

凍結融解作用が気泡混合軽量土の一軸圧縮強 さに及ぼす影響

亀井健史¹⁾, 堀切保則²⁾

¹⁾島根大学総合理工学部 地球資源環境学科

²⁾榎竹下技術コンサルタント

Effects of freezing and thawing on unconfined compressive strength of foamed mixture lightweight soil

Takeshi KAMEI and Yasunori HORIKIRI

¹⁾Department of Geoscience, Interdisciplinary Faculty of Science and Engineering, Shimane University

²⁾Takeshita Engineering Consultant Co, Ltd.

Abstract

In cold regions, ground freezing and thawing is repeated several times during winter. Ground freezing and thawing causes damage in two ways: the first is due to the frost heaving itself, whereas the second arises from decrease of the strength of the soil during the spring thaw. It follows that unconfined compressive characteristics of foamed mixture lightweight soils may also be greatly affected by freezing and thawing. Although many studies on engineering properties of foamed mixture lightweight soils have recently been made, studies on the effects of freezing and thawing on unconfined compressive characteristics of foamed mixture lightweight soil have not yet been investigated. For this reason, to investigate the effects of freezing and thawing on unconfined compressive characteristics of foamed mixture lightweight soil, unconfined compression tests were performed on foam mixture lightweight soils subjected to freezing and thawing action. The unconfined compressive strength of foamed mixture lightweight soil gradually decreases with an increase in the number of freezing and thawing cycles although the first event has the greatest effect for soils. The unconfined compressive strength of foamed mixture lightweight soil subjected to freezing and thawing is about 0.7 times less than that of specimens without freezing and thawing. The decrease of unconfined compressive strength is caused by decrease of suction and destruction of soil structure due to freezing and thawing.

1. はじめに

冬期に凍結状態であった土が春期に融解すると、土のせん断強さが低下するため、融雪期には多くの斜面崩壊が発生する。このため、季節凍土地帯が広く分布している寒冷地や山岳地帯を開発する場合には、路盤の凍上問題や凍結融解作用に伴う土のせん断強さの低下に起因した斜面崩壊等に代表される地盤工学的諸問題を考慮した施工が望ましい¹⁾。

日本国内では、北海道などの地域において、春先の融解期に未舗装道路の軟弱化、未装工水路のり面の崩壊、傾斜農地の土壌流亡あるいはその後の乾燥に伴う畑地の

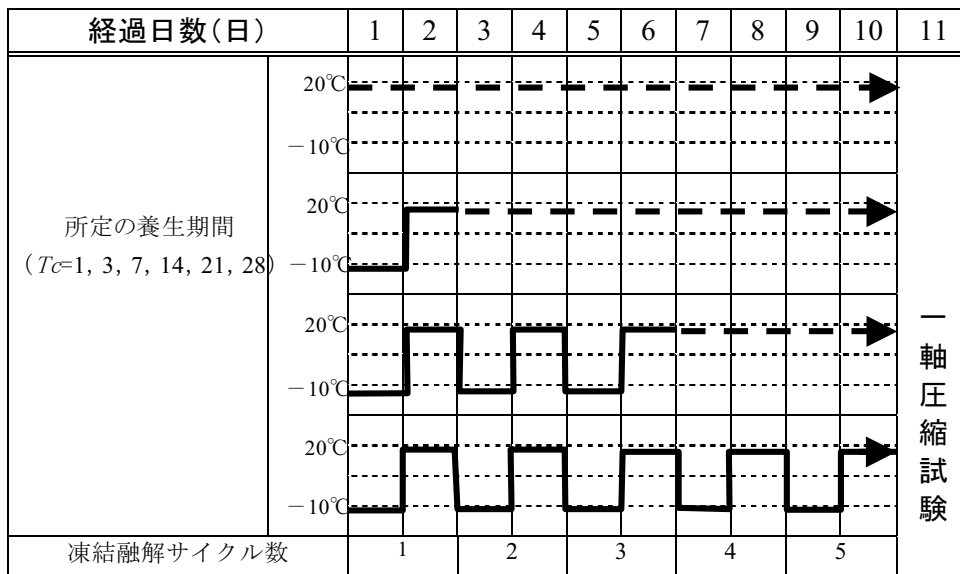
著しい風食などの憂慮すべき諸現象が発生する。凍結融解作用に伴う土の物理的・力学的性質などの変化がこのような諸現象の主要な原因として考えられることから、凍結融解後の土の性質を把握しておくことは、問題解決のために必要不可欠である。とくに気温の低下に伴う地盤への凍結線の侵入²⁾、凍結地盤の物理的³⁾・工学的⁴⁾性質、凍上現象⁵⁾あるいは凍結時の水分の移動⁶⁾などに関して、従来から多くの研究が行われてきた。さらに、応用面でも、凍結工法による地下鉄工事などの都市土木⁷⁾、寒冷地における道路舗装⁸⁾・用水路⁹⁾の施工等に多くの報告例がある。

