

論文 ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物のモルタルの変形について

青木 孝義*¹・伊藤 憲雄*²・角舎 輝典*³

要旨: ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物に使用されていたモルタルの推定された構成材料の容積比を中心とする調合計画を作成して、組積造としての強度特性と変形（静弾性係数）に関する基礎データの蓄積を試みた。レンガ粒径 0.6mm 未満を入れた試験体は 0.6mm 以上を入れたものより圧縮強度が大きくなっているが、これは微細分のレンガが試験体内の空隙を埋め密実になっているためである。また、付着せん断強度は圧縮強度の約 1/10 であることがわかった。静弾性係数はミナレットの常時微動測定から同定されたヤング係数と良い一致をみた。

キーワード: ハギア・ソフィア大聖堂, 消石灰, モルタル, 強度, 静弾性係数

1. はじめに

近年、歴史的建築物をユネスコの世界遺産委員会で世界遺産条約の「世界遺産」に指定して保存しようとする気運が高まってきている。その代表例のひとつであるハギア・ソフィア大聖堂は、保存や補強の面からその力学的特性の解明が切望され、同大聖堂に関する現地調査や力学的研究が開始されている[1, 2]。しかし、使用されている材料の特性に関しては、大聖堂から実際にサンプルを採取して実験を行うことが難しいため、構造解析の重要な前提であるにも関わらず我々の研究では他の研究者と同様に文献などの調査に頼ってきた。メインストーンは材料特性の重要性と逆解析によるその推定の必要性を指摘している[3]。この点に関して、プリンストン大学のチャクマックを中心とする研究グループと筑波大学の日高を中心とする研究グループは、それぞれ実測された固有振動数と有限要素法による固有値解析結果を比較して、ヤング係数の同定を試みている[4, 5]。

前編の「ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物のモルタルの強度特性について」[6]では、1) ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする当時の歴史的建築物に使用されていたモルタルの構成材料の容積比を史料から川砂 2、消石灰 1、レンガ 2/3 と推定し[7]、2) この容積比を中心とする調合計画を作成してモルタルの実験を行い、材齢と比重、圧縮強度、曲げ強度、引張強度と動弾性係数の関係をあきらかにした。

本研究では前編の結果に基づき組積造としての実験を行い、材齢と圧縮強度、付着せん断強度と変形（静弾性係数）に関する基礎データの蓄積を試みる。

2. 組積造実験の概要

組積造実験の第一段階として、ここでは一番単純なモデルを想定した。すなわち、組積造試験体はレンガ片 2 個とその間のモルタルで構成される。

*1 名古屋市立大学芸術工学部講師 生活環境デザイン学科、工博（正会員）

*2 宮城工業高等専門学校助教授 建築学科（正会員）

*3 宮城工業高等専門学校助教授 情報デザイン学科、工博

2. 1 モルタルの構成材料

消石灰（気乾比重：2.51）は市販品、細骨材（表乾比重：2.54、吸水率：3.04%、粗粒率：2.67）は宮城県阿武隈川流域産、レンガ破碎粒（以下、レンガ粒またはレンガという）（SLBP、粒径：0.6mm 未満、表乾比重：2.67、吸水率：0.38%、SLB1、粒径：0.6mm 以上 1.2mm 未満、表乾比重：2.07、吸水率：19.03%、SLB2、粒径：1.2mm 以上 2.5mm 未満、表乾比重：2.12、吸水率：16.48%、SLB3、粒径：2.5mm 以上 5.0mm 未満、表乾比重：2.18、吸水率：13.54%、SLB4、粒径：5.0mm 以上 8.0mm 未満、表乾比重：2.18、吸水率：11.22%）は市販品、練り混ぜ水は水道水を使用した。

2. 2 モルタルの調合

試験体としては、前編の「ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物のモルタルの強度特性について」[6]の実験結果より、圧縮強度の高い消石灰と細骨材の容積比 1:2.00 のモルタルにレンガの単一粒度を 5 水準として内割りで加えた組合せの調合、および粒度分布をもつレンガを内割りで加えた調合計画を作成した。すなわち、試験体としては消石灰のみのもの（L1）と消石灰と細骨材+レンガの容積比 1:2.00 における各レンガ粒径（2SL、2SLBP、2SLB1～2SLB4）、およびクラッシャーで砕いた際の粒度分布（粗粒率：3.68、4.21）をもつレンガを加えたもの（CL2、CL3）の圧縮強度と付着せん断強度、および静弾性係数に及ぼす影響をみるためのもの、計 9 種類を作製した。モルタルの調合は表-1 のとおりである。なお、実験には細骨材とレンガ粒径 0.6mm 以上は表乾状態、消石灰とレンガ粒径 0.6mm 未満は気乾状態のものを用いた。また、組積造を構成するレンガ片は、十分に吸水した状態のものを用いた。

