

DOI: 10.11779/CJGE20230756

# 冻结作用下土石坝护坡土石混合体水分迁移试验研究

李卓<sup>1,2</sup>, 姜鑫<sup>3</sup>, 张继勋<sup>3</sup>, 赵昱<sup>3</sup>, 王虞清<sup>3</sup>, 鲁洋<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院大坝安全与管理研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029;

3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210024)

**摘要:** 土石坝护坡冻胀破坏主要由护坡砂砾料垫层、坝体填土自身冻胀和水分迁移共同作用引起。针对寒区土石坝护坡普遍存在的隆起、错位、坍塌等冻胀破坏问题, 以寒区某土石坝护坡工程砂砾料垫层、坝体填土为研究对象, 采用自研的土石混合体水分迁移冻结模型试验装置系统, 开展了补水条件下单向冻结模型试验研究, 研究了温度、含石量、水分迁移对土石坝护坡土石混合体冻胀特性的影响。研究表明: 温度、含石量对土石混合体的冻胀特性影响显著; 水分迁移受土石含量、温度和含水率影响, 护坡砂砾料垫层和坝体填土含水率越大, 冻结过程中水分迁移量越大, 水分相变成冰的条件越充分; 土、石分层对黏土温度变化影响较大, 黏土和砾石分层可有效减小水分迁移量和冻胀量, 对土石坝护坡防冻胀是有利的; 土石混合体内部孔隙水相变成冰并在试样内部形成冰晶是冻胀量增加的主要原因, 土石混合体原位冻胀以及冻结过程中冰晶的生长使冻胀量不断增加, 且补水量越大, 试样冻胀量就越大; 不同温度、含石量下试样的冻胀量均随补水量的增加而基本呈线性增大, 且含石量对冻胀量增加速率影响较小, 温度对冻胀量增加速率影响较显著。研究成果可为寒区土石坝护坡设计和运行管理提供科学依据和技术支撑, 补充了碾压式土石坝设计规范中的护坡设计。

**关键词:** 土石坝; 土石混合体; 水分迁移; 冻胀破坏; 冻结作用

中图分类号: TU433

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)05-0959-09

**作者简介:** 李卓(1979—), 男, 博士, 宁夏隆德人, 正高级工程师, 硕士生导师, 主要从事水工建筑物防冻胀、边坡稳定、水库大坝安全评价等方面研究。E-mail: zhuoli@nhri.cn。

## Experimental study on water transfer of soil-rock mixtures under freezing action

LI Zhuo<sup>1,2</sup>, JIANG Xin<sup>3</sup>, ZHANG Jixun<sup>3</sup>, ZHAO Yu<sup>3</sup>, WANG Yuqing<sup>3</sup>, LU Yang<sup>3</sup>

(1. Dam Safety Management Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety Management

Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University,

Nanjing 210024, China)

**Abstract:** The frost-heaving failure of earth-rock dam slopes is mainly caused by the combined action of sand and gravel cushion, frost heaving of dam fills and water migration. Aiming at the common frost-heaving damage problems such as uplift, dislocation and collapse of earth-rock dam slopes in cold areas, taking the sand and gravel cushion and dam fills as the research object, a self-developed water-transfer freezing test system for the earth-rock mixtures is used to carry out a one-way freezing model test study under water refill conditions. The effects of temperature, rock content and water migration on the frost-heaving characteristics of the soil-rock mixtures for slope protection of earth-rock dams are studied. The results show that the temperature and stone content have significant effects on the frost-heaving characteristics of the soil-rock mixtures. The water migration is affected by the soil and rock content, temperature and water content. The larger the water content of slope protection sand and gravel and dam fills, the greater the water migration during freezing, and the more sufficient the conditions for water phase to become ice. The stratification of soil and rock has a great influence on the soil temperature. The stratification of soil and gravel can effectively reduce the water migration and frost heaving, which is beneficial for the slope protection and frost-heaving prevention of the earth-rock dams. The main reason for the increase of the frost heaving is that the pore water phase in the soil-rock mixtures becomes ice and forms segregated ice in the samples. The in-situ frost heaving of the soil-rock mixtures and the growth of the segregated ice during the freezing process make the frost-heaving amount increase continuously. The freeze-heaving quantity of the samples under different temperatures and rock contents basically increases linearly with the increase of the water recharge, and the different rock contents have small effects on the rate of the freeze-heaving increase,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979173, 52109123)

收稿日期: 2023-08-08

while the different temperatures have a significant effect. The research results provide a scientific basis for the slope protection design and operation management of earth-rock dams in cold areas, and supplement the slope protection design in the design specifications of rolled earth-rock dams.

**Key words:** earth-rock dam; earth-rock mixture; water migration; frost-heaving failure; freezing action

## 0 引言

截至 2020 年底,中国已建成水库大坝 98556 座,其中寒区水库大坝 22579 座,土石坝约占 82%<sup>[1]</sup>。土石坝护坡冻胀破坏是寒区土石坝普遍存在问题,土石坝护坡冻胀破坏主要表现为护坡隆起、错位、坍塌等冻胀破坏;位于寒区的土石坝护坡在水库水面结冰后产生的冰推冰拔和护坡下砂砾料垫层、坝体填土自身冻胀共同作用下会发生冻胀破坏,当气温降至零下时水分由坝体内部不断向坝坡表层迁移从而加剧冻胀破坏。例如,黑龙江省兰西县泥河水库大坝护坡采用渣油混凝土板护坡,根据多年护坡冻胀量观测资料,发现大坝护坡以隆起破坏为主;辽宁省宽甸满族自治县蒲石河水库大坝护坡采用混凝土网格梁护坡,根据大坝安全监测资料,发现上游砌石护坡发生砌石拔出等冻胀破坏;宁夏西吉县张家嘴头水库大坝上游坝坡护坡冻胀量最大值为 23 cm,经过 3~5 个冻融循环后大坝护坡发生了冻融冻胀破坏。土石坝护坡冻胀破坏主要由砾料垫层、坝体填土自身冻胀破坏引起,在负温作用下坝体内部会发生水分迁移,而水分迁移是引起砂砾料垫层、坝体填土自身冻胀的主要原因。因此,研究冻结作用下土石混合体水分迁移试验对土石坝护坡防冻胀破坏具有重要意义。

