

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0076

WANG Tiehang, ZHAO Zaikun, JIN Xin, et al. Frost heaving characteristics for loess under different load[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1249-1255. [王铁行, 赵再昆, 金鑫, 等. 考虑荷载影响的黄土冻胀特性研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1249-1255.]

## 考虑荷载影响的黄土冻胀特性研究

王铁行<sup>1</sup>, 赵再昆<sup>1</sup>, 金鑫<sup>2</sup>, 郭静静<sup>1</sup>, 梁谊<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021;  
3. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:** 黄土的冻胀特性与土体的含水率、土体的密度以及外部荷载关系密切。在室内对不同含水率、不同密度的黄土试样施加不同荷载, 进行了冻胀试验研究。结果表明: 黄土试样的冻胀率随着荷载增加呈指数形式递减; 冻胀率在土样含水率越大时随干密度的变化越大; 在自由冻胀状态下, 冻胀率随干密度的变化较大, 施加荷载后随干密度的变化较小。在荷载水平较高时, 冻胀率随着含水率增大而增大, 但增加幅度相较于自由冻胀显著降低。对于密度相同、作用荷载相同的土样, 含水率增大时冻胀率线性增大。黄土地区的冻胀影响因素中, 荷载、含水率、干密度对冻胀影响是依次减小的。对不同含水率、不同干密度以及不同作用荷载条件下的黄土冻胀试验结果进行拟合, 得到了可综合考虑含水率、干密度和荷载的冻胀预报模型。

**关键词:** 冻胀; 黄土; 荷载; 含水率; 干密度

**中图分类号:** P642.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1249-07

## 0 引言

黄土冻胀是一个复杂的问题, 影响冻胀的因素有内部因素和外部因素两个方面。外部因素产生的冻胀可引起工程结构产生变形, 如果变形受到约束, 其内部就会产生应力, 一旦应力超过了结构强度, 裂缝等就会产生, 进而可能导致工程结构破坏, 造成经济损失, 甚至引发严重的安全问题<sup>[1-4]</sup>。荷载作用作为一个对冻胀有着抑制作用的因素, 也是黄土冻胀特性的重点研究方向之一。黄土高原属于季节冻土地区, 黄土冻胀问题一直受到学者们广泛关注<sup>[5-10]</sup>, 因此开展黄土冻胀研究工作是十分必要的。

虽然荷载对冻胀的抑制作用非常明显, 但在作用相当大的荷载时, 冻胀依然存在<sup>[11-15]</sup>。目前的研究中, 随着黄土高原建设规模不断发展, 许多工程中出现了高荷载作用下的冻胀问题, 如复合地基工

程、黄土冻结壁工程、浅埋桩基工程、输电塔地基工程等。目前对黄土冻胀特性的研究中, 关于荷载对冻胀抑制作用的荷载取值均较小<sup>[16-23]</sup>, 且综合考虑荷载条件、含水率以及土体密度等因素的研究尚少。潘鹏等<sup>[24]</sup>对宁夏饱和黄土的冻胀与初始干密度的关系进行了分析, 发现在冻融次数少于20次时, 冻胀率随初始干密度的增大而减小, 但是该研究未考虑含水率与荷载对冻胀的影响, 也未涉及非饱和黄土。许健等<sup>[25]</sup>以黏质黄土为研究对象, 通过对非饱和土体的冻胀特性研究, 发现在封闭系统下, 非饱和土体冻胀系数随含水率增大而增大, 且最终趋于一个稳定数值, 但该试验没有考虑密度与荷载的影响。黄土的冻胀特性在高荷载影响下尚不明确。

本文综合考虑外部荷载、密度和含水率的影响, 以高荷载作为外因变量, 对黄土的冻胀特性进行研究, 并建立高荷载影响下的冻胀预报模型, 可

收稿日期: 2018-08-20; 修订日期: 2019-10-07

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究重点项目(2020JZ-49)资助

作者简介: 王铁行(1968-), 男, 陕西富平人, 教授, 2001年在长安大学获博士学位, 从事黄土工程理论和实践方法研究。

E-mail: wangtx@xauat.edu.cn

通信作者: 赵再昆, 博士研究生, 从事黄土冻胀及水分迁移研究. E-mail: zhaozaikun@126.com.

