

(23) 竹補強組積造の力学挙動に関する 実験的研究

寺井 雅和

正会員 近畿大学准教授 工学部建築学科 (〒729-6112 広島県東広島市高屋うめの辺一番)
E-mail:terai@hiro.kindai.ac.jp

筆者らは、竹材をコンクリート構造物の補強材にした、竹筋コンクリート造の開発研究を進めてきた。これまで取り組んできた実験結果を踏まえ、レンガ組積造の補強材として竹を使った「竹補強組積造」を開発する。本研究では、竹補強組積造の力学挙動を確認することを目的にした基礎実験を行った。試験体はレンガ組積壁を無補強のものと竹材で補強したものの二体を作製し、対角線加力によるせん断破壊実験を行い、竹材によるレンガ組積造に対する補強効果を確認した。レンガ組積壁のせん断破壊において、水平目地モルタルで滑りが生じたのち、竹材がダボ抵抗することで耐力の向上と変形能力の増大が期待できることが確認された。

Key Words : Masonry, Wall, Bamboo, Shear Strength, Dowel Action

1. はじめに

(1) 研究背景

組積造は、小さな建材を積み上げて構造体をつくり、大型の建設機械や設備が必要ないので施工が容易であることから、古くから世界各地で造られている。しかしながら、組積造は構造的に弱く、地震などの水平外力を受けると崩壊する危険性がある。世界で巨大地震が発生する多くの地域では、今でも組積造建物が数多く建設され、地震のたびに建物が崩壊し多くの人命が失われている。また、鋼材価格は原料の価格高騰などで近年上昇しており、さらに製造には大量の二酸化炭素を排出するため環境問題も懸念されている。近い将来、鋼材の使用が制限されることも考えられ、鋼材に代わる材料を用いた「ものづくり」が期待される。

竹は、東南アジアを中心に世界各地に600種、日本でも約150種が生育している。さらに、竹は加工が容易で軽量なので運搬コストが低く、建設分野に竹材を積極的に活用することで、建築物の製造コストを低く抑えることが可能となる。引張強度が鋼材並みに大きいので、鉄筋の代用品として、「竹筋コンクリート構造」として利用している地域がある（日本も戦時中までは施工されていた）。

筆者らは、竹材をコンクリート構造物の補強材（竹主筋や竹繊維）にして、開発途上国における「耐震建築」および「耐震補強技術」に活用することを目的とした開

発研究を進めてきた^{1),2)}。竹とコンクリートを組み合わせる場合、竹には脂肪分が多く含まれており、コンクリート中でアルカリ性の水分を吸収すると、この脂肪分がアルカリによって溶け、竹の組織は破壊することが既往の研究で指摘されている³⁾。しかしながら、筆者らがこれまでに行った竹筋コンクリート部材の実験では、極端な強度低下や性能劣化は見られず、低コストで耐久性の高い構造物を造ることが可能であると考えている。実際に、30-40年前に竹筋コンクリート構造物は日本国内でも施工されており、それが現在でも使用され続けているという事例が確認されている⁴⁾。「竹とコンクリートの組み合わせ」は、多くの可能性を秘めており、建築構造物はもとより工業製品としての実用化もすでに様々な産業で進められている。

(2) 研究目的

レンガなどの組積造の補強筋として、竹材（あるいは類似の植物）を利用する構造形式は、インドや中南米などの諸外国ですでに施工され、設計法や施工のためのガイドライン（以下、ガイドライン⁵⁾）も作られている。しかし、その構造特性については未解明の部分が多く、様々な角度からの検証が必要であると考えている。

本研究は、インドで施工されている「竹補強組積造」を事例として、この構造の力学性状を確認することを目的として、竹補強組積造壁体の対角線加力による実験を行い^{6),7)}、破壊性状およびせん断変形について検証した。

