



煉瓦の凍害機構に関する検証実験*

中 村 大¹ 後 藤 隆 司² 伊 藤 陽 司³
山 下 聡⁴ 鈴 木 輝 之⁵ 山 崎 新 太 郎⁶

Verification Experiment of the Mechanism of Frost Damage to Bricks

by Dai NAKAMURA^{a*}, Takashi GOTO^b, Yoji ITO^b, Satoshi YAMASHITA^c,
Teruyuki SUZUKI^c and Shintaro YAMASAKI^a

- a. Research Associate, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology, Koen-cho 165, Kitami, 090-8507 JAPAN
(*Corresponding author E-mail: dnaka@mail.kitami-it.ac.jp)
b. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology
c. Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kitami Institute of Technology

In Kitami City, Hokkaido, cracks have been found in bricks, seemingly due to frost damage have been found. In this research, we considered three different mechanisms of frost damage such as frost heave phenomenon, one-dimensional freeze-thaw phenomenon, and closed-type freeze-thaw phenomenon.

We conducted frost heave experiment and two kinds of laboratory freeze-thaw experiments in order to verify the actual mechanism of the formation of the cracks in the bricks.

From the experimental results, it has been confirmed that frost heave phenomenon does not occur in bricks and that cracks does not occur in bricks due to simple one-dimensional freeze-thaw phenomenon.

In addition, if bricks do not melt completely during repeated freezing leaving some frozen parts and then the bricks refreeze, the melted parts refreeze surrounded by the frozen parts and cracks then appear in the bricks.

In this research, this mechanism of frost damage has been defined as closed-type freeze-thaw phenomenon.

This mechanism of frost damage is different from those considered in the past.

In this article, this new mechanism of frost damage will be described.

KEY WORDS: Brick, Frost Damage, Freeze-Thaw, Frost Heave Phenomenon, One-Dimensional Freeze-Thaw Phenomenon, Closed-Type Freeze-Thaw Phenomenon

1. は じ め に

北海道北見市内において、凍害が原因と思われる煉瓦のひび割れが確認された。Fig. 1 にその一例を示す。著者らはこの煉瓦のひび割れの発生機構を解明する目的で、現地調査と暴露実験を行った¹⁾。現地調査の結果から、日当たりの良い場所に設置された煉瓦にひび割れが多く発生すること、ひび割れは煉瓦の突き出た部分で発生することが明らかとなった。さらに、暴露実験の結果から、2月下旬から3月下旬にかけての晩冬に、煉瓦にひび割れが発生することも明らかとなった。また、著者らは、煉瓦にひび割れが発生する際、以下のような特徴的な温度分布となっていることも確認した。晩冬、煉瓦は日中の暖気で融解するが、こ

の際、煉瓦が完全に融解せず、凍結部分が残ったままで夜を迎えると、日中に発生した融解部分は夜間の冷気によって閉じこめられるように再凍結する。

煉瓦などの多孔質体の建設材料にみられる凍害現象は、一般的に、素地中の水分が凍結する際の容積増加に起因すると考えられてきた。例えば、Thomas²⁾、Watson³⁾および Powers⁴⁾らは、間隙中の水分が氷結する際の約9%の体積膨張圧が、煉瓦の凍害破壊に起因すると考えた。

一方、Penner⁵⁾や Everett⁶⁾は、一次元の冷却に伴う、間隙中の氷の結晶成長(氷晶分離凍結)、すなわち凍上現象の概念を凍害に適用した。近年では、この氷晶分離凍結の概念を用いて、煉瓦と同様の多孔質材料である岩石の凍害現象を明らかにしようという試みも行われている(例えば、Ishizaki⁷⁾や Akagawa and Fukuda⁸⁾など)。

中村ら⁹⁾は、三次元と一次元の冷却方法における凍害実験を行い、一次元の冷却方法における凍害性状が実際に発生する煉瓦の凍害性状に非常に近いことを報告している。三次元冷却の場合、試験片周囲から凍結が開始し、試験片内部に未凍結の水分が閉塞される。さらに凍結が進むにつれて、等方的に試験片内部から外部に向かって圧力が発生し、亀裂が放射状に発生する。一方、一

*2010年8月5日受付 2011年2月18日受理

1. 普通会員 北見工業大学 工学部社会環境工学科 助教
2. 普通会員 北見工業大学 工学部社会環境工学科 准教授
3. 普通会員 北見工業大学 工学部社会環境工学科 准教授
4. 北見工業大学 工学部社会環境工学科 教授
5. 北見工業大学 工学部社会環境工学科 教授
6. 北見工業大学 工学部社会環境工学科 助教
[著者連絡先] FAX: 0157-23-9408 (北見工業大学・中村)

E-mail: dnaka@mail.kitami-it.ac.jp

キーワード: 煉瓦, 凍害, 凍結融解, 凍上現象, 一次元の凍結融解現象, 閉塞型の凍結融解現象

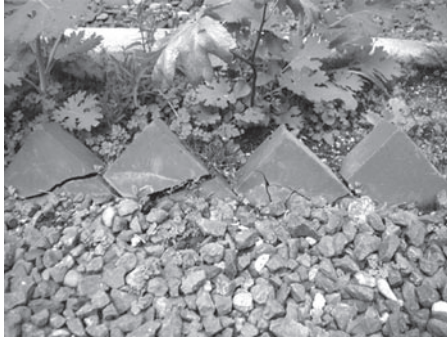


Fig.1 Frost damage of bricks in Kitami city, Hokkaido.

次元冷却の場合、冷却方向と同一方向への氷の生成に伴って、一方向への圧力が発生する。亀裂は、冷却方向と直角に、層状に発生する。また、中村ら⁹⁾は、三次元冷却では冷却速度が速い方が、一次元冷却では冷却速度が遅い方が、凍害破壊を起こしやすいことも報告している。

以上を踏まえて、本研究では次のような3つの凍害機構を想定した。一つは多孔質体を一次元的に凍結させて発生する凍上現象、もう一つは単純な一次元の凍結融解現象、さらに、暴露実験で確認された繰返し凍結融解時に発生する特徴的な温度分布によって引き起こされる凍害現象である。以降、この凍害現象を閉塞型の凍結融解現象と定義し、議論を進めていく。本研究では、これらの凍害機構、それぞれについて検証実験を行い、北海道北見市で確認された煉瓦の凍害機構を解明することに取り組んだ。

2. 本研究で想定した3つの凍害機構

本研究で想定した3つの凍害機構を以下にまとめる。Fig. 2は本研究で想定した凍上現象を、Fig. 3は一次元の凍結融解現象を、Fig. 4は繰返し凍結融解時に発生する閉塞型の凍結融解現象を、それぞれ模式的に表している。

これらの凍害機構は、主に、初冬と晩冬に発生する。厳冬期には、外気温がプラスまで上昇することはない、煉瓦が完全に凍結し、定常状態になってしまうため、凍害現象は発生しない。また、積雪の多い厳冬期において、煉瓦の上部に積雪が存在する場合には、煉瓦が断熱されてしまい、凍結の影響を受けないため、この場合にも凍害現象は発生しない。

厳冬期を除く、初冬と晩冬では、Fig. 3に示した一次元の凍結融解現象を引き起こす温度分布になることが多い。Fig. 2の凍上現象や、Fig. 4の閉塞型の凍結融解現象を引き起こす温度分布が発生することは稀である。

以上の3つの凍害機構が、独立的に、もしくは複合的に作用して、煉瓦にひび割れを発生させたと考えられる。

2・1 凍上現象

本研究では、以下のような凍上現象のプロセスを考えた。

冬期、煉瓦は表面から寒気によって冷却される。これに伴って、煉瓦内部には温度勾配が生じ、0℃線が熱流方向に直行して深部へ移動するが、寒気の影響と地熱の影響とが釣り合う部分で、0℃線が停滞する。0℃線より上方の凍結部分では、潜在するクラックや空隙中の水分が凍結して間隙氷となるが、一部は不凍水となって、間隙氷と共存する。間隙氷は時間の経過と共に不凍水を吸収しながら成長するが、この際に発生する体積膨張は、潜在するクラックや空隙中に、クラックを押し広げる方向の内部圧力を発生する。この内部圧力の増加に伴い、クラックや空隙が押し広げられる。その後、クラックが伸展、結合し、煉瓦が割れる。

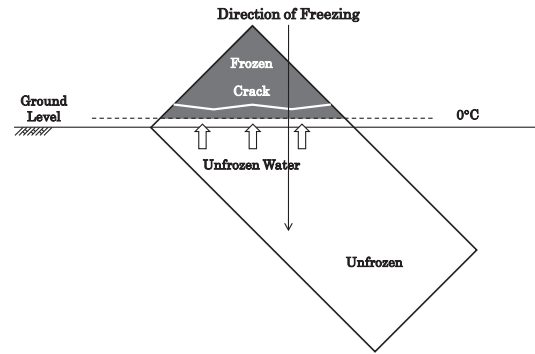


Fig.2 Schematic image of frost heave phenomenon.

