

論文 Article

版築供試体のインターロッキング効果に及ぼす供試体寸法の影響

原稿受付 2014 年 4 月 3 日

ものづくり大学紀要 第 5 号 (2014) 49~56

赤谷樹一郎^{*1}, 大塚秀三^{*2}, 荒巻卓見^{*3}, 降旗翔^{*4}^{*1} 三友エンジニアリング株式会社(ものづくり大学大学院 ものづくり学研究科 修了)^{*2} ものづくり大学 技能工芸学部 建設学科^{*3} 日本大学大学院理工学研究科博士後期課程建築学専攻(ものづくり大学大学院 ものづくり学研究科 修了)^{*4} ものづくり大学大学院 ものづくり学研究科

Effects of Specimen Size on Interlocking-effect of Rammed Earth Wall Specimen

Kiichiro AKATANI^{*1}, Shuzo OTSUKA^{*2}, Takumi ARAMAKI^{*3} and Sho FURIHATA^{*4}^{*1} Sanyu Engineering Co.,Ltd.

(Graduate, Graduate School of Technologists, Institute of Technologists)

^{*2} Dept. of Building Technologists, Institute of Technologists^{*3} Graduate student, Doctor's Degree Course, Graduate school of Science and Technology, Nihon University

(Graduate, Graduate School of Technologists, Institute of Technologists)

^{*4} Graduate School of Technologists, Institute of Technologists

Abstract

The purpose of this paper is to clarify effects of specimen size on interlocking-effect of rammed earth wall specimen. As a result, the following conclusions are obtained: 1) Compressive strength of specimens built 5-layers version becomes smaller as it approaches the single layer. 2) Change in mass tended to be smaller compaction energy increases. 3) Volume change will become small, if bundle hardening energy becomes large. 4) Volume change was not sealed curing. 5) The rate of a volume decrease suited the rate of a mass decrease, and proportionally relations by all the factors.

Key Words : Rammed Earth Wall Specimen, Interlocking-effect, Compaction energy, Compressive strength
Shape change

1. はじめに

版築壁は、土、細骨材、固化材および固化補助材を混合したものを突固めるといふ建築技法により構築し、日本では飛鳥時代から建物の壁や塀として使用されてきた¹⁾。一方で版築壁は、現場発土を主成分として自然由来の材料で構成できること、温湿度の調整機能を有する^{2),3)}こと、人力で施工可能なこと、シックハウス対策に有効なこ

となどからその技法が環境負荷低減につながるものであり、先進国においても見直されつつある^{4),5)}。しかし、版築壁の築造にあたっては、技能者の経験的な勘および伝聞継承された暗黙知に委ねられている部分が多く、工学的知見が体系立ってまとめられていないのが現状である。このことから、既存の版築壁と同等以上の圧縮強度を得るための施工方法および構成材料の割合(以下、構成割合と称する)などについて不明な点がある。

筆者らは、これまでにφ100×200mmの円柱供試体(以下、1段版築供試体と称する)を用いて圧縮強度および形状変化について検討してきた^{6)~8)}。その結果、Fig.1に示すように、圧縮強度は、ランマーの質量の違いに関わらず締固めエネルギーの増加に伴い大きくなる傾向を示した。この傾向は、最上ら⁹⁾の実験結果と同様の傾向を示している。しかしながら、実際の版築壁では、鉛直方向に積層して突固めていくため、高さ方向に伝達する締固めエネルギーの挙動と、これが圧縮強度および形状変化に及ぼす影響については不明な点が残る。

そこで本研究では、後述する版築供試体の固化機構のうちインターロッキング効果に着目して、構成材料を同一として締固めエネルギーおよび版築供試体の寸法を変化させた2種類の版築供試体を用いて、圧縮強度および形状変化に及ぼす影響について検討し、その内容を提示することを目的とする。

ここでは、版築壁を模擬したφ100×1000mm(以下、5段版築供試体と称する)およびφ100×200mmの1段版築供試体を対象として検討した結果を報告する。

2. 版築供試体の硬化および固化機構の仮定

構成材料に土、細骨材、消石灰(水酸化カルシウム)およびにがり水(塩化マグネシウム水溶液)を用いた版築供試体の固化機構は、物理的機構および化学的機構に大別して促えることができる。

2.1 物理的機構(インターロッキング効果)

インターロッキング効果¹⁰⁾とは、土粒子を密実に締固めることで土粒子間の表面摩擦により固化する機構である。その際に、土粒子間の間隙水が多量となると表面摩擦が低減し固化を弱めるため、含水比を管理することが重要となる。また、この効果は、同じ種類の材料であっても粒子配列や締固め方法などでも変化する¹¹⁾。

