

ブータンの版築造を再現したブロックの材料特性に関する研究

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

ブータンでは、伝統的な建築物として、土を突き固めて構築する版築造が用いられている。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いる。既往の研究では、 $\phi 100 \times 200$ mmの円柱供試体を対象とし、版築の強度発現メカニズム、固化材添加の効果、最適な突き固め方法、圧縮強度に及ぼす加水率と乾燥温度の影響などについて明らかにした。しかし、一定の環境で作製・乾燥した小さい供試体の実験結果を実際ブータンの版築造に適用することは限界があり、屋外で作製・曝露したブロックレベルでその特性を検討することは非常に重要である。

現存するブータンの版築建築物の強度や品質を把握することは非常に難しく、その実績も少ない実情である。そこで、本研究は、ブータン現地における版築造の品質調査手法を確立することを目的とし、その一環として、日本で作製した版築ブロックを対象とし、圧縮強度、静弾性係数、含水率などの材料特性について検討を行った。

2. ブロックの試験体の概要

表1に版築ブロック試験体の概要、表2に使用材料を示す。本実験で使用した土は、粘土と珪砂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、既往の研究から乾燥密度及び圧縮強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。混ぜた土の様子を写真1に示す。試験体のサイズは、ブータンの版築造と同じ大きさとするため、W(600mm)×H(600mm)×L(600～1200mm)とした。型枠は合板で組立て、底面か

表1 版築ブロック試験体の概要

土の調合	粘土：珪砂	1：0.5（気乾状態）
	加水率	15%
試験体の寸法		600×600×600mm
突き固め層数		10層
突き固め時間		20分/層
乾燥方法		脱型直後脱型・屋外乾燥

表2 使用材料

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



写真1 混ぜた土



写真2 型枠



写真3 木製ハンマー



写真4 型枠内

ら約40cm高さまでは単管パイプで補強した（写真2参照）。突き固めは、写真3の木製ハンマーで限界（体積変化がない時）まで突くことを想定し、本実験では1層あたり20分間行った。層数は10層を基準とし、1層の高さが

A Study on the Material Properties of Blocks that Reproduced
Rammed Earth of the Bhutan

Sangchul SHIN, Noboru YUASA and Takayoshi AOKI

表 1 版築ブロック試験体の作製結果

試験体番号	1号	2号	3号	4号	5号
作製日	2018.8.23	2018.10.24	2018.12.20	2019.6.13	2019.8.2
サイズ(mm)	600×600×600	1200×600×600	600×600×600		
土の調合	粘土 (1) : 珪砂 (0.5) 加水率 15%		1号を崩して 土を再利用	2号を崩して 土を再利用	1号・2号と 同様
土の量 (Kg/層)	30	90	—	—	40
突き固め 層数	8	10			
乾燥方法	成形直後脱型し、屋外乾燥				
備考 (問題点及 び改選策)	・噴霧器で混合 ・1層あたり1時間 程度かかったので 打設当日済ませな かた (8層で終了)	・じょうろを使用 ・打設時間短縮 (30分/層) ・上面からの雨水 の浸透が多く乾燥 しにくい	・雨の影響を防ぐ ために打設直後か ら上面にビニルシ ートをかぶせる	・きれいな面と粗 い面が発生(端っ この突き固め方法や 脱型方法の検討必 要) ・梅雨で破損	・セラミックセン サを用い、質量含水 率との関係を検討 ・木材の蓋を上面 にかぶせる
測定項目	—	—	・含水率 ・圧縮強度 ・静弾性係数	—	・含水率 ・セラミックセン サによる電気抵抗

60mm となるようにした。ブロック作製途中の型枠内の様子を写真4に示す。作製したブロックは、打設直後脱型し屋外で乾燥させた。測定項目としては、ブロックからコア試験体を採取し、深さ方向の含水率、圧縮強度、静弾性係数試験を行った。

3. 版築ブロックの作製結果考察

表3に版築ブロックの作製結果を示す。ブロックは合計5体を作製し、作製日が古い順から1号～5号のように呼称する。各ブロック試験体の作製結果及び特徴を以下に示す。

まず、最初の1号試験体では、加水の仕方や土の量などを探りながら行った。加水は実験室実験と同様に噴霧器を使ってミスト散布の形で加水した。よって、土の混合に時間がかかってしまい、一日で作業が終わらず、総層数は8層となった。また、土の量を1層あたり30kgとしたが、高さ600mmまで作製するためには10層を超える結果となった。なお、写真5に示すよう乾燥に伴いひび割れが多く生じた。

2号ブロックでは、ブロックの長さを1200mmとし、各層の土の量を90Kgと1号より増やしたが、完成したブロックの高さは660mmと基準を超えてしまった。ここからは、作製時間短縮のため加水にじょうろを用いて、各層30分程度で打込むことができた。一方、雨が降った際に上面からの雨水の浸透が多く乾燥しにくいことがわかった(写真6参照)。

