

論文 Article

伝統技法を用いた版築壁の強度性状に及ぼす 調合および施工要因の影響に関する研究

原稿受付 2012年3月30日

ものづくり大学紀要 第3号 (2012) 42~49

赤谷樹一郎^{*1}, 大塚秀三^{*2}, 竹村雅行^{*3}, 遠野未来^{*4}, 稲川幸司^{*5}^{*1}ものづくり大学 ものづくり学研究所 大学院生^{*2}ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科^{*3}岩瀬建築有限会社^{*4}遠野未来建築事務所^{*5}東鉄工業株式会社(ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科卒業生)

Effects of Mix Proportion and Construction Factors on Strength Development of Rammed Earth Wall Using Traditional Technique

Kiichiro AKATANI^{*1}, Shuzo OTSUKA^{*2}, Masayuki TAKEMURA^{*3}, Mirai TONO^{*4} and Koji INAGAWA^{*5}^{*1} Graduate Student, Graduate School of Building Technologists, Institute of Technologists^{*2} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*3} Iwase Construction Inc.^{*4} Tono Mirai Architects^{*5} TOTETSU KOGYO Co., Ltd. (Graduate, Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists)

Abstract

The purpose of this paper is to clarify effects of mix proportion and construction factors on strength development of rammed earth wall using traditional technique. As a result, the following conclusions are obtained: 1) Maximum compressive strength was measured when the ratio of Kanto loam to fine aggregate to slaked lime was 1:0.5:0.15. 2) Maximum compressive strength was measured at Rammer fall height of 30 cm and number of compaction times 25. 3) It takes 8 hours to complete this work by 33 persons. 4) Horizontal muntin of form was subjected to a uniformly distributed load of 1.39(kN/m). 5) Plywood of form was subjected to uniformly distributed load of 0.15(kN/m).

Key Words : Rammed Earth Wall, Mix Proportion, Construction Factor, Strength Development,
Traditional Technique

1. はじめに

歴史的建造物をはじめ現代建築においても発展途上国を中心に世界各地で築造方法として普及を見る, 土を主原料として締固めた固化物により構造体を構築する版築工法が, 近年では先進国においても再認識^{1), 2)}されつつある. 版築工法は, 施工手間が多めで非生産的である反面, 人力で施工

可能なこと, 地産地消が可能であること, 室内の温熱環境の改善効果³⁾が示唆されていることなどから, 建設に伴う二酸化炭素の排出量を抑制でき, 環境負荷低減へ一定の効果を期待できるものと考えられる. さらには, 土固有の独特なテクスチャーにより多様な意匠表現を可能とすることも含めて, 構造材料の選択肢となり得る可能性があると考えられる. しかしながら, 版築工法は, 材料選

定および調合、施工方法などについて技能者の経験に依るところが大きく、構造体としての品質確保に立脚した定量的な築造方法が確立されているとは言い難い。

そこで、本研究は小規模建築物において伝統技法に準じた版築壁の構築を指向した研究の基礎的段階として、調合および施工要因が版築壁の強度性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。ここでは、土に荒木田土、固化材に消石灰(Ca(OH)₂)、固化補助材ににがり(MgCl₂)を用いた版築供試体を対象に検討した結果を述べる。さらには、版築供試体を作製した調合および施工方法で実大の版築壁が施工可能であるか試験施工により確認した。

2. 研究の構成

本研究は、版築供試体の実験と実大の版築壁の試験施工で構成する。

(1) 版築供試体による検討

1) 締固め方法と荒木田土および細骨材の構成割合の検討

版築供試体の作成で用いる荒木田土の物理的性状の把握と荒木田土および細骨材の構成割合を検討した。

2) 版築供試体における圧縮強度および乾燥収縮の検討

調合および施工要因が版築供試体の強度性状および乾燥収縮に及ぼす影響を検討した。

(2) 実大の版築壁の試験施工

版築供試体による実験の結果から実大の版築壁の施工が可能であるか試験施工により確認した。

3. 版築供試体による締固め方法と荒木田土および細骨材の構成割合の検討

3.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を Table.1 に示す。実験の要因は、施工要因と調合要因に大別した。施工要因は、締固め回数、層数、ランマーの落下高さおよびランマーの質量について検討した。調合要因は、

Table.1 Factors and levels of experiment

Factor		Level
Construction Factor	Number of compaction times	15, 25, 50
	Rammer fall height cm	30, 45
	Layer number	3
	Rammer mass kg	2.5, 4.5
Mix proportion Factor	Kanto loam to Fine aggregate ,Mass ratio	1:0, 1:0.5, 1:1, 1:2

