壁土の調合が強度特性に及ぼす影響

EFFECT OF MIX PROPORTION ON DEFORMATION AND STRENGTH CHARACTERISTICS OF WALL CLAY

越智隆行 — * 1 宮本慎宏 — * 2
宇都宮直樹 — * 3 小林正幸 — * 4
山中 稔 — * 5 松島 学 — * 6

Takayuki OCHI — * 1 Mitsuhiro MIYAMOTO — * 2
Naoki UTSUNOMIYA — * 3 Masayuki KOBAYASHI — * 4
Minoru YAMANAKA — * 5 Manabu MATSUSHIMA — * 6

キーワード：
調合, 中塗土, 要素実験, 砂, ベントナイト, 粒径加積曲線

Keywords:
Mix proportion, Nakanuri soil, Element test, Sand, Bentonite, Grain size accumulation curve

The seismic performance of mud walls is decided by the mechanical characteristics of wall clay. Viscous soil is mixed with sand and fiber material such as straw for wall clay based on the experience and intuition of craftsmen. In this study, the objective is to examine experimentally the effect of the mix proportion on the mechanical characteristics of wall clay, such as cohesion and angle of internal friction. It is shown that the mechanical characteristics of wall clay can be changed by the mix proportion of sand or bentonite to wall clay.

1. はじめに

土塗壁は吸放湿性や耐火性などに加え、再利用できる循環型の天然材料として近年注目を集めている。土塗壁に用いる壁土は、身近に採取できる土とすさ等の繊維材を混ぜ合わせて作製する。壁土の材料の混合は職人の経験と勘で行うため、壁土の粘着力やせん断抵抗角などの強度特性にはばらつきがある。土塗壁の耐力の8割以上を壁土が負担しており¹⁾、壁土の強度特性は土塗壁の耐震性能に大きく影響する。しかし、土塗壁の壁倍率は、塗り厚や中塗りの仕様だけで規定され、壁土の材料となる各地域の土や、混合する材料の差異は考慮されていない。

壁土に関する既往の研究として、奥石ら²⁾は、壁土の主要な産出地で職人が練り混ぜた荒壁土と中塗土を対象とし、藁すさを除去した壁土の粒度、流動性、収縮率、圧縮強度などを測定している。浦ら³⁾は、地方の壁土を入手し、一定のコンシステンシーの元で壁土の性質を定量的に評価している。三芳ら⁴⁾⁵⁾は、壁土材料の圧縮試験、せん断試験を行い、原土の種類、すさの種類、水合わせなどの影響を検討している。しかし、土質力学に基づいて壁土の粘着力やせん断抵抗角などの強度特性を評価した研究は少ない。

著者らは、土塗壁に用いる荒壁土や中塗土を全国各地から取り寄せ、要素試験から壁土の強度特性を定量的に把握し、地域によって壁土の強度特性が異なることを明らかにした⁶⁾⁷⁾。本研究では、土塗壁の耐震性能に大きく寄与する中塗土に着目し、壁土の強度特性に影響を及ぼす要因を検討する。さらに、各地域の原土への他の材料の混合（以下では調合と呼ぶ）が壁土の強度特性に及ぼす影響を検討する。2章では全国各地の中塗土の強度特性を要素試験から定量

的に把握し、壁土の強度特性に影響を及ぼす要因を検討する。3章では、粒度分布に偏りがある土を対象とし、砂やベントナイトを調合した壁土の要素試験を行い、壁土の調合が強度特性に及ぼす影響を検討する。

2. 土塗壁に用いる中塗土の性質

土塗壁に用いる中塗土の性質を把握するため、全国各地より中塗土に用いるおろし土（原土をふるいにかけた粒の細かい土）を取り寄せ、実験場で調合したうえで壁土の要素試験を行った。図1に△で示すように、対象地域は埼玉、愛知、福井、京都、兵庫、香川、山口防府、熊本の計8ヶ所とした。ただし、上記のうち1地域では中塗土に原土を用いるため、原土を取り寄せた。

2. 1 調合方法と粒径加積曲線

中塗土は、こて離れの施工性と乾燥中に生じる収縮ひびわれ抑制のため、市販のおろし土に砂ともみすさを調合して作製する。おろし土を中塗り用の壁土に適した状態となるように、実験場で香川県の職人1名に経験的に砂ともみすさを調合してもらった。砂は海砂、もみすさは藁の繊維が開繊し、繊維長さが3~10mm程度である。各壁土に対する調合量を砂は容積比、もみすさは土100リットルに対する質量で表1に示す。表中の地域A~Hは前述のいずれかの地域に該当する。各壁土の調合量は砂が40~70%程度、もみすさが砂を調合した壁土100リットルに対して1.1~2.1kgであった。

