

# 孟宗竹を利用した構造物の部材接続部の強度

## Experiments of Bamboo Connection Strength for Bamboo Structures

吉田 競人、松井 正澄<sup>1)</sup>、田中 成人<sup>2)</sup>

YOSHIDA Keito, MATUI Masasumi and TANAKA Sigeto

### 1. 序

横浜市開港 150 周年を祝する記念イベントの一環としてもうけられたヒルサイドステージは竹の利用を提案することをテーマの一つに考えた会場である。竹を構造物、仕上げ材として使用するために、前回の基礎および検証実験においては、横浜近隣の竹材の基本的な力学的特性を把握し、「竹のパーゴラ」に使用するための基本設計及び工法を提案した。さらに実証実験においては実際に制作を行い耐久性の確認を行い一連の実験を終了した。

今回更に実験を行うことになった目的は、竹のパーゴラの仕口をできるだけ自然素材による構造にしたいとの要請によるものである。前回の提案では一般市民が容易に制作できるように全ネジボルトを利用して組み立てを基に建築構造の設計施工をおこなった。今回はこれの代替として全ネジボルトの代わりとして竹集成材を込栓として利用した工法の可能性を実験的に確認するものである。また、竹材の継ぎ手方法について鋼管を使用しない工法を実験的に行うものである。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 実験項目

本実験は、前回提案した竹材の継ぎ手を改良した方法の強度確認を行うことを目的としていることから試験項目は接続に使用する竹集成材の強度とトラスの弦材とラチス材の取り付け強度を確認するための平行継ぎ手と直交継ぎ手の強度さらに、梁突き付け接合の強度確認の実験とした。

#### 2. 2 軸直交接合

##### 1) 試験体形状

試験体は、垂直材と水平材を同じ竹から採取する。垂直材および水平材材長はそれぞれ 690mm、570mm である。試験体加力図と写真はそれぞれ図 1 と写真 1 のとおりである。

試験体は 3 体である。直径と各部の厚などの計測結果は各断面表 1 及び表 2 に示すとおりである。なお直径は一断面において 4 箇所、直径は 2 か所を計測した。

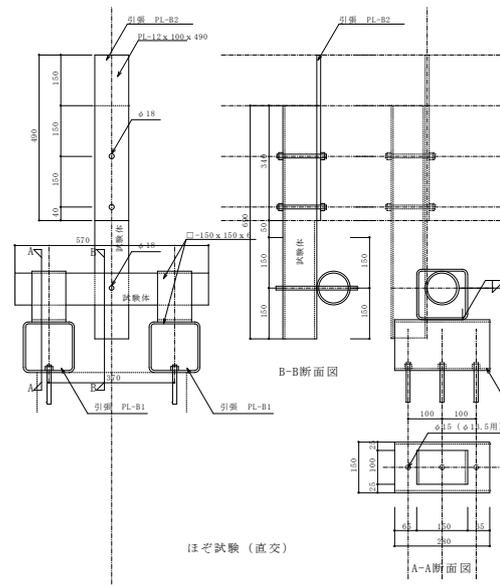


図 1 軸直交試験体形状

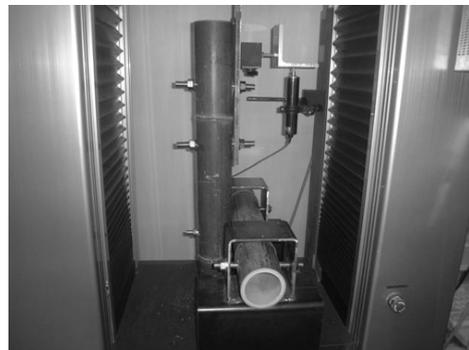


写真 1 軸直交試験体形状

<sup>1)</sup> (株)アトリエトド 代表取締役

<sup>2)</sup> 横浜市

表1 計測寸法(厚さ)

上段: 縦材 下段: 水平材	厚さ									
	上					下				平均
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	DB1	7.9	7.9	7.6	8.2	8.0	7.6	8.0	8.0	7.9
	DB1	8.0	8.6	7.9	8.7	8.2	8.5	8.9	8.9	8.4
2	DB2	9.7	8.9	9.5	9.5	10.8	10.9	9.7	10.0	9.9
	DB2	8.5	8.5	8.4	9.7	8.4	9.0	8.2	8.7	8.7
3	DB3	10.3	10.0	10.8	10.2	10.7	10.5	11.5	8.6	10.3
	DB3	9.8	8.4	8.9	8.9	8.8	9.4	9.9	9.9	9.2