表-1 組積造実験に用いたモルタルの調合表（1リットルあたり）

試験体	消石灰 (g/L)	砂 (g/L)	レンガ (g/L)	水 (cc/L)	フロー 値 (mm)	水/消 石灰比 (%)	消石灰 の割合 (%)	容積比 消石灰： 細骨材	容積比 レンガ： 細骨材	レンガ 粒径 (mm)
L1	1054.4	—	—	580	148	55.0	100.0	1:0.00	1:3.00	—
2SL	541.9	1096.8	—	352	118	65.0	33.1	1:2.00	1:3.00	—
2SLBP	533.2	809.4	283.6	363	113	68.0	32.8	1:2.00	1:3.00	<0.6
2SLB1	541.9	822.6	223.5	352	133	65.0	34.1	1:2.00	1:3.00	0.6<1.2
2SLB2	542.0	822.7	228.9	352	120	65.0	34.0	1:2.00	1:3.00	1.2<2.5
2SLB3	542.0	822.7	235.3	352	130	65.0	33.9	1:2.00	1:3.00	2.5<5.0
2SLB4	542.0	822.7	235.3	352	131	65.0	33.9	1:2.00	1:3.00	5.0<8.0
CL2	542.5	823.4	245.3	353	126	65.0	33.7	1:2.00	1:3.00	<5.0
CL3	513.9	877.5	261.4	334	116	65.0	31.1	1:2.25	1:3.00	<8.0

2. 3 試験体とその養生

ハギア・ソフィア大聖堂の壁体は、約 60cm×60cm×5cm のレンガとほぼ同じ厚さの目地モルタルで構成されている。これに基づき、試験体の寸法としては、厚さ 5cm のモルタルを 10cm×10.5cm×6.2cm の 2 個のレンガ片に挟み込んだ 10cm×10.5cm×17.5cm とし、試験体は作製後、気中養生した。また、施工の進行にともない実際の構造物では上にレンガが徐々に積まれ荷重が作用することから、本実験では約 6 段分のレンガが積まれた状態を仮定し、その荷重を加えながら気中養生した。なお試験体数は各試験項目に対して 2 本の計 108 体である。

2. 4 測定項目と実験方法

実験では、調合計画に基づき作製した組積造の圧縮強度、付着せん断強度、静弾性係数の変化を測定した。圧縮強度と静弾性係数については3日、7日、28日、84日の材齢で、また付着せん断強度については28日、84日の材齢で試験を行った。圧縮強度試験は試験体を縦置きで(図-1)、付着せん断試験は試験体を横置きとし、レンガとモルタルの接合面に鉄棒を置いて行った(図-2)。消石灰の比重試験はJIS R 5210に準ずる。ただし、消石灰は気硬性のため水と化学反応をおこさないため、ここでは鉱油の代わりに水を用いた。レンガ粒の比重試験および吸水率試験はJIS A 1109に準ずる。

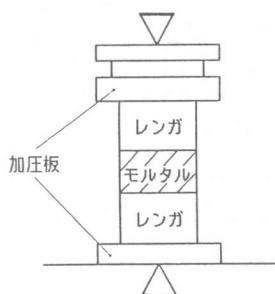


図-1 圧縮強度試験の加圧状態

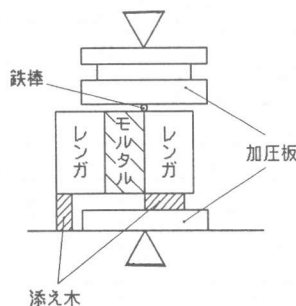


図-2 付着せん断強度試験の加圧状態

2. 5 実験結果とその考察

図-3、図-4にそれぞれ圧縮強度試験と付着せん断強度試験の実験結果を示す。材齢3日で大きくなった圧縮強度は材齢7日で一旦小さくなるものの、その後は徐々に強度が大きくなり、その傾向は消石灰のみのもの(L1、○印)を除く各試験体ではほぼ同じであることがわかる。