Table.2 Materials

Materials	Type	Character/ Property/Component
Soil	Kanto loam	Table.3
Water	Tap water	—
Fine aggregate	Crushed sand	Air-dry density : 2.61g/cm ³ Fineness modulus : 2.75%, Water absorption : 2.30%

Table.3 Physical property of Kanto loam

Test item	Test method	Test results	
Water content of soils	JIS A 1203	Natural water content %	30.7
Bulk density of soils	JIS A 1225	Wet density g/cm ³	1.732
		Dry density g/cm ³	1.256
		Critical void ratio g/cm ³	1.1
		Degree of saturation g/cm ³	89.4
Density of soil particles	JIS A 1202	Density of soil particle g/cm ³	2.686
Particle size distribution of soils	JIS A 1204	Stone %	0
		Gravel %	3.3
		Sand %	22.3
		Silt %	19.6
		Clay %	54.8
Liquid limit and plastic limit of soils	JIS A 1205	Liquid limit %	72.4
		Plastic limit %	23.0
		Plasticity index %	49.4
Soil compaction using a rammer	JIS A 1210	Maximum dry density g/cm ³	1.547
		Optimum moisture content %	23.7

荒木田土と細骨材の構成割合（質量比）について検討した。

(2) 使用材料

使用材料を Table.2 に示す。使用材料は、土を北関東で産出する荒木田土、細骨材を砕砂とした。また、荒木田土の含水比の調整用に上水道水を用いた。

荒木田土の物理的性質を Table.3 に示す。各土質試験は、当該 JIS に準じた。粒径加積曲線を Fig.1 に示す。荒木田土の通過質量百分率は、粒径 0.01mm までの粘土分が 54.8%と著しく多いため、乾燥収縮が大きくひび割れが生じやすいと考えられる。このため、本実験では乾燥収縮を低減させるために細骨材を混合した。

(3) 試験項目および方法

試験項目は、土の締固め試験(JIS A 1210:2009)および圧縮強度試験とした。圧縮強度試験は、コンクリートの圧縮強度試験方法(JIS A 1108:2005)

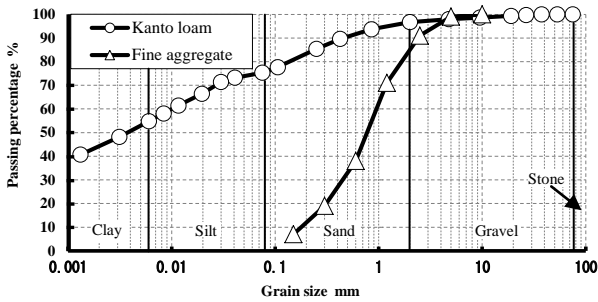


Fig.1 Grain size distribution curve

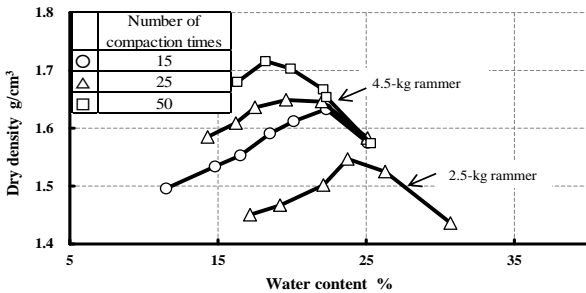


Fig.2 Relationship between water content and dry density in Kanto loam

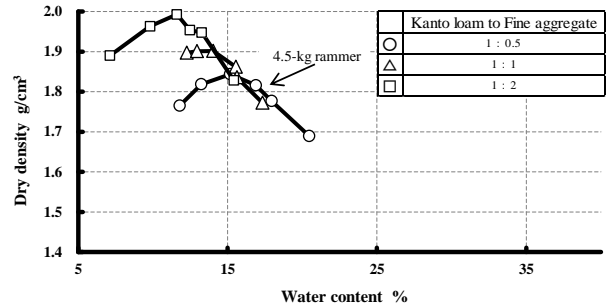


Fig.3 Relationship between water content and dry density in Kanto loam and fine aggregate

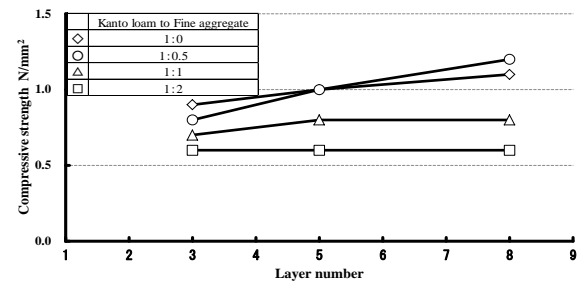


Fig.4 Relationship between layer numbers and compressive strength

に準じて $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の供試体により判断した。

3.2 結果および考察

(1) 締固め方法の検討

荒木田土の締固め回数の違いによる締固め曲線を Fig.2 に示す。土の含水比とは、土粒子質量に対する空隙に含まれる水分量の割合を百分率で表したものであり、最大乾燥密度の時の含水比を最適含水比といい、最適含水比より若干低いときに圧縮強度が最大となる。⁴⁾

