中塗土の練り混ぜ過程における 水の調合量が圧縮性能に及ぼす 影響

INFLUENCE OF MIXING WATER VOLUME ON COMPRESSIVE PERFORMANCE OF MUD DRYWALL

馬場 祐 ——— * 1 田淵敦士 ——— * 2

キーワード：

左官, 壁土, 調合, 力学的性能, 圧縮試験

Keywords:

Plasterer, Drywall mud, Compounding, Mechanical property, Compression test

Yu BABA ——— * 1 Atsushi TABUCHI ——— * 2

The mixing proportion of drywall mud tends to be decided by the experience of craftsmen in practice, and it results in the wide property variation. In this study, an experiment was carried out to clarify the influence of the water-mud ratio (W/Md) on the mechanical performance. As a result, the relationship between W/Md and the strength / rigidity showed the strong influence of the W/Md can be only observed when the proportion of sand is small. The equations were proposed to estimate the strength and the elasticity of mud drywall based on these relationships found in the result.

1. 背景

土壁は古くから伝わる日本の伝統的な塗り壁であるが、湿式工法であるがゆえの施工期間の長さ、現場管理の難しさ、あるいは生産性の低さなどによりその施工量は減少している。一方で地球環境や室内環境の向上などの環境的有用性が指摘されており¹⁾、土壁の普及に繋がるのではないかと期待されている。

壁土の調合は建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事（以下、JASS）および国土交通省告示第 1100 号で言及されているものの、詳細は技術ある左官職人の感覚に委ねられていることが多く、性能のバラツキが大きくなる。しかし、この感覚は職人の長年の経験が伝承されたものであり、また現在に至るまで土壁が使われてきたことなどから一定の性能を満たしているのではないかと考える。

このような背景のなか、壁土調合の標準化を目的とし、たとえば、岩崎ら²⁾は各地域の壁土と福島産の壁土の調合特性を比較することで分類を行っている。山崎ら³⁾は左官職人が調合した壁土に対して、すさや砂の量を変化させた場合の壁土の強度を比較することで調合比と強度との関係を明らかにしている。また宇都宮ら⁴⁾はすさの量を変化させた場合の圧縮強度の違いを明らかにし、「粒度分布」「密度」「液性・塑性限界」の壁土の物理的特性との関係を考察している。また、平野ら⁵⁾は壁土の含水率と練り置き期間が、力学的性質に及ぼす影響を調べている。その他、荘所ら⁶⁾は粗粒分含有率・含水比・スサ含有率が壁土の圧縮強度に及ぼす影響について調べている。以上のように壁土の性質に関する研究は進められているが壁土の練り混ぜ水が力学的性質に与える影響に着目しているものはほとんどない。そこで本研究では、中塗土の練り混ぜ水の割合が力学的性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

まず、壁土を調合する際の中塗土の原土の基礎的性質を明確にするための試験として液性限界・塑性限界試験を行った。次に中塗土の原土、砂、すさ、および水のすべてを調合したものの乾燥後の性質と

して圧縮試験を調合比ごとに行いそれぞれの力学的性能を評価した。

2. 液性限界・塑性限界試験

京都産中塗土（中内建材店）を使用した。これを以下原土と呼ぶ。原土の含水比の変化による状態の変化や変形に対する抵抗の大小（コンシステンシー）を調べるために液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205:2009）を行った。

図 1 に液性限界試験の結果で得られた流動曲線を示す。これより液性限界 w_L (%) を求めると、28%であった。

また 3 回の塑性限界試験で求めた各含水比の平均値である塑性限界 w_p (%) を求めると、21.5%であった。

今回の試験値がどのような意味をもつかを検討するために既往研究の結果と比較した。図 2 は液性限界における奥石ら⁷⁾、田中ら⁸⁾と今回行った試験結果との比較であり、同様に図 3 は塑性限界のそれを示す。図中の横軸、京 H 荒から京 N 荒（2）までが奥石らによる試験結果、関東産から外国産までが田中らによる試験結果である。既往の研究から抜き出したデータに関して、液性限界の変動係数は 21.3%、塑性限界の変動係数は 15.0%であった。これより液性限界は塑性限界と比較して地域による差が大きいことが分かる。また、既往研究における液性限界の中央値は 41.3%であり、今回実験を行った原土の液性限界は他のものと比べて比較的小さな値をとっているといえる。液性限界が小さいということはある一定のコンシステンシーを得るのに必要な水量が少ないことを意味する。

