

## 东北粘质黄土有害毛细上升高度预测研究

许 健<sup>1,2</sup>, 牛富俊<sup>2</sup>, 牛永红<sup>2</sup>, 侯仲杰<sup>3</sup>(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所  
冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064)

**摘 要:**以沈哈高速铁路沿线的粘质黄土为研究对象,在恒温状态下进行了开放系统水分迁移试验,试验结果表明:随着时间的推移,湿润锋面由底部逐渐向上迁移,含水量也由试件的底部向顶部逐渐减小,试验结束时土柱中的含水量基本表现出由底部向顶部逐渐减小的趋势。基于上述试验终态时刻土体体积含水量沿试样高度的分布,利用灰色理论预测模型 GM(1,1)并结合室内冻胀敏感性试验资料确定出了东北粘质黄土的有害毛细上升高度约为 1.12 m。在此基础上,结合长春地区的最大冻深资料,计算出要保证粘质黄土不产生冻胀,其距离地下水位的的最小高度约为 2.92 m。

**关键词:**粘质黄土;含水量;水分迁移;有害毛细上升高度

中图分类号:TU445

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2011)04-0501-06

路基土体含水量的不同致使其强度产生差异<sup>[1-4]</sup>,在车辆荷载及大气环境周期作用下,路基经常发生不均匀沉降、波浪变形及裂缝等病害。路基湿度变化的水分来源主要有三个方面:大气降水和蒸发、地下水和温度。

在季节冻土区,在温度作用下,土中水分迁移会使路基湿度发生变化,致使路基产生冻胀和翻浆<sup>[5-10]</sup>。土的冻胀受土的机械组成、密实度、含水量、冻结速率以及土体与地下水位距离等因素的控制。大量的试验和观测资料表明<sup>[11-12]</sup>,土体含水量与地下水埋藏深度对冻胀率有很大影响。当含水量小于起始冻胀含水量(接近塑限含水量)时,土体基本无冻胀性,随着含水量的增加,土的冻胀性增强。当正冻土体与地下水位很接近时,冻胀性最强,此时地下水通过毛细作用源源不断地补给正冻土体;随着地下水埋藏深度增大,土中的毛细作用变弱,使得土中含水量减小,冻胀率逐渐降低,到某一临界值以下土冻胀率很小,以致可以忽略。也就是说当毛细水上升到一定高度后,由于土中的毛细作用较弱,使得土中含水量很小,土体冻胀率很小,可以忽略,此时的高度就是毛细水的冻害有效高度。

建设中的沈哈客运专线穿越东北中部山前平原重度季节冻土区,地下水位埋深较浅,稳定水位埋深 2.5~6.0 m,浅层粘质黄土又具有冻胀性。因此有必要确定粘质黄土的有害毛细上升高度,以期对季节冻土区铁路路基工程的防冻胀设计提供依据和参考。基于此,本文以沈哈高速铁路沿线的粘质黄土为研究对象,进行等温状态下土体水分迁移特征的试验;基于试验终态时刻土体体积含水量沿试样高度的分布,利用灰色理论预测模型 GM(1,1)并结合室内冻胀试验资料确定毛细水的冻害有效高度。

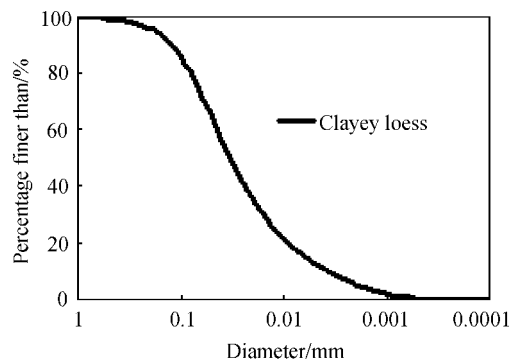


图 1 粘质黄土颗粒级配曲线

Fig. 1 Grain size distribution of the soil on test

\*收稿日期:2010-10-20 修改稿日期:2011-06-27

基金项目:973 计划前期研究专项课题基金资助项目(2010CB434813);国家高技术研究发展计划(863 计划)基金资助项目(2008AA11Z103);国家自然科学基金重点基金资助项目(41030741);中交股份重大科技研发基金项目(2006-ZJKJ-025);西安建筑科技大学人才科技基金项目(DB01119)

作者简介:许 健(1980-),男,山东泰安人,讲师,博士,主要从事寒区岩土工程研究。

# 1 等温过程土体水分迁移试验

## 1.1 试验用土

试验所用土体为东北粘质黄土,取自在建沈哈线路堑挖方试验段 DK691+820 处,取样深度为天然地表下 8 m,土样具有一定的代表性.其颗粒级配曲线如图 1 所示,土性参数列于表 1.