为黄土高原季节冻土区工程建设提供参考。

### 1 试验方法

黄土的物理性质见表 1, 试验用黄土取自陕西富平地区某基坑。室内制作不同含水率和密度的黄土土样。

按照土工试验规范<sup>[26]</sup>, 将风干、碾碎、过 2 mm 筛后的干土按照不同加水比例制作试验所需含水率的湿土, 湿土覆膜静置一昼夜, 保证水分均匀扩散。根据环刀容积和试验干密度计算出所需湿土的质

量, 再将湿土倒入装有环刀的压样器内, 通过活塞加压将土样压实到要求密度, 得到不同含水率、不同密度试验土样。土样干密度分别控制为 1.53、1.62、1.70 g·cm<sup>-3</sup>, 土样含水率分别控制为 15%、20%、25% 和 30%。土样为 79.8 mm×20 mm 的环刀样, 温控系统的温度控制方式为风冷, 控温精度为±0.2 ℃, 加载装置采用南京土壤仪器厂生产的 WG 型单杠杆固结仪, 最大荷载压力 2 000 kPa, 加荷精度 12.5 kPa。变形检测装置为百分表, 准确读数精确度 0.01 mm, 试验装置如图 1 所示。

表 1 黄土的物理性质参数  
Table 1 Physical properties of intact loess

液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p$	颗粒含量/%		
			>0.05 mm	0.05~0.005 mm	<0.005 mm
34.4	18.1	16.3	16.09	61.56	22.35

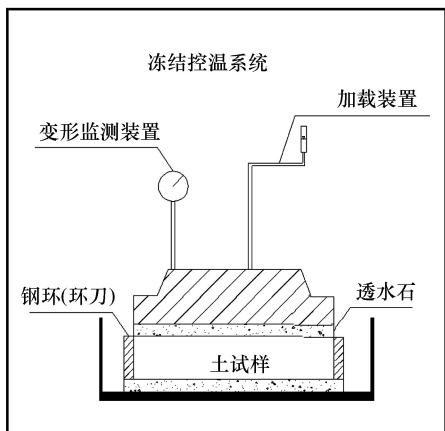


图 1 试验装置图  
Fig. 1 Experimental equipment drawing

在试验开始前, 控制温控系统温度为-3 ℃, 然后放置土样并开始施加荷载。土样在负温作用下发生冻结膨胀, 采用百分表对膨胀量进行实测。荷载值分别取为 0、100、200、300、400 kPa。对荷载、含水率、密度不同的试验土样进行冻胀试验。

负温条件下, 冻胀量会随冻结时间而逐渐增大并趋于稳定。因此, 为了更好地对比分析试验结果, 我们约定冻胀量的稳定标准为连续两小时的冻胀增量小于实测冻胀量的 0.5%。

自然状态下, 黄土密度变化范围较大, 大多介于 1.30~1.70 g·cm<sup>-3</sup>。本文中考虑较高荷载作用, 此时黄土密度较大, 试验土样的干密度介于 1.53~1.70 g·cm<sup>-3</sup>。试验设计及结果见表 2。在施加荷载后进行冻结, 由于土样密度较大, 土样未发生压缩