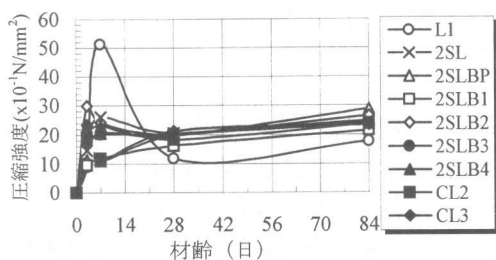


図-3 圧縮強度試験結果

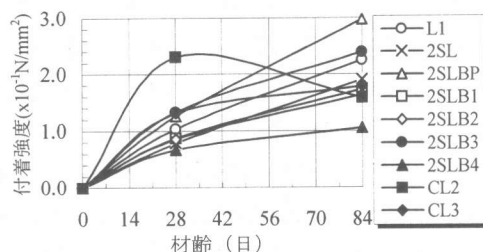


図-4 付着せん断強度試験結果

表-2に各試験体の材齢と圧縮強度、付着せん断強度、静弾性係数の実験結果を示す。表中、*印は圧縮強度試験の際にレンガが割れて最大耐力が決まったものであるが(レンガ自体の圧縮強度は 21N/mm^2)、これらの値をみると他のものに比べて大幅に強度が高いことがわかる(図-5、図-6)。また、表中**印は、付着せん断試験において試験方法(図-2)の影響で梁(曲げ)の影響がでてしまったものである。

表-2 組積造実験結果

試験体	圧縮強度 ($\times 10^{-1} \text{N/mm}^2$)				付着せん断強度 ($\times 10^{-1} \text{N/mm}^2$)		静弾性係数 ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)				レンガ 粒径 (mm)
	3日	7日	28日	84日	28日	84日	3日	7日	28日	84日	
L1	9.15	*51.33	11.94	17.74	1.04	2.25	2.48	1.39	2.27	2.90	—
2SL	14.63	26.00	20.46	24.87	0.78	1.90	3.54	2.27	3.33	6.19	—
2SLBP	11.34	20.47	19.62	28.71	1.26	2.97	2.17	2.81	3.94	6.27	<0.6
2SLB1	9.66	11.94	16.23	21.47	0.88	1.73	0.49	0.92	2.28	3.60	0.6<1.2
2SLB2	*29.75	24.10	19.99	26.35	0.86	1.64	0.57	1.59	2.93	3.35	1.2<2.5
2SLB3	*16.92	20.20	20.37	23.68	1.33	2.40	0.55	1.38	3.19	4.77	2.5<5.0
2SLB4	*19.70	*22.95	18.35	23.84	0.67	1.05	0.38	0.92	1.94	2.43	5.0<8.0
CL2	*19.23	11.07	19.76	23.98	**2.30	1.58	0.53	0.74	2.15	3.29	<5.0
CL3	*23.44	11.54	21.32	23.39	1.31	1.78	0.66	1.52	3.44	5.40	<8.0

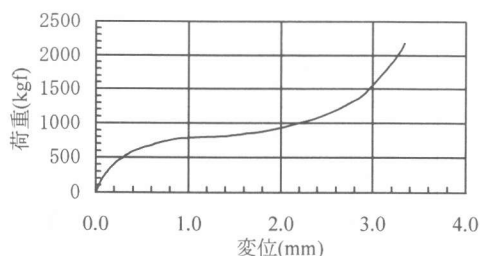


図-5 材齢3日におけるCL2の荷重-変形曲線

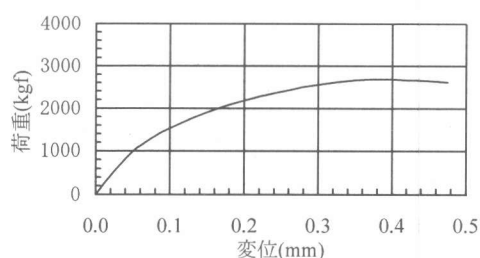


図-6 材齢84日におけるCL2の荷重-変形曲線

これらは正確な最大耐力とはいえないため、レンガが割れて最大耐力が決まったものの値を除き、その他の数値より統計して予測値を求め、検討することにした。図-7にレンガが割れた試験体の実験結果による回帰グラフを示す。回帰式の決定係数は70~100%程度を示しており、これらの回帰式による予測値は信頼性の高いものと思われる。図-8、表-3にレンガが割れたものの値を回帰式で求められた予測値により改正した結果を示す。

