

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強度特性について

青木 孝義^{*1}・伊藤 憲雄^{*2}

要旨: 史料に基づきハギア・ソフィア大聖堂に使用されていたモルタルの構成材料の容積比を川砂 2, 消石灰 1, レンガ 2/3 と推定した。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。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。また, 曲げ強度は圧縮強度の約 1/2, 引張強度は約 1/10 であることがわかった。動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好一致をみた。

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

1. はじめに

トルコのイスタンブールにあるハギア・ソフィア大聖堂 (6 世紀) は, その時代・都市・様式・文化を代表する重要建築物であり, また内径約 32m の組積造ドームをもつ優れた空間構造としても位置づけられている。しかし, ドームの力学特性と施工方法に不明点を残しており, ドームの崩壊に関する構造安定性が進行中の亀裂により脅かされている現在, 保存や補強の面からその解明が切望されている。それにも関わらず, これら貴重な構造物を保存するための力学的観点からの構造特性および補強方法に関する研究は少ない。

歴史的建築物の構造調査や構造解析が開始され, 1993 年の STREMA93 国際会議ではハギア・ソフィア大聖堂に関して特別セッションが設けられ, 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我々日本の研究グループが初めてハギア・ソフィア大聖堂の固有振動数について発表を行っている[1, 2]。また, 常時微動測定結果と固有値解析結果の比較により目地を含んだレンガ, 石のヤング係数の同定を行うとともにミナレットの耐震性能の評価を試みている[3]。しかし, 使用されている材料の特性に関しては, 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文献などの調査に頼り, 看過されていた。

本稿は, 史料に基づきハギア・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構成材料の整理を行うとともに, その強度特性をあきらかにすることを目的としている [4]。

2. モルタルの構成材料の容積比の推定

紀元前 1 世紀のウィトルーウィウスの『建築書』によれば, 消石灰, 砂, レンガの容積比は次のとおりである。「・・・それが山砂の場合は砂 3 と石灰 1 が注ぎ込まれ, 川砂あるいは海砂の場合は砂 2 と石灰 1 が投入される。こうすれば調合正しい混合比となるであろう。なお, 川砂あるいは海砂に砕いて篩にかけた瓦屑を 1/3 加えるならば, 用うるにいい材料の調合となるであろう。」[5]

*1 宮城工業高等専門学校講師 建築学科, 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)

一方、15 世紀のアルベルティの『建築論』によれば、消石灰、砂、レンガの容積比は次のとおりである。「・・・カトーは手押車一台分について石灰一、砂二とモディウス量で判断しているが、人によってまちまちである。ウィトルーウィウスとプリーニウスは山砂に対しては四分の一、川砂および海砂に対しては三分の一になるように石灰を混ぜることを勧めている。・・・もし砕いた焼成れんがを三分の一ほど加えると、大変強靱になる、と誰もが保証している。しかしいずれにしても、再三繰り返して最小の粒までよく混合すべきである。このために石臼の中で打ち、かき廻す人々もいる。・・・」[6]

このようにウィトルーウィウスによるモルタルの構成材料の容積比はアルベルティにより追認されている。したがって、当時使用されていたモルタルの構成材料の容積比は川砂 2、消石灰 1、レンガ 2/3 と推定される。しかし、水の容積比に関する記述はみられない。

3. 強度特性に関する実験

3. 1 モルタルの構成材料とその調査

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：2.90%、粗粒率：2.67）は宮城県阿武隈川流域産、レンガ（粒径 0.6mm 未満(SLBP)、0.6mm 以上 1.2mm 未満(SLB1)、1.2mm 以上 2.5mm 未満(SLB2)、2.5mm 以上 5.0mm 未満(SLB3)、5.0mm 以上 8.0mm(SLB4)、表乾比重：2.67、2.07、2.12、2.18、2.18、吸水率：0.38%、19.03%、16.48%、13.54%、11.22%）は市販品、練り混ぜ水は水道水を使用した。試験体としては消石灰のみのもの（L1）と、消石灰：細骨材比（SL##）、水／消石灰比（SL##）、各レンガ粒径における消石灰：細骨材＋レンガ比（1:1.75：1SL、1:2.00：2SL、1:2.25：3SL）、クラッシャーでレンガを砕いた際の粒度における消石灰：細骨材＋レンガ比（CL）、砂：レンガ比（SCL）の圧縮強度に及ぼす影響をみるためのもの、計 36 種類を作製した。モルタルの調査は表－1 のとおりである。なお、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を用いた。

