

DOI: 10.11779/CJGE202202003

试论冻害敏感性的合理性

何浩松^{1, 2}, 滕继东^{*1, 2}, 张 升^{1, 2}, 盛岱超^{1, 2}

(1. 中南大学土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 高速铁路建造技术国家工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

摘 要: 冻胀和融沉是影响寒区工程设施安全服役的关键难题, 如何合理评价土体的冻害敏感性一直是寒区岩土工程的热点话题。长期以来, 以细粒含量为指标的冻胀特性评价体系, 较为简单、明确, 在指导寒区工程建设中发挥了重要作用。但近年来的研究成果表明: 不同国家和地区的冻害敏感性评价体系差别较大, 准确性参差不齐; 气态水迁移能够引起粗粒土发生冰体聚集和明显冻胀, 既有评价体系并未考虑。这对既有冻害敏感性理论提出了严峻挑战, 冻害敏感性的概念、指标、评价体系等是否合理, 值得深入探讨和梳理。对冻害敏感性存在的问题进行了概述分析, 分析了冻害敏感性的分级体系和可靠性, 并重点讨论既有冻害敏感性存在的潜在问题。结果表明: ①既有冻害敏感性评价方法可靠性普遍偏低, 可靠度在 50%~80%之间; ②既有冻害敏感性评价标准并不适用于气态水迁移诱发的土体冻胀, 仅根据细粒含量来判定土体冻害敏感性是不充分的, 应综合考虑冻结环境因素。③既有冻害敏感性评价指标可以用于评判土体的融沉特性。分析了既有冻害敏感性的不足并给出了相关的试验证明, 成果有助于补充完善土的冻害敏感性分类标准, 对寒区冻害防控有重要意义。

关键词: 冻害敏感性; 细粒含量; 可靠度; 气态水迁移; 环境因素

中图分类号: TU445

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)02-0224-11

作者简介: 何浩松(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事非饱和冻土等方面的科研工作。E-mail: haosonghe@csu.edu.cn.

Rationality of frost susceptibility of soils

HE Hao-song^{1, 2}, TENG Ji-dong^{1, 2}, ZHANG Sheng^{1, 2}, SHENG Dai-chao^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; 2. National Engineering Research Center of High-speed Railway Construction Technology, Changsha 410075, China)

Abstract: The frost heave and thaw weakening are the critical issues for the infrastructures in cold regions. How to reasonably assess the frost susceptibility of soils has been a hotspot in cold-region geotechnics. The frost susceptibility has been studied for about one hundred years since Casagrande (1931) proposed fine content as a main index to evaluate the frost susceptibility of soils. In most cases, the frost characteristics defined by fines content are clear and very simple, and work well in guiding the engineering construction in cold regions. However, the recent studies show that: (1) The frost heave occurs frequently in the subgrade which is designed and constructed absolutely according to the existing frost susceptibility criteria. (2) The current frost susceptibility criteria vary greatly in different countries and regions with different accuracies. (3) The vapour flow can lead to considerable frost heave in coarse-grained soils, which is not considered in the existing frost susceptibility. The above issues challenge the existing frost susceptibility. It is worth to analyze whether the concept of frost susceptibility is reasonable or not as well as its evaluation system. This study tries to analyze the advantages and disadvantages of the existing frost susceptibility criteria. The main findings are: (1) The reliability of the existing frost susceptibility is generally low, within the range of 50% to 80%. (2) The existing frost susceptibility criteria are not suitable to the case that the frost heave in coarse-grained soils is caused by vapour transfer. The freezing environmental factors should be considered in defining the frost susceptibility. (3) The existing frost susceptibility may be suitable to indicate the thaw weakening property of soils. The outcome of this study is helpful to replenishing the classification of frost susceptibility criteria. It would be of great significance to frost disaster prevention in cold regions.

Key words: frost susceptibility; fines content; reliability; vapour transfer; environmental factor

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178376, 51878665, U1834206); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ5748); 湖南省湖湘青年英才项目(2020RC3008); 中南大学创新驱动项目(2020CX034); 中南大学研究生自主探索创新项目(2021zzts0215); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200110, CX20210126)

收稿日期: 2021-03-17

***通信作者** (E-mail: jdteng@csu.edu.cn)

0 引 言

自 20 世纪 20 年代末以来, 国际上关于寒区岩土

冻害问题的研究逐渐兴起, 至今已有近 100 a 的历史。在 20 世纪 60—80 年代, 岩土冻害研究在国际上曾引起了广泛关注, 各类冻胀和融沉模型、经验公式不断涌出^[1]。进入 21 世纪以来, 随着青藏铁路、哈大高铁、沈丹高铁、哈齐高铁、兰新高铁等永久冻土和季节性冻土地区的基础设施建设, 岩土冻害问题又引起了广泛关注^[2-6]。冻胀和融沉是寒区岩土冻害的两种主要形式, 也一直是困扰寒区基础设施安全服役的突出问题。其中, 冻胀是指土冻结时产生的土体体积膨胀, 它通常由土中冰透镜体的集聚所引起, 随着温度升高, 含冰量大的冻土逐渐融化并对其上部路基造成融沉破坏, 导致路基强度明显下降, 并发生不均匀沉降。因此, 冻胀实际上是融沉的前提和主要诱因^[7]。

根据经典冻胀理论, 土中冰透镜体的产生需要 3 个条件: ①冻胀敏感性土; ②负温; ③水分向负温区的迁移。消除其中一个条件, 即可很大程度减轻冻害。目前, 国内外工程界普遍采用的抗冻害措施之一, 是冻胀敏感性弱的砂砾等粗颗粒材料换填细粒土, 或直接作为构筑物的填料。以中国寒区高速铁路路基工程为例, 工程技术人员按照设计规范要求, 从选择非冻胀敏感性土、隔排水、防寒等多方面采取了一系列防护措施。然而实践结果表明, 寒区高铁线路, 例如哈大、哈齐、兰新等, 仍然面临严峻的冻胀问题^[5-6, 8], 个别区段冻胀近 20 mm, 已远超设计规范, 而且大部分冻胀都发生在非冻胀敏感性的 A、B 组填料和级配碎石层^[6, 8-9]。但非冻胀敏感性填料持水能力差, 冻结后渗透系数极小^[10], 液态水难以迁移至冻结区, 从冻害机理来讲, 粗颗粒土的冻胀现象挑战了传统的冻胀认识, 亟需科学解释, 近年来发展的新理论认为气态水迁移成冰诱发冻胀^[11-15]。从工程应用的角度来讲, 非冻胀敏感性粗粒土能够产生显著冻胀, 是否意味着现有冻胀敏感性的判别标准存在一定的偏差? 我们对冻胀敏感性的理解是否已经充分? 既有冻胀敏感性评判体系是否需要改进?