2.2 化学的機構

(1) ポゾラン反応

ポゾラン反応¹²⁾は、土粒子に含まれるシリカまたはアルミナが水酸化カルシウムと反応してケイ

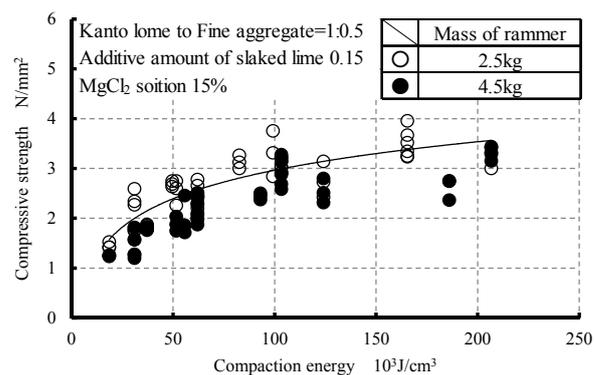
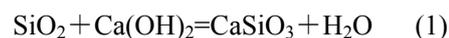


Fig.1 Relationship between compaction energy and compressive strength

酸カルシウムと水を生成する反応である。ケイ酸カルシウムは、不溶性であり版築供試体に結晶として析出するため固化に寄与すると考えられる。シリカと水酸化カルシウムによる反応式を(1)式に示す。



(2) 消石灰の硬化反応

消石灰の硬化反応¹³⁾は、消石灰と空気中の二酸化炭素が反応して炭酸カルシウムを生成する反応である。炭酸カルシウムは、ケイ酸カルシウムと同様に不溶性であり版築供試体内に結晶として析出するため固化に寄与すると考えられる。反応式を(2)式に示す。



ポゾラン反応および消石灰の硬化反応では、いずれも反応の際に H_2O が生成されるが、構成材料の混合時に加える水量と比較すると極めて少ないため、固化への影響をほとんど及ぼさないと考えられる。

(3) 塩化マグネシウム水溶液の反応

塩化マグネシウム水溶液の反応は、以下の2つの効果が挙げられ、前述の固化機構の補助的役割(固化補助材)を果たすと考えられる。

1) 塩化マグネシウム水溶液の結晶水による効果

塩化マグネシウムは、余分な水分を結晶水として取込む効果がある。これにより、粒子間の水分を取込むことになり、インターロッキング効果を増進させることに繋がるものと考えられる。結晶水として取込んだ水分は、定常環境下で蒸発することはない。

2) 塩化マグネシウム水溶液の塩析効果

塩析効果とは、無機塩が水を強く引寄せため

水の活動度が低下し、水に溶けにくい物質の溶解度を低下させる効果である。そのため、ポズラン反応および消石灰の硬化反応で生成された水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムが版築供試体内で結晶化しやすくなると考えられる。その結果、版築供試体の固化を早めることに繋がる。

以上が本研究における版築供試体の硬化および固化機構の仮定である。この仮定に基づけば版築供試体の圧縮強度への影響は、物理的機構では締固めエネルギーが支配的であり、化学的機構では材料の構成割合が支配的であると考えられる。本報告では、物理的機構のうちインターロッキング効果に着目し、版築供試体の寸法の相違が圧縮強度および形状変化に及ぼす影響を検討した。

3. 実験概要

3.1 実験の要因と水準

実験の要因と水準を Table.1 に示す。1層あたりの締固め回数は、25回、50回および100回の3水準とした。養生方法は、気中養生および封かん養生の2水準とした。

3.2 使用材料

使用材料を Table.2 に示す。使用材料は、土に北関東で産出する荒木田土、細骨材に砕砂、固化材に工業用消石灰(JIS R 9001)、固化補助材に塩化マグネシウム水溶液・6水和物とした。

3.3 版築供試体の概要

(1) 構成割合

構成割合を Table.3 に示す。5段版築供試体および1段版築供試体の構成割合は、質量比で荒木田土：細骨材：消石灰＝1：0.5：0.15、塩化マグネシウム水溶液の濃度が15%一定とした。また、塩化マグネシウム水溶液の加水量は、JIS A 1210：2009 突き固めによる土の締固め試験方法に定められる最適含水比まで調整した。

(2) 版築供試体の寸法と締固め回数

本実験では、5段版築供試体(φ100×1000mm)と、各段と同じ締固めエネルギーになる1段版築供試体(φ100×200mm)の2種類の版築供試体を作製して検討を行った。