表 2 冻胀试验参数及结果  
Table 2 Test parameters and results of frost heaving

$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$P/\text{kPa}$	$\eta/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$w/\%$	$P/\text{kPa}$	$\eta/\%$
1.53	13	0	0.101	1.62	25	0	0.911
1.53	13	100	0.013	1.62	25	100	0.166
1.53	13	200	0	1.62	25	200	0.110
1.53	13	300	0	1.62	25	300	0.054
1.53	13	400	0	1.62	25	400	0.001
1.53	20	0	0.345	1.62	30	0	1.463
1.53	20	100	0.056	1.62	30	100	0.203
1.53	20	200	0.013	1.62	30	200	0.158
1.53	20	300	0	1.62	30	300	0.113
1.53	20	400	0	1.62	30	400	0.067
1.53	25	0	0.773	1.70	20	0	0.242
1.53	25	100	0.081	1.70	20	100	0.062
1.53	25	200	0.032	1.70	20	200	0.036
1.53	25	300	0	1.70	20	300	0.024
1.53	25	400	0	1.70	20	400	0.022
1.53	30	0	1.225	1.70	25	0	1.025
1.53	30	100	0.172	1.70	25	100	0.086
1.53	30	200	0.083	1.70	25	200	0.056
1.53	30	300	0	1.70	25	300	0.052
1.53	30	400	0	1.70	25	400	0.034
1.62	20	0	0.341	1.70	30	0	1.614
1.62	20	100	0.087	1.70	30	100	0.236
1.62	20	200	0.041	1.70	30	200	0.174
1.62	20	300	0.001	1.70	30	300	0.130
1.62	20	400	0	1.70	30	400	0.115

注:  $\rho_d$  为土样初始干密度;  $w$  为土样含水率;  $P$  为施加荷载;  $\eta$  为冻胀率, 冻胀率为实测冻胀量与土样原始高度之比。

固结,这与试验结果是一致的。

## 2 试验结果及分析

从表2可知,土体的含水率、密度、荷载会影响黄土的冻胀率。三个影响因素中任何一个发生变化,都会引起黄土冻胀率的变化。

### 2.1 荷载对黄土冻胀特性的影响

图2为干密度和含水率不同时冻胀率与荷载的关系。由图中可知,荷载对冻胀率的影响颇大,主要表现为对冻胀率的抑制作用。随着荷载增加,黄土试样冻胀率变化显著。

冻胀率随着荷载增加呈指数形式递减,其他试样有相同的规律。荷载增量会随着荷载继续增加,降低对冻胀的抑制效果。当土样施加100 kPa的上部荷载时,较自由冻胀状态(0 kPa)下,冻胀率的减小幅度最大可达80%。分析发现,含水率和干密度的值越大,黄土试样的冻胀率越大。另外,当干密度和含水率的值较小时,随着荷载增加,其冻胀率的减小幅度均较小。在自由冻胀状态下(0 kPa),冻胀量的增大主要由于试样中的水分冻结成冰(水冻结后体积膨胀9%)。由于冰具有强度高、可压缩性低的特点,荷载作用对冰产生的压缩是有限的,荷载对冻胀的抑制作用主要表现在改变冰晶的生长方式和降低冻结温度。研究发现,荷载可对冻胀起抑制作用,可使土体中的冰晶向孔隙生长,进而导致冻胀量减小。增加外荷载可对土体冻胀产生显著的消减作用,在相同的冻结环境条件下,外加荷载强度愈大,土体冻胀愈小。另外,土的冻结温度随着上覆荷载的增大而降低,上覆荷载作用使土体内部产生应力,影响土体水分之间的相态平衡,

