

田平天主堂における煉瓦材料試験

- 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：田平天主堂

文化財種別 (指定年月日)：重要文化財 (平成 15 年 12 月 25 日)

所在地：長崎県平戸市田平町小手田免 19 番地 19

所有者 (管理団体)：カトリック長崎大司教区

構造形式：三廊式教会堂、煉瓦造及び木造、建築面積 459.90m²、正面塔屋及び左右側面出入口付、棧瓦葺

建築年：大正 7 年 (1918)

事業名称：重要文化財田平天主堂耐震診断事業

事業期間：令和元年 6 月 1 日～令和 3 年 3 月 31 日

工事種別：耐震診断

事業者：カトリック長崎大司教区

設計監理：(公財)文化財建造物保存技術協会

実験計画者：(公財)文化財建造物保存技術協会

実験機関：(一財)建材試験センター中央試験場 (要素せん断試験以外)
(株)計測リサーチコンサルタント (要素せん断試験)

実験年月日：令和元年 10 月～11 月

引用・参考文献：－

●実験に至る経緯と目的

構造検討上必要となる、構造要素の力学的特性や材料特性などの物性を把握するため、煉瓦や目地の材料の強度や組積体としての強度を実験的に調査した。

● 姿図・寸法

表 煉瓦コア採取一覧表 (mm)

名称	採取位置	削孔深さ	試験可能長さ	試験方法
床-1	床下	600	600	せん断及び引張
床-2		460	300+100	せん断及び引張
床-3		600	400+200	せん断及び引張
床-4		900	200+200+500	せん断及び引張
床-5		600	100	せん断及び引張
床-5		600	100+400	せん断及び引張

※採取コア径は 80mm

表 煉瓦要素採取一覧表 (mm)

名称	採取位置	試験	概略寸法
床-1	床下	圧縮	230×220×270

※上記表以外に単体試験用煉瓦 15 体、要素圧縮用煉瓦 2 体は床下に残置してある煉瓦を使用した。

● 実験方法

(1) 煉瓦単体試験

① 密度・吸水率試験

密度については、試料の寸法を計測し、気乾状態での質量を測定して気乾密度（見かけの比重）を求める。気乾密度は、以下の式にて算出する。

$$\text{気乾密度}(g/cm^3) = \frac{\text{気乾質量}(g)}{\text{供試体の幅}(mm) \times \text{供試体の長さ}(mm) \times \text{供試体の高さ}(mm)} \times 1000$$

吸水率については、JIS R 1250（普通れんが及び化粧れんが）に従うものとする。試料を 105℃～120℃の空气中で 24 時間乾燥し、室温まで放冷後、秤量しこれを乾燥質量 m_1 (g) とする。この試料を直ちに 20±5℃の水中に 24 時間静置する。試料上部と水面間の距離は、50～60mm とする。これを水中から取り出し、手早く湿布で表面の水分をぬぐい取り、直ちに秤量し、これを飽水質量 m_2 (g) とする。

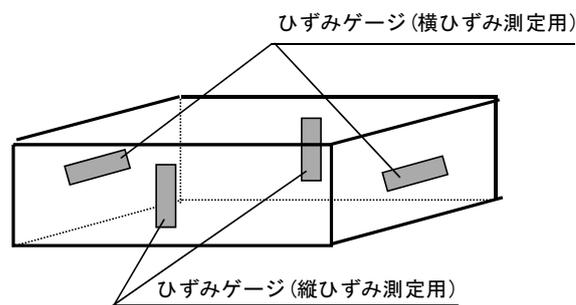
$$a = (m_2 - m_1) / m_1 \times 100 (\%)$$

②煉瓦単体圧縮

JIS R 1250（普通れんが及び化粧れんが）に従うものとする。圧縮強度を求める場合には、煉瓦の平面を加圧面とし、予め試料ごとに加圧面積Aを求める。加圧面及び底面をせっぽうを用いてキャッピングして平面調整を行い、均一に加圧する。加圧速度は毎秒0.49～0.98N/mm²とし、試料が破壊した時の最大荷重_bP_{cm}を測定する。

$$\delta_c = {}_b P_{cm} / A$$

また、あらかじめ試験体厚さt(mm)を求め、圧縮強度と同時にひずみゲージを設置してひずみの変化量を2方向測定することにより、静弾性係数とポアソン比を求める。



静弾性係数は、以下の式にて算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 400 \times 10^{-6}} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (kN/mm²)

S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm²)

S_2 : 供試体の縦ひずみ 400×10^{-6} の時の応力 (N/mm²)

