

压实度及水分对青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性的影响

龙小勇¹, 岑国平¹, 蔡宛彤¹, 张建军², 张永祥², 温小平³, 杨佳乐⁴

1. 空军工程大学航空工程学院, 西安 710038

2. 空军工程设计研究局南空设计室, 南京 210000

3. 中国人民解放军95877部队, 酒泉 735018

4. 中国人民解放军95538部队, 成都 611231

摘要 针对青藏高原季冻区某机场道基主要材料砂砾土, 通过实验系统地研究了压实度、初始含水率及补水状况对砂砾土冻胀特性的影响规律。结果表明, 在封闭条件下, 若初始含水率不变, 则砂砾土冻胀率随压实度的增加呈先增大后减小的趋势, 在压实度为95%左右时达到最大值, 若压实度不变, 则冻胀率随初始含水率的增加呈线性增大; 压实度和初始含水率均与冻胀率之间存在高度相关的函数关系, 这些关系式在某些情况下可用于相关指标的相互预测。在开放条件下, 砂砾土的冻胀率较封闭条件下显著增大, 通常达3~4倍以上。为有效防治砂砾土冻胀, 应严格控制压实度和初始含水率, 同时采用降低地下水位、设置隔水垫层等措施阻止外界水源补充。

关键词 砂砾土; 冻胀; 初始含水率; 压实度; 补水

在中国青藏高原季冻区, 道基冻害问题是危害机场跑道安全的一大隐患, 彻底解决该问题一直是机场设计、施工等部门的重要课题。道基冻害的实质是土体的冻胀, 不同因素对不同类别土体的冻胀特性影响规律也不尽相同。国内外关于土质、温度、上覆荷载等因素对土体冻胀影响的研究已经取得了丰硕的成果^[1-6]。大量研究和工程实际表明, 冻胀现象通常发生于细粒土中, 粗粒土如砂砾土等往往不容易引起冻胀, 因此关于细粒土冻胀特性的研究较多^[7-11], 而针对砂砾土等粗粒土冻胀特性的研究较少。岑国平等^[12]利用正交实验, 研究了含水率、含泥量(粒度小于0.075 mm 颗

粒的质量分数)、压实度、上覆荷载和补水状况等因素对砂砾土冻胀特性的影响规律, 结果表明砂砾土在某些情况下仍然会引起一定程度的冻胀, 其危害已不容忽视。另外, 无论是针对细粒土还是粗粒土, 单纯从压实度、初始含水率和补水状况等因素对土体的冻胀特性进行综合性研究的文献较少^[13-15], 其中关于砂砾土的研究更少, 因此有必要针对这一问题开展研究。本文以青藏高原季冻区某机场道基的主要材料砂砾土为研究对象, 通过冻胀室内实验, 系统地探索压实度、初始含水率(本文所述含水率均为质量含水率)及补水状况对砂砾土冻胀特性的影响规律。

收稿日期: 2017-08-15; 修回日期: 2018-01-19

基金项目: 国家民航局科研项目(MHRD20140216)

作者简介: 龙小勇, 博士研究生, 研究方向为机场规划设计和机场道面材料与结构防冻, 电子信箱: 18509270709@163.com

引用格式: 龙小勇, 岑国平, 蔡宛彤, 等. 压实度及水分对青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性的影响[J]. 科技导报, 2018, 36(6): 112-118; doi: 10.3981/j.

issn.1000-7857.2018.06.014

1 实验方法

1.1 试样制备

实验所用土样取自中国青海省果洛自治州大武机场工程现场。由于原状土样的采取、运输、保存等存在一定的困难,因此采用重塑扰动土样进行室内实验。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。土样包括天然砂砾土和表层细粒土。

土的细颗粒含量和颗粒级配对冻胀有着明显的影响^[12]。颗粒大小反映土粒表面力场的差异性,这种表面效应指标是比表面积。颗粒由大变小,比表面积由小变大,与水相互作用的能量越高,直接影响水分迁移能力,导致冻胀变形特征不同。通过颗粒实验分析得到天然砂砾土和表层细粒土的颗粒级配曲线,如图1所示。由图1可知,砂砾土中细颗粒含量较少,粗颗粒含量较多。而在细粒土中,细颗粒含量较多,粗颗粒含量较少。由表1可知,砂砾土的不均匀系数、曲率系数均大于细粒土,显然砂砾土的颗粒级配较细粒土更加良好,砂砾土的冻胀敏感性较细粒土更弱。砂砾土的不均匀冻胀系数过大,说明其缺失中间粒径颗粒,而在实际施工过程中,表层细粒土往往容易被掺杂在砂砾土中,不仅使得砂砾土的细粒含量增加,并且还在一定程度上填补了天然砂砾土所缺失的中间粒径颗粒,使得混合了部分粉土的砂砾土级配趋于不良,冻胀敏感性增强,导致实际工程中砂砾土地基的冻胀现象更加明显。