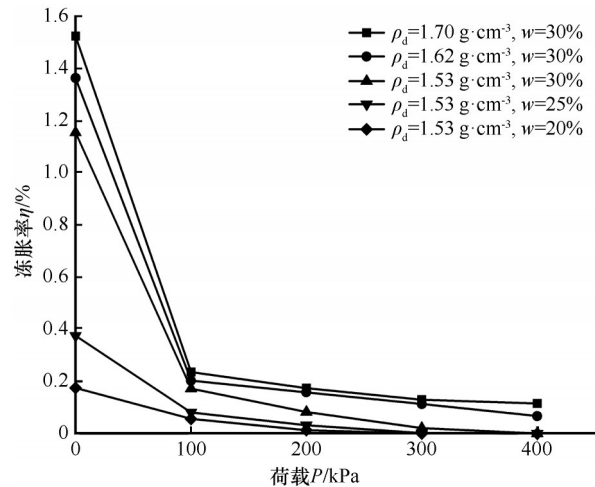


图2 不同干密度和含水率下黄土的荷载-冻胀率关系

Fig. 2 Relationship between load and frost heave of loess under different dry density and water content

使土体冻结温度降低。上覆荷载越大,未冻水含量越高,冰体积越小<sup>[15,27]</sup>。

### 2.2 密度对冻胀作用的影响

含水率分别为20%、25%和30%时,土样干密度与冻胀率的关系如图3所示,图中, $R^2$ 为相关系数,反映干密度与冻胀率之间的线性相关程度; $k$ 为斜率,反映冻胀率线性增长的幅度。由图可知,含水率对冻胀率增加幅度影响显著,含水率越高,冻胀率增加幅度越大;干密度越大,黄土试样冻胀率越大,且近似为线性关系。施加荷载对抑制冻胀影响显著,当施加荷载为100 kPa时,抑制冻胀量可达80%。在自由冻胀状态(0 kPa)下,室内试验发现,干密度对黄土试样的冻胀率影响较大。但是在施加荷载后,干密度对黄土试样的冻胀率影响较小,可见荷载对冻胀起到显著的抑制作用。

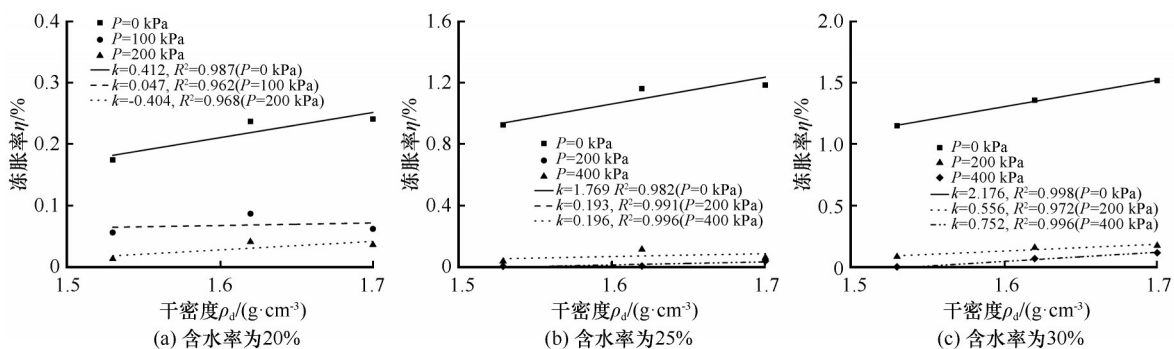


图3 不同荷载下干密度和冻胀率的关系

Fig. 3 Relation between dry density and frost heave rate under different loads: the water content is 20% (a), 25% (b) and 30% (c)

