥密度が概ね最大となる含水率となるように15%の加水量を基準とした。また乾燥温度シリーズの実験として、前述のように加水量15%で作製した試験体を各々5, 12, 20, 27, 35°Cと設定した恒温室で養生を行った。試験体は、材齢14, 28, 56, 91, 182日に圧縮強度試験と含水率を測定した (材齢182日は測定予定)。

表1 実験概要

要因	加水量 (%)	乾燥温度 (°C)	測定項目
加水量の影響	7	20	圧縮強度 含水率 (材齢14, 28, 56, 91, 182日)
	11		
	15		
	19		
乾燥温度の影響	15	5	
		12	
		20	
		27	
		35	

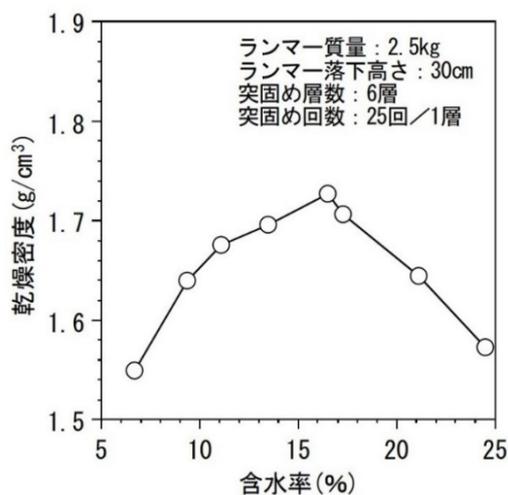


図1 土の含水率と乾燥密度の関係

Effect of Mixing Water Content and Curing Temperature on Compressive Strength of Rammed Earth Construction

Sangchul SHIN, Noboru YUASA and Takayoshi AOKI

## 2.2 使用材料

使用材料を表2に示す。本実験で使用した土は、粘土（岡山県笠岡市産：密度  $2.45\text{g/cm}^3$ ）と珪砂5号（愛知県岡崎市産：密度  $2.65\text{g/cm}^3$ ）を気乾状態の質量比で1:0.5で混合したものとした。混合水は上水道水を用いて、写真1のように噴霧器を使用してミスト散布の形で加水した。

## 2.3 版築試験体の作製方法

版築試験体の作製条件を表3に示す。試験体は $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体レベルで、鋼製型枠を用いてJIS A 1210:2009に規定される2.5kgのランマー（写真2）により、落下高さ30cmで、6層に分け、各層25回の条件で突き固めた。突き固めが終わった試験体は、成形した直後に型枠を取り外し、予め定めた養生室で養生を行った。ただし、乾燥温度 $27^\circ\text{C}$ と $35^\circ\text{C}$ の試験体においては、急激な乾燥でひび割れが生じることを防ぐため、材齢14日までは $20^\circ\text{C}$ の恒温室で乾燥させた。

表2 使用材料

材料		種類・産地	物性
土	粘土	岡山県笠岡市産	密度： $2.45\text{g/cm}^3$
	珪砂(5号)	愛知県岡崎市産	密度： $2.65\text{g/cm}^3$
水		習志野市上水道水	—

表3 版築試験体の作製条件

土の調合	粘土：珪砂 (機関状態の質量比)	1 : 0.5
	加水量	表1による
締固め条件	試験体の寸法	$\phi 100 \times 200\text{mm}$
	ランマーの質量	2.5kg
	ランマーの落下高さ	30cm
	突き固め層数	6層
	突き固め回数	25回/層
養生	乾燥温度	表1による

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 加水量の影響

図2に加水量変化実験における材齢による強度発現性状を示す。いずれも材齢経過につれて圧縮強度は高くなっており、材齢91日強度は14日強度に比べて約 $0.44 \sim 0.66\text{N/mm}^2$ 高くなった。加水量に対して見れば、15%の試験体がすべての材齢で最も高い強度値となっており、7%の試験体は一番低い強度を見せている。加水量7%試験体と15%試験体の91日強度差は $0.84\text{N/mm}^2$ となったが、強度値自体が低いレベルの版築材料では大きな違いといえる。一方で、加水量11%と19%は、材齢に関係なくほとんど同程度で、15%試験体と7%試験体の中間程度の水準となった。このことから版築において強度発現に影響を及ぼす加水量はピークが存在することがわかる。

図3の横軸に加水量、縦軸に圧縮強度と含水率を示す。圧縮強度は加水量が多いほど高くなる傾向にあるが、15%以上になると逆に低下している。前述のように、版築の最適含水率は15%程度であることが本実験でも確認された。含水率の場合、56日の値は加水量が多いことによって含水率も多いが、それだけで加水量と含水率の一定な傾向を説明することは難しい。従って、乾燥温度が一定な場合、乾燥した版築試験体の含水率に対する調合水量の影響は大きくないと考えられる。また、加水量7%の試験



