doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.03.009

# 青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性试验

岑国平<sup>1</sup>,龙小勇<sup>1</sup>,洪 刚<sup>1</sup>,刘垍荧<sup>1</sup>,王新忠<sup>2</sup>.贾 勇<sup>2</sup>

(1.空军工程大学 航空航天工程学院,710038 西安;2.中国民航机场建设集团公司,710075 西安)

**摘 要:**为探索青藏高原季冻区砂砾土的冻胀特性,为机场工程防冻胀设计提供依据,首先进行颗粒分析实验、击实实验等砂砾土的基本特性实验,为冻胀率室内实验提供相应依据,然后在传统冻胀率室内实验装置的基础上针对砂砾土粒径大的特点进行改进,利用改进后装置进行一系列正交试验,研究含水率、含泥量、压实度、上覆荷载、补水对冻胀率的影响规律.试验结果表明:在封闭条件下,冻胀率随含水率的增大而线性增大;随含泥量的增大呈非线性关系递增;随压实度的增大呈先增大后减小的趋势,在压实度为95%的状态下达到最大值;随上覆荷载的增大呈线性关系平缓递减.在外界补水条件下,冻胀率增大3倍以上.经多元回归分析,得到了多因素综合影响下的回归预报公式.各个因素对冻胀率的影响从大到小依次为:补水,含水率,含泥量,压实度,上覆荷载.在工程实际中,控制补水、含水率、含泥量是防冻胀设计的关键.

关键词:机场土基;砂砾土;冻胀;含水率;含泥量;多元回归分析

中图分类号: TU411.99 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2016)03-0053-07

# Frost heaving properties of gravel soil in seasonal frozen region of Qinghai-Tibet Plateau

CEN Guoping<sup>1</sup>, LONG Xiaoyong<sup>1</sup>, HONG Gang<sup>1</sup>, LIU Jiying<sup>1</sup>, WANG Xinzhong<sup>2</sup>, JIA Yong<sup>2</sup>

(1.School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, 710075 Xi'an, China; 2.China Civil Airport Construction Corporation, 710075 Xi'an, China)

Abstract: In order to explore frost heaving properties of gravel soil containing mud in seasonal frozen region of Qinghai-Tibet Plateau, and provide the foundation for airport engineering anti-freezing expansion design, Particle analysis experiment and compaction experiment were conducted to provide the basis indoor frost heaving rate experiment. Then it improved for gravel soil particle size characteristics of large heaving rate based on traditional means of laboratory experiments, following the improved apparatus a series of sets of orthogonal frost heave indoor tests were conducted to study the influence of factors including degree of compaction, moisture content, silt content, overlying load, water replenishing on frost heaving ratio by the improved experiment device. The test results show that frost heaving ratio of gravel soil containing mud in seasonal frozen region of Qinghai-Tibet Plateau showed a trend of decrease after the first increase with the increase of degree of compaction in a sealed environment, and approaches its maximum at the compaction degree of 95%; increases linearly with the increase of moisture content, increases with the increase of silt content corresponding to a polynomial function; Gently decreases at an exponential functional with the increase of overlying load. Frost heaving ratio increases over three times under the condition of the water replenishing. Multi-factor regression forecast formula is obtained by the multiple regression analysis. The influence of various factors on frost heaving ratio decreasing order: water replenishing, moisture content, silt content, degree of compaction, overlying load. Consequently, it is the key of anti-freezing expansion design to control water replenishing, moisture content, silt content.

Keywords: airport earth subgrade; gravel soil; frost heaving; moisture content; silt content; multiple regression analysis

机场土基不均匀冻胀变形是机场工程破坏的重要原因之一.因此,在进行机场工程建设之前,必须

对机场土基作出冻胀性评价,以便采取有效的防冻 胀措施,确保机场工程的安全可靠.土体的冻胀特 性一直是国内外研究的焦点,国外学者 Everett<sup>[1]</sup>首 先提出毛细理论,对冻胀和冻胀力进行了定量解释 和估计,但却不能解释不连续冰透镜的形成原因且 低估了细颗粒土中的冻胀压力.认识到了毛细理论

收稿日期:2014-12-15.