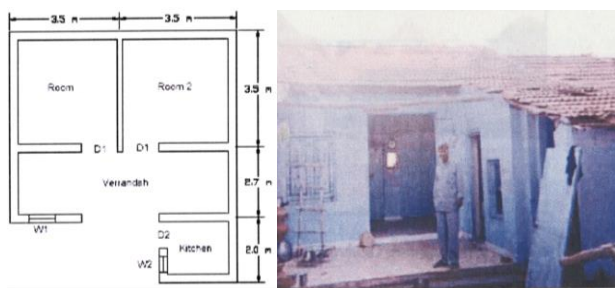


図-1 インドの住宅⁵⁾

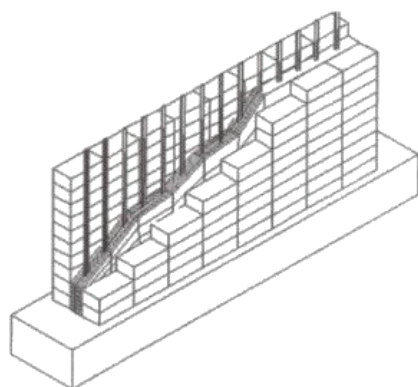
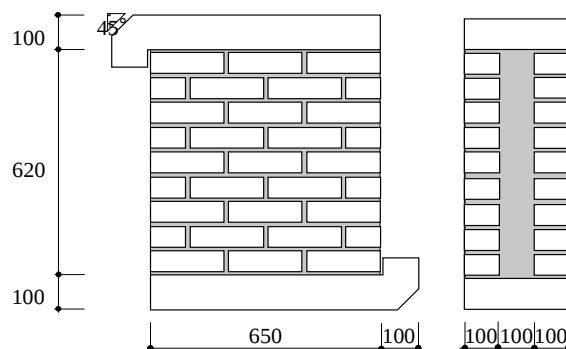


図-2 インドの竹筋組積造⁵⁾

表-1 試験体一覧

試験体	補強筋	
	縦筋	水平筋
BRM-N	なし	なし
BRM-B	φ 15	割竹



BRM-N

図-3 試験体形状および寸法

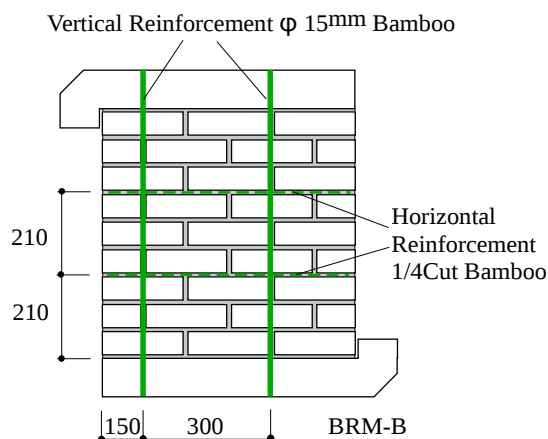


図-4 配筋位置

2. 実験計画

(1) インドの住宅

インドの住宅の約3割、都市部に限っては6割がレンガ造である。標準的なインドの住宅は、平屋で屋根は竹や木で母屋を組んで土を葺いたものが多い。壁は不整形な自然石を粘土モルタルで積み上げており、大きな壁厚の効果により乾燥地域の防暑・防寒には適するが、水平面の拘束力がないため地震に極めて脆弱である。図-1に標準的なインド住宅の平面図と写真を示す⁵⁾。本研究で計画している組積造試験体は、この住宅の設計で想定されている耐力壁をもとにしている。

(2) 試験体計画

前節で紹介した住宅を想定して、耐力壁の一部を抜き出した試験体を製作した。インドのガイドラインによると、インドで施工されている竹補強組積造の構造形式は、図-2のように、壁の厚さ方向には、壁の表裏にレンガを一行に積み、その間にモルタルを充填する。このモルタルの中に竹を井桁状に組み補強筋としている。

図-3に示すように、試験体制作では、この構造形式を再現した。補強組積壁の上下には、加力装置への取り付け部として鉄筋コンクリート（以下、RC）スタブを取り付ける。なお、縦筋の上下端部はRCスタブ内に150mm定着させており、この長さもガイドラインに定められたものとした。竹筋による配筋位置を図-4に示す。

インドのような中進国でも貧富の差が大きく、地方では品質の良い材料は入手できない。そのことを想定して試験体を作ると、極めて粗悪なものを作らなければならず、実験データの信頼性が曖昧になるので、本実験ではいずれも日本で販売され入手が出来る材料を使用した。レンガはJIS4種（210×60×100mm、圧縮強度30MPa以上）で、インドで実際に使用されているレンガに比べると品質がよいものであるが、現地のレンガを入手できなかったため国産のものを使用した。モルタル用の石灰とセメントは市販品として、消石灰と普通ポルトランドセメントを使用した。

モルタルの調合は、ガイドラインを参考に、容積比でセメント1：石灰1：細骨材6とした。水分量については、施工性を考慮して決定したが、実測値として水セメント比125%となるようにした。