冻土中的水分迁移是指冻结过程中土体内部毛细水和薄膜水的迁移<sup>[1]</sup>,只有深入研究水分迁移的过程才能更好的揭示土体的冻胀破坏。针对水分迁移的研究,在 1885 年,有学者提出毛细管作用力理论之后,Taber<sup>[2]</sup>提出了结晶力理论。Beskow<sup>[3]</sup>基于薄膜水的迁移理论,认为是未冻水膜导致了土颗粒不平衡的渗透压力。Taylor 等<sup>[4]</sup>建立了水热耦合模型并模拟了未冻水的迁移过程,发现水分迁移的驱动力是未冻含水率梯度。王铁行等<sup>[5]</sup>基于非饱和黄土试样的试验结果,考虑了含水率和密度的影响,得到了温度梯度引起含水率梯度变化的关系式。曾桂军等<sup>[6]</sup>基于第二冻胀理论,建立了饱和土体冻胀模型模拟饱和土体底部无压补水和顶部加压的冻胀情况,并通过对比数值模拟和试验结果验证了模型的可靠性。明锋等<sup>[7]</sup>根据能量平衡与质量守恒原理,建立了考虑孔隙率变化的一维水热模型,发现了随着冻结时间的增长,补水量逐渐增大的规律。魏厚振等<sup>[8]</sup>对饱和粉土进行冻结试验,研究了不同温度边界和高度对试样冻胀量的影响,发现试样高度越高,冻胀量越小的规律。赵再昆等<sup>[9]</sup>采用

自制的高温水热迁移装置,进行了不同高温水平下不同初始含水率的黄土水热迁移试验,发现高温对水分具有显著驱动作用。

目前国内外水分迁移研究主要集中在公路工程、铁路工程及水利工程中的输水渠道等领域。张喜发等<sup>[10]</sup>通过对路基含水率进行测试,研究了路堑段冻前冻后含水率变化,发现不管地下水位埋深大小,冻结期间水分都向路基上部路床迁移。张以晨等<sup>[11]</sup>对不同含泥量的粗粒土进行了封闭系统下的冻胀模拟试验,研究了粗粒土冻胀率和含水率的关系,得到了粗粒土的不同冻胀等级和界限含水率值。王书娟等<sup>[12]</sup>为掌握季节性冰冻地区路基冻胀机理,在重冻区路基中埋设温度传感器对温度进行自动监测,发现不同路基土质中冰的存在形式不同,且不同形式冰结构出现的深度和含水率呈现出一定的规律性。Arenson 等<sup>[13]</sup>采用荧光剂追踪法确定了粗粒土冻结过程中未冻水膜的位置。王天亮等<sup>[14]</sup>通过葡氏击实和冻胀试验,研究了不同细粒土含量、不同干密度条件下细圆砾土填料的冻胀特性,发现细圆砾土试样冻土段的含水率均大于初始含水率,其不同位置含水率分布曲线呈 S 型。高建强等<sup>[15]</sup>在考虑覆盖层和补水条件下进行了室内单向冻结试验,开展了土质、温度梯度和温度边界条件对非饱和粗颗粒填料冻胀特性的影响研究,得出试样冷端温度边界越低,冻胀量越小的结论。张玉芝等<sup>[16]</sup>采用自行研发的水气迁移试验装置开展了单向冻结试验,分析了细粒含量对高速铁路基粗颗粒填料水气迁移特征及冻胀特性的影响,发现水气混合迁移模式下,细粒含量越高,外界补水量越大的规律。姜海波等<sup>[17]</sup>对不同部位的渠基土体进行冻融试验,研究了渠基土样在冻融过程中的水分迁移,揭示了渠基土体单向冻融过程中的水分迁移规律、孔隙水的分布状态及其冻胀微观特性。

综上,目前土石混合体水分迁移的研究主要集中在公路工程、铁路工程及水利工程中输水渠道,对土石坝工程护坡土石混合体中水分迁移的规律研究较少,土石坝护坡土石混合体与上述工程不同,主要是由于土石坝护坡结构、防渗形式、运行特点等与上述工程完全不同,土石坝工程有自身特殊性,受到水压力、冰压力、浪压力等不同,其冻融冻胀破坏过程更加复杂,尤其是库水位波动区护坡。根据《碾压式土

石坝设计规范》(SL274—2020)<sup>[18]</sup>对反滤料的材料选择及填筑要求,反滤料可利用天然或经过筛选的砾石,应为连续级配,小于 0.075 mm 的颗粒含量应不超过 5%,且垂直或倾斜的反滤层最小厚度为 0.5 m。对于不同工程等别、级别、区域、地质条件的土石坝,砂砾料垫层厚度大不相同,土石坝护坡设计中要考虑砂砾料垫层厚度。当冻深一定,砂砾料垫层厚度较大时,土石坝护坡冻胀破坏主要由砂砾料垫层自身冻胀引起;砂砾料垫层厚度较小时,土石坝护坡冻胀破坏主要由坝体填土自身冻胀引起。而在不同的冻土区,土石坝护坡冻胀破坏程度也有所差异,气温较低的冻土区,冻胀破坏更为严重,因此,研究含石量、温度、水分迁移对土石混合体的冻胀特性影响具有重要意义。针对土石坝护坡冻胀破坏问题,以寒区某土石坝工程护坡土石混合体为研究对象,采用自研的土石混合体水分迁移冻结模型试验装置系统,开展了补水条件下单向冻结模型试验,研究了温度、含石量、水分迁移对土石混合体冻胀特性的影响,研究成果可为研究寒区土石坝护坡防冻胀设计和运行管理提供科学依据和技术支撑,补充了碾压式土石坝设计规范中的护坡设计。

1 试验方案

1.1 试验材料

本试验材料取自宁夏回族自治区某土石坝工程坝体填筑料和砂砾石垫层料,黏土基本物理性质指标见表 1。制样过程首先将黏土风干,用木槌敲碎大颗粒土块并过 2 mm 筛,然后根据试验设计配比向风干黏土中喷洒相应质量的水,并将黏土装入密封塑料袋中静置约 24 h 以确保水分均匀润湿黏土,并根据各试样含石量设计配比称取一定量的砾石装入密封袋备用,试验装置如图 2 所示。选取砾石尺寸范围为 2~10 mm,其粒径组成百分比:2~4 mm 为 5.0%,4~6 mm 为 31.5%,6~8 mm 为 33.5%,8~10 mm 为 30.0% (见图 1)。