乾燥密度は、締固め回数かつランマーの質量が増大すると大きくなり、4.5kg ランマーおよび締固め回数が 50 回で最大となり、ランマーの質量、落下高さおよび重力加速度の積で示す締固めエネルギーに比例していることが分かる。また、乾燥密度が大きくなるにつれて最適含水比が小さくなる傾向となった。これは、締固めによって土粒子の間隙水が相対的に少なくなるためと考えられる。

(2) 荒木田土および細骨材の構成割合の検討

荒木田土および細骨材の締固め曲線を Fig.3 に示す。ここでは、締固め回数を 25 回および 4.5kg ランマーとして検討した。

乾燥密度は、細骨材量に比例して大きくなった。これは、細骨材の密度が荒木田土の 2 倍程度であ

ることに起因すると考えられる。

層数と圧縮強度の関係を Fig.4 に示す。荒木田土のみおよび荒木田土：細骨材 = 1 : 0.5 の圧縮強度は、層数と概ね比例関係にある一方、荒木田土：細骨材 = 1 : 1 および 1 : 2 では、層数の増加による圧縮強度の変化は少なかった。また、細骨材を混合した場合には荒木田土：細骨材 = 1 : 0.5 が最大の圧縮強度であった。

以上より、圧縮強度の確保を指向した場合には、4.5kg ランマーおよび荒木田土：細骨材 = 1 : 0.5 を用いた試料が最適と判断できるため、以降の検討ではこれを基準とした。

4. 版築供試体における圧縮強度および乾燥収縮の検討

4.1 実験概要

(1) 実験の要因と水準

実験の要因と水準を Table.4、材料の構成割合（質量比）を Table.5 に示す。なお、Table.5 におけるにがり水 (MgCl_2 水溶液) または水の添加量は、荒木田土、細骨材および消石灰を混合した状態において最適含水比まで調整したものである。

1) 調合要因

Table.4 Factors and levels of experiment

Factor		Level
Construction Factor	Kanto loam to Fine aggregate ,Mass ratio	1:0, 1:0.25, 1:0.5, 1:1
	Kanto loam to Slaked lime ,Mass ratio	1:0, 1:0.05, 1:0.15, 1:0.25
	MgCl ₂ solution of concentration %	0, 5, 15, 25
Confection Factor	Compaction number of times	15, 25, 50
	Rammer fall height cm	15, 30, 45
	Layer number	3, 5, 8
	Age of stripping day	0, 3, 7, 14
	Age of compressive strength day	0, 3, 7, 14, 28

Table.5 Ratio of materials ,Mass ratio

Kanto loam	Fine aggregate	Slaked lime	Mass ratio to sum of the Kanto loam, Fine aggregate and Slaked lime MgCl ₂ solution or water ※ %	MgCl ₂ solution of concentration %
1	0.5	0	19.6	Water
		0.05	18.5	
		0.15	18.4	
		0.25	17.1	
	0.5	0	19.6	5
		0.05	18.5	
		0.15	18.4	
		0.25	17.1	
	0.5	0	19.6	15
		0.05	18.5	
		0.15	18.4	
		0.25	17.1	
0.5	0	19.6	25	
	0.05	18.5		
	0.15	18.4		
	0.25	17.1		
1	0.15	0.15	15.1	Water
				5
				15
				25
0.25	0.15	0.15	20.4	Water
				5
				15
				25
0	0.15	0.15	23.8	Water
				5
				15
				25

※ : Specimen is added until the optimum moisture content

調査要因は、荒木田土に対する細骨材および消石灰の質量比および MgCl₂ 水溶液の濃度とした。

2) 施工要因

施工要因は、締固め回数、ランマーの落下高さ層数、脱型材齢および圧縮強度試験材齢とした。

(2) 使用材料

使用材料を Table.6 に示す。使用材料は、固化材を消石灰、固化補助材を MgCl₂ 水溶液とし、その他については、前章と同一のものである。固化材および固化補助材による固化のメカニズムは、固化材である消石灰が空気中の二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムの結晶を生成する硬化反応と、

Table.6 Materials

Material	Type	Property/Component
Soil	Kanto loam	Table.3
Fine aggregate	Crushed sand	Air-dry density : 2.61g/cm ³ Fineness modulus : 2.75% Water absorption : 2.30%
Solidification material	Slaked lime	Ca(OH) ₂ Purity : 72.5% over
Aids solidification material	MgCl ₂ solution	MgCl ₂ Purity : 98.9% over