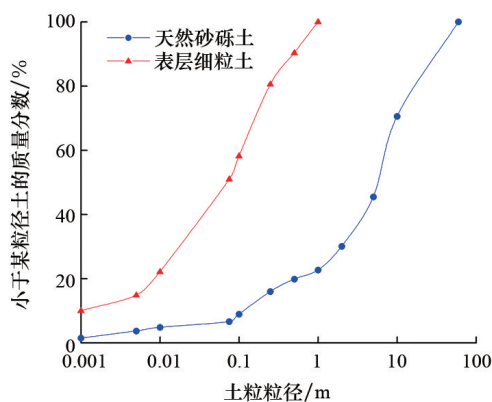


图1 颗粒级配曲线
Fig. 1 Grading curve

表1 颗粒级配指标

Table 1 Grain composition indexes

土样	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
天然砂砾土	47	2.1
表层细粒土	25	1.4

将土样的含泥量控制为15%,并将天然砂砾土与表层细粒土按照一定比例掺和均匀,制备成实验所需含泥量的试样。采用浮称法测得所配制含泥量为15%试样的土粒比重为2.71(用于计算土的孔隙率和饱和度),通过标准击实实验得到试样的标准最大干密度为2.33 g/cm³,最优含水率为7%。

1.2 冻胀参数计算

土体的冻胀特性主要用土体的冻胀量和冻胀率表示。冻胀量是土体在无侧向变形的的前提下,经单向冻结而引起的竖向位移,土体纵向高度的增量与土体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

$$\eta = \frac{\Delta h}{H_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中, η 为冻胀率,%; Δh 为冻胀量,mm; H_i 为冻结土层的厚度^[15],mm。

土体内部的冻结深度根据实测温度值采用下式计算,即

$$H_x = H \left(i + \frac{|t_i^-|}{|t_i^-| + t_{i+1}^+} \right) \quad (2)$$

式中, H_x 为计算冻结深度,cm; H 为测温元件的间距, $H=2.0$ cm; i 为测温元件由表层起算的层号; $|t_i^-|$ 为第*i*层测得的负温度的绝对值,℃; t_{i+1}^+ 为第*i*+1层测得的正温度,℃。

计算原理如图2所示^[16]。

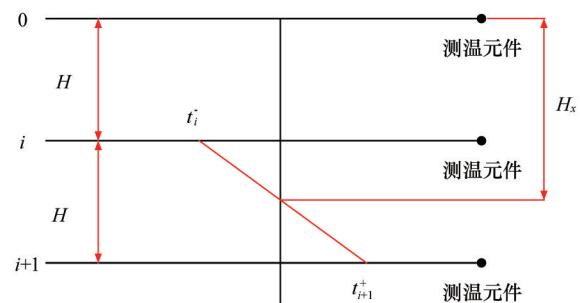


图2 冻结深度计算原理示意

Fig. 2 Sketch of computation for freeze depth

1.3 实验系统改进

传统的实验系统由试样筒、加压装置、补水装置、位移监测装置、恒温环境箱和温控装置组成。然而由于该系统的试样筒的尺寸较小,标准规定只适用于粉质土和砂质土等细粒土,不适用于砂砾土等粗粒土的冻胀率测量。为此,对传统的实验系统做以下改进。

1) 试样筒。试样筒的内径由原来的10 cm增大至

15 cm, 高度由原来的 10 cm 增大至 16 cm; 温度传感器的布置间距由原来的 1 cm 增大至 2 cm, 其他保持不变。

2) 加压装置。用气缸加压代替原来的砝码加压, 使加压系统的加压范围更大, 调节更方便。改进后的加压系统由空气压缩机、调压阀、气缸、连接管等组成。

3) 补水装置。采用马氏瓶供水代替原来的普通供水装置, 使水位保持更加稳定; 将补水进口的位置由原来的顶板改至底板, 使补水管水位与试样筒底板平齐, 使其与实际工程中地下水补充情况相符; 采用位移传

