

論文 屋外暴露をした歴史的な組積造建造物の消石灰モルタルの色彩値と力学特性

青木孝義*¹・伊藤憲雄*²・宮村篤典*³・角舎輝典*⁴

要旨: 本研究は、歴史的な組積造建造物に使用されているモルタルの色彩による劣化診断法の可能性を検討することを最終目的に、屋外暴露養生、室内養生条件下において、使用されている消石灰モルタルの調合を表面の色彩の変化として捉え、それが力学特性とどのような関連性を示しているかをあきらかにすることにより、モルタル表面の色彩からモルタルの調合推定、およびその力学特性推定の可能性を検討している。養生方法の違いが、モルタル表面の色彩と調合及び重要な力学特性である動弾性係数との関係に与える影響をあきらかにしている。

キーワード: 組積造, 消石灰, モルタル, 調合, 色彩, 力学特性, 屋外暴露養生

1. はじめに

歴史的な組積造建造物に使用されているモルタルの色彩による劣化診断法の可能性を検討することを最終目的に行った前編までの研究では、室内実験によりモルタル表面の色彩、水分量と、調合、材齢、密度、および力学特性である動弾性係数、圧縮強度の関係をあきらかにした¹⁾。本研究では、屋外暴露養生、室内養生におけるモルタル表面の色彩から、実際のサンプルを採取して実験を行うことが厳しく禁止されているという問題を抱えている歴史的建造物のモルタルの調合推定、およびその力学特性推定の可能性を検討する。ここで、屋外暴露養生は歴史的な組積造建造物を取り巻く外部環境を、室内養生はその内部環境を再現していると考えられる。

2. 水分量測定および測色の概要

2.1 水分量測定

モルタルの水分量の測定には、高周波容量式水分計（コンクリート・モルタル水分計, K社製, 自動温度補正装置付, 水分量を高周波容量の変化として評価）を用いた。

2.2 測色

モルタルの測色には、分光測色計（M社製）を用いて実施した。測色条件は、d/8（拡散照明・8°方向受光）、正反射光成分除去（SCE）でJIS Z 8722の条件Cに準拠し、測色波長範囲は400~700nm、測色波長間隔は10nm、半値幅は約15nm、反射率測色範囲は0~175%、分解能0.01%、光源D₆₅、分光角度2°視野1回瞬時発光とし、測定項目は分光分布、色彩値（ $L^*a^*b^*$ 値）である²⁾。 L^* は明度、 a^* 、 b^* は色の方向を示しており、 $+a^*$ は赤、 $-a^*$ は緑、 $+b^*$ は黄、 $-b^*$ は青方向をそれぞれ示し、絶対値が大きくなるに従って色あざやかになり、小さくなるに従ってくすんだ色になる。

3. 実験の概要

3.1 モルタルの構成材料

消石灰（L, 気乾密度 2.34）は岐阜県大垣産の市販品、細骨材（S, 山砂, 粗粒率 2.79, 吸水率 1.29%, 表乾密度 2.55, 絶乾密度 2.52）は愛知県豊田産、レンガ破砕粒（以下、レンガという）は市販品、練混ぜ水は水道水を使用した。

*1 名古屋市立大学助教授 芸術工学部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 名古屋市立大学教授 芸術工学部生活環境デザイン学科 工博

*4 岐阜工業高等専門学校助教授 建築学科 工博

JASS5³⁾に規定された普通コンクリート用骨材の標準粒度範囲で、粒度曲線の下限と同値としたレンガをC(粗粒率 3.43, 吸水率 9.88%, 表乾密度 2.35, 絶乾密度 2.12), 粒度曲線の上限と同値としたレンガをF(粗粒率 2.00, 吸水率 4.91%, 表乾密度 2.51, 絶乾密度 2.39), また粒度曲線の上限を平行移動して粒径 0.6mm 未満としたレンガをP(粗粒率 0.85, 吸水率 0.38%, 気乾密度 2.63)とした。