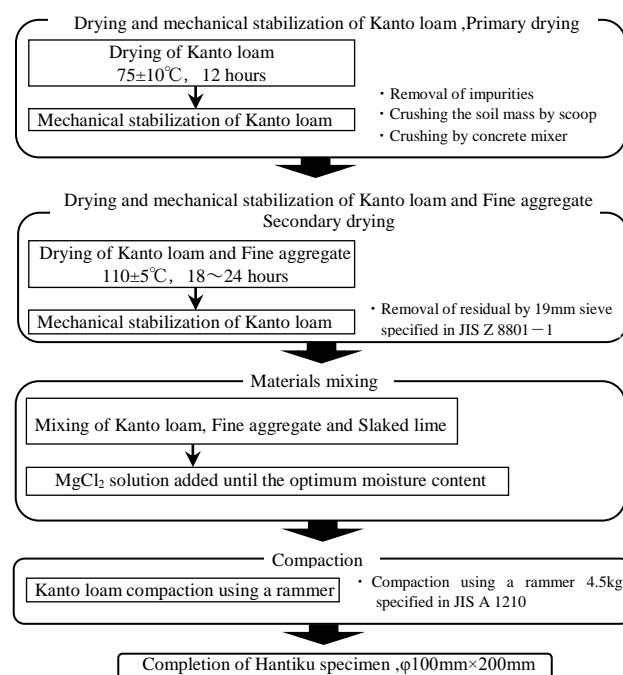


Fig.5 Fabrication process of specimen

荒木田土に含まれるシリカと水酸化カルシウムとが化合してけい酸カルシウムを生成するポズラン反応⁵⁾である。

(3) 版築供試体の作製フロー

版築供試体(以下、供試体と略称する)の作製フローを Fig.5 に示す。荒木田土の乾燥および粒度調整は、2つの工程で構成している。第1次段階では、荒木田土を 75±10°Cで 12 時間乾燥した後不純物を除去するとともにスコップおよびコンクリートミキサを用いて土塊を破碎することにより粒度調整した。第2次段階では、荒木田土を 110±5°Cで 18~24 時間乾燥した後、JIS Z 8801-1:2006 に規定される 19mm ふりを用いてふるい残留分を除去して粒度調整した。使用材料の混合では、荒木田土、細骨材および消石灰を混合し MgCl₂ 水溶液を添加した後、4.5kg ランマーを用いて締固め