感器代替原来的直尺, 可精确地观测供水容器的水位变化, 自动获得补水量。

4) 数据采集装置。采用位移传感器代替千分表, 可更加精确地观测冻胀量; 位移、温度信号均由采集器自动采集, 计算机自动记录。

经过改进的冻胀率实验系统由试样筒、恒温箱及温控装置、温度监测装置、位移监测装置、数据采集装置、补水装置、气动平衡加压装置组成。实验系统如图 3 所示, 实验装置如图 4 所示^[17]。

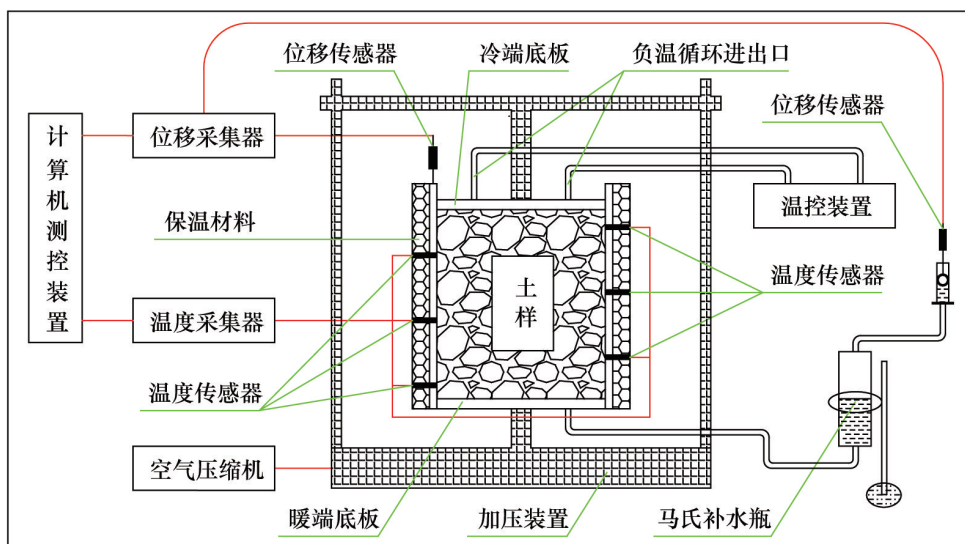


图3 冻胀率实验系统

Fig. 3 Schematic diagram of frost-heaving ratio test device



(a) 阿尔泰测控软件; (b) 恒温箱; (c) 采集器; (d) 低温恒温循环器; (e) 气动平衡加压器; (f) 试样筒; (g) 马氏补水瓶

图4 冻胀率实验装置照片

Fig. 4 Frost-heaving ratio test devices

1.4 实验方案及步骤

实验过程中,控制上覆荷载为 20 kPa,初始冻结温度设定为 -2°C ,共进行 3 组实验,即压实度实验、初始含水率实验和补水状况对冻胀率影响实验。实验方案如表 2 所示。

表 2 冻胀实验方案
Table 2 Frost-heaving ratio test program

压实度 /%	含水率 /%	是否 补水	压实度 /%	含水率 /%	是否 补水
85	3	否	95	7	否
85	5	否	95	9	否
85	7	否	100	3	否
85	9	否	100	5	否
90	3	否	100	7	否
90	5	否	100	9	否
90	7	否	95	3	是
90	9	否	95	5	是
95	3	否	95	7	是
95	5	否	95	9	是

注:本文所指含水率均为质量含水率。

实验按下列步骤进行:

1) 取准备好的实验试样,按照实验方案要求的含水率进行配料,然后闷料 24 h,以保证试样的初始含水率均匀一致。根据方案要求的压实度和事先测得的孔隙率、饱和度等指标,计算需要称取的试样质量,将称取的试样在试样筒中分 5 层进行击实,然后静压成型。

2) 为防止实验过程中水分流失,同时使补充水分从试样底面均匀入渗,在试样顶面和底面各放 1 张滤纸,然后放上顶板并稍加压,使试样与顶、底板接触紧密。将试样筒放入恒温箱内,在试样周侧、底板表面布置温度传感器,在试样筒的周侧包裹厚 5 cm 橡塑海绵保温材料。