表 1 黏土基本物理性质

| 粒组百分含量/%  |             |                |                |                 |              | 液限 $w_L$<br>/% | 塑限 $w_P$<br>/% | 塑性指<br>数 $I_P$ | 最大干密度<br>$\rho_{dmax}/$<br>( $g \cdot cm^{-3}$ ) | 最优含<br>水率 $w/%$ |
|-----------|-------------|----------------|----------------|-----------------|--------------|----------------|----------------|----------------|--|-----------------|
| 2~1<br>mm | 1~0.5<br>mm | 0.5~0.25<br>mm | 0.25~0.1<br>mm | 0.1~0.075<br>mm | <0.075<br>mm |                |                |                |  |                 |
| 6.0       | 18.3        | 12.1           | 24.6           | 2.0             | 37.0         | 34.2           | 18.7           | 15.5           | 1.682  | 18.9            |

表 2 试验方案

| 试样编号 | 含石量/% | 含水率/% | 试样尺寸( $h \times \varphi$ )/<br>m×m | 温度梯度/<br>( $^{\circ}C \cdot cm^{-1}$ ) | 温度边界/ $^{\circ}C$ |    | 试验时间/h |
|------|-------|-------|------------------------------------|--|-------------------|----|--------|
|      |       |       |                                    |  | 顶板                | 底板 |        |
| S1   | 10    | 18.9  | 200×220                            | 0.50                                   | -5                | 5  | 144    |
| S2   | 50    | 18.9  | 200×220                            | 0.50                                   | -5                | 5  | 144    |
| S3   | 10    | 18.9  | 200×220                            | 1.00                                   | -15               | 5  | 144    |
| S4   | 30    | 18.9  | 200×220                            | 0.75, 1.00                             | -10, -15          | 5  | 144    |

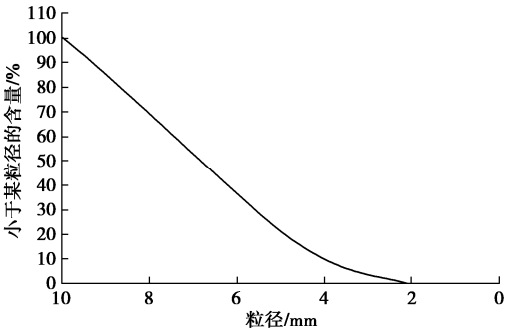


图 1 砾石颗粒粒径分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curve of gravel particles

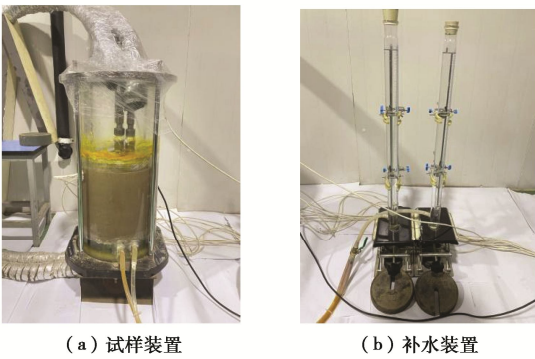


图 2 装置图

Fig. 2 Diagram of setting-up

1.2 试验装置及方案

本试验基于河海大学冻土实验室展开。该试验装置主要由制冷系统、控温系统、数据监测系统、补水系统等组成,如图 3 所示。制冷及控温系统由冷浴盘和风冷式制冷机组组成,冷浴盘采用铜质和不锈钢的材质,具有较好导热性,能够快速实现冷能传递,风冷机采用氟利昂作为制冷剂,能够迅速达到设计环境温度。数据监测系统由温度传感器、位移计和数据采集仪组成,温度传感器采用高精度热敏电阻,位移计采用高精度位移计,可在-30℃~40℃的环境下正常运行。补水系统由马氏瓶实现自动补水,通过计算马氏瓶水位线差值得到各时间段补水量。

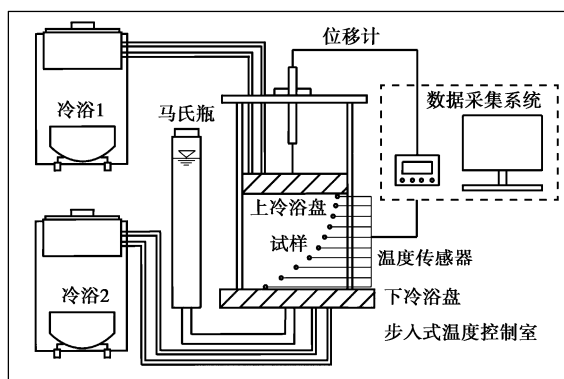


图3 水分迁移试验装置图

Fig. 3 Diagram of water migration test devices

影响水分迁移规律的因素主要是土体本身的特性（土体类型、导热性能和渗透性能等）及外界条件（温度、地下水位和压力等）<sup>[15]</sup>。对于土石混合体的冻胀性能，已有试验表明细粒含量、初始含水率和温度对土石混合体的冻胀特性影响较为显著<sup>[15]</sup>。因此，本文主要针对含石量、温度进行了水分迁移试验研究。土石坝工程结构有自身特殊性，坝体填土上部有混凝土板、砂砾料垫层、土工膜，在坝体填筑过程中，砂砾料垫层和坝体填土分层填筑，但施工过程中部分砂砾料垫层会与坝体填土混合在一起，砂砾料垫层厚度会影响土石混合体含石量。因此，本次试验前3组采用黏土和砾石混合进行研究，第4组试验在前3组试验基础上，采用砾石和黏土分层进行研究，且考虑到实际工程存在环境温度变化，设置了两种温度对比，采用 $-10^{\circ}\text{C}$ 控制32 h， $-15^{\circ}\text{C}$ 控制112 h，具体试验方案见表2。