ε_1 : 応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ

ポアソン比は、以下の式にて算出する。

$$\nu = \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - 400 \times 10^{-6}}$$

ここに、 ν : ポアソン比

ε_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力における縦ひずみ

ε_2 : 最大荷重の1/3に相当する応力における横ひずみ

ε_3 : 縦ひずみ 400×10^{-6} の時の応力における横ひずみ

③煉瓦単体引張

試験方法は、長手方向に平行な向きに載荷する引張試験とする。平面に引張用治具を接着し、引張治具を介して引張力を加える。引張強度は試料が破壊した時の最大荷重を測定した。また、荷重の増加量 ΔP とともに、ひずみゲージを設置してひずみの変化量を測定し、静弾性係数を求める。

引張強度は、以下の式にて算出する。

$$\text{引張強度}(N/mm^2) = \frac{\text{最大荷重}(kN)}{\text{破壊部の幅}(mm) \times \text{破壊部の厚さ}(mm)}$$

静弾性係数は、以下の式にて算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 25 \times 10^{-6}} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (kN/mm^2)

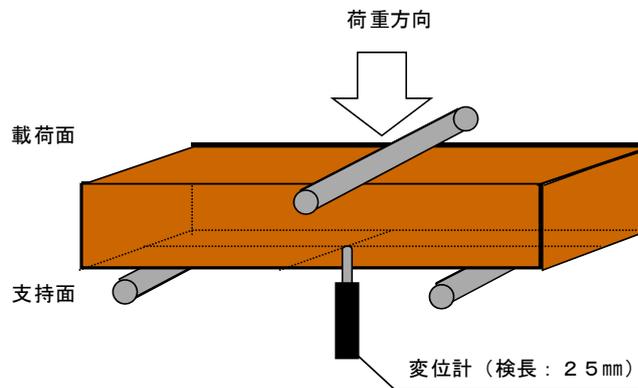
S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm^2)

S_2 : 供試体の縦ひずみ 25×10^{-6} の時の応力 (N/mm^2)

ε_1 : 応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ

④煉瓦単体曲げ

試験方法は、平面を加圧面とする1点載荷曲げ試験とする。支点間距離を厚さの3倍以上(180mm)とし、その中央に集中荷重を加える。曲げ強度は、試料が破壊した時の最大荷重を測定する。また、中央でたわみ量を測定し、静弾性係数を求める。



曲げ強度は、以下の式にて算出する。

$$f_b = \frac{3 \times P \times l}{2 \times b \times h^2}$$

ここに、 f_b : 曲げ強度 (N/mm^2)

P : 最大荷重 (kN)

l : スパン (mm)

b : 破壊面の幅 (mm)

h : 破壊面の高さ (mm)

静弾性係数は、以下の式にて算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 200 \times 10^{-6}} \times 10^{-3}$$

ここに、 E c : 静弾性係数 (kN/mm²)

S₁ : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm²)

S₂ : 供試体の縦ひずみ200×10⁻⁶の時の応力 (N/mm²)

ε₁ : 応力 S₁によって生じる供試体の縦ひずみ

⑤煉瓦単体せん断

せん断試験は直接二面せん断による繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法 (JCI-SF6) で行う。

試験機は JIS B 7733 (圧縮試験機) に従った。せん断試験装置は供試体に常に垂直な荷重が作用するような構造で、所定の幅のエッジをもつものを標準とし、上下のエッジのずれ (δ) は 0~1mm の範囲でなければならない。エッジの間隔 (H=100mm) は供試体高さ (h) と同じ寸法とし、エッジ幅はエッジ間隔 (H) の 1/10 とする。

供試体の 2 つの破壊予定面の高さ及び厚さをそれぞれ 2 ヶ所で 0.2mm まで測定し、それぞれの平均値を供試体の高さ及び幅とする。供試体は載荷装置の中央に置いて上部加圧装置を接触させ、煉瓦の幅方向に載荷する。載荷速度は毎秒 0.06~0.1N/mm² とし、試料が破壊した時の最大荷重 P を有効数字 3 桁まで読む。また、ひずみゲージを設置してひずみの変化量を測定し、静弾性係数を求める。

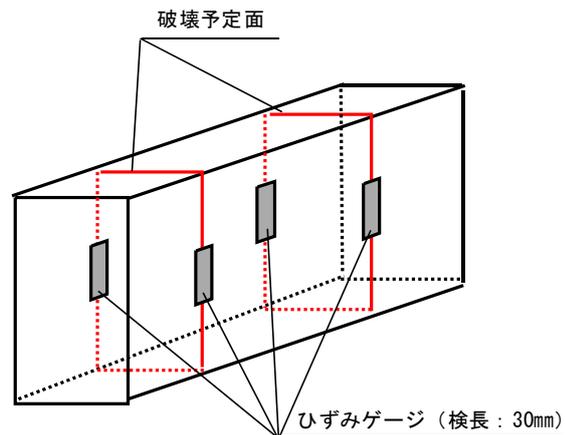
$$\tau = P / (2bh)$$

τ : せん断強度 (N/mm²)