砂調合前の各地域の土の粒径加積曲線を図2(a)、砂調合後を図2(b)に示す。粒径加積曲線は、縦軸が特定のふるい目を通して土粒子の質量百分率、横軸が土粒子の粒径である。一般的に土粒子の

本稿の一部は文献7)にて報告している。

¹⁾ 四国職業能力開発大学校住居環境科 講師・工修
(〒763-0093 丸亀市郡家町3202番地)

²⁾ 香川大学工学部安全システム建設工学科 助教・博士(工学)

³⁾ 近畿職業能力開発大学校住居環境科 准教授・博士(工学)

⁴⁾ 香川大学大学院工学研究科安全システム建設工学科 博士前期課程

⁵⁾ 香川大学工学部安全システム建設工学科 准教授・博士(工学)

⁶⁾ 香川大学工学部安全システム建設工学科 教授・工博

¹⁾ Lecturer, Dept. of Residential Environment, Shikoku Polytechnic College, M. Eng.

²⁾ Research Assoc., Dept. of Safety Systems Construction Eng., Kagawa Univ., Dr. Eng.

³⁾ Assoc. Prof., Dept. of Residential Environment, Kinki Polytechnic College, Dr. Eng.

⁴⁾ Graduate Student, Dept. of Safety Systems Construction Eng., Kagawa Univ.

⁵⁾ Assoc. Prof., Dept. of Safety Systems Construction Eng., Kagawa Univ., Dr. Eng.

⁶⁾ Prof., Dept. of Safety Systems Construction Eng., Kagawa Univ., Dr. Eng.

粒径が 0.005mm 以下は粘土、0.005～0.075mm はシルト、0.075～2mm は砂、2mm 以上は礫に分類する。粘土とシルトを合わせて細粒分、砂と礫を合わせて粗粒分と呼ぶ。細粒分が 50%以上の土を粘性土、粗粒分が 50%以上の土を砂質土に分類する。粒度分布曲線の傾きが大きい区間は、その区間の粒径の土粒子を多く含むことを示す。砂調合後の各地域の土の粒径加積曲線は、図 2(a)のデータと表 1 に示す砂の調合割合から求めた。砂調合前の各地域の土の粒径加積曲線は地域によって大きく異なるが、調合後は概ね一致する。粒径加積曲線が他地域と異なる傾向を示す地域 H は、前述の中塗土に原土を用いている地域である。施工性を考慮して職人が経験的に砂を調合することで、各地域の土はほぼ同じ粒度分布となる。

2. 2 要素試験概要

砂ともみすさを調合した各地域の壁土を用いて図 3 に示す円柱試験体を作製し、壁土の要素試験として一軸圧縮試験を行った⁸⁾。壁塗り直前の状態の壁土を直径 125mm、高さ 250mm の円筒形型枠に入れて成型し、2 週間程度の気中養生を行った。脱型後に再び気中養生を行い、気中養生中に計測する質量が変化しなくなった時点で終了した。実験条件を一定にするため、試験体は実験前に温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿器内で 24 時間の養生を行った。試験体数は各壁土に対して 5 体とした。作製した試験体に対し、既往の文献⁹⁾に準じて毎分 1%の圧縮ひずみが生じる割合で加力を行った。本研究では試験体の底面にポリエチレンシートを敷き、側面を濾紙で覆うことにより、型枠と試験体が付着しないようにしている。養生中に壁土は自由に収縮できるため、目視による観察の範囲において、試験直前の試験体表面にひび割れは発生していなかった。

一軸圧縮試験結果から図 4 に示すモールの応力円とクーロン式の関係に基づき、各壁土の粘着力 c 、せん断抵抗角 ϕ 、および弾性係数 E_{50} を求めた⁸⁾。点 A とモールの応力円とクーロン式の接点 C とを

結ぶ直線の角度は図 3 に示す円柱試験体の破壊面の角度 α_f と一致し、せん断抵抗角 ϕ はモール・クーロンの破壊基準より式(1)で表される。

$$\phi = 2\alpha_f - \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

モール・クーロンの破壊基準から一軸圧縮試験では試験体に作用する側圧が 0 のため、点 A は原点 O と一致し、粘着力 c は壁土の圧縮強度 σ_u を用いて式(2)で表される。

$$c = \frac{\sigma_u}{2} \cdot \frac{(1 - \sin \phi)}{\cos \phi} \quad (2)$$

弾性係数 E_{50} は、圧縮強度 σ_u の 1/2 の点と原点を結ぶ直線の傾きである。各壁土の強度特性の平均値を表 1 に示す。各壁土の試験体 5 体のうち、圧縮強度の最大値と最小値を除いた 3 体の平均値とした。なお、圧縮強度のばらつきを表す変動係数は 0.01～0.04 の範囲であった。