3号ブロックは、雨の影響を防ぐために打設直後から上面にビニルシートをかぶせた(写真7)。この3号ブロックを用いてコア抜き作業



写真5 1号ブロック



写真6 2号ブロック



写真7 3号ブロック



写真8 4号ブロック



セラミックセンサーの設置様子



脱型直後の様子

写真9 5号ブロック

を行い、含水率、圧縮強度、静弾性係数を測定した。一方で、3号と4号ブロックはそれぞれ1号と2号を崩して粉碎した土を再利用した。

4号ブロックは、脱型後きれいな面と粗い面が発生した。これは、端っこの突き固め方法や脱型方法に起因すると思われ、さらなる検討が必要である。なお、4号ブロックは写真8のように乾燥期間中梅雨でほとんど破損され、測定不可の状態となった。

5号ブロックでは、非破壊試験の観点から版築ブロックの内部含水率を測定することを目的とした。ここではコンクリートに埋め込んだ場合にその電気抵抗とコンクリートの質量含水率の関係が明らかとなっているセラミックセンサを用い、セラミックセンサの電気抵抗値と版築の質量含水率との関係を検討した。セラミックセンサの設置様子及び脱型直後の様子を写真9に示す。また、5号試験体より、600×600×600mmの体積のブロックを作製するためには1層あたり約40kgの土が必要であることがわかった。

4. 試験結果及び考察

4.1 3号ブロックの試験結果—含水率、圧縮強度、静弾性係数

版築の材料強度は非常に小さいため、一般的なアンカー固定式コアドリルでは試験体を採取することが難しい。よって、本実験では手で持てるコアドリルを用いてコア試験体を採取した。3号ブロックでは、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ 、 $\phi 75 \times 150\text{mm}$ 、 $\phi 100 \times 150\text{mm}$ の円柱試験体を抜き取り、上下面を石膏でキャッピングし、圧縮強度と静弾性係数の測定を行った。また、 $\phi 50 \times 150\text{mm}$ の円柱試験体を1cm単位で輪切りし、表面から深さ方向の含水率分布を測定した。

図1に材齢146日に行った3号ブロックの圧縮強度測定結果を示す。コア試験体の直径が一番小さい $\phi 50 \times 100\text{mm}$ では 2.3N/mm^2 で最も高い強度値を示し、他の試験体は $1.6 \sim 1.7\text{N/mm}^2$ となった。同じ調合の円柱供試体の91日強度が 2.56N/mm^2 であったことと比べると、版築ブロックでは円柱供試体よりも少し低い強度レベルを持つことがわかった。

図2に3号ブロックの静弾性係数測定結果を示す。 $\phi 100 \times 150\text{mm}$ 試験体のD/Hが若干大きいことにより静弾性係数は少し高くなっているが、本実験の範囲では、146日間乾燥した時点での版築ブロックの静弾性係数は $0.6 \sim 0.7$