表 1 试验土样的物性参数

Tab. 1 Physical properties of the soil on test

Soil	Water content /%	Dry density /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Optimal water content/%	Maximum dry density /( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	Liquid limit/%	Plastic limit/%	Plasticity index	Soil classification
Clayey loess	13.19	1.35	15.70	1.78	45	25	20	Clay

## 1.2 试验装置

### 1.2.1 装置的构成

试验所用装置为长安大学特殊地区公路工程教育部重点实验室自行研究开发的水分迁移测试系统,此系统由试模、水分传感器、水分采集设备、补水装置等部件构成,如图 2 和图 3 所示.试模采用有机玻璃筒,其高 60 cm,直径 20 cm,每隔 5 cm 埋设一只水分传感器,共埋设 12 支;水分传感器采用美国 SEC 水分传感器,精度为 0.1;水分采集设备为时域反射仪(6050X1 Trase System);补水装置采用马氏瓶.



图 2 等温条件下土体水分迁移测试系统实体图

Fig. 2 Moisture migration test equipment under constant temperature conditions

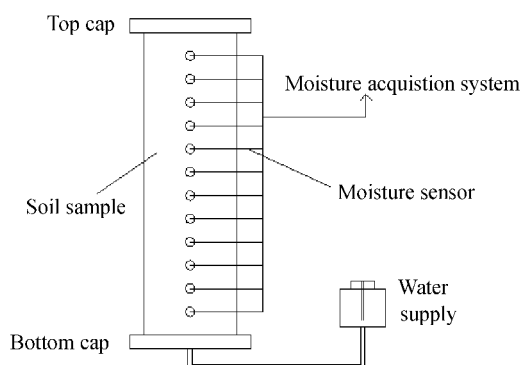


图 3 等温条件下土体水分迁移测试系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram for moisture migration test under constant temperature conditions

### 1.2.2 测试原理

本试验所采用的水分迁移测试系统的测试原理为:通过水分传感器实时对被测试土样的水分进行检测且同时将其检测信号传至水分采集系统,水分采集系统及时对信号进行分析处理并相应得出被测试土样内部含水量;利用马氏瓶原理制作而成的补水系统模拟地下水并控制补水的水头高度与土柱底部平行,避免水头压力对水分迁移的影响,同时通过补水管从底部对被测土样进行均匀补水.通过补水系统可以模拟地下水上升情形,因而本系统能够更好地与工程实际相结合,并且测试结果直观准确且稳定,试验测试结果受外界测试环境因素的影响较小.

## 1.3 试验方案

试验采用东北粘质黄土,将烘干的土样粉碎后过 2 mm 筛,配制质量含水量为 13.19% 的土样;再经过 24 h 以上的闷料;然后将其分层装入试件模中,经击实使其达到要求的密实状态;同时将水分传

感器埋设在指定位置。

将装好的试件放置 24 h, 然后用马氏瓶经由试件底部透水板进行补水, 应用水分采集设备定时测试土体内部含水量的变化, 并记录补水量。当含水量在半个小时内的变化幅度小于 1% 时, 停止补水, 进行数据的整理和分析。

#### 1.4 试验结果分析

图 4 和图 5 分别是不同时刻含水量和含水量相对初始时刻的变化值随试样高度的变化曲线。从图中可以看出, 试样中初始含水量测试结果并非均匀一致, 这是由于土样拌和、装样及水分传感器测试误差的缘故。随着时间的推移, 湿润锋面由底部逐渐向上迁移, 含水量也由试件的底部向顶部逐渐减小, 试验结束时土柱中的含水量基本表现出由底部向顶部逐渐减小的趋势。此外, 虽然土样含水量整体表现出由底部向顶部逐渐减小的趋势, 但是在试验过程中水分传感器的测试值有时会出现异常抖动, 表现在图中含水量随试样高度的增大呈现出波浪式减小的趋势, 亦即随土柱高度的增加, 土样含水量并非一直是减小的, 有时反而是增大的, 这主要是由于土体密实度、水分和土体孔隙中的气体不均衡所致。