基金项目:民航科研专项资金(MHRD20140216).

作者简介: 岑国平(1962—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 岑国平, cenguoping@ 163.com.

的不足,Miller<sup>[2]</sup>提出在冻结锋面和最暖冰透镜底 面存在一个低含水量、低导湿率和无冻胀的带,称为 冻结缘.冻结缘理论在一定程度上克服了毛细理论 的不足,得到广大学者的认可.这两大冻胀理论的 提出为冻胀研究奠定了基础. 国内学者吴紫汪[3]对 土的冻胀机制、动力及变化规律进行了研究,为道路 工程的冻胀成因、分类和病害防治措施的制定提供 了理论依据. 陈肖柏<sup>[4]</sup>提出饱水砂砾料冻结时的冻 胀敏感性主要受细粒土含量及冻结条件的影响. 王 天亮等[5]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. 巨娟丽[6]通过室内试验对白砂岩土的冻胀率 冻胀特性进行了研究. 程佳等[7]研究了青藏铁路多 年冻土区典型土样的冻胀特性. 刘新华等[8]研究了 季节冻土冻胀和融沉与土质、密度、含水率等性质的 关系. 高志华<sup>[9]</sup>选取了 21 组土样进行分析, 从颗粒 组成、毛细水上升高度等分析青藏铁路冻胀出现的 可能性. 张以晨等[10]对 5 种粗粒土 13 种不同含泥 量土料在不同含水率、饱和度和密实度状态下进行 了一系列封闭系统下的冻胀模拟试验. 研究了各种 粗粒土的n - w关系,并对其进行线性分析,揭示了 粗粒土的冻胀规律. 徐洪坤等[11]建立了考虑水热 耦合迁移的 Clausius-Clapeyron 方程,推导了机场道 基一维垂直向冻胀位移的积分表达式,建立了寒区 机场道基冻胀预测模型. 杨锐等[12]从能量平衡角 度,推导了作用在基层底面的冻胀应力解析式,并在 某机场改造工程中作了验算.李博等[13]分析了造 成机场冻胀的各种因素,提出了机场工程冻土土基 处理的措施. 闫永刚等[14]分析了西北壁滩机场道 面冻胀产生的原因,提出了消除冻胀的方法.沈哲 等[15]指出高寒地区机场土基的冻胀受降温速率、 土样的含水率、上覆荷载等因素的影响,并存在复杂 的函数关系.

综上研究成果,关于季冻区土基冻胀影响因素 和工程实践方面的研究比较少;关于机场冻胀的研 究也仅有零星报道,且研究成果比较零散,不成系 统,缺乏有效的工程实际价值;而关于砂砾土较多青 藏高原季冻区机场冻胀的研究更是未见报道.因 此,有必要结合青藏高原季冻区独特的气候和土壤 特点,对砂砾土进行冻胀室内试验,研究其冻胀特性 并总结规律,结合工程实际提出建议,为青藏高原季 冻区机场工程冻害防治提供理论依据.

1 概 况

### 1.1 颗粒级配及土样制备

试验所用土样取自果洛自治州大武机场现场

段,将土样装袋并用货车运送至西安,在实验室内进 行过滤杂质、风干等处理.试验土样包括天然砂砾 土和表层粉土,天然砂砾土为主要试验对象,表层粉 土为对照试验对象.通过筛分试验,测得天然砂砾 土中直径小于 0.075 mm 的颗粒的质量分数(以下 简称含泥量)为 6.9%,表层粉土的含泥量为 50%, 将这两种土样按不同的比例掺合均匀,即可得到试 验所需的含泥量为 10%、15%、20%、25%、45%的土 样.已有研究表明,土样颗粒级配对土样的冻胀有 明显的影响<sup>[10]</sup>.按公路土工试验规程<sup>[16]</sup>规定的方 法,通过颗粒分析试验得到两种土样的颗粒级配曲 线如图 1 所示.由图 1 可知,天然砂砾土和表层粉土 级配良好,属于冻胀敏感性土类.



