竹の設計強度の算定および人力 施工が可能な接合法の開発

— 竹を構造物材料として用いた応急仮設
建築物の設計・施工の実例 その2 —

EVALUATION OF DESIGN STRENGTH OF BAMBOO AND DEVELOPMENT OF JOINT MAKING METHOD WITH MANUAL WORK

— Design and construction of emergency temporary
building made of bamboo material (Part 2) —

永井拓生 — * 1 陶器浩一 — * 2

キーワード:

竹, 竹構造, 設計強度, 接合法, セルフビルド, 応急仮設建築,
空間構造

Keywords:

Bamboo, Bamboo structures, Design strength, Joint making method,
Manual work, Emergency temporary building, Spatial structure

Takuo NAGAI — * 1 Hirokazu TOKI — * 2

In this article, we discuss on the mechanical properties of bamboo as construction material and on the development of handmade joint connecting bamboos, based on the results of some experiments. We used them in the planning of the actual building as reported in the previous paper (Part 1).

We sampled some test pieces in the bamboo forest near the building site, and conducted experiments to evaluate the strength of bamboo. Joint making method was also developed by repeating some test trials. We propose two types of method, which have convenience for manual work and enough reliability in securing necessary strength.

1. はじめに

前報(その1)にて, 著者らが設計および施工を行った, 竹を構造物材料として用いた空間構造物の実例(以下, 「竹の会所」)について, 設計・施工計画および実際の施工状況を報告した²⁾。本報告(その2)では, 「竹の会所」の設計にあたり事前に実施した竹の設計強度の算定, および手作業による人力施工が可能な丸竹同士の接合法の開発とその設計耐力の算定について述べる。

2. 竹の設計強度の算定

2. 1 強度試験の概要

竹は建築基準法において構造物材料として性質が定められていない材料であり, 竹構造の設計にあたっては各種の材料強度・定数を実験等により求める必要がある。代表的な既往研究として, 井上ら³⁻⁵⁾が大分県産マダケについて多くの強度試験を行っており, 試験方法による強度への影響や強度のばらつき等, 有益な知見を示している。また, 陶器ら⁶⁾は滋賀県産マダケを対象とした曲げ試験を行い, 丸竹の曲げ破壊のメカニズムについて考察を行っている。

本建築物においては, マダケ(真竹)とモウソウチク(孟宗竹)の2種類の竹を構造物材に用いている。モウソウチクはマダケと比べ肉厚が大きく, 大きな曲げモーメントや軸力を負担する部材に使用する。このため, モウソウチクの曲げ強度と剛性を把握する必要があり, 実際の工事において竹を調達する竹林(宮城県気仙沼市)で試験体を採取し, 設計に先立って強度試験を行った。

強度試験は曲げと引張の2種類を行い, 圧縮とせん断の試験は省略した。この理由は, 前報²⁾において断面検定式に示したように, 部材の軸力・せん断力に対しては, 竹そのものの強度よりも後述する竹

同士の接合部耐力や座屈耐力のほうが小さいことが想定され, 部材設計においてはこれらが決定的となり圧縮強度, せん断強度は直接使用しないためである。引張試験については, 同様に引張軸力により竹そのものが破断することはないと想定されるが, 引張強度と曲げ強度との比較を行うため予備的に実施した。

また, 肉厚の薄いマダケは, 軸力のみ負担するトラスや床仕上げといった2次部材として使用する。マダケのトラス部材の設計は, 圧縮軸力やせん断力に対する設計と同様に両端の接合部耐力によるため, マダケの強度試験は省略した。

2. 2 試験体の作成方法

竹林で実際に竹を調達する範囲から無作為にモウソウチクの立木3本(個体A~C)を伐り出し, 図1に示す元口直径約80mm, 末口直径約30mm, 長さ5~6mの試験体を各個体より1体ずつ採取した。

図1 上: 試験体の採取方法 下: 引張試験体形状

本稿は参考文献1)のその2, 3を再構成し加筆修正したものである。

¹⁾ 滋賀県立大学環境科学部環境建築デザイン学科 助教・修士(工学)
(〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町2500)

²⁾ 滋賀県立大学環境科学部環境建築デザイン学科 教授・博士(環境科学)

¹⁾ Assistant Prof., Dept. of Design and Architecture, School of Environmental Science, The Univ. of Shiga Prefecture, M. Eng.