また文献 8) の流動曲線の傾きより、九州産は傾きが最も大きく、コンシステンシーの変化に対する水量の感度が鈍いことが分かる。一方、関西産の傾きは小さいことから、九州産よりもコンシステンシーの変化に対する水量の感度が鋭いことが分かる。これらを用いた今回の実験結果と比較すると、九州産よりも傾きは小さいが、関西産よりは大きいこと、また中部産、外国産、および関東産より液性

^{*1} 首都大学東京大学院都市環境科学研究科建築学域 博士前期課程
(〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

^{*2} 京都府立大学大学院生命環境科学研究科環境科学専攻 准教授・博士（農学）

^{*1} Graduate Student of Architecture and Building Eng., Tokyo Metropolitan Univ.

^{*2} Assoc. Prof., Dept. of Life and Environmental Science Eng., Kyoto Prefectural Univ., Dr. Agr.

(ℓ)のものに対し水土比 (W/Md) が 35%、40%、および 45%の 3 種類、B の調合比は砂 105 (ℓ) のものに対し水土比 (W/Md) が 35%、40%、45%および 50%の 4 種類、C の調合比は砂 150 (ℓ) のものに対し水土比 (W/Md) が 45%、50%、55%、60%および 65%の 5 種類とし、全部で 12 種類とした。なおここでは実際の施工性は考慮していない。

3.1 使用材料

3.2 調合

A、B および C の調合比はすさの量を一定として、原土に対する砂の量、水土比 (W/Md) を変化させたものである。A の調合比は砂 60

調査名	原土(ℓ)	砂(ℓ)	すざ(kg)	水土比(W/Md)(%)
A-1	100	60	0.7	35
A-2	100	60	0.7	40
A-3	100	60	0.7	45
B-1	100	105	0.7	35
B-2	100	105	0.7	40
B-3	100	105	0.7	45
B-4	100	105	0.7	50
C-1	100	150	0.7	45
C-2	100	150	0.7	50
C-3	100	150	0.7	55
C-4	100	150	0.7	60
C-5	100	150	0.7	65

圧縮試験用供試体は 150mm×150mm×70mm とし、各調合比につき 4 体ずつ、計 48 体を以下の手順で作製した。(1) 体積を計量し、均等になるまでよく練り混ぜ、内法 400mm×400mm×70mm の型枠に詰めた。(2) 設定温度 30℃の実験室内で、養生し表面が乾燥したら脱型した。(3) 脱型後、重量一定になるまで十分乾燥させ、所定の寸法に切り出し寸法と重量を測定した。なお今回は練り混ぜ水量の圧縮性能への影響に着目するため、練り置き期間は設けていない。

載荷には万能試験機（島津製作所製 UH-500kNI）を使用した。圧縮試験概要図を図4に示す。まず試験機載荷台の上に供試体を置き、さらにその上に厚さ 15mm の鉄板(SS400)を置いて、この鉄板を介して荷重を加えた。なお、荷重と変位は、それぞれ試験機載荷重台の反力およびクロスヘッドの変位とした。

3.5 実験結果

図 5~7 に A、B、および C の各調合比における圧縮応力-変位関係のグラフを示す。ここで圧縮応力は、測定した荷重を実測値により算出した断面積で除したもので、変位は載荷装置のクロスヘッド変位である。また、それぞれのグラフは各供試体の平均応力を示している。圧縮試験の最大応力の平均で最大となったのは A-1 で 1.10N/mm^2 、最小となったのは C-3 で 0.35N/mm^2 であった。いずれの調合比においても概ね、最大荷重に到達する直前に供試体側面に亀裂が生じ、その亀裂が徐々に大きくなることによって供試体が垂直に剥がれ落ち、破壊へと繋がった。また図 8~10 に A-3-C3 における供試体左側面、正面および背面の載荷後の様子を示す。

図7 Cの圧縮応力-変位曲線

図8 A-3-C3 左側面(載荷後)

図9 A-3-C3 正面(載荷後)