目前, 国内外关于土体冻胀敏感性的判别方法主要分为三类。第一类是以土的级配为依据的判别方法, 主要依据粒径小于 0.075 mm 或 0.02 mm 的细颗粒含量, 必要时配合塑性指数和液限两个参数, 这是目前应用最广泛的方法^[16]。Chamberlain^[17]曾系统分析了 100 多种此类冻胀敏感性分类方法, 但发现并没有一个统一的、切实可行的定量标准, 并且大多数方法缺乏理论支撑和试验验证。第二类方法在土体级配基础上增补表征土-水-冰相互的参数^[18-23], 譬如地下水位深度、毛细高度、透水系数、矿物成分等参数, 这类方法较第一类方法有些改进, 但由于影响冻胀敏感性的参数太多, 难以综合考虑^[24]。第三类方法是直接通

过室内冻胀试验或现场测试试验来判定^[25-27], 但对不同的国家和地区, 冻胀试验千差万别, 从试样尺寸、冻结温度设置、补水方式、变形测试等均存在较大差异, 目前国际并没有规范化的室内测试方案。现场测试方法往往仅用于提出该指标的地区或行业, 难以概化推广。

由此看来, 关于冻胀敏感性的研究需要回归到以下几个问题: 冻胀敏感性的定义是什么? 为什么粗颗粒非冻胀敏感性材料也会产生明显冻胀? 现有的评判标准是否合理, 存在哪些问题, 是否需要更新? 围绕以上问题, 本文将首先探讨明确冻胀敏感性的定义, 通过对比分析阐述既有评价方法存在的不足。并在室内冻融变形试验的基础上, 提出并佐证新的冻胀敏感性的观点, 阐述冻胀敏感性分类的统一性。

1 冻胀敏感性的定义

吴紫汪作为中国最早开始冻胀敏感性研究的学者之一, 根据多年冻土的物理指标提出了冻土冻胀分类和融沉分类的方法, 并强调了二者的联系性和统一性^[28]。在随后的研究中, 中国一些学者普遍将冻胀敏感性的概念单一地与土的冻胀性质建立联系, 并针对不同类型土体开展了大量的室内试验, 确定冻胀率、冻胀变形等指标, 来判定土体的冻胀敏感性^[7, 29-32]。相应的行业规范也往往认为土的冻胀敏感性与冻结成冰过程相关, 不考虑土的融沉性质, 忽略了冻胀性与融沉性的联系。

冻胀敏感性概念来自英文词汇 frost susceptibility (FS)。实际上, FS 更准确的翻译应该为冻害敏感性, 它包括土的冻胀敏感性和融沉敏感性两部分。在国际上, 曾经出现过诸多学者只将其与冻胀过程相联系的现象。Chamberlain^[17]明确提出“冻胀性和融沉性均是评价铁路和公路路基填料的重要指标, 应统一考虑进冻害敏感性评价中”。ASTM 在 2013 年颁布的土的冻害敏感性测试方法中, 给出 FS 的定义为“土体在冻结过程中冰集聚而产生冻胀, 或融化过程中产生沉陷, 或二者兼具的性质”^[33]。Carter 等^[34]也曾给出类似的表述, 认为 FS 包含土体冻胀和融沉两个过程的性质。

由此可见, 将冻胀敏感性简单等同于 FS 是不合理的。目前将 FS 的研究局限在冻结过程是相对片面的, 应综合考虑冻胀和融沉指标的联系, 冻胀敏感性更应该称之为冻害敏感性。

2 既有冻害敏感性分类方法对比分析

2.1 冻害敏感性分类的差异

自 1931 年 Casagrande^[16]提出以细粒含量 (0.02

mm) 和不均匀系数 (C_u) 作为划分土体冻害敏感性的重要指标以来, 该标准被广泛使用, 并为以细粒含量为主划分冻害敏感性该类标准提供参考。欧美大多国家地区的冻害敏感性划分是以细粒含量和粒径分布为重要参考指标, 从实用角度划分出不冻胀土。以颗粒特征划分冻害敏感性的方法最简单便捷, 试验耗时短, 因此备受欢迎。以冻土大国著称的俄罗斯(苏联)及东欧国家, 在冻土理论、现场检测和室内试验方面做了大量研究工作^[35-39], 得到了与欧美体系有别的冻害敏感性分类, 主要按照冻胀率大小并结合水文地质情况划分土体冻害敏感性^[27, 40], 该类研究冻胀的思维模式对中国影响较大^[32, 41]。

20 世纪 30 年代初到 20 世纪末是土体冻胀问题研究发展的黄金时期, 涌现出以 Casagrande、Taber 和 Beskow 等为代表的早期冻土学者, 该段时间内呈现出了几十种以颗粒特征判定土体冻害敏感性的方法, 但是在最近的二三十年内, 关于冻害敏感性分类标准的文献并不多见, 主要还是在原有冻害敏感性分类的基础上加以改进和完善。本文归类了 10 余个国家地区以粒径特征划分的冻害敏感性分类标准, 主要国家地区规范有奥地利、中国、加拿大、丹麦、芬兰、德国、挪威、波兰、前苏联(俄罗斯)、罗马尼亚、瑞士和美国, 主要学者提出的标准有 Casagrande (1931)、Beskow (1935)、Schaible (1957)、Jessberger (1976)、Brandl (1979, 1980) 和 Konrad (1980)。其中奥地利和 Brandl 标准, 主要根据细粒含量和矿物成分将土体划分为冻胀土和不冻胀土。丹麦、芬兰和 Beskow 等标准主要根据土体级配将冻害性划分为冻害敏感性和

冻害不敏感性土。加拿大、德国、瑞士、美国、Casagrande 和 Jessberger 等标准主要根据土体类别、细粒含量将土体冻害等级性划分为 2~6 个不同等级。中国标准则需根据土体类别、粒含量、初始含水率以及冻胀率等条件将土体冻害性划分为 5 个等级。Konrad 以分凝势大小将土体划分为 6 个冻害等级^[42]。

冻害敏感性主要以区分冻胀土与不冻胀土为首要目的, 已达到其实用目的。上述评判标准主要有两大特性(分凝势和苏联(俄罗斯)标准不在讨论范围内): 其一是只考虑了液态水迁移引起的冻胀; 其二是以细粒含量作为主控因素表征冻害敏感性, 或附加以初始含水率、地下水位深度、冻胀速率、不均匀系数(C_u)以及矿物成分等因素, 进一步确定冻害敏感性等级。1989 年国际土力学与基础工程学会 (ISSMFE) ^[43] 在比较不同冻害敏感性分类时, 提出将各冻害敏感性标准均划为不冻害、低冻害、中等冻害和强冻害 4 个等级是比较合适的, 其中包括 6 等级划分的分凝势理论和 CRREL 的冻胀速率试验方法。为比较不同地区冻害敏感性的差异性, 本文亦将所归类的冻害敏感性重新划分为 4 个冻害等级, 本质上与 ISSMFE 会议上提出的划分结果一致, 新旧等级划分如表 1 所示。表 1 第 1 列表示原冻害等级分类, 第 3 列中原冻害等级采用文字表示, 对应的新冻害等级则采用括号内的数字表示, 新的冻害等级划分如第四列所示, 为四级分类。

为具体体现各评价标准在预测土体冻害敏感性等级的差异性以及能否准确区分冻胀土和不冻胀土, 本文收集了 6 篇文献 58 组冻胀试验数据, 试验材料涵盖细粒土到粗粒土, 粗粒土细粒含量由 0%~15%不