図-1(a)にモルタルの構成材料の色度図(色相と彩度)を、図-1(b)に色調図(明度と彩度)を示す。消石灰, 細骨材, レンガの順に明度は小さくなり, 細骨材は黄, レンガは黄赤で粒径が小さくなるに従って彩度が大きくなることわかる。また, 水分量が多くなるに従って明度が小さくなり, 中間的な水分量で色あざやかになることわかる。

3.2 モルタルの調合

資料から推定された消石灰と細骨材の容積比 1.0:2.0 を中心とする調合計画を作成した。すなわち, 試験体としては,

- 1) 消石灰のみのもの(L),
- 2) 消石灰と細骨材, JASS5³⁾に規定された普通コンクリート用骨材の標準粒度範囲で粒度曲線の下限と同値としたレンガC(粗粒率 3.43)の容積比を変化させたもの(C),
- 3) 上記2)でレンガを粒度曲線の上限と同値と

したレンガF(粗粒率 2.00)とし, その容積比を変化させたもの(F),

- 4) 上記3)でレンガを粒度曲線の上限を平行移動して粒径 0.6mm 未満としたレンガP(粗粒率 0.85)とし, その容積比を変化させたもの(P)

の質量と密度, 水分量, 色彩, 動弾性係数に及ぼす影響をみるためのもの, 計 10 種類を作製した(表-1)。実験には細骨材とレンガ粒径 0.6mm 以上は絶乾状態, 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。

3.3 試験体とその養生

消石灰モルタルの試験体寸法は 4cm×4cm×16cm で, セメントの物理試験方法 JIS R 5201

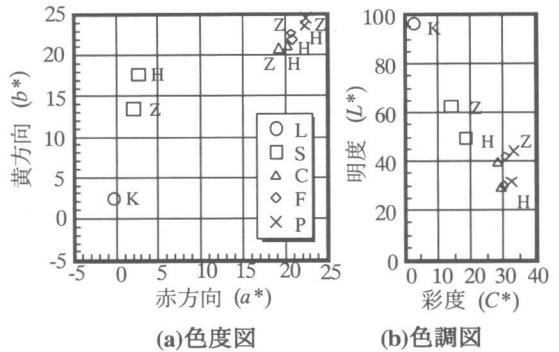


図-1 構成材料の色度図と色調図

L は消石灰, S は細骨材, C, F, P はそれぞれ粗粒率 3.43, 2.00, 0.85 のレンガを, H は表乾, K は気乾, Z は絶乾状態をそれぞれ示す。

表-1 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 細骨材: レンガ	レンガ 粒径 (mm)	レンガ 粗粒率
L1	845.4	0.0	0.0	634.0	154	75.0	100.0	1:0.00	1:0.00	-	0.00
C1	618.9	506.4	141.7	464.2	135	75.0	48.8	1:1.00	1:3.00	<10	3.43
C2	465.4	761.6	213.1	395.6	145	85.0	32.3	1:2.00	1:3.00	<10	3.43
C3	380.0	932.7	261.0	342.0	138	90.0	24.1	1:3.00	1:3.00	<10	3.43
F1	618.9	506.4	160.1	464.2	143	75.0	48.2	1:1.00	1:3.00	<2.5	2.00
F2	465.4	761.6	240.8	395.6	155	85.0	31.7	1:2.00	1:3.00	<2.5	2.00
F3	380.0	932.7	294.9	342.0	133	90.0	23.6	1:3.00	1:3.00	<2.5	2.00
P1	618.9	506.4	176.4	464.2	158	75.0	47.5	1:1.00	1:3.00	<0.6	0.85
P2	465.4	761.6	265.2	395.6	155	85.0	31.2	1:2.00	1:3.00	<0.6	0.85
P3	380.0	932.7	324.8	342.0	135	90.0	23.2	1:3.00	1:3.00	<0.6	0.85

