

## 熊本城長堀における控柱石材の材料試験

- 種別：材料試験 [木材・煉瓦・鉄・コンクリート・その他]、重量測定、  
要素試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]、  
補強性能試験 [接合部・軸組・壁・水平構面 (床・天井・小屋組・屋根)・非構造部材・その他]

### ●基本情報

文化財名称：熊本城長堀

文化財種別 (指定年月日)：重要文化財 (昭和 8 年 1 月 23 日)

所在地：熊本県熊本市

所有者 (管理団体)：熊本市

構造形式：木造、棧瓦葺

建築年：—

事業名称：熊本城宇土櫓ほか 12 棟保存修理事業 その 4

事業期間：平成 29 年 6 月 1 日～平成 30 年 3 月 31 日

工事種別：保存修理 (災害復旧)

事業者：熊本市

設計監理：(公財) 文化財建造物保存技術協会

実験計画者：日本診断設計株式会社 長谷川哲也

実験機関：国立大学法人 三重大学 工学研究科

実験年月日：平成 29 年 9 月 27 日～10 月 6 日

引用・参考文献：

### ●実験に至る経緯と目的

熊本城長堀は、平成 27 年の台風 15 号及び平成 28 年の熊本地震により控石柱が折損する被害が生じた。これを受け長堀の構造検討を行ったところ、石材の強度が折損被害に大きく影響を及ぼしている可能性がある判断された。石材種は阿蘇溶結凝灰岩であり、既往の研究等により材料強度が明確になっていない。以上より、折損被害の原因究明を行うため、石材の材料強度を明らかにする。

● 姿図・寸法

【使用材料】

阿蘇溶結凝灰岩（折損被害に遭った長堀控石柱 3 種+新規補足材サンプル）

- ・ No.17（当初の可能性のある材）
- ・ No.18（当初の可能性のある材）
- ・ No.44（平成 3～4 年修理の補足材）
- ・ No.N（今回修理の補足材サンプル）

【試験体寸法】

試験体寸法・個数

	圧縮試験 (ヤング係数)	曲げ試験	小径ドリル 削孔試験
寸法 (mm)	φ 50×100	102×203×57	φ 50×40
No.17	3本	—	3本
No.18	3本	3枚	3本
No.44	3本	3枚	3本
No.N	3本	3枚	3本

● 概要

折損した熊本城長堀の控石柱より試験体を採取し、圧縮強度・曲げ強度・小径ドリル削孔試験等を行い、阿蘇溶結凝灰岩の石材材料強度・ヤング係数・比重・含水率を測定する。

● 実験方法

【圧縮強度試験】

図 1 のように φ 50×100 の試験体をアムスラー型万能試験機にセットし、一軸圧縮試験を実施する。また同時にヤング係数も測定する。ここで、圧縮強度は破壊荷重/断面積とする。

【曲げ強度試験】(ASTM C99)

図 2 のように支持スパンを約 17.8cm とした試験体をセットし、その中央に集中载荷する。また気乾状態に加えて湿潤状態の強さを求める事とし、試験体を 23.5±5℃の水に 48 時間浸水させたものを 1/3 個用意する。曲げ破壊係数 R は次式により算出する。

$$R=3Wl/2bd^2[\text{kgf/cm}^2] \quad W:\text{破壊荷重}[\text{kgf}], l:\text{スパン}[\text{cm}], b:\text{幅}[\text{cm}], d:\text{厚さ}[\text{cm}]$$

【小径ドリル削孔試験】

図 3 のように小径ドリル削孔試験用試験体の断面について削孔 6 本/枚程度の削孔を行った。ドリルは毎秒 4000 回転、押しつけ力 2.8kg を試験条件とし、削孔速度と石材強度の相関関係を導く。



図1 圧縮試験状況



図2 曲げ試験状況

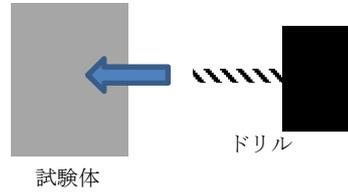
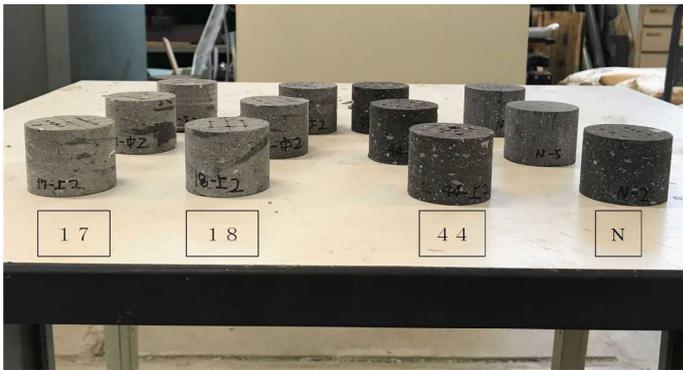