### 2.3 含水率对冻胀作用的影响

干密度不同的土样在荷载作用下的含水率和

冻胀率的关系如图4所示,可以发现,在负温条件下,当土中含有水分较多时,冻结引起的土体冻胀

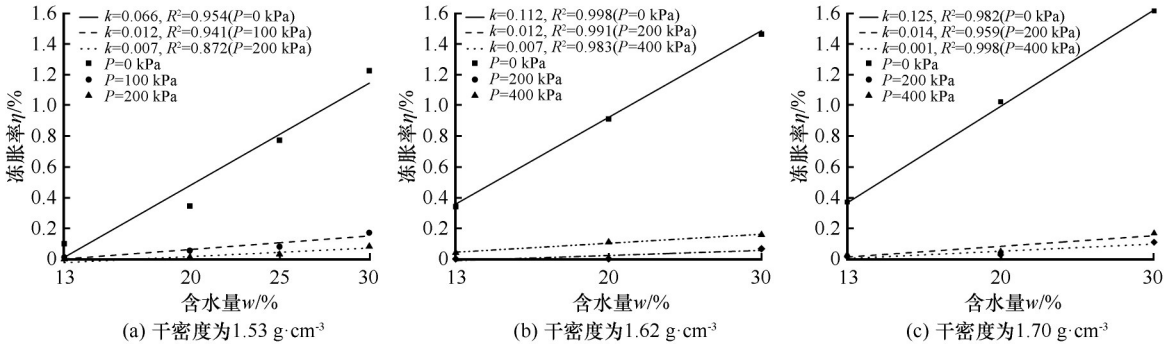


图4 不同荷载下含水率和冻胀率的关系

Fig. 4 Relationship between water content and frost heave under different loads: the dry density is 1.53 g·cm<sup>-3</sup> (a), 1.62 g·cm<sup>-3</sup> and 1.70 g·cm<sup>-3</sup>

率也会较大。

对于密度相同、荷载相同的条件下，土样含水率和冻胀率近似呈线性关系。含水率对黄土试样冻胀率有显著影响，在自由冻胀状态(0 kPa)下，黄土试样冻胀率随含水率的增加显著增大，但在施加荷载后随含水率的增加而减小。在荷载水平较高时，冻胀率随含水率的增大而增大，但增加幅度相较于自由冻胀显著降低。

2.4 含水率、干密度、荷载对冻胀影响的显著性分析

关于含水率、干密度、荷载对冻胀影响的显著性分析见表3。

根据表3的分析结果，可得到极差R排序为荷载(0.134)>含水率(0.112)>干密度(0.079)。基于本文的试验条件，黄土试样冻胀的最大影响因素为

荷载，其次为含水率，最后为干密度。

3 冻胀预报模型

综合考虑干密度、含水率影响以及竖向荷载对冻胀的抑制作用，选择冻胀预测模型为：

$$\eta = a \cdot \exp(b \cdot P) + cP + d \tag{1}$$

式中： $\eta$ 为冻胀率； $P$ 为荷载； $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 均为系数。

对施加不同荷载作用下的含水率和干密度不同的土样试验结果进行拟合，确定模型参数，得到了综合考虑干密度、含水率、荷载影响的冻胀预报模型：

$$\eta(w, \rho_d, P) = a \cdot \exp(-3P) - 0.38P \times 10^{-2} + d \tag{2}$$

式中： $a = -7.27 + 0.15w + (12.34 - 0.27w)\rho_d$ ； $d = -2 + 1.35\rho_d$ 。

采用式(2)对相同条件下的土样冻胀率进行计算，将实测结果与计算结果进行对比，图5为部分数据对比结果，由图可知，计算值与实际值较为吻合，可见该公式可以进行冻胀预报。

4 结论

通过对不同含水率、不同密度的试验土样分别施加不同荷载进行了冻胀试验研究，得到主要结论如下：

(1) 黄土冻胀率与含水率、密度、荷载均有密切关系，这三个影响因素中任何一个发生变化，黄土冻胀率均会发生变化。

(2) 土样冻胀率在含水率越大时随干密度的变化越大。对于密度和施加荷载都相同的土样，含水率和冻胀率近似呈线性关系，含水率越大，冻胀率也越大。

(3) 在自由冻胀状态(0 kPa)下，黄土试样的冻

表3 显著性分析表格

Table 3 The significant analysis table

序号	$T/^{\circ}\text{C}$	$w/\%$	$\rho_d/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$P/\text{kPa}$	$\eta/\%$
1	-3	20	1.62	300	0.001
2	-3	25	1.53	200	0.032
3	-3	30	1.70	100	0.236
4	-3	20	1.53	100	0.056
5	-3	25	1.70	300	0.052
6	-3	30	1.62	200	0.158
7	-3	20	1.70	200	0
8	-3	25	1.62	100	0.166
9	-3	30	1.53	300	0
均值1		0.019	0.029	0.152	
均值2		0.083	0.108	0.063	
均值3		0.131	0.096	0.018	
极差R		0.112	0.079	0.134	