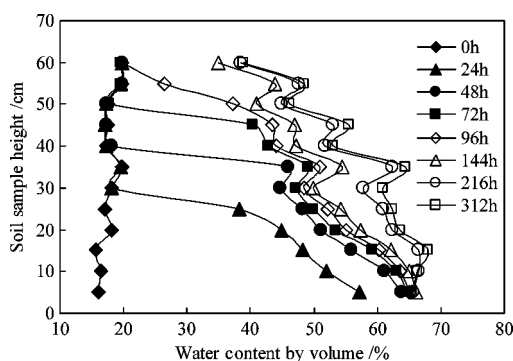


图 4 不同时刻含水量随试样高度变化曲线

Fig. 4 Water content varying with sample height at different time

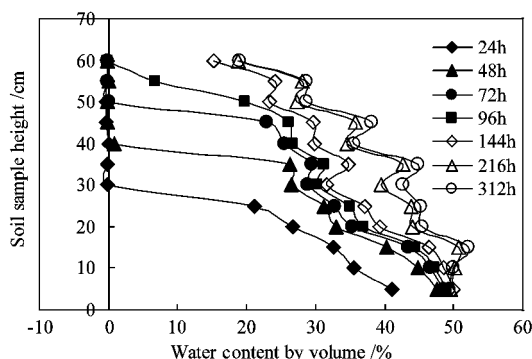


图 5 不同时刻含水量变化值随试样高度变化曲线

Fig. 5 Variations of water content with the sample height at different time

土体终态时含水量之所以自上而下逐渐增大, 是因为土体的基质势与其含水量是呈正比的, 亦即基质势越大, 其相应的含水量也越大。以试件底部为重力势能零基准面, 向上为正, 则土体中任一点水的重力势能均是正值; 基质势则为负值, 用负水头表示。随着土体中水分高度的降低, 其重力势能必定减小, 因而基质势也应相应的增大, 才能在土体中与重力势能达到平衡。因此, 随着试件高度的减小, 土柱中的含水量是逐渐增大的。

基于上述等温状态下土体的水分迁移试验, 测得了终态时刻土柱含水量沿试样高度的分布; 但由于土柱尺寸的限制, 至试验结束时毛细水仍在继续上升, 无法获得毛细水上升稳定后土柱含水量沿高度的分布, 故后面利用灰色理论预测模型 GM(1,1) 对毛细上升高度范围内土柱的含水量进行预测。

## 2 毛细上升高度范围内土柱含水量分布预测

GM(1,1) 模型是灰色系统理论中应用最广泛的一种灰色动态预测模型, 该模型由一个单变量的一阶微分方程构成。它主要用于复杂系统某一主导因素特征值的拟合和预测, 以揭示主导因素变化规律和未来发展变化态势。GM(1,1) 模型的一般形式如下:

(1) 微分方程

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = u \quad (1)$$

式中:  $a$  称发展系数, 反映发展态势;  $u$  称灰作用量, 起始点或截矩。

(2) 时间响应方程

$$\hat{x}^{(1)}(t) = \left[ x^{(1)}(0) - \frac{u}{a} \right] e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (t = 0, 1, 2, \dots, n)$$
 (2)

将前面等温过程土体水分迁移试验终态时刻土柱 60 cm 高度范围内的实测数据序列代入《灰色系统理论及其应用》(第三版) 自带软件中<sup>[13]</sup>, 得到如下 GM(1,1) 模型:

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + 0.046\,615x^{(1)}(t) = 75.026\,784$$
 (3)

误差检验表见表 2.

表 2 误差检验表

Tab. 2 The error checking

Height	Analogue value	Residual error / %	Relative error / %
10	70.312 637	4.112 637	6.212 443
15	67.110 233	-0.289 767	-0.429 921
20	64.053 685	0.353 685	0.555 235
25	61.136 348	-0.763 652	-1.233 687
30	58.351 880	-2.048 120	-3.390 927
35	55.694 233	-7.705 767	-12.154 207
40	53.157 627	3.157 627	6.315 254
45	50.736 554	-3.463 446	-6.390 122
50	48.425 747	2.425 747	5.273 363
55	46.220 186	-1.579 814	-3.305 050
60	44.115 080	6.115 080	16.092 316

注: 平均相对误差为 5.577 502 %

依据该模型, 分别计算出了 65~150 cm 处的体积含水量, 结合试验测得的 5~60 cm 范围内的体积含水量值, 可以获得 5~150 cm 范围内体积含水量沿试样高度的分布图, 如图 6 所示.