図3 小径ドリル削孔試験（左：試験体、右：試験方法）

●特性値

【圧縮強度】（色塗り列 左から：密度・含水率・吸水率・圧縮強度・ヤング係数）

	直径 (mm)	直径 (mm)	直径平均 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm <sup>3</sup> )	質量 (g)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥前 質量(g)	乾燥後 質量(g)	含水率 (%)	湿潤 質量(g)	乾燥後 質量(g)	吸水率 (%)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )	備考	
17-上1	51.75	51.70	51.73	100.20	210.44	359.74	1.71	355.51	353.34	0.61	401.95	353.26	13.78	38.95	18.55	0.35		
17-中1	51.70	51.70	51.70	100.40	210.66	386.34	1.83	342.89	341.49	0.41	380.59	340.47	11.78	85.75	40.87	0.86		
17-下1	51.60	51.60	51.60	100.40	209.85	370.06	1.76	364.35	362.55	0.50	410.14	361.12	13.57	65.90	31.53	0.73		
17-上2	51.65	51.60	51.63	40.60	84.94	135.97	1.60										削孔試験	
17-中2	51.70	51.70	51.70	40.50	84.98	146.03	1.72										削孔試験	
17-下2	51.60	51.65	51.63	40.45	84.63	153.38	1.81										削孔試験	
18-上1	51.70	51.70	51.70	100.70	211.29	399.33	1.89	339.62	337.95	0.49	381.60	337.95	12.92	81.20	38.70	0.76	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> ) 18-A : 5.34 18-B : 5.58 18-C : 6.05	
18-中1	51.70	51.70	51.70	100.00	209.82	382.10	1.82	383.86	381.97	0.49	425.77	381.54	11.59	72.80	34.70	0.72		
18-下1	51.80	51.65	51.63	100.20	209.63	400.56	1.91	359.59	357.77	0.51	390.05	352.71	10.59	73.75	35.25	0.76		
18-上2	51.80	51.70	51.75	40.30	84.72	157.38	1.86										削孔試験	
18-中2	51.70	51.70	51.70	40.20	84.35	160.22	1.90										削孔試験	
18-下2	51.60	51.70	51.65	40.50	84.61	160.98	1.90										削孔試験	
44-上1	50.60	50.60	50.60	100.40	201.79	272.20	1.35	263.40	262.33	0.41	325.67	262.17	24.22	24.25	12.07	0.31	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> ) 44-A : 2.65 44-B : 2.90 44-C : 3.37	
44-中1	50.80	50.70	50.75	100.40	202.99	277.83	1.37	270.18	268.98	0.45	331.28	268.59	23.34	30.25	14.96	0.36		
44-下1	50.90	50.80	50.85	100.40	203.79	283.96	1.39	275.74	274.63	0.40	335.99	274.55	22.38	32.75	16.13	0.36		
44-上2	50.50	50.60	50.55	40.40	81.04	111.40	1.37											削孔試験
44-中2	50.40	50.50	50.45	40.70	81.32	111.32	1.37										削孔試験	
44-下2	50.50	50.60	50.55	40.60	81.44	112.27	1.38										削孔試験	
N-1	51.40	51.40	51.40	100.00	207.39	380.46	1.83	305.37	304.41	0.32	337.46	303.69	11.12	99.20	47.83	0.95	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> ) N-3A : 7.59 N-3C : 7.66 (但し、N-3A、3Cは、 N-1と同一試験体)	
N-4	51.70	51.65	51.68	100.00	209.62	451.76	2.16	300.39	299.66	0.24	268.57	256.65	4.64	288.00	137.39	3.15		
N-6	51.70	51.70	51.70	100.10	210.03	440.04	2.10	273.15	272.54	0.22	287.18	270.97	5.98	220.00	104.85	2.95		
N-2	51.70	51.60	51.65	40.00	83.77	152.52	1.82											削孔試験
N-5	51.65	51.65	51.65	40.30	84.39	161.86	2.15											削孔試験
N-7	51.75	51.70	51.73	40.20	84.43	176.28	2.09											削孔試験
																		削孔試験