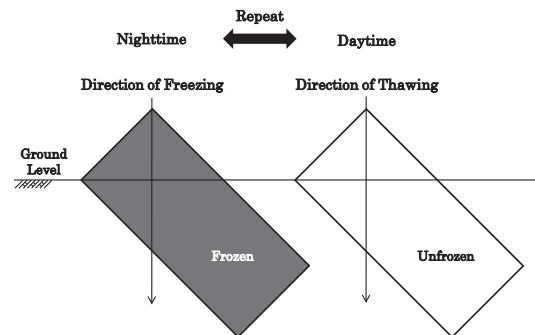


Fig.3 Schematic image of one dimensional freeze-thaw phenomenon.

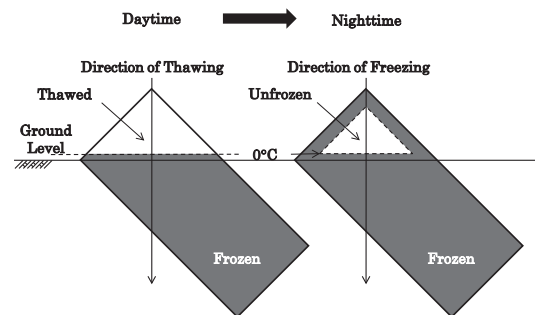


Fig.4 Schematic image of closed-type freeze-thaw phenomenon.

ただし、空隙半径が大きく、透水性の高い多孔質材料では、間隙中で発生した凍結に伴う内部圧力は、間隙水を下方の未凍結部へと移動させてしまう。この場合、内部圧力は材料に作用しないため、材料の割裂が起こらず、凍上は発生しない。

さらに、凍上では、その多孔質材料が保持できる不凍水の量、その材料が凍結面へと供給できる不凍水量も重要な要素となる。不凍水の量は、多孔質材料の比表面積に大きく影響を受けるが、比表面積が小さい場合には、凍上は発生しない。

また、強度の高い材料では、凍上が発現するまで、長時間を要する傾向がある。これは、強度の高い材料の場合、材料を割裂するために、より大きな内部圧力を必要とするためである。凍上の場合、内部圧力の増加は、不凍水の流入とそれに伴う間隙氷の成長によってもたらされる。このため、煉瓦のように比較的強度が高い材料において凍上が発生する場合、0℃線が煉瓦中に長時間留まる必要があると考えられる。そこで、本研究で想定している凍上現象では、0℃線が極めて遅く移動する（煉瓦中で0℃線が停滞する）ことを前提としている。

2・2 一次元の凍結融解現象

本研究では、以下のような一次元の凍結融解現象のプロセスを考えた。

晩冬や初冬、煉瓦は夜間の寒気によって表面から冷却される。これに伴って、煉瓦内部には温度勾配が生じ、上記の凍上現象と同様に、0℃線が熱流方向に直行して深部へ移動していく。0℃線より上方の凍結部分では、クラックや空隙中の水分が凍結して間隙水が形成される。この際に発生する体積膨張は、潜在するクラックや空隙中に、クラックを押し広げる方向の内部圧力を発生する。やがて0℃線は煉瓦の最深部まで達し、煉瓦は完全に凍結する。その後、日の出と共に、日射を受け、煉瓦は表面から融解していく。これに伴って、煉瓦内部には再度、温度勾配が生じ、0℃線が深部へと移動していく。0℃線より上方では、クラックや空隙中に形成されていた間隙水が融解する。やがて0℃線は煉瓦の最深部まで達し、煉瓦は完全に融解する。以上のような一次元の凍結融解を繰り返すことにより、煉瓦内部にはダメージが蓄積され、最終的に割れる。

ただし、空隙半径が大きく、透水性の高い多孔質材料では、空隙中で発生した凍結に伴う内部圧力は、間隙水を下方の未凍結部へと移動させてしまう。この場合も、凍上現象と同様、内部圧力は材料に作用しないため、材料の割裂は起こらない。

また、上記のようなプロセスで凍結融解を繰り返すため、凍上現象のように0℃線は停滞せず、常に移動しつづけることとなる。本研究で想定している一次元の凍結融解現象では、0℃線は凍上現象と較べて、早く移動することとなる。

2・3 閉塞型の凍結融解現象

本研究では、以下のような閉塞型の凍結融解現象のプロセスを考えた。

晩冬、夜間の寒気によって最深部まで完全に凍結していた煉瓦が、日中の日射によって表面から融解していく。これに伴って、煉瓦内部には温度勾配が生じ、0℃線が深部へと移動していく。0℃線より上方では、クラックや空隙中に形成されていた間隙水が融解する。その後、0℃線は地表面付近に達し、煉瓦の上部は融解する。晩冬は日差しが弱いため、煉瓦は完全には融解しない。

煉瓦の下部は凍結したままであるが、この状態で夜を迎えると、日中に発生した融解部分は夜間の冷気によって閉じこめられるように再凍結することとなる。このため、煉瓦の上部に存在する水分は閉塞するように凍結し、高まった内部圧力によって、煉瓦が割れる。

これは、中村ら⁹⁾が報告している三次元冷却によって発生する凍害破壊と、ほぼ同様の圧力の発生機構である。つまり、本研究で想定している閉塞型の凍結融解現象は、特殊な温度条件の下で発生した、三次元の凍結融解現象ということもできる。

ただし、中村ら⁹⁾の実験は、試験片を周囲から凍結させるというもので、現実には発生しえない温度条件である。本研究で想定している閉塞型の凍結融解は、再凍結の際、煉瓦の下部は凍結しており、0℃線と平行に凍結面が形成されている。凍結面より下部は、間隙水の凍結により、強度が増加し、止水された状態となっている。この凍結面に向かって、煉瓦の上部から冷気が進行していき、閉塞状態を作り出す。この点が、本研究と中村ら⁹⁾の研究との大きな違いである。

3. 実験に使用した煉瓦の物理的性質

実験には、市販の普通煉瓦を用いた。生産は、北海道江別市昭和窯業株式会社である。

主成分は、二酸化けい素、酸化アルミニウム、酸化鉄で、黄

Table 1 Basic physical properties of common brick use to experiment and brick sampled on the site.

Types of Brick		Common Brick Use to Experiment	Brick Sampled on the Site
Water Absorption Ratio (%)		12.2	12.2
Porosity (%)		24.7	24.9
Bulk Density		1.98	2.01
Apparent Density		2.63	2.68
Elastic Wave Velocity (km/s)	Dry Condition	2.49	2.60
	Wet Condition	2.97	3.04

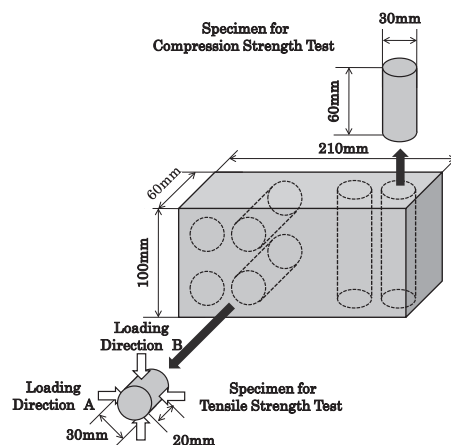


Fig.5 Sampling of test pieces for compressive strength test and tensile strength test.