凍結融解土の力学的性質を明らかにするために、外部

表-1 配合条件

水セメント比 W/C	セメント C (kg/m^3)	起泡剤 m_1 (kg/m^3)	希釈水 m_2 (kg/m^3)	混練水 m_3 (kg/m^3)	水量 $m_1+m_2+m_3$ (kg/m^3)	目標湿潤密度 ρ_t (g/cm^3)	目標フロー値 Flow (mm)	目標空気量 a (%)
0.71	353.0	1.6	25.0	225.7	252.3	0.6 ± 0.1	180 ± 20	65 ± 5

表-2 凍結融解過程



との水分の出入りのない条件下（いわゆる閉鎖系凍結融解）で、凍結 24 時間、融解 48 時間を 1 サイクルとした凍結融解作用を受けた土の一面せん断試験等の室内試験結果によれば¹⁰⁾、土のせん断強さは凍結融解過程を経ると大幅に低下するが、そのせん断強さの低下自体に凍結時間の長短の影響は認められなかった。また、凍結温度が低下に伴って土のせん断強さの低下は顕著となるが、凍結温度が -10°C 以下の場合には、その強さはほぼ一定値を示した。さらに、土が凍結融解作用を繰返し受ける場合には、最初の凍結融解作用によって土のせん断強さは 60% 程度低下するが、その後の繰返しに伴う強度低下の程度は小さく、最終的には凍結融解作用を受けていない土の約 50% 程度の強度を示すことが報告されている¹⁰⁾。

一方、最近、道路の路盤材料として、気泡混合軽量土が多用されるようになってきている¹¹⁾。このため、気泡混合軽量土の工学的性質が徐々に明らかになってきている^{12)~16)}。一方、気泡混合軽量土はその長所がよく注目されるが、注意しなければならない留意点として最近の研究例では、とくに施工に伴うセメント発熱現象が強度変形特性に大きな影響を及ぼしていることが明らかにされており、施工方法の再検討の必要性が指摘されている^{14),15)}。また、この気泡混合軽量土においても、先述したような凍結融解作用によって、一般の土に認められる強度低下が容易に推定できる。しかしながら、気泡混合軽量

土に及ぼす凍結融解作用の影響は、未解明である。今後は、寒冷地においても気泡混合軽量土の施工例が増加するものと考えられることから、気泡混合軽量土の力学的性質に及ぼす凍結融解作用の影響を明らかにしておく必要がある。

本研究では、気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす凍結融解作用の影響を明らかにするために、水セメント比 (W/C) を一定のもと、異なる養生日数 (T_c) と凍結融解サイクル数を与えた供試体に対して一軸圧縮試験を行った。その結果、凍結融解サイクル数の違いが気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす影響を定量的な観点から検討している。

2. 供試体作製方法および実験方法

2.1 供試体の作製方法

エアミルクを作製する場合には、固化材、起泡剤、水（混練水、希釈水）が必要である。本研究では、固化材として、強度特性と経済性を考慮し、高炉セメント B 種を用いた。また、気泡を得るために界面活性剤系の起泡剤（主成分：高級アルコールの硫酸エステル系化合物、 $\rho_d=1.020\sim 1.040$, $\text{pH}=7\sim 9$, 凍結温度 $=-1^\circ\text{C}$) を使用した。起泡剤の発泡に水質が大きな影響を及ぼすもの¹¹⁾