1905 熊本城長堀における控柱石材の材料試験  
文化財建造物構造実験データ集

【曲げ強度】（色付列 左から密度・含水率・吸水率・曲げ強度）

	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	体積 (cm <sup>3</sup> )	質量 (g)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	乾燥前 質量(g)	乾燥後 質量(g)	含水率 (%)	湿潤 質量(g)	乾燥後 質量(g)	吸水率 (%)	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	備考	
18-A	57.10	103.00	203.30	1195.67	2253.20	1.88	2234.20	2204.90	1.33	2425.90	2205.00	10.02	6.72	5.34	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) 18-上1: - 18-中1: 34.70 18-下1: 35.25	
18-B	56.80	103.20	203.90	1195.21	2319.10	1.94	2304.00	2275.20	1.27	2472.80	2275.40	8.68	6.96	5.58		気乾状態
18-C	56.70	103.30	204.10	1195.44	2269.90	1.90	2426.40	2221.70	9.21	2426.40	2221.70	9.21	7.53	6.05		湿潤状態
44-A	58.10	101.90	203.20	1203.02	1658.43	1.38	1618.10	1608.30	0.61	1964.10	1607.60	22.18	3.41	2.65	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) 44-上1: 12.07 44-中1: 14.96 44-下1: 16.13	
44-B	57.30	101.70	203.10	1183.55	1710.57	1.45	1657.10	1647.30	0.59	1996.40	1647.30	21.19	3.63	2.90		気乾状態
44-C	57.10	102.00	203.30	1184.06	1730.61	1.46	2021.03	1673.50	20.77	2021.03	1673.50	20.77	3.87	3.11		湿潤状態
N-3A	57.00	101.60	203.60	1179.09	2153.20	1.83	2141.30	2132.00	0.44	2327.00	2131.30	9.18	9.38	7.59	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> ) N-1: 47.83 N-4: 137.39 N-6: 104.85 (但し、N-1のみ、N-3A、 3Cと同一試験体)	
N-3C	57.30	102.00	203.90	1191.71	2198.70	1.84	2357.80	2169.40	8.68	2357.80	2169.44	8.68	9.61	7.66		気乾状態
N-8	57.10	101.90	203.90	1186.39	2056.30	1.73	2035.80	2008.3	1.37	2255.40	2008.30	12.30	5.59	4.49		湿潤状態

【小径コア削孔】（色付列 左から密度・平均削孔速度）

	直径 (mm)	直径 (mm)	直径平均 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm <sup>3</sup> )	質量 (g)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	削孔速度(mm/s)							備考 圧縮強度: (N/mm <sup>2</sup> )
								1	2	3	4	5	6	平均	
17-上2	51.65	51.60	51.63	40.60	84.94	135.97	1.60	0.720	0.547	0.539	0.784	0.717	0.640	0.658	17-上1: 18.55
17-中2	51.70	51.70	51.70	40.50	84.98	146.03	1.72	0.659	0.613	0.627	0.625	0.539	0.564	0.605	17-中1: 40.87
17-下2	51.60	51.65	51.63	40.45	84.63	153.38	1.81	0.612	0.422	0.545	0.503	0.530	0.614	0.538	17-下1: 31.53
18-上2	51.80	51.70	51.75	40.30	84.72	157.38	1.86	0.332	0.421	0.394	0.549	0.630	0.552	0.480	18-上1: -
18-中2	51.70	51.70	51.70	40.20	84.35	160.22	1.90	0.318	0.437	0.334	0.482	0.316	0.359	0.374	18-中1: 34.70
18-下2	51.60	51.70	51.65	40.50	84.81	160.96	1.90	0.291	0.307	0.291	0.444	0.273	0.243	0.308	18-下1: 35.25
44-上2	50.50	50.60	50.55	40.40	81.04	111.40	1.37	1.903	2.106	2.214	3.870	3.212	2.319	2.604	44-上1: 12.07
44-中2	50.40	50.50	50.45	40.70	81.32	111.32	1.37	2.796	3.055	1.976	1.590	2.519	2.523	2.410	44-中1: 14.96
44-下2	50.50	50.60	50.55	40.60	81.44	112.27	1.38	2.128	2.322	1.959	2.004	1.630	2.102	2.024	44-下2: 16.13
N-2	51.70	51.60	51.65	40.00	83.77	152.52	1.82	0.517	0.588	0.638	0.534	0.595	0.493	0.561	N-1: 99.20
N-5	51.65	51.65	51.65	40.30	84.39	181.86	2.15	0.147	0.136	0.131	0.138	0.132	0.139	0.137	N-4: 137.39
N-7	51.75	51.70	51.73	40.20	84.43	176.28	2.09	0.191	0.241	0.190	0.195	0.177	0.172	0.194	M-6: 104.85