表2 計測寸法(直径)

試験体 上段: 縦材 下段: 水平材	直径					
	上		下		平均	
	mm	mm	mm	mm	mm	
1	DB1 690	103.0	96.8	98.7	92.0	97.6
	DB1 570	105.4	99.8	103.3	97.8	101.6
2	DB2 690	105.1	111.7	111.7	114.5	110.7
	DB2 570	109.0	102.5	107.0	100.3	104.7
3	DB3 690	101.1	98.8	96.1	96.5	98.1
	DB3 570	88.2	91.1	95.0	96.0	92.6

2) 試験結果一覧

試験体 DB1,2,3 共に破壊性状は次のようにほぼ同じ傾向を示した。荷重の増加とともに、垂直材の取り付けボルト穴部分に支圧によるめり込みが発生し、その後水平材に軸方向に沿う亀裂が発生した。込栓に亀裂は生じなかった。試験体結果一覧は表3に掲げるとおりである。また、試験結果後の写真を写真2に掲げる。

表3 軸直交接合試験結果一覧

試験体		最大荷重 (kN)
1	DB1 690	2.95
	DB1 570	
2	DB2 690	3.34
	DB2 570	
3	DB3 690	4.33
	DB3 570	



写真2 軸直交試験体破壊形状 (DB1)

2.3 軸平行接合

1) 試験体形状

試験体は、垂直材2本を同じ竹から採取する。上部に来る材をa、下部に来る材をbとする。

試験体は3体である。直径と各部の厚さは表4と表5に示すとおりである。竹とジグの固定にはφ16の全ネジを使用。各部にワッシャーを挟み、ナットで固定する。ナットは手で回せない程度の締め具合とする。竹と竹同士の接続には、φ12の全ネジと、φ18の竹集成材を使用、竹と治具の取り付け部においても各部にワッシャーを挟み、ナットで固定する。竹集成材使用時は、集成材端部にくさびを打ち込むこととする。試験体の開孔はすべてφ18とした。試験体の写真及び図をそれぞれ写真3と図2に掲げる。

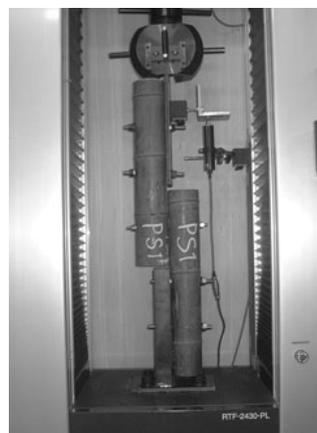


写真3 軸平行試験体形状

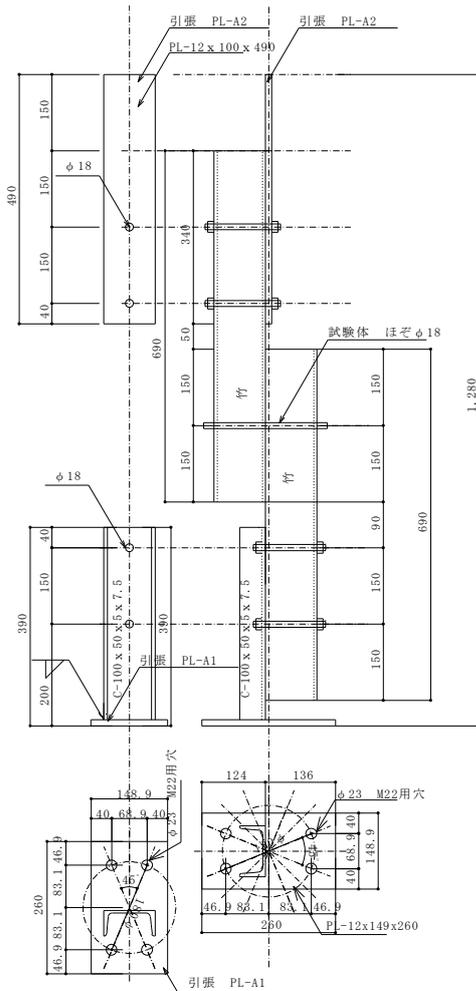


図2 軸平行試験体形状

表4 軸平行試験体形状 (直径)