### 1.3 试验步骤

称取一定质量的黏土，将其与砾石混掺均匀，然后把配置好的土石混合体装入有机玻璃筒中，有机玻璃筒内径为220 mm，高为500 mm，壁厚为20 mm。依据工程中砂砾料垫层的相对密度及坝体填土最大干密度，通过计算不同含石量下单元体土石混合体的质量，本次试验将S1, S2, S3中土石混合体的干密度控制为 $2.11\text{ g/cm}^3$ ；S4根据某土石坝工程填筑情况，将黏土干密度控制为 $1.78\text{ g/cm}^3$ ，砾石干密度控制为 $2.00\text{ g/cm}^3$ ，黏土层厚度为11 cm，砾石层厚度为9 cm。制样过程采用分层压实，S1, S2, S3具体步骤是将土石混合体分为5等份装入有机玻璃筒中，控制每层土石混合体高度为4 cm，S4先将黏土分层压实到指定高度后再将砾石分层压实，压实完成后沿玻璃筒高度每隔2 cm进行钻孔并插入温度探头，插入温度探头后通过风冷机将室温控制在 $5^{\circ}\text{C}$ 并恒温24 h，然后将上冷浴盘温度调至设计温度，下冷浴盘温度和

环境温度保持 $5^{\circ}\text{C}$ 不变。温度传感器和位移计每隔1 min记录一次数据。大坝护坡表层库水位入渗使坝体浅层填土和砂砾料垫层中的土石混合体达到饱和状态，因此，试验开始前通过调整马氏瓶高度对试样底部2 cm进行补水来提高底部2 cm黏土饱和度，试样S1, S3底部2 cm黏土饱和度可达到0.7，S2, S4可达到1.0，整个试验过程中通过人工记录补水量来分析补水量随冻结时间的变化规律。考虑到试样尺寸及冻结温度，试样冻结时间为144 h。试验过程中，对试样进行拍照记录，试验结束后沿试样高度每隔2 cm取2份试样并通过烘干法测定冻结后的含水率，取平均值作为该层含水率。

在试验中由于冷浴循环管道中的热损使上、下冷浴盘的温度在冻结稳定后未能达到设计温度，下文试验数据及结果分析均以实测值进行讨论。

## 2 结果与分析

### 2.1 含石量及温度对土石混合体冻胀量的影响

图4为不同试样冻胀量变化曲线。由图可知，随着时间变化，S1, S2, S3, S4冻胀量均不断增大，且不同含石量、温度边界的试样在试验结束后的冻胀量明显不同。S1, S2冻胀量变化曲线呈现激增和缓增2个阶段，至144 h，冻胀量分别为15.11, 18.55 mm。S3冻胀量变化曲线呈现激增、稳定、缓增3个阶段，至144 h冻胀量从0增加到6.16 mm。S4冻胀量变化曲线呈现稳定和缓增2个阶段，至144 h冻胀量从0增加到2.21 mm。

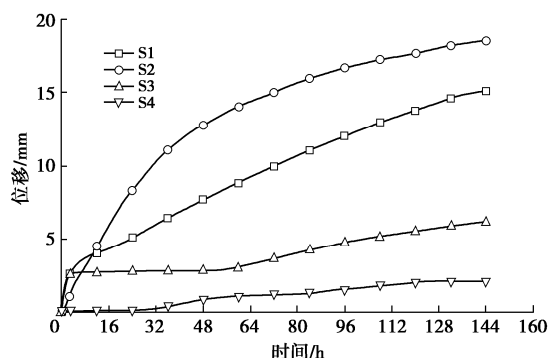


图4 不同试样冻胀量变化曲线

Fig. 4 Curves of frost heaving of different samples

对于土石混合体而言，含石量和温度对土石混合体的冻胀量影响较大，由于试验开始前对试样底部2 cm进行了补水，在相同干密度下，相比于S1, S2在试验开始前补水量更大导致底部黏土饱和度更高，冻结过程中在水分迁移作用下，外界环境中更多的水分进入试样造成S2冻胀量较大，对于本次试验两种不同含石量的试样，含石量越高，补水量越大，冻胀

量越大。与 S3 相比, S1 冻胀量较大, 由于两组试样上冷浴盘温度不同, 当上冷浴盘温度为 $-15^{\circ}\text{C}$ 时, 根据有关文献研究<sup>[15]</sup>此时试样温度梯度大, 试样冻结速率较快, 试样内部孔隙水主要发生原位冻结, 试样底部水分未能有效地向冻结锋面传递, 冻胀量较小。对于冷端温度较高的试样, 冻结过程中水分迁移相对充分<sup>[15]</sup>。根据本次试验结果及文献<sup>[8]</sup>, 黏土在冻结过程中受温度梯度影响较为明显, 水分迁移量随温度减小而降低。本次试验 S1 上冷浴盘温度较高, 温度梯度较小导致试样冻结速率较低, 水分能够持续不断地向冻结锋附近迁移, 因此, S1 冻胀量较大。S4 由于设置了不同的温度边界, 当温度边界为 $-10^{\circ}\text{C}$ 时, 试样温度稳定后, 由于砾石导热性较弱, 此时冻结锋面位置仍在砾石层, 且砾石中大孔隙的存在使黏土中的水分无法通过毛细上升通道向砾石层迁移, 试验初期冻胀量没有增加; 当温度边界为 $-15^{\circ}\text{C}$ 时, 冻结锋面向下移动到土石交界面, 此时黏土中的水分通过毛细上升通道不断向冻结锋面迁移, 水分不断冻结成冰体积增大, 试样冻胀量缓慢增加。可以看出, 黏土中孔隙水相变成冰体积增大是造成黏土冻胀量增加的主要原因, 且黏土含水率越高, 冻胀量越大。

水分迁移会导致冻胀量增加且水分迁移是引起土石坝护坡砂砾料垫层、坝体填土自身冻胀的主要因素, 当气温降至零下时, 浅层坝坡原位水的冻结, 同时坝体内部水分克服阻力不断向冻结锋面迁移加剧冻胀, 使坝体浅层填土和砂砾料垫层中的土石混合物发生冻胀导致大坝护坡的冻胀量逐渐增大。水分迁移主要与土石含量、温度和含水率有关, 土石坝护坡砂砾料、坝体填土含水率均较大, 而冻结过程中黏土含水率越高水分迁移量越大, 水分相变成冰的条件越充分, 从而造成土石混合体的冻胀量越大, 导致土石坝护坡冻胀破坏程度越大。