●破壊形状

【圧縮強度試験】

供試体	破壊後	破壊形式	圧縮強度
17-上		脆性破壊	18.6 [N/mm <sup>2</sup> ]
17-中		脆性破壊	40.9 [N/mm <sup>2</sup> ]
17-下		脆性破壊	31.5 [N/mm <sup>2</sup> ]

供試体	破壊後	破壊形式	圧縮強度
18-上		脆性破壊	38.7 [N/mm <sup>2</sup> ]
18-中		脆性破壊	34.7 [N/mm <sup>2</sup> ]
18-下		脆性破壊	35.25 [N/mm <sup>2</sup> ]

供試体	破壊後	破壊形式	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
44-上		脆性破壊	12.1
44-中		脆性破壊	15.0
44-下		脆性破壊	16.1

供試体	破壊後	破壊形式	圧縮強度 [N/mm <sup>2</sup> ]
N-1		爆裂破壊	47.8
N-4		爆裂破壊	137.4
N-6		爆裂破壊	104.9

【曲げ強度試験】

供試体	破壊後
18-A	
18-B	
18-C	

供試体	破壊後
44-A	
44-B	
44-C	

供試体	破壊後
N-3A	
N-8	
N-3C	

●理論式

—

●モデル化

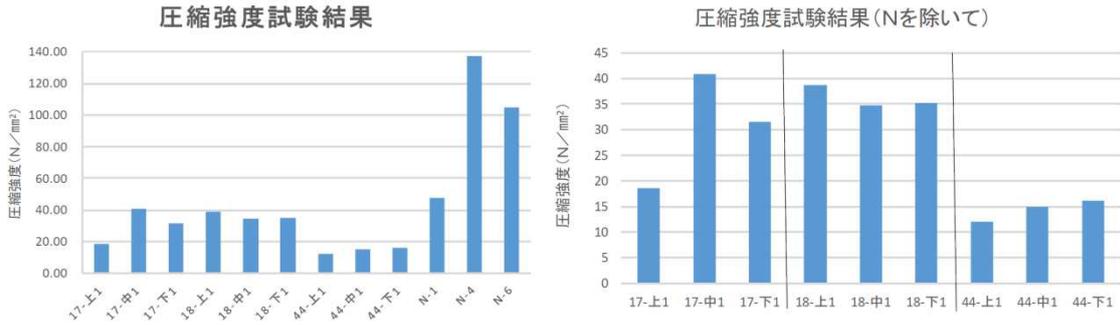
—

●考察

【圧縮強度について】

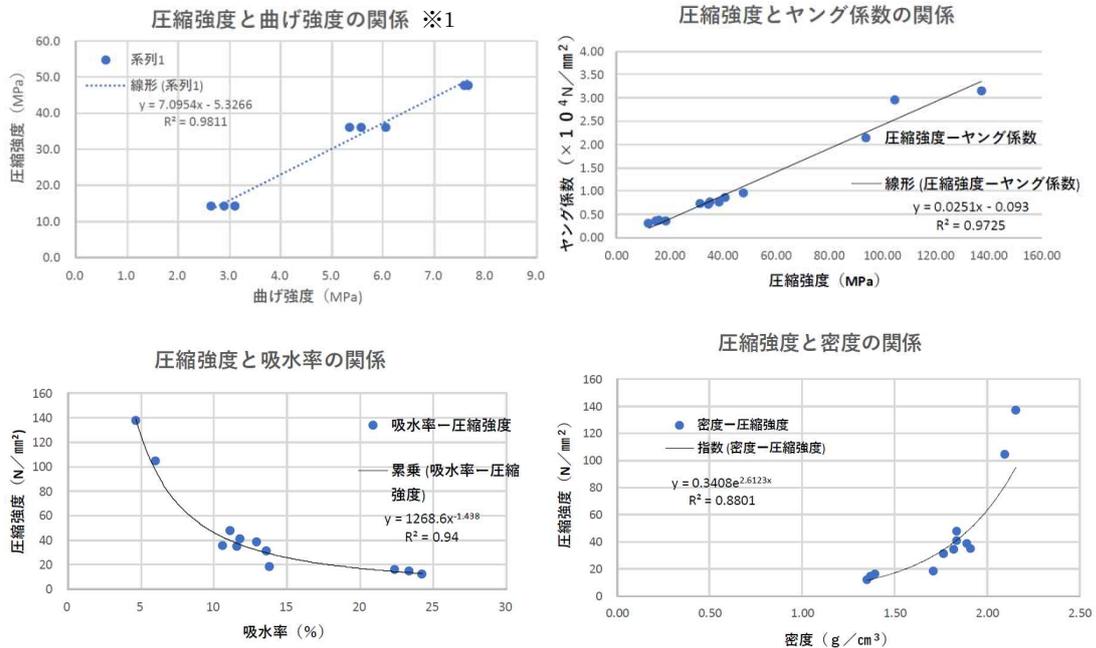
補足材サンプル（N-1、N-4、N-6）は高強度でバラツキも大きい。

下左図ではN材以外の材の強度の違いが分かりにくいいため、N材を除いた材の強度を下右図に示す。同図から、当初の可能性のある材（No.17, 18）の強度が比較的高く、平成3～4年に取り換えられた材（No.44）の強度が低いことが分かる。



【圧縮強度との相関関係】