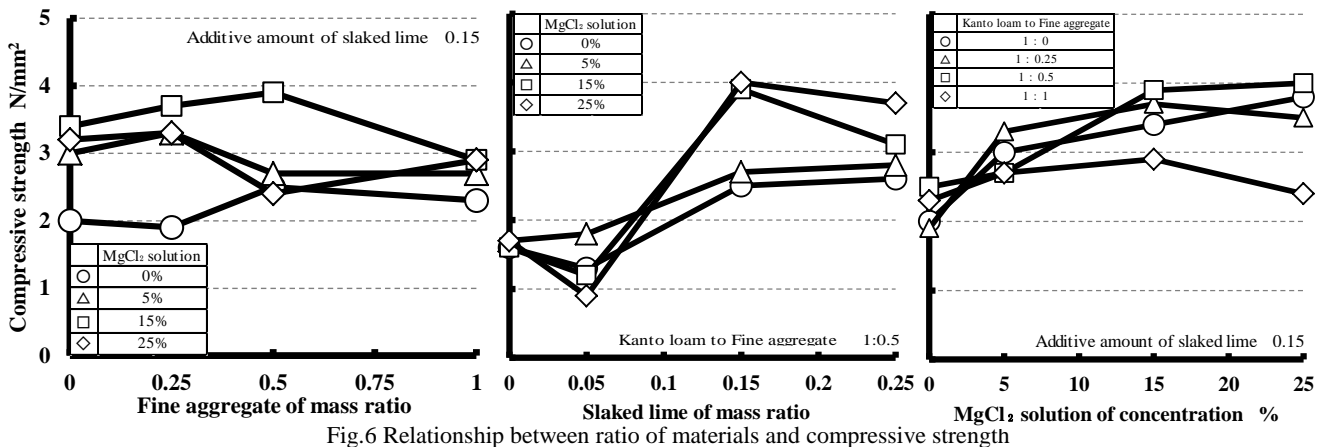


Fig.6 Relationship between ratio of materials and compressive strength

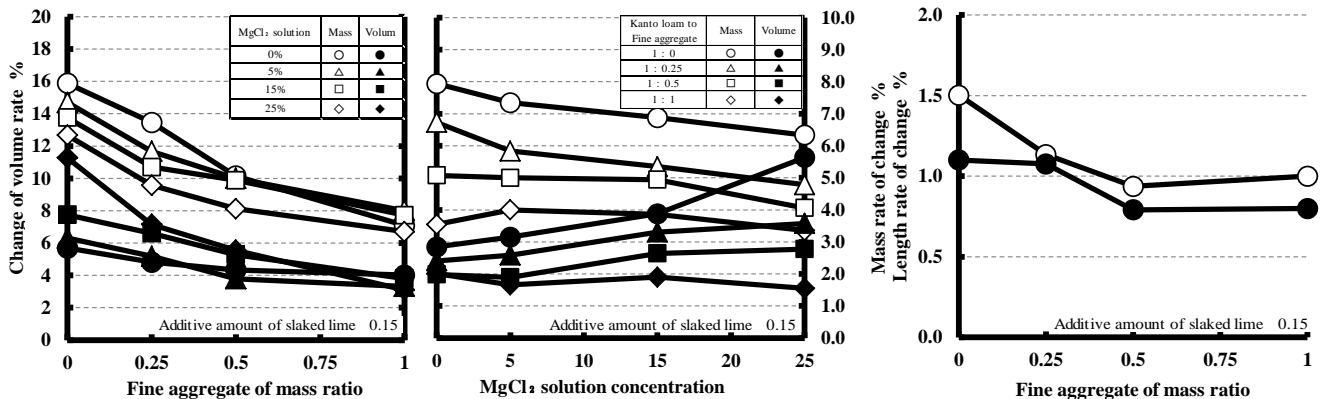


Fig.7 Relationship between ratio of materials and various rate of change in age of stripping at 7 days, age of compressive strength at 21 days

を行った。

(4) 試験項目および方法

試験項目は、JIS A 1108:2005 に準じた圧縮強度試験と乾燥収縮に伴う供試体の変形および質量変化とした。供試体の変形は、所定の材齢において JIS B 7507:1993 に規定されるノギスを用いて供試体の直径および高さを測定し、体積変化率として評価した。直径は、供試体の高さの 3 点(上中下)を直行する 2 方向で測定し、高さは供試体の対面する 2 方向を測定し、それぞれの平均値を用いた。また、併せて供試体の質量も測定した。

4.2 結果および考察

(1) 調合要因

1) 試料の構成割合の違いが圧縮強度に及ぼす影響

試料の構成割合と圧縮強度の関係を Fig.6 に示す。圧縮強度は、荒木田土に対する細骨材の質量比が 0.5 までは概ね大きくなる傾向を示すが、細骨材の質量比が 1 になると再び小さくなった。また、消石灰の質量比が 0.15 で圧縮強度が最大となる一方で、消石灰の質量比が 0.05 および 0.25 に

いては圧縮強度が低下しており強度発現が消石灰の添加量に比例しない傾向となった。この原因は、定かではないが、Minke ら¹⁾は消石灰の添加量が過小もしくは過大であると強度発現が停滞する現象を捉えており、本実験の結果はこれと相反するものではないと言える。一方、圧縮強度は概ね水溶液の濃度に比例して大きくなるが、消石灰の添加量が 0.15 の場合には MgCl₂ 水溶液の濃度が 15% を超えると、細骨材の質量比が 1 では顕著に圧縮強度が低下する傾向となった。これは、供試体が「荒木田土と固化材および固化補助材」、「細骨材」の 2 相材料とすると、強度発現に寄与する前者と細骨材の構成割合によって、圧縮強度が決定づけられることを示唆しているものと考えられる。

2) 乾燥に伴う供試体の形状および質量変化

脱型材齢 7 日の乾燥材齢 21 日における供試体の形状および質量変化率を Fig.7 に示す。体積変化率および質量変化率は、いずれも細骨材の質量比が大きくなるにしたがって小さくなった。これは、細骨材の混合により水分をより多く含む荒木田土