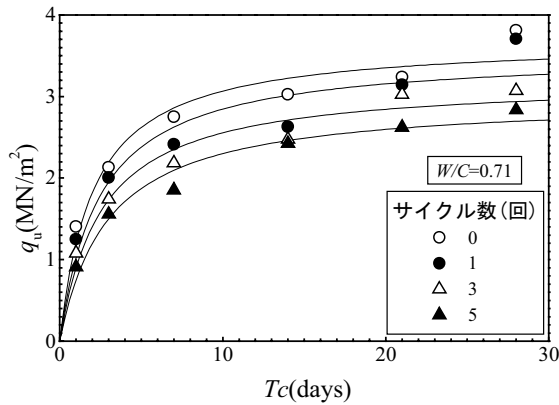


図-1 一軸圧縮強さと養生日数の関係

表-3 一軸圧縮強さと養生日数の関係

凍結融解サイクル数	関係式
0	$q_u = 3.69T_c / (2.05 + T_c)$
1	$q_u = 3.54T_c / (2.44 + T_c)$
3	$q_u = 3.21T_c / (2.55 + T_c)$
5	$q_u = 2.98T_c / (2.96 + T_c)$

と考え、水には蒸留水を用いた。

供試体の作製手順については、骨材、固化材と混練水を混合してモルタルを作製するとともに、起泡剤と希釈水を混ぜ、気泡を得た。その後、モルタルと気泡をミキサーで混合することによりエアミルク（気泡混合軽量土）を作製した。表-1 に本実験に適用した配合条件を示す。

試料の品質管理は、フロー値(180±20mm)、空気量(65±5%)、作製時の湿潤密度(0.6±0.1g/cm³)の項目について行った。各項目の試験値が目標の範囲内¹¹⁾であることを確認後、モールド(φ=50mm, H=100mm)に打設した。打設に際しては、試料とモールドの付着、および水分の流出を防ぐため、モールド内側にシリコングリースを薄く塗布するとともに、OHPシートをモールド内部に貼り付けた。

モールドに打設した試料は、まず、全体をビニール袋で覆い、20℃で24時間保管した。その後、モールドから試料を取り外し、端面を成形した後にラップで2重に包み養生した。なお、養生日数は、1, 3, 7, 14, 21, 28日の6種類を設定した。ここでいう養生日数とは、打設から初回の凍結融解を開始するまでの期間を示している。

供試体に所定の養生日数を経た後、表-2 に示す凍結融解過程を供試体に与えた。なお、一般の土に凍結融解が繰返し作用する場合には、その一軸圧縮強さは最初の凍結融解作用の影響を最も大きく受け、二回目以降の繰返し作用の影響による強度低下は極めて小さい¹⁰⁾。このことを考慮し、凍結融解サイクル数は1, 3, 5回の場合、および比較のために凍結融解作用を与えない(0回)場合の4種類を準備した。凍結融解過程を終えた供試体は試験日(凍結融解サイクル5回終了時)までの間、約20℃で保管し、その後実験に用いた。

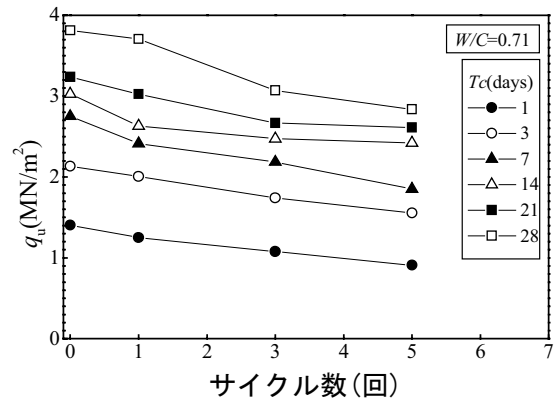


図-2 一軸圧縮強さと凍結融解サイクル数の関係

2. 2 実験方法

一軸圧縮試験は、ひずみ制御方式で行い、せん断時のひずみ速度は1%/minとした。また、強度・変形特性に及ぼす端面摩擦の影響を軽減するために、一軸圧縮試験装置の上下加圧板の表面にシリコングリースを薄く塗布した。なお、供試体内の含水比の違いを検討するため、試験後の供試体を上部・中部・下部に3分割し、それぞれの含水比を測定した。