²⁾ Prof., Dept. of Design and Architecture, School of Environmental Science, The Univ. of Shiga Prefecture, Dr. Environmental Science

まず、曲げ試験体として各個体の元口から末口に亘り 1m ずつ 5～6 体を採取する。次に、曲げ試験を実施後、個体 A と C の元口側（A-1, C-1）と末口側（A-6, C-5）から、曲げ試験で生じた亀裂や損傷を避け、引張試験体采取了。引張試験体は、各位置につき試験部中央に節があるものとなないものを 3 体ずつ作成する。個体 B は曲げ試験で大きな亀裂が生じ、引張試験体采取了できなかった。

試験体に使用したモウソウチクは全て材齢 3 年以上で、伐採後 2 週間以内に試験を行っている。人工的な乾燥や油抜き等の処理は一切行っていない。試験体の含水率はいずれも 60～80% である。

2. 3 曲げ試験

曲げ試験の方法を図 2 に示す。アムスラ万能試験機（2,000kN）を用い、4 点曲げにより試験を行った。支持部および載荷部における局部的な支圧による変形や割裂を防ぐため、鞍型の木製治具を介し、載荷を行っている。

図 2 曲げ試験（4 点曲げ）の方法

図 3 左：曲げ応力度－変形関係 右：曲げ強度と断面係数

図 3 および表 1 に試験結果を示す。変形は載荷点位置の鉛直変位であり、各試験体の直径と肉厚は、試験体両端での計測値の平均値である。断面係数の算出にはこの値を用いている。曲げ強度は、断面係数の小さな試験体でやや高めの値となっているが、概ね一定の傾向が見られる。また、図中のマダケの強度は、著者らが過去に滋賀県彦根市内で採取したマダケの試験結果⁹⁾であり、本試験のモウソウチクは、これに対し約 2 倍の強度を有する。また、竹材の曲げ破壊の性状は、断面の上下縁における曲げ応力によるものではなく、載荷点近くで円筒がつぶれるような変形に付随して生じる材軸方向の亀裂に起因する場合が多い。このため、モウソウチクの曲げ強度は後に示す引張強度を大きく下回っており、マダケと同様の傾向⁹⁾を示す。本試験における破壊性状は上下縁の曲げ応力による純粋な曲げ破壊ではないが、設計上は安全側となるため設計耐力として採用した。

2. 4 引張試験

引張試験体の形状は図 1 に示すものとした。井上ら³⁾は、試験体における試験部（くびれ部）と非試験部（つかみ部）の間のノッチ形状が引張強度に大きく影響することを示している。この中で、くびれ部を有しかつノッチ形状が緩やかでない形状（CL タイプ）が安全側の平均値を与え、なおかつ結果のばらつきが小さいことが示されており、本建築物での試験体作成の参考とした。

引張試験はアムスラ万能試験機（1,000kN）にて行った。歪の計測は、亀裂が歪ゲージの添付位置で生じる場合があり、断念した。

試験結果を図 4 および表 1 に示す。図中の変形は、上下の掴み部間の試験体全体の伸びを表す。応力度－変形曲線はいずれも明確な降伏点を有さず、また最大強度が破断強度となる脆性的な挙動を示す。個体中の採取位置や節の有無については明確な差が認められず、同じ採取位置でも強度にばらつきがある。これは、ノッチ部で破断したものと非試験部で裂けるように破断したものなど（図 5）、試験体の製作精度によるばらつきも含まれている。表中に「失敗」とあるのは、アムスラ試験機チャックに試験体を噛ませる際、試験体を持つ曲率のために、つかんだ直後に割れてしまったものである。

また、図中のマダケの強度は、曲げと同じく陶器らの過去の試験結果⁹⁾であり、試験体の製作方法も同様である。モウソウチクはマダケと比べ高い引張強度を有し、ばらつきが大きいことが分かる。