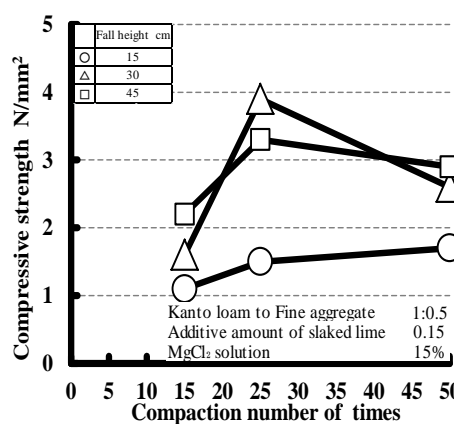


Fig.8 Relationship between compaction number of times and compressive strength

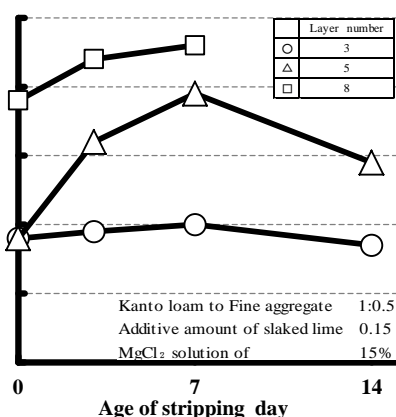
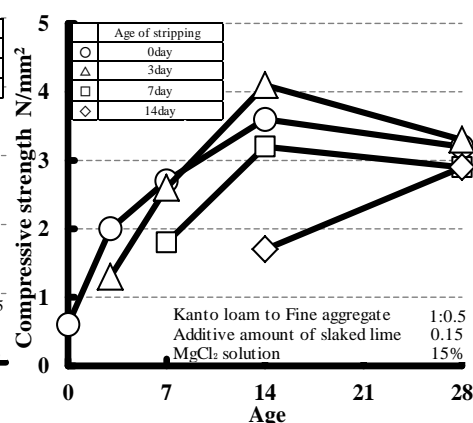


Fig.9 Relationship between age of stripping and compressive strength



の質量比が小さくなるため、乾燥収縮が低減されたものと考えられる。また、荒田土のみでは $MgCl_2$ 水溶液の濃度に比例して体積変化率が大きくなる一方で、細骨材を混合した場合には体積変化率および質量変化率は、ほぼ一定で推移するか若干小さくなる傾向を示した。

以上から、 $MgCl_2$ 水溶液の濃度が高くなるとともに圧縮強度が増大することに伴って形状変化が抑制される効果は、細骨材を混合した方が優れているといえる。また、荒木田土に対する消石灰の質量が 0.15 かつ $MgCl_2$ 水溶液の濃度が 15% においては、直径に比べ高さの長さ変化率の方が小さくなった。

(2) 施工要因

1) 締固め方法が圧縮強度に及ぼす影響

ランマーの落下高さによる締固め回数と圧縮強度の関係を Fig.8 に示す。圧縮強度は、締固め回数が 25 回を除いてランマーの落下高さに比例して大きくなる一方で、落下高さが 30 および 45cm では締固め回数が 25 回をピークとしてその後では減少する傾向となった。これは、前章で示したように、荒木田土および細骨材では締固めエネルギーに比例して圧縮強度が増加する傾向と異なっており、固化材の添加によって単に締固めエネルギーの増加に圧縮強度が追従しない可能性を示唆しているものと考えられる。この現象は、技能者へのヒアリング^{注)}においても同様の指摘が得られている。

2) 脱型材齢が圧縮強度に及ぼす影響

脱型材齢および圧縮強度試験材齢と圧縮強度の関係を Fig.9 に示す。圧縮強度は、層数が多くなるほど大きくなり、脱型材齢が 7 日をピークとして最大となるものの、14 日では低下する傾向を示した。一方、脱型してからの材齢の経過に伴う圧縮強度は、材齢 14 日をピークとしてこれ以降増進しなかった。

以上から、早期に脱型すると供試体の表層部における $MgCl_2$ 水溶液が逸散することにより消石灰の反応性が低下する一方で、脱型時期が遅くなると消石灰と二酸化炭素との反応性が低下するものと推察される。

5. 実大の版築壁の試験施工

5.1 施工概要

(1) 実大の版築壁の外観

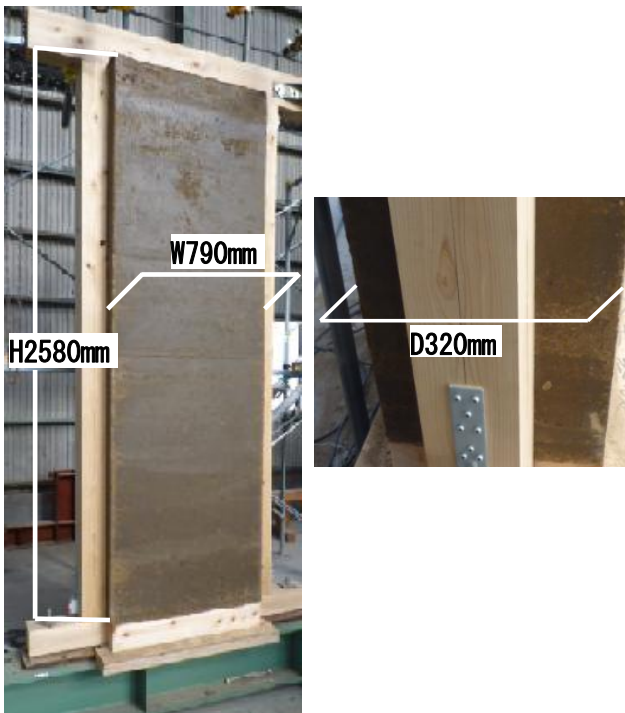
実大の版築壁の外観を Phot.1 に示す。寸法は、 $W790 \times D320 \times H2580$ (mm)とした。