使用した材料の強度試験結果を表-2にまとめて示す。

表-2 材料強度

	ヤング係数 (10^3N/mm^2)	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)
レンガ	12.1	48.2	—
コンクリート(スタブ)	18.3	9.42	—
目地モルタル	8.2	3.81	—
竹($\phi 15$)	11.8	—	197



写真-1 試験体製作風景

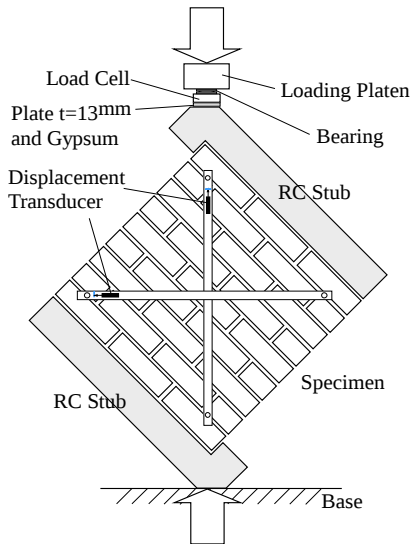


図-5 対角線加力

(3) 試験体制作

レンガは、RCスタブを水平にして積んだ。9段のレンガを積み上げるが、一気に積むと重みで目地モルタルが収縮するので、5段+4段に分けて積むことにした（写真-2）。レンガを5段積んでから目地モルタルを硬化させ、レンガの間にモルタルを中込めし、その後最低二日間空けてから次の段を積んでいくことにした。竹補強試験体（BRM-B）では、水平筋として $\phi 15\text{mm}$ の竹を四分割したものを、所定の位置で3号のタコ糸により縦筋に固く縛った。ガイドラインでは、竹筋の面外方向の精度確保のための繋ぎ筋（Tie筋）を、壁面に対して直行方向に配筋することになっているが、試験体寸法が小さかったため省略した。



写真-2 加力装置全景

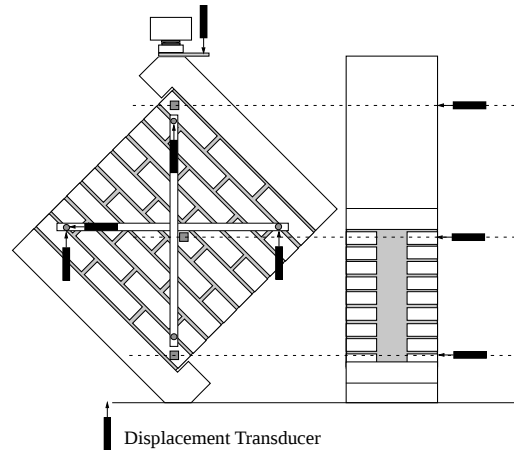


図-6 変位計測位置

(4) 载荷・測定方法

壁部材による水平目地面における垂直応力作用下のせん断強度を簡易的に確認される方法として、アメリカやヨーロッパなどで一般的に行われている壁を 45° 傾けて対角線方向に加力される方法で試験を行った。図-5に示すように加力スタブの端部を切り欠いて、万能試験機で上下に圧縮力を加えた。加力装置の全景を写真-2に示す。

せん断変形および壁体の面外方向の変形を計測するため、図-6に示すように変位計を取り付けた。せん断変形は、二つの対角線の伸縮を計測するために計測フレームを取り付けた。さらに、試験体の回転を計測する3点、面外方向に対して3か所の点を計測した。

3. 実験結果

(1) ひびわれ発生状況

図-7に、実験終了後のひびわれ発生状況を示す。無補強壁（BRM-N）および竹補強壁（BRM-B）ともに同じひびわれ性状が確認できた。载荷初期の段階では、壁面全体に小さなひびわれがいくつか見られたが、その後、下から4段目の水平目地沿いにすべり出した。水平目地がすべり出したときの荷重値は二体で異なった。