表 1 冻害敏感性四级分类

Table 1 Four levels of classification of frost susceptibility

原冻害等级	标准来源	原冻害等级 (对应新冻害等级)	新冻害等级
1-2	奥地利, 丹麦, 芬兰, 波兰, Beskow, Brandl	冻害不敏感 (1)	1-3
		冻害敏感 (3)	
1-2-3	加拿大 安大略 德国 罗马尼亚 Schaible	低冻害 (2), 中等冻害 (3), 强冻害 (4)	2-3-4
		不冻害(1), 中等冻害 (3), 强冻害 (4)	1-3-4
		不冻害(1), 低—高冻害 (3), 非常强冻害 (4)	1-3-4
		不一低冻害(2), 中—强冻害(3), 非常强冻害 (4)	2-3-4
1-2-3-4	挪威, 瑞士, Jessberger, Konrad	不冻害 (1), 低冻害 (2), 中等冻害 (3), 强冻害 (4)	1-2-3-4
		不冻害(1), 低冻害(2), 中等冻害(2), 强冻害(3), 非常强冻害(4)	1-2-3-4
1-2-3-4-5	中国 加拿大 曼尼托巴	不冻害(1), 低冻害(2), 中等冻害(2), 强冻害(3), 非常强冻害(4)	1-2-3-4
		不冻害 (1), 极低冻害 (2), 低冻害 (2), 中等冻害 (3), 强冻害 (3), 非常强冻害 (4)	1-2-3-4

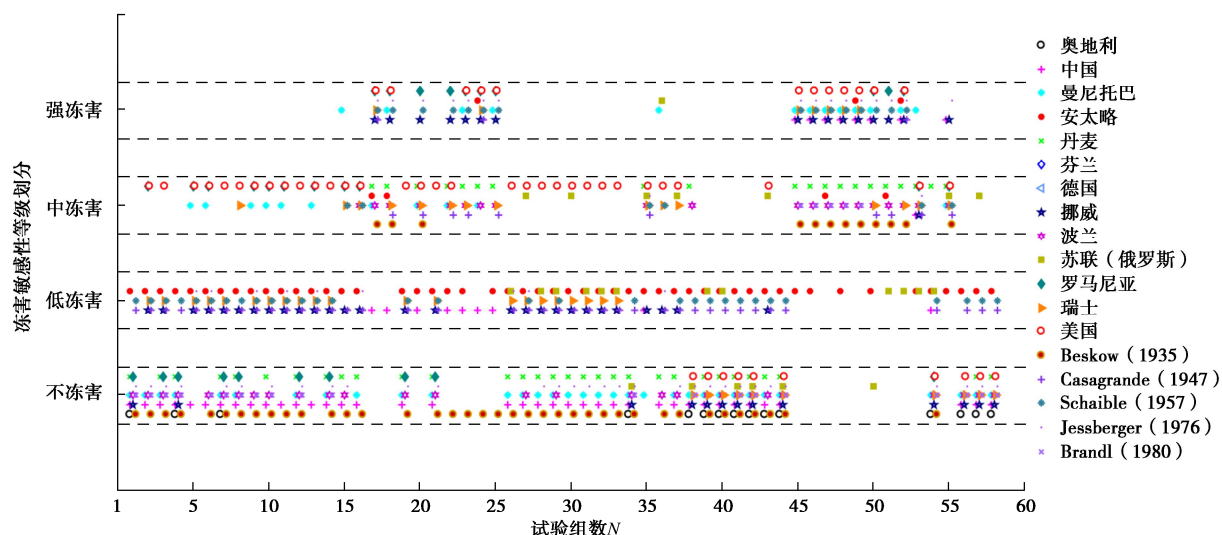


图1 58组试样冻害等级结果(中文标注代表国家,英文标注代表外国学者)

Fig. 1 Predicted results of classification of frost susceptibility of 58 samples (The Chinese and English labels represent the countries and the foreign scholars, respectively)

等, 土体类型范围较广, 土体材料基本性质和试验结果可参见文献[44~49]。按照本文重新划分的冻害敏感性等级, 对该58组试验材料冻害敏感性等级进行分析, 结果如图1所示。第56~58组粗粒土试样中, 小于0.075 mm细粒含量分别为1.5%, 2.8%和0%, 在众多评判标准中该材料均被认为是冻害不敏感材料, 但仍有一些标准认为此类型材料为冻害敏感性材料, 如加拿大安大略、Casagrande(1947)和Schaible(1957)的冻害敏感性标准。对于细粒含量在3%~15%的粗粒土, 不同判定标准对同一组粗粒土冻害敏感性划分不同, 其冻害敏感性等级涵盖了不冻害到强冻害各个等级, 对于粗粒土是否属于冻害敏感性土, 没有统一的认识。而对于细粒土, 所有评价标准对土体是否发生冻胀的判定是一致的, 均认为细粒土是冻害敏感性土, 但冻害敏感性强度等级不尽相同。由于各评价标准对同一组试样的冻害等级预测结果存在差异, 因此冻害敏感性分类结果存在一定的离散性, 如图1所示, 几乎没有一组试样的冻害敏感性等级分类是统一的。主要原因是不同标准对细粒含量、颗粒级配等的规定存在差异。例如, 曼尼托巴的冻害敏感性分类体系来源于美国陆军工程兵团标准, 并在此基础上进行了适当修订, 曼尼托巴冻害分类方法认为当碎石土、砂土中细粒含量(<0.02 mm)小于6%时, 该类型土是良好的路基材料, 可视为不冻胀^[50], 但美国陆军工程兵团则认为碎石土、砂土中细粒含量(<0.02 mm)小于6%时也是有可能发生冻胀的, 且冻害等级为很低到中等^[51]。而加拿大安大略省则对细粒含量的要求更为宽松, 当细粒含量(0.005~0.075 mm)小于40%时, 视为低冻害^[52]。

细粒含量作为划分冻害敏感性的主控指标, 但不同地区的标准存在较大的差异, 主要对细粒含量阈值和粒径大小控制上变现为参差不齐, 水分补给方式、冻结速率、地下水位等因素都是影响冻害敏感性存的重要因素, 细粒含量不是影响冻害敏感性的唯一主要因素, 目前缺乏进一步的深入探讨和理论支撑, 这将会给寒区工程设计和冻胀防治带来困难, 是后续研究的重点方向。

2.2 冻害敏感性分类方法的可靠性分析

冻害敏感性的一个重要作用就是区分冻胀土和不冻胀土, 对应不冻害等级和冻害等级(包括极低冻害等级到极强冻害等级)。本文采用可靠度表示冻害敏感性区分土体是否会发生冻胀的准确性, 利用冻害敏感性预测结果与试验结果的比值表示, 可靠度越大表明准确性越高, 其数学表达式如下:

$$P_r = \frac{\sum_{i=1}^N n_i}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中 P_r 为冻害敏感性可靠度; N 为试验总组数; 当第 i 组试验结果与冻害敏感性预测结果相同时, n_i 取1, 否则取0。 n_i 取值原理如下: 试验结果可判别土体是否发生冻胀, 再根据冻害敏感性标准并结合土性参数(细粒含量、级配曲线等), 预测土体是冻胀土或是不冻胀土。当试验结果与预测结果相一致时, 此时 n_i 取值为1, 否则为0。

利用可靠度的定义, 本文对58组试验土样进行分析, 除去边界和不可预测组土样后, 冻害敏感性分类标准的可靠性如图2所示, 图2(a)~(c)分别表示45组粗粒土、13组细粒土和58组土体冻害敏感性可靠度。粗粒土冻害敏感性可靠度范围在30%~