3. 2 試験体とその養生

試験体の寸法は 4cm×4cm×16cm とし、試験体は作製後、気中養生した。

3. 3 測定項目と実験方法

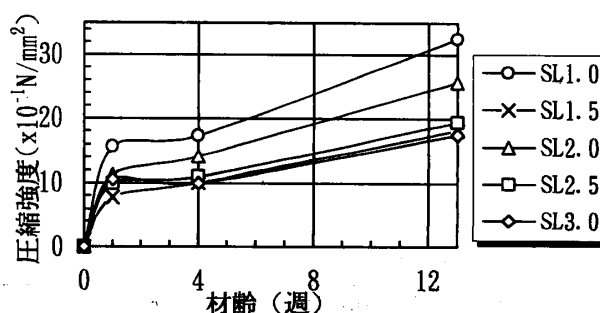
実験では、比重と曲げ強度、圧縮強度の変化を測定した。それぞれの測定項目について 1 週、4 週、13 週の材齢で試験を行った。

試験方法はセメントの試験方法（JIS R 5201）に準ずる。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。レンガ粒の比重および吸水率試験は JIS A 1109 に準ずる。

3. 4 実験結果とその考察

表－2 に各試験体の実験結果を示す。これよりすべての試験体で材齢とともに水分が蒸発して比重が小さくなった後、空気中の二酸化炭素と消石灰が反応し比重が大きくなり、その傾向は各試験体でほぼ同じであることがわかる。