图1 颗粒级配曲线

#### 1.2 击实试验

对含泥量为 10%、15%、20%、25%、45%的砂砾 土进行标准击实试验,得到不同含泥量下的砂砾土 的标准最大干密度和最优含水率如表 1 所示.由表 可知,砂砾土的最优含水率随着含泥量的增大而增 大.然而,砂砾土的标准最大干密度却随着含泥量 的增大而减小.

表1 击实试验结果

含泥量/%	最大干密度/(g・cm <sup>-3</sup> )	最优含水率/%
10	2.36	6.69
15	2.33	7.00
20	2.29	7.66
25	2.25	8.27
45	2	13.02

### 1.3 试验方法及装置

土体的冻胀特性主要用土体的冻胀量和冻胀率 表示. 冻胀量是地表由于土体冻结而引起的竖向位 移,土体在无侧向变形的前提下,经单向冻结,其纵 向高度的增量与试样原始高度的比值称为冻胀率 (也称冻胀强度或冻胀系数),通常用高度比表示, 计算公式为 表 2 冻胀试验方案

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_{\rm f}} \times 100\% \ . \tag{1}$$

式中: $\eta$ 为冻胀率%; $\Delta h$ 为冻胀量,mm; $H_f$ 为冻结 土层的厚度<sup>[16]</sup>. 试样制备过程严格按照中华人民共和国行业标 准<sup>[16]</sup>进行.由于原状土样的采取、运输、保存等存在 一定的困难,室内试验中采用重塑扰动土样进行冻 胀率试验.试验具体方案如表2所示.

含泥量/%	含水率/%	压实度/%	上覆荷载/kPa	是否补水	含泥量/%	含水率/%	压实度/%	上覆荷载/kPa	是否补水
10	5.94	95	20	否	20	8.51	95	20	否
10	6.69	95	20	否	20	7.66	95	10	否
10	7.43	95	20	否	20	7.66	95	30	否
10	6.69	95	10	否	20	7.66	95	40	否
10	6.69	95	30	否	25	8.27	85	20	否
10	6.69	95	40	否	25	8.27	90	20	否
15	6.29	95	20	否	25	8.27	95	20	否
15	7.86	95	20	否	25	8.27	100	20	否
15	7	95	10	否	25	6.43	95	20	否
15	7	95	30	否	25	7.35	95	20	否
15	7	95	40	否	25	9.19	95	20	否
15	3	95	20	否	45	18	85	20	否
15	5	95	20	否	45	18	90	20	否
15	7	95	20	否	45	18	95	20	否
15	9	95	20	否	45	18	100	20	否
15	3	95	20	是	45	10	95	20	否
15	5	95	20	是	45	12	95	20	否
15	7	95	20	是	45	14	95	20	否
15	9	95	20	是	45	16	95	20	否
20	6.81	95	20	否	20	8.51	95	20	否
20	7.66	95	20	否	20	7.66	95	10	否

注:表中含水率为含水质量比;压实度为 95%,上覆荷载为 20 kPa,初始冻结温度为-2 ℃;饱和度为土体中孔隙水体积与孔隙体积之的比值.

结合砂砾土的特点,本文采用改进的冻胀室内 试验装置进行试验.试验装置由试样筒、恒温箱和 温控系统、温度检测系统、位移检测系统、数据采集 终端、补水系统和气动平衡装置组成,系统图及各组 成部分照片分别见图 2、3 所示.



图 2 冻胀试验装置系统



## 图 3 冻胀试验装置系统各组成部分照片

由于砂砾土的粒径较大,经过改装后,试样筒由 内径 15 cm,高 16 cm,壁厚 1 cm 的有机玻璃筒制 作,沿高度每隔 2 cm 设温度传感器插入孔. 底板为 中空结构,有负温循环液进出口. 顶板有外界水源 补充通道.