褐色粘土が使用されている。著者らが行った粉末X線回折では、実験に使用した煉瓦には粘土鉱物は確認されなかった。煉瓦は1180℃という高温で焼成されるため、材料に粘土鉱物等が含まれていたとしても、その結晶構造は焼成過程で破壊されてしまうと考えられる。

実験に使用した煉瓦の物理的性質を把握する目的で、種々の物性値試験を行った。また、凍害が確認された現地において採取した煉瓦の物性値との比較も行った。Table 1にその基本物性を示す。表から、購入した普通煉瓦と現地から採取した煉瓦の基本物性には、特に違いは見られなかった。

これらに加えて、本研究では、一軸圧縮強度、円盤圧裂引張強度、細孔分布、比表面積についても測定を行なった。以下に、試験方法、実験結果についてまとめた。

3・1 試験方法

3・1・1 一軸圧縮強度試験 万能材料試験機を用い、荷重速度は1000N/sで試験を行った。

煉瓦に対して、Fig. 5のようにボーリングを行い、供試体采取了。供試体は円柱形で、直径30mm、長さ60mmである。100℃のオーブンで24時間かけて乾燥させた乾燥供試体と、蒸留水中で真空ポンプを用いて24時間かけて脱気した後、数日間放置し、重量変化がなくなった湿潤供試体を使用した。

試験に使用した供試体の内訳は次のようになる。市販の普通煉瓦では、乾燥供試体10本、湿潤供試体10本、現場から採取した煉瓦では、乾燥供試体13本、湿潤供試体7本である。

3・1・2 円盤圧裂引張強度試験 万能材料試験機を用いて、荷重速度100N/sで試験を行った。

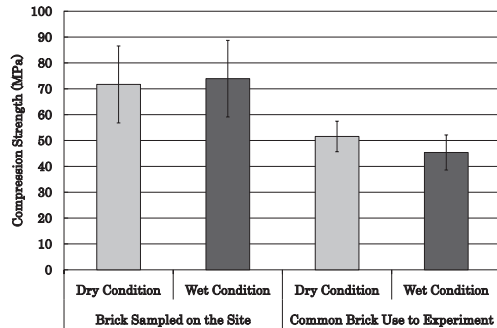


Fig.6 Compressive strength test results.

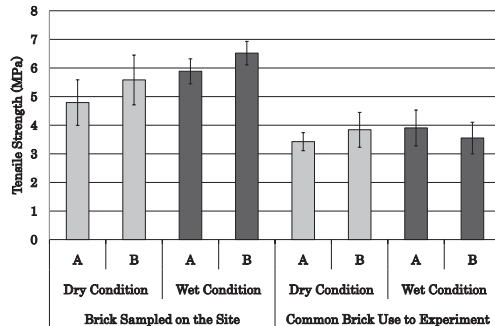


Fig.7 Tensile strength test results.

煉瓦に対して、Fig. 5 のようにボーリングを行い、供試体を採用した。供試体は円柱形で、直径 30mm、長さ 20mm である。載荷方向は、異方性を考慮して、Fig. 5 のように A、B の 2 方向とした。実験には、一軸圧縮強度試験と同様、乾燥供試体と湿潤供試体を使用した。

試験に使用した供試体の内訳は次のようになる。市販の普通煉瓦では、乾燥供試体 19 本（そのうち、載荷方向 A は 9 本、載荷方向 B は 10 本）、湿潤供試体 20 本（そのうち、載荷方向 A は 10 本、載荷方向 B は 10 本）である。現場から採取した煉瓦では、乾燥供試体 24 本（そのうち、載荷方向 A は 12 本、載荷方向 B は 12 本）、湿潤供試体 24 本（そのうち、載荷方向 A は 12 本、載荷方向 B は 12 本）である。

3・1・3 水銀圧入式ポロシメータ試験による細孔分布測定

水銀圧入式ポロシメータ（島津製作所製、オートポア III 9420）を使用して、細孔の大きさとその容積を測定した。

試験に用いた試料は、煉瓦の中央付近から採取した。ハンマーで砕いた煉瓦をふるいにかけて、5mm ふるいを通過し、2.5mm ふるいに留まったものを測定に使用した。

3・1・4 比表面積測定 比表面積・細孔分布測定装置（Beckman Coulter 社製、SA3100）を用い、窒素ガス吸着によって、比表面積の測定を行った。比表面積の算出には BET 法を用いた。

試験に用いた供試体は、煉瓦の中央部分から採取した。測定には、一辺が約 5mm ～ 10mm 程度の立方体の供試体を用いた。試験に使用した供試体の内訳は、市販の普通煉瓦、現場から採取した煉瓦、共に、3 個ずつである。

3・2 試験結果

3・2・1 一軸圧縮強度試験 乾燥・湿潤状態における一軸圧縮強度試験の結果を Fig. 6 に示す。図から、本研究で用いた普通煉瓦と現地から採取した煉瓦の圧縮強度には違いが見られ、普通煉瓦の方が採取した煉瓦に較べて、強度が小さいことが明らかとなった。乾燥状態と湿潤状態の圧縮強度では、普通煉瓦、現地

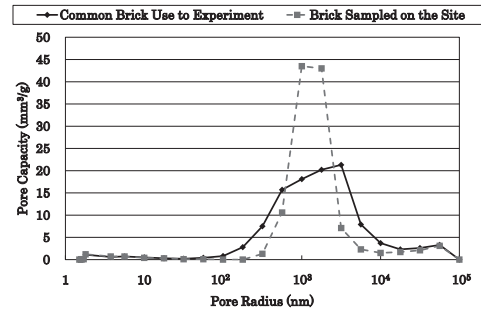


Fig.8 Relationship between pore capacity and pore radius by mercury porosity meter.

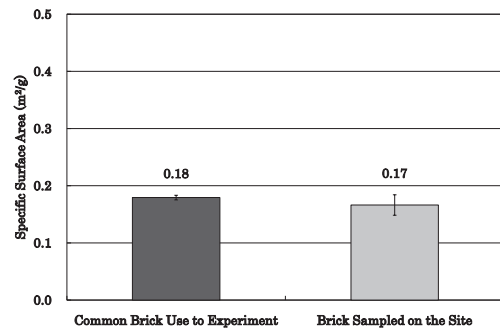


Fig.9 Specific surface area.

から採取した煉瓦、どちらにも特に差は見られなかった。

試験結果のばらつきは、普通煉瓦で ± 10 ～ 15% 程度、採取した煉瓦で ± 20% 程度であった。

3・2・2 円盤圧裂引張強度試験 乾燥・湿潤状態における円盤圧裂引張強度試験の結果を Fig. 7 に示す。一軸圧縮強度と同様に、普通煉瓦と現地から採取した煉瓦の引張強度には違いが見られ、普通煉瓦の方が採取した煉瓦に較べて、強度が小さいことが明らかとなった。

採取した煉瓦では、乾燥状態と湿潤状態の圧裂引張強度の間には、約 20% 程度の差が見られた。ただし、一軸圧縮強度ではこのような差は見られないことから、これは個体間の強度差によるものではないかと思われる。一方、普通煉瓦では、上記のような状態の違いによる強度差は確認できなかった。

また、採取した煉瓦では、載荷方向においても、微妙ではあるが差が見られ、異方性が確認された。一方、普通煉瓦では、上記のような載荷方向の違いによる強度差は確認できなかった。

試験結果のばらつきは、普通煉瓦で ± 10 ～ 15% 程度、採取した煉瓦で ± 5 ～ 20% 程度であった。

3・2・3 水銀圧入式ポロシメータ試験による細孔分布測定

細孔分布の一例を Fig. 8 に示す。普通煉瓦、現地から採取した煉瓦、どちらにも細孔半径 10³nm 付近の空隙が多く存在していることが明らかとなった。ただし、その細孔容積には大きな差があり、現地から採取した煉瓦の細孔容積は普通煉瓦の約 2 倍となっている。このような細孔容積の違いが経年変化によるものなのか、煉瓦の種類の違いによるものなのかどうかは定かではない。

3・2・4 比表面積測定

比表面積の測定結果を Fig. 9 に示す。普通煉瓦は 0.18m²/g、現地から採取した煉瓦は 0.17m²/g で、両煉瓦に違いは見られなかった。また、著者らは、過去の研究¹⁰⁾で、煉瓦と同様の多孔質材料である岩石の比表面積を測定したが、それらに較べて、煉瓦の比表面積は非常に小さな値となった。煉瓦の比表面積は、非凍上性である札幌軟石の約 1/5 程度である。

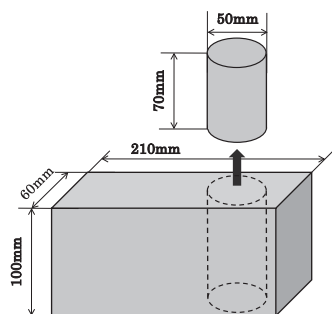


Fig.10 Sampling of test pieces for frost heave experiment.