図 4 左：引張応力度－変位関係 右：引張強度と断面係数

引張試験体の設置状況 破断状況（左：縦割型、中／右：引張破断型）

図 5 引張試験後の試験体の破損の状況

表 1 モウソウチクの曲げ試験・引張試験結果

個体	曲げ試験体	直径 [mm]	板厚 [mm]	曲げ強度 [N/mm²]	引張強度 [N/mm²]					
					節なし			節あり		
A	A-1	71.0	7.5	118.50	199.16	139.30	224.27	159.38	338.38	失敗
	A-2	63.9	6.6	112.10						
	A-3	58.4	6.2	120.80						
	A-4	49.9	5.4	131.90						
	A-5	45.0	4.7	145.90						
	A-6	37.7	4.5	115.90	失敗	失敗	失敗	145.63	254.67	失敗
B	B-1	68.6	7.6	123.10						
	B-2	62.5	6.6	114.90						
	B-3	54.7	5.8	135.20						
	B-4	46.3	5.2	153.50						
	B-5	41.0	4.4	147.00						
	B-6	33.6	3.8	164.40						
C	C-1	65.6	7.5	134.90	169.23	357.29	213.76	447.14	210.83	346.28
	C-2	60.7	6.6	110.30						
	C-3	55.3	5.9	125.30						
	C-4	49.2	5.8	116.40						
	C-5	42.8	5.1	151.80	209.62	272.90	失敗	256.52	297.83	198.00
平均値				130.70	223.19			265.47		
標準偏差				16.60				81.12		
COV[%]				(12.70)				(32.88)		

2. 5 設計強度の算定

各強度試験の結果をもとに、設計強度を定めたのが表 2 である。設計基準強度は最大強度の平均値から標準偏差を減じた値とした。これは正規分布の仮定では 30% 下限値に相当し、木質材料で一般的に用いられる 5% 下限値と比べ、緩和した値である。「竹の会所」では、丸竹の存在応力は強度に比べ十分に小さい部分が多く、また補修が容易な設計としているためである。長期・短期の許容応力度は基準強度のそれぞれ 1/3、2/3 とした。マダケの強度は設計では直接使用

しないが、既往研究⁹⁾をもとに参考値として算定した。また、ヤング係数は、曲げ試験における各試験体の荷重－たわみ関係の初期勾配を求め、それらの平均値から推定した値である。初期勾配の値は、最大荷重に対し 0.4 倍荷重時の座標と原点とを結ぶ割線勾配を用いた。

表 2 竹の設計強度・ヤング係数 (単位: N/mm²)

竹の種別	長期許容応力度		設計基準強度		曲げヤング係数
	引張	曲げ	引張	曲げ	
モウソウチク	55.2	38.0	165.6	114.1	12,120
マダケ	54.6	13.1	163.7	39.3	12,472

細長比の大きな部材の圧縮軸力に対しては、オイラー弾性座屈荷重を基準強度とした。その算定には表 2 の曲げヤング係数を用いる。本建築物のアーチ材、柱材および基礎トラス上下弦材は細長比が 60~100 程度となる。井上ら⁵⁾により細長比が 60 を超えて大きくなるに従い、座屈荷重はオイラー座屈荷重に対し小さい側で次第に漸近する結果が報告されており、これを参考に、オイラー座屈荷重との誤差を含め十分な余裕を見込むため、その 1/3 を長期許容圧縮軸力、2/3 を短期許容圧縮軸力とした。

3. 人力施工可能な接合法の開発

3. 1 接合法の概要

「竹の会所」は、災害直後の限られた資材・労働力の条件のもと、施工の大半を学生とボランティアの手作業によって行う計画である。このため、特殊な装置や機械を用いない人力作業により、構造上十分な耐力と剛性が安定的に得られる接合法の開発が求められた。

国内における竹同士の接合法の代表研究として、井上らにより丸竹の小口に杉材と接着剤を充填する方法等⁷⁾が試みられているが、これらの方法は、災害被災地で手作業により短時間で施工する、という観点に立ったものではない。また、グラウトや接着材の充填等の補強なしに丸竹にビスやボルトを打ち込むと容易に割裂する可能性が高く、施工性の観点から、丸竹を欠損させずに接合する方法が好ましい。

本建築物では丸竹同士をロープや番線で縛り接合する方法を採用した。この接合法では、交差する 2 本の丸竹同士の接触点で力を伝達させるため、接合部の耐力は丸竹同士の摩擦や、竹を縛る材料の性質に依存すると考えられる。そこで、図 6 に示す材料や組み合わせについて、載荷試験により接合部耐力を比較した。