L は消石灰のみ, C は JASS5³⁾に規定された普通コンクリート用骨材の標準粒度範囲で下限値のレンガ, F は上限値, P は上限値を平行移動し粒径 0.6mm 未満としたレンガを用いた試験体をそれぞれ示す。

に従って作製し、3日で脱型した後、それぞれ屋外暴露養生と室内養生とした。なお、試験体数は各試験項目に対して3本とした。

3. 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モルタルの質量と密度、水分量と色彩、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、材齢2年まで毎月試験を行った。

モルタルの水分量測定点は各試験体側面、測色測定点数は各試験体側面8点、打設面8点の計16点である。

動弾性係数試験はJIS A 1127に従って実施した。消石灰の比重試験はJIS R 5201に定める密度試験に準じて実施した。ただし、消石灰は気硬性で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に従って実施した。

4. 実験結果とその考察

4. 1 質量、密度、水分量と力学特性

図-2と図-3に密度と材齢の関係を示す。これより、室内養生においてはすべての試験体

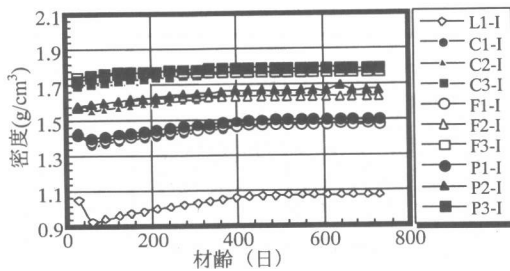


図-2 密度の変化 (室内養生)

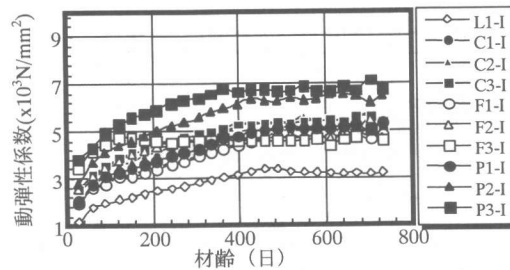


図-4 動弾性係数の変化 (室内養生)

で材齢とともに水分が蒸発して密度が小さくなった後、空気中の二酸化炭素と消石灰が反応して密度が大きくなり、その傾向は各試験体でほぼ同じであることがわかる。また、消石灰の割合が大きい程、材齢とともに水分量の小さくなる割合が大きいことがわかる。

図-4と図-5に動弾性係数と材齢の関係を示す。これより、すべての試験体で材齢とともに動弾性係数が大きくなり、その傾向は各試験体でほぼ同じであることがわかる。また、消石灰のみの試験体を除き、動弾性係数は屋外暴露養生の方が室内養生より高くなることわかる。

図-6から図-9に動弾性係数と消石灰と細骨材の容積比、粗粒率の関係を示す。凡例中、-の後の数字は材齢(日)を示す。これより、いずれの容積比の試験体においてもレンガの粗粒率が小さい試験体(P)はその他の試験体より動弾性係数が大きくなっているが、これは微細分のレンガが骨材粒子間の間隙を埋め密実になっているためである。また、いずれの試験体でも消石灰に対する細骨材とレンガの混入量が多くなればなる程(C3, F3, P3)、動弾性係数が大きくなることわかる。

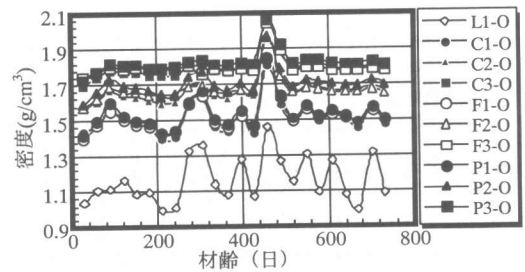


図-3 密度の変化 (屋外暴露養生)