2. 3 要素試験結果と考察

中塗土の圧縮強度の基準値は文献¹⁰⁾により 0.55N/mm² と規定されている。文献¹⁰⁾の試験体形状は直方体であり、本研究における試験体は円柱であるため、単純な比較は出来ないが、表 1 に示すように地域 G は基準値である 0.55N/mm² を下回る。これは図 2(a)に示すように、地域 G の土は粒径 0.001mm 以下のコロイドの割合が 30%程度と最も大きく、調合した砂の土粒子間の噛み合わせ効果が小さいためと考える。砂の調合割合と砂調合後の粒度分布が概ね一致する地域 A、B、G の壁土の圧縮応力度 - ひずみ度関係を比較して図 5 に示す。図 5 の圧縮応力度 - ひずみ度関係も圧縮強度の最大値と最小値の試験体を除く 3 体の平均値とした。曲線の形状は概ね一致するが、圧縮強度は地域 A が 0.95N/mm²、地域 B が 0.74N/mm²、地域 G が 0.52N/mm² と最大で約 1.8 倍異なる。弾性係数や気乾密度も地域によって大きくばらついている。各壁土のもみすさ調合量と圧縮

図 1 対象地域

(a)調合前

(b)調合後

図 2 中塗土の粒径加積曲線

表 1 中塗土の要素試験結果一覧

地域名	砂調合割合 m_s (%)	もみすさ混合量 m (kg/100L)	圧縮強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E_{50} (N/mm ²)	気乾密度 ρ (g/cm ³)	粘着力 c (N/mm ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
A	64.0	2.1	0.95	202.9	1.46	0.36	16
B	70.0	1.1	0.74	280.7	1.67	0.22	29
C	72.4	1.4	0.72	200.2	1.51	0.23	25
D	46.0	1.2	0.87	222.7	1.64	0.23	35
E	73.0	1.4	0.60	185.2	1.64	0.17	30
F	63.5	1.3	0.71	171.1	1.55	0.29	13
G	72.7	1.2	0.52	214.7	1.65	0.14	34
H	42.9	1.8	0.98	193.4	1.68	0.32	24

図 3 一軸圧縮試験

図 4 せん断破壊時のモールの応力円とクーロン式の関係

強度、気乾密度の関係を図6に示す。もみすさ調合量が増加すると、土粒子密度より繊維密度は小さいため、気乾密度が低下し、圧縮強度も低下すると考えられるが、図6に示すようにばらつきが大きく、その傾向は見られない。各壁土のせん断抵抗角-粘着力関係を図7に示す。粘着力とせん断抵抗角は地域によって大きくばらつき、概ね反比例の関係にある。これは砂が主成分のものから粘土が主成分のものまで、壁土が広範囲の土質特性を持つことを意味している。以上より、砂調合後の土の粒度分布が概ね一致しても壁土の強度特性は異なる。もみすさ調合量に加え、各地域の土に含まれる粒子形状やコロイド含有率の違いが壁土の強度特性に影響を及ぼしていると考えられる。これは角張った粒子形状になれば粒子間の噛み合わせ効果による摩擦力が大きくなり、コロイド状になれば電気化学的な粒子間の吸着力が大きくなることに起因する。

3. 壁土の調合が強度特性に及ぼす影響

2章の要素試験結果より、砂調合後の土の粒度分布が同様であっても、壁土の強度特性は異なる。本章では、粒子形状やコロイド含

有率の違いが壁土の強度特性に及ぼす影響を検討するため、粒度分布に偏りがある土に砂やベントナイトを調合した壁土の要素試験を行った。

3. 1 調合方法と粒径加積曲線

既報⁹⁾で用いた全国各地の荒壁土用の原土から試料①～④の4種類を選定した。試料①と②は粘性土であり、試料①は細粒分が約90%と多く、試料②は細粒分が約78%と試料①と比べて少ない。試料①、②の原土に対して砂を容積比で10%、20%、40%調合し、原土と合わせて4種類の試料を用意した。試料③と④は粗粒分が多い土であり、試料③は粗粒分が約80%の砂質土、試料④は粗粒分が約33%と試料③と比べて少ない。試料③、④の原土に対してベントナイトを容積比で5%、10%、20%調合し、原土と合わせて4種類の試料を用意した。ベントナイトは砂と比べて比表面積が大きく、少量で調合の影響が確認できると考え、砂の半分の量を調合した。ここで比表面積とは、一定の量の試料に含まれる全粒子の表面積の総和である。