図10 A-3-C3 背面(載荷後)

図11 圧縮応力の平均値と基準強度特性値

図12 圧縮弾性係数の平均値と基準弾性特性値

4. 考察

4.1 強度と剛性の評価法

各圧縮試験の強度は強度分布の信頼水準 75%における 5%下側許容限界値を基準強度特性値 ($F_{0.05}$) として求めたところ図 11 のような結果となった。 $F_{0.05}$ が最大となったのは A-1 で 0.68N/mm^2 、最小となったのは C-3 で 0.21N/mm^2 であった。中央値が 0.30N/mm^2 であることから砂の少ない A では強度が高い傾向であることが分かる。

また、剛性は最大応力 (σ_{max}) の 10%と 40%となる点を結ぶ直線の傾きを弾性係数とし、信頼水準 75%における 50%下側許容下限値を基準弾性特性値 ($E_{0.5}$) として求めたところ図 12 のような結果となった。 $E_{0.5}$ が最大となったのは A-2 で 0.58N/mm^2 、最小となったのは A-3 で 0.08N/mm^2 であった。中央値が 0.12N/mm^2 であることから A-1 および A-2 は比較的剛性が高い傾向があり、A-3 から C-5 までは同程度の剛性となっていることが分かる。

4.2 強度と剛性の関係

各圧縮試験における最大圧縮応力と弾性係数の関係を図 13 に、基準強度特性値と基準弾性特性値との関係を図 14 にそれぞれ示す。これらの関係について回帰直線を求めたところ、いずれも正の相関があることが分かった。また各決定係数 (R^2) は 0.43 および 0.64 となり、強度と剛性との間には強い相関があることが分かった。各関係の中でも特に、基準強度特性値と基準弾性特性値関係には強い相関があることが分かった。

4.3 密度と強度・剛性の関係

各圧縮試験における密度と最大圧縮応力の関係を図 15 に示す。この関係について回帰直線を求めたところ、決定係数 (R^2) は 0.47 となり、密度と強度との間には強い相関があることが分かった。

また密度と弾性係数の関係を図 16 に示す。同様に回帰直線を求めたところ、決定係数 (R^2) は 0.19 となり、密度と剛性の間にはやや相関があることが分かった。密度と剛性の関係より、強度と密度の関係の方が強い相関があることが分かった。

図13 最大圧縮応力と弾性係数の関係

図14 基準強度特性値と基準弾性特性値の関係

図15 密度と最大圧縮応力の関係

図16 密度と弾性係数の関係

図17 砂土比と最大圧縮応力の平均の関係

図18 砂土比と基準強度特性値の関係

4.4 砂土比と強度・剛性の関係

各圧縮試験における砂土比 (S/Md) と最大圧縮応力の平均の関係を図 17 に、砂土比 (S/Md) と基準強度特性値の関係を図 18 に示す。ここで砂土比 (S/Md) とは原土に対する砂の重量比として定義した。砂を多く混入すると強度が下がると言われているが³⁾、今回の試験

においてもそれぞれについて回帰直線を求めたところ、決定係数 (R^2) は 0.45 および 0.59 となり、砂土比 (S/Md) と強度との間には強い相関があることが分かった。

また砂土比 (S/Md) と弾性係数の平均の関係を図 19 に、砂土比 (S/Md) と基準弾性特性値の関係を図 20 にそれぞれ示す。これらの関係についても同様に回帰直線を求めたところ、決定係数 (R^2) が 0.28 および 0.29 となり、砂土比 (S/Md) と剛性の間にはやや相関があることが分かった。砂土比 (S/Md) と剛性の関係より、砂土比 (S/Md) と強度関係の方が強い相関があることが分かった。

4.5 水土比と強度・剛性の関係

各圧縮試験における水土比 (W/Md) と基準強度特性値および基準弾性特性値の回帰直線を利用して圧縮強度推定式および圧縮弾性推定式を求めた (図 21、22)。具体的には回帰直線を求め水土比 45% を起点に平行移動したものとした。なお、B と C では水土比と強度の関係にはほぼ同じ傾向が見られたことから、安全側である C を使用した。圧縮強度推定式では水土比 45% を閾値として、A の調合比では $F_c = -0.035 W/Md + 1.825$ 、B、C の調合比では $F_c = 0.25$ となった。また圧縮弾性推定式は A の調合比では $E_c = -0.04 W/Md + 1.9$ 、B、C の調合比では $E_c = 0.1$ となった。また水土比と密度の関係から A の調合比では水土比が大きくなると密度が小さくなり、B と C の調合比では密度が大きくなった。これより B と C では水よりも砂が密度に作用し、それが圧縮性能に影響を及ぼしたと考えられる。