P : 最大荷重 (N)

b : 供試体の厚さ (mm)

h : 供試体の高さ (mm)



静弾性係数は、以下の式にて算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 50 \times 10^{-6}} \times 10^{-3}$$

ここに、 E c : 静弾性係数 (kN/mm²)

S₁ : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm²)

S₂ : 供試体の縦ひずみ50×10⁻⁶の時の応力 (N/mm²)

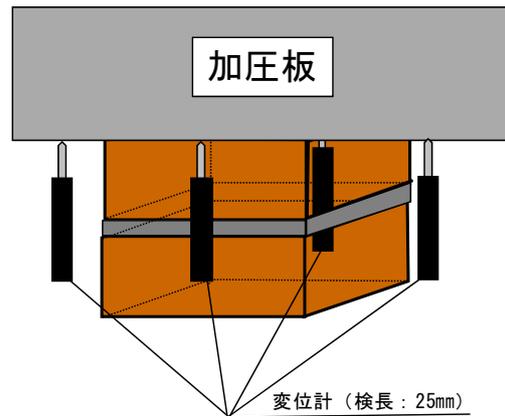
ε₁ : 応力 S₁によって生じる供試体の縦ひずみ

(2) 煉瓦要素試験

① 煉瓦要素圧縮

試験体には、煉瓦の平面の長さ方向を半分に切断したものに目地 1 段を介して 2 段に積んだもの（100mm×100mm×120mm 程度）を用いる。

試験方法は、煉瓦の平面を加圧面として載荷を行う。上下面には、せっこうを用いてキャッピングして平面調整を行い、均一に加圧する。試料が破壊した時の最大荷重 P_{cm} を測定する。また、圧縮強度と同時に、縦方向に変位計を設置して、変位量を測定することにより、静弾性係数を求める。



圧縮強度は、以下の式にて算出する。

$$\text{圧縮強度}(N/mm^2) = \frac{\text{最大荷重}(kN)}{\text{加圧面積}(mm^2)}$$

静弾性係数は、以下の式にて算出する。

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - 1000 \times 10^{-6}} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (kN/mm^2)

S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm^2)

S_2 : 供試体の縦ひずみ 1000×10^{-6} の時の応力 (N/mm^2)

ε_1 : 応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ

②煉瓦要素引張

試験体には、φ80mm×100mm程度の円柱形で、1本の目地がそれぞれの底面の円の中心を通るものを用いる。

試験方法は直接引張試験とし、予め試料ごとに試験体の長さ、幅、目地の幅を計測する。円柱の側面に治具を接着し、引張治具を介して引張力を加え、試料が破壊した時の最大荷重 eP_{tm} を引張強度とする。



③煉瓦要素せん断

試験体には、直径80mm、長さ煉瓦1枚分の円柱形を基本とし、1本の目地がそれぞれの底面の円の中心を通るものを用いる。

煉瓦目地せん断試験は、圧縮応力を载荷しながら行う一面せん断試験とする。あらかじめ試験体の径、長さ、目地の幅を計測する。目地を水平に設置し、煉瓦上部と下部にそれぞれ治具を設置して、目地に直角になるように圧縮力を载荷する。床下から採取した供試体には建物の荷重を想定(0.40N/mm²)して設定した。それ以外の側圧を想定しない供試体の場合には、治具が载荷中に不要に動かないように、軽く上部から押さえ試験を実施する。

圧縮力を载荷した状態で、目地に水平な荷重を载荷し、試料が破壊した最大荷重 eP_{sm} を測定する。また、変位計を設置して変位量を測定し、静弾性係数を求める。

静弾性係数は、以下の式にて算出する。

$$Ec = \frac{S_1 - S_2}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \times 10^{-3}$$

ここに、 E_c : 静弾性係数 (kN/mm²)

S_1 : 最大荷重の1/3に相当する応力 (N/mm²)

S_2 : 縦ひずみ 0.0×10^{-6} の時の応力 (N/mm²)