试验步骤如下:1)首先进行击实试验,确定最 大干密度和最优含水率,见表 1.2)冻胀试件成型: 在有机玻璃内成型,试样直径15 cm、高13.5 cm. 首 先按一定的含泥量、含水率配料、闷料 24 h,以保证 试样的含水率均匀一致,根据压实度称取一定质量, 于试样简中分5层进行击实,静压成型.3)为防止 试验过程中水分流失,在试样顶面和底面各放一张 滤纸,然后放上顶板,并稍加力,使土样与顶、底板接 触紧密. 将两个试样盒放入恒温箱内,试样周侧、底 板内放入温度传感器,周侧包裹厚5 cm 橡塑海绵保 温材料. 连接底板冷冻液循环管路及顶板补水管 路,供水并排除顶板内气泡,调节供水装置水位.安 装位移传感器. 将温度和位移传感器与数据采集终 端连接. 4)开启加压装置,并调节到所需压力;开启 恒温箱及底板冷浴,设定恒温箱为1℃,底板冷浴为 -15 ℃.5)试样恒温 6 h,并监测温度和变形,待试 样初始温度均匀达到1℃左右以后,开始冻结. 6) 低温恒温循环器调节到-15 ℃并持续 0.5 h, 让试 件迅速从底面冻结.然后底板温度调节到-2℃,并 以0.2 ℃/h 速度下降,保持箱温和顶板温度均为 1℃.打开电脑上的阿尔泰测控系统读取、保存数 据. 试验持续至位移量读数恒定不变方可结束(约 72 h). 7) 试验结束后, 迅速从试样盒中取出试样, 量测试样高度并测定冻结深度,读取数据并计算 结果.

- 2 试验结果及分析
- 2.1 典型冻胀过程分析

取一组(含水率14%、含泥量45%、压实度 95%、上覆荷载20kPa)试验结果为典型,绘制不同 高度处温度随时间的变化关系,如图4所示.



图 4 不同高度处温度随时间变化曲线

从图 4 中可以看出,不同高度处,土样降温的速率是不同的,其中 4 cm 处降温速度最快,12 cm 处降温速度最慢.同理,绘制冻胀量随时间的变化关系,如图 5 所示.

由图 5 可知, 土样冻胀基本可以分为 4 个阶段:

1) 冻缩阶段. 这一阶段内,冻胀率为负值,即土样发 生冻缩现象,约4~8h后土样体积增大,冻胀开始. 由于土样颗粒受冷收缩,孔隙水结冰后增大的体积, 不足以抵消土样颗粒收缩的体积:水在4℃时密度 最大,土样所含水分的体积最小,这对于土样的冻缩 有一定的影响.此外,给土样加载的 20 kPa 的上覆 荷载,也抑制了土样体积的增长.因此,在起始阶 段,土样体积不但不会增大反而会减小. 随着温度 继续降低,土样开始持续冻胀,当冻胀引起的体积增 量超过土样颗粒收缩导致的体积减量时,才能观测 到冻胀现象.2)快速冻胀阶段.这一阶段冻胀量快 速增长,是由于此时冰析作用非常强烈,聚集在冻结 锋面处的水分冻结成冰时,将挤开土颗粒而形成零 散的细小冰透镜体,出现冰分凝现象,因此体积快速 增大.3)缓慢冻胀阶段.这一阶段冰分凝已经比较 充分,冻结锋面附近形成的冰透镜的厚度及连续程 度加大,使得冻胀量增长的幅度慢慢减小.4)稳定 阶段. 这一阶段冻结锋面基本稳定, 冰透镜体停止 生长,冻胀率几乎停止增长,保持不变状态.