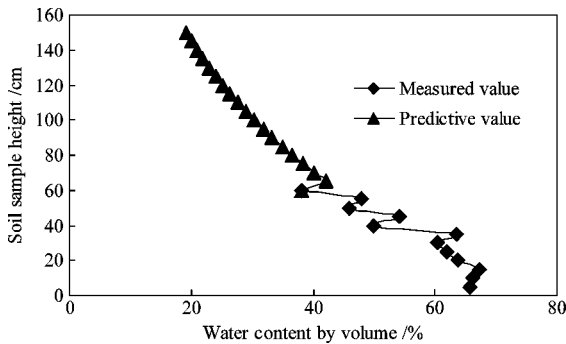


图 6 终态时刻土柱含水量沿试样高度的分布图

Fig. 6 Final water content distribution along the sample height

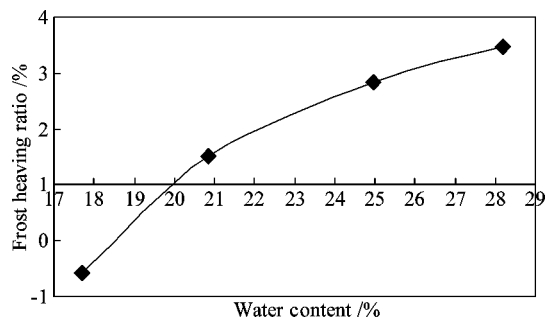


图 7 粘质黄土冻胀系数与含水量之间的关系曲线

Fig. 7 Relation curve between frost heaving ratio with water content of clayey loess

### 3 粘质黄土室内冻胀敏感性

#### 试验资料分析

由室内冻胀敏感性试验的研究成果<sup>[14]</sup>, 东北粘质黄土冻胀系数  $\eta$  与含水量  $W$  之间的关系如图 7 所示.

由《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JTJ118—98)对土冻胀性的分级, 并结合图 7, 可以得到  $\eta \leq 1$

亦即不冻胀界限质量含水量约为 20.0%。

#### 4 粘质黄土有害毛细上升高度的确定

对于东北粘质黄土,由上面的分析可以知道,当  $\eta \leq 1$  时即不冻胀界限质量含水量为 20.0%,水分迁移试验中土样的干密度为  $1.35 \text{ g/cm}^3$ ,其所对应的体积含水量为 27.0%。结合图 6,可以确定有害的毛细上升高度,见图 8。

由图 8 可以求得粘质黄土的有害毛细上升高度约为 1.12 m。基于此,针对粘质黄土,其不产生冻胀距离地下水位的最小高度  $h$  可以用下面的式子求得:

$$h = h_f + h_m \quad (4)$$

式中: $h_f$  为某一地区的最大冻深,长春地区  $h_f$  取为 1.8 m; $h_m$  为有害毛细上升高度。

因此,要保证长春地区粘质黄土不发生冻胀,其距离地下水位的最小距离  $h$  约为 2.92 m。

#### 5 结 论

(1)对沈哈高速铁路沿线粘质黄土进行等温过程水分迁移的试验研究揭示出,随着时间的推移,湿润锋面由底部逐渐向上迁移,含水量也由试件的底部向顶部逐渐减小,试验结束时土柱中的含水量基本表现出由底部向顶部逐渐减小的趋势。

(2)基于等温过程土体水分迁移试验终态时刻土体体积含水量沿试样高度的分布,利用灰色理论预测模型 GM(1,1)并结合室内冻胀敏感性试验资料确定出了东北粘质黄土的有害毛细上升高度约为 1.12 m。在此基础之上,结合长春地区的最大冻深资料,计算出要保证粘质黄土不产生冻胀,其距离地下水位的最小高度约为 2.92 m。

#### 参考文献 References

- [1] 党进谦,李 靖. 含水量对非饱和黄土强度的影响 [J]. 西北农业大学学报, 1996, 24(1): 56-60.  
DANG Jin-qian, LI Jing. Study on strength of loess considering water content effect [J]. ACTA Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis, 1996, 24(1): 56-60.
- [2] 刘巍然,高江平. 压实黄土路基中水分迁移的数值模拟 [J]. 长安大学学报:自然科学版, 2006, 26(4): 5-7.  
LIU Wei-ran, GAO Jiang-ping. Numerical modelling on water migration in loess subgrade [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(4): 5-7.
- [3] 邵生俊,龙吉勇,杨 生,等. 湿陷性黄土结构性变形特性分析 [J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1668-1672.  
SHAO Sheng-jun, LONG Ji-yong, YANG Sheng, et al. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1668-1672.
- [4] 王铁行,岳彩坤,鲁 洁,等. 连续降雨条件下黄土路基水分场数值分析 [J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2007, 39(5): 593-597.  
WANG Tie-hang, YUE Cai-kun, LU Jie, et al. Numerical analysis on moisture migration in loess subgrade under rainfall [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2007, 39(5): 593-597.
- [5] 郑秀清,樊贵盛,赵生义. 水分在季节性冻土中的运动 [J]. 太原理工大学学报, 1998, 29(1): 62-65.  
ZHENG Xiu-qing, FAN Gui-sheng, ZHAO Sheng-yi. Water movement in seasonal unsaturated frozen soil [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29(1): 62-65.
- [6] 张树光,屈小民. 非等温条件下道路水分迁移的数值模拟 [J]. 岩土力学, 2004, 25(增 2): 231-234.