図－1 から図－7 に各試験体の圧縮強度の変化を示す。図－1 より消石灰量の割合が細骨材量に比べて大きくなれば圧縮強度が大きくなることが



図－1 消石灰：細骨材比

表-1 調合表

試験体	消石灰 (g)	砂 (g)	レンガ (g)	水 (cc)	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	4500.0	—	—	2925.0	100	65.0	100.0	1:0.00	1:3.00	—
SL1.0	2485.1	2514.9	—	1033.8	110	41.6	49.7	1:1.00	—	—
SL1.5	1787.2	2712.8	—	1000.0	130	56.0	39.7	1:1.50	—	—
SL2.0	1488.1	3011.9	—	910.0	111	61.2	33.1	1:2.00	—	—
SL2.5	1416.5	3583.5	—	915.0	121	64.6	28.3	1:2.50	—	—
SL3.0	1238.9	3761.1	—	890.0	110	71.8	24.8	1:3.00	—	—
SL58	1653.5	3346.5	—	967.3	105	58.5	33.1	1:2.00	—	—
SL60	1653.5	3346.5	—	992.1	131	60.0	33.1	1:2.00	—	—
SL65	1488.1	3011.9	—	967.3	129	65.0	33.1	1:2.00	—	—
SL70	1488.1	3011.9	—	1041.7	143	70.0	33.1	1:2.00	—	—
SL75	1488.1	3011.9	—	1116.1	162	75.0	33.1	1:2.00	—	—
1SL	1624.0	2876.0	—	1055.6	118	65.0	36.1	1:1.75	—	—
1SLBP	1610.8	2139.5	749.7	1080.0	106	67.0	35.8	1:1.75	1:3.00	<0.6
1SLB1	1673.5	2222.7	603.8	1087.8	125	65.0	37.2	1:1.75	1:3.00	0.6<1.2
1SLB2	1668.1	2215.5	616.4	1084.3	126	65.0	37.1	1:1.75	1:3.00	1.2<2.5
1SLB3	1661.6	2207.0	631.4	1080.0	122	65.0	36.9	1:1.75	1:3.00	2.5<5.0
2SL	1488.1	3011.9	—	967.3	118	65.0	33.1	1:2.00	—	—
2SLBP	1475.5	2239.7	784.8	1003.3	117	68.0	32.8	1:2.00	1:3.00	<0.6
2SLB1	1535.7	2331.1	633.2	998.2	127	65.0	34.1	1:2.00	1:3.00	0.6<1.2
2SLB2	1530.5	2323.2	646.3	994.8	125	65.0	34.0	1:2.00	1:3.00	1.2<2.5
2SLB3	1524.3	2313.8	661.9	990.8	114	65.0	33.9	1:2.00	1:3.00	2.5<5.0
3SL	1373.3	3126.7	—	892.6	118	65.0	30.5	1:2.25	—	—
3SLBP	1361.2	2324.4	814.5	925.6	109	68.0	30.2	1:2.25	1:3.00	<0.6
3SLB1	1418.9	2422.9	658.2	922.3	130	65.0	31.5	1:2.25	1:3.00	0.6<1.2
3SLB2	1413.9	2414.4	671.7	919.0	120	65.0	31.4	1:2.25	1:3.00	1.2<2.5
3SLB3	1407.9	2404.3	687.8	915.1	122	65.0	31.3	1:2.25	1:3.00	2.5<5.0
CL1	1652.1	2194.3	653.7	1073.9	127	65.0	36.7	1:1.75	1:3.00	<5.0
CL2	1515.1	2299.8	685.1	984.8	113	65.0	33.7	1:2.00	1:3.00	<5.0
CL3	1399.1	2389.2	711.7	909.4	113	65.0	31.1	1:2.25	1:3.00	<5.0
CL4	1137.7	2590.5	771.7	809.5	111	71.2	25.3	1:3.00	1:3.00	<5.0
CL5	1011.8	2687.6	800.6	777.7	115	76.9	22.5	1:3.50	1:3.00	<5.0
SCL1	1504.2	2587.7	408.1	977.7	115	65.0	33.4	1:2.00	1:5.67	<5.0
SCL2	1515.1	2299.8	685.1	984.8	117	65.0	33.7	1:2.00	1:3.00	<5.0
SCL3	1524.3	2056.7	919.0	990.8	116	65.0	33.9	1:2.00	1:2.00	<5.0
SCL4	1543.0	1561.5	1395.5	1003.0	116	65.0	34.3	1:2.00	1:1.00	<5.0
SCL5	1554.5	1258.5	1687.0	1010.4	117	65.0	34.5	1:2.00	1:0.67	<5.0

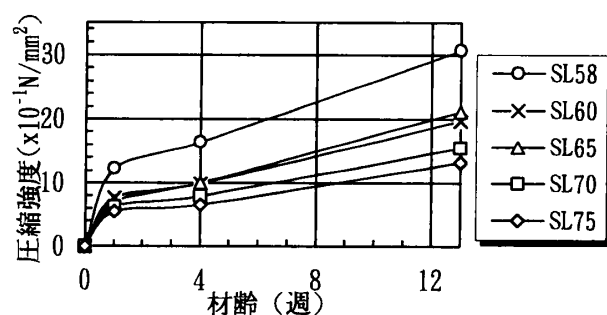


図-2 水/消石灰比

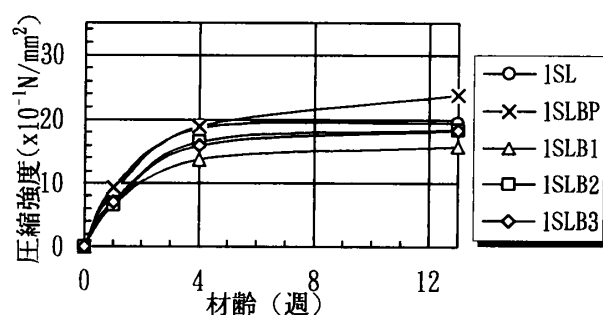


図-3 消石灰: 細骨材+レンガ比 1:1.75

また、図-2より水/消石灰比が小さくなれば圧縮強度が大きくなることわかる。

図-3から図-5に各消石灰と細骨材の容積比 1:1.75(1SL), 1:2.00(2SL), 1:2.25(3SL)における各レンガ粒径の圧縮強度に及ぼ影響を示す。図中×印はSLBP(粒径 0.6mm 未満)に対応している。これより、いずれの容積比の試験体においてもレンガ粒径 0.6mm 未満を入れた試験体(SLBP)は粒径 0.6mm 以上を入れたもの(SLB)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