ε_1 : 応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ

ε_2 : 応力 S_2 によって生じる供試体の縦ひずみ

※ S_2 の値は応力-ひずみ曲線の勾配が供試体により違うため、供試体毎に設定した。

●結果

(1)煉瓦単体試験

①密度・吸水率試験

表 煉瓦単体密度試験結果

供試体 番 号	供試体の寸法 (mm)			乾燥質量 (g)	密度 (g/cm ³)
	平均幅	平均長さ	平均厚さ		
No.1	108.9	225.6	61.9	2638	1.73
No.2	109.4	205.8	58.6	2384	1.81
No.3	107.1	185.5	59.0	2033	1.73
平均	—	—	—	—	1.76

表 煉瓦単体吸水率試験結果

供試体 番 号	乾燥質量 (g)	飽水質量 (g)	吸 水 率 (%)
No.1	2638	3001	13.8
No.2	2384	2582	8.3
No.3	2033	2305	13.4
平均	—	—	11.8

②煉瓦単体圧縮

表 煉瓦組積体圧縮強度試験結果

供試体 番 号	供試体の寸法 (mm)			加圧面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 (N/mm ²)
	平均幅	平均長さ	平均厚さ			
No.1	107.6	102.6	64.7	11039.8	332	30.1
No.2	106.2	113.2	66.2	12021.8	361	30.0
No.3	104.9	99.7	64.7	10458.5	510 ^{a)}	48.8
平均	—	—	—	—	—	36.3

注 ^{a)} 500kN 万能試験機を用いて最大容量 (500kN) まで載荷したが、破壊しなかったため、
除荷したのち 3000kN 圧縮試験機 (使用レンジ 1000kN) で再度載荷した。

表 煉瓦組積体圧縮弾性係数試験結果

供試体 番 号	最大荷重の 1/3 に 相当する応力:S ₁ (N/mm ²)	縦ひずみ 400×10 ⁻⁶ のときの応力:S ₂ (N/mm ²)	応力 S ₁ によって 生じる縦ひずみ (×10 ⁻⁶)	圧縮弾性係数 (kN/mm ²)
No.1	10.0	1.78	2271	4.39
No.2	10.0	1.69	2190	4.64
No.3	16.3	4.01	1823	8.64
平均	—	—	—	5.89

③煉瓦単体引張

表 煉瓦単体引張強度試験結果

供試体 番 号	破壊面の寸法 (mm)		最大荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)
	平均幅	平均厚さ		
No.1	62.2	57.1	5.47	1.54
No.2 ^{a)}	62.2	58.9	6.56	1.79
No.3	60.8	60.9	4.94	1.33
平均	—	—	—	1.55

注 ^{a)} 破断面が試験区間外であったため、試験区間中央の寸法を用いて断面積を算出した。

表 煉瓦単体引張弾性係数試験結果

供試体 番 号	最大荷重の 1/3 に 相当する応力: S_1 (N/mm^2)	縦ひずみ 25×10^{-6} のときの応力: S_2 (N/mm^2)	応力 S_1 によって 生じる縦ひずみ ($\times 10^{-6}$)	引張弾性係数 (kN/mm^2)
No.1	0.513	0.154	85	5.98
No.2	0.597	0.171	88	6.76
No.3	0.443	0.178	71	5.76
平均	—	—	—	6.17

④煉瓦単体曲げ

表 煉瓦単体曲げ強度試験結果

供試体 番 号	破壊面の寸法 (mm)		支点間距離 (mm)	最大荷重 (kN)	曲げ強度 (N/mm^2)
	平均幅	平均厚さ			
No.1	110.9	60.9	180	4.54	2.98
No.2	105.0	58.1	180	5.66	4.31
No.3	108.8	58.4	180	4.36	3.17
平均	—	—	—	—	3.49

表 煉瓦単体曲げ弾性係数試験結果

供試体 番 号	最大荷重の 1/3 に 相当する応力: S_1 (N/mm^2)	曲げひずみ 300×10^{-6} のときの応力: S_2 (N/mm^2)	応力 S_1 によって 生じる曲げひずみ ($\times 10^{-6}$)	曲げ弾性係数 (kN/mm^2)
No.1 ^{a)}	0.993	0.270	1047	0.968
No.2	1.44	0.661	600	2.60
No.3	1.06	0.435	598	2.10
平均	—	—	—	1.89

注^{a)} 荷重—変位曲線に初期すべりがみられたため、立ち上がり後の傾きを用いて補正した
応力度—ひずみ曲線から求めた値を示す。

⑤煉瓦単体せん断

表 煉瓦単体せん断強度試験結果

供試体 番 号	破壊面の寸法 (mm)		最大荷重 (kN)	せん断強度 (N/mm ²)
	平均厚さ	平均幅		
No.1	60.8	60.2	19.7	1.47
No.2	59.1	59.4	44.9	3.47
No.3	58.3	60.0	42.4	3.28
平均	—	—	—	2.74