#### 2.2 单因素试验结果与分析

#### 2.2.1 含水率对冻胀率的影响

图 6 为不同含水率与冻胀率的关系曲线,可以 看出,在含泥量一定的情况下,土体的冻胀率随着含 水率的增大而增大.其原因分析如下:含泥量一定, 则干密度一定,在干密度一定的情况下,土体的饱和 度随着含水率的增大相应增大,孔隙中的水分黏结 更为紧密,水分连续迁移更加明显,冻结时孔隙冰体 积增加,因而产生的总的冻胀量增大.对3组数据 拟合可知:土体冻胀率与含水率呈现一元线性关系, 3条拟合直线的斜率关系为  $k_{0.25} > k_{0.45} > k_{0.15}$ ,这 是因为含泥量为45%的土样的干密度在3种土样当 中最小(见击实试验结果),土体也最疏松,土体有 比较大的孔隙,能够容纳更多的冻结冰,不容易使得 土粒之间的空间变大从而引起冻胀.此时,随着含 水率的增大,冻胀率增大的幅度较小.随着含泥量 减小到 25%,土样的干密度也相应增大,导致土体 颗粒之间的距离相应减小. 在这种情况下,薄膜水 就会在土体冻结过程中有相对比较活跃的水分迁 移. 由此冻结的冰能够使得土粒之间的距离明显增 大. 此时,随着含水率的增大,冻胀率增大的幅度较 大. 然而这种增幅并非随着干密度的增大一直增 大,当含泥量减小到 15%时,土体的干密度继续增 大,此时冻胀率的增幅反而减小,这是由于此时土体 的骨架连结力比较大,这样就会使得存在相互重叠 在一起的结合水膜,水膜重叠在一起就会使得这种 结合水膜变得比较厚,从而使得水膜的渗透性会相 应的降低,最终使得水分迁移的通道也就相对变小 了. 所以冻胀率的增幅也相应减小.



2.2.2 含泥量对冻胀率的影响

图 7 为不同含泥量与冻胀率的关系曲线,可以 看出,在饱和度一定的情况下,土体的冻胀率随着含 泥量的增大而增大.含泥量为 10%时,土体的冻胀 率较小.分析其原因:土颗粒越细,其比表面积越 大,表面能越高,与水相互作用的能量也越高.具体 来讲,土颗粒表面都会吸附一定厚度的水膜,细颗粒 较高的表面能可将水膜紧紧吸附在土粒周围,土粒 间的相互连接构成利于水分连续迁移的薄膜通道, 因此,冻胀率更大.





由上图的拟合曲线斜率的变化可知,冻胀率的 增幅随着含泥量的增大呈现减小的趋势,这是由于, 随着含泥量的增加,土样当中的细颗粒的含量也在 逐渐增加,颗粒直径特别小时,巨大的表面能使得土 粒与未冻水的结合作用增大,从而使土粒表面吸附 水膜的厚度增大,减小了供水分迁移的薄膜通道,降 低了土体的水分渗透性能,甚至土颗粒外围水膜过 厚造成叠加完全阻塞迁移通道,从而导致水分迁移 能力大大减弱,对冻胀率产生抑制作用.

饱和度越大,冻胀率越大.一是由于饱和度越 大,含水率越大,因而冻胀率越大;二是由于饱和度 越大,土体当中的孔隙体积占土体总体积的比例就 越小,冻结期间更容易被冻结冰填充,从而更容易引 起土颗粒位移,产生更大的冻胀.同时观察3条曲 线的斜率可得,冻胀率的增幅随着饱和度的增大呈 现减小的趋势,这是因为未饱和时,水分的迁移和聚 集作用比饱和时更加明显,因而对于冻胀增幅的抑 制作用小.

2.2.3 压实度对冻胀率的影响

图 8 为不同压实度与冻胀率的关系曲线,可以 看出,在土体含水率和含泥量相同的条件下,土体的 冻胀率随着压实度的增大呈现增大后减小的趋势. 其原因分析如下:在压实度较低时,随着压实度的增 大,土中未冻水膜的连续性比疏松时未冻水膜的连 续性增强,有利于水分迁移与聚冰,因而冻胀强度增 大;当压实度增大到一个临界值时使薄膜通道减到 最小,此时土体的冻胀强度最大,而随着压实度继续 增大超过这一临界值时,土体的冻胀强度减小,这是 由于土中孔隙体积缩小,使得土颗粒间的有效接触 面积增加,造成外围水膜相互叠加,导致冻结时水分 迁移受阻.