図 6 丸竹同士の接合法

3. 2 載荷試験および設計耐力の算定

試験体は曲げ・引張試験と同様の竹林で採取したモウソウチクとマダケを使用し、材齢は 3 年以上、直径 50~70 mm、肉厚 4~8 mm である。試験方法を図 7 に示す。載荷試験には万能アムスラ試験機 (1,000kN) を用いる。本接合法では丸竹同士が偏心して接合されるため、試験中の転倒を防ぐために 2 体 1 組として載荷を行っている。また、載荷は試験体の荷重支持能力が極端に低下し載荷不可能となった場合か、変形が 80mm に達した場合に終了する。接合部の変形は、図 7 中の横向き部材の鉛直下方向の変位として計測する。

試験体は、表 3 に示す(1)~(7)を各 5 体ずつ作成した。試験結果同表に各接合法の最大耐力の平均値を、図 8 に荷重－変形関係を示す。

図 8 各接合法試験体の荷重－変形関係
表 3 各試験体の最大耐力平均値および標準偏差 (() 内は COV)

丸竹同士の接合法	竹の種別	平均値 [kN]	標準偏差 [kN]
(1) 番線のみ	マダケ	0.50	0.05 (10.0%)
(2) 番線+布テープ	マダケ	1.52	0.24 (15.8%)
(3) ロープ	マダケ	0.69	0.21 (30.0%)
(4) ロープ+布テープ	マダケ	2.31	0.75 (32.5%)
(5) ロープ+布テープ	モウソウチク	2.97	0.77 (25.9%)
(6) 切欠き	マダケ	2.14	0.53 (24.8%)
(7) 切欠き	モウソウチク	4.56	0.89 (19.5%)

ロープ+布テープ接合の終局状態
布テープが裂けロープと一体で竹の表面との間で滑りを生じる
切欠き接合の終局状態
縦材の切欠き部と横材の接触部を起点に横材に亀裂を生じ破壊する
図 9 載荷による試験体の破壊の様子

各接合法による試験体の破壊性状の特徴は以下のようであった。
(番線またはロープのみの接合) 丸竹自体が破壊することではなく、竹と番線またはロープとの間に滑りを生じることで大きく変形する。急激な耐力低下は無いが、他の接合法と比べ最大耐力は小さい。
(番線またはロープ+布テープの接合) 布テープを貼ったことにより丸竹同士の摩擦力が大きく向上する。ロープや番線の破断はなく、縦材の布テープが裂ける頃に最大耐力に達する(図 9 左)。その後は、なだらかに耐力が低下しながら変形が増大する。

（切欠き接合）切欠き部と横材が局部的に接触するため集中的な支圧が生じており、横材の局部的な破壊を生じた時点で最大耐力に達する。その後は急激に耐力が低下する（図9右）。マダケに比べ肉厚の大きなモウソウチクがより高い耐力を有しており、この接合法では竹の肉厚や強度が接合部耐力に大きく影響すると考えられる。

以上をもとに、最も高い耐力を有するモウソウチク同士の「切欠き接合」と、耐力はそれに劣るものの変形性能に優れた「ロープ+布テープ接合」を採用した。これらの接合法の設計耐力を表4に示す。竹の材料強度と同様に、基準耐力を試験結果の平均値から標準偏差を減じた値とし、長期・短期耐力はその1/3、2/3とした。また、「ロープ+布テープ接合」の耐力は、安全側としてマダケの数値を採用した。また、丸竹の直径は実験を行った50~70mmに限り用いる。

表4 採用した接合法の設計耐力

丸竹同士の接合法	長期許容耐力 [kN]	設計基準耐力 [kN]
切欠き接合（モウソウチク）	1.22	3.67
ロープ+布テープ接合	0.62	1.86

「切欠き接合」は、切欠きの作業に精度と手間を要するため、アーチ部材と基礎トラス上下弦材の、限られた接合部のみに使用した²⁾。メインフレーム全48構面の両端部に上下2箇所ずつ、合計192箇所である。この接合部は、アーチ材の初期曲げ加工による反力(0.7~0.9kN)を負担する。それ以外の丸竹同士の接合は、全て「ロープ+布テープ接合」である。これら接合部の総数は3,500箇所以上に上った。