各供試体における締固めエネルギーの概念を

Table.1 Factors and levels of experiment

Factors	Levels
Number of compaction times Times	25, 50, 100
Curing method	Atmospheric curing Sealed curing

Table.2 Materials

Material	Type	Property/Component
Soil	Kanto loam	Previous report ⁶⁾
Fine aggregate	Crushed sand	Air-dry density:2.61g/cm ³ Fineness modulus:2.75% Water absorption:2.30%
Solidification material	Slaked lime	JIS R 9001 Slaked lime
Aids solidification material	MgCl ₂ solution	MgCl ₂ ・6 hydrate Purity : 98.9% over

Table.3 Ratio of materials, Mass ratio

Constituent material	Ratio of materials
Kanto loam : Fine aggregate : Slaked lime	1 : 0.5 : 0.15
MgCl ₂ solution additive amount %	18.4
MgCl ₂ solution of concentration %	15

Fig.2, 5段版築供試体および切断後の5段版築供試体の外観を Phot.1 に示す。ここでは、各段においてその上段における締固めエネルギーが伝達されて累積されるものと仮定している。5段版築供試体の作製には、φ100×200mmの円柱鋼製型枠を5段縦に連結して使用した。締固めは、4.5kgのランマーを使用し、ランマーの落下高さを30cmとした。5段版築供試体は、1段当たり5層とし1層あたりの締固め回数を25回、50回および100回の3水準とした。締固めエネルギーは、Ralph R.Proctor¹⁴⁾の締固めエネルギーに関する下式により算出した。

$$E_C = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V}$$

ここで、 E_C : 締固めエネルギー(J/cm³)

W_R : ランマーの重量(kgf)

H : ランマーの落下高さ(cm)

N_B : 1層あたりの突固め回数(回)

N_L : 層の数

V : 供試体の容積(cm³)

5段版築供試体の作製後は、圧縮強度試験の材齢にコンクリートカッターを使用して各段の高さが200mmになるように切断した。

一方、1段版築供試体は、φ100×200mmの円柱供

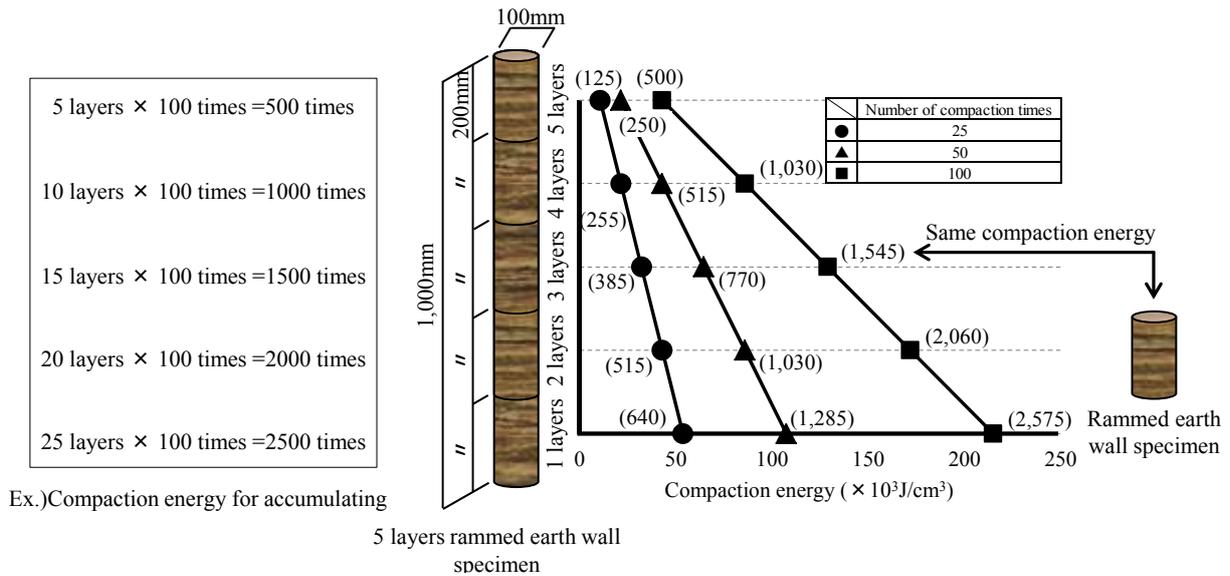


Fig.2 Concept of compaction energy in each specimen



Phot.1 Appearance of 5 layers rammed earth wall specimen and rammed earth wall specimen after cutting