图 5 为不同试样不同高度处温度随时间变化曲线。由图可知, 不同试样不同高度处温度随时间变化曲线均呈骤降、缓降和稳定 3 个阶段。至 24 h, 试样 S1, S2, S3 沿试样 20 cm 高度处温度均达到设计温度且进入温度稳定阶段。因此, 可以将试样 S1, S2, S3 不同高度处温度变化分为 3 个阶段, 即温度快速降低阶段(0~8 h), 距上冷浴盘越近温度降低越快; 温度缓慢降低阶段(8~24 h), 试样在该阶段温度降低速率不断下降; 温度稳定阶段(24~144 h), 试样在该阶段温度已处于稳定。S4 由于设置了两个边界条件, 不同高度处温度随时间变化曲线与前 3 组不同, 出现两次温度降低阶段, 但不同高度处温度仍分为以上 3 个阶段, 且各阶段温度变化时间与前 3 组试样相

同。

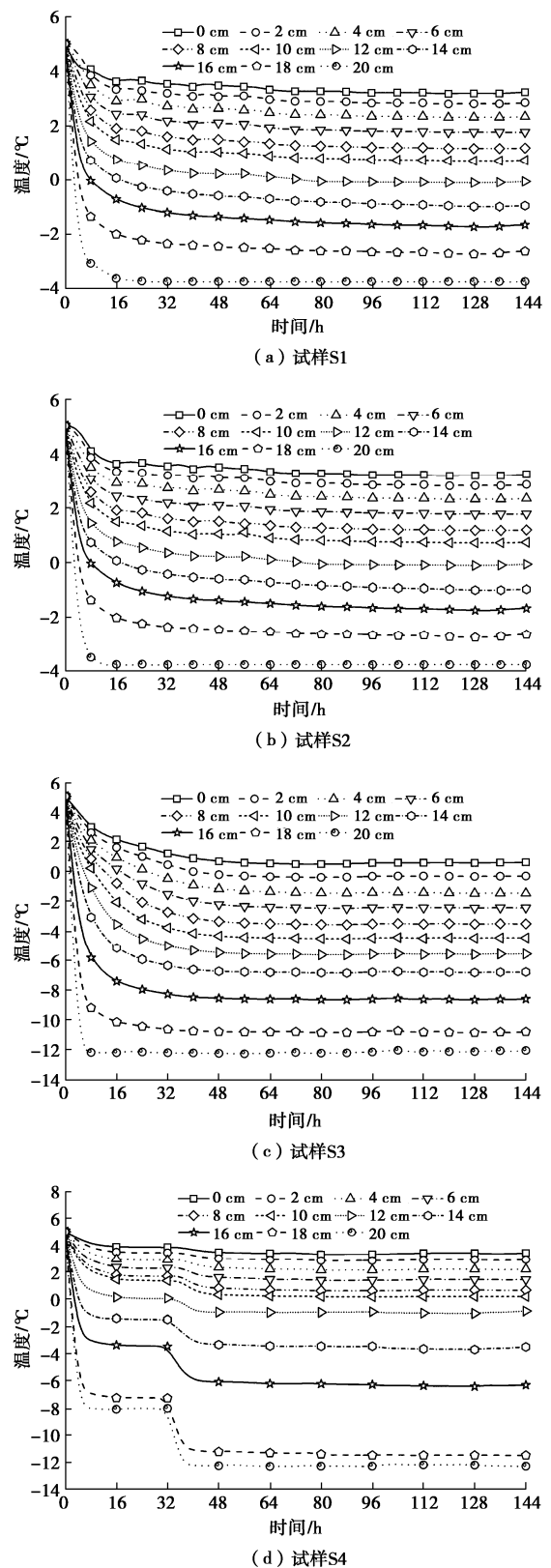


图 5 不同试样温度随时间变化曲线

Fig. 5 Curves of temperature of different samples with time

本次试验试样底部温度相对上边界温度变幅小, 且有一定的滞后性, 试样 S1, S2, S3 不同高度处温度随时间变化曲线趋势一致, 试样 S4 黏土中温度变

化受上边界温度影响弱,表明不同含石量对温度变化的影响较小,但土石分层对黏土温度变化的影响较显著。

## 2.2 含石量及温度对土石混合体含水率的影响

图 6 为不同试样含水率变化曲线, S4 由于黏土和砾石分层, 只绘制了黏土部分的含水率变化曲线。由图可知, 在试验结束后, 不同试样含水率变化曲线均出现峰值, 其中 S3 出现了 2 个峰值, 且试样不同高度处含水率均高于试样初始含水率且冻结区含水率高于未冻区含水率。试样 S1, S2 顶部 2 cm 范围内的含水率分别为 23.53%, 27.13%, 增幅分别为 4.63%, 8.23%, 含水率最大值出现在冻结锋面附近, 峰值含水率分别为 31.53%, 34.67%, 增幅分别为 12.63%, 15.77%。试样 S3 顶部峰值含水率为 21.61%, 底部峰值含水率 21.03%, 增幅分别为 2.71%, 2.13%。S4 峰值含水率出现在黏土顶部, 含水率为 26.15%, 增幅为 7.25%。

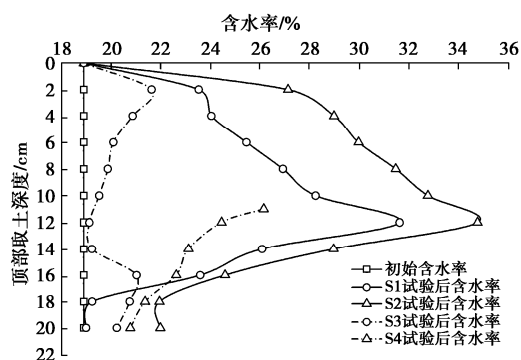


图 6 不同试样含水率变化曲线

Fig. 6 Curves of water content of different samples

参考文献[8], 本次试验将 0℃ 作为冻结温度, 冻结锋面位置为试样 0℃ 温度处, 试样 S1, S2 由于冻结过程中上冷浴盘温度恒为 -5℃, 下冷浴盘温度恒为 5℃, 在温度梯度作用下, 冻结锋面不断向下移动, 当温度进入稳定阶段后, 冻结锋面位置基本保持不变, 水分不断从底部向冻结锋附近迁移致使冻结锋面附近含水率较高。同时可以看出, S2 中不同高度处含水率均高于 S1, 主要是由于 S2 含石量高, 砾石之间易形成骨架导致试样内部大孔隙多, 且试验前在水头压力作用下底部 2 cm 补水量更大, 底部饱和度更高, 液态水迁移较多, 试验开始后, 在水分迁移作用下水分不断从底部向冷端迁移, 外界水分也不断进行补给, 因此, S2 试验结束后, 各高度含水率较高; 相比于 S1, S3 上边界温度较低, 试验开始后顶部快速冻结形成冰层导致顶部出现峰值含水率, 当试样温度稳定后, 冻结锋面出现在试样底部, 试样底部同样出现峰值含水率, 由于水分迁移较弱, 补水量较小, 峰值含水率较