Table 2 Temperature conditions.

Temperature Conditions	Temperature of Top Plate (°C)	Temperature of Bottom Plate (°C)	Temperature Gradient in Calculation (°C/mm)	Position of 0°C in Calculation (from Bottom of Test Piece) (mm)	Experiment Time (hour)
1	-25	+25	0.71	35.0	746
2	-20	+10	0.43	23.3	240
3	-25	+5	0.43	11.7	208

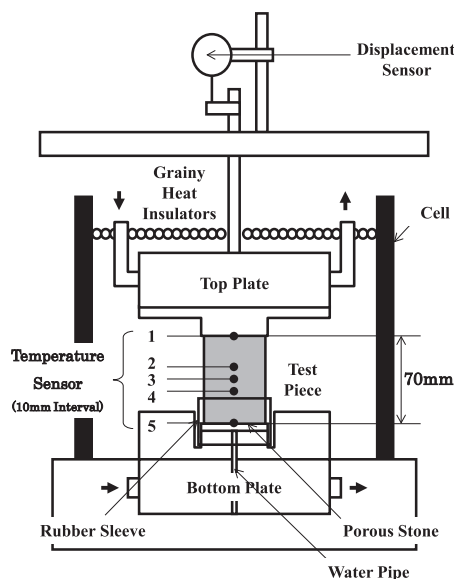


Fig.11 Frost heave experiment equipment.

4. 凍上実験

4・1 供試体

煉瓦に対して、Fig. 10 のようにボーリングを行い、供試体を採取した。供試体は円柱形で、直径 50mm、長さ 70mm である。本研究では、筆者らが過去に岩石の凍上実験を行った際に作製した凍上実験装置を流用した¹⁰⁾。このため、供試体の直径は実験装置の上盤の外径に制限される。また、供試体の長さは、著者が過去に行った岩石の凍上実験結果との比較を行う目的で、同様の長さとした。

実験には蒸留水中で真空ポンプを用いて 24 時間かけて脱気した後、数日間放置して、重量変化がなくなった湿潤供試体を使用した。以上のように、強制的に湿潤させるため、全ての供試体はほぼ含水飽和状態であると考えられる。

4・2 実験方法

4・2・1 凍上実験装置 本研究で使した凍上実験装置を Fig. 11 に示す。この試験装置の上下盤を、独立した温度制御装置によって、煉瓦の上面に寒気を想定したマイナスの温度、下面に地熱を想定したプラスの温度を与える。また、供試体の下面からは、水分の供給を行った。実験装置の詳細については、中村ら¹⁰⁾を参照されたい。

凍上量は、Fig. 11 に示した岩石の凍上実験装置の上方に取り付けた変位計によって、1 分毎に測定した。

供試体には 3 本の温度センサを供試体の中央から 10mm の間隔で設置した。また、これとは別に、上下盤と供試体との境界部

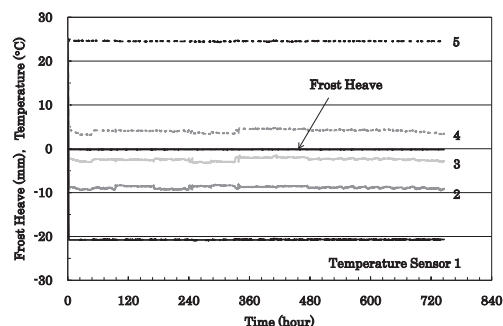


Fig.12 Result of frost heave experiment on temperature condition 1.

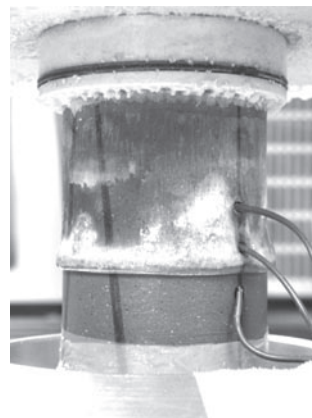


Fig.13 Appearance of the brick after the frost heave experiment.

分にも 2 本の温度センサを設置した。

4・2・2 温度条件 実験はまず、上下盤をコントロールする冷媒の温度をプラスに設定し、供試体の内部温度をプラスで均一化させた。その後、下盤の冷媒温度はプラスのまま制御し、上盤の冷媒温度をマイナスに下げ、供試体の上面から凍結を進行させた。

本研究では、3 種類の温度条件を設定して、凍上実験を行った。Table 2 に、上下盤の温度条件、実験時間についてまとめた。

4・3 実験結果と考察

全ての温度条件において、煉瓦に凍上は発生しなかった。ここでは、最も厳しい温度条件で、最も長時間実験を行った温度条件 1 の結果についてのみ示す。

Fig. 12 は、凍上量、供試体の内部温度を表しており、図中の数字は Fig. 11 の温度センサ番号と一致している。図から、凍上量には全く変化がなく、煉瓦に凍上が発生していないことが確認できる。

Fig. 13 に凍上実験終了直後の煉瓦の様子を示す。写真から、

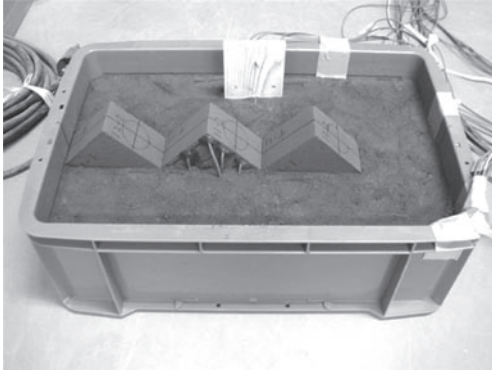


Fig.14 Appearance of the freeze-thaw experiment.

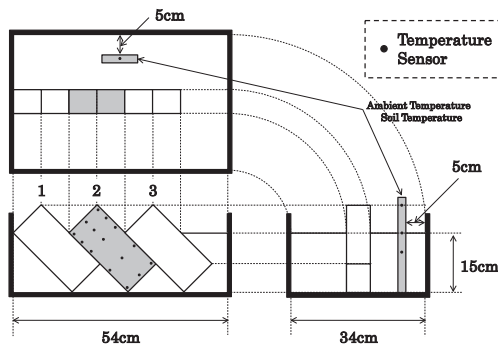


Fig.15 Arrangement of bricks for freeze-thaw experiment.

供試体のほぼ中央付近に氷が押し出されるように、水平方向に発達していることが確認できる。ただし、これは、凍上に伴って発達したアイスレンズではなく、供試体には、クラック等のダメージは全く確認できなかった。

著者らは、煉瓦と同様の多孔質体である岩石の凍上現象について報告している¹⁰⁾。本研究では、それを踏まえて、煉瓦に凍上現象が発生しなかった原因について以下のように考察した。

多孔質体が凍上するためには、間隙水が間隙氷へと相変化する際に発生する膨張力によって、割れなければならない。煉瓦は、いくつかの凍上性岩石に較べると高い引張強度を有しており、この高い引張強度が凍上を妨げていると考えられる。

また、著者らは、空隙半径の大きい岩石では凍上が発生しないことを報告している¹⁰⁾。空隙半径が大きく間隙水の移動が容易であれば、間隙水が間隙氷へと相変化する際に発生する内部圧力は、間隙水を下方の未凍結部へと移動させてしまう。この場合、内部圧力は材料に作用しないと考えられる。煉瓦の空隙半径は凍上性のそれに較べて大きく、非凍上性のそれと類似しており、このために割裂に必要な大きな内部圧力が発生しなかったと考えられる。

さらに、著者らは、比表面積の大きな岩石ほど、高い凍上性を示すことも報告している¹⁰⁾。比表面積の測定結果から、煉瓦の比表面積が非常に小さいことが明らかである。また、粉末 X 線回折の結果から、本研究で使用した煉瓦には粘土鉱物が含まれていないことも明らかである。粘土鉱物は大きな比表面積を持つことが知られており¹¹⁾、煉瓦の比表面積が小さいことは、粘土鉱物を含んでいないことに起因すると考えられる。多孔質材料が割裂し、凍上するためには、間隙水の成長が必要であり、間隙水の成長には、不凍水が必要である。比表面積が小さければ、多孔質材料が保持できる不凍水の量、その材料が凍結面へと供給できる

Table 3 Particle size distribution of weathered volcanic ash.