が試験体内の空隙を埋め密実になっているためである。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[6]。図-6はクラッシャーでレンガを砕いた際の粒度を用いた試験体の実験結果であるが、上記同様、史料で言及されている容積比 1:2.00 で圧縮強度が大きくなっていることがわかる。しかし、図-7より細骨材中の砂とレンガの比率が圧縮強度に及ぼす影響は少ないことがわかった。

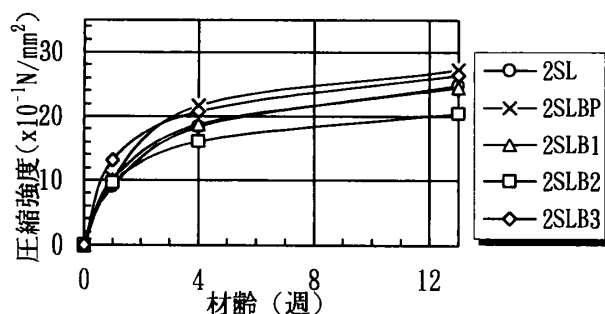


図-4 消石灰：細骨材+レンガ比 1:2.00

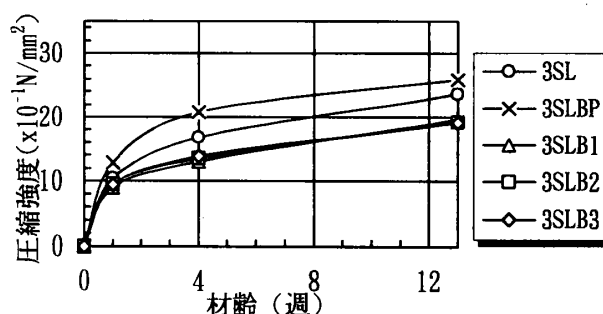


図-5 消石灰：細骨材+レンガ比 1:2.25

表-2 実験結果

試験体	比重			曲げ強度 ($\times 10^{-1}$ N/mm ²)			圧縮強度 ($\times 10^{-1}$ N/mm ²)			レンガ 粒径 (mm)
	1 週	4 週	13 週	1 週	4 週	13 週	1 週	4 週	13 週	
L1	1.35	1.04	1.11			9.17	12.19	17.44	26.36	—
SL1.0	1.72	1.63	1.67		9.09	12.79	15.56	17.30	32.50	—
SL1.5	1.74	1.61	1.65		7.10	10.18	7.78	9.99	18.17	—
SL2.0	1.87	1.75	1.78		8.42	11.54	11.23	14.16	25.71	—
SL2.5	1.89	1.76	1.78		6.90	10.02	9.91	10.95	19.40	—
SL3.0	1.88	1.77	1.79		6.79	9.05	10.59	9.97	17.48	—
SL58	1.94	1.76	1.80		9.17	13.73	12.27	16.38	30.71	—
SL60	1.88	1.73	1.77			10.80	7.66	9.91	19.75	—
SL65	1.86	1.68	1.72		6.90	9.83	7.03	10.02	21.21	—
SL70	1.78	1.64	1.67			8.70	6.29	7.95	15.50	—
SL75	1.66	1.59	1.62			7.96	5.52	6.54	13.22	—
1SL	1.85	1.69	1.72		9.52	9.48	8.57	18.61	19.48	—
1SLBP	1.89	1.66	1.70		10.37	11.97	9.28	18.92	23.81	<0.6
1SLB1	1.81	1.60	1.63		8.74	8.35	6.80	13.73	15.83	0.6<1.2
1SLB2	1.84	1.63	1.66		9.91	10.18	6.61	16.54	18.39	1.2<2.5
1SLB3	1.85	1.63	1.65	6.79	8.89	9.28	7.02	15.97	18.34	2.5<5.0
2SL	1.89	1.72	1.76		8.46	10.10	9.02	18.31	24.78	—