图 8 压实度与冻胀率的关系曲线

在工程实际中,一般将压实度控制在 95%~ 98%的范围内,而实验结果表明,压实度为 95%左右 时,冻胀率达到最大值,因此在实际施工时,对压实 度的控制应予以注意.

2.2.4 上覆荷载对冻胀率的影响

图 9 为不同上覆荷载与冻胀率的关系曲线,可 以看出,上覆荷载对土样的冻胀具有抑制作用,冻胀 率随上覆荷载的增大而减小.但是从拟合曲线的变 化率来看,这种抑制作用影响不大,这是由于土体内 部冻胀时所产生的冻胀力是非常大的,外加荷载相 对来说所起的作用就比较小了.



2.2.5 补水状况对冻胀率的影响

图 10 为是否补水与冻胀率的关系曲线,可以看出,是否补水对土样的冻胀率影响较大,补水能使冻胀率增大 3 倍以上,这是由于土体内部水分迁移聚 集形成孔隙负压,使得外界水分源源不断地向冻结 封面迁移和聚集,并形成冰透镜体,导致冻胀率急剧 增大,这说明外界补水是引起及土基冻胀的主要 因素.



3 多因素回归分析

将试验数据结果整理如表 3 所示,以含水率  $\omega_m$ 、含泥量 $\omega_s$ 、压实度k、上覆荷载p为自变量,以冻 胀率 $\eta$ 为因变量.利用 MATLAB 编程对试验结果进 行多元回归分析,得到含水率、含泥量、压实度、上覆 荷载综合影响下的冻胀率的回归模型为

 $\eta = 0.147\ 651\omega_{\rm m} + 0.121\ 521\omega_{\rm s} - 0.002\ 08\omega_{\rm s}^{\ 2} - 0.048\ 18k + 0.000\ 323k^2 - 0.002\ 74p.$ 

修正拟合系数  $R^2 = 0.990 872$ ,  $F = 542.758 6 > F_{0.05}(4,36) = 2.65$ , 显著性非常好, 反映该回归模型 拟合情况良好, 可信度较高, 说明以上几个因素对土 体冻胀率有显著性影响, 故该回归模型合理有效. 由各个因素回归系数的可知, 对冻胀率的影响由大 到小的顺序:含水率、含泥量、压实度、上覆荷载.为 了检验该公式的正确性和有效性,本文将初始条件 代入公式,得到冻胀率拟合值,将其与试验值对比分 析如图 11 所示.

表 3 冻胀试验结果汇总

序号	压实度/%	含水率/%	含泥量/%	上覆荷载/kPa	冻胀率/%
1	85	8.27	25	20	0.98
2	90	8.27	25	20	1.18
3	95	8.27	25	20	1.28
4	100	8.27	25	20	1.17
5	85	18.00	45	20	2.08
6	90	18.00	45	20	2.21
7	95	18.00	45	20	2.28
8	100	18.00	45	20	2.18
9	95	3.00	15	20	0.43
10	95	5.00	15	20	0.62
11	95	7.00	15	20	0.71
12	95	9.00	15	20	1.02
13	95	6.43	25	20	0.81
14	95	7.35	25	20	0.99
15	95	9.19	25	20	1.46
16	95	10.00	45	20	0.88
17	95	12.00	45	20	1.32
18	95	14.00	45	20	1.64
19	95	16.00	45	20	1.98
20	95	5.94	10	20	0.10
21	95	6.29	15	20	0.46
22	95	6.81	20	20	0.75
23	95	6.69	10	20	0.19
24	95	7.66	20	20	1.01
25	95	7.43	10	20	0.28
26	95	7.86	15	20	0.88
27	95	8.51	20	20	1.28
28	95	6.69	10	10	0.22
29	95	6.69	10	30	0.16
30	95	6.69	10	40	0.16
31	95	7.00	15	10	0.76
32	95	7.00	15	30	0.73
33	95	7.00	15	40	0.68
34	95	7.66	20	10	1.07
35	95	7.66	20	30	1.00
36	95	7.66	20	40	0.96

由图 11 可知,计算值与试验值拟合情况良好, 说明该公式具有较高的准确性和一定的有效性.应 用该回归模型可以预测不同因素综合影响下的冻胀 率,具有一定的工程应用价值.由于该公式只是考 虑到了压实度、含水率、含泥量、上覆荷载等几种主 要因素对于冻胀率的影响,并未将其他所有因素考 虑在内,因此还具有一定的局限性,这一点有待进一 步改进.