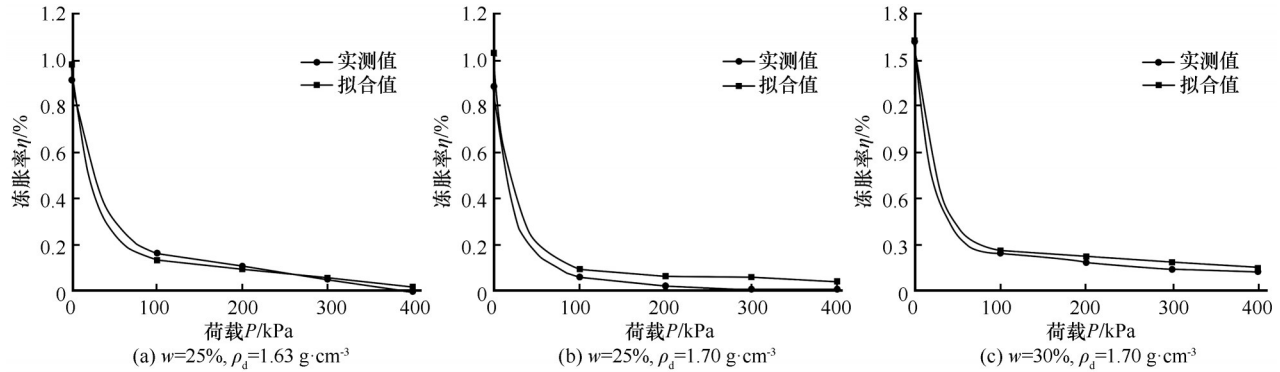


图5 土体冻胀率实测值和拟合值对比

Fig. 5 Comparison of measured values and fitting values of frost heaving rate of soil:  $w=25\%$ ,  $\rho_d=1.63 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (a),  $w=25\%$ ,  $\rho_d=1.70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (b) and  $w=30\%$ ,  $\rho_d=1.70 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  (c)

胀率随干密度的变化较大,在施加荷载后随干密度的变化较小。土样冻胀率在施加上部荷载为 100 kPa 时,比自由冻胀状态(0 kPa)下小,且减小幅度最大可达 80%。荷载增量随荷载继续增加对冻胀的抑制效果降低,且冻胀率呈指数形式递减。在荷载水平较高时,冻胀率随着含水率的增大而增大,但增加幅度相较于自由冻胀显著降低。

(4) 黄土地区的冻胀影响因素中,荷载、含水率、干密度对冻胀影响依次减小。进一步对不同荷载下的含水率和干密度分别不同的土样试验结果进行拟合,得到了综合考虑含水率、干密度、荷载影响的冻胀预报模型,计算值与实际值较为吻合。

