

寒冷地におけるガラス発泡軽量材の適用性に関する検討

(株) 構研エンジニアリング 正会員 ○菅原 正則
 北海道科学大学 正会員 松田 圭大 正会員 川端 伸一郎
 室蘭工業大学大学院 正会員 木幡 行宏
 福田道路 (株) 非会員 畑山 良二

1. はじめに

近年、持続可能な循環型社会の形成のため、様々なリサイクル資材の高度利用が求められている。この背景より 2019 に JIS 認定された廃ガラスを用いたガラス発泡軽量材¹⁾ (以下、軽量材) に着目した。

軽量材は廃ガラス瓶を粉砕し、焼成・発泡させた多孔質で軽量の資材であり、地盤材料および造園・緑化材料として活用されている。このうち地盤材料としては、軽量盛土や裏込め材、暗渠排水材等に利用されている一方、北海道のような寒冷地での施工事例は少ない現状にある。寒冷地での適用に際しては、強度や透水性などの性状以外にも凍上性や凍結融解抵抗性も考慮する必要がある。しかし、同材料に対して検討した事例は少なく、利用の妨げになっていると考えられる。

また、軽量であることは内部に多量の空隙を有することを意味しており、副次的な効果として通常の粒状材料よりも高い断熱性が期待できる可能性がある。

そこで本研究は、軽量材の寒冷地における下層路盤や凍上抑制層への適用性を検討するため、凍上性や凍結融解抵抗性および熱的性質を調べたものである。

2. 実験試料の基本的性質

本研究で用いた試料は、JIS Z 7313 で規格化されたガラス発泡軽量材である。この材料は JIS 規格により、粒度や吸水率、せん断抵抗角などの基準を満たすことに加え、環境安全品質を満足することが求められている。また、用途に応じて 1 種と 2 種に区分されており、1 種が主に地盤材料として使用する軽量材である。図-1 は、今回用いる 1 種軽量材の粒度基準と試験粒度および粒子写真である。本研究では JIS の上下限粒度の中間値を試験粒度とした。また、粒子写真から明らかなように粒子内には多量の空隙が確認される。

表-1 は試料の基本的性質である。出荷時の含水比はほぼ絶乾状態 (0.1%) であるが、JIS 法の 24 hr 水浸により含水比 (吸水率) は 18.5% まで増加している。ただし、軽量材の粒子内には水浸程度では吸水しない閉塞間隙も含まれると考えられることから、煮沸や脱気による強制吸水を試みた。煮沸および脱気による吸水率は 100% 程度まで増加しており、約 80% の増加水分を保持できる閉塞間隙が粒子内に多量に存在することが確認された。この閉塞間隙の存在が見かけの土粒子密度 (24 hr 水浸での 1.893 g/cm³) と JIS 法の粒子密度

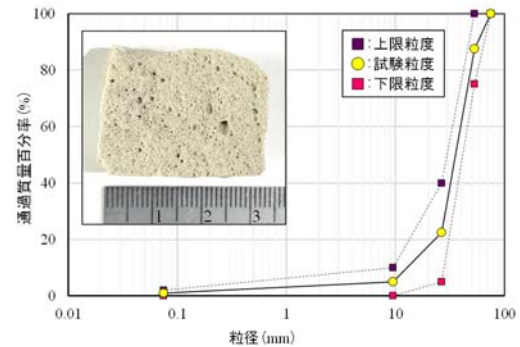


図-1 軽量材の粒度基準と試験粒度および粒子写真

表-1 試料の基本的性質

吸水条件の違いによる吸水率と土粒子密度		
吸水条件	吸水率 Q(%) D _{max} =37.5mm	土粒子密度 ρ _s (g/cm ³) D _{max} =2.0mm
0hr 水浸	0.1 ^{※1}	1.858
24hr 水浸	18.5 ^{※2}	1.893
24hr 水浸+1hr 煮沸	99.4	2.267 ^{※2}
3hr 脱気 (-95kPa)	104.0	-----
締固めによる乾燥密度の一例 ρ _d (g/cm ³)		
4.5kg ランマー (42 回・3 層) 最大粒径 D _{max} =37.5mm		0.459