試体として 5 段版築供試体の各段に累積される締固めエネルギーと同一となる締固め回数(Fig.2 参照)により作製した。なお、層数、ランマーおよびランマーの落下高さは、5 段版築供試体の作製方法と同様である。

3.4 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版築供試体の形状変化および質量変化とした。5 段版築供試体の形状は、JIS B 7512 : 2005 に規定されるコンベックスルールを用いて高さを測定し、JIS B 7507 : 1993 に規定されているノギスを用いて直径を測定し、作製日に対する試験日の体積比で評価した。直径は、5 段版築供試体の 5 段目、3 段目および 1 段目の中心を直行する 2 方向、高さは 5 段版築供試体の対面する 2 方向でそれぞれ測定し、その平均値を用いた。また、併せて 5 段版築供試体の質量も測定した。いずれの試験とも試験材齢は、28 日、56

日、91 日、183 日および 365 日とした。

4. 結果および考察

4.1 締固めエネルギーの違いが圧縮強度に及ぼす影響

(1) 圧縮強度と段数の関係

圧縮強度と段数の関係を Fig.3 に示す。同図には、5 段版築供試体と 1 段版築供試体の結果をプロットした。5 段版築供試体および 1 段版築供試体の圧縮強度は、いずれの材齢においても、締固め回数が増加するにしたがって大きくなる傾向を示している。5 段版築供試体の圧縮強度は、養生方法および材齢に関わらず締固め回数 25 回および 50 回では 1 段目に近づくにつれて小さくなる傾向を示した。また、締固め回数 100 回では、5 段目から 3 段目まで概ね大きくなるが 3 段目から 1 段目にかけて小さくなる傾向を示した。

1 段版築供試体の圧縮強度は、締固め回数に関わらず 1 段目に向かって大きくなる傾向を示した。また、この傾向は材齢の経過に伴い顕著に現れる。

(2) 5 段版築供試体と版築供試体における締固めエネルギーと圧縮強度の関係

締固めエネルギーと圧縮強度の関係を Fig.4 に示す。圧縮強度は、5 段版築供試体では、締固めエネルギーが増加しても追従しない傾向を示す反面、1 段版築供試体では、締固めエネルギーの増加に伴って大きくなる傾向を示した。5 段版築供