70%，可靠度主要在 50%附近波动，安大略的标准、Casagrande 标准以及 Brandl 标准可靠度为 65%左右，对于粗粒土而言是最高的。加拿大安大略交通运输部将细粒含量（ $0.005\text{ mm}\leq d\leq 0.075\text{ mm}$ ）小于 40%的土体定为低冻害等级，该等级所对应的细粒含量范围较大，满足了大部分粗粒土中的粉粒含量，因此该标准可靠度较高。Casagrande 标准可靠度高的主要原因是其冻害敏感性等级跨度大，没有十分详细的划分标准，如对于不含细粒良好级配的碎石土或砂土，其冻害敏感性等级为“不冻害到轻冻害”，因此试验结果很容易落在该标准所规定的范围内。安大略标准和 Casagrande 标准有一个共同点，都未定义冻害不敏感性土，即土体都有可能发生冻胀，只是其冻害强度等级存在差异。当土体细粒（ $<0.02\text{ mm}$ ）含量超过 3%时，则需对细粒矿物成分进行分析，因此对于 Brandl 冻害敏感性可靠度分析，只取细粒（ $<0.02\text{ mm}$ ）含量小于等于 3%的试样，因此该标准可靠度也相对较高，但不具代表性。奥地利标准可靠度最低，该标准涉及细粒（ $<0.02\text{ mm}$ ）矿物含量分析，故不做深入探讨。其中，加拿大曼尼托巴标准可靠度最低，仅为 35.6%，曼尼托巴冻害敏感性标准主要源于美国规范，但由 2.1 节分析可知，曼尼托巴评判标准将细粒含量（ $<0.02\text{ mm}$ ）上限规定为 6%，而此时所对应的 0.075 mm 的细粒含量必然不小于 6%，而在众多评判标准中，如此高的细粒含量足以引起粗粒土发生冻胀，因此曼尼托巴的评判标准可靠度最低。即使对于冻害敏感性发源地美国，其评判标准可靠度也仅为 52.4%，美国陆军工程兵团标准中冻害敏感性等级跨度较大，同一材料冻害等级可由“可忽略”到“强冻害”，意味着即使对同一组材料，其冻害敏感性也不是特定不变的，具体冻害等级需根据试验确定，因此美国陆军工程兵团标准和 ASTM 试验标准存在判定指标不同的差异。而对于其他评判标准，基本都是以细粒含量高低划分土体是否会发生冻胀，或者辅以初始含水率、液塑限或不均匀系数等。此类标准大同小异，均不能很好预测粗粒土能否发生冻胀。对于细粒土而言，所有冻害敏感性判定标准的可靠度都是 100%，因为其细粒含量均超过 50%，属于冻害敏感性土，既有判定标准对细粒土的冻胀预测是一致的、准确的。

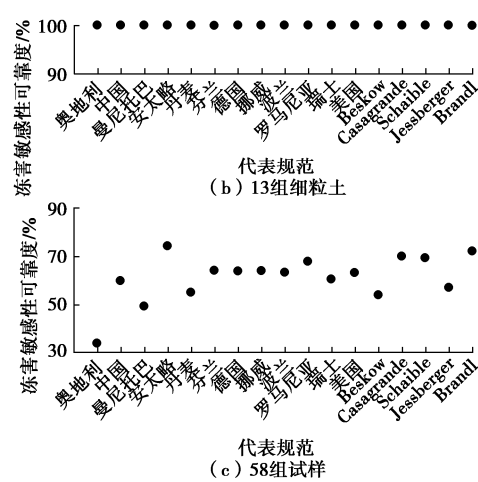
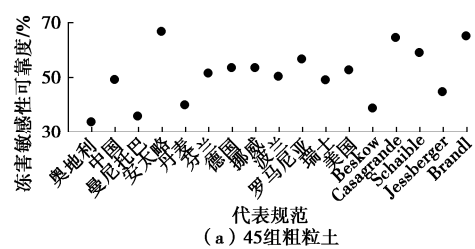


图 2 冻害敏感性标准可靠度
Fig. 2 Reliability of frost susceptibility criteria

3 土体冻融变形试验及结果分析

3.1 试验设计

本次试验采用自主研发的冻胀仪，试验装置如图 3 所示，图 3（a）为液态水补给试样冻胀示意图。试样直径为 10 cm，高为 15 cm，顶部和底部温度由循环回路的制冷液控制，控温范围为 $-30^{\circ}\text{C}\sim+90^{\circ}\text{C}$ ，控温精度为 0.1°C ，试样由顶部向下冻结，顶部和底部温度分别设为 -10°C 和 10°C ，试样底部放置多孔板防止土颗粒流失，也便于液态水补给。试样顶部安置灵敏度为 0.01 mm 的位移计，监测冻胀量的变化。采用 midi LOGGER GL840 采集温度，精度为 0.1°C ，由试样底部开始，在 0，2，4， \cdots ，14，15 cm 位置处埋设温度传感器，监测土体温度变化。所有仪器设备安装完毕后，用保温材料对试样进行包裹，防止径向热量交换。土样按照设定含水率配置好后，放置在密闭的塑料袋内 24 h，让内部水分均匀分布，粗粒土可现拌现用。装样前试样筒壁涂凡士林，土体材料分层填装、压实到有机玻璃筒中，每层填装厚度为 2 cm，试验持续时间为 7 d。由于制冷循环液能量损耗和横向温度传输影响，试样顶部实际温度为 -8°C 左右，底部实际温度大概为 12°C ，试验基本条件如表 2 所示。

表 2 补水冻胀试验方案设计					
Table 2 Design of water-supply frost heave test schemes					
土样	编号	含水率/%	干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	顶部温度/ $^{\circ}\text{C}$	底部温度/ $^{\circ}\text{C}$
粉土	1	16.0	1.80	-7.5	12.1
黏土	2	20.0	1.60	-7.9	12.6
A 料	3	3.0	1.60	-7.6	12.2
A 料	4	7.0	1.60	-7.7	12.2
细砾	5	3.0	1.60	-8.1	12.9