2SLBP	1.86	1.69	1.72		10.14	11.93	10.28	21.66	27.25	<0.6
2SLB1	1.80	1.64	1.68		9.67	11.82	10.13	18.72	24.51	0.6<1.2
2SLB2	1.79	1.67	1.70		8.85	10.65	9.65	16.05	20.52	1.2<2.5
2SLB3	1.78	1.70	1.75		10.57	11.74	13.18	20.82	26.46	2.5<5.0
3SL	1.87	1.75	1.78		8.39	10.35	10.43	16.72	23.66	—
3SLBP	1.85	1.72	1.76		9.09	12.36	12.83	20.82	25.92	<0.6
3SLB1	1.76	1.67	1.70		7.90	10.43	9.01	13.05	19.66	0.6<1.2
3SLB2	1.76	1.68	1.71		7.78	9.57	9.48	13.49	19.18	1.2<2.5
3SLB3	1.72	1.69	1.72		8.09	8.72	9.46	13.81	19.07	2.5<5.0
CL1	1.74	1.64	1.67		8.89	10.88	9.89	17.05	22.78	<5.0
CL2	1.79	1.68	1.72		8.78	11.88	12.24	19.63	23.56	<5.0
CL3	1.79	1.72	1.75		9.56	12.21	12.74	20.59	25.34	<5.0
CL4	1.80	1.74	1.77		8.23	10.04	11.92	16.79	20.83	<5.0
CL5	1.79	1.77	1.79		7.25	9.26	9.27	14.42	17.63	<5.0
SCL1	1.82	1.68	1.71		7.49	10.84	10.23	17.21	23.08	<5.0
SCL2	1.80	1.66	1.70		8.58	11.64	10.19	16.85	24.35	<5.0
SCL3	1.77	1.64	1.68		8.93	11.90	10.83	18.02	24.29	<5.0
SCL4	1.74	1.62	1.65		8.62	11.43	11.38	18.81	23.45	<5.0
SCL5	1.68	1.59	1.62		8.50	11.39	11.61	18.30	22.66	<5.0

表-2より曲げ強度は圧縮強度のほぼ1/2程度であることがわかる。

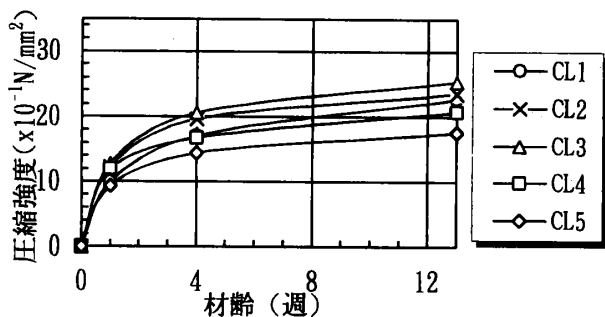


図-6 消石灰：細骨材＋レンガ（クラッシャー）比

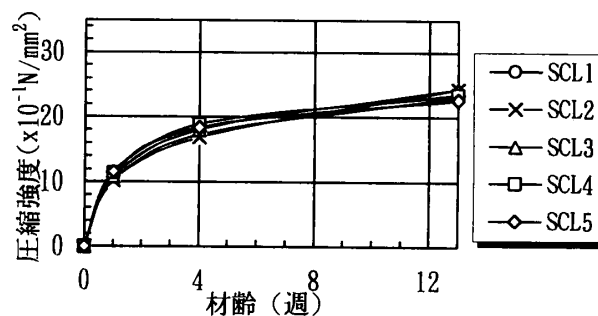


図-7 細骨材：レンガ比

4. 引張強度、動弾性係数に関する実験

4. 1 モルタルの構成材料とその調査

試験体としては、消石灰のみのもの（L1）と前節3. 強度特性に関する実験結果より、圧縮強度の高いシリーズ 2SL, クラッシャーでレンガを砕いた際の粒度を用いたもの（CL2, CL3）の計9種類を作成した。モルタルの調合は表-3のとおりである。