3) 连接底板的冷冻液循环管路及顶板的补水管路,打开马氏补水瓶的供水开关开始供水,先排除顶板内气泡,再调节补水瓶内的水位至合理高度。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,并调节至实验所需值。开启恒温箱,设定恒温值为 1°C ,监测温度值的变化,待试样整体的初始温度达到约 1°C 以后,开启低温恒温循环器,温度阈值调节至 -2°C ,并以 $0.2^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率下降。

5) 检查所有管线的连接情况,确认无误后,打开计算机中的阿尔泰测控软件读取、保存数据。在封闭实

验中,实验持续至位移量的读数恒定不变时结束(约 72 h)。在开放实验中,为了与封闭实验进行对照,将实验结束时间控制在冻结开始后的第 72 h。

6) 上述实验结束后,迅速从试样筒中取出试样,测量试样高度和冻结深度,读取相关数据并计算结果。

2 结果及分析

2.1 压实度对冻胀率的影响

配制含水率分别为 3%、5%、7%、9% 的 4 种试样,在封闭条件下,测量每一种试样在压实度分别为 85%、90%、95%、100% 时的冻胀率。实验结果如表 3 所示。

表 3 不同压实度下冻胀率实验结果
Table 3 Results of frost-heaving ratio test in different compaction degrees

压实度/%	含水率/%	是否补水	冻胀率/%	压实度/%	含水率/%	是否补水	冻胀率/%
85	3	否	0.21	85	7	否	0.51
90	3	否	0.35	90	7	否	0.66
95	3	否	0.43	95	7	否	0.71
100	3	否	0.33	100	7	否	0.64
85	5	否	0.35	85	9	否	0.78
90	5	否	0.51	90	9	否	0.98
95	5	否	0.58	95	9	否	1.02
100	5	否	0.46	100	9	否	0.96

根据表 3 绘制的冻胀率与压实度的关系曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在初始含水率相同的条件下,土体的冻胀率随压实度的增加呈先增大后减小的趋势,且在压实度为 95% 左右时冻胀率达到最大值。

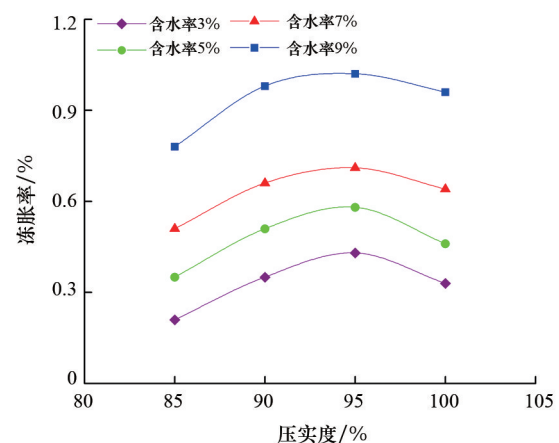


图 5 压实度与冻胀率的关系曲线

Fig. 5 Relationship between compaction degree and frost-heaving ratio

冻结结束后,取出试样沿深度方向每隔 3 cm 取一层土样测量其含水率,绘制不同压实度下含水率沿试

样深度分布曲线如图6所示。从图6可以看出,95%压实度下的试样,其靠近冷端区域的含水率大,靠近暖端区域的含水率小,说明其水分迁移最剧烈;而100%压实度下的试样,其靠近冷端区域的含水率小,靠近暖端区域的含水率大,说明其水分迁移作用最弱。分析其原因:当压实度较低时,土体较疏松,孔隙体积较大,水膜连续性随着压实度的增大而增强,水分迁移越来越剧烈,导致冻胀强度增大。当压实度增大到一个临界值时,水膜通道减到最小,即土粒达到最佳颗粒团聚状态,此时水分迁移作用最为剧烈,土体的冻胀强度最大。当压实度超过这一临界值时,土体过分紧密,孔隙体积较小,渗透性大大减小,阻碍了冻结过程中的水分迁移和冰分凝的形成,冻胀强度反而逐渐减小。

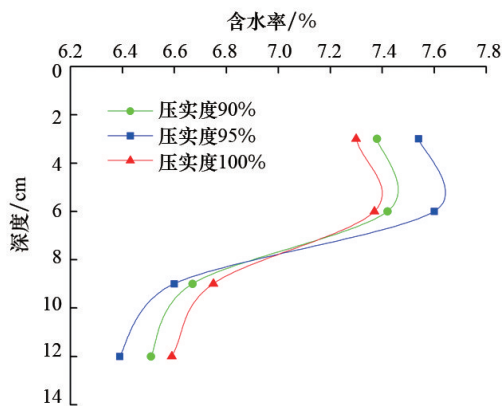


图6 不同压实度下含水率沿试样深度分布曲线
Fig. 6 Moisture content vs. depth in different compaction degrees