試験体 a: 上部材 b: 下部材	直径					
	上		下		平均	
	mm	mm	mm	mm		
1	PB1 a	92.7	97.1	91.6	86.5	92.0
	PB1 b	101.7	99.2	97.2	95.8	98.5
2	PB2 a	101.4	94.0	104.0	97.0	99.1
	PB2 b	96.6	89.4	101.6	93.3	95.2
3	PB3 a	96.2	87.5	102.5	94.3	95.1
	PB3 b	102.4	92.1	109.3	98.0	100.5

表5 軸平行試験体形状 (厚さ)

試験体 a: 上部材 b: 下部材	厚さ									
	上				下				平均	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
1	PB1a	6.5	9.3	7.8	8.2	8.2	8.1	8.8	8.3	8.1
	PB1b	8.3	8.2	8.8	8.6	7.6	7.3	8.8	8.1	8.2
2	PB2a	9.5	9.5	9.5	9.9	10.5	10.8	10.9	11.1	10.2
	PB2b	9.3	9.8	10.0	10.1	10.0	10.3	10.2	10.7	10.1
3	PB3a	7.8	8.3	8.1	8.0	8.2	8.8	9.2	9.3	8.5
	PB3b	8.1	8.6	9.0	8.7	9.4	9.7	8.6	8.8	8.9

## 2) 試験結果一覧

試験結果一覧を表6に掲げる。PB1は初めに込栓との接触部分が支圧力により変形を生じた。その後竹材内側部分が竹集成材と接触し支圧力により変形が進み、ボルト外側の楔のめり込みがおおきくなり、最終的には支圧部分が抜け落ちた(写真4a)。

PB2試験体は上下竹材同士に位置する節同士が接触し、両者の竹表面が十分接触しない試験体となった。このため、竹集成材ボルトにモーメントが生じ集成材が破断した(写真4b)。PB3試験体の破断は取り付け竹集成材のせん断により生じた。施工精度が高かったために他の試験体と比べ強度も大きかった(写真4c)。

表6 軸平行試験体実験結果

試験体	最大荷重 (kN)
1	4.22
PB1 a	
2	5.88
3	7.34



写真4a 軸平行試験体破壊形状 (PB1)



写真4b 軸平行試験体破壊形状 (PB2)



写真4c 軸平行試験体破壊形状 (PB3)

## 2. 4 竹集成材 (込栓) 材料強度試験

### 1) 試験体形状

竹トラスの接合に利用するための込栓として使用する竹集成材の材料特性を把握するために曲げ試験およびせん断試験を以下のように行った。曲げ試験は写真5に示すようにスパン250mmを一端ピン多端ローラー支持とし、中央に集中荷重載荷させた。また、せん断試験は写真6のように行った。試験体数はそれぞれ合計3体である。曲げ試験体断面形状はφ18、直径を中央部から左右100mmの間隔で3箇所計測した。計測結果は表7aのとおりである。

またせん断試験用試験体の直径は2方向を測定した。結果は表7bに掲げる通りである。竹集成材は図3に示すように5mmほどの厚さの竹片から構成されている。加力は、竹集成材にはせん断耐力を負担させる利用を想定しており、積層方向の影響を知る必要があるために、加力方向に対し水平位置をSH試験体、鉛直な試験体をSV試験体とした。曲げ試験に対する積層方向は鉛直とした。

表7a 竹集成材形状 (直径：曲げ試験用)

	直径									断面積 mm <sup>2</sup>
	端部-1		中央		端部-2		平均	平均	平均	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y	平均	
B1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	254.3
B2	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0	18.1	18.0	18.0	18.0	254.3
B3	18.0	18.0	18.0	18.0	17.9	18.1	18.0	18.0	18.0	254.3

表7b 竹集成材形状 (直径：せん断試験用)

	直径		
	x	y	平均
SH1	18.0	18.0	18.0
SV1	18.0	18.1	18.1
SH2	17.9	18.0	17.9
SV2	18.0	18.0	18.0
SH3	18.0	18.0	18.0
SV3	18.0	18.0	18.0

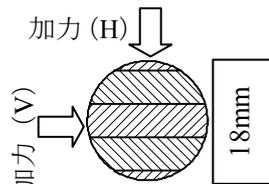


図3 竹集成材断面形状

### 2) 試験体結果一覧 (曲げ、せん断)

試験結果一覧は表8a、8bの通りである。

表8a 竹集成材曲げ試験結果

	断面積 (mm <sup>2</sup> )	スパン (mm)	曲げ 比例限度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )
B1	254.5	250.0	44.94	6844.3	98.8
B2	254.5	250.0	49.44	8566.1	141.2
B3	253.8	250.0	43.37	7480.8	109.0