(2) 型枠の構成

型枠の構成を Fig.10 に示す。型枠は、横棧で補強した JAS 規格のコンクリート型枠用合板を版築壁の両側から全ねじボルトで緊結したものである。横棧は、材質がヒノキ、寸法が $W1030 \times D36 \times H39$ (mm)であり、コンクリート型枠用合板の寸法は、 $W910 \times D18 \times H452$ (mm)である。

(3) 調合条件

調合条件は、前章の結果から荒木田土：細骨材：消石灰 = 1 : 0.5 : 0.15(質量比)および塩化マグネシ



Phot.1 Appearance full scale rammed earth wall

ウム水溶液の濃度を 15%とした。

(4) 施工条件

施工条件は、前章の結果からランマーの質量 4.5kg, ランマーの落下高さ 30cm および締固め回数を 0.34 回/cm²(版築供試体における 25 回相当)とした。総層数は、締固め後に 1 層 4cm となるように 64.5 層とした。また、型枠の脱型材齢は、最上層の締固めが完了後 7 日とした。

(5) 使用材料

使用材料は、前章までの材料と同一の荒木田土、細骨材、消石灰および MgCl₂ 水溶液である。

5.2 結果および考察

実大の版築壁の施工結果を Table.7 に示す。

(1) 施工における人工数

実大の版築壁の作製にあたり施工に関わった人工数は、延べ 33 人工であった。施工作業による内訳は、土の締固め 2 名と使用材料の混合 1 名の計 3 名であり、施工期間は延べ 11 日であった。

(2) 側圧

側圧により型枠の中央部で最大 8.75mm のたわみが生じた。そこで横棧および合板に生じた側圧を (1)式を用いて算出した。なお、曲げヤング係数を横棧では 13.1(kN/mm²), 合板では 6.86(kN/mm²)とした。その結果、型枠の構成材料

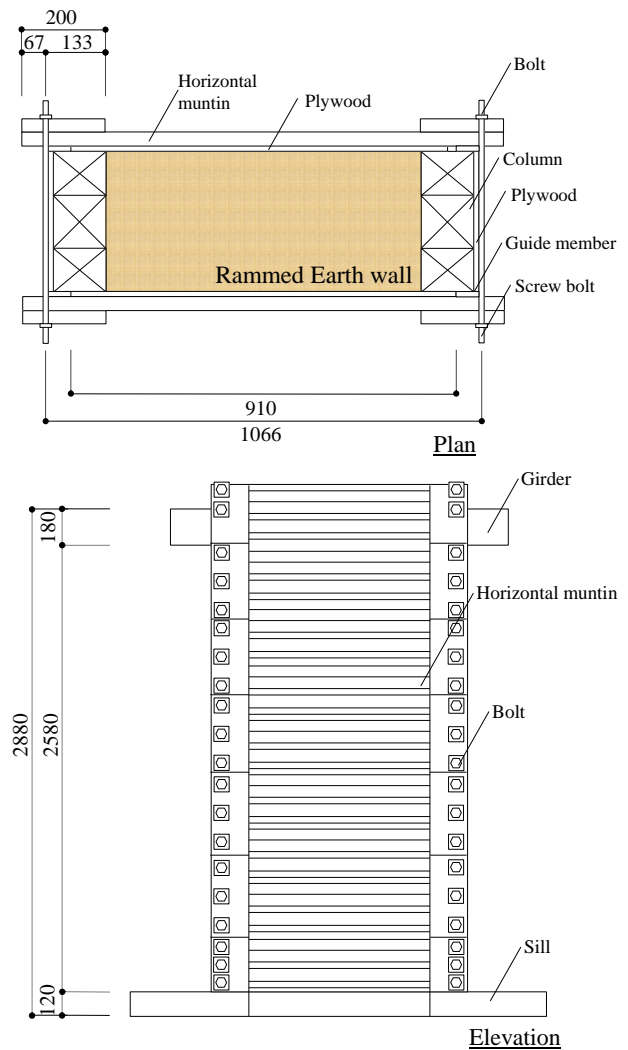


Fig.10 Constitution of form

Table.7 Results of full scale rammed earth wall

Item	Result
Type of wall	Stud wall framing finished on both sides
Volume cm ³	0.652
Number of workers to complete	33
Number of compaction times	885
Layer number	72
maximum swelling of form cm	8.75