低; S4 由于黏土和砾石分层, 砾石导热性较弱, 上冷浴盘温度对黏土温度影响有限, 当温度边界为 -10℃ 时, 冻结锋面位置仍在砾石层, 黏土中水分无法向砾石层迁移, 当温度边界为 -15℃ 时, 冻结锋面向下移动到土石交界面, 此时黏土中的水分通过毛细上升通道不断向冻结锋面迁移, 因此, 土石交界面黏土含水率较高。土石混合体水份迁移试验情况见图 7。

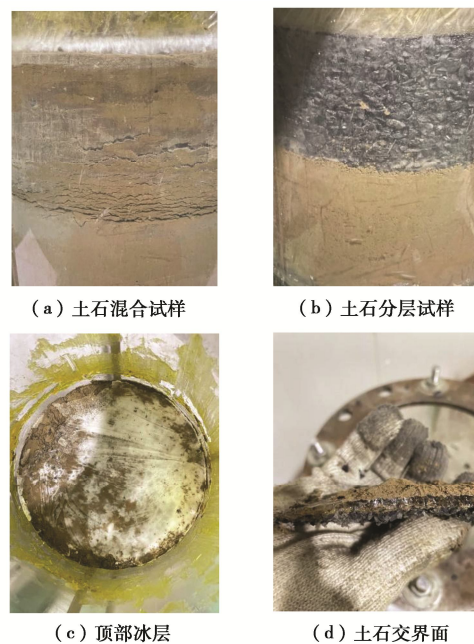


图 7 土石混合体水分迁移试验

Fig. 7 Water transfer tests on soil-rock mixtures

在温度变化阶段, 冻结锋面不断向下移动, 水分向冷端迁移, 冷凝以后聚集在试样上部导致试样上部含水率较高, 当温度进入稳定阶段以后, 冻结锋面位置变化不大, 此时水分仍不断向冻结锋面迁移, 并在负温作用下相变成冰导致冻结锋面附近含水率较高。同时可以看出, 与黏土和砾石混合相比, 当黏土和砾石分层时, 冻结锋面处含水率较低, 表明黏土和砾石分层可有效降低水分迁移量, 从而降低冻胀量。

图 8 为不同试样冻胀量与补水量关系曲线。由图可知, 在冻结过程中, 不同试样补水量均不断增加且不同试样在冻结过程中的补水量不同。至 144 h, S1, S2, S3, S4 的补水量分别为 511, 709, 244, 208 mL。不同含石量的试样在冻结过程中内部孔隙水、气压力不同, 对于本次试验当温度相同时, 含石量越高补水量越大。而当含石量相同时, 温度越低补水量越小。S1, S2 上边界温度较高, 冻结速率较低, 在冻结过程中水分能够有效地向冻结锋面迁移, 补水量相对较大。S3 上边界温度较低, 试验开始后, 冻结锋面迅速向下移动, 当温度稳定时, 冻结锋面出现在试样底部, 水分迁移有限, 补水量较小。S4 由于黏土和砾石分层,