冻融试验装置如图 3（b）所示，试样直径为 10 cm，高为 8 cm，冻结过程持续 2d，试样顶部和底部温度分

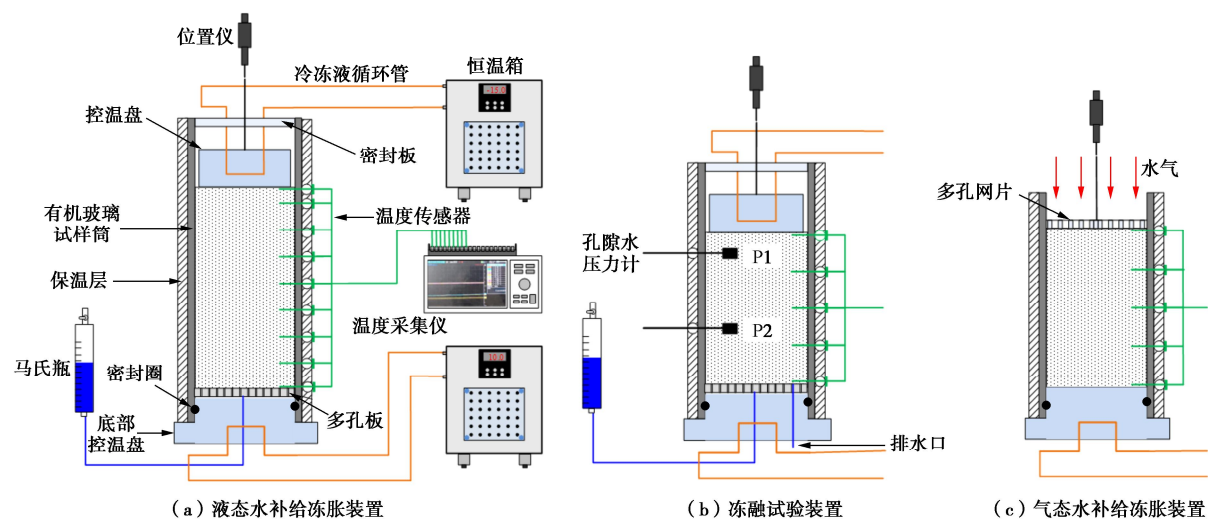


图 3 冻胀仪

Fig. 3 Schematic diagram of frost instrument

别设为 -15°C 和 10°C ,融化阶段时间为1 d,此时试样顶部和底部温度分别设为 15°C 和 10°C 。由试样底部开始,在0, 2, 4, 6, 8 cm位置处设置温度传感器,监测土体温度变化。并在2, 6 cm高度处设置孔隙水压力计,以监测土体冻融过程中孔隙水压力的变化,孔隙水压力计采用南京丹陌电子科技有限公司生产的DMKY型孔隙水压力传感器,探头直径为16 mm,长20 mm,量程为 $-40\sim 40\text{ kPa}$,精度为0.1 kPa,经标定校准后方可使用,试验基本条件如表3所示。补气冻胀试验如图3(c)所示,试样直和高度均为8 cm,试样由底部向上冻结,底部温度设置为 -15°C ,试样顶部直接与大气接触,在试样顶部放置多孔板,既便于冻胀量测量,利于水气进入试样内。由试样底部开始,在0, 2, 4, 6, 8 cm位置处设置温度传感器,监测土体温度变化。试验持续时间为7 d。试验基本条件如表4所示。

表 3 冻融试验条件

Table 3 Test conditions of freeze-thaw

土样	编号	含水率/%	顶部温度/ $^{\circ}\text{C}$	底部温度/ $^{\circ}\text{C}$	渗透系数/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
粉土	6	16.0	-10.5	10.2	8.1×10^{-5}
A料	7	3.0	-10.9	10.3	6.1×10^{-2}

表 4 气态水补给冻胀试验条件

Table 4 Test conditions of vapour-supply frost heave

材料	编号	含水率/%	干密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	底部温度/ $^{\circ}\text{C}$	顶部温度/ $^{\circ}\text{C}$	平均湿度/%
粉土	8	10.0	1.60	-11.2	5.2	80.5
黏土	9	10.0	1.60	-11.4	7.2	75.9
A料	10	3.0	1.60	-11.6	5.1	78.8
细砾	11	3.0	1.60	-11.0	8.8	80.2

室内冻胀试验是研究土体材料冻胀特性的一维冻胀试验,研究材料基本物理属性以及环境因素对冻

胀的影响,如细粒含量、初始含水率、冻结温度和补水条件等,试样尺寸对一维冻胀试验的影响较小。在不同类型冻胀试验中,本文试样尺寸和负温设置虽存在差异,但在同一类型试验中,试样尺寸和温度边界是相同的,因此试验结果仍具有说服力。由于侧壁摩擦力会限制冻胀量的增长,在证明气态水诱发粗粒土冻胀时,为使冻胀现象更明显,因此采用由下而上的冻结方式进行试验,并在试样顶部进行补气。

3.2 试验材料

本次室内试验选用典型的冻害敏感性和非冻害敏感性材料,分别为兰州粉土、长沙黏土、铁路路基A组填料和细砾土,特别需要注意的是A组填料和细砾土均不含细颗粒,4组材料粒径分布如图4所示。按照土工试验方法标准对土液塑限、最优含水率和最大干密度等物理性能参数进行测试,结果如表5所示。

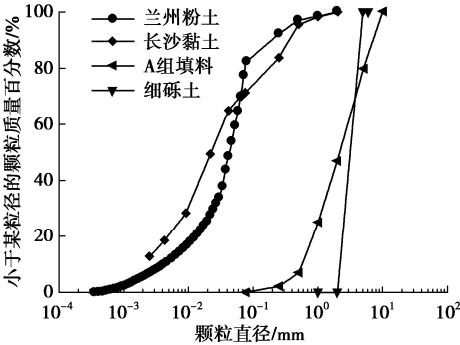


图 4 颗粒分布曲线

Fig. 4 Grain-size distribution curves

3.3 试验结果与分析

(1) 液态水补给下土体冻胀特性

图5给出了试样冻结过程冻胀量的变化趋势,冻结120 h后,粉土冻胀量高达13.11 mm,黏土冻胀量

表 5 材料物理参数
Table 5 Physical properties of materials

材料	粒径 /mm	液限 /%	塑限 /%	最优含 水率/%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)
粉土	<2	34.6	16.6	15.8	1.88
黏土	<2	42.0	25.4	21.3	1.71
A 料	0.075~10	—	—	—	1.68
细砾	2~5	—	—	—	1.67

为 10.89 mm，其主要冻胀量均发生在冻结前 12 h，该阶段内冻胀量快速发展，随后增长变缓，最后趋于稳定。相比于冻胀显著的细粒土，低含水率的 A 组填料和细砾试样的冻胀量非常小，分别仅为 0.01, 0.09 mm，可忽略。而初始含水率较高（7%）的 A 组填料，冻结开始后随即发生冻胀，液态水的持续补给使得试样持续冻胀，冻胀量随时间呈线性增加，试验结束后冻胀量为 1.35 mm，可见提高初始含水率，A 组填料也能发生冻胀。Sheng 等^[53]利用冻胀数值软件 PCHeave 模拟纯砂土冻胀，发现当砂土未冻水含量由 1%增大至 1.5%时，冻胀量可由 0.6 mm 增大到 22.8 mm，其所对应初始含水率为 10%~15%。Lund 等^[49]参照 ASTM 标准对不含细粒的粗粒土进行冻胀试验，发现试样冻胀量高达 4.0 mm。由此可见，只要冻结条件合适（如提高初始含水率），补水条件下粗粒土也能发生冻胀。

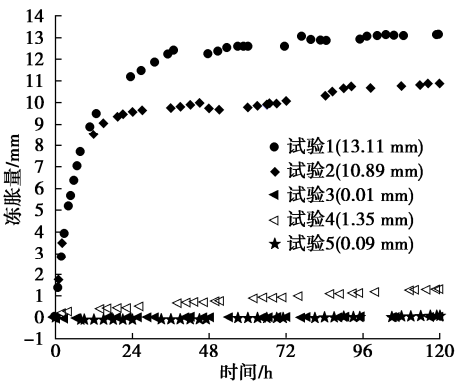


图 5 液态水补给下土体的冻胀量

Fig. 5 Frost heaves with liquid water supply

细粒土冻结过程中会形成具有一定厚度的冰透镜体，生长的冰透镜体将上附土层不断向上顶起，造成冻胀，这是引起细粒土冻胀的直接原因，如图 6（a）所示。粗粒土由于不具备大量未冻水膜，未冻区的水分难以由水膜迁移至冻结区，因此被认为是不冻胀土。当土体初始含水率增加时，未冻水含量也随之增加，冻胀量也会更为明显。如图 6（b）所示，粗粒土试样冻结锋面处形成大量孔隙冰，虽然孔隙冰并未分凝形成层状冰，但随着孔隙冰的不断积累变厚，慢慢将土颗粒向外排开，从而引起冻胀。这表明，在液态水补