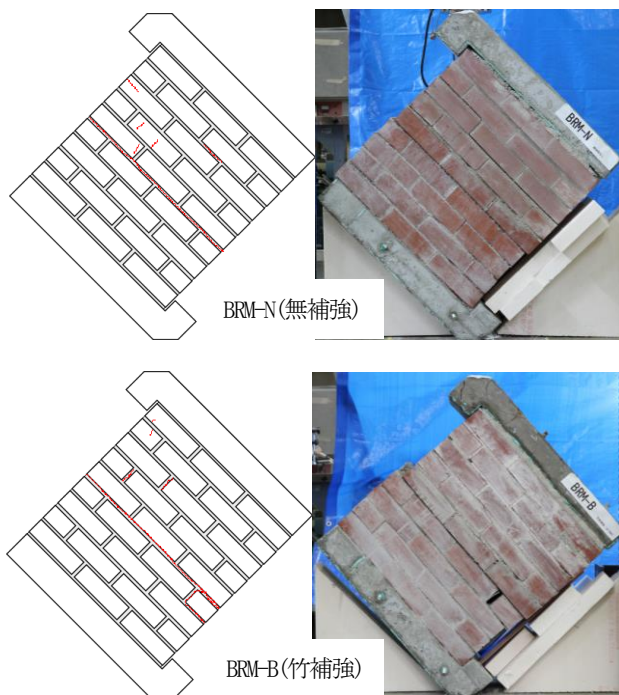


図-7 ひびわれ発生状況（実験終了時）

(2) せん断応力－層間変形角関係

図-8に、二体の実験から得られたせん断応力度－せん断変形角関係を示す。グラフの縦軸は、圧縮応力を45°に分解した成分を断面積（300mm×650mm）で除した値として平均せん断応力を表す。横軸のせん断変形角は、試験体対角線方向に取り付けた二本の変位をもとに算出した。

無補強壁（BRM-N）は、ゆるやかに剛性が落ちながら荷重が増大し、水平目地がすべり出すとともに頭打ちとなった。その後、一旦荷重が低下するものの、ほぼ一定値を保ちながら変形したが、部材角0.5%rad.頃から緩やかに荷重が下がっていった。補強試験体（BRM-B）は、BRM-Nより小さな荷重から水平目地がすべりだし、部材角0.5%rad.まで一定の荷重を保持しながら変形する。その後、竹補強材がせん断抵抗（ダボ抵抗）をしたと考えられ、荷重は増大を続けた。部材角1.5%rad.頃から耐力を保持したが、ダボ抵抗を支持していたレンガ（下から4段目の最外縁；図-7下）が外れて急激に荷重が落ちていった。

(3) 耐力

試験体の破壊状況や荷重－変形の関係から、壁のせん断耐力は水平目地モルタルのせん断強度に支配され、水平せん断破壊を生じたのち、竹補強されたものは補強筋のダボ抵抗（図-9に概念図を示す）で耐力上昇したと考えられる。そこで、耐力評価は a) 水平目地モルタル強度と b) ダボ抵抗の二つに分けて検討する。

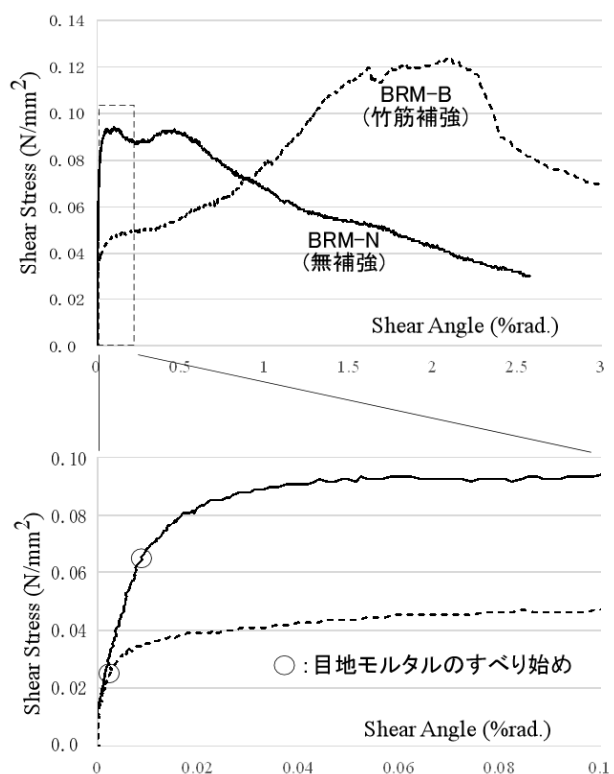


図-8 せん断応力度－せん断ひずみ関係

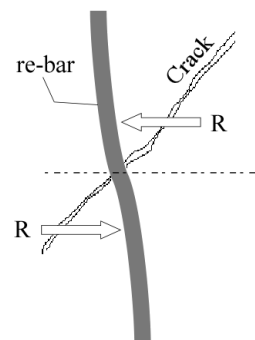


図-9 ひび割れ面を横切る補強筋によるダボ抵抗

a) 水平目地モルタル強度

モルタル接合面の垂直応力 σ とせん断応力度 τ の関係は、モール・クーロンの破壊条件にあてはめて説明することができ、既往の文献でも次式が紹介されている⁶⁾。

$$\tau = 0.17 \cdot \sqrt{\sigma_m} + 0.3 \cdot \sigma$$

$$\text{かつ} \quad \tau \leq 1.3 (N/mm^2) \quad (1)$$

ここに、 σ_m ：モルタル一軸圧縮強度

本実験の加力方法では、すべり面が45°傾いて垂直応力を受けながらせん断破壊していることになる。すなわち、対角線加力の場合、せん断応力度 τ = 直応力度 σ として計算できる。