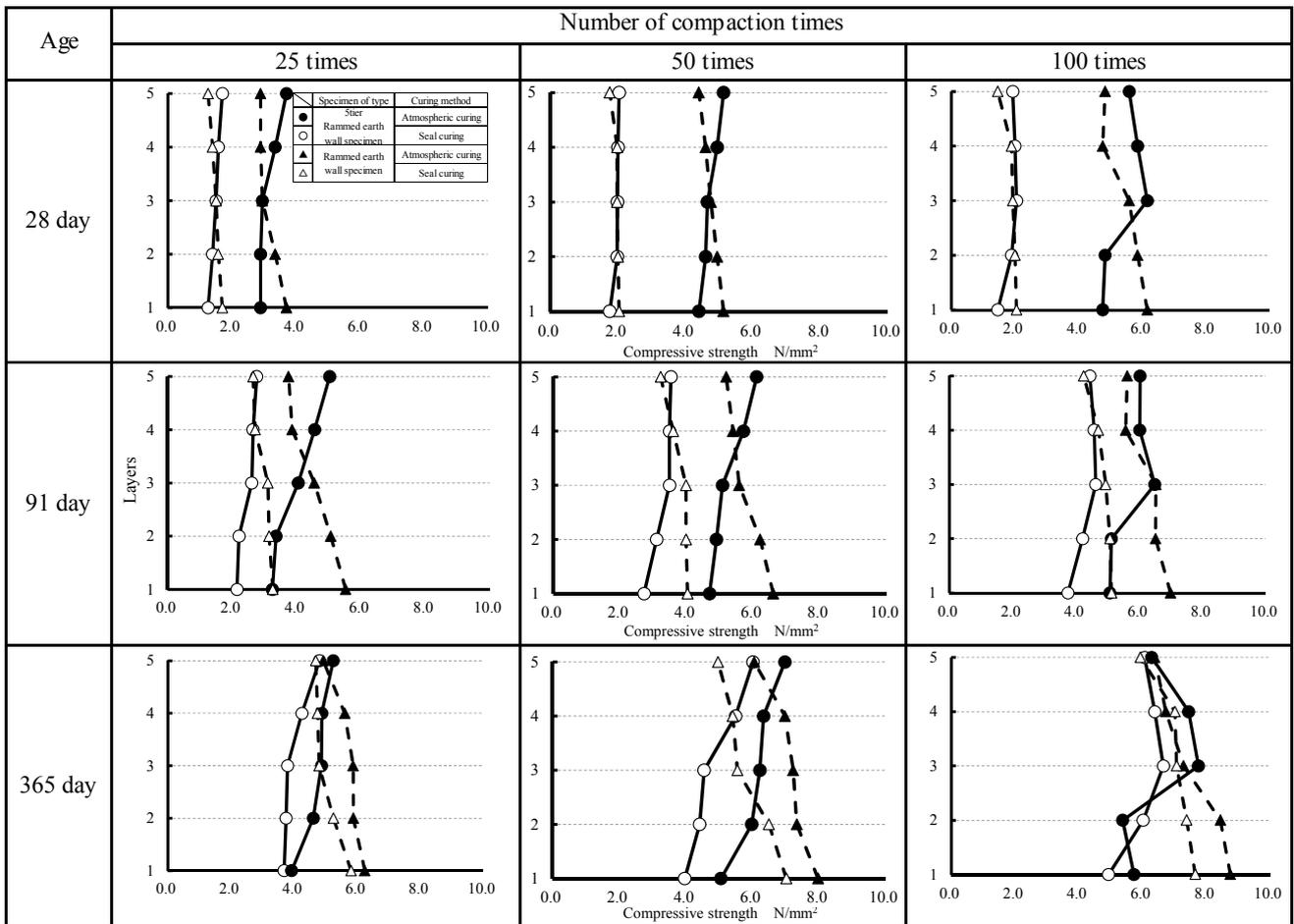


Fig. 3 Relationship between compressive strength and layers

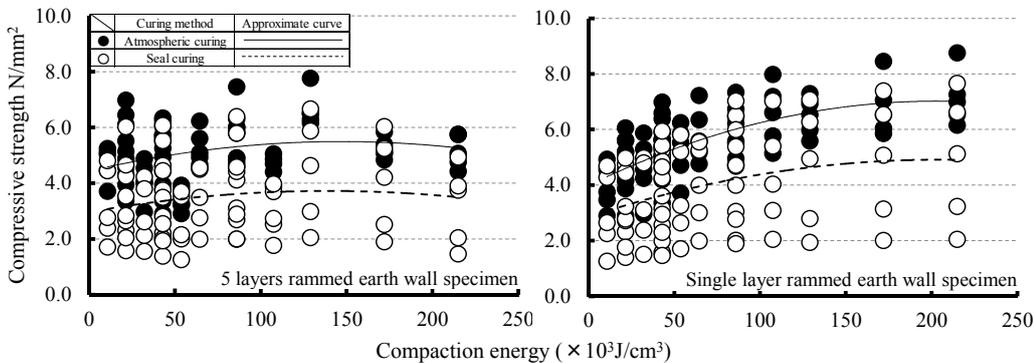


Fig. 4 Relationship between compaction energy and compressive strength

試体では、日野ら¹⁵⁾が示すオーバーコンパクションになると圧縮強度の低下に繋がる現象と一致を見る一方で、同一に締固めエネルギーを加えている1段版築供試体では、圧縮強度の低下がみられなかった。このことから5段版築供試体では、締固めエネルギーが下部まで伝達されていないことを示唆しているものと考えられる。

(3) 同一締固めエネルギーにおける5段版築供試体と1段版築供試体の圧縮強度の比較

1段版築供試体の圧縮強度と5段版築供試体の圧縮強度の関係を Fig.5 に示す。同図は、全材齢

の結果をプロットしたものである。

圧縮強度は、締固め回数および養生方法に関わらず5段版築供試体の5段目および4段目までは1段版築供試体より大きくなる傾向を示した。

また、3段目では1段版築供試体に対して同等であった。一方で、2段目および1段目の5段版築供試体の圧縮強度は、1段版築供試体に対して小さくなった。以上により、ある程度の層数になると、上部に堆積される層における締固めエネルギーが下部へ伝達されにくくなることを示唆するものと考えられる。