2.2 初始含水率对冻胀率的影响

分别以85%、90%、95%、100%这4种压实度控制试样,在封闭条件下,测量同一压实状态下试样在初始含水率分别为3%、5%、7%、9%时的冻胀率。实验结果如表4所示。

表4 不同初始含水率下冻胀率实验结果

Table 4 Results of frost-heaving ratio test in different initial moisture contents

压实度/%	含水率/%	冻胀率/%	压实度/%	含水率/%	冻胀率/%
85	3	0.21	95	3	0.43
85	5	0.35	95	5	0.58
85	7	0.51	95	7	0.71
85	9	0.78	95	9	1.02
90	3	0.35	100	3	0.33
90	5	0.51	100	5	0.46
90	7	0.66	100	7	0.64
90	9	0.98	100	9	0.96

根据表4绘制冻胀率与初始含水率的关系曲线如图7所示。由图7可知,在压实度一定的情况下,土体的冻胀率随初始含水率的增加而线性增大。这是由于,随着初始含水率的增加,土体的饱和度相应增大,孔隙中的水分黏结更紧密,水分连续迁移更明显,土体冻结时孔隙冰体积增加,因此土体产生的总的冻胀量增大。

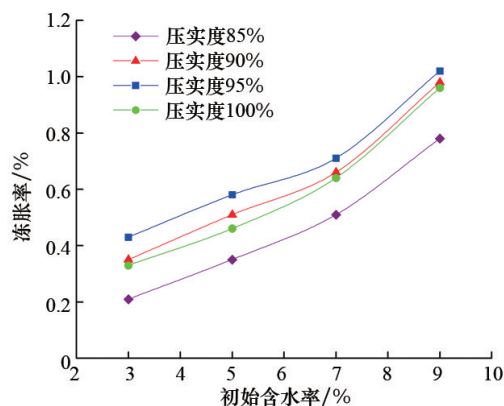


图7 初始含水率与冻胀率的关系曲线
Fig. 7 Relationship between initial moisture content and frost-heaving ratio

2.3 补水状况对冻胀率的影响

控制压实度为95%,配制初始含水率分别为3%、5%、7%、9%的4种试样各2组,分别在封闭条件下和开放条件下进行冻结,研究补水状况对冻胀率的影响,实验结果如图8所示。由图8可知,补水状况对冻胀率有很大影响,补水通常能使冻胀率增大数倍以上。其原因是:由于外界水源处的水分通过未冻土的毛细作用能够上升到一定高度,并向冻结锋面迁移聚集,为冰透

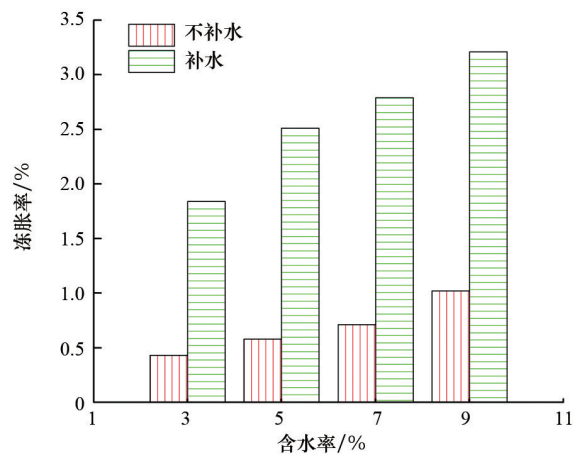


图8 补水与冻胀率的关系
Fig. 8 Relationship between water replenishing and frost-heaving ratio

镜体的生长提供了条件;随着冻结持续进行,冻结锋面后方的水分不断形成冰透镜体,土体内部形成一定的孔隙负压,使得外界水分源源不断地经过毛细通道向冻结锋面迁移和聚集,并形成冰透镜体,从而使得冻胀量显著增大。对比封闭和开放2种条件下水分对冻胀率的影响,可以看出外界补水是引起土体冻胀的主要因素。