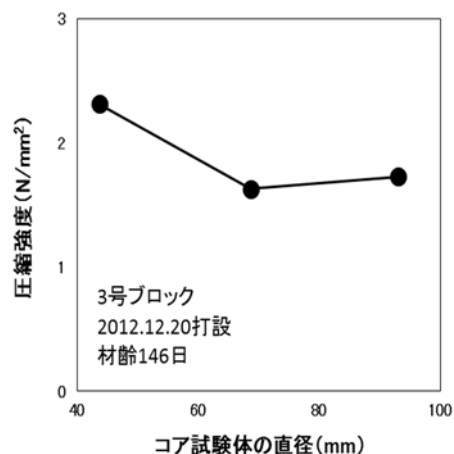


図1 3号ブロックの圧縮強度

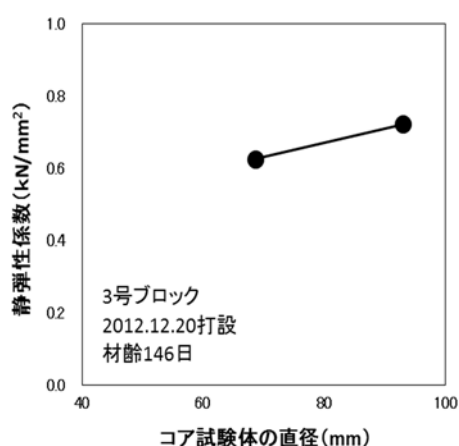


図2 3号ブロックの静弾性係数

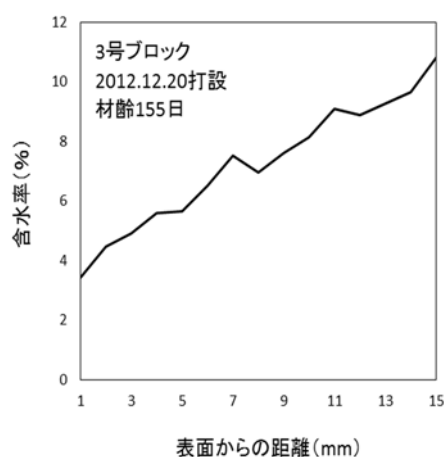


図3 3号ブロックの含水率

kN/mm^2 程度となった。

図3に3号ブロックの含水率を示す。表面部の含水率は約3.5%、表面から15cm深さでは10%を超える結果となった。版築ブロックの乾燥による含水率の変化は、表面から距離が離れていくことに対し直線的に増加している。

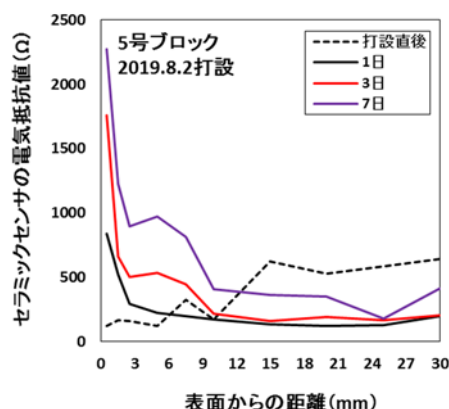


図4 セラミックセンサの電気抵抗値

4.2 5号ブロックの試験結果—セラミックセンサによる含水率推定

図4に5号ブロックにおいて表面からの距離ごとにセラミックセンサによる電気抵抗値を示す。打設直後の電気抵抗は、表面から内部に行くほど大きくなった。打設直後にはセラミックセンサを設置した部分の土の含水率にバラツキはあるためであると思われる。しかし、材齢1日、3日、7日の場合は、全体的に表面よりも内部の電気抵抗値が低いことがわかる。また材齢の経過に伴い、電気抵抗値は乾燥により高くなることが確認された。

図5に材齢7日に測定したセラミックセンサの電気抵抗値と質量式含水率の関係を示す。本実験では、質量含水率試験を行ったコア試験体の長さが150mmであったため、表面から150mm深さまでの関係を示している。図からみると、両者の関係は直線的な関係にあり、全体的な相関は比較的高いと考えられる。1000Ωを基準とし、その以下の範囲では急激な変化、その以上では緩やかな変化を見せている。このように、セラミックセンサにより、版築ブロックの含水率を推定することの可能性が確認できた。ただし、本実験では、データが少なかったため、もっと多くのデータを蓄積し、さらに検討する必要はあると考えられる。

4 まとめ

本研究では、ブータン現地における版築造の品質調査手法を確立することを目的とし、日本で作製した版築ブロックの材料特性について検討を行い、以下の知見を得られた。

1) 日本の粘土と珪砂の混合した土を用いて、ブータンの版築造と同様のサイズのブロック

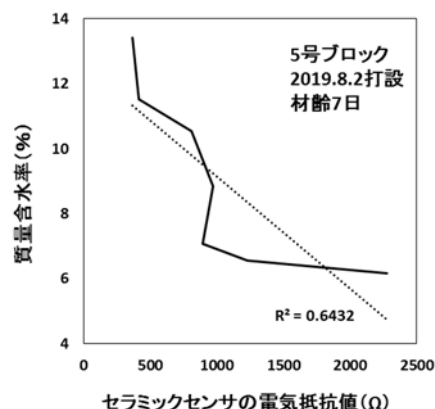


図5 セラミックセンサの電気抵抗値と質量式含水率の関係

を作製することができた。また、十分乾燥したブロックにおいては、コア試験体を採取して材料実験を行うことが可能であった。

2) 材齢146日の版築ブロックからコア抜きした試験体の圧縮強度は2N/mm²前後となり、同試験体の静弾性係数は0.6~0.7kN/mm²の範囲となることがわかった。

3) 版築ブロックの含水率分布は、表面からの距離が増えると含水率が高くなった。これは、セラミックセンサの電気抵抗と質量含水率の関係からキャリブレーションカーブを作成し、今後推定可能であると考えられる。

「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る。

「参考文献」

- 1) 申相澈、湯浅昇、青木孝義、Phuntsho Wangmo、K. C. Shrestha、宮本慎宏、高橋典之、張景耀、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7版築の圧縮強度に及ぼす加水率および乾燥温度の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、(2019) p.849~850.
- 2) 湯浅昇、笠井芳夫、松井勇、埋め込みセラミックセンサの電気的特性によるコンクリートの含水率測定方法の提案、日本建築学会構造系論文集、62巻 498号(1997) p. 13-20