给条件下，细粒土会发生冻胀，不含细粒的粗粒土是否会发生冻胀，这与试样初始冻结条件有关，如初始含水率，因此既有冻害敏感性适用于判别细粒土冻胀与否，在判别低细粒含量粗粒土是否发生冻胀时，应综合考虑冻结条件。

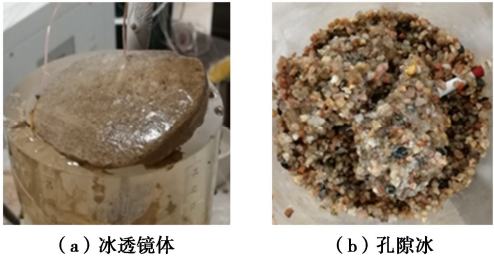


图 6 液态水补给下冻结特征

Fig. 6 Frozen characteristics with liquid water supply

（2）土体冻融特性和孔隙水压力变化

冻融变形和孔隙水压力变化如图 7, 8 所示。冻结开始后粉土冻胀量快速增长，持续时间大概为 12 h，随后增长速度变缓，持续冻结 48 h 后，粉土试样冻胀量为 7.59 mm。随后进入融化阶段，72 h 后试样融沉变形量为 3.94 mm，融沉变形量主要集中在前 2h，占总融沉量的 94%。本文粉土试样压实度为 0.957，冻融后产生竖向残余变形量 3.65 mm。对于非冻害敏感性 A 组填料，冻结 48 h 后，冻胀量仅为 0.8 mm，融化后残余变形量为 0.43 mm，可见 A 组填料对融沉变形不敏感。粉土试样冻结过程中，P1 处孔隙水压力快速降低，随后稳定在 -1.3 kPa 左右。P2 处孔隙水压力先快速增大至 1.6 kPa 左右，随后维持稳定，与 P1 变化相反。融化阶段，P1 与 P2 处孔隙水压力分别快速增大到峰值 2.4, 3.1 kPa，由于粉土的低渗透性（ 8.1×10^{-5} cm/s）和高持水特性，融沉产生的孔隙水压力缓慢消散。A 组填料由于其高渗透性（ 6.1×10^{-2} cm/s）和低持水特性，整个冻融周期几乎不产生孔隙水压力。

春季路基融沉会造成其强度、承载力和刚度模量低于其正常值，主要原因是冻土路基在融化过程会产生超孔隙水压力，超孔隙水压力缓慢消散导致土体有效应力降低。以细粒土填筑的路基排水能力差，融沉会引起超孔隙水压力，在外荷载作用下路面极易发生翻浆冒泥、强度降低等病害。为减缓路基冻胀，既有冻害敏感性标准要求采用细粒含量低的粗粒土（非冻害敏感性材料）填筑路基，此类材料渗透性强，能将土层融化产生的液态水快速排出，不会引起超孔隙水压力，对土体强度影响较小，因此非冻害敏感性填料能有效防止路基融沉。由试验结果和上述分析可知，现有冻害敏感性分类标准能区分融沉性土和非融沉性土，这表明传统冻害敏感性标准在指示土体融沉方面是适用的。

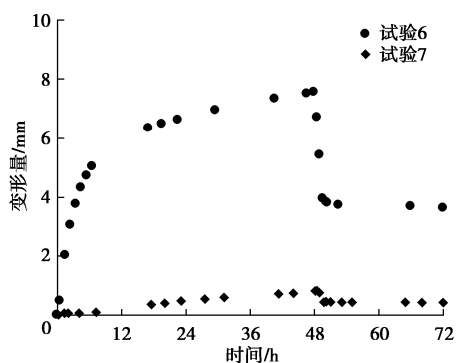


图7 冻融过程土体的变形量

Fig. 7 Deformations of soils during freeze-thaw

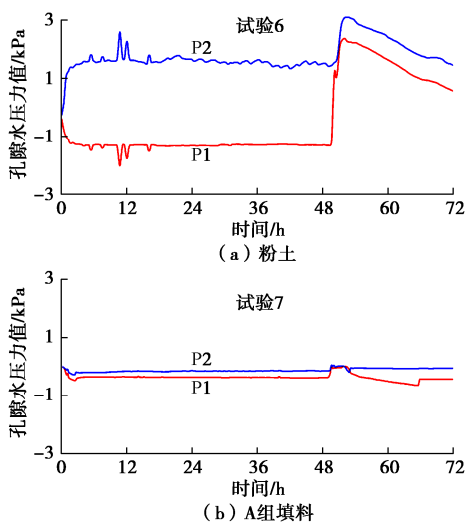


图8 土体孔隙水压力变化

Fig. 8 Variation of pore water pressure in soils

(3) 气态水补给下土体冻胀特性

气态水补给下试样冻胀变化趋势如图9所示。随着冻结的开始, A组填料和细砾试样随即发生冻胀, 冻胀量随着时间的累积大致呈线性增长, 试验进行168 h后, A组填料和细砾试样均发生了明显冻胀, 冻胀量接近3 mm, 但增长趋势仍未减缓。对于粉土, 前72 h未观测到冻胀, 随后发生缓慢冻胀, 136 h后, 冻胀量仅为0.25 mm, 此后冻胀量快速增长, 冻结168 h后累积冻胀量为1.22 mm。整个冻结周期内黏土均未发生冻胀。粗粒土具有更大尺寸的孔隙结构, 更有利于水气迁移至冻结区, 因此粗粒土更容易发生冻胀。试样冻结后, 粉土和黏土试样并未发现孔隙冰, A组填料和细砾的冻结锋面处生成大量孔隙冰, 孔隙冰包围着土颗粒, 随着孔隙冰的不断生长, 不断将土颗粒排挤, 从而形成冻胀。因此, 在气态水补给条件下, 原来冻害不敏感的粗粒土同样可以发生冻胀, 也即冻害敏感性不单与材料颗粒性质有关, 还需考虑环境因素如渗流边界等。

综合以上试验结果可以发现, 冻害敏感性使用是有条件限制的。高速公路或国道对冻胀变形不敏

感性^[54-55], 但春季融沉引起的超孔隙水压力是造成路基发生多种病害的首要原因, 参考既有冻害敏感性分类方法, 可选用细粒含量低的粗粒土作为路基填筑材料, 消除超孔隙水压力, 从而减小路基融沉破坏, 虽然大部分冻害敏感性都是建立在冻胀参数(冻胀量、冻胀速率、冻胀率)的基础上, 但既有冻害敏感性标准能区分路基填料是否会发生融沉, 这是冻害敏感性至今仍被广泛使用的原因之一。然而, 高铁路基对变形十分敏感, 微小的冻胀变形都会影响列车的正常运营^[56], 目前既有冻害敏感性标准不能将路基冻胀量控制在限定范围内。此外气态水迁移能诱发A组填料和细砾发生冻胀(对应试验10和11), 这是引起寒区高铁路基冻胀的重要原因。由此可见, 当基础结构对变形十分敏感或者存在气态水迁移引起基础结构冻胀时, 既有冻害敏感性标准需谨慎使用。