4. 2 試験体とその養生

試験体の寸法は4cm×4cm×8cmとし、試験体は作製後、気中養生した。

4. 3 測定項目と実験方法

実験では、比重と圧縮強度、引張強度、動弾性係数の変化を測定した。それぞれの測定項目について1日、3日、7日、28日、（91日）の材齢で試験を行った。圧縮強度試験はJIS A 1108に、引張強度試験は立方体割裂試験方法に、動弾性係数試験はJIS A 1127に準ずる。

表-3 調合表

試験体	消石灰 (g)	砂 (g)	レンガ (g)	水 (cc)	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	4500.0	—	—	2475	148	55.0	100.0	1.0.00	1.3.00	—
2SL	1488.1	3011.9	—	967	118	65.0	33.1	1.2.00	1.3.00	—
2SLBP	1475.5	2239.7	784.8	1003	114	68.0	32.8	1.2.00	1.3.00	<0.6
2SLB1	1535.7	2331.1	633.2	998	131	65.0	34.1	1.2.00	1.3.00	0.6<1.2
2SLB2	1530.5	2323.2	646.3	995	127	65.0	34.0	1.2.00	1.3.00	1.2<2.5
2SLB3	1524.3	2313.8	661.9	991	134	65.0	33.9	1.2.00	1.3.00	2.5<5.0
2SLB4	1524.3	2313.8	661.9	991	132	65.0	33.9	1.2.00	1.3.00	5.0<8.0
CL2	1515.1	2299.8	685.1	985	130	65.0	33.7	1.2.00	1.3.00	<8.0
CL3	1399.1	2389.2	711.7	909	115	65.0	31.1	1.2.25	1.3.00	<8.0

表-4 実験結果

試験体	比重				圧縮強度 (x10 ¹ N/mm ²)				引張強度 (x10 ¹ N/mm ²)				動弾性係数 (x10 ³ N/mm ²)				レンガ 粒径 (mm)
	1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日	1日	3日	7日	28日	
L1	1.58	1.35	1.24	1.16	6.01	7.42	6.68	20.2	0.93	0.98	0.76	2.08	1.16	1.28	1.59	2.08	—
2SL	1.96	1.80	1.70	1.66	4.88	4.95	5.31	16.2	0.61	0.52	0.71	1.12	1.63	1.67	2.26	2.89	—
2SLBP	1.91	1.77	1.63	1.61	4.14	4.56	5.88	9.13	0.57	0.48	0.53	1.51	1.53	1.40	1.94	2.48	<0.6
2SLB1	1.94	1.73	1.64	1.62	3.04	4.60	5.23	12.1	0.50	0.61	0.54	1.44	1.38	2.03	2.46	3.11	0.6<1.2
2SLB2	1.96	1.79	1.68	1.65	3.42	6.74	6.45	13.8	0.57	0.87	0.49	2.00	1.48	2.38	2.81	4.01	1.2<2.5
2SLB3	1.96	1.80	1.67	1.64	3.28	6.01	5.68	21.1	0.56	0.87	0.61	1.91	1.45	2.14	3.07	4.18	2.5<5.0
2SLB4	1.94	1.77	1.66	1.67	3.21	6.26	7.33	16.5	0.58	0.60	0.86	1.50	1.38	2.48	3.23	4.21	5.0<8.0
CL2	1.94	1.76	1.66	1.64	3.45	5.09	5.04	11.7	0.60	0.60	0.60	1.38	1.66	1.95	2.51	3.39	<8.0
CL3	1.96	1.86	1.69	1.68	4.05	5.10	5.35	14.7	0.61	0.53	0.55	1.34	1.91	1.89	1.99	2.58	<8.0