以上により、調合条件による強度の関係は、消石灰と細骨材のもの(2SL、×印)、およびレンガ片を含むもの(2SLBP、2SLB1~2SLB4、CL2、CL3)の強度が消石灰のもの(L1、○印)に比べて高い値を示していることがわかる。特に材齢84日の圧縮強度では、レンガ粒径0.6mm未満を入れた試験体(2SLBP、△印)で最大値2.87N/mm²が得られており、微細な粒度のレンガを混入したモルタルの強度性状が良いことがわかった。このことが既にアルベルティの『建築論』で言及されていることは興味深い[8]。また、材齢と強度の関係としては、材齢経過とともに強度は増える傾向を示し、それは各試験体においてほぼ同じであることがわかったが、材齢3日~7日ほどの若材齢では強度変化にばらつきがあり、2SLB2、2SLB3、CL2、CL3のように7日で一旦小さくなっているものや、2SL、2SLBPのように逆に7日で一旦大きくなっているものがある。このような若材齢での強度発現に関しては、気硬性である消石灰の二酸化炭素との反応量、およびその速度による影響が考えられることから、現時点ではこれらの現象が消石灰を結合材とするモルタルの強度特性であるかどうかについては不明である。

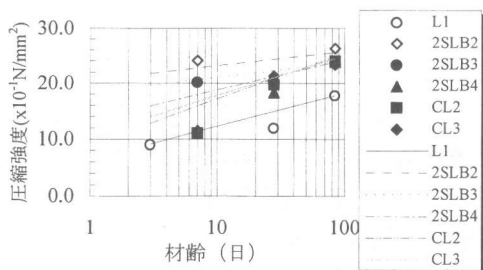


図-7 レンガが割れた試験体による
回帰グラフ

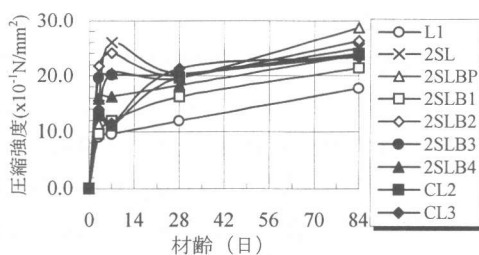


図-8 予測値による圧縮強度試験結果

表-3 組積造実験結果 (予測値)

試験体	圧縮強度 ($\times 10^1 \text{N/mm}^2$)				付着せん断強度 ($\times 10^1 \text{N/mm}^2$)		静弾性係数 ($\times 10^3 \text{N/mm}^2$)				レンガ 粒径 (mm)
	3日	7日	28日	84日	28日	84日	3日	7日	28日	84日	
L1	9.15 (9.63)	11.94	17.74	1.04	2.25	2.48	1.39	2.27	2.90	—	
2SL	14.63	26.00	20.46	24.87	0.78	1.90	3.54	2.27	3.33	—	
2SLBP	11.34	20.47	19.62	28.71	1.26	2.97	2.17	2.81	3.94	6.27	
2SLB1	9.66	11.94	16.23	21.47	0.88	1.73	0.49	0.92	2.28	3.60	0.6<1.2
2SLB2	(21.77)	24.10	19.99	26.35	0.86	1.64	0.57	1.59	2.93	3.35	1.2<2.5
2SLB3	(19.66)	20.20	20.37	23.68	1.33	2.40	0.55	1.38	3.19	4.77	2.5<5.0
2SLB4	(15.89)	(16.29)	18.35	23.84	0.67	1.05	0.38	0.92	1.94	2.43	5.0<8.0
CL2	(12.82)	11.07	19.76	23.98	**2.30	1.58	0.53	0.74	2.15	3.29	<5.0
CL3	(13.99)	11.54	21.32	23.39	1.31	1.78	0.66	1.52	3.44	5.40	<8.0

図-9 に予測値により改正した実験結果を用いた圧縮強度と付着せん断強度の関係を示す。付着せん断強度と圧縮強度との比は、材齢 28 日では 1/27~1/10 の範囲で認められたが、材齢 84 日では多少のばらつきはあるものの各試験体でほぼ 1/10 程度であることがわかる。また、図-9 より圧縮強度が大きくなると付着せん断強度も大きくなり、その傾向は一次的であることがわかる。

図-10 に静弾性係数試験結果を示す。これより材齢 84 日における消石灰モルタルを用いた組積造の静弾性係数は $2.43 \sim 6.27 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ と幅があるものの、現在用いているコンクリート構造用材料のヤング係数の約 8 分の 1 から 3 分の 1 であることがわかる。この弾性係数は、ミナレットの常時微動測定から同定されたヤング係数（コンクリートの約 7.5 分の 1 から 3.1 分の 1）と良い一致をみている[5]。