#### 参考文献(References):

- [1] Xiao Xin, Liu Enlong, Song Bingtang, et al. Numerical analysis of coupled liquid water, vapor, stress and heat transport in unsaturated freezing soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155(11): 20–28.
- [2] Cai Xiaopei, Liang Yanke, Xin Tao, et al. Assessing the effects of subgrade frost heave on vehicle dynamic behaviors on high-speed railway[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 158(2): 95–105.
- [3] Long Xiaoyong, Cen Guoping, Cai Liangcai, et al. Model experiment of uneven frost heave of airport pavement structure on coarse-grained soils foundation[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188(11): 372–380.
- [4] Xu Jian, Wang Qinze, Ding Jiulong, et al. Frost heave of irrigation canals in seasonal frozen regions[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(1): 1–14.
- [5] Wang Tiehang, Luo Shaofeng, Liu Xiaojun. Testing study of freezing-thawing strength of unsaturated undisturbed loess considering influence of moisture content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(8): 2378–2382. [王铁行, 罗少锋, 刘小军. 考虑含水率影响的非饱和原状黄土冻融强度试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2378–2382.]
- [6] Ye Wanjun, Yang Gengshe, Li Xi'an, et al. Test study of effect of freezing speed on behavior of Q2 loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1912–1917. [叶万军, 杨更社, 李喜安, 等. 冻结速率对 Q2 黄土性状影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1912–1917.]
- [7] Li Guoyu, Ma Wei, Mu Yanhu, et al. Process and mechanism of impact of freezing and thawing cycle on collapse deformation of compacted loess[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(5): 1–5. [李国玉, 马巍, 穆彦虎, 等. 冻融循环对压实黄土湿陷变形影响的过程和机制[J]. 中国公路学报, 2011, 24(5): 1–5.]
- [8] Wang Zhijun, Pan Junyi, Zhou Peng, et al. Influence of freezing and thawing on collapsibility of loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(6): 1710–1716. [王治军, 潘俊义, 周鹏, 等. 冻融作用对黄土湿陷性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(6): 1710–1716.]
- [9] 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. [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.]
- [10] Gu Qi, Wang Jiading, Si Dongdong, et al. Effect of freeze-thaw cycles on collapsibility of loess under different moisture contents[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(7): 1187–1192. [谷琪, 王家鼎, 司冬冬, 等. 不同含水率下黄土冻融循环对湿陷性影响探讨[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1187–1192.]
- [11] Tong Changjiang, Yu Chongyun. The effect of surcharge on the frost heaving of shallow foundations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(3): 193–199. [童长江, 俞崇云. 超载压力对浅基础冻胀的影响[J]. 冰川冻土, 1990, 12(3): 193–199.]
- [12] Zhang H, Zhang J, Zhang Z, et al. A consolidation model for estimating the settlement of warm permafrost[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 76(1): 43–50.
- [13] Lee J, Kim Y S, Chae D, et al. Loading rate effects on strength and stiffness of frozen sands[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2016, 20(1), 208–215.
- [14] Guan Hui, Wang Dayan, Ma Wei, et al. Study on the freezing characteristics of silty clay under high loading conditions[J]. Cold Regions Science and Technology, 2015, 110: 26–31.
- [15] Zhao Zaikun. Experimental study on frost heave characteristics of loess and normal frost-heave force[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2019. [赵再昆. 黄土冻胀特性和法向冻胀力试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学]