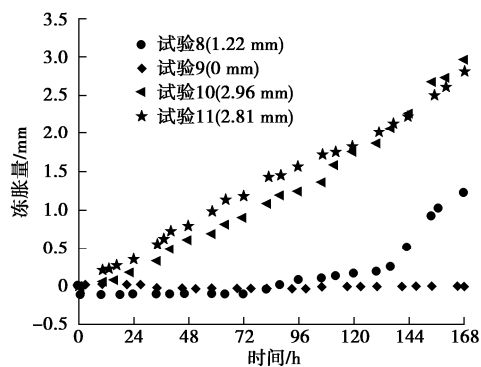


图9 气态水补给下土体的冻胀量

Fig. 9 Frost heaves with vapour supply

4 结论和展望

本文通过文献分析、数据统计以及室内试验, 对既有冻害敏感性的可靠度和适用条件进行了分析讨论, 证实了以细粒含量为主控因素划分土体冻害敏感性的标准是不全面的, 在划分土体冻害敏感性时应考虑冻结环境因素。

(1)传统称为冻胀敏感性的指标应该定义为冻害敏感性, 对应 Frost Susceptibility, 包括冻胀和融沉两部分。

(2)既有冻害敏感性等级划分不统一, 未能准确区分冻胀土和不冻胀土, 通过冻胀试验结果和冻害敏感性预测结果进行比较, 发现既有冻害敏感性可靠度仅落在50%~80%区间, 可靠度偏低, 对于粗粒土不完全适用。

(3)既有冻害敏感性判别指标适用于评价液态水补给条件下的土体冻胀特性, 但对以气态水迁移为主要水分运输机制的冻土是不适用的。粗粒土和细粒土在合适的冻结条件下都可以发生冻胀, 与土体本身的

冻害敏感性无关,因此在评价土体冻害敏感性时应考虑冻结环境因素。

(4) 粗粒土快速消散路基融化引起的孔隙水压力,有效减小路基融沉变形,故原有的冻害敏感性指标可以指示土体的融沉敏感性。

(5) 针对寒区岩土工程设计和后续研究,提出以下3点建议:①液态水防治一直是国内外寒区岩土工程设计和施工关注的重点,但往往忽略了负温下气态水迁移、相变成冰的致灾过程,在未来设计中需要谨慎考虑;②目前美国、日本和芬兰的标准冻胀试验中包含了融沉试验,只有美国的标准采用冻胀和融沉两项指标表征土体冻害敏感性,即冻胀速率和融沉 CBR 值,但融沉试验的统一性还缺乏研究,包括试样制作、试验步骤和确定融沉判别指标等等;③气态水成冰的冻胀理论模型还需要进一步完善,包括新的成冰分凝判据是什么、周期性冰透镜体是否形成、如何进行有效的数值模拟等等。

参考文献:

- [1] 程国栋, 何平. 多年冻土地区线性工程建设[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 213 - 217. (CHENG Guo-dong, HE Ping. Linearity engineering in permafrost areas[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 213 - 217. (in Chinese))
- [2] MA W, CHENG G D, WU Q B. Construction on permafrost foundations: Lessons learned from the Qinghai-Tibet railroad[J]. Cold Regions Science and Technology, 2009, **59**(1): 3 - 11.
- [3] LAI Y M. Cooling effect of ripped-stone embankments of Qing-Tibet railway under climatic warming[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, **48**(6): 598 - 604.
- [4] 马巍, 王大雁. 中国冻土力学研究 50a 回顾与展望[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 625 - 639. (MA Wei, WANG Da-yan. Studies on frozen soil mechanics in China in past 50 years and their prospect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 625 - 639. (in Chinese))
- [5] 卢春房. 路基工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 191 - 274. (LU Chun-fang. Subgrade Engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2015: 191 - 274. (in Chinese))
- [6] NIU F J, ZHENG H, LI A Y. The study of frost heave mechanism of high-speed railway foundation by field-monitored data and indoor verification experiment[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(3): 581 - 593.
- [7] 盛岱超, 张升, 贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(3): 594 - 605. (SHENG Dai-chao, ZHANG Sheng, HE Zuo-yue. Assessing frost susceptibility of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(3): 594 - 605. (in Chinese))
- [8] LIN Z J, NIU F J, LI X L, et al. Characteristics and controlling factors of frost heave in high-speed railway subgrade, Northwest China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, **153**: 33 - 44.
- [9] 蔡德钧. 高速铁路季节性冻土路基冻胀时空分布规律试验[J]. 中国铁道科学, 2016, **37**(3): 16 - 21. (CAI De-gou. Test on frost heaving spatial-temporal distribution of high speed railway subgrade in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2016, **37**(3): 16 - 21. (in Chinese))
- [10] TENG J D, YAN H, LIANG S H, et al. Generalising the Kozeny-Carman equation to frozen soils[J]. Journal of Hydrology, 2021, **594**: 125885.
- [11] TENG J D, SHAN F, HE Z Y, et al. Experimental study of ice accumulation in unsaturated clean sand[J]. Géotechnique, 2019, **69**(3): 251 - 259.
- [12] TENG J D, LIU J L, ZHANG S, et al. Modelling frost heave in unsaturated coarse-grained soils[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(11): 3307 - 3320.
- [13] ZHANG S, TENG J D, HE Z Y, et al. Canopy effect caused by vapour transfer in covered freezing soils[J]. Géotechnique, 2016, **66**(11): 927 - 940.
- [14] ZHANG S, TENG J D, HE Z Y, et al. Importance of vapor flow in unsaturated freezing soil: a numerical study[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, **126**: 1 - 9.
- [15] 刘建龙, 滕继东, 张升, 等. 气态水迁移诱发非饱和粗粒土冻胀的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, **43**(7): 1297 - 1305, 1379. (LIU Jian-long, TENG Ji-dong, ZHANG Sheng, et al. Experimental study on frost heave in unsaturated coarse-grained soil caused by vapour transfer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, **43**(7): 1297 - 1305, 1379. (in Chinese))
- [16] CASAGRANDE A. Discussion of frost heaving[C]// Proceedings, Highway Research Board, 1931: 168 - 172.
- [17] CHAMBERLAIN E J. Frost Susceptibility of Soil, Review of Index Tests[M]. Hanover, NH: US Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 1981.
- [18] WILLIS E A. Discussion on the relation of frost phenomena to the subgrade by Burton and Benkelman[C]// Proceedings, Highway Research Board, 1930: 275.