表8b 竹集成材せん断試験結果

	断面積	最大荷重	変位量	平均せん断応力度*1	最大せん断応力度*2	含水率
	mm <sup>2</sup>	kN	mm	kN/mm <sup>2</sup>	kN/mm <sup>2</sup>	%
SH1	254.5	5.77	5.4	2.27E-02	3.02E-02	7.64
SV1	255.9	4.69	5.5	1.83E-02	2.44E-02	
SH2	251.7	5.58	11.7	2.22E-02	2.96E-02	7.18
SV2	253.8	5.29	9.9	2.08E-02	2.78E-02	
SH3	253.8	6.03	11.9	2.38E-02	3.17E-02	7.12
SV3	253.8	6.14	12.1	2.42E-02	3.23E-02	

$$*1: \tau = \frac{Q}{A}$$

$$*2: \tau_{max} = \frac{4}{3} \times \frac{Q}{A}$$

### 3) 破壊状況

曲げ試験およびせん断試験による加力状況と破壊状況は写真5から8に掲げるとおりである。



写真5 曲げ試験



写真6 せん断試験



写真7 曲げ試験結果



写真8 せん断試験結果

## 2.5 竹継ぎ手1強度試験

### 1) 試験体形状

長スパンを形成するためにはトラス弦材に使用する竹同士を何らかの方法で接続する必要がある。そのための接続方法として込栓とエポキシ樹脂による接合実験を行った。接続方法は図4、外形写真は写真9に示すとおりである。

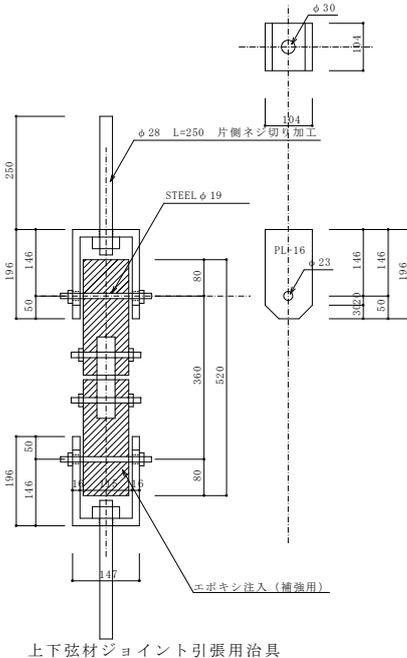


図4 竹材継ぎ手1試験体形状

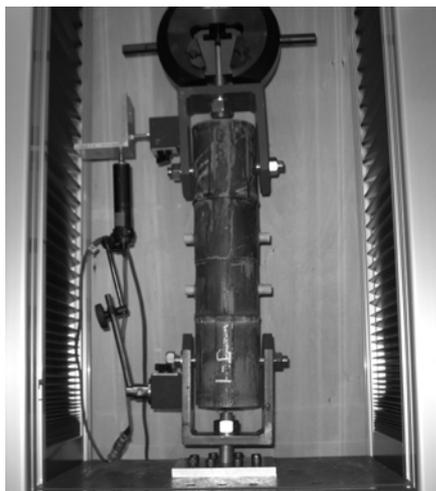


写真9 竹材継ぎ手1試験体形状

### 2) 試験体一覧

試験体は3体である。それらの形状は表9に示す通りである。

表9 竹材継ぎ手1試験体形状一覧

		J-1	J-2	J-3
上部直径 (mm)	上端	121.0	114.6	104.0
	下端	126.8	125.0	114.0
下部直径 (mm)	上端	118.1	127.9	117.3
	下端	124.9	117.4	109.7
上部部材 取り付け 小口厚さ (mm)	1	9.3	10.2	10.6
	2	9.3	9.9	9.6
	3	9.9	9.5	9.3
	4	10.7	9.3	10.3
下部部材 取り付け 小口厚さ (mm)	1	9.3	10.1	10.2
	2	9.3	9.2	10.0
	3	9.1	10.8	10.5
	4	9.1	10.1	10.5
竹込栓距離 (mm)		100	100	100
試験体全長 (mm)		519	518	518