写真1 練混ぜの様子

写真2 ランマー

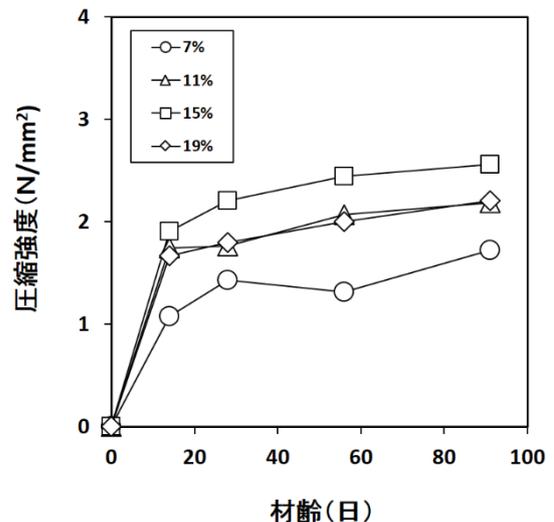


図2 加水量による強度発現性状

体を除けば、材齢28日と56日の含水率差は大きくなく、56日以降の含水率減少が顕著であった。材齢91日では、すべての試験体で2.07～2.28%となっており、これは材齢28日の含水率から44～58%小さい。材齢91日の含水率は加水量の変化にかかわらず同程度であり、圧縮強度には影響を及ぼさないと考えられる。結局、同じ乾燥条件では、加水量の変化が強度性状には影響を及ぼすが、試験体の含水率は同程度となることが確認された。

### 3.2 乾燥温度の影響

図4に乾燥温度の影響に関する実験の圧縮強度試験結果を示す。加水量試験体と同様に、すべての試験体が材齢経過、つまり乾燥が進行されることにより圧縮強度は大きくなった。乾燥温度ごとに検討すると、温度が最も低い5℃の部屋で乾燥した試験体の強度がすべての材齢で最低値を示し、35%以外の試験体では乾燥温度が高いほど強度値が高くなることが確認された。特に27℃で乾燥させた試験体は、28日以降ずっと最大値となっており、20℃の試験体と比べて0.8～1.0 N/mm<sup>2</sup>程度高くなった。しかし、35℃の試験体の場合には、28日強度は27℃試験体より若干小さい水準であったが、材齢が増加するにつれてむしろ強度が小さくなる結果となった。91日の圧縮強度は20℃で乾燥した試験体よりも小さくなった。182日の強度データが確認されていないが、版築の強度発現メカニズムは乾燥にあるが、高い温度での乾燥は逆に強度発現に悪影響を及ぼす可能性があることが確認された。

図5に乾燥温度により変化する圧縮強度と含水率を示す。図からわかるように圧縮強度と含水率は非常に密接な関係を見せている。まず、乾燥温度と圧縮強度を見てみると、前述の35℃の乾燥温度での強度低下を別にすると、乾燥温度が高くなるほど圧縮強度は高い。一方、91日材齢で35℃の試験体の含水率が20℃の試験体よりも小さいにもかかわらず、強度はその分伸びていないことがわかる。これは、今の段階で説明するには難しいが、本実験の182日の実験結果及び、今後の実験で試験体の含水率だけでなく試験体内部の水分分布などを測定することで明らかにしたいと思う。