3. 実験結果および考察

3. 1 凍結融解サイクル数の違いが一軸圧縮強さと養生日数の関係に及ぼす影響

気泡混合軽量土では、一軸圧縮強さ(q_u)と養生日数(T_c)の関係は、双曲線近似で表されることが報告されている¹³⁾。本研究においても、凍結融解サイクル数の違いによらず q_u 値と T_c の関係は、 q_u 値が T_c の初期に急激に増加し、 T_c の長期化に伴い緩やかに増加する双曲線近似となった(図-1)。その関係式を表-3に示す。また、凍結融解サイクル数の増加に伴い、 q_u 値には減少する傾向が認められた。

破壊形態に着目すると、気泡混合軽量土の場合には、凍結融解サイクル数の違いによらず圧縮応力の増加に伴い上端または下端から徐々に潰れてゆき、まるでスポンジを圧縮したときのように変形し、明瞭なせん断面を形成せずに破壊へと至る。これは、気泡混合軽量土特有の薄いマトリクス部分と大きな空隙部分とからなる構造に起因しているものと考えられる。一方、一般の土の場合には、最大荷重後、明瞭なせん断面を形成する。したがって、気泡混合軽量土は、破壊後もある程度の強度が維持されることから、より安全な地盤材料であることがわかる。

つぎに、一軸圧縮強さ(q_u)と凍結融解サイクル数の

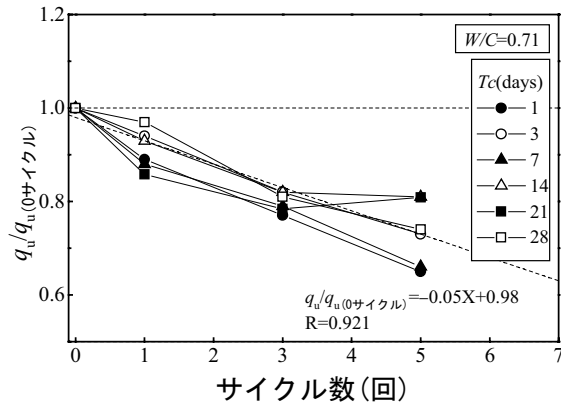


図-3 正規化された一軸圧縮強さと凍結融解サイクル数の関係

関係に及ぼす養生日数 (T_c) の影響を検討する. 図-2 は, $T_c = 1 \sim 28$ 日の q_u 値と凍結融解サイクル数の関係を示している. q_u 値は, T_c の違いによらず, 凍結融解サイクル数の増加に伴い直線的に減少することが明らかとなった.

図-3 は, 正規化された一軸圧縮強さ ($q_u/q_u(0 \text{ サイクル})$) と凍結融解サイクル数の関係を示している. $q_u/q_u(0 \text{ サイクル})$ は, 養生日数の違いによらず, 凍結融解サイクル数の増加に伴い直線的に減少している. また, q_u 値は, 凍結融解サイクル 1 回で約 10% 減少し, 3 回では約 20%, 5 回では約 30% 減少することが明らかとなった. また, その関係式は, 凍結融解サイクル数を x として, $q_u/q_u(0 \text{ サイクル}) = -0.06x + 1.0$ (相関係数 $R=0.921$) と表すことができた.

凍結融解作用を繰返し受けた一般の土の場合には, 最初の凍結融解作用が q_u 値に最も大きな影響を及ぼし, その q_u 値は 70%~50% 程度まで急激に減少する. そして, それ以降の凍結融解サイクル数の増加に伴う q_u 値の減少傾向は, かなり小さくなることが知られている¹⁰⁾. 一方, 気泡混合軽量土では, 凍結融解作用の繰返しに伴い q_u 値は徐々に減少し, 凍結融解サイクル数を 5 回与えた場合でも, 凍結融解作用を受けない場合の 70% 程度の強度を有していることが明らかとなった. このことから, 気泡混合軽量土は, 一般の土と比べて, 凍結融解作用に対して高い耐久性を有していることが明らかとなった. この理由としては, 凍結作用に伴う体積膨張分を気泡部分が分担することにより構造そのものに及ぼす影響が少なくなっているものと考えられる. 以上のことから, 気泡混合軽量土は, 寒冷地での路盤材料などにも適用性があり, その有効利用の可能性が示されたといえる.