砾石导热性较弱,上冷浴盘温度对黏土温度影响有限,水分迁移速率较低,补水量同样较低。

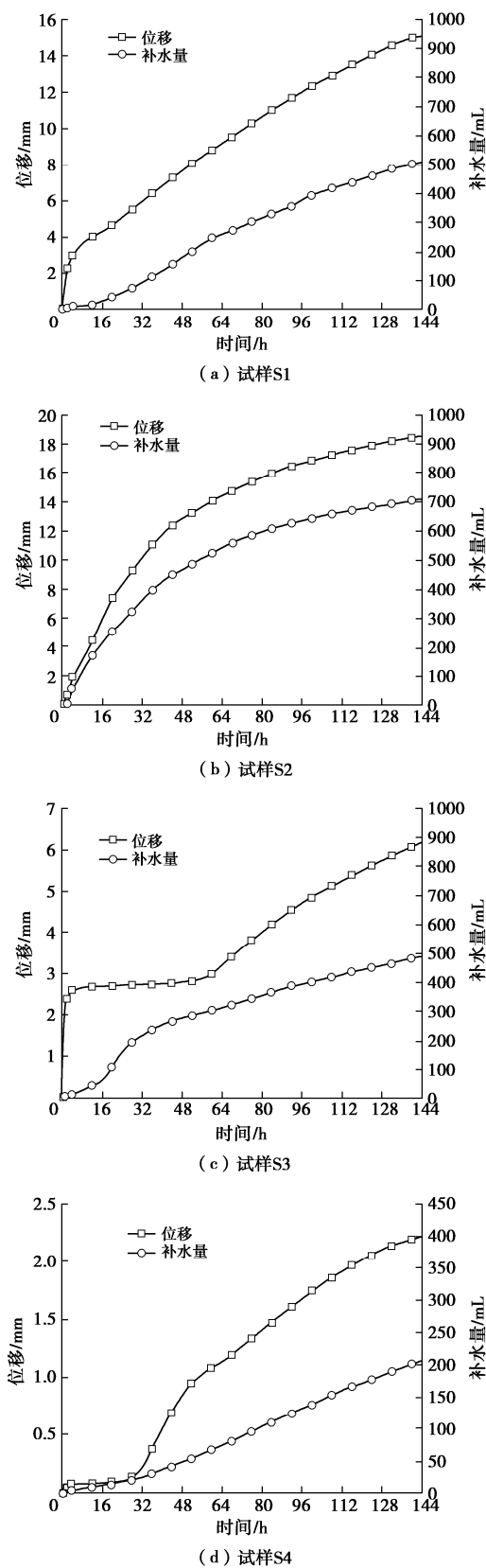


图 8 不同试样冻胀量与补水量关系曲线

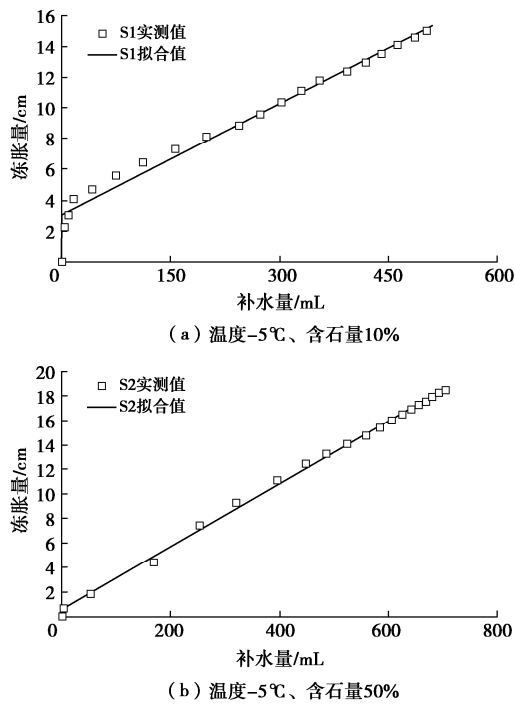
Fig. 8 Relationship curves of frost-heaving volume and water recharge in different samples

温度梯度变化及试样底部黏土初始饱和度是影响

马氏瓶中水分向土石混合体试样内补给的主要因素,当温度相同时,含石量越高,试验开始前底部黏土饱和度和越高,试验过程中补水量越大;当含石量一定时,温度若过低,试样内部孔隙水来不及向冷端迁移就发生原位冻结,试验过程中补水量较小。值得注意的是,砾石和黏土分层可降低补水量从而降低冻胀量,表明砾石和黏土分层对土石坝护坡防冻胀破坏有利。试样内部孔隙水相变成冰并在试样内部形成分凝冰是冻胀量的增加的主要原因,土石混合体原位冻胀以及冻结过程中分凝冰的生长使试样冻胀量不断增加,试样补水量越大,冻结过程中含冰量就越高,试样冻胀量就越大。

2.3 补水量对土石混合体冻胀量的影响

图 9 为不同温度、含石量下试样冻胀量与补水量关系曲线,由于 S4 黏土与砾石分层,与前 3 组试验情况不同,本次只绘制了前 3 组试样冻胀量与补水量关系曲线,其中  $x$  为试样补水量,  $y$  为试样冻胀量。由图可知,不同温度、含石量下试样的冻胀量均随补水量的增加而增大,当试样 S1 补水量为 511 mL 时,冻胀量为 15.11 mm;当试样 S2 补水量为 709 mL 时,冻胀量为 18.55 mm;当试样 S3 补水量为 3, 150, 244 mL 时,冻胀量分别为 2.53, 2.99, 6.16 mm。不同温度、含石量下试样冻胀量与补水量函数关系见表 3,由表可知,试样 S1, S2 的冻胀量增加速率分别为 0.024, 0.026;试样 S3 有 3 个冻胀量增加速率,分别为 0.803, 0.001, 0.033,主要是由于 S3 上边界温度较低,试验开始后试样内部孔隙水来不及向冷端迁移就发生原位冻结,当试样温度稳定后,冻结锋面出现在试样底部,此时冻胀量才缓慢增加。这表明不同含石量对冻胀量增加速率影响较小,而不同温度对冻胀量增加速率影响较显著。



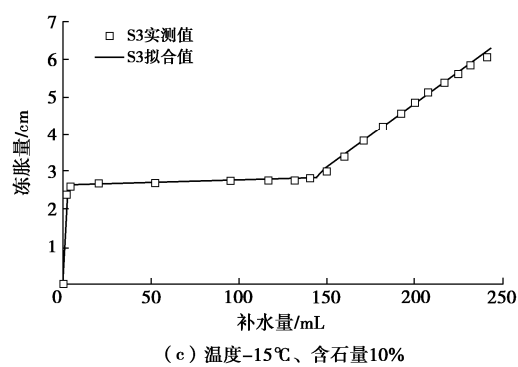


图 9 不同温度、含石量下试样冻胀量与补水量关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of frost heaving and water recharge under different temperatures and stone contents

表 3 不同温度、含石量下试样冻胀量与补水量函数关系

Table 3 Relationship between frost-heaving amount and water recharge under different temperatures and stone contents

| 温度边界/℃ | 含石量/% | 关系式                                     | $R^2$ |
|--------|-------|---|-------|
| -5     | 10    | $y=0.024x+0.0005$<br>$0 < x \leq 511$   | 0.977 |
|        |       | $y=0.026x+0.0001$<br>$0 < x \leq 709$   | 0.998 |
| -15    | 10    | $y=0.803x+0.2986$<br>$0 < x \leq 3$     | 0.783 |
|        |       | $y=0.001x+0.0001$<br>$3 < x \leq 150$   | 0.838 |
|        |       | $y=0.033x+0.0004$<br>$150 < x \leq 244$ | 0.996 |
|        |       |   |       |

3 结 论

针对寒区土石坝护坡普遍存在的隆起、错位、坍塌等冻胀破坏问题，以寒区某土石坝工程中砂砾料垫层、坝体填土为研究对象，采用自行研制的土石混合体水分迁移冻结模型试验装置系统，开展了温度、含石量对土石坝护坡土石混合体冻胀特性的影响研究，得出 6 点结论。

(1)以土石坝护坡土石混合体为研究对象进行了单向冻结试验研究，分析了温度、含石量、水分迁移对土石坝护坡土石混合体冻胀特性的影响。试验结果表明温度、含石量对土石坝护坡土石混合体的冻胀特性影响显著。

(2)水分迁移主要与土石含量、温度和含水率有关，土石坝护坡砂砾料、坝体填土含水率均较大，而冻结过程中黏土含水率越高水分迁移量越大，水分相变成冰的条件越充分，从而造成土石混合体的冻胀量越大，导致土石坝护坡冻胀破坏程度越大。

(3)试样 S1, S2, S3 不同高度处温度变化分为 3 个阶段，即温度快速降低阶段 (0~8 h)，距上冷浴盘越近温度降低越快；温度缓慢降低阶段 (8~24 h)，试样在该阶段温度降低速率不断下降；温度稳定阶段

