

冬季温度对浅层黄土水分场的影响研究

张 辉,王铁行,罗 扬

(西安建筑科技大学土木工程学院,陕西 西安 710055)

摘 要:通过季节冻土区现场测试浅层黄土温度和含水量的变化,研究了冬季温度对浅层黄土水分场影响的变化规律.测试得出:随着地表温度的降低,冻结锋面向下移动,冻土层含水量越来越大,冻土层下方未冻土含水量明显降低.建立了模拟现场的水热耦合数值计算模型,并计算了彬县的水分场变化,计算结果和实测基本吻合,验证了该计算模型及参数选取的合理性,该计算模型可用于模拟黄土高原地区冬季浅层黄土水分迁移.

关键词:季节冻土区;浅层黄土;水分场;数值分析

中图分类号:TU 445

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2013)06-0842-05

随着西部大开发战略的实施,黄土高原地区建筑、道路、隧道、桥梁等工程建设事业蓬勃发展,这些工程项目大多修建在浅层黄土之上.黄土地区大多属于季节冻土区,受自然因素影响浅层土温度场和水分场随季节变化,特别是冬季冻结作用下水分向冻结土层迁移而使含水量重新分布,含水量增大随之抗剪强度降低,由此导致黄土高原边坡、路基、岸坡出现溜方、滑塌、剥落等工程病害频发^[1-5],也影响农业发展和山川绿化事业^[6].因此不少学者对浅层土温度和水分迁移进行了研究,张冬青^[7]等对吉林季节冻土区高速公路路基含水状况与冻害进行了调查研究;王铁行^[8]等以西安为例对浅层黄土温度场进行了数值分析;张喜发^[9]等研究了季节冻土区高速公路路基中的水分迁移变化规律,并指出这是引起道路冻害的主要因素;周德源^[10]通过现场监测研究了河套灌区季节冻土水分迁移规律.目前对于黄土高原地区冬季冻结作用下温度和水分迁移变化规律多集中在室内试验,现场试验研究尚少,基于此,本文通过现场测试研究黄土地区地表土冬季温度场和水分场的变化规律,并进行数值计算分析.

1 温度对水分场影响的现场测试研究

1.1 现场场地概况

现场测试以彬县、铜川、洛川各地各取一个测试点,彬县和铜川测试点在平整场地,洛川测试点在阴坡坡脚.场地浅层土为粉质粘土,黄褐色,地下水位较深,其基本物理参数如表 1.

1.2 测试方法

预先在土层 1 m 范围内每隔 10 cm 埋设温度传感器,适时测不同深度处的温度,传感器精度为 0.1 °C.图 1 为现场读温度数据.在测试点旁边挖探坑取不同深度处土样进行含水量和密度试验,以便研究浅层土含水量的变化规律.测试时间从 2011 年 12 月 10 日开始到 2012 年 3 月 10 日.

1.3 现场测试结果及分析

按照测试方案,得到彬县,洛川,铜川三个地方冬季浅层黄土温度场和水分场测试结果如图 2 和图 3 所示.

表 1 基本物理指标

Tab. 1 Basic physical index

| 地点 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 |
|----|-------|-------|-------|
| 洛川 | 30.74 | 18.03 | 12.74 |
| 铜川 | 29.71 | 17.75 | 11.96 |
| 彬县 | 30.9 | 18.1 | 12.8 |



图 1 现场温度测试

Fig. 1 Testing temperature

收稿日期:2013-06-08 修改稿日期:2013-12-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078309,51208409)

作者简介:张 辉(1986-),男,陕西大荔人,博士研究生,主要从事黄土及冻土工程理论及实践研究.