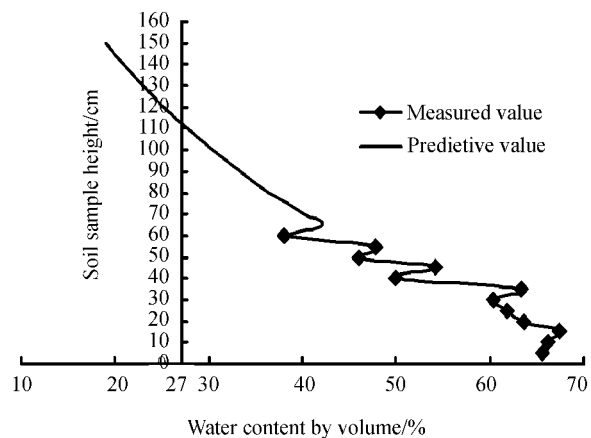


图 8 东北粘质黄土有害毛细上升高度

Fig. 8 Effect height of frost damage for clayey loess in Northeast China

- ZHANG Shu-guang, QU Xiao-min. Numerical simulation of moisture migration in roadway under condition of transient temperature [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(S2): 231-234.
- [7] YOSHISUKE N, ALLEN T. Transport of water in frozen soil [J]. *Effects of temperature* [J]. *Advances in Water Resources*, 1987, 10(1): 44-50.
- [8] YOSHISUKE N, ALLEN T. Transport of water due to a temperature gradient in unsaturated frozen clay [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1990, 18(1): 57-75.
- [9] SALLY A S, SUSAN R B. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: modeling and large scale experiments [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 1997, 25(2): 33-45.
- [10] WANG T H, SU L J. Experimental study on moisture migration in unsaturated loess under effect of temperature [J]. *Journal of Cold Regions Engineering*, 2010, 24(3): 77-86.
- [11] 童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.  
TONG Chang-jiang, GUAN Feng-nian. The frost heave of soil and controlling of frost damage to buildings [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1985.
- [12] 李建宇, 刘建坤, 孙继彪. 包兰线路基土冻胀特性试验分析[J]. *铁道建筑*, 2007, 47(12): 72-74.  
LI Jian-yu, LIU Jian-kun, SUN Ji-biao. Experimental analysis on frost heaving property of Baotou to Lanzhou railway subgrade [J]. *Railway Engineering*, 2007, 47(12): 72-74.
- [13] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng. Theory and application of grey system [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [14] 许 健, 牛富俊, 牛永红, 等. 重塑粘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.  
XU Jian, NIU Fu-jun, NIU Yong-hong, et al. Experimental analysis of frost susceptibility for remolded clayey loess [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2010, 32(1): 24-30.

## Forecast on the effect height of frost damage of clayey loess in Northeast China

XU Jian<sup>1, 2</sup>, NIU Fu-jun<sup>2</sup>, NIU Yong-hong<sup>2</sup>, HOU Zhong-jie<sup>3</sup>

- (1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
3. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China )

**Abstract:** A moisture migration test on the unsaturated clayey loess along Shenyang-Harbin Express Railway was carried out to investigate the water movement of soil in an open system with constant temperature conditions. The experimental results show that over time the soakage side gradually rises and the water content by volume gradually decreases from the bottom to the top of the specimen. In addition, the final water content basically decreases from the bottom to the top. Furthermore, based on the final water content with the sample height, the effect height of frost damage of clayey loess in Northeast China is about 1.12 m by grey forecast model GM(1,1) and experimental data of frost susceptibility. Then this height is used to compute the critical height of clayey loess to avoid the frost damage considering the maximum frozen depth around Changchun City. The computed critical height is about 2.92 m.

**Key words:** clayey loess; water content; moisture migration; effect height of frost damage

---

\*Biography: XU Jian, Ph. D., Lecturer, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-18709228865, E-mail: xujian@lzb.ac.cn