3.2 凍結融解サイクル数の違いが変形係数と一軸圧縮強さの関係に及ぼす影響

図-4 に, 凍結融解作用を受けた気泡混合軽量土の変形係数 (E_{50}) と一軸圧縮強さ (q_u) の関係を示す. 凍結融解作用を受けた土の E_{50}/q_u 値は, 100~350 の範囲に分布

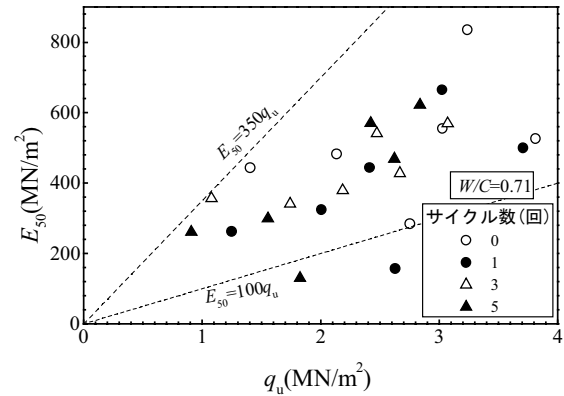


図-4 変形係数と一軸圧縮強さの関係

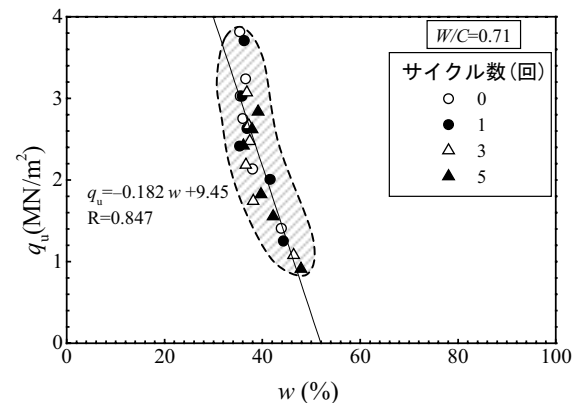


図-5 一軸圧縮強さと含水比の関係

している. 横田・三嶋¹³⁾によると凍結融解作用を受けていない一般的な気泡混合軽量土の E_{50}/q_u 値は, 100~200 の範囲となることが報告されている. したがって, 気泡混合軽量土の場合には, 凍結融解作用を受けても, 両者の関係に大きな変化は生じないものと考えられる.

3.3 凍結融解サイクル数の違いが一軸圧縮強さと含水比の関係に及ぼす影響

凍結融解サイクル数の違いが一軸圧縮強さ (q_u) と含水比 (w) の関係に及ぼす影響を図-5 に示す. 気泡混合軽量土の q_u 値には, 凍結融解サイクル数の違いによらず, w 値の減少に伴い直線的に増加する傾向が認められた. 同様の傾向は, 凍結融解作用を受けていない気泡混合軽量土の q_u 値と w 値の関係においても報告されている¹⁶⁾.

凍結融解サイクル数の増加に伴う q_u 値と w 値の関係式の傾きに注目すると, 僅かではあるが凍結融解サイクル数の増加に伴って緩やかとなることが明らかとなった. これは, w 値の減少に伴う q_u 値の増加傾向が, 凍結融解サイクル数の増加に伴って, 小さくなることを示している. 参考のために示すと, 凍結融解サイクル数 0 回と 5 回における q_u 値と w 値の関係式は, 凍結融解サイクル数 0 回の場合, $q_u = -0.23w + 11.38$ (相関係数 $R=0.878$) と