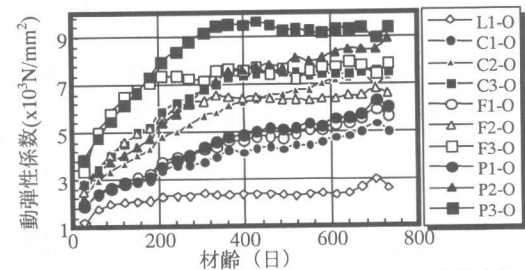


図-5 動弾性係数の変化 (屋外暴露養生)

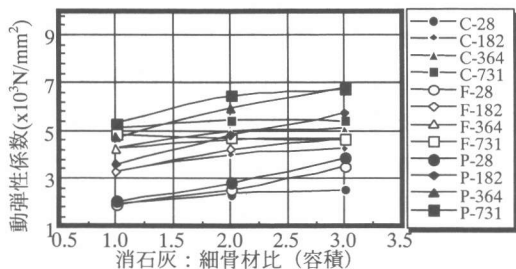


図-6 動弾性係数と容積比の関係 (室内)

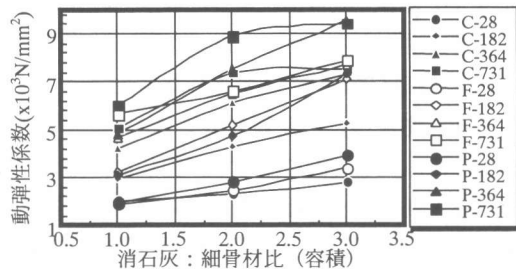


図-7 動弾性係数と容積比の関係 (屋外)

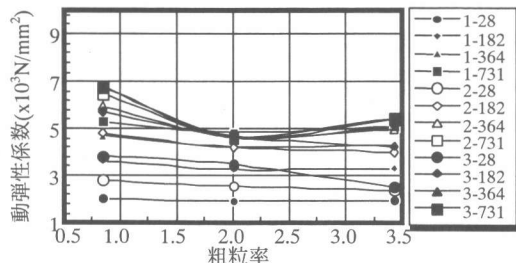


図-8 動弾性係数と粗粒率の関係 (室内)

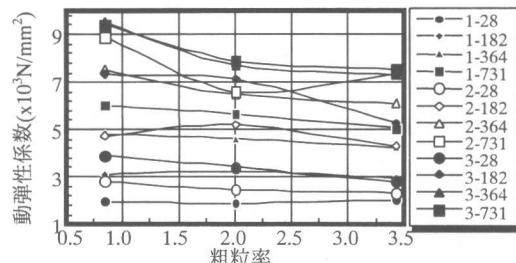


図-9 動弾性係数と粗粒率の関係 (屋外)

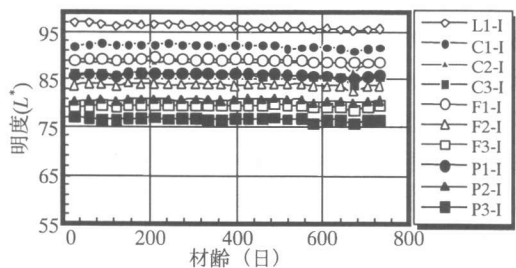


図-10 明度の変化 (室内養生: 側面)

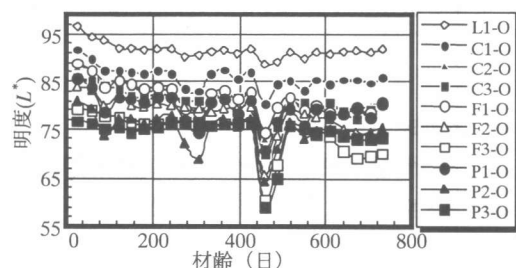


図-11 明度の変化 (屋外暴露養生: 側面)

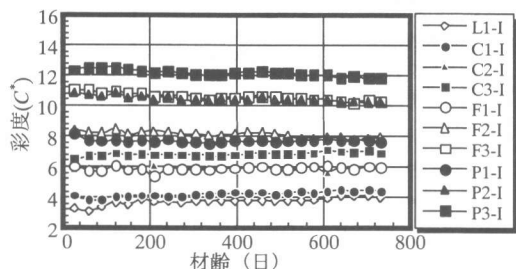


図-12 彩度の変化 (室内養生: 側面)