※1 製品含水比 (出荷時状態)

※2 JIS 法による吸水率試験, 土粒子の密度試験

(2.267 g/cm³) の違いとして表れており、締固め時の乾燥密度においても、砕石などの 1/4 程度 (0.459 g/cm³) に軽量化される理由といえる。

また、通常的环境下では閉塞間隙は水分を含まない空隙として存在することから熱伝導特性、特に断熱性に良好な影響を与えられられる。

3. 凍上性および凍結融解抵抗性

本研究では、NEXCO 基準 (以下、NEXCO 法) と地盤工学会基準 (以下、JGS 法) の凍上試験を実施した。NEXCO 法は粒径 37.5 mm までの粗粒材を試験可能であること、凍上性に加えて凍結融解後の強度変化までを評価可能なことから本研究での主体とした。一方 JGS 法は大粒径には向かないものの試験精度の高さを活かし、軽量材の破碎性を意識して初期状態では数%しか含まれない 2 mm 以下を対象とした。

NEXCO 法の試験結果を表-2 に示す。軽量材は非凍上性であり、凍結融解による CBR 低下もみられず、CBR は 30% 以上を期待できる。なお、参考値として下層路盤の品質規格は粒状材料の種類により異なるが、修正 CBR20% 以上 30% 未満、もしくは 30% 以上²⁾ である。

キーワード リサイクル, 軽量材, CBR, 粒状材料, 凍上試験, 熱伝導解析

連絡先 〒065-0018 札幌市東区北 18 条東 17 丁目 1-1 (株) 構研エンジニアリング TEL011-780-2819

表-2 NEXCO 法（凍上・凍結融解試験）の試験結果

最大粒径 D _{max} (mm)	締固め条件	試験含水比 w ₀ (%)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	水浸 膨張比 r _e (%)	水浸後 含水比 w' (%)	凍上率 ξ (%)	CBR		
							未凍結 (%)	凍結融解後 (%)	保存率 (%)
37.5	4.5kg ランマー 42回・3層	0.1	0.459	0.0	51.8	0.0	35.2	40.4	114.8

表-3 JGS 法（凍上試験）の試験結果

最大粒径 D _{max} (mm)	締固め 条件	含水比 w ₀ (%)	乾燥密度 ρ _d (g/cm ³)	凍結速度 U (mm/h)	凍上速度 U _h (mm/h)
2	静的締固め	0.1	0.775	1.09	0.00

表-4 軽量材の熱伝導率，一般値および再現値

軽量材に対する熱伝導率の計測結果	
試験方法	非定常熱線法 ³⁾
供試体寸法(mm)	φ150・H125
熱伝導率 λ(W/m・K)	0.087
主な材料の熱伝導率 λ (W/m・K)	
断熱材 (XPS)	0.033 ⁴⁾
切込砕石	2.192 ⁵⁾

つぎに、破碎性を意識して 2 mm 以下で調整した材料での JGS 法での結果は、U_h=0.0 mm/h(表-3)となり、非凍上性(0.1 mm/h 未満)が確認され、NEXCO 法での結果と併せて本軽量材の寒冷地での利用に対して問題ない結果が得られた。

4. 軽量材の熱的性質と熱伝導解析

前述した吸水率の結果から、軽量材には粒子内に多くの閉塞間隙が存在することが確認されている。これらの空隙によって熱伝導特性も一般粒状材料とは異なることが推察され、凍結深さの抑制に寄与する可能性が考えられる。

そこで、軽量材の熱定数を測定し、熱伝導解析により凍結深さの抑制効果を検証した。熱定数の測定は、非定常熱線法による熱伝導率測定と土槽模型の凍結試験による体積熱容量測定を実施し、その結果を表-4, 5 に示した。両表には断熱材と切込砕石の一般値も併記した。