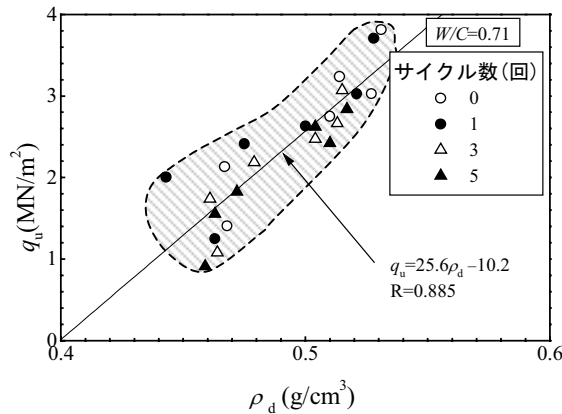


図-6 一軸圧縮強さと乾燥密度の関係

なり、凍結融解サイクル数5回の場合、 $q_u = -0.15w + 8.28$ (相関係数 $R=0.876$) となる。

3.4 凍結融解サイクル数の違いが一軸圧縮強さと乾燥密度の関係に及ぼす影響

図-6 は、一軸圧縮強さ (q_u) と乾燥密度 (ρ_d) の関係に及ぼす凍結融解サイクル数の影響を示している。凍結融解サイクル数によらず ρ_d 値の増加に伴い q_u 値が直線的に増加していることがわかる。また、その傾きは、凍結融解サイクル数によらずほぼ同じ値を示しており、 ρ_d 値と q_u 値の関係に及ぼす凍結融解サイクル数の影響は比較的少ないものと考えられる。

3.5 凍結融解サイクル数の違いが一軸圧縮強さと間隙比の関係に及ぼす影響

気泡混合軽量土を常温で養生した場合には、間隙比 (e) の減少に伴い一軸圧縮強さ (q_u) は直線的に増加することがすでに報告されている¹⁶⁾。そこで本実験結果における凍結融解サイクル数の違いが q_u 値と e 値の関係に及ぼす影響を図-7 に示す。図より本実験結果においても、 e 値の減少に伴い q_u 値はほぼ直線的に増加する傾向が認められた。また、凍結融解サイクル数の違いによらず q_u 値と e 値の関係には、ほぼ同じ傾きを示していることが明らかとなった。

3.6 凍結融解サイクル数の違いが含水比と養生日数の関係に及ぼす影響

図-8 は、異なる凍結融解サイクル数から得られた含水比 (w) と養生日数 (T_c) の関係を示している。凍結融解サイクル数によらず w 値は、 T_c の経過に伴って $T_c=7$ 日程度まで急激に減少し、それ以後はほぼ一定値を示している。また、凍結融解サイクル数を多く受けた供試体の場合には、凍結融解サイクル数が少ない供試体と比較

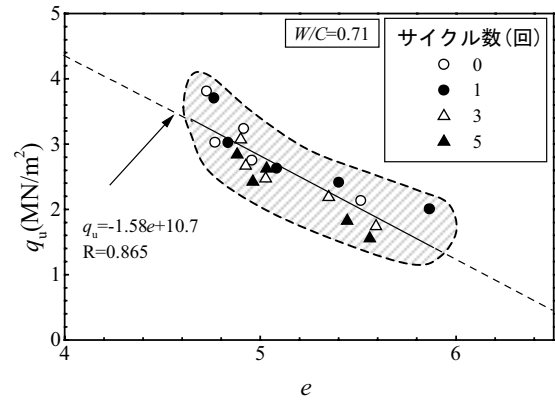


図-7 一軸圧縮強さと間隙比の関係

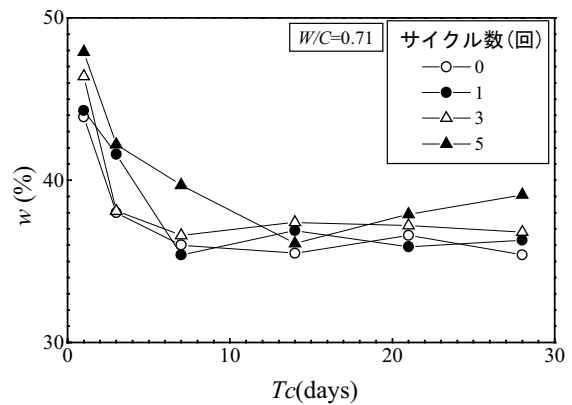


図-8 含水比と養生日数の関係

して、 w 値は $T_c=21$ 日以降わずかに大きくなる傾向が認められた。このような凍結融解サイクル数の増加に伴う w 値のわずかな増加は、凍結作用に伴う水分移動と水和反応の抑制がその原因となっていることが考えられる。