4.2 締固めエネルギーの違いが形状変化に及ぼす影響

(1) 締固めエネルギーと形状変化の関係

締固めエネルギーと形状変化の関係を Fig.6 に

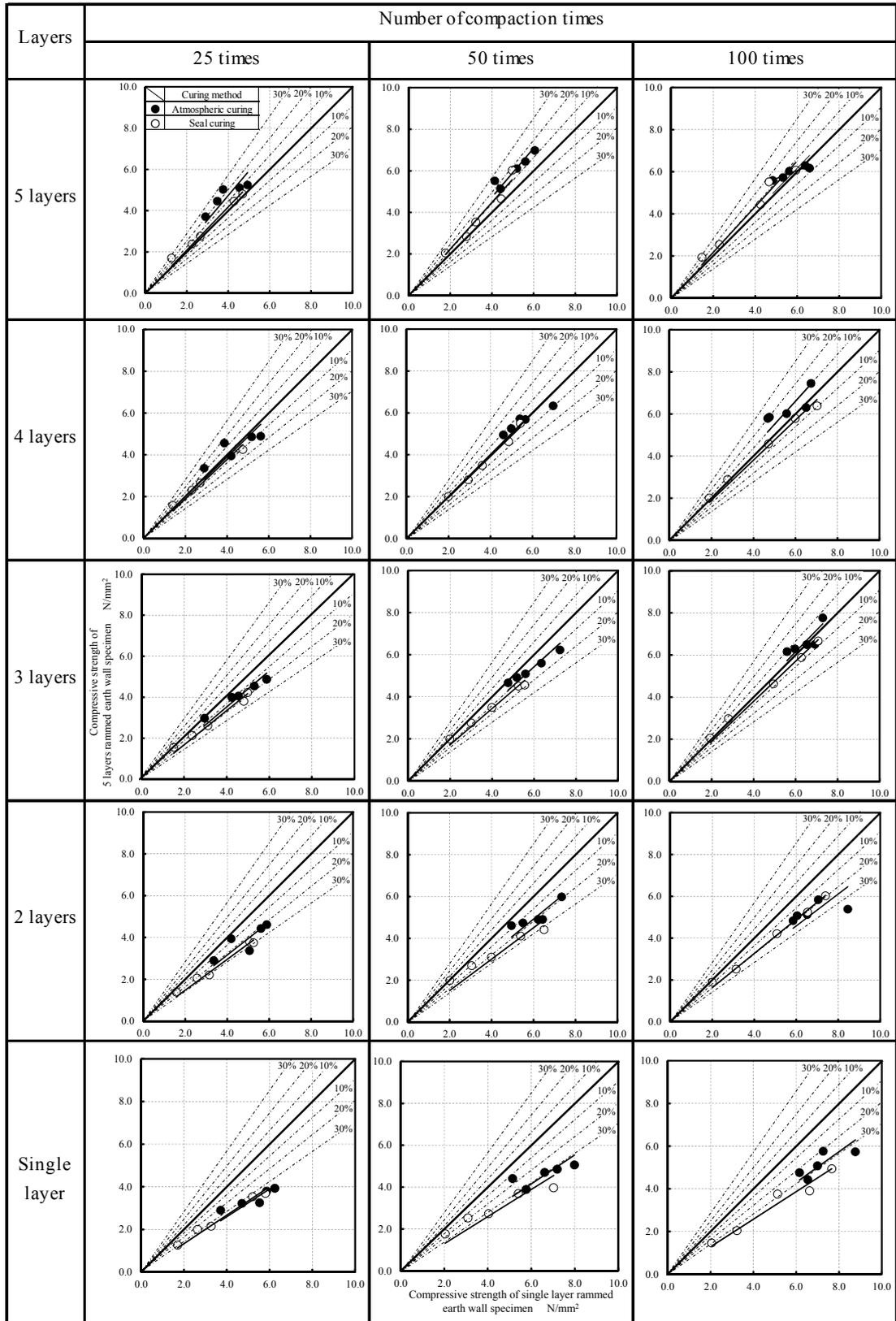


Fig.5 Relationship between compressive strength of single layer rammed earth wall specimen and compressive of strength 5 layers rammed earth wall specimen