4. 4 実験結果とその考察

表-4に各試験体の実験結果を示す。これよりすべての試験体で材齢とともに比重が小さくなり、その傾向は各試験体でほぼ同じであることがわかる。

図-8, 図-9にそれぞれ圧縮, 引張試験結果を示す。強度は材齢1日, 3日で一旦大きくなり7日で小さくなるが, その後は徐々に強度が大きくなることからわかる。試験体が十分に硬化していないことに帰因するのか, あるいは消石灰モルタルの特性なのか現段階では不明である。図中, レンガ粒径0.6mm未滴を入れた試験体(2SLBP)の圧縮, 引張強度が小さいが, これは打ち込み不良の影響である。また, 引張強度は圧縮強度のほぼ1/10程度であることがわかる。

図-10に動弾性試験結果を示す。これより材齢28日における消石灰モルタルの動弾性係数は $2.0 \sim 4.2 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ で, コンクリートのヤング係数の約10分の1から5分の1であることがわかる。この動弾性係数は, 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[3]。

今後はレンガとモルタルの組積造としての特性(圧縮, 引張, せん断, 付着強度)をあきらかにする予定である。

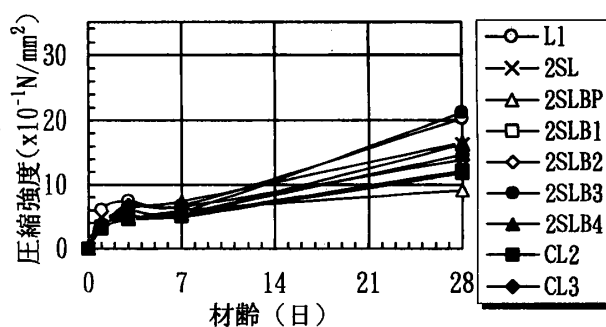


図-8 圧縮強度試験結果

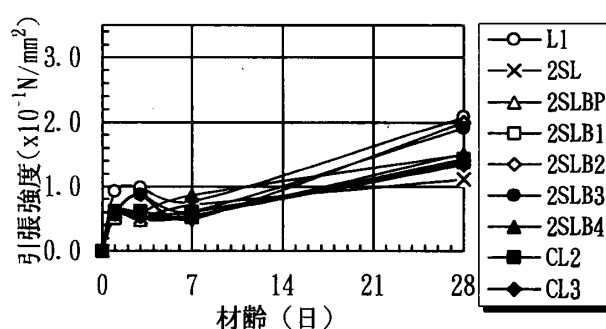


図-9 引張強度試験結果

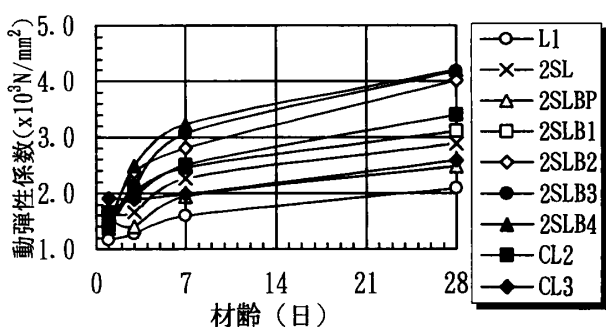


図-10 動弾性係数試験結果

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御助言をいただいた。心から感謝致します。東北電力㈱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高専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)と旭硝子財団研究助成(研究代表者: 青木孝義), および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] Cakmak, R. Davidson, C. L. Mullen, M. Erdik : Dynamic Analysis and Earthquake Response of Hagia Sophia, Proc. of STREMA Symp., pp.881-898, 1993
- [2] Aoki, S. Kato, K. Ishikawa : Structural Characteristics of the Dome of Hagia Sophia from Measurement of Micro Tremor, Proc. of STREMA Symp., pp.915-922, 1993
- [3] 青木孝義, 加藤史郎, 石川浩一郎, ミフト・ヨルマス, フェリト・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, pp.87-98, 1994
- [4] 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性状について(その1 基礎実験), 日本建築学会大会梗概集, 平7.8(1995), F-2, pp.431-432
- [5] 森田慶一訳註: ウィトルーウィウス建築書, 東海大学出版会, 1980, p.83 (第二書第5章石灰について1.)
- [6] 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)