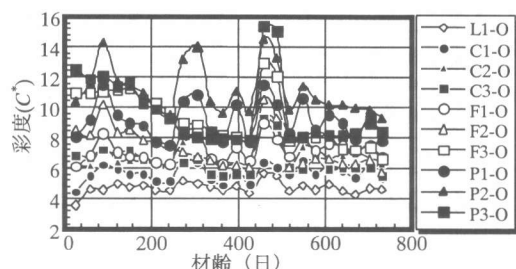


図-13 彩度の変化 (屋外暴露養生: 側面)

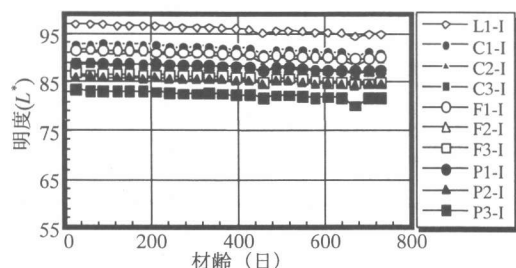


図-14 明度の変化 (室内養生: 上面)

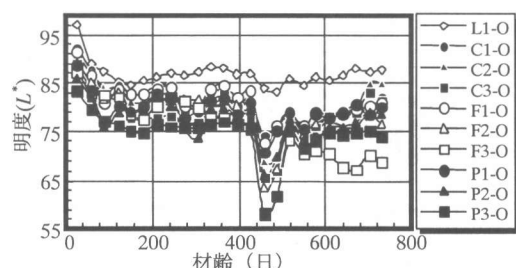


図-15 明度の変化 (屋外暴露養生: 上面)

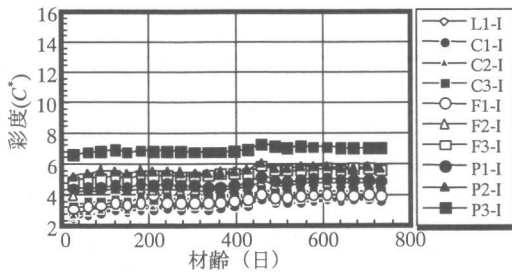


図-16 彩度の変化 (室内養生: 上面)

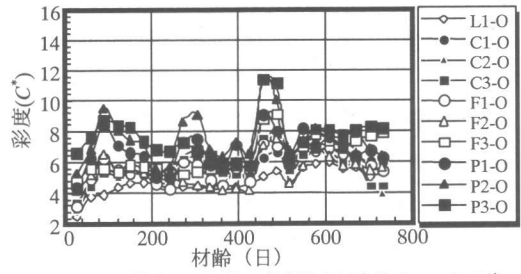


図-17 彩度の変化 (屋外暴露養生: 上面)