### 3) 試験結果

試験結果は表10に掲げるとおりである。エポキシによる竹との付着を期待したが、実験結果と竹のせん断抵抗による値がほとんど等しいことから(2.5.1式)、竹とエポキシの付着力はほぼないと考えられる。これは竹内側の薄皮によるものである。このためエポキシと一体になることなく加力により込栓の支圧により竹が抜け落ちる結果となった。

破壊状況は写真10のとおりである。

表10 竹材継ぎ手1試験結果一覧

	最大荷重 (kN)	厚さ t (mm)	せん断強度 (kN/cm)	含水率 (%)
J1	18.1	9.2	19.6	22.7
J2	21.7	10.1	21.5	19.7
J3	22.0	10.0	21.3	32.5

$$Q_{\max} = (41\text{mm} \times t) \times 4 \times 13\text{N} / \text{mm}^2 = 2.13t \cdot \text{kN} \quad (2.5.1)$$



写真10 竹材継ぎ手1破断状況 (両者とも J2 試験体)

## 2. 6 竹継ぎ手2強度試験

### 1) 試験体形状

エポキシ樹脂と竹とはそのままでは付着が期待できないことが実験から判明したため、付着によらない新たな機械的な接合を考えて実験を行った。すなわち、接合する竹同士にφ6の穴を2か所ずつ設けその穴に注入したエポキシ樹脂が突起を成形することにより両者を接合するものである。エポキシ樹脂は竹内部空隙を全て満たす必要がないため、ここでは、一回り小さな竹を挿入し竹同士にまたがるエポキシ樹脂の厚さが5mm程度を保つようにした(図5、写真11参照)。この接合方法によりガタつきを防止するとともにある程度の接合に必要な強度が得られる。

実験に使用した試験体は3体でその形状は表11に示すとおりである。

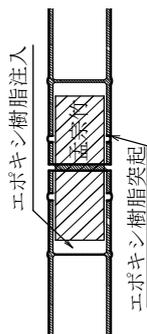


図5



写真11

竹材継ぎ手2試験体形状 竹材継ぎ手2試験体

表11 竹材継ぎ手2試験体形状一覧

		J-4	J-5	J-6
上部直径 (mm)	上端	96.0	86.0	116.0
	下端	93.0	84.0	110.0
下部直径 (mm)	上端	90.0	91.0	111.0
	下端	90.0	87.0	106.0
上部部材 取り付け 小口厚さ (mm)	1	7.0	6.9	8.5
	2	7.0	6.6	9.3
	3	6.8	6.5	8.3
	4	7.1	7.4	9.3
下部部材 取り付け 小口厚さ (mm)	1	6.5	7.1	9.0
	2	6.8	7.0	8.7
	3	6.7	7.8	9.3
	4	6.45	7.2	8.8
竹込栓距離 (mm)		146	149	143

### 2) 試験体結果一覧

試験結果は表12のとおりである。破断はエポキシ樹脂接合の中心部分に破断が生じ脆性破壊性状を示した(写真12)。

表12 竹材継ぎ手2試験結果一覧

試験体	最大荷重 (kN)
J4	16.2
J5	12.3
J6	11.3

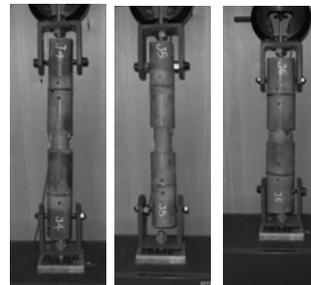


写真12 竹材継ぎ手2試験体破壊形状一覧

## 3. 建築制作

### 3.1 建築作品

以上の実験結果を参考にし製作した建物の写真を写真13と14に示す。これらの建物は横浜開港150周年記念イベント会場において制作されたものである。



写真13 竹材継ぎ手2によるトラス建物



写真14 竹のパーゴラ

### 3.2 加力試験

会期終了を迎えたトラス構造物の強度を確認するために、加力実験を行った。加力フレームは、スパン 10m (FR10 と称する。) のものと、方杖を有する有効内法スパン 6m (FR6 と称する。) のもの 2 フレームとした。荷重は中央集中荷重である (写真 1 5、1 6 参照)。