各試料の粒径加積曲線を図8と図9に示す。砂やベントナイトを調合した各試料の粒径加積曲線は、原土と砂やベントナイトそれぞ

図5 圧縮応力度-ひずみ度関係

図6 もみすさ調合量と圧縮強度、気乾密度の関係

図7 せん断抵抗角-粘着力関係

表2 砂を調合した壁土の要素試験結果一覧

試料名		圧縮強度 σ_n (N/mm ²)	弾性係数 E_{50} (N/mm ²)	粘着力 c (N/mm ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
試料①	原土	0.47	8.9	0.23	0
	砂10%	0.45	73.3	0.22	0
	砂20%	0.61	142.0	0.27	6
	砂40%	0.61	156.7	0.25	13
試料②	原土	0.52	46.9	0.23	6
	砂10%	0.53	91.5	0.26	1
	砂20%	0.61	112.6	0.27	7
	砂40%	0.64	146.1	0.25	14

図8 砂を調合した壁土の粒径加積曲線

表3 ベントナイトを調合した壁土の要素試験結果一覧

試料名		圧縮強度 σ_n (N/mm ²)	弾性係数 E_{50} (N/mm ²)	粘着力 c (N/mm ²)	せん断抵抗角 ϕ (°)
試料③	原土	0.56	103.3	0.23	11
	べ5%	0.58	95.6	0.25	8
	べ10%	0.34	48.1	0.16	3
	べ20%	0.29	37.7	0.14	0
試料④	原土	0.44	96.3	0.20	5
	べ5%	0.76	76.3	0.32	9
	べ10%	0.96	107.5	0.36	16
	べ20%	0.36	45.9	0.17	2

図9 ベントナイトを調合した壁土の粒径加積曲線

れの粒径加積曲線から求めた。調合に用いた砂は 95%以上を粗粒分が占め、細粒分をほとんど含まない。調合に用いたベントナイトはモンモリロナイトを主成分とし、電気化学的な吸着性能に優れる。99%以上を細粒分が占め、コロイドも 60%程度含む。各試料には土 100 リットルあたり 1.8kg の藁すさを調合して壁土を作製した。

3. 2 要素試験

2 章と同様に、調合した各壁土の要素試験を行い、強度特性を求めた結果の平均値を表 2 と表 3 に示す。圧縮強度は圧縮応力度の最大値としたが、圧縮応力度-ひずみ度関係が漸増する場合は、ひずみ度 0.034 における値を最大値とした。これは既往の文献¹¹⁾の耐力変形推定式より、実大土塗壁のせん断変形角 1/15rad 時に概ね対応するひずみ度が 0.034 となるためである。なお、圧縮強度のばらつきを表す変動係数は 0.02~0.16 の範囲であった。

3. 3 要素試験結果と考察

3. 3. 1 砂の調合による影響

試料①と②の圧縮応力度-ひずみ度の関係を図 10、砂の調合割合と弾性係数、圧縮強度、せん断抵抗角の関係をそれぞれ図 11~13 に示す。試料①、②ともに原土はひずみ度が大きくなると圧縮応力

度が漸増するが、砂の調合割合が増加するとピーク値が見られる。砂を 40%調合した場合はひずみ度 0.01 程度で圧縮強度に達する。試料①、②ともに砂の調合割合が増加すると弾性係数、せん断抵抗角は増加する。これらは砂が調合されることで粒子間の噛み合わせ力が大きくなったためと考える。試料①は砂の調合割合が増加すると、圧縮強度は増加したが、試料②は圧縮強度の増加割合が試料①に比べて小さい。各試料の原土に含まれる粒子形状などが影響していると考えられる。