つぎに、実路での既往研究⁵⁾を参考とし、これら軽量材の熱定数を用いて表-6 に示す解析条件により熱伝導解析を行った。図-2 は実路で観測された凍結深さの実測値と解析値である。凍上抑制層を切込砕石とした解析値が実際の舗装構造を再現した条件であり、本解析の精度を表している。この解析法により、ほぼ実測値を予測可能であることから凍上抑制層を新たに軽量材に変更した条件で解析した。この結果から、凍上抑制層を軽量材にすると凍結進行が大幅に抑制されている。この実路は路床土が強凍上性のため凍上被害が確認された路線であり、仮に軽量材を用いた場合には、図-2 に示す実測値と解析値で得られた凍結深さの推移傾向より、路床土を凍結させない結果が得られた。

5. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- 1) 軽量材は CBR 値 30 %以上を示し、更に非凍上性材であり、凍結融解後の CBR 値も良好な結果を示した。
- 2) 熱伝導解析により、凍上抑制層を軽量材に置換することで、凍上被害を回避できる可能性が示唆された。

表-5 軽量材の体積熱容量と一般値および再現値

軽量材に対する体積熱容量の計測結果	
試験方法	土層模型試験
供試体寸法 (mm)	W600×D200×H250
体積熱容量 Q(MJ/m ³ ・K)	0.115
主な材料の体積熱容量 Q (MJ/m ³ ・K)	
断熱材 (XPS)	0.045 ⁴⁾
切込砕石	1.728 ⁵⁾

表-6 熱伝導解析の条件

二次元熱伝導解析 (TEMP/W)				
モデル深度	4m			
メッシュサイズ	1辺0.01mの正方形			
入力外力	実測の表面温度			
断面構成	熱定数			
	熱伝導率 λ (W/m・K)	体積 熱容量 Q (MJ/m ³ ・K)	体積 含水率 θ (m ³ /m ³)	
As 混合物層	1.448	1.875	0.00	
路盤	2.192	1.728	0.08	
凍上 抑制層	切込砕石	2.192	1.728	0.08
	軽量材	0.087	0.115	0.00
路床	0.751	1.451	0.25	

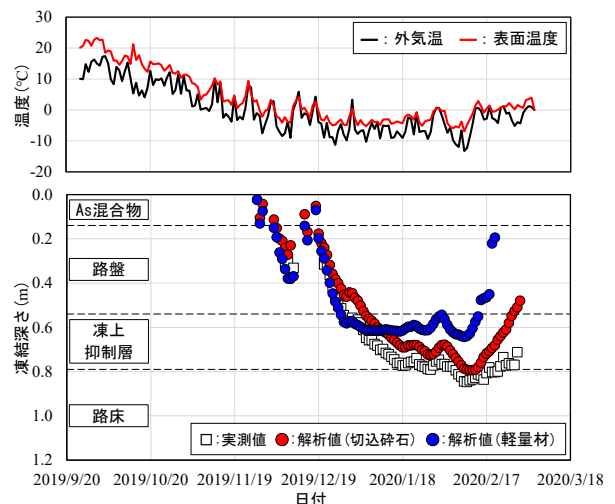


図-2 実測値と解析値で得られた凍結深さの推移

謝辞：(株) イーアンドエムの橋本年史氏には材料提供と研究遂行のご支援をいただいた。また、ナラサキ産業(株)の平本充氏には貴重なご助言とご協力を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本規格協会：ガラス発泡リサイクル資材, JIS Z 7313, 2019.
- 2) 公益社団法人日本道路協会：舗装設計便覧, p. 79, 2006.
- 3) 大村高弘：非定常熱線法, 周期加熱法及びホットディスク法による熱伝導率測定に関する研究, ニチアス技術時報, NO.338, 4号, pp. 1-2, 2003.
- 4) 地盤工学会北海道支部：寒冷地地盤工学, p. 48, 2009.
- 5) 松田圭大, 川口貴之, 川端伸一郎, 中村大：熱伝導解析を用いた舗装路における凍結深さの推定法に関する検討, 土木学会論文集 E1, Vol. 77, No. 2, pp. I_85-I_92, 2021.