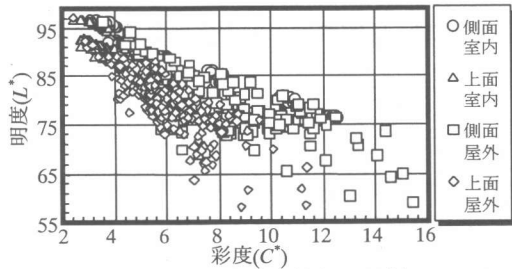


図-18 明度と彩度の関係

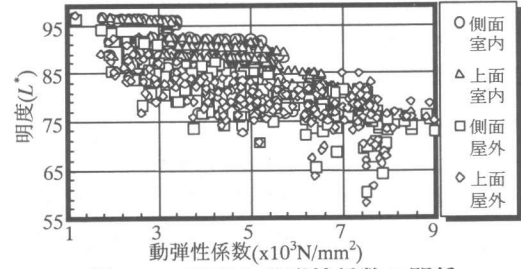


図-19 明度と動弾性係数の関係

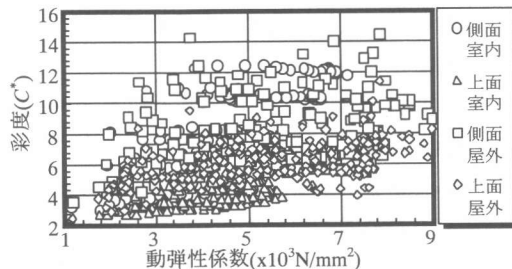


図-20 彩度と動弾性係数の関係

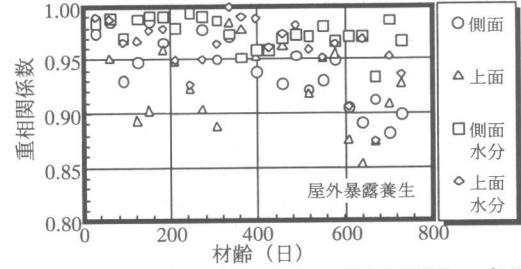


図-21 動弾性係数に関する重相関係数の変化

4. 2 色彩と調合, 動弾性係数

図-10 から図-17 に明度, 彩度と材齢の関係をそれぞれ示す。これより, いずれの試験体においても材齢にともない彩度 C^* の数値が大きくなること, すなわち黄赤が色あざやかになり, 明度 L^* の値が小さくなることがわかる。また, いずれの容積比の試験体においてもレンガの粗粒率が小さい試験体 (P) はその他の試験体より, また消石灰に対する細骨材とレンガの混入量が多くなればなる程 (C3, F3, P3), 色あざやかになり明度が小さくなることがわかる。図-18 に明度と彩度の関係を示した。

表-2 に側面の色彩値 ($L^*a^*b^*$ 表色系) と消石灰モルタルの構成材料の関係を示す。これより, 同一種類の材料を用いた材齢 28 日から 2

年における本実験条件の範囲では, 明度 L^* の値が大きくなればなる程, 消石灰の量が多くなり細骨材とレンガの量が少なく評価されることがわかる。逆に赤 a^* と黄 b^* の値が大きくなれ

表-2 色彩値 ($L^*a^*b^*$ 表色系) と調合の関係

偏相関係数	L^*	a^*	b^*	C^*	重相関係数
消石灰	0.835 (0.714)	-0.717 (-0.580)	-0.805 (-0.415)	-0.736 (-0.472)	0.968 (0.803)
細骨材	-0.828 (-0.722)	0.720 (0.597)	0.786 (0.430)	0.722 (0.483)	0.970 (0.838)
レンガ	-0.929 (-0.796)	0.857 (0.732)	0.888 (0.513)	0.852 (0.606)	0.982 (0.892)
粗粒率	0.130 (0.027)	-0.270 (-0.265)	-0.194 (-0.150)	-0.296 (-0.282)	0.926 (0.782)
重相関係数	0.994 (0.838)	0.997 (0.911)	0.984 (0.642)	0.993 (0.786)	室内 (屋外)

ばなる程、消石灰の量が少なくなり細骨材とレンガの量が多くなることわかる。重相関係数は室内養生 0.92, 屋外暴露養生 0.78 以上で、モルタルの構成材料とその量に及ぼす色彩値の相関関係は非常に強く、色彩値を測定することによって構成材料とその量を予測することが可能であることを示唆している。同様にモルタルの色彩値に及ぼす調合の相関関係も非常に強いことがわかる。なお、ここでは表面の凹凸の影響が少ない側面の場合のみを示したが、実際の組積造建造物の表面状態に近いと考えられる打設面についても同様の傾向が確認できた。