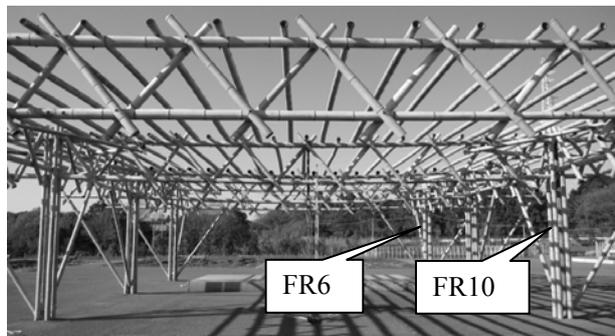


写真 1 5 試験体フレーム



写真 1 6 加力状況

### 3.3 実験結果

FR10 は荷重が 1.76 kN, 2.16 kN においてラチス材の込栓がそれぞれせん断破壊した後、荷重が 2.25 kN、変形が 107mm に達し、上限材が引張力により破断した。FR6 は荷重 3.92 kN において梁中央部ラチス材の込栓がせん断破壊し、4.41 kN において上限材継ぎ手が破断した。実験結果概要は表 1 3 に示すとおりである。また荷重変形結果は図 6 に示すとおりである。この際の破断の写真は写真 1 7 a ~ 1 7 d である。込栓強度が実験により得られた値 (表 8 b) より著しく少なかったのは、屋根材の荷重の影響のほか、屋外に曝されていたことにより、込栓が水分を吸収しあるいは劣化により強度が低下したものと考えられる。

表 1 3 実験結果概要

試験体	荷重(kN)	変形(mm)	特記
FR6	3.92	56 (1/179)	込栓破断
	4.41	74 (1/135)	上弦材継ぎ手破断
FR10	1.76	34 (1/294)	込栓破断
	2.16	68 (1/147)	込栓破断
	2.25	107 (1/93)	上弦材継ぎ手破断

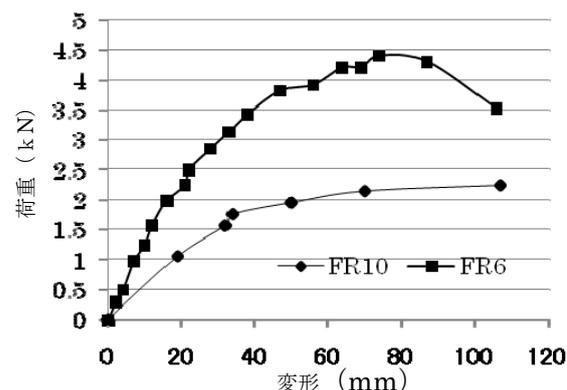


図 6 荷重-変形曲線



写真 1 7 a 込栓破断



写真 1 7 b 上弦材破断



写真 1 7 c 込栓破断



写真 1 7 d 上弦材破断

### 4. まとめ

一連の実験を通して得られた結果を以下に箇条書きにする。

- 竹材直交接合の破壊形式は取り付け部の割裂と込栓せん断力により生じる。その平均割裂応力度は  $1.15\text{N/mm}^2$  と推定できる。

- 竹材平行接合の破壊形式は込栓せん断強度か縁あき距離による。今回使用した込栓のせん断強度は 5.58 kN であった。
- エポキシと竹内部との付着は期待できない。
- 接続する竹同士に穴を設けてエポキシの突起により接続する方法はガタつきの防止と接合強度の両者を期待できる。

#### 参考文献

- 1) 「東京大学農学部演習林報告 第 36 号」、昭和 23 年 12 月 PP134~PP186
- 2) 大分大学福祉環境工学科木質構造研究室 HP
- 3) International Code Council Evaluation Service ( ICC-ES ) , “Mechanical Properties of Bamboo”, April 12, 2002
- 4) Institute for Structural Design Dr.-Ing. Evelin Rottke Reiffmuseum Schinkelst.1 52062 Aachen
- 5) 北原覚一著「木材物理」、森北出版、1972 年 11 月 30 日
- 6) “ Bamboo Structural Design”, International Standard Design ISO/TC 165/N313, N314, N315
- 7) ICBO Evaluation Service, Inc., “ACCEPTANCE CRITERIA FOR STRUCTURAL BAMBOO”, AC162, March 2000
- 8) 「建築構造利用のための孟宗竹の材料特性に関する基礎的な研究実験報告書」、(独)雇用・能力開発機構職業能力開発総合大学校東京校 受託研究、2007/10/31
- 9) 「横浜開港 150 周年記念事業」「竹の海原」の実証実験報告書」、安藤一級建築士事務所、(独)雇用・能力開発機構職業能力開発総合大学校東京校、2008/2/29