### 3.3 含水率と圧縮強度の関係

図6に加水量シリーズ実験と乾燥温度シリーズ実験における含水率と圧縮強度の関係を示す。加水量シリーズの場合は、同じ水準の含水率での強度差が大きいことから一定な傾向

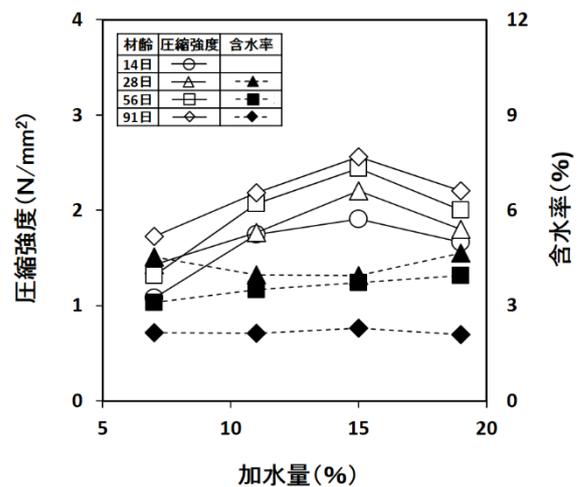


図3 加水量による圧縮強度と含水率

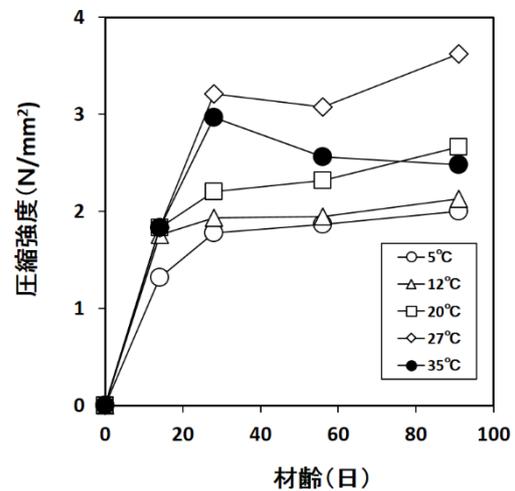


図4 乾燥温度による強度発現性状

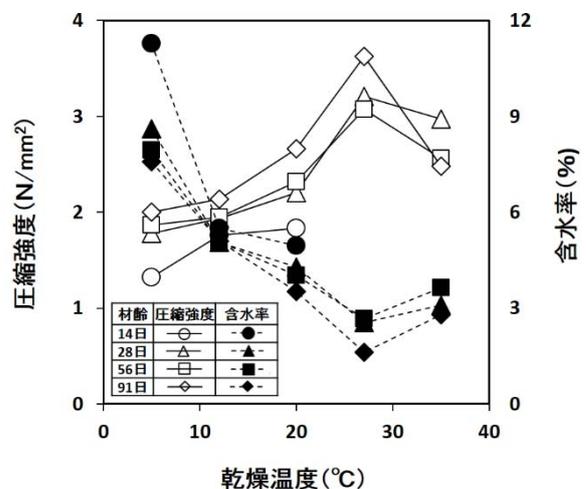


図5 乾燥温度による圧縮強度と含水率

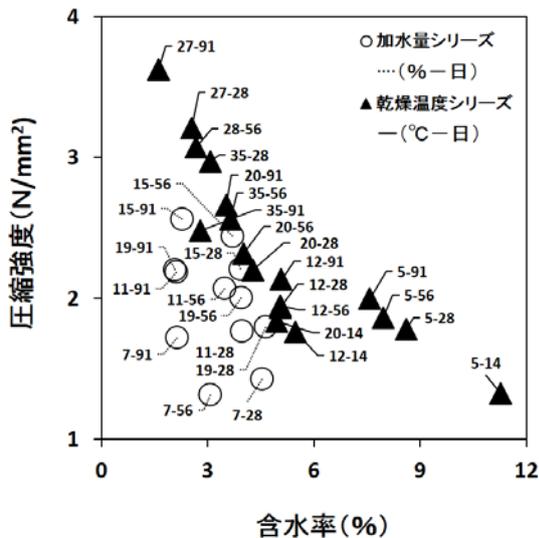


図6 含水率と圧縮強度の関係

が見られなかった。反面、乾燥温度シリーズでは、比較的に高い相関関係が確認できる。結局、乾燥の進行により強度が発現される版築の強度性状は、一定な乾燥環境では最初の加水量に影響を受けるが、この場合加水量による版築の含水率の変化は大きくないといえる。しかし、同じ調査条件で製造された版築の場合、乾燥される環境条件の影響を強く受け、強度性状と含水率は変化し、両者の相関が高いことが認められた。

#### 4 まとめ

本研究では、加水量および乾燥温度が版築の材料特性に及ぼす影響について実験的に検討し、以下の知見を得られた。

- (1) 版築材料の強度性状は乾燥によるが、同一な乾燥環境では、調査上の加水量により圧縮強度が変化する。また、版築の強度が最も高くなる加水量はピーク値が存在し、本実験の範囲では15%程度である。
- (2) 調査が同じ場合、乾燥温度により圧縮強度と含水率が大きく変化し、含水率が小さいほど圧縮強度は高くなる。

#### 「謝辞」

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)、国立研究開発法人日本医療研究開発機構(AMED)、独立行政法人国際協力機構(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カプログラム「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 青木孝義教授)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) 青木孝義, 宮本慎宏, K.C. SHRESTHA, 湯浅昇, 高橋典之, 張景耀, 荒巻卓見, ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究その1プロジェクトの概要と伝統的版築造住宅のモニタリング, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2018) p. 903~904.
- 3) 湯浅昇, 青木孝義, 荒巻卓見, 宮本慎宏, K.C. SHRESTHA, 高橋典之, 張景耀, Phuntsho WANGMO, ブータンにおける組積造建築の耐震化技術に関する研究その2版築の材料強度の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (2018) p. 904~905.