2.4 压实度及含水率与冻胀率的函数关系

对图5和图7的关系曲线进行回归分析,得到压实度、初始含水率与冻胀率之间的函数关系如表5所示。

表5 试样实验指标的函数关系
Table 5 Functional relationship between soil test indexes

自变量	因变量	回归曲线	函数关系 $y=f(x)$	相关系数
x	y			
压实度	冻胀率	含水率3%	$y=-0.0024x^2+0.453x-20.94$	0.971
		含水率5%	$y=-0.0028x^2+0.526x-24.14$	0.982
		含水率7%	$y=-0.0022x^2+0.416x-18.94$	0.999
		含水率9%	$y=-0.0026x^2+0.493x-22.30$	0.995
含水率	冻胀率	压实度85%	$y=0.0935x-0.0985$	0.974
		压实度90%	$y=0.1020x+0.0130$	0.963
		压实度95%	$y=0.0950x+0.1150$	0.956
		压实度100%	$y=0.1035x-0.0235$	0.958

由表5可知,砂砾土的冻胀率与压实度和初始含水率之间存在明显的函数关系,经过拟合回归,相关系数都在0.95以上,属高度相关。因此,在实际工程的某些情况下,表5中的函数关系式可以用作相关指标的相互预测,具有一定的应用价值。

3 结论

在工程实际中,一般将压实度控制在95%~98%的范围内。然而本文的实验结果表明,在封闭条件下,若控制初始含水率不变,砂砾土的冻胀率随压实度的增大呈先增大后减小的趋势,压实度为95%左右时达到最大值;含泥量为15%的砂砾土,初始含水率为7%(最优含水率)、压实度为95%时,冻胀率达0.71%。说明工程常用的95%的压实度,在一定初始含水率下也能使砂砾土产生较强的冻胀,因此在工程设计和施工时,应该严格控制压实度,根据本文的实验结果,建议取压实度为98%。

在封闭条件下,若控制压实度不变,砂砾土的冻胀率随初始含水率的增大呈线性增大,含泥量为15%的砂砾土在压实度为95%、初始含水率为9%时,冻胀率达1.02%,说明过高的初始含水率在一定压实状态下也能

使砂砾土产生较强的冻胀。因此,在工程设计和施工时,要注意对土基的压实度和初始含水率进行双指标控制。

在开放条件下,砂砾土的冻胀率较封闭条件下显著增大,通常达数倍以上。含泥量为15%、含水率为9%的砂砾土在有外界补水时,冻胀率达3.21%,这一冻胀率对应于冻深为2.2 m的机场道基,所产生的冻胀量将达到几厘米甚至十几厘米,可能导致机场道面板产生一定程度的错台破坏,严重时将危害飞机跑道的使用安全。因此,为了有效防治土体冻胀,不仅要控制压实度和初始含水率进行双指标控制,更要采用降低地下水位、设置隔水垫层等措施阻止外界水源补充。

参考文献(References)

- [1] 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 heaving[C]//Proceedings of the International Symposium on Frost Action in Soils. Luleaa, Sweden, 1977: 68-74.
- [3] 徐学祖, 邓友生. 冻土中水分迁移的试验研究[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
Xu Xuezu, Deng Yousheng. Experimental study of moisture migration in permafrost[M]. Beijing: Science Press, 1991.
- [4] 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): 4251-4257.
Yang Rui, Wang Xiaorong, Xu Jinyu. Calculation of frost heave stress on the airport pavement base bottom in frigid area[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2007, 8(3): 4251-4257.
- [5] 孙兵, 仇文革, 周超. 饱和粘土三轴冻胀应力-应变关系试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(2): 177-180.
Sun Bing, Qiu Wenge, Zhou Chao. Experimental investigation on triaxial frost heaving stress strain relationship of saturated clay[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(2): 177-180.
- [6] 于琳琳, 徐学燕, 吉植强. 不同人工冻结方向条件下土的冻胀试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(6):58-62.
Yu Linlin, Xu Xueyan, Ji Zhiqing. Test research on frost heave by artificial freezing with different freezing directions[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition), 2009, 41(6): 58-62.
- [7] Yu L L, Xu X Y, Ma C. Combination effect of seasonal freezing and artificial freezing on frost heave of silty clay [J]. Journal of Central South University, 2010, 17: 163-168.
- [8] 程培峰, 尹传军. 季冻区粉质黏土冻胀特性分析[J]. 公路交通科技, 2014, 31(1): 44-49.
Cheng Peifeng, Yin Chuanjun. Analysis of frost heaving characteristics of silty clay in seasonal frozen region[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(1): 44-49.
- [9] 彭丽云, 刘建坤, 田亚护. 粉质粘土的冻胀特性研究[J]. 水文