4. 3 調合と動弾性係数の推定式

屋外暴露をした同一種類の材料を用いた材齢 28 日から 2 年の本実験条件の範囲における消石灰モルタルの調合と動弾性係数の推定式を重回帰分析により求めた結果、次式が得られた。

$$L = 16.9L^* - 173a^* - 202b^* + 290C^* - 928 \quad (1)$$

$$S = -28.7L^* + 385a^* + 475b^* - 653C^* + 3612 \quad (2)$$

$$B = -8.59L^* + 111a^* + 97.9b^* - 157C^* + 1102 \quad (3)$$

$$F = -0.0265L^* + 1.53a^* + 3.46b^* - 3.77C^* + 4.78 \quad (4)$$

$$E_D = -0.404L^* - 0.108a^* - 1.04b^* + 0.240C^* + 43.2 \quad (5)$$

ここで、 $L^* a^* b^* C^*$: 色彩値 ($L^* a^* b^*$ 表色系), L : 消石灰量 (g), S : 細骨材量 (g), B : レンガ量 (g), F : 粗粒率, E_D : 動弾性係数 ($\times 10^3 N/mm^2$) である。消石灰モルタルの側面の色彩値がわかれば、式(1)~(5)よりその構成材料の調合と動弾性係数を推定することができる。なお、推定式(1)~(5)の寄与率はそれぞれ 64.5%, 70.2%, 79.5%, 61.2%, 75.3%である。ここでは側面の場合のみを示したが、打設面についても同様の傾向が確認できた。また、屋外暴露養生より室内養生をした試験体の方が推定式の寄与率は大きくなる。図-19 と図-20 に明度、彩度と動弾性係数の関係を、図-21 に目的変量に動弾性係数、説明変量に色彩値を用いた場合の屋外暴露養生における重相関係数の変化を示した。消石灰モルタルの動弾性係数が推定できれば、図-22 に示したように動弾性係数と圧縮強度の間に一次の関係があること

から、その推定が可能となる⁴⁾。

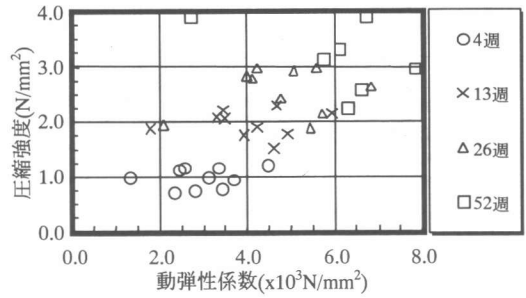


図-22 圧縮強度と動弾性係数の関係

5. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 動弾性係数は屋外暴露養生の方が室内養生より高くなることわかった。
- 2) レンガの粗粒率が小さい程、また消石灰に対する細骨材とレンガの混入量が多くなればなる程、質量、密度、動弾性係数が大きくなることわかった。
- 3) 材齢28日から2年における消石灰モルタルの色彩に及ぼす調合の影響をあきらかにし、屋外暴露養生と室内養生におけるモルタル表面の色彩値を測定することで、調合と重要な力学特性である動弾性係数を推定できる可能性を示した。

謝辞

本実験の実施にあたり、名古屋市立大学嘱託員の植木稔氏、大場弘也氏、鬼頭和明氏、澤田喜八郎氏の助力を得た。本研究は、平成12年度名古屋市立大学特別研究奨励費により進められた研究成果の一部である。なお、実験には名古屋市立大学芸術工学部構造実験室を用いた。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 青木孝義, 伊藤憲雄, 宮村篤典, 角舎輝典: 歴史的な組積造建造物の消石灰モルタルの力学特性と色彩, 構造工学論文集, Vol.46B, pp.253-259, 2000.3
- 2) 日本色彩学会: 色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 1994.12
- 3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・解説J ASS5鉄筋コンクリート工事, 日本建築学会, 1993.5
- 4) 青木孝義, 伊藤憲雄, 角舎輝典, 宮村篤典: 歴史的な組積造建造物のモルタルの力学特性に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第10巻1号, pp.41-50, 1999.1