に生じた等分布荷重は、横棧では 1.39(kN/m)となり、合板では 0.15(kN/m)となる。したがって、型枠に生じた等分布荷重の和は、1.54(kN/m)となり、これを保持し得る型枠設計が必要となることが分かる。

$$w = (\delta \times 384EI) / 5l^4 \quad (1) \text{式}$$

ここで、I:断面二次モーメント(mm⁴)

δ :たわみ(mm)

l :スパン(mm)

E:曲げヤング係数(kN/mm²)

w:等分布荷重(kN/m)

6. まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下にまとめる.

(1) 版築供試体による検討

1) 調合要因

圧縮強度が最大になる構成割合は, 荒木田土, 細骨材および消石灰の質量比が 1 : 0.5 : 0.15 であり, 体積変化率を考慮すると MgCl₂ 水溶液の濃度が 15% である.

2) 施工要因

圧縮強度は, 単に締固めエネルギーを増加させることにより大きくなるわけではなく, ランマーの落下高さ 30cm, 締固め回数 25 回および脱型材齢 7 日が最大となる.

(2) 実大の版築壁の試験施工

1) 施工における人工数

実大の版築壁の施工に関わった人工数は, 1 日 3 人工で 11 日間の作業で延べ 33 人工であった.

2) 側圧

実大の版築壁の型枠に生じた側圧は, 1.54(kN/m)であった.

以上の結果から, 側圧を考慮した型枠構成が必要であるものの, 版築供試体を用いた検討によって定めた調合と締固め方法で実大の版築壁の施工が可能であることが確認できた.

謝 辞

実験およびデータ整理では, 本学学部 4 年生・前田真佑君, 大文社寺建築(有)・枝松武君(当時・日本建築専門学校)の協力を得た. ここに記して謝意を表する.

注

本研究の手掛かりを得るために, 3 名の熟練の左官技能者へ伝統技法を用いた版築壁の築造方法についてのヒアリング調査を行った. その結果を付表に示す. 本報告ではこの結果を手掛りとして実験を構成した.

付表 熟練の左官技能者へのヒアリング結果

質問項目		回答	
材料	土	土の種類	関西: まさ土, 関東: 荒木田土
		土の粒度	土の粒子が過小だと割れやすい
	石灰	石灰の種類	一般的には消石灰(粗い方が良い)
	にがり	にがりの濃度	・ 65ℓの水に塩化マグネシウム 10kg(濃度 13.3%)を溶解 ・ 本当のにがり(海水)の方が強度大
	その他	土の保存方法	ブルーシートを被せて保存
	その他の材料	・ 粗骨材(天然砂利) ・ スサを入れることもある	
調合	調合比	材料の構成割合	土 6 : 消石灰 1(質量比)に, にがり水を土を握っても水が出てこないくらいまで入れる
		粗骨材の混合量	コンクリートと同程度
	材料の混合	材料の投入順	土→消石灰→にがり水の順
		混合時間	土の色が元に戻るまで
施工方法	使用道具	締固め用の道具	柱材を利用した「たこ」
	締固め方法	締固めの留意点	・ 型枠の隅や角から突いていく ・ あまり強く突かない
		施工前の層厚	一層の厚さは最大で 100mm
		施工後の層厚	ほとんど下がらない
	労働力	人工数	5~6名/m ³
		養生期間	7日程度
	その他	その他の施工方法	竹釘(L200mm程度)を壁厚の中心に数本打ち, 縄で繋ぐ
耐久性(8年)	表面性状	苔の付着	若干苔が付着
		ひび割れの発生	ひび割れなし

文 献

- 1) 例えば, Gernot Minke 著, 輿石直幸, 藤田香織監訳: 土・建築・環境—エコ時代の再発見, 西村書店, 2010
- 2) 例えば, 山下保博, 輿石直幸ほか設計: アース・ブリックス, 2011.7(<http://www.tekuto.com/works/index1.html> 2011.1.4 参照)
- 3) 畑中久美子ほか: セルフビルドによる土の実験住宅建設と性能測定に関する研究(その 1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.181-184, 2002.8
- 4) 社団法人地盤工学会: 入門シリーズ 1 地盤工学入門, p.198, p.200, 2000.7
- 5) 玉山豊ほか: たたき工法による人造石を用いた歩道用舗装体の開発とその環境特性, 土の基礎, 地盤工学会誌, pp.23-25, 2004.11