これより、水土比 45% 未満のときは、砂の多い B と C の調合比より砂の少ない A の調合比の強度および剛性が常に大きくなるため、施工性の向上のためには少ない砂の量で水を増やすのが合理的である。一方で、45% 以上になる時は、A の調合比のように少ない砂の量で水を増やすより、砂を増やすことで強度が下がらなくなると言える。

5. 結論

今回使用した原土はある一定のコンシステンシーを得るのに必要な水量は少なく、また水量を変化させていったときのコンシステンシーが変化しにくいという性質があった。

圧縮試験の最大応力から基準強度特性値および基準弾性特性値を求めた。強度と剛性、密度と強度・剛性、砂土比と強度・剛性、水土比と強度および剛性の関係ではそれぞれ高い相関が見られた。

また水土比と強度・剛性の関係から、砂が少ない場合は水土比の影響が大きく、砂が多い場合は水土比の影響をほとんど受けないことが分かった。またそれらの関係から強度推定式および弾性推定式を提案した。今後、水土比に加えて、さらに砂と土の比率を変数とした強度試験を加えることで強度および剛性推定の実験式を整えることが可能であると考えられる。さらにせん断試験、曲げ試験に関しても、圧縮試験と同様にそれぞれ強度推定式および剛性推定式を提案する必要があると考える。さらに荒壁土と中塗土を一体化させた供試体で圧縮試験を行うことでより実際の土壁の耐力推定が可能であると考えられる。

謝辞

本研究実施において、アンケート、ヒアリングの協力をして下さった京都左官技能専修学院の指導者、生徒のみなさまに多大な助力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

図 19 砂土比と弾性係数の平均の関係

図 20 砂土比と基準弾性特性値の関係

図 21 水土比と強度の関係の概略図

図 22 水土比と剛性の関係の概略図

参考文献

- 車, 橋高, 田村: 室内環境調整機能を付加した土壁系仕上材料に関する研究 その 1 平衡含水率と吸放湿特性, 日本建築士上学会大会学術講演会研究発表論文集, pp.15~18, 2003.10
- 岩崎, 細谷, 八木: 土壁工法仕様標準化に関する研究 (4) -福島産、京都-滋賀地方産及び北関東産壁土の代表指標-, 日本建築学会東北支部研究報告集 (62), pp.411~414, 1999.6
- 山崎, 津田: 壁土の強度と材料配合比との関係-岡山矢掛、新保の土について-, 日本建築学会中国支部研究報告集 (36), pp.5~8, 2013.3
- 宇都宮, 立尾ら: 土塗壁の耐震性向上のための物理的及び技術的研究 藁スサが圧縮強度に及ぼす影響, 日本建築学会四国支部研 (8), pp.41-42, 2008.5
- 平野, 有馬, 信田: 壁土の練り置き時間期間に生じる変化が材料特性に与える影響, 日本建築士上学会論報告集第 10 巻第 1 号, pp.1~7, 2003.1
- 荘所, 早崎, 三芳, 大橋: 壁土の圧縮強度特性に与える要因に関する研究 その 1 粗粒分含有率・含水比・スサ含有率の影響について, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), 2015.9
- 興石, 位田: 主要産出地における荒壁土および中塗土の性質, 小舞土壁に用いる土壁に関する研究 その 1, 日本建築学会構造系論文集 第 73 巻 第 631 号 pp.1467-1474, 2008.9
- 田中, 興石, 位田: 壁土の性質に関する基礎的研究 第 1 報 基本物性の測定 (左官、材料施工), 学術講演梗概集 A-1 材料施工, pp.173-174, 2003.7
- 日本建築学会編「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 15 左官工事」, 丸善, 東京

[2017 年 5 月 29 日原稿受理 2017 年 9 月 26 日採用決定]