(24~144 h)，试样在该阶段温度已处于稳定。试样 S4 黏土中温度变化受上边界温度影响较弱，表明不同含石量对温度变化的影响较小，但土石分层对黏土温度变化的影响较显著。

(4)不同试样含水率变化曲线均出现峰值，在温度变化阶段，冻结锋面不断向下移动，水分向冷端迁移，冷凝以后聚集在试样上部导致试样上部含水率较高，当温度进入稳定阶段以后，冻结锋面位置变化不大。同时可以看出，当黏土和砾石分层时，冻结锋面处含水率较低，表明黏土和砾石分层可有效降低水分迁移量，从而降低冻胀量。水分迁移是引起土石坝护坡砂砾料垫层、坝体填土自身冻胀的主要因素，当气温降至零下时，浅层坝坡原位水的冻结，同时坝体内部水分克服阻力不断向冻结锋面迁移加剧冻胀，使坝体浅层填土和砂砾料垫层中的土石混合体发生冻胀导致大坝护坡的冻胀量逐渐增大。

(5)温度梯度变化及试样底部黏土初始饱和度是影响马氏瓶中水分向土石混合体试样内补给的主要因素，且砾石和黏土分层可降低补水量从而降低冻胀量，表明砾石和黏土分层对土石坝护坡防冻胀破坏有利。试样内部孔隙水相变成冰并在试样内部形成分凝冰是冻胀量的增加的主要原因，土石混合体原位冻胀以及冻结过程中分凝冰的生长使试样冻胀量不断增加，试样补水量越大，冻结过程中含冰量就越高，试样冻胀量就越大。

(6)不同温度、含石量试样的冻胀量均随补水量的增加而增大，且不同含石量对冻胀量增加速率影响较小，不同温度对冻胀量增加速率影响较显著，研究成果可为寒区土石坝护坡防冻胀设计和运行管理提供科学依据和技术支撑，补充了碾压式土石坝设计规范中的护坡设计。

参考文献:

[1] HARLAN R L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resources Research, 1973, 9(5): 1314-1323.

[2] TABER S. The mechanics of frost heaving[J]. The Journal of Geology, 1930, 38(4): 303-317.

[3] BESKOW B F D G. Soil freezing and frost heaving with special application to roads and railroads[J]. Soil Science, 1948, 65(4): 234-375.

[4] TAYLOR G S, LUTHIN J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(4): 548-555.

[5] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题

- 探讨[J]. 岩土力学, 2004, **25**(7): 1081-1084. (WANG Tiehang, LU Haihong. Moisture migration in unsaturated loess considering temperature effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(7): 1081-1084. (in Chinese))
- [6] 曾桂军, 张明义, 李振萍, 等. 饱和正冻土水分迁移及冻胀模型研究[J]. 岩土力学, 2015, **36**(4): 1085-1092. (ZENG Guijun, ZHANG Mingyi, LI Zhenping, et al. Study of moisture migration and frost heave model of freezing saturated soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(4): 1085-1092. (in Chinese))
- [7] 明 锋, 李东庆. 压力作用下冻结粉质黏土的水分迁移特征[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, **35**(3): 67-73. (MING Feng, LI Dongqing. Characteristics of moisture migration in freezing silty clay under the pressure[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, **35**(3): 67-73. (in Chinese))
- [8] 魏厚振, 周家作, 韦昌富, 等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学, 2016, **37**(9): 2547-2552, 2560. (WEI Houzhen, ZHOU Jiazuo, WEI Changfu, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, **37**(9): 2547-2552, 2560. (in Chinese))
- [9] 赵再昆, 王铁行, 金 鑫, 等. 高温作用下非饱和黄土水热迁移试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(1): 151-161. (ZHAO Zaikun, WANG Tiehang, JIN Xin, et al. Experimental study on water and heat migration of unsaturated loess under high temperatures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(1): 151-161. (in Chinese))
- [10] 张喜发, 辛德刚, 张冬青, 等. 季节冻土区高速公路路基土中的水分迁移变化[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 454-460. (ZHANG Xifa, XIN Degang, ZHANG Dongqing, et al. Water migration and variation in the subgrade soils of expressway in seasonally frozen ground regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, **26**(4): 454-460. (in Chinese))
- [11] 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 Yichen, LI Xin, ZHANG Xifa, 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))
- [12] 王书娟, 陈志国, 秦卫军, 等. 季节性冰冻地区路基冻胀机理分析[J]. 公路交通科技, 2012, **29**(7): 20-24, 44. (WANG Shujuan, CHEN Zhiguo, QIN Weijun, et al. Mechanism analysis on subgrade frost heaving in seasonal frozen region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, **29**(7): 20-24, 44. (in Chinese))
- [13] ARENSON L U, SEGO D C. The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, **43**(3): 325-337.
- [14] 王天亮, 岳祖润. 细粒含量对粗粒土冻胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(2): 359-364, 388. (WANG Tianliang, YUE Zurun. Influence of fines content on frost heaving properties of coarse grained soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(2): 359-364, 388. (in Chinese))
- [15] 高建强, 白瑞强, 马勤国. 非饱和粗颗粒土体的冻结试验研究[J]. 冰川冻土, 2018, **40**(1): 94-101. (GAO Jianqiang, BAI Ruiqiang, MA Qinguo. Experimental study on freezing of unsaturated coarse-grained soils[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, **40**(1): 94-101. (in Chinese))
- [16] 张玉芝, 王天亮, 张 飞, 等. 不同细粒含量下高速铁路基粗颗粒填料水气迁移特征与冻胀特性[J]. 中国铁道科学, 2021, **42**(4): 1-8. (ZHANG Yuzhi, WANG Tianliang, ZHANG Fei, et al. Water-vapor migration and frost heave characteristics of coarse particle filler with different fine contents in high speed railway subgrade[J]. China Railway Science, 2021, **42**(4): 1-8. (in Chinese))
- [17] 姜海波, 李 琳, 李志强. 季节冻土区渠道水分迁移规律及冻胀特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2020, **51**(2): 92-97. (JIANG Haibo, LI Lin, LI Zhiqiang. Experimental study on channel water migration law and frost-heaving characteristics in seasonal frozen soil region[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, **51**(2): 92-97. (in Chinese))
- [18] 碾压式土石坝设计规范: SL274—2020[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2020. (Design Code for Rolled Earth-Rock Fill Dams: SL274—2020[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2020. (in Chinese))