- 大学, 2019.]
- [16] Tian Yahu, Liu Jiankun, Peng Liyun. Experimental study on frost action of fine-grained soils under dynamic and static loads [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1882 – 1887. [田亚护, 刘建坤, 彭丽云. 动、静荷载作用下细粒土的冻胀特性实验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1882 – 1887.]
- [17] Han Changling, Yao Hongzhi, Dong Changsong. Calculation methods for supporting load of highway tunnels in permafrost regions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(12): 114 – 119. [韩常领, 姚红志, 董长松. 多年冻土区公路隧道围岩荷载计算方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 114 – 119.]
- [18] Du Haimin, Zhang Shujuan, Ma Wei. Study of the uniaxial compressive strength characteristics of frozen soil with high ice/water content [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1213 – 1219. [杜海民, 张淑娟, 马巍. 高含冰(水)量冻土的单轴抗压强度变化特性研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1213 – 1219.]
- [19] Deng Gang, Wang Jianyu, Zheng Jinlong. Influences of lining stiffness distribution on frost heave pressure on cold regional tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(5): 716 – 720. [邓刚, 王建宇, 郑金龙. 寒区隧道衬砌刚度分布对冻胀压力的影响[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(5): 716 – 720.]
- [20] Jiang Hongju, Cheng Enyuan. Effect of load on frost heaving of subsoil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1990, 12(1): 41 – 47. [姜洪举, 程恩远. 荷载对地基土冻胀的影响[J]. 冰川冻土, 1990, 12(1): 41 – 47.]
- [21] Huang Zhijun, Lai Yuanming, Li Shuangyang, et al. Dynamic response of embankment in permafrost regions under traffic load [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(2): 418 – 426. [黄志军, 赖远明, 李双洋, 等. 交通荷载作用下冻土路基动力响应分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 418 – 426.]
- [22] Hu Kun, Zhu Chunpeng, Wang Xiaoping. Tests on characteristics of final ice lens at different overburden pressures [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(Suppl 2): 393 – 399. [胡坤, 朱春鹏, 王小平. 上覆荷载作用下末透镜体演变规律试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(增刊2): 393 – 399.]
- [23] Wang Jiacheng, Xu Xiaozu, Zhang Lixin, et al. Influence of temperature and pressure on cryogenic structure of freezing soil [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(3): 250 – 257. [王家澄, 徐敦祖, 张立新, 等. 温度和压力条件对正冻土中成冰过程和冷生组构的影响[J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 250 – 257.]
- [24] Pan Peng, Li Jian, Hao Jiaxing, et al. Frost heaving and thawing settlement characteristics of saturated loess in Ningxia [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(18): 230 – 233. [潘鹏, 李剑, 郝佳兴, 等. 宁夏饱和黄土的冻胀融沉特性[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(18): 230 – 233.]
- [25] Xu Jian, Niu Fujun, Niu Yonghong, et al. Experimental analysis of frost susceptibility for remolded clayey loess [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2010, 32(1): 24 – 30. [许健, 牛富俊, 牛永红, 等. 重塑黏质黄土冻胀敏感性试验分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 24 – 30.]
- [26] Nanjing Hydraulic Research Institute. Standard for soil test method, GB/T 50123–1999 [S]. Beijing: China Planning Press, 1999. [南京水利科学研究所. GB/T 50123–1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国规划出版社, 1999.]
- [27] Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. [徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2001.]

## Frost heaving characteristics for loess under different load

WANG Tiehang<sup>1</sup>, ZHAO Zaikun<sup>1</sup>, JIN Xin<sup>2</sup>, GUO Jingjing<sup>1</sup>, LIANG Yi<sup>3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. College of Civil and Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 3. China Jikan Research Institute of Engineering Investigations and Design, Co., Ltd, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The frost heave is obviously restrained by the load, but it still exists when the load is quite large. At present, there are few studies on the frost heave under high load. To evaluate high load effected frost heave, the frost heaving test of loess samples considering the effect of water content, density and load was carried out, which revealed the close relationship between the frost heaving rate of loess and soil water content, density and load. The tests indicated that, when the upper load of soil sample is small, the frost heave rate decreases greatly compared with that under the natural state. While the load continues to increase, the restraining effect of load increment on frost heave decreases. The frost heave rate decreases exponentially with the increase of load. The freeze-heaving rate of loess varies greatly with the dry density under free freeze-heaving condition. The frost heaving rate of loess samples has little change with the dry density after the load is applied. The greater the water content of soil sample, the greater the change of frost heave with dry density. The frost heave ratio increases linearly with the increase of water content. When the load level is high, the frost heaving rate increases with the increase of water content, but the increase amplitude is significantly lower than that of free frost heaving. Among the factors affecting frost heaving in loess area, the load has greatest influence on frost heaving, followed by the water content and the dry density. Moreover, by fitting the test results of soil samples with different water content and dry density under different loads, the frost heaving prediction model of unsaturated loess is obtained.

**Key words:** frost heave; loess; load; water content; dry density

(责任编辑: 周成林; 编辑: 周成林)