表 煉瓦単体せん断弾性係数試験結果

供試体 番 号	最大荷重の 1/3 に 相当する応力:S ₁ (N/mm ²)	せん断ひずみ 100×10 ⁻⁶ のときの応力:S ₂ (N/mm ²)	応力 S ₁ によって 生じるせん断ひずみ (×10 ⁻⁶)	せん断弾性係数 (kN/mm ²)
No.1	0.490	0.069	598	0.845
No.2	1.16	0.429	234	5.46
No.3	1.09	0.554	195	5.64
平均	—	—	—	3.98

(2) 煉瓦要素試験

① 煉瓦要素圧縮

No. 1, No. 2 は床下に残置してあった煉瓦を使用し、No. 3 は床下壁部から採取した煉瓦を使用した。目地の状態として No. 1, No. 2 は目地間の接着が弱く、手でこすると目地がパラパラする状態であった。No. 3 は No. 1, No. 2 に比べると目地接着が若干強かった状況であった。

表 煉瓦組積体圧縮強度試験結果

供試体 番号	上面の寸法 (mm)		下面の寸法 (mm)		平均 高さ (mm)	目地 厚さ (mm)	加圧面積 (mm ²)			最大 荷重 (kN)	圧縮 強度 (N/mm ²)	目地モ ルタル 充填率 (%)
	平均 幅	平均 長さ	平均 幅	平均 長さ			上面	下面	平均			
No.1	105.1	92.8	103.3	94.0	131.2	7.4	9753.3	9710.2	9731.8	87.3	8.97	100
No.2	92.2	82.4	93.7	83.9	135.6	12.3	7597.3	7861.4	7729.4	71.2	9.21	100
No.3	101.9	101.9	99.6	100.9	132.5	11.4	10383.6	10049.6	10216.6	124	12.1	100
平均	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10.1	100

表 煉瓦組積体圧縮弾性係数試験結果

供試体 番号	最大荷重の 1/3 に 相当する応力: S ₁ (N/mm ²)	縦ひずみ 1000×10 ⁻⁶ のときの応力: S ₂ (N/mm ²)	応力 S ₁ によって 生じる縦ひずみ (×10 ⁻⁶)	圧縮弾性係数 (kN/mm ²)
No.1	2.99	2.01	1712	1.38
No.2	3.07	1.80	1610	2.08
No.3	4.03	1.48	2681	1.52
平均	—	—	—	1.66

② 煉瓦要素引張

表 煉瓦組積体引張強度試験結果

供試体 番号	供試体の寸法 (mm)			破壊面の寸法 (mm)		破壊面積 (mm ²)	最大荷重 (kN)	引張強度 (N/mm ²)	目地 モルタル 充填率 (%)
	平均 直径	平均 長さ	目地 厚さ	平均 幅	平均 長さ				
No.1	79.3	102.2	76.1	78.5	101.7	7983.5	1.58	0.198	95
No.2	79.1	101.0	77.1	80.4	99.0	7959.6	4.88	0.613	100
No.3	79.6	102.8	78.0	80.0	90.7	7256.0	2.52	0.347	100
平均	—	—	—	—	—	—	—	0.386	—

③煉瓦要素せん断

表 煉瓦組積体せん断強度試験結果

	No. 1-1	No. 2-1	No. 4-1
平均コア長さ L(mm)	198.3	200.3	194.8
目地幅 d(mm)	78.5	77.3	79.7
せん断面積 A (mm ²)	15566.6	15483.2	15525.6
破壊荷重 P (kN)	30.7	26.95	23.41
目地せん断強度 τ (N/mm ²)	1.97	1.74	1.51
側面載荷応力 (N/mm ²)	0.40	0.40	0.40
破壊形態	目地+境界	煉瓦+目地	境界
			
目地充填率 (%)	100	100	100

表 煉瓦組積体せん断弾性係数試験結果

供試体 No.	最大荷重の 1/3 に 相当する応力 S_1 N/mm ²	縦ひずみ 300×10^{-6} の時の応力 S_2 N/mm ²	応力 S_1 によって 生じる縦ひずみ $\times 10^{-6}$	せん断弾性係数 kN/mm ²
No. 1-1	0.657	0.182	1803	0.316
No. 2-1	0.579	0.204	1799	0.289
No. 4-1	0.502	0.158	1815	0.227

※No. 2-1 は縦ひずみ 300×10^{-6} 時が、応力-ひずみ曲線の勾配が立ち上がる前の領域に位置するため縦ひずみ 500×10^{-6} 時の応力 S_2 から算出した。