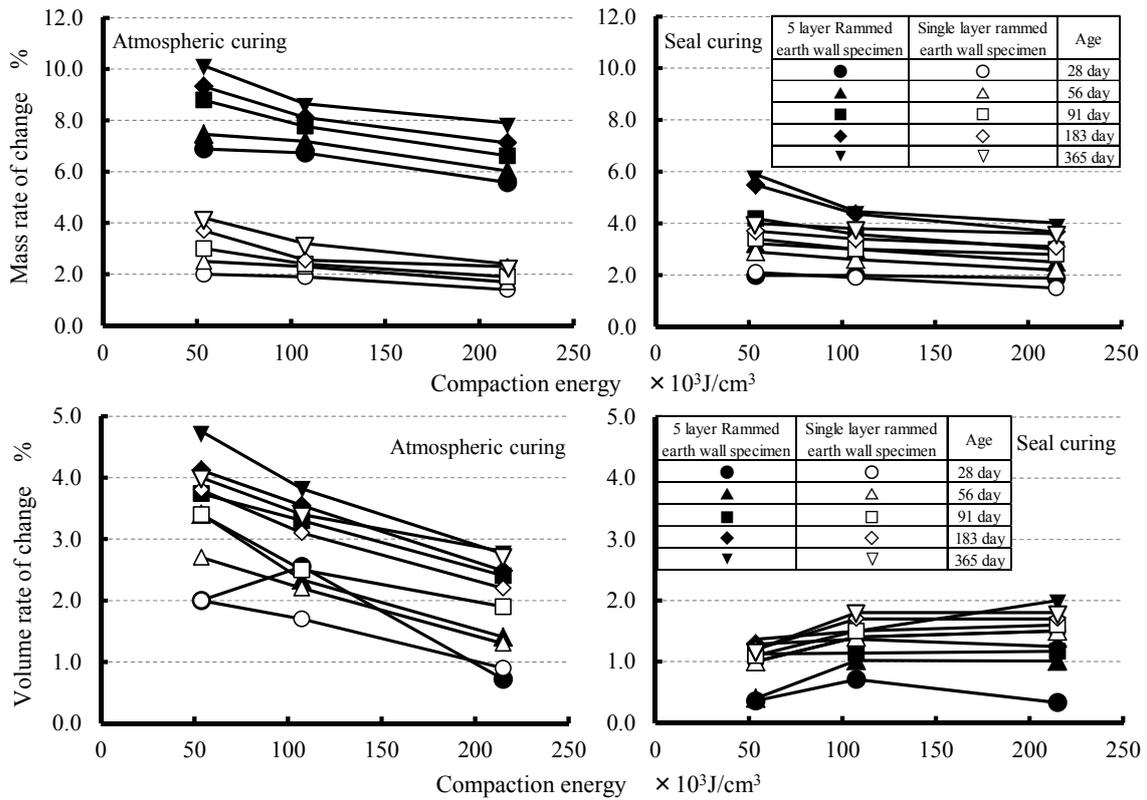


Fig.6 Relationship between compaction energy and shape change

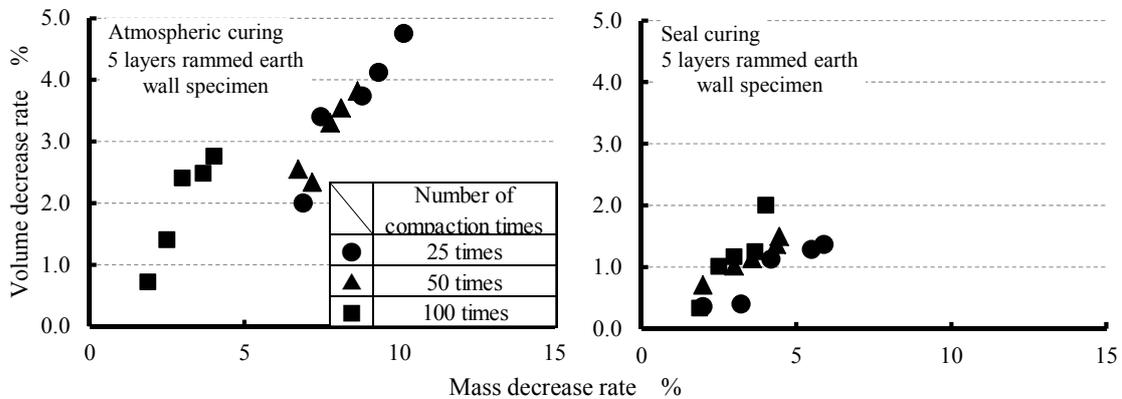


Fig.7 Relationship between mass decrease rate and volume decrease rate

示す。質量変化は、供試体の種類、材齢および養生条件に関わらず締固めエネルギーが大きくなるにつれて小さくなる傾向を示している。これは、締固めエネルギーが大きくなることで供試体の土粒子間の空隙が少なく密実になり、供試体の内部の水分が逸散しにくくなったためと考えられる。質量変化を供試体の種類で比較すると、気中養生では1段版築供試体の方が5段版築供試体に比べ小さくなる傾向を示す一方で、封かん養生では、供試体の違いによる変化はほとんど見られなかった。