	Clay	Silt	Fine Sand	Medium Sand	Coarse Sand
Percentage Passing (%)	26	24	33	16	1

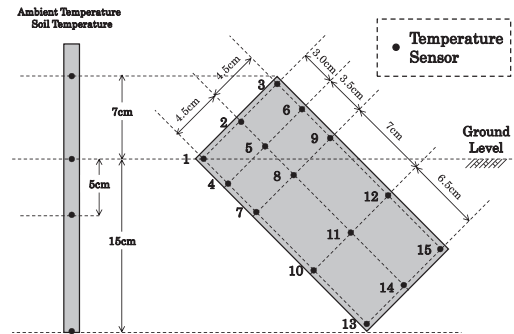


Fig.16 Installation positions of the temperature sensor.

不凍水量も少なくなってしまう。

以上の結果から、本研究で使用した煉瓦には凍上が発生しないと結論付けた。

5. 一次元の凍結融解実験

5・1 供試体

煉瓦は特に加工せず、そのままの状態の実験に使用した。寸法は、縦 210mm、横 100mm、厚さ 60mm である。この煉瓦を、凍上試験と同様に、蒸留水中で真空ポンプを用いて 24 時間かけて脱気し、数日間放置して、重量変化がなくなるまで湿潤された。以上のように、強制的に湿潤させるため、全ての供試体はほぼ含水飽和状態であると考えられる。

5・2 実験方法

5・2・1 煉瓦の設置 本研究では、Fig. 14 のように、プラスチック製コンテナ内に煉瓦を設置して実験を行った。煉瓦の凍結融解は、このコンテナを低温室に出し入れして行った。

煉瓦は、Fig. 1 に示した北見市内で凍害が発生した現地と同様に、斜めに設置した。煉瓦の配置状況を Fig. 15 に示す。コンテナ内に 3 本の煉瓦を設置し、周りには北見市内で採取した風化火山灰を敷き詰めた。使用した風化火山灰の粒子密度は 2.557g/cm^3 、最適含水比は 32.5% であった。Table 3 には、その粒度分布を示す。実験には、含水比が約 30% となるように水分調整して使用した。

5・2・2 煉瓦の内部温度の測定 煉瓦の温度変化を解析するため、Fig. 15 の中央に設置した煉瓦の内部に、15 本の温度センサを設置した。温度センサの詳細な設置位置を Fig. 16 に示す。温度センサには熱電対を用い、粘土を用いて固定した。また、図中の数字はセンサ番号を表している。

さらに、本研究では、このようにして得られた温度データから温度分布図を作成した。センサ間の温度は、5mm 毎に、線形補間して求めた。

5・2・3 雰囲気温度及び土中温度の測定 Fig. 16 に示すように、温度センサを設置して、雰囲気温度及び土中温度を測定した。温度センサには、煉瓦の内部温度測定と同様に、熱電対を用いた。

本研究では、最上部に設置した温度センサの計測値を、この実

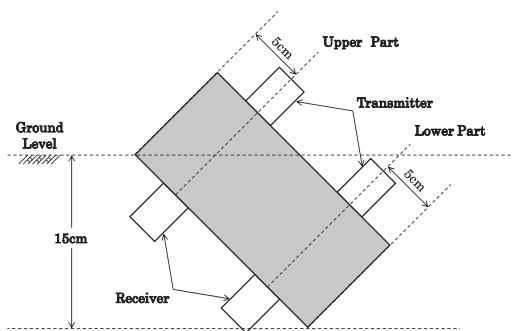


Fig.17 Measuring positions of elastic wave velocity.

験の雰囲気温度として扱うこととした。

上述の煉瓦の内部温度、雰囲気温度及び土中温度は、データロガーによって、1分毎に自動計測される。

5・2・4 凍結融解方法 本研究では、煉瓦に急激な温度変化を与えている。

凍結は、上記のプラスチック製コンテナを -25℃に設定した低温室に入れて行った。凍結期間は、煉瓦に設置した全ての温度センサがマイナスの温度に達するまでとした。

これに対し、融解はコンテナを +20℃の室内に放置して行った。融解期間は、煉瓦に設置した全ての温度センサがプラスの温度に達するまでとした。

このような温度条件で凍結融解を5サイクル行った。

5・2・5 弾性波速度の測定 本実験では、凍結融解後の煉瓦の劣化状況を把握する目的で、実験の前後に、乾燥状態における弾性波速度の測定を行った。測定にはパンジットを用いた。

Fig. 17のように、発信子と受信子を設置し、煉瓦の上部と下部、2箇所において弾性波速度の測定を行った。測定は1箇所につき3度行い、その平均値を求めた。ただし、パンジットによる弾性波速度の測定は、発信子と受信子の設置面の平坦性に大きく左右される。本実験では煉瓦に特別な加工を行わなかったため、表面には凹凸があり、煉瓦によっては弾性波速度の測定が不可能であった。

5・2・6 煉瓦の吸水率の測定 凍結融解によって、煉瓦内に含まれていた水分がどのような挙動を示すのかを把握する目的で、実験の前後に、煉瓦の吸水率の測定を行った。

5・2・7 実験中の煉瓦の水分状態 煉瓦に凍結の影響を効率的に与えるためには、煉瓦を高含水比の状態に保って、実験を行うことが望ましい。しかしながら、本研究では、実験開始時に含水飽和状態の煉瓦を用いたものの、実験期間中は、凍結融解を連続的に行う目的で、煉瓦への水分供給は行わなかった。煉瓦は多孔質材料ではあるが、水分を供給しても、浸透に長時間を要してしまうためである。

5・3 実験結果と考察

本実験では、凍結融解を5サイクル行ったものの、3本、全ての煉瓦にひび割れは発生しなかった。Fig. 18に凍結融解前後の煉瓦の様子を示す。凍結融解5サイクル終了後の煉瓦には白華現象を確認することができる。これは、凍結融解、乾燥に伴う水分移動によって、元々煉瓦に含まれていた石灰分が析出したため

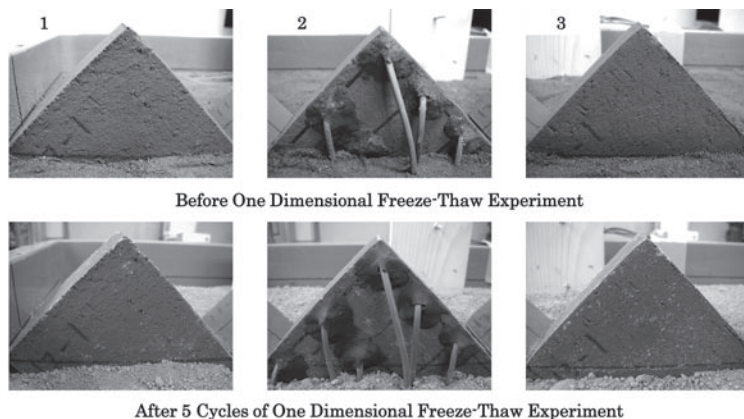


Fig.18 Appearances of bricks before and after one dimensional freeze-thaw experiment.

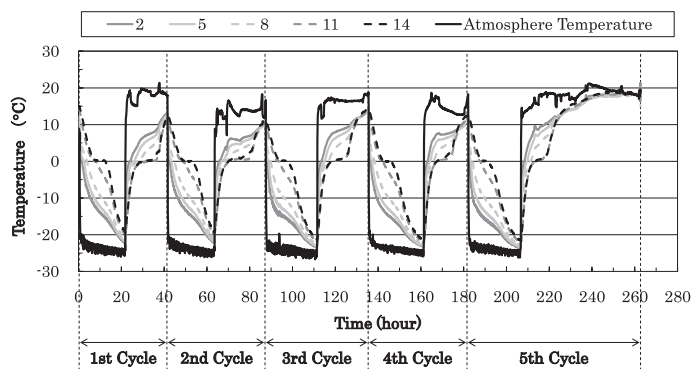


Fig.19 Changes in temperature of brick and atmosphere temperature during one dimensional freeze-thaw experiment.