4. まとめ

本研究では、凍結融解作用が気泡混合軽量土の一軸圧縮強さに及ぼす影響について取りまとめた。その結果、凍結融解作用に伴って気泡混合軽量土の一軸圧縮強さは、凍結融解作用の繰返し回数の増加に伴って徐々に直線的に低下していくことが明らかとなった。一般的な土の凍結融解後のせん断強さは、1回目の凍結融解作用によって40%程度の強度低下が認められるものの、その後の凍結融解サイクル数の増加による強度減少は小さいが¹⁰⁾、気泡混合軽量土の一軸圧縮強さは、凍結融解サイクル数の増加に伴って強度は徐々に減少していき5サイクル後の強度でも30%程度の強度減少に留まっている。

このことにより、一般的な土の場合と比較して気泡混合軽量土では、同一サイクル数における強度減少が小さくなっているといえる。よって、今回のような実験条件のもでは気泡混合軽量土は、一般的な土と比較して凍結融解作用に対する耐久性が大きく、寒冷地にける地盤材料としても有効利用できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 例えば, 土質工学会編, : 土の凍結—その制御と応用—, 土質基礎工学ライブラリー23, pp.70-90, 1994.
- 2) 例えば, 木下誠一, 福田正己, 矢作 祐: 北海道における土の凍結深の分布, 自然災害資料解析, 5, pp.10-15, 1978.
- 3) 例えば, Hoekstra, P.: The Physics and Chemistry of Frozen Soils, HBR, Special Report 103, pp.78-90, 1969.
- 4) 例えば, Andersland, O. B., Akili, W.: Stress Effect on Creep Rates of a Frozen Clay Soil, Geotechnique, 17, pp.27-39, 1967.
- 5) 例えば, 村尾恭一: 凍上機構について, 土と基礎, Vol.5, No.3, pp.17-20, 1957.
- 6) 例えば, 木下誠一, 鈴木義男, 堀口 薫, 田沼邦雄: 凍上と地下水位の関係 I, 低温科学, 物理編, 27, pp.367-376, 1969.
- 7) 高志勤, 生瀬孝博, 山本英夫: 地盤凍結工法を対象とした土の凍結膨張, 土と基礎, Vol.25, No.7, pp.25-32, 1977.
- 8) 久保宏: 積雪寒冷地舗装の凍上対策, 土木学会誌, Vol.64, No.2, pp.10-16, 1979.
- 9) 森井 徹, 津田 進, 高橋英紀, 長沢徹明: 凍結期における水路側壁の挙動, 農土誌, Vol.45, No.9, pp.15-19, 1977.
- 10) 長澤徹明, 梅田安治: 凍結融解土の諸性質について, 土と基礎, Vol.29, No.2, pp.39-46, 1981.
- 11) 日本道路公団: 気泡混合軽量土を用いた軽量盛土工法の設計・施工指針, pp.1-58, 1996.
- 12) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす水セメント比と養生日数の影響, 土木構造・材料論文集, Vol.18, pp.169-176, 2002.
- 13) 横田聖哉, 三嶋信雄: 気泡混合軽量土を用いた人工地盤, 土と基礎, Vol.44, No.5, pp.5-8, 1996.
- 14) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡混合軽量土の一軸圧縮特性に及ぼす初期養生温度の影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.35-42, 2002.
- 15) 亀井健史, 前川晴義, 堀切保則: 気泡混合軽量土の施工に伴う温度履歴が一軸圧縮特性に及ぼす影響, 地盤と建設, Vol.20, No.1, pp.27-33, 2002.
- 16) 古谷俊明: 軽量盛土材としての気泡モルタル, 土と基礎, Vol.37, No.2, pp.73-77, 1989.