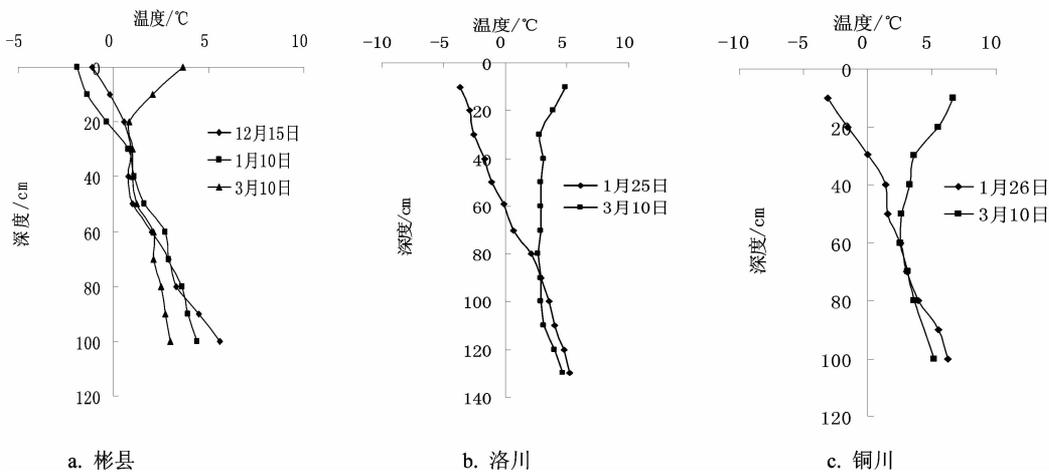


图 2 不同地点浅层黄土温度随时间的变化

Fig. 2 Temperature variation of shallow loess with time in different locations

从图 2 中可以看出该场地在冬季随着时间推移地表土温度降低,冻土深度越来越大,彬县在 1 月 10 日冻深为 26 cm,洛川 1 月 25 日冻深 61 cm,铜川 1 月 26 日冻深 28 cm. 到 3 月 10 号,气温已经回升到正温,表层土温度上升,已没有冻土,但是彬县 50 cm 以下,洛川 90 cm 以下,铜川 60 cm 以下较深处温度反而降低,这是由于随着气候逐渐变暖,地表土体由表及里热传导过程的滞后性造成的。