- [19] MAAG G. Ein physikalisches frostkriterium[J]. Strasse und Verkehr, 1966, **52**(8): 431 - 434. (MAAG G. A physical frost criterion[J]. Road and Traffic, 1966, **52**(8): 431 - 434. (in German))
- [20] WILLIAMS P J. Pore pressures at a penetrating frost line and their prediction[J]. Géotechnique, 1966, **16**(3): 187 - 208.
- [21] JONES R H, HURT K G. An osmotic method for determining rock and aggregate suction characteristics with applications to frost heave studies[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 1978, **11**(3): 245 - 252.
- [22] HOEKSTRA P, CHAMBERLAIN E J. Frost Heaving Pressures[R]. CRREL Internal Report, 1965.
- [23] RIDDLE J A. Susceptibility to Frost Heaving of Soils at Selected Sites along the Liard River Valley, Determined by Pore Pressure Measurements[R]. Task Force on Northern Oil Development, Environmental-Social Committee Report 73-3, 1973: 465 - 511.
- [24] KONRAD J M. Frost susceptibility related to soil index properties[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1999, **36**(3): 403 - 417.
- [25] JIN H W, LEE J, RYU B H, et al. Simple frost heave testing method using a temperature-controllable cell[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, **157**: 119 - 132.
- [26] 铁路工程土工试验规程: TB 10102—2010[S]. 2011. (Code for Soil Test of Railway Engineering: TB 10102—2010[S]. 2011. (in Chinese))
- [27] VASILYEV Y M. Factors affecting the heaving of subgrade soils at freezing[J]. Frost in Soil, 1973, **12**: 17 - 18.
- [28] 吴紫汪. 冻土工程分类[J]. 冰川冻土, 1982, **4**(4): 43 - 48. (WU Zi-wang. Classification of frozen soils in engineering constructions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1982, **4**(4): 43 - 48. (in Chinese))
- [29] 陈肖柏, 王雅卿, 何平. 砂砾料之冻胀敏感性[J]. 岩土工程学报, 1988, **10**(3): 23 - 29. (CHEN Xiao-bai, WANG Ya-qing, HE Ping. Frost susceptibility of sandy gravel during freezing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **10**(3): 23 - 29. (in Chinese))
- [30] 陈肖柏, 王雅卿, 何平. 砂砾土中的成冰作用及其冻胀敏感性[J]. 科学通报, 1987, **23**: 1812 - 1815. (CHEN Xiao-bai, WANG Ya-qing, HE Ping. Ice formation and frost susceptibility of sandy gravel soil[J]. Chinese Science Bulletin, 1987, **23**: 1812 - 1815. (in Chinese))
- [31] 张以晨, 李欣, 张喜发, 等. 季冻区公路路基粗粒土的冻胀敏感性及其分类研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(10): 1522 - 1526. (ZHANG Yi-chen, LI Xin, ZHANG Xi-fa, et al. Research on frost heave susceptibility and classification of coarse grained soil of highway subgrade in seasonally frozen ground region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(10): 1522 - 1526. (in Chinese))
- [32] 叶阳升, 王仲锦, 程爱君, 等. 路基的填料冻胀分类及防冻层设置[J]. 中国铁道科学, 2007, **28**(1): 1 - 7. (YE Yang-sheng, WANG Zhong-jing, CHENG Ai-jun, et al. Frost heave classification of railway subgrade filling material and the design of anti-freezing layer[J]. China Railway Science, 2007, **28**(1): 1 - 7. (in Chinese))
- [33] ASTM D 5918-13 2013. Standard Test Methods for Frost Heave and Thaw Weakening Susceptibility of Soils[S]. 2013.
- [34] CARTER M, BENTLEY S P. Frost Susceptibility in Soil Properties and Their Correlations[M]. UK: John Wiley and Sons, Ltd, 2016.
- [35] АЛЕКСЕЕВА Е К. Лабораторная методика определения пучения грунтов при промерзании[C]// Конференция по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их исследования. Москва: АН СССР, 1957: 304 - 306. (ALEKSEEVA E K. Laboratory technique for determining ground heaving during frost penetration[C]// Conference on Engineering and Geological Properties of Rocks and the Methods of Their Investigation. Moscow: AN SSSR, 1957: 304 - 306. (in Russian))
- [36] 罗曼 JT. 冻土力学[M]. 张长庆, 张泽, 译. 北京: 科学出版社, 2016. (ROMAN L T. Frozen Soil Mechanics [M]. ZHANG Chang-qing, ZHANG Zhe, trans. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))
- [37] ZHELEZNIAK M, WU Q B, KIRILLIN A, et al. Permafrost distribution and temperature in the Elkon Horst, Russia [J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2021, **13**(2): 107 - 122.
- [38] KUKKONEN I T, SUHONEN E, EZHOVA E, et al. Observations and modelling of ground temperature evolution in the discontinuous permafrost zone in Nadym, north-west Siberia[J]. Permafrost and Periglacial Processes, 2020, **31**(2): 264 - 280.
- [39] VASILIEV A A, DROZDOV D S, GRAVIS A G, et al. Permafrost degradation in the western Russian arctic[J]. Environmental Research Letters, 2020, **15**(4): 045001.
- [40] КРОНИК Л А. Морозостойкость грунтов, используемых при строительстве гидротехнических сооружений на Крайнем Севере[R]. Москва: Инженерно-строительный институт. Сборник трудов, 1973, **115**: 159 - 167. (KRONIK

- L. A. Frost Susceptibility of Soils Used for Building Hydraulic Structures in the Far North[R]. Moscow: Civil Engineering Institute. Collection of Works, 1973, **115**: 159 - 167. (in Russian))
- [41] 陈肖柏, 刘建坤, 刘鸿绪, 等. 土的冻结作用与地基[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 149 - 154. (CHEN Xiao-bai, LIU Jian-kun, LIU Hong-xu, et al. Frost Action of Soil and Foundation Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2006: 149 - 154. (in Chinese))
- [42] KONRAD J M. Frost Heave Mechanics[D]. Edmonton: The University of Alberta, 1980.
- [43] ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering) Technical Committee on Frost, TC-8. Frost in Geotechnical Engineering[R]. Saariselkä, Finland, Espoo, VTT Symposium, 1989, **11**: 1570.
- [44] ĆWIAKAŁA M, GAJEWSKA B, KRASZEWSKI C, et al. Laboratory investigations of frost susceptibility of aggregates applied to road base courses[J]. Transportation Research Procedia, 2016, **14**: 3476 - 3484.
- [45] ASKAR Z, ZHANBOLAT S. Experimental investigations of freezing soils at ground conditions of Astana, Kazakhstan[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2015, **7**(4): 399 - 406.
- [46] JOHNSON A E. Freeze-thaw Performance of Pavement Foundation Materials[D]. Iowa: Iowa State University, 2012.
- [47] NAKAMURA D, GOTO T, ITO Y, et al. A basic study on frost susceptibility of rock: differences between frost susceptibility of rock and soil[C]//14th Conference on Cold Regions Engineering. August 31-September 2, 2009, Duluth, Minnesota, USA. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2009: 89 - 98.
- [48] NURMIKOLU A. Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track[D]. Tampere: Tampere University of Technology, 2005.
- [49] LUND M S M, HANSEN K K, ANDERSEN I B. Frost susceptibility of sub-base gravel used in Pearl-Chain Bridges: an experimental investigation[J]. International Journal of Pavement Engineering, 2018, **19**(11): 986 - 998.
- [50] AHAMMED M A. Subgrade soil frost susceptibility assessment for pavement design in Manitoba[C]// TAC 2018: Innovation and Technology: Evolving Transportation - 2018 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada, Ottawa, 2018.
- [51] U.S.ACE Engineering Manual: Pavement Criteria for Seasonal Frost Conditions[S]. Washington DC: Army Corps of Engineers, EM 1110-3-138, 1984.
- [52] Ministry of Transportation Ontario. Pavement Design and Rehabilitation Manual[S]. Second Edition, 2013.
- [53] SHENG D C, ZHANG S, YU Z W, et al. Assessing frost susceptibility of soils using PCHeave[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, **95**: 27 - 38.
- [54] DORÉ G, ZUBECK H K. Cold regions pavement engineering [M]. Reston: American Society of Civil Engineering, 2009, VA 20191 - 4400.
- [55] LORANGER B. Laboratory Investigation of Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates and Field Assessment of Frost Heave and Frost Depth[D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2020.
- [56] SEEHUSEN J. Flytoget må kjøre i 80 [OL]. 2011: Available at: <https://www.tu.no/artikler/flytoget-ma-kjore-i-80/238210>. (SEEHUSEN J. The train must run at 80 km/h [OL]. 2011: Available at: <https://www.tu.no/artikler/flytoget-ma-kjore-i-80/238210>. (in Norwegian))