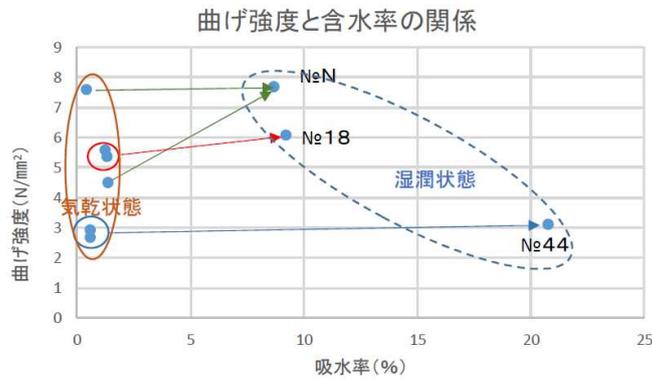
各強度・ヤング係数・吸水率・密度の関係を下図に示す。図より各強度・ヤング係数・吸水率・密度に相関関係がみられることが分かる。



※1：N材はいくつかの石片に分かれていて、試験体は異なる石片から採取した。このため、N-4・N-6・N-8の試験体は曲げ試験と圧縮試験で同質でない可能性があり、ここでの考察の対象から外した。

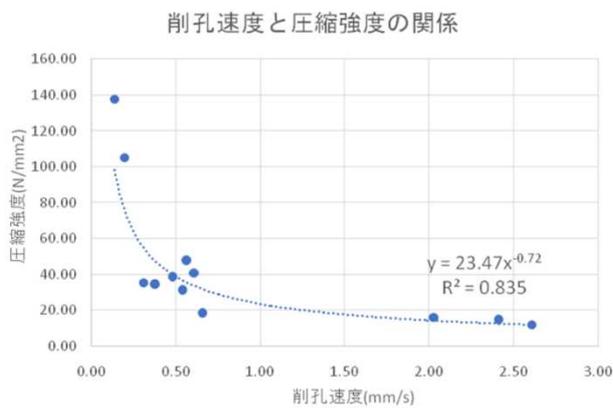
【曲げ強度と含水率の関係】

下図より、湿潤状態と気乾状態で石材の曲げ強度に大きな変化は見られない。



【小径ドリル削孔試験結果と圧縮強度との関係】

圧縮強度試験のものと同質部分の試験体にて削孔試験を行い、削孔速度と圧縮強度の関係を図・表で確認した。図より、削孔速度が遅いと圧縮強度が高く、逆に速度が速いと圧縮強度が小さくなっており、高い相関関係を示していることが分かる。今後、阿蘇溶結凝灰岩を対象とした小径コア削孔速度からおよその圧縮強度を推定することができると考えられる。



圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		削孔速度 (mm/s)	
試験体名	試験値	試験値	試験体名
17-上 1	18.55	0.66	17-上 2
17-中 1	40.87	0.60	17-中 2
17-下 1	31.53	0.54	17-下 2
18-上 1	38.70	0.48	18-上 2
18-中 1	34.70	0.37	18-中 2
18-下 1	35.25	0.31	18-下 2
44-上 1	12.07	2.60	44-上 2
44-中 1	14.96	2.41	44-中 2
44-下 1	16.13	2.02	44-下 2
N-1	47.83	0.56	N-2
N-4	137.39	0.14	N-5
N-6	104.85	0.19	N-7