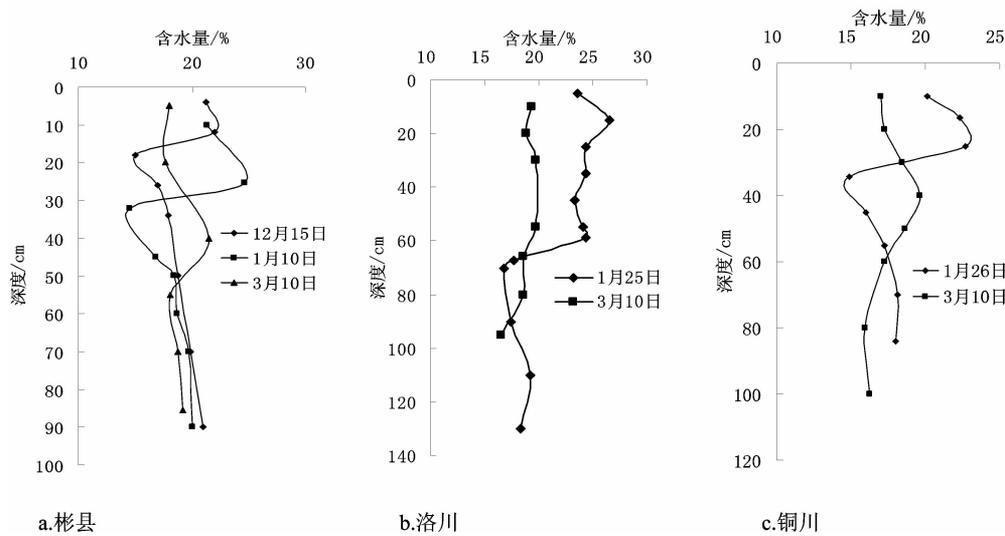


图 3 不同地点浅层黄土含水量随深度的变化

Fig. 3 Water content of shallow loess with time in different locations

对照图 2 和图 3 可以看出,三个测试点冻土层含水量均明显增大,冻土层下方未冻土含水量明显降低;对照图 2(a)和图 3(a)中也可看出从 12 月 15 日到 1 月 10 日,地表温度降低,冻结锋面向下移动,冻土层厚度增加,冻土层整体含水量越来越大且冻结锋面的含水量也越来越大. 这是由于在冬季土体温度降到冰点以下时,在冻结锋面形成抽吸力,未冻区水分不断的向冻结锋面迁移,使冻结区含水量增大;更深处未冻土的水分在温度梯度和水分差影响下向上迁移,但迁移速度较慢来不及向上补给而造成邻近冻结区的未冻土中含水量减小. 从图 4 中可明显的看出地表冻土层中含有大量的冰晶颗粒,含水量较高. 到 3 月浅层土温度升高融化后,原来冻土层范围的水分一部分向下入渗,一部分向上蒸发. 由于蒸发量不同,浅层土含水量分布也不同,彬县和铜川比洛川蒸发量小,因此如图 3(a)和(c)中 3 月 10 日曲线

所示彬县和铜川测试点原冻结土层含水量减小,原冻结层以下30 cm左右含水量增大,由于洛川蒸发量大,导致图3(b)中融化下渗的水分大多都蒸发,所以冻结层下方曲线没有明显增大的现象.测试的三个地点中洛川的冻土层最厚,水分迁移量最大,铜川最小,分析主要原因是三个地点同属渭北旱塬地区,引起温度场差别的主要因素是气温,气温越低冻土层越厚,相应的分水迁移量越大.

2 冬季浅层黄土水热耦合数值计算

气候因素如辐射、蒸发、湿度、风速等随时间是变化的,受此影响,浅层黄土温度场属非稳态相变温度场,其基本方程如(1)式

$$\left\{ [K] + \frac{[N]}{\Delta t} \right\} \{T\}_t = \{P\}_t + \frac{[N]}{\Delta t} \{T\}_{t-\Delta t} \quad (1)$$

式中:[K]为温度刚度矩阵;[N]为非稳态变温矩阵;{T}为温度值的列向量; Δt 为时间步长,{P}为合成列阵,下标 t 表示时间.采用等参四边形单元,刚度矩阵和变温矩阵参数确定见(2)式、(3)式.

$$k_{l,n} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\lambda}{16|J|} \left(D_2 \frac{\partial H_n}{\partial \xi} + D_1 \frac{\partial H_n}{\partial \eta} \right) d\xi d\eta + A\alpha s \quad (l,n=i,j,k,m) \quad (2)$$

$$n_{l,n} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho C_p |J| H_l H_n d\xi d\eta + A\alpha s \quad (l,n=i,j,k,m) \quad (3)$$

式中: i,j,k,m 为单元节点; λ 为导热系数; ρC_p 为容积比热容;|J|、 D_1 、 D_2 、 H 都是积分基点坐标(ξ, η)的函数,并与节点坐标有关; α 为对流换热系数; s 为换热边界长; A 对非第三类边界取0,对第三类边界, l 等于 n 时, A 取1/3, l 不等于 n 时 A 取1/6.

列阵{P}是综合考虑相变、辐射、对流、蒸发的边界条件列阵,按式(4)计算.

$$\{P\} = \{P_1\} + \{P_2\} + \{P_3\} + \{P_4\} \quad (4)$$

地表边界太阳辐射量、蒸发量、气温、风速等根据彬县地区气象资料取值.文献^[11]测试了不同干密度和含水量的非饱和黄土导热系数和比热容,通过拟合得到了确定黄土导热系数和比热容的关系式:

$$\lambda = (4.17\omega^2 + 1504) 10^{0.25\rho_d^{-3.9}} \quad (5)$$

$$C = \rho_d (1.27 + 0.021\omega) 10^3 \quad (6)$$

式中: λ 为土体的导热系数, W/(m·°C); C 为土体的比热容, J/(kg·°C); ρ_d 为干密度, g/cm³; ω 为土体含水量.

冬季浅层黄土在冻结作用下水分迁移是非稳态的,其有限元方程为

$$([D] + \frac{[E]}{\Delta t}) \{h\}_{t+\Delta t} = \frac{[E]}{\Delta t} \{h\}_t + \{F\} \quad (7)$$

式中:[D]为刚度矩阵;{F}为反映边界条件的流量矢量列阵;[E]为容量矩阵;{h}为水头列阵; Δt 为时间步长.水头列阵按式(6)计算:

$$h = h_g + h_u + h_c \quad (8)$$

式中 h_u 根据已有文献^[12]按式(7)计算,参数取值参考文献^[12]:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |ah|^n]^m} \quad (9)$$

相变界面水头与土体密度和含水量有关,其表达式采用笔者自己根据室内冻结黄土水分迁移试验得到的研究结论

$$h_c = 0.00025e^{6.4\rho_d} (1 - 0.5S_r) \quad (10)$$

式中: h_c 为相变界面水头, m; ρ_d 为干密度, g/cm³; S_r 饱和度.

其它水热参数根据非饱和黄土文献^[13-14]确定.



图4 地表冻土层的冻土

Fig. 4 Frozen soil of shallow ground

水热耦合计算过程就是将式(1)、(7)两个控制方程进行耦合,对每一个时间步,导热系数、比热容、相变潜热、水头等水热参数均不采用定值,首先根据初始含水量,由式(1)计算该时间步长的温度场,然后根据得到的温度场由式(7)进行水分迁移的计算,收敛后进入下一个时间步,水热参数均采用上一个时间步计算结果,以此类推计算.水热耦合计算采用迭代法,为了改进收敛性能,在两次迭代之间用矩阵消元法直接求解,再用低松弛因子来确定下次迭代值,迭代值按下式修正:

$$\bar{T}^{(i)} = \omega T^{(i)} + (1 - \omega) \bar{T}^{(i-1)} \quad (11)$$

$$\bar{h}^{(i)} = \omega h^{(i)} + (1 - \omega) \bar{h}^{(i-1)} \quad (12)$$

式中: $\bar{T}^{(i-1)}$ 、 $\bar{h}^{(i-1)}$ 为第*i*次代入迭代值; $\bar{T}^{(i)}$ 、 $\bar{h}^{(i)}$ 为新值进行下次迭代; ω 为松弛因子,采用低松弛迭代,取 $\omega < 1$,并根据根据迭代次数不断调整 ω 值,直到计算结果满足精度为止.

根据上述思路,用fortran语言建立有限元计算软件,以12月10日的土体温度和含水量作为已知条件,采用水热耦合计算1月10日的含水量,计算结果如图5所示.从图中可以看出计算值与实测值基本吻合,验证了该数值计算方法的合理性,同时也证明了由室内试验得出的相变界面水头表达式(10)应用于现场也是可行的.

3 结 论

通过季节冻土区现场测试浅层黄土温度和含水量的变化,研究了冬季浅层黄土温度对水分场影响的变化规律.测试得出:随着地表温度的降低,冻结锋面向下移动,冻土层厚度增加,冻土层含水量越来越大,冻土层下方未冻土含水量明显降低.建立了模拟现场的水热耦合数值计算模型,并计算了彬县的水分场变化,计算结果和实测基本吻合,验证了该计算模型及参数选取的合理性,可用于模拟黄土高原地区冬季浅层黄土水分迁移.

参考文献 References

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
XIE Ding-yi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] SHOOP Sally A, BIGL Susan R. Moisture migration during freeze and thaw of unsaturated soils: Modeling and large scale experiments [J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25(1): 33-45.
- [3] 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. Effect of Water Content on the Strength of Unsaturated Loess. [J]. ACTA Univ. Agric. Boreali-occidentalis, 1996, 24(1): 56-60.
- [4] 王铁行. 非饱和黄土路基水分场的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(1): 41-45.
WANG Tie-hang. Moisture migration in unsaturated loess subgrade [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(1): 41-45.
- [5] 张苏民, 郑建国. 湿陷性黄土(Q3)增湿变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990(12): 21-33.
ZHANG Su-min, ZHENG Jian-guo. The Deformation Characteristics of Collapsible Loess during Moistening process [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990(12): 21-33.
- [6] 徐敦祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin. Frozen soil physics [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [7] 张冬青, 张喜发, 辛德刚, 等. 季节冻土区高速公路路基含水状况与冻害调查[J]. 公路, 2004(2): 140-146.
ZHANG Dong-qing, ZHANG Xi-fa, XIN De-gang, et al.. Investigation on Frost Damage and Water-Bearing Condition of Expressway Subgrade in Seasonally Frozen Soil Region [J]. Highway, 2004(2): 140-146.
- [8] 王铁行, 刘自成, 岳彩坤. 浅层黄土温度场数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(4): 463-467.

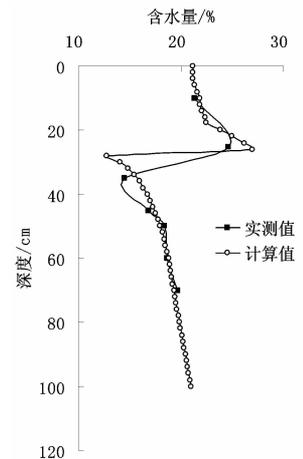


图5 数值计算结果

Fig. 5 The results of numerical calculation

- WANG Tie-hang, LIU Zi-cheng, YUE Cai-kun. Thermal regime in shallow soil strata in loess plateau[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Natural Science Edition, 2007, 39(4):463-467.
- [9] 张喜发, 辛德刚, 张冬青, 等. 季节冻土区高速公路路基中的水分迁移变化[J]. 冰川冻土, 2004, 26(4):454-460.
ZHANG Xi-fa, XIN De-gang, ZHANG Dong-qing, et al.. Water Migration and Variation in the Subgrade Soils of Express way in Seasonally Frozen Ground Regions[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(4):454-460.
- [10] 周德源. 河套灌区季节冻土水分迁移规律[J]. 内蒙古水利, 1994(1):27-30.
ZHOU Deyuan. Seasonal frozen soil moisture migration rules in Hetao irrigation area [J]. Inner Mongolia Water Resources, 1994(1):27-30.
- [11] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4):655-658.
WANG Tie-hang, LIU Zi-cheng, LU Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4):655-658.
- [12] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1):1-5.
WANG Tie-hang, LU Jing, YUE Cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1):1-5.
- [13] 王铁行, 卢靖, 张建峰. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11):2364-2368.
WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study on permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11):2364-2368.
- [14] 王铁行, 胡长顺. 多年冻土地地区路基温度场和水分迁移场耦合问题研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(12):93-97.
WANG Tie-hang, HU Chang-shun. Study on the problem of coupled temperature field and moisture migration field of subgrade permafrost region[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(12):93-97.

Influence of winter temperatures on water field in shallow loess

ZHANG Hui, WANG Tie-hang, LUO Yang

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Through field test temperature and water content of shallow loess in seasonal frozen ground, the changing rules of the influence of winter temperatures on water field in shallow loess is studied. Testing results show that with the decrease of surface temperature, the freezing front move downward. Then the water content of frozen soil zone increases and reduces significantly below the frozen soil zone. The water-thermal coupling numerical model for simulating field is established and the water field changing of Binxian County calculated. The numerical result is in agreement with the test data. It shows that the calculation model and parameter selection is reasonable. The model can be used to simulate water migration of shallow loess in Loess Plateau in winter.

Key words: seasonal frozen ground; shallow loess; water field; numerical analysis