図 11 砂調合割合と弾性係数の関係

図 10 圧縮応力度-ひずみ度関係

図 12 砂調合割合と圧縮強度の関係

図 13 砂調合割合とせん断抵抗角の関係

図 14 圧縮応力度-ひずみ度関係

図 15 ベントナイト調合割合と弾性係数の関係

図 16 ベントナイト調合割合と圧縮強度の関係

図 17 ベントナイト調合割合と粘着力の関係

3. 3. 2 ベントナイトの調合による影響

試料③、④の圧縮応力度－ひずみ度関係を図 14、ベントナイトの調合割合と弾性係数、圧縮強度、粘着力の関係をそれぞれ図 15～17 に示す。試料③はベントナイトの調合割合が増加しても圧縮応力度のピーク値は見られない。一方、試料④はベントナイトの調合割合が増加するとピーク値が見られる。ベントナイトを 20%調合した場合はひずみ度 0.015 程度で圧縮強度に達する。試料③はベントナイトの調合割合が増加しても弾性係数、圧縮強度、粘着力ともに変化は小さく、ベントナイトを 10%以上調合した場合は逆に低下する。試料④はベントナイトの調合割合が増加すると、弾性係数、圧縮強度、粘着力ともに増加し、ベントナイトを 20%調合した場合は逆に低下する。これらはベントナイトを調合することで、試料④はベントナイトと吸着する細粒分が多く、試料③はその細粒分が少ないことが要因と考える。さらに、ベントナイトを混入し過ぎると、膨潤後の乾燥収縮により微細なひび割れが発生するため、吸着性能が低下すると考える。

4. まとめ

全国各地で土塗壁に用いる中塗土の強度特性に影響を及ぼす要因を把握するため、8 地域の土を取り寄せて調合を行い、要素試験から壁土の強度特性を把握した。さらに、壁土の調合が強度特性に及ぼす影響を把握するため、原土に砂やベントナイトを調合した壁土の要素試験を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1)土の粒径加積曲線は地域によって大きく異なるが、施工性を考慮して職人が経験的に砂を調合することで概ね一致した。しかし、砂調合後の土の粒度分布が同様でも、壁土の強度特性は異なることを示した。
- 2)細粒分の多い土に砂を調合することで、弾性係数、せん断抵抗角は大きくなったが、圧縮強度は原土によって傾向が異なり、粒子形状が影響している可能性がある。
- 3)細粒分の多い土にベントナイトを調合することで、弾性係数、圧縮強度、粘着力が大きくなったが、細粒分の少ない土では効果が見られなかった。また、ベントナイトの調合割合が 10%以上になると、弾性係数、圧縮強度、粘着力は逆に低下した。

以上より、細粒分含有率の大きい土には砂、粗粒分含有率の大きい土にはベントナイトを調合することで、壁土の強度特性が変化した。各地域の土質特性に合わせた壁土の調合の可能性を示した。

謝辞

本研究は国土交通省の建設技術研究開発助成制度「竹材等の低利用資源を用いた高性能壁土の開発」の一環として行われた。実験では香川大学と四国職業能力開発大学校の学生の協力を得た。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1)中尾方人，山崎裕，田中純：土塗り壁のせん断耐力の評価に関する実験的研究，構造工学論文集 vol.49B，pp.573-578，2003.3.
- 2)奥石直幸，位田達哉：主要産出地における荒壁土及び中塗土の性質，駒井土壁に用いる壁土に関する研究 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.
- 3)浦憲親，山本智大：一地方の壁土用原土の性質，日本建築学会技術報告集，第 17 巻，第 36 号，pp.449-454，2011.6.
- 4)濱崎信子，三芳紀美子，大橋好光：土壁の強度に関する研究 その 3 壁土圧縮試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，vol.C-1，pp.399-400，2004.8.
- 5)三芳紀美子，濱崎信子，大橋好光：土壁の強度に関する研究 その 4 壁土 2 面せん断試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，vol.C-1，pp.357-358，2005.9.
- 6)小林正幸，宇都宮直樹，宮本慎宏，松島学：壁土の地域特性を考慮した土塗壁の耐震性能評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.467-468，2013.8.
- 7)N. Utsunomiya, M. Miyamoto, M. Yamanaka and M. Matsushima: Seismic Performance Evaluation of Mud Walls Considering Regional Characteristics of Wall Clay, 13th World Conference on Timber Engineering, Quebec City, Canada, August, 2014.
- 8)宇都宮直樹，山中稔，松島学：藁スサを混合した新しい供試体の提案，日本建築学会構造系論文集，第 664 号，pp.1119-1124，2011.6.
- 9)土の一軸圧縮試験法，JIS A 1216，2009.
- 10)技術解説書作製委員会：土塗壁・面格子壁・落とし込み板壁の壁倍率に係る技術解説書，日本住宅・木材技術センター，pp.25，2004.2.
- 11)宇都宮直樹，宮本慎宏，山中稔，松島学：土質力学に基づく土塗壁の耐力変形推定式の提案，日本建築学会構造系論文集，第 684 号，pp.363-368，2013.2.

[2014 年 6 月 18 日原稿受理 2014 年 11 月 25 日採用決定]