图 11 试验值与拟合值对比

# 4 结 论

1)在封闭条件下,冻胀率随含水率的增大而线 性增大;随含泥量的增大呈非线性关系递增;随压实 度的增大呈先增大后减小的趋势,在压实度为95% 的状态下达到最大值;随上覆荷载的增大呈线性关 系平缓递减.

2) 经多元回归分析,得到了多因素综合影响下 的回归模型为  $\eta = 0.147 \ 651\omega_m + 0.121 \ 521\omega_s - 0.002 \ 08\omega_s^2 - 0.048 \ 18k + 0.000 \ 323k^2 - 0.002 \ 74p.$ 可见含水率  $\omega_m$  和含泥量  $\omega_s$  对冻胀的影响较大. 应 用该回归模型可以预测不同因素综合影响下的冻胀 率,具有一定的工程应用价值.

3) 外界补水条件下, 土体冻胀率显著增大, 通常能够增大3倍以上.

4)各个因素对冻胀率的影响由大到小顺序:补水、含水率、含泥量、压实度、上覆荷载.因此,在工程实际中,控制补水、含水率、含泥量是防冻设计的关键.

# 参考文献

- EVERETT D H. The thermodynamics of frost damage to porous solids
  J]. Transaction Faraday Society, 1961, 57: 1541-1551.
- [2] MILLER R D. Lens initiation in secondary frost heaving[R]. Lulea, Sweden: Int Symp on Frost Action in Soils, 1977.
- [3] 吴紫汪. 土的冻胀性试验研究[M]//兰州冰川冻土所集 刊第2号. 北京: 科学出版社, 1981: 82-96.
- [4] 陈肖柏. 砂砾料之冻胀敏感性[J]. 岩土工程学报,1988 (3): 23-29.
- [5] 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):359-365,388.
- [6] 巨娟丽. 白砂岩土的冻胀率试验研究[J]. 水利与建筑 工程学报,2004,2(2):51-54.
- [7] 程佳, 赵相卿, 杨晓明. 青藏铁路多年冻土区典型土样 冻胀率特性研究[J].冰川冻土, 2011, 33(4): 863-866.
- [8] 刘新华. 季节冻土冻胀和融沉的影响因素研究[D]. 西安:长安大学,2007.
- [9] 高志华. 青藏铁路路基冻胀变形特点研究[D]. 西安: 长安大学,2010.
- [10] 张以晨,李欣,张喜发,等.季冻区公路路基粗粒土的冻 胀敏感性及分类研究[J].岩土工程学报,2007,29 (10):1522-1526.
- [11] 徐洪坤, 杨祺, 伍危. 寒区机场道基冻胀预测模型[J]. 路基工程, 2007 (5):17-19.
- [12]杨锐,王肖戎,许金余.高寒地区机场道面基层底面冻胀 应力的计算[J].空军工程大学学报(自然科学版), 2007,8(3):16-18.
- [13]李博,蔡良才,张罗利.机场工程土基处理分析[J].四川 建筑科学研究,2010,36(6):104-106.
- [14] 闫永刚,刘文录.西北戈壁滩机场水泥混凝土道面病害 与对策研究[J].甘肃科技纵横,2010,39(3):151-154.
- [15]沈哲,李永毅,李澎,等.高寒地区机场土基冻胀特性 试验研究[J].施工技术,2010,39(增刊):8-11.
- [16]交通部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG E40—2007[S].北京:人民交通出版社,2007:345-349.

(编辑 魏希柱)