だと考えられる。

Fig. 19は、煉瓦の内部温度と雰囲気温度の経時変化を表している。ただし、図には、設置した15本の温度センサのうち、煉瓦の中心線に沿って設置された2, 5, 8, 11, 14番のセンサの計測値のみをプロットした。凡例の数字はFig. 15の温度センサ番号と一致している。

図から、凍結時、融解時、共に、11, 14番のセンサが、0℃付近において、一度停滞していることが確認できる。また、その他のセンサも、短時間ではあるが、0℃付近で停滞している。このことから、煉瓦の空隙中において、水分の凍結融解が発生していたことが確認できた。

凍結融解1サイクル目における温度分布図を、Fig. 20に示す。図から、凍結時、融解時、どちらにおいても想定した一次元の凍結融解現象をほぼ再現できていることが確認できる。温度分布は、2サイクル目以降もほぼ同様の挙動を示していた。

Fig. 21に、凍結融解前と、凍結融解5サイクル後における乾燥状態の煉瓦の弾性波速度を示す。凡例の数字は、Fig. 15の煉瓦の番号と対応している。図から、3本の煉瓦、全てにおいて、1割程度の弾性波速度の低下が確認できる。煉瓦の上部と下部とで弾性波速度の測定を行ったものの、明確な差は見られなかった。以上の弾性波速度の測定結果から、煉瓦の表面及び内部において、目視では観察できない微細な劣化が進んでいることが明らかとなった。

実験前後の煉瓦内の水分挙動に着目すると、凍結融解前に約11.5%だった吸水率は、凍結融解5サイクル後、約2.9%まで低下していた。実験前の煉瓦の飽和度を100%とすると、凍結融解

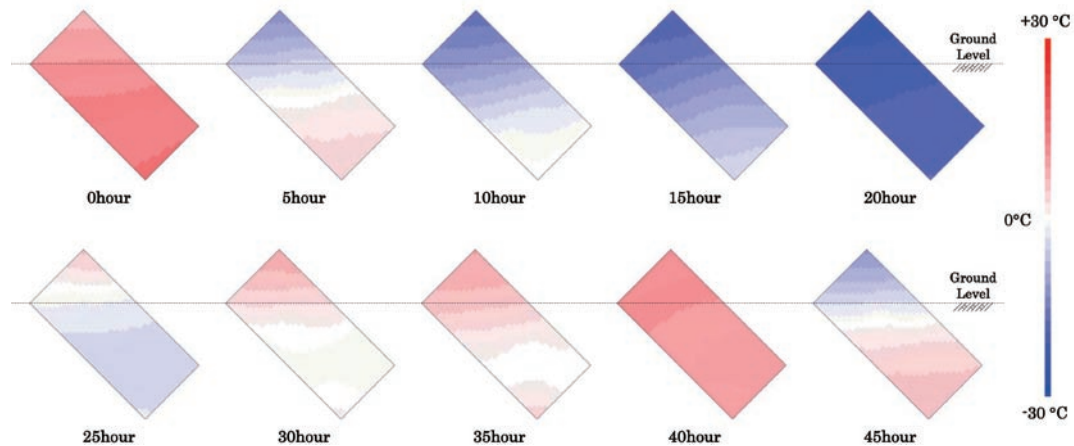


Fig.20 Temperature distribution of brick at the 1st cycle in one dimensional freeze-thaw experiment.

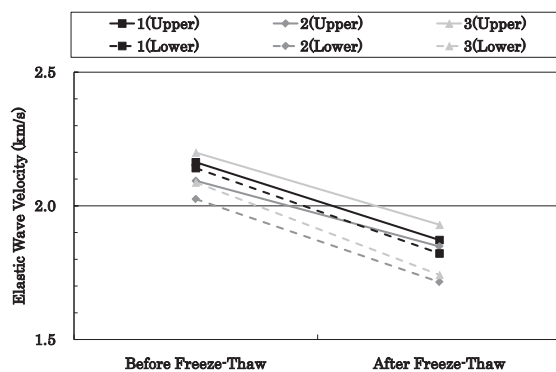


Fig.21 Elastic wave velocities of bricks before and after one dimensional freeze-thaw experiment.

後の煉瓦の飽和度は約 25.4% に相当する。つまり、煉瓦中の水分は、凍結時の昇華や融解時の蒸発によって、約 75% も排出されていることになる。このことから、凍結融解を繰り返すことによって煉瓦中の水分が排出され、煉瓦の乾燥が進むことが確認された。

以上の実験結果から、煉瓦は一次元の凍結融解ではひび割れは発生しないものの、煉瓦の表面や内部において、微細な劣化が進んでいることが明らかとなった。この煉瓦の劣化は、間隙中に含まれていた水分の凍結融解によって引き起こされていると考えられる。ただし、一次元の凍結では、凍上現象と同様、間隙水が間隙氷へと相変化する際に発生する膨張力が、間隙水を下方の未凍結部へと移動させてしまうため、大きな内部圧力が発生しなかったのではないかと考えられる。

また、煉瓦中の水分が凍結融解を繰り返すことによって著しく減少していくことから、間隙水が間隙氷へと相変化する際に発生する膨張力も、凍結融解を重ねるごとに、小さくなっていると考えられる。このことも、一次元の凍結融解で、煉瓦にひび割れが発生しなかった原因の一つであると考えられる。ただし、一次元の凍結融解現象で煉瓦にひび割れが発生するのであれば、含水飽和状態の 1 サイクル目の凍結時にひび割れ等の明らかな劣化が確認されるはずである。吸水率が高いと思われる 2 サイクル目の凍結時においても煉瓦にひび割れが発生していない。以上のことから、今回の温度条件では、飽和度が高くても、一次元の凍結融解現象で煉瓦にひび割れが発生しないことは明らかである。

加えて、今回の実験では、煉瓦に急激な温度変化を与えた。中

村ら⁹⁾は、一次元冷却では冷却速度が遅い方が、凍害破壊を起こしやすいことを報告している。中村ら⁹⁾の実験において、一次元冷却時に氷晶分離凍結が起こっていたとすると、間隙氷の成長には不凍水の流入が必要である。冷却速度が不凍水の流入速度に較べて遅い場合には、不凍水の流入量が多くなる。一方、不凍水の流入速度に較べて冷却速度が速い場合には、不凍水の流入量が少なくなり、間隙氷が成長せず、凍害破壊が起こりづらくなると考えられる。以上のことから、本研究の速い冷却速度は、一次元の凍結融解現象による凍害破壊を起こりづらくしていた可能性も考えられる。

6. 閉塞型の凍結融解実験

6・1 供試体と実験方法

実験に用いた煉瓦は、一次元の凍結融解実験に用いた煉瓦と同様のものである。また、煉瓦の設置方法、各種の温度の測定方法、弾性波速度の測定方法等も、一次元の凍結融解実験と同様である。

ただし、凍結融解方法については、一次元の凍結融解実験とは異なるため、以下にその詳細について記述する。

1 サイクル目の凍結時、全ての温度センサがマイナスの温度に達するまで凍結させるのは、一次元の凍結融解実験と同様である。1 サイクル目の融解時、煉瓦は上部から融解していくが、融解期間は Fig. 16 の 5 番の温度センサがプラスの温度を示すまでとした。つまり、1 サイクル目の融解終了時には、煉瓦は完全には融解していない状態となる。2 サイクル目の凍結開始時、煉瓦には凍結部分と未凍結部分が存在することになるが、その境界は Fig. 16 の 5 番と 8 番の温度センサの間となる。このような状態で再凍結を行うことにより、煉瓦の上部に凍結領域によって囲まれた、閉塞した未凍結領域を作り出す。

これらに加えて、本実験では、実験期間中の煉瓦を定点カメラによって撮影し、凍結融解によって、煉瓦の様子がどのように変化していくかを観察した。撮影した煉瓦は、Fig. 15 の 3 番の煉瓦で、撮影間隔は 1 分である。