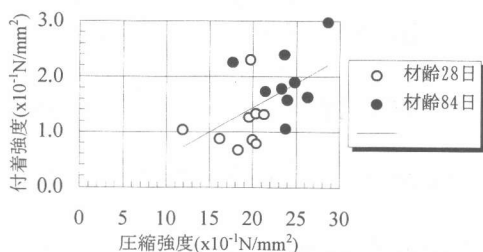


図-9 圧縮強度 - 付着せん断強度関係

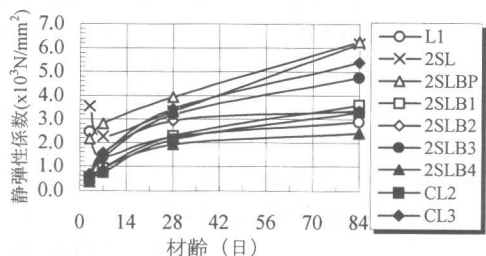


図-10 静弾性係数試験結果

4. まとめ

本研究で得られた結果を列記すると以下のようになる。

- 1) レンガ粒径 0.6mm 未満を入れた試験体はその強度特性が優れていることをあきらかにした。これは微細分のレンガが試験体内の空隙を埋め密実になっているためであると思われるが、このことが既にアルベルティの『建築論』で言及されていることは興味深い。
- 2) 付着せん断強度は圧縮強度のほぼ 1/10 程度であることをあきらかにした。
- 3) 組積造実験で得られた静弾性係数は、ミナレットの常時微動測定から同定されたヤング係数（コンクリートの約 7.5 分の 1 から 3.1 分の 1）と良い一致をみた。

紀元 300 年に建設されたテッサロニキのロトンダ[9]、およびハギア・ソフィア大聖堂と同時に建設されたクチュック・アヤソフィアモスク[10]の材料実験から得られた圧縮強度（引張強度）と弾性係数は、ばらつきがあるものの我々の実験結果と大きな差はみられなかった。

謝辞

愛知工業大学教授の飯田喜四郎博士、名古屋大学教授の谷川恭雄博士には研究上の御助言をいただきました。心から感謝致します。東北電力(株)電力技術研究所土木研究室の成田健氏には施設供与をはかっていただきました。深く感謝致します。また、本実験を行うにあたり宮城工業高等専門学校建築学科技官の森弘則氏、卒業研究室学生の酒井篤史君、中西貴行君、水尾麻奈さんのご協力をいただいた。感謝致します。本稿は、平成 7 年度文部省科学研究費「試験研究(B)(2)」補助金（研究代表者：青木孝義）と鹿島学術振興財団研究助成（研究代表者：青木孝義）の一部により進められた研究成果の一部である。

参考文献

- [1]R. Mark and A. S. Çakmak : Hagia Sophia, From the Age of Justinian to the Present, Cambridge University Press, 1992
- [2]Proc. of STREMA Symp., 1993, Proc. of SDEE Symp., 1993
- [3]R. J. Mainstone : The Structural Conservation of Hagia Sophia, Proc. of STREMA Symp., 1993, pp.3-14
- [4]A. S. Çakmak, R. Davidson, C. L. Mullen and M. Erdik : Dynamic Analysis and Earthquake Response of Hagia Sophia, Proc. of STREMA Symp., 1993, pp.67-84
- [5]青木孝義、加藤史郎、石川浩一郎、ミュフイト・ヨルルマズ、フェリドゥン・チュル：ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物の常時微動測定に基づく振動特性、構造工学論文集、Vol.40B、1994、pp.87-98
- [6]青木孝義、伊藤憲雄：ハギア・ソフィア大聖堂を中心とする歴史的建築物のモルタルの強度特性について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18、No.2、1996、pp.1523-1528
- [7]R. A. Livingston : Materials Analysis of the Masonry of the Hagia Sophia Basilica, Istanbul, Proc. of STREMA Symp., 1993, pp.15-31 (TGA 解析よりハギア・ソフィア大聖堂に用いられているモルタルの容積比は、ウィトルーウィウスの『建築書』に示されている消石灰 1、砂 2 の割合に非常に近いという結果が報告されている。)
- [8]相川浩訳：アルベルティ建築論、中央公論美術出版、1987、pp.69-70 (第三書諸工事第四章石材と石灰)
- [9]C. Ignatakis, E. Stavrakakis, G. Penelis : Mechanical Characteristics of Ancient Roman Masonry, Proc. of IABSE Symp., 1993, pp.433-440
- [10]G. A. Özçen, F. Aköz, N. Yüzer, M. Özkaraman : The Structural Evaluation of Küçük Ayasofya Mosque - Sts. Sergius and Bacchus - in Istanbul, Proc. of IASS Symp., 1995, pp.1261-1270