3. 3 ロープ巻き回数による耐力の比較

上述のように、本建築物における丸竹同士の接合は、その多くが「ロープ+布テープ接合」である。このため、この接合法が、作業者の違いや巻き方の多少の誤差によらず耐力を安定的に確保し得るかどうかは、信頼性という点で重要な課題である。そこで、図10に示すロープの巻き回数を変化させた(a)~(d)の試験体を作成し、耐力の比較を行った。巻き方による違いのみに着目するため、竹は全て直径65mmのマダケを用いた。試験体は各巻き方を3体ずつ作成した。

図10 ロープの巻き回数を変えた試験体

図11 荷重-変形関係

各巻き方の試験体の試験結果を図11、表5に示す。図中の「▼2.31」のラインは正規の巻き方（マダケ）による平均値を表している。

荷重レベルの小さな領域では初期すべりにばらつきがあり、巻き回数が少ないほど剛性が小さい傾向がある。しかし、最大耐力およびその時の変形は各巻き方で大きな違いはなく（正規の巻き方を上回る場合もある）、全体のばらつきも小さい。このように、「ロープ+布

表5 各巻き方の耐力 (○内はCOV)

巻き方	平均値[kN]	標準偏差[kN]
(a)	2.69	0.29 (10.6%)
(b)	2.31	0.15 (6.4%)
(c)	2.40	0.24 (10.2%)
(d)	2.19	0.07 (3.2%)
全体	2.40	0.28 (11.5%)

テープ接合」はロープの巻き方の誤差に対し鈍感であり、耐力の安定的な確保に一定の信頼性を期待しうる接合法と考えられる。

4. まとめ

「竹の会所」の設計にあたり、モウソウチクの設計強度の算定、および丸竹同士の接合法の開発と耐力の算定を行った。

提案した接合法は、手作業で施工可能ながらも、耐力の安定的な確保が比較的容易であり、災害の被災地域等における応急仮設建築物を人力で施工する方法として有効と考える。今後、本接合法の復元力特性について詳細な検討を行い、モデル化を試みる。

また、本建築物の竣工後、経年した竹部材の強度試験や、建物の微振動測定を実施している。これらの調査結果は、別報で報告する。

謝辞 本稿に示す成果の一部は、科学研究費補助金（課題番号：10021160 および 15K21285）の助成を受けたものである。

付録 ロープ接合法の施工手順

参考文献

1) 永井拓生, 額田直子, 澤修平, 生駒岳大, 陶器浩一: 丸竹曲げによる空間構造の設計と施工 その1~その4, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), B-1, pp.697~704, 2012.9

2) 陶器浩一, 永井拓生: 竹を構造材料として用いた空間構造の設計および施工ー竹を構造材料として用いた応急仮設建築物の設計・施工の実例ーその1ー, 日本建築学会技術報告集 第21巻 第49号, pp.1007~1012, 2015.10

3) 矢頭盛吾, 井上正文, 田中圭: 竹材の引張強度試験報に関する実験的研究 (その1) 引張試験片の形状が強度性能に及ぼす影響, 日本建築学会九州支部研究報告 第39号, pp.445~448, 2000.3

4) 藤川将登, 井上正文, 他4名: 丸竹の材料特性に関する基礎的研究 (その1) 圧縮実験及び曲げ実験, 日本建築学会九州支部研究報告 第43号, pp.345~348, 2004.3

5) 田中圭, 井上正文, 他3名: 丸竹の材料特性に関する基礎的研究 (その3) 圧縮強度及び座屈の挙動に関する考察, 日本建築学会九州支部研究報告 第44号, pp.461~464, 2005.3

6) 額田直子, 江島諒介, 陶器浩一: 丸竹の曲げ耐力に関する実験的研究 その1~その2, 日本建築学会学術講演梗概集(北陸), C-1, pp.55~58, 2010.9

7) 井上正文, 沖林聡, 田中圭, 矢頭盛吾, 住岡 修: 竹材の接合法開発に関する実験的研究 (その1) 仕口の引張試験, 日本建築学会九州支部研究報告 第38号, pp.669~672, 1999.3

[2016年2月2日原稿受理 2016年4月2日採用決定]