6・2 実験結果と考察

本実験では、凍結融解を 2 サイクル行った。凍結融解を 2 サイクルしか行っていないに関わらず、3 本の煉瓦の内、2 本において、ひび割れの発生が確認できた。ひび割れが確認された煉瓦は、Fig. 15 の 2 番と 3 番の煉瓦である。

Fig. 22 に凍結融解前後の煉瓦の様子を示す。写真から、ひび割れは煉瓦の地表面から突き出た部分で発生しており、その亀裂

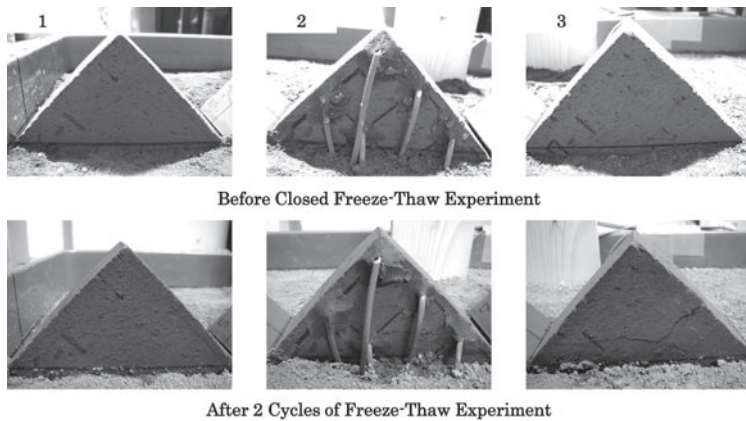


Fig.22 Appearances of bricks before and after closed-type freeze-thaw experiment.

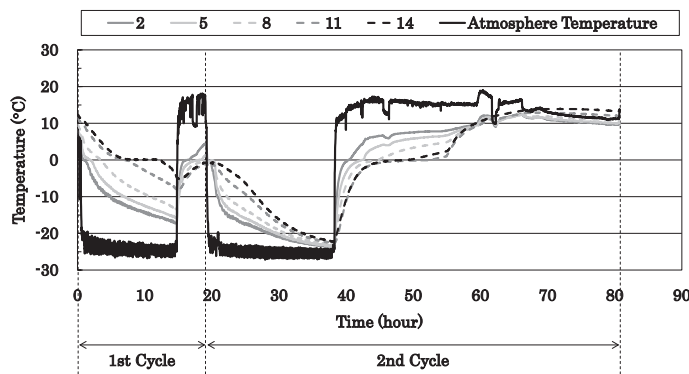


Fig.23 Changes in temperature of brick and atmosphere temperature during closed-type freeze-thaw experiment.

は地表面と平行、もしくは斜め方向に形成されていることが確認できる。このひび割れの発生状況は、Fig. 1 に示した、北海道北見市内で確認された煉瓦のひび割れの発生状況と酷似している。

このような亀裂が発生した原因については、以下のように考察した。閉塞型の凍結融解の場合、煉瓦が再凍結する際には、凍結面より下部は、間隙水の凍結により、強度が増加した状態となっている。このため、亀裂は煉瓦の下部方向に、発生、進展しえない。また、本研究のような煉瓦の設置方法では、煉瓦の下部の方が、地表面から突き出た上部より自由面までの距離が長い。このため、内部圧力が高まった閉塞部分から、自由面に近い水平方向、もしくは斜め方向へ亀裂が発生、進展したものと考えられる。

Fig. 15 の 1 番の煉瓦では、ひび割れが確認できなかったが、これは煉瓦の設置位置に起因すると考えられる。1 番の煉瓦は、角がコンテナの内壁に接触するように設置されているため、融解時にこの角から先に融解してしまう。このため、再凍結時に間隙水を閉塞させるような温度条件にならなかったのではないかと考えられる。

Fig. 23 は、煉瓦の内部温度と雰囲気温度の経時変化を表している。ただし、図には、設置した 15 本の温度センサのうち、煉瓦の中心線に沿って設置された 2, 5, 8, 11, 14 番のセンサの計測値のみをプロットした。凡例の数字は Fig. 16 の温度センサ番号と一致している。

図から、1 サイクル目の凍結時、11, 14 番のセンサが、0 °C 付近において、一度停滞していることが確認できる。また、その他のセンサも、短時間ではあるが、0 °C 付近で停滞している。このことから、煉瓦の空隙中において、水分の凍結が発生していたこ

とが確認できた。1 サイクル目の融解時、2 番と 5 番の温度センサは、0 °C 付近で停滞した後、温度が上昇している。このことから、煉瓦の間隙水が融解し、間隙水となったことが確認できる。8, 11, 14 番の温度センサは、0 °C 付近で停滞、もしくはマイナスの温度のままであることから、間隙氷が形成されたままであることが確認できる。

凍結融解 2 サイクル目の凍結時における温度分布図と、定点カメラによって撮影された亀裂進展の様子を、Fig. 24 に示す。凍結開始直後、煉瓦の上部は 0 °C 付近のプラスの温度で未凍結状態であり、煉瓦の下部はマイナスの温度で凍結状態である。煉瓦の地表面から突き出た部分は周りから冷却されて、0 °C 線は徐々に未凍結部分を囲うように進行していく。実験開始から 20.27 時間後には、煉瓦の表面に水滴が発生しているのが確認できる。これは、閉塞されるように凍結し、煉瓦の中心部へと移動していた水分が、間隙水圧の増加によって、煉瓦に潜在していたクラック等を伝わって、押し出されたものと考えられる。実験開始から 20.33 時間後には、煉瓦の突き出た部分は全てマイナスの温度となっているが、20.42 時間後には、再度、温度が上昇し、0 °C 付近のプラスの温度となっている。これは、過冷却状態になっていた間隙水が氷へと相変化する際に、潜熱を発生したためだと考えられる。また、この時、煉瓦にへアクラック状の亀裂の発生を確認することができた。間隙水が凍結し、間隙氷へと相変化する際に発生した内部圧力が、煉瓦の引張強度を上回り、亀裂が発生したのと考えられる。その後、

煉瓦は冷却され続けていくが、温度の低下と共に、亀裂の開口幅も広がっていくのが確認できる。

Fig. 25 に、凍結融解前と、凍結融解 2 サイクル後における乾燥状態の煉瓦の弾性波速度を示す。凡例の数字は、Fig. 15 の煉瓦の番号と対応している。ただし、本実験では、凍結融解前、1 番と 2 番の煉瓦の上部、3 番の下部において、煉瓦表面の凹凸が原因で弾性波速度が測定できなかった。また、2, 3 番の煉瓦の上部は、凍結融解後、ひび割れが発生してしまったため、計測ができなかった。上記の理由から、Fig. 25 には、ひび割れが発生せず、計測が可能であった 1 番と 2 番の煉瓦の下部の弾性波速度のみを示している。図から、一次元凍結融解実験と同様に、1 割程度の弾性波速度の低下が確認できた。このことから、表面的に確認可能な亀裂以外にも、煉瓦の表面や内部において、微細な劣化が進んでいることが考えられる。煉瓦の下部は、1 サイクル目の一次元冷却によって凍結し、2 サイクル目は凍結状態のままで定常状態である。このことから、上記の微細な劣化は、1 サイクル目の凍結時に発生したものだと推測することができる。つまり、閉塞型凍結融解実験における煉瓦下部の弾性波速度の低下は、一次元の凍結融解によって引き起こされたものであると考えることができる。弾性波速度の低下量は、一次元凍結融解実験におけるそれとほぼ同程度であるが、これはここに起因するものと思われる。

実験前後の煉瓦内の水分挙動に着目すると、凍結融解前に約 11.5% だった吸水率は、凍結融解 2 サイクル後、約 7.0% まで低下していた。実験前の煉瓦の飽和度を 100% とすると、凍結融解後の煉瓦の飽和度は約 60.8% に相当する。つまり、煉瓦中の水分は、凍結時の昇華や融解時の蒸発によって、約 40% も排出さ