- 地质工程地质, 2016(9): 62-67.
Peng Liyun, Liu Jiankun, Tian Yahu. Study on frost heaving property of silty caly[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2016(9): 62-67.
- [10] 李强, 姚仰平, 韩黎明, 等. 土体的“锅盖效应”[J]. 工业建筑, 2014, 44(2): 69-71.
Li Qiang, Yao Yangping, Han Liming, et al. Pot-cover effect of soil[J]. Industrial Construction, 2014, 44(2): 69-71.
- [11] 王永涛, 王大雁, 郭妍, 等. 青藏粉土单向冻结冻胀率变化特性研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 409-415.
Wang Yongtao, Wang Dayan, Guo Yan, et al. Experimental study of the development characteristic of frost heaving ratio of the saturated Tibetan silt under one-dimensional freezing [J]. Journal of Glaciology and Geocrylogy, 2016, 38(2): 409-415.
- [12] 岑国平, 龙小勇, 洪刚, 等. 青藏高原季冻区砂砾土冻胀特性试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(3): 53-59.
Cen Guoping, Long Xiaoyong, Hong Gang, et al. Frost heaving properties of gravel soil in seasonal frozen region of Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(3): 53-59.
- [13] 王青志, 刘建坤, 田亚护, 等. 寒区级配碎石冻胀正交试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 36(10): 2825-2836.
Wang Zhiqing, Liu Jiankun, Tian Yahu, et al. A study of orthogonal design tests on frost-heaving characteristics of graded crushed rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 36(10): 2825-2836.
- [14] 夏琼, 窦顺, 赵成江. 兰新铁路路基冻结过程中水分迁移及冻胀规律试验研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(5): 1-7.
Xia Qiong, Dou Shun, Zhao Chengjiang. Experimental study on water migration and frost heaving rules during the freezing process of subgrade in Lanzhou-Xinjiang railway[J]. China Railway Science, 2012, 33(5): 1-7.
- [15] 中华人民共和国交通部. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
The Ministry of Communications of the People's Republic of China. JTG E40—2007 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communication Press, 2007.
- [16] 汪恩良, 徐学燕. 白浆土冻胀特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 851-853.
Wang Enliang, Xu Xueyan. An experimental study on frost-heave characteristics of albic soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(6): 851-853.
- [17] 岑国平, 龙小勇, 洪刚, 等. 含泥量对砂砾土冻胀特性的影响[J]. 科技导报, 2015, 33(5): 78-82.
Cen Guoping, Long Xiaoyong, Hong Gang, et al. Influence of silt content on frost heaving properties of gravel soil[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(5): 78-82.

Influence of compaction degree and moisture on frost heaving properties of gravel soil in seasonally frozen region of Qinghai-Tibetan Plateau

LONG Xiaoyong¹, CEN Guoping¹, CAI Wantong¹, ZHANG Jianjun², ZHANG Yongxiang², WEN Xiaoping³, YANG Jiale⁴

1. Aviation Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China

2. Design Office of Nankong, Air Force Engineering Design Research Bureau, Nanjing 210000, China

3. PLA Unit 95877, Jiuquan 735018, China

4. PLA Unit 95538, Chengdu 611231, China

Abstract In order to see the influence of the compaction degree and the moisture on the frost heaving properties of the gravel soil in the seasonally frozen region of Qinghai-Tibetan Plateau, and provide a foundation for the prevention and the control of the soil frost heaving, a series of frost-heaving ratio indoor tests with improved test devices are conducted to study the influence of the compaction degree, the initial moisture content and the water replenishing on the frost-heaving ratio. It is shown that, the frost-heaving ratio of the gravel soil decreases after the first increase with the increase of the compaction degree, with its maximum at the compaction degree of 95% under the closed condition and with the same initial moisture content, and it increases linearly with the increase of the initial moisture content under the closed condition and with the same compaction degree. There are highly related functional relationship between the compaction degree, the initial moisture content and the frost-heaving ratio, which can be used to forecast related indicators in some cases. The frost-heaving ratio increases over several times under the open condition than under the closed condition. It is necessary to reduce the underground water level, to set the water-resisting layer, and to strictly control the compaction degree and the initial moisture content for the effective prevention and control of the soil frost.

Keywords gravel soil; frost heaving; initial moisture content; compaction degree; water replenishing ●



(责任编辑 韩星明)