気中養生における体積変化は、供試体の種類に

関わらず締固めエネルギーが大きくなるにつれて小さくなる傾向を示した。これは、前述したように締固めエネルギーが大きくなることで供試体が密実になり、供試体の内部の水分が逸散しにくくなったためと考えられる。封かん養生における体積変化は、供試体の種類に関わらず締固めエネルギーが大きくなってほとんど変化はみられなかった。これは、封かん養生では、締固めエネルギーの違いに関係なく水分の逸散が少ないためと考えられる。

(2) 質量減少率と体積減少率の関係

質量減少率と体積減少率の関係を Fig.7 に示す。

体積減少率は、いずれの締固め回数および養生条件においても質量減少率と比例的関係にあった。気中養生においては体積減少率および質量減少率は、締固め回数が多くなるにつれて小さくなる傾向を示す一方で、封かん養生では気中養生に比べ体積変化率および質量変化率ともに小さくなる傾向を示した。

5. まとめ

本研究における、圧縮強度および形状変化に及ぼす影響についての検討に関して得られた知見を以下まとめる。

(1) 締固めエネルギーと圧縮強度の関係

- 1) 5段版築供試体は、1段版築供試体と比べ締固めエネルギーの圧縮強度への追従性が低下した。
- 2) 5段版築供試体の5段目および4段目までは、1段版築供試体より大きくなる傾向を示した。一方で、3段目～1段目では、1段版築供試体に対して小さくなった。

これらの結果から、ある程度の層数になると、上部に堆積される層における締固めエネルギーが伝達されにくくなることが示唆された。

(2) 締固めエネルギーと形状変化の関係

- 1) 質量変化は、締固めエネルギーが大きくなると小さくなる傾向を示した。
- 2) 体積変化は、気中養生では、締固めエネルギーが大きくなると小さくなる傾向を示したが、封かん養生では、ほとんど変化はみられなかった。
- 3) 体積減少率は、いずれの締固め回数および養生条件においても質量減少率と比例的関係にあった。

【謝辞】

本研究を行うにあたり、有限会社渡辺建材からの材料の提供を受けた。実験およびデータ整理では、(株)安藤ハザマ・川瀬翔太氏(当時・ものづくり大学学部生)をはじめとしたものづくり大学学生にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1)高橋誠一：古代飛鳥の国際性と文化交渉—広域的都市計画と要塞化—, 東アジア文化交渉研究 5号, pp.307-325, 2012.12
- 2)福應浩ほか：NHL(天然水硬性石灰)の環境性能に関する基礎的研究—(その1)NHL 単体環境性能と利用用途—, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.705-708, 2005.2
- 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概要集, pp.181-184, 2002.8
- 4)例えば, Gernot Minke 著, 興石直幸, 藤田香織：土・建築・環境 - エコ時代の再発見, 西村書店, 2010
- 5)例えば, 金子智子, 寺坂久美設計：版築のある家 2007.6(<http://www.satokane.com> 2012.7.1 参照)
- 6)赤谷樹一郎, 大塚秀三ほか：荒木田土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, 日本建築学会関東支部研究報告集 I, pp.41-44, 2012.3
- 7)赤谷樹一郎, 大塚秀三ほか：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, ものづくり大学紀要, 第3号, pp.42-49, 2012.6
- 8)川瀬翔太, 大塚秀三, 赤谷樹一郎ほか：伝統工法による版築壁の圧縮強度および形状変化に及ぼす調合および施工要因の影響, 日本建築工上学会 2012 年大会学術講演会研究発表論文集, pp.223-226, 2012.10
- 9)最上武雄, 久野悟郎：土の突固めについて (I), 東京大学理工学研究報告第3巻第7.8号, pp.48-54, 1949.7・8
- 10)春山元寿：インターロッキング, 土と基礎, Vol.31, No.5, pp.91-92, 1983.5
- 11)平川修治ほか：締固め土の圧縮・強度特性, 福山大学工学部紀要第11号, pp.41-48, 1989.3
- 12)玉山豊ほか：たたき工法による人造石を用いた歩道用塗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
- 13)船引雅人ほか：消石灰の炭酸化反応を利用した真空加圧成形材の物理特性に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第25巻, pp.45-48, 2002.3
- 14)Ralph R.Proctor : Fundamental Principles of Soil Compaction, Engineering News Record, 1933.8
- 15)日野剛徳ほか：浚渫改良土による盛土材料の一軸圧縮・コーン指数・締固め特性, 第42回地盤工学研究発表会(名古屋), pp.615-616, 2007.7