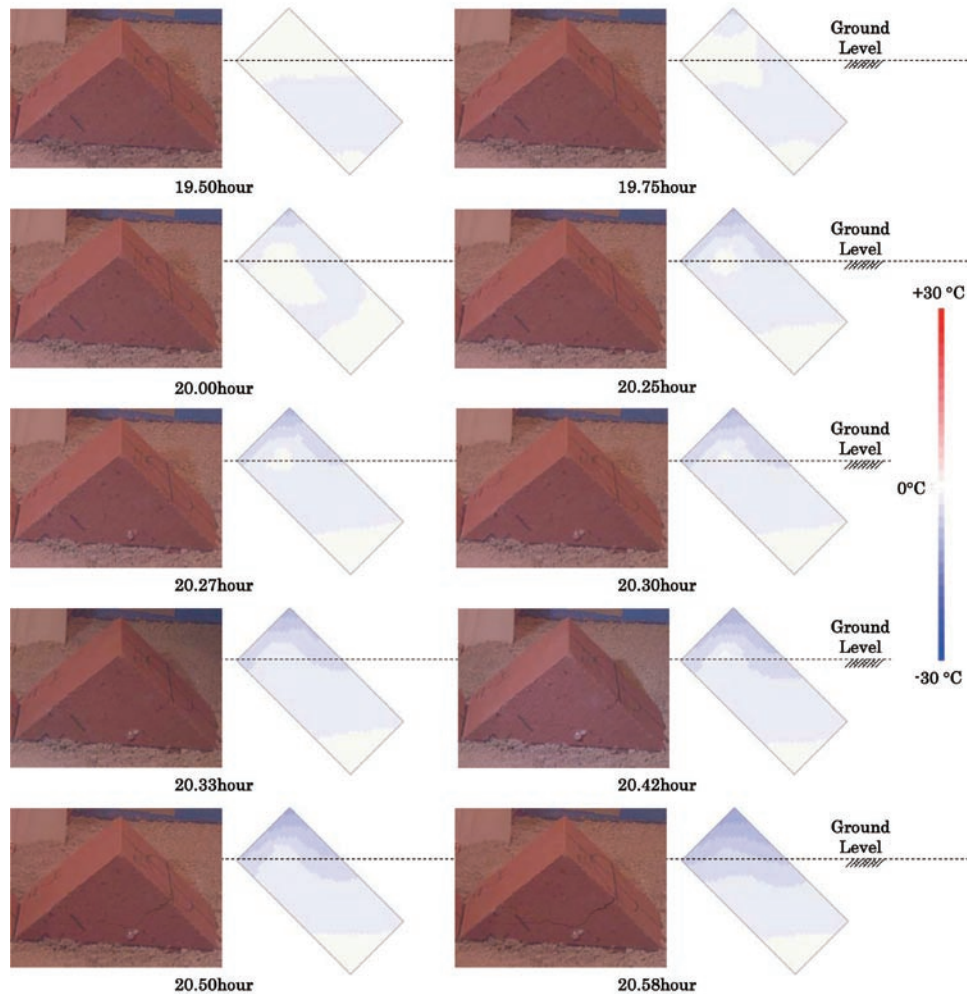


Fig.24 Temperature distribution of brick at the 2nd cycle in closed-type freeze-thaw experiment.

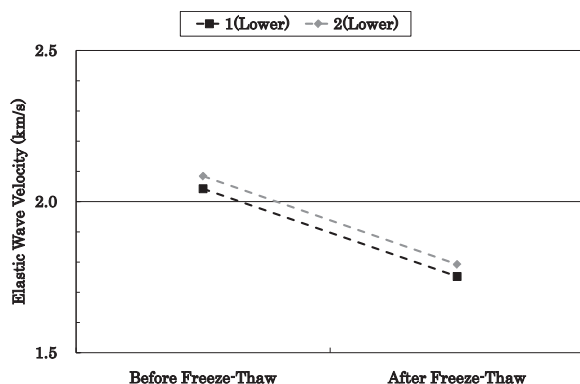


Fig.25 Elastic wave velocities of bricks before and after closed-type freeze-thaw experiment.

れていることになる。一次元の凍結融解実験と同様、この実験でも凍結融解を繰り返すことによって煉瓦中の水分が排出され、煉瓦の乾燥が進むことが確認された。また、ひび割れが発生し、ブロック化した3番の煉瓦の上部における吸水率は、5.7%まで低下していた。飽和度は48.4%に相当する。ひび割れが発生し、ブロック化することで、さらに乾燥が進むものと考えられる。

以上の実験結果から、煉瓦が閉塞型の凍結融解でひび割れることが明らかとなった。しかも、凍結融解2サイクル、実質の閉塞型の凍結融解はたったの1回で、煉瓦にひび割れが発生すること

が確認された。このことから、閉塞型の凍結融解によって発生する内部圧力は、1回の凍結で煉瓦を破断させるほど、大きな圧力であると推測できる。

さらに、煉瓦の表面や内部においても、微細な劣化が進んでいることが明らかとなった。この煉瓦の劣化は、間隙中に含まれていた水分の凍結融解によって引き起こされていると考えられる。

これらの実験結果は、北見市内で発生した煉瓦のひび割れを良く再現していると考えられる。ただし、本実験で用いた供試体はほぼ含水飽和状態であり、実際の水分状態とはかけ離れた実験条件であると考えられる。また、今回の実験では、煉瓦に急激な温度変化を与えた。中村ら⁹⁾は、三次元冷却では冷却速度が速い方が、凍害破壊を起こしやすいことを報告している。このことから、本研究の温度条件では、凍害破壊が起こりやすかった可能性も考えられる。煉瓦の含水状態及び冷却速度と、閉塞型の凍結融解による劣化との関係については、今後明らかにすべき課題として挙げておきたい。

以上の議論から、本研究では、北海道北見市内で発生した煉瓦のひび割れの主な原因は、閉塞型の凍結融解であると結論付ける。また、一次元の凍結融解によって、煉瓦の表面や内部において、微細な劣化が進んでいたことも遠因となったと考えられる。

7. ま と め

北海道北見市で確認された煉瓦の凍害機構を解明することに取

り組んだ。本研究では、3つの凍害機構を想定し、それぞれについて検証実験を行った。

以下に、本研究で得られた知見を示す。

(1) 本研究で用いた煉瓦には、凍上現象は発生しないことが明らかとなった。

(2) 一次元の凍結融解では、煉瓦にひび割れは発生しないことが明らかとなった。ただし、凍結融解を繰り返すことによって、煉瓦の表面や内部では微細な劣化が進んでいることが確認できた。

(3) 閉塞型の凍結融解によって、煉瓦にひび割れが発生することが明らかとなった。しかも、凍結融解2サイクル、実質の閉塞型の凍結融解はたったの1回で、煉瓦にひび割れが発生することが確認された。このことから、閉塞型の凍結融解によって発生する内部圧力は、1回の凍結で煉瓦を破断させるほど、大きな圧力であると推測できる。

以上の結論から、本研究では北海道北見市内で発生した煉瓦の

ひび割れは、一次元凍結融解の繰返しによる煉瓦の劣化と、閉塞型の凍結によって引き起こされたと結論付ける。

References

- 1) D. Nakamura, T. Goto, Y. Ito, S. Yamashita, T. Suzuki and S. Yamasaki: Journal of MMIJ, **129** (2011), 219-229.
- 2) W. N. Thomas: Bulding Reserch Technology Paper, 1938, No.17.
- 3) A. Watson : Tlansactions of the British Ceramic Society, **63** (1964), 663-680.
- 4) T. C. Powers and T. L. Brownyard: Journal of the American Concrete Institute, **18** (1947), 933-969.
- 5) E. Penner: Highway Research Board Bulletin, No.168 (1957), pp. 50-64.
- 6) D. H. Everett: Transactions of the Faraday Society, **57** (1961), 1541-1551.
- 7) T. Ishizaki: 10th International Symposium for Building Physics, (Doresden, 1999), pp. 827-832.
- 8) S. Akagawa and M. Fukuda: Permafrost and Periglacial Processes, **2** (1991), 301-309.
- 9) M. Nakamura and S. Okuda: Yogyo Kyokai shi, **84** (1976), 325-332.
- 10) D. Nakamura, T. Goto, T. Suzuki, Y. Ito and S. Yamashita: Journal of MMIJ, **124** (2008), 231-239.
- 11) *Nendo no Fushigi* (Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1986), pp38-39.