b) ダボ抵抗

破壊面を横切るように補強筋が挿入されている場合、図-9のようなダボ抵抗が作用している。この図のように、ひび割れ面周辺のモルタルによって拘束されたダボ抵抗力は、本実験のようなモルタル強度が低く（20MPa未満）、補強筋強度が低い（400MPa未満）の場合、次式で簡単に計算される⁹⁾。

$$Q_d = 0.25d_{rv}^2 \cdot f_y \quad (2)$$

ここに、 d_{rv} ：補強筋の直径、 f_y ：補強筋の降伏強度

式(1)で、モルタル目地のすべり強度を計算すると、 0.474N/mm^2 となる。図-8の拡大図より、実験でははるかに小さな応力度ですべり出していることがわかる（図中○印）。モルタルは、強度のばらつきが大きく、また施工性にも大きく左右されるため、二体の試験体で違いが生じたと考えられる。

次に、式(2)より補強試験体のダボ耐力を計算すると 22.2kN となり、試験体の応力度に換算すると 0.11N/mm^2 である。水平目地が摩擦滑りをしながらダボ抵抗をしていると考え、実験結果はおおよそ計算値で評価できることが確認できる。

4. まとめ

竹補強組積造の力学性状を確認することを目的として、竹補強組積造壁体試験体として無補強のものと竹材で補強したもの二体を製作し、対角線加力による実験を行い、せん断強度および破壊性状について検証した。

レンガ組積壁のせん断破壊において、水平目地モルタルで滑りが生じたのち、竹材がダボ抵抗することで耐力の向上と変形能力の増大が期待できることが確認できた。

謝辞：本研究は、公益財団法人住友財団2012年度環境研究助成を受けて実施しました。また、試験体製作・実験実施にあたり、近畿大学建築生産研究室の卒研生諸氏により多大なご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Masakazu TERA I and Koichi MINAMI : Basic Study on Mechanical Properties of Bamboo Reinforced Concrete, Proc. Of IABSE-IASS 2011 Symposium, London(UK), DVD, 2011.
- 2) Masakazu TERA I and Koichi MINAMI : Fracture Behavior and Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Concrete, Key Engineering Materials Vols.488-489, Trans Tech Publications, Switzerland, pp.214-217, 2011.
- 3) Sreemathi Iyer : GUIDELINES FOR BUILDING BAMBOO-REINFORCED MASONRY IN EARTHQUAKE AREAS IN INDIA, University of Southern California, 2002.
- 4) 河村協：竹筋コンクリート，山海堂社出版部，1941
- 5) 玉井 孝幸，嵩 英雄：現存する竹筋コンクリート造を求めて：熊本県小国町のコンクリートアーチ橋群の調査より，コンクリート工学，47(6)，pp.19-27，2009
- 6) 馬場明生，石井克侑，在永末徳，千歩 修：対角線加力試験法による鉄筋コンクリート組積造耐力壁の斜張力剪断性状に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 556 号，pp.15-20，2003
- 7) 藤井光治郎ほか：既存レンガ造建物の耐震診断と耐震補強に関する研究 その1～4，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.1009-1016，1990
- 8) Miha Tomazevic : Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings Series on Innovation in Structures and Construction – Vol.1, Imperial College Press, 1999
- 9) Eurocode 6 : Design of masonry structures, Part 1-1: General rules for buildings. Rules for reinforced and unreinforced masonry, ENV 1966-1-1: 1995 (CEN, Brussels), 1995

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF BAMBOO REINFORCED MASONRY WALL

Masakazu TERA I

This paper deals with shear behaviors of bamboo reinforce masonry walls, that consists of two leaves (wythes) of masonry units, separated by a cavity into which the vertical and horizontal reinforcement is placed and grouted with either grout. Two bamboo reinforced masonry wall specimens in which the bamboo was used as reinforcement was prepared and tested under diagonal tensile monotonic loading. Then, it can be clarified that part of the shear capacity of the wall can also be attributed to vertical bamboo reinforcement acting in bending (dowel action).