

冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究

王铁行^{1,2}, 王娟娟¹, 张龙党¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部建筑科技国家重点实验室(筹), 陕西 西安 710055)

摘 要:首先自制了冻结作用导致水分迁移的试验装置,采用未设置格栅试验装置得到了液态水和气态水混合迁移结果,采用设置格栅试验装置得到了阻断液态水迁移通道情况下水分迁移结果.试验结果表明,土样密度、含水量、时间对冻结作用导致的水分迁移进程均有影响.冻结过程冻结锋面的推进使冻结区域含水量明显增大,未冻结区域含水量明显减小,冻结锋面处含水量增加最大.相对于未冻结区域水分迁移进程,水分向冻结锋面的迁移是比较缓慢的.干密度较小土样冻结区域含水量增加值小于干密度较大土样,干密度大,冻结锋面处的含水量增量相对较少.初始含水量越大,冻结锋面土体含水量增加值越大,并形成冰层.随着时间增加,冻结锋面处的含水量增加,但后期含水量随时间的增加值明显小于前期,在冻结锋面冰层形成初期,未冻结区域水分向冻结锋面迁移量大,冰层形成以后水分迁移量小,当土样初始含水量比较小时,设置格栅阻断液态水通道对冻结作用导致的水分迁移进程影响不大,向冻结锋面迁移水量主要来源于气态水迁移.当土样初始含水量比较大时,和混合迁移试验结果相比较,设置格栅阻断液态水迁移通道后向冻结锋面迁移水量明显减小.

关键词:黄土;含水量;水分迁移;冻结;密度

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)01-0007-07

我国黄土高原面积约64万平方公里,区域广阔,受干旱半干旱气候条件影响,该区域浅层黄土基本上处于非饱和状态.随着西部大开发战略的实施,黄土高原工程规模日益扩大,道路工程、水利工程等大多处于浅层非饱和黄土之上,边坡、岸坡等工程的主体也是浅层非饱和黄土,浅层非饱和黄土的工程性质事关工程成败.浅层黄土直接暴露于大自然,自然因素对土体物理力学性质产生影响,夏秋雨水入渗使土体含水量增加,冬季土层冻结使水分向冻结界面富集.由于抗剪强度主要由含水量来决定,随着含水量的增加,抗剪强度降低,由此导致的工程病害频发.本文主要考虑冻结作用的影响,冬季土层冻结驱使水分向冻结界面迁移,使冻结界面附近含水量增加甚至形成冰层,易导致工程冻胀病害,春季融化后在冻结界面出现高含水量层,易导致边坡、岸坡出现溜方、滑塌等病害.对此病害问题工程界给予高度重视,已有多位研究者通过试验揭示了冻结作用驱使水分向冻结界面迁移的现象.但冻结作用如何驱使水分迁移尚需进一步研究,土体密度、含水量、时间如何影响水分迁移进程?液态水迁移和气态水迁移分别对水分迁移进程的影响如何?这些问题尚需明确,也是本文研究的主要内容.

1 试验装置及土样

试验用非饱和黄土土样取自西安市北郊某基坑,土样呈黄褐色,液限30.2%,塑限17.8%,塑性指数12.4.为了满足本次试验需要,首先自制了试验装置,如图1所示.图1(a)为非饱和黄土水分混合迁移试验装置,试验时不区分液态水和气态水迁移结果,实测得到总的水分迁移结果.试验土样为长度30 cm、直径7.5 cm的圆柱形土样,四周包裹绝

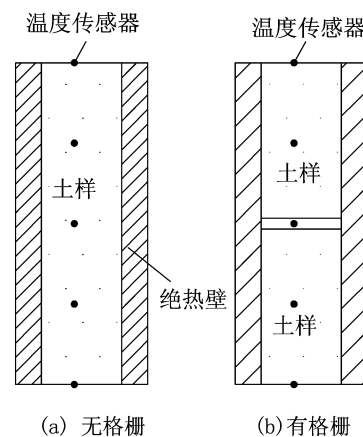


图1 试验装置

Fig. 1 Test device

收稿日期:2009-11-25 修改稿日期:2011-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50678144)

作者简介:王铁行(1968-),男,陕西富平人,教授,主要从事黄土、冻土工程领域研究工作.

热材料,保证土样沿轴向单向导热,土样顶面和底面为温度控制端,底面(以下称为冷端)控制为负温使土样冻结,顶面控制为正温。试验时配制不同密度、不同含水量土样若干个,测定每个土样经历不同冻结时间的水分分布进而探讨水分向冻结界面迁移情况。图1(b)为设置格栅的非饱和黄土水分迁移试验装置,该试验装置与前述水分混合迁移试验装置和试验方法基本相同,区别在于中间设置了间隔为1 cm的格栅,设置格栅的目的是阻断液态水迁移通道,只允许气态水通过,将采用此试验装置的水分迁移结果与未设格栅的混合迁移结果进行对比分析,便可分析液态水迁移和气态水迁移对水分迁移进程的影响。试验时,土样底面和顶面温度分别控制为 -10°C 和 19°C ,并在土样中每隔7.5 cm埋设温度传感器,测试土样温度的分布。

试验时共配制10个土样进行试验,土样见表1。表中,土样1—5用于水分混合迁移试验,土样6—10用于设置格栅的水分迁移试验。

表1 试验土样

Tab. 1 Test soil sample

试样编号	含水量 $w/\%$	干密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	冻结时间/d
1,6	13.60	1.28	7
2,7	13.60	1.40	7
3,8	20.80	1.28	7
4,9	20.80	1.40	7
5,10	20.80	1.40	14

2 冻结作用下水分迁移试验结果及分析

试验结果如图2~6所示,分别给出了温度分布和含水量分布。从图中可以看出,在土样冷端施加负温后,一定长度的土样冻结,冻结区域含水量明显增大,未冻结区域含水量明显减小,冻结锋面处含水量增加最大。在土样冷端施加负温后,冻结锋面自外向里逐渐推进,直至现有冻结锋面。由于未冻结区域水分向冻结锋面迁移,在冻结锋面推进过程中,导致现有冻结区域含水量明显增大。因此,冻结区域含水量增大是未冻结区域水分向冻结锋面迁移的结果,并不代表水分向冻结区域内迁移。在未冻结区域,土样含水量减小,几乎是均匀分布的。这表明,相对于未冻结区域水分迁移进程,水分向冻结锋面的迁移是比较缓慢的。未冻结区域水分向冻结锋面发生迁移后,其在未冻结区域引起水分差异,导致未冻结区域内发生水分迁移,并迅速使未冻结区域水分趋于均布。

图2、3为相同初始含水量不同干密度土样的试验结果。由图可以看出,干密度对土样含水量的变化以及冻结锋面的位置有一定影响。在含水量一定情况下,干密度越大,单位体积土体含水质量越大,冻结时释放热量越大,延缓冻结锋面推进进程。但干密度越大,导热越快,将加速冻结锋面推进进程。此二者相互制约,对冻结锋面推进的影响需由试验结果确定。试验结果表现为干密度越大,冻结锋面推进慢,冻结区域较小,反之,干密度越小,冻结锋面推进快,冻结区域越大。冻结锋面推进越快,冻结区域含水量增加越小,图中干密度较小时土样冻结区域含水量增加值小于干密度较大土样。当土样中温度达到稳态分布后,冻结锋面位置不再变化,锋面处的含水量也随干密度的不同而不同,干密度大,锋面处的含水量相对较少,干密度小,锋面处的含水量相对较大。

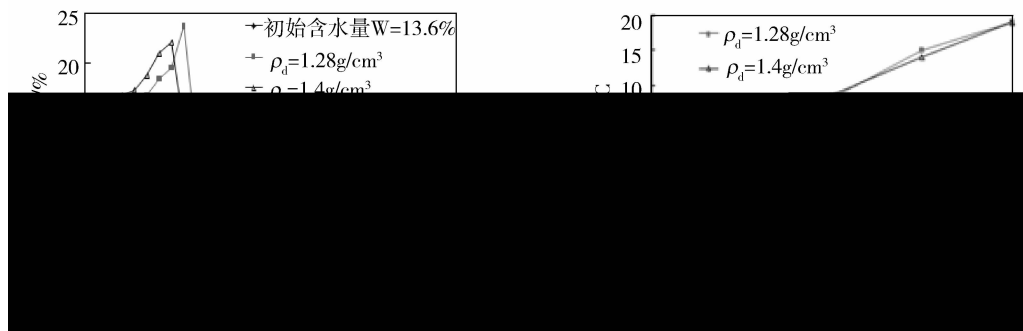


图2 初始含水量13.6%土样冻结7 d含水量和温度分布

Fig. 2 The initial water content of 13.6% soil moisture and temperature distribution of frozen 7 d

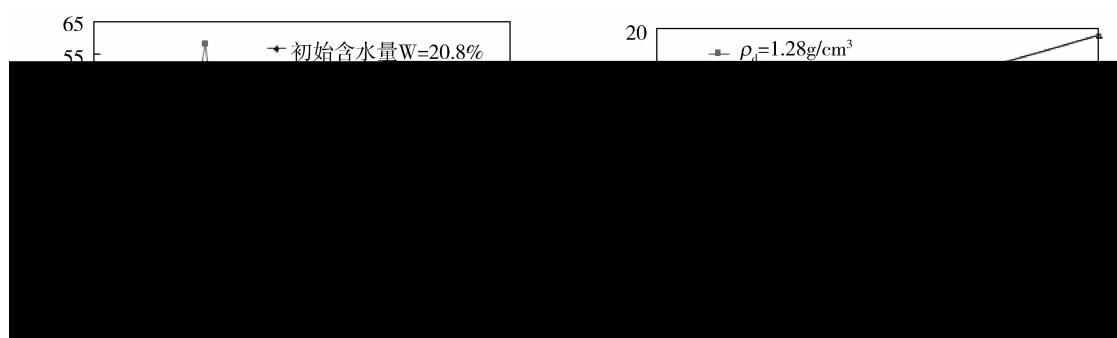


图 3 初始含水量 20.8% 土样冻结 7 d 含水量和温度分布

Fig. 3 The initial water content of 20.8% soil moisture and temperature distribution of frozen 7 d

图 4、5 为相同干密度不同初始含水量土样的试验结果. 由图可以看出, 初始含水量对土样含水量的变化有影响, 但对冻结锋面位置影响不大. 在干密度一定情况下, 初始含水量越大, 冻结锋面土体含水量增加值越大. 当初始含水量较大时, 冻结锋面处土体含水量已经远超过饱和含水量, 此处有冰层存在. 试验过程中, 在密度较大土样冻结锋面处肉眼发现有明显的冰层, 而含水量较低的土样中未见明显的冰层. 在干密度一定情况下, 土体含水量越大, 冻结时释放热量越大, 延缓冻结锋面推进进程. 但含水量越大, 导热越快, 将加速冻结锋面推进进程. 试验结果表明此二者几乎相互抵消, 初始含水量对冻结锋面位置影响不大.

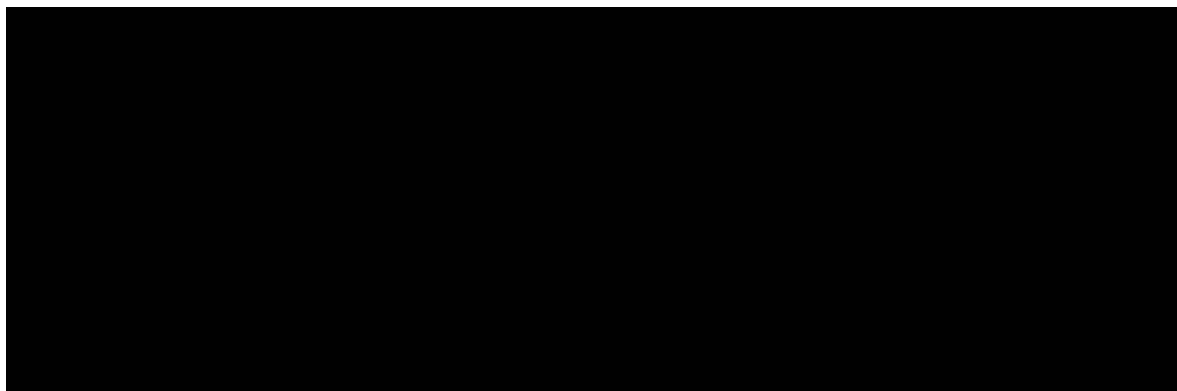


图 4 干密度 1.28 g/cm³ 土样冻结 7 d 含水量和温度分布

Fig. 4 Dry density of 1.28 g/cm³ soil moisture and temperature distribution of frozen 7 d

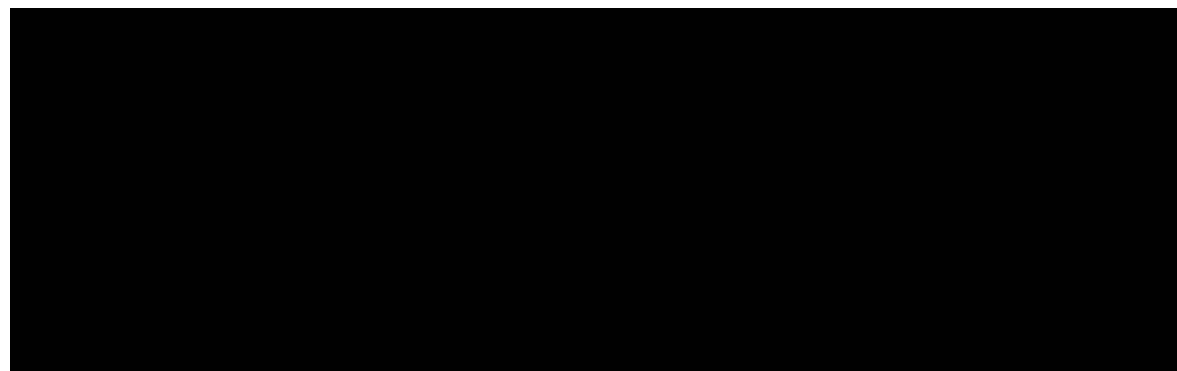


图 5 干密度 1.40 g/cm³ 土样冻结 7 d 含水量和温度分布

Fig. 5 Dry density of 1.40 g/cm³ soil moisture and temperature distribution of frozen 7 d

图 6 是不同冻结时间水分迁移试验结果. 从图中可以看出, 在土样干密度、初始含水量一定情况

下,当温度达到稳态分布,冻结锋面稳定后,随着时间增加,冻结锋面处的含水量(含冰量)增加,但后期含水量随时间的增加值明显小于前期,说明在冻结锋面冰层形成初期,未冻结区域水分向冻结锋面迁移量大,冰层形成以后水分迁移量小.由图还可以看出,冻结锋面稳定后,冻结区域土样含水量随时间变化很小,但土样未冻结区域含水量随时间稍有不同,时间长的土样含水量稍低于时间短的土样含水量,这主要是一定冻结梯度下,随着时间的增长,土样未冻结区域水分向冻结锋面迁移且迁移量增加,引起土样未冻结区域含水量随时间的增长而减少.

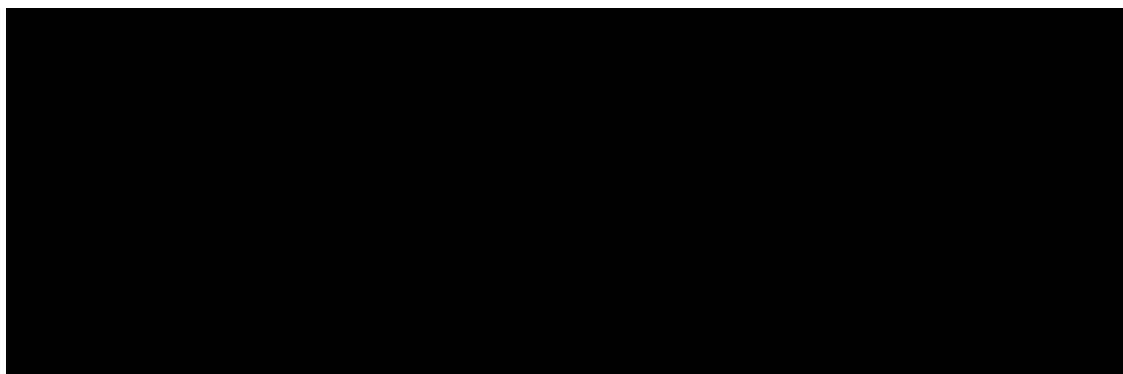


图6 不同冻结时间含水量和温度分布

Fig. 6 Water content and temperature distribution at different freezing time

进一步配制不同密度、不同初始含水量土样并设置格栅进行试验研究,格栅的设置阻断了液态水迁移通道,试验结果如图7—11所示.试验结果表明,在设置格栅情况下,土样密度、含水量、时间对冻结作用导致的水分迁移进程均有影响.在初始含水量一定情况下,干密度越大,冻结区域较小,反之亦然,干密度较小时土样冻结区域含水量增加值小于干密度较大土样.干密度大,锋面处的含水量相对较小,干密度小,锋面处的含水量相对较大.在干密度一定情况下,初始含水量越大,冻结锋面土体含水量增加值越大.初始含水量对冻结锋面位置影响不大.当冻结锋面稳定后,随着时间增加,冻结锋面处的含水量(含冰量)增加,但后期含水量随时间的增加值明显小于前期,在冻结锋面冰层形成初期,未冻结区域水分向冻结锋面迁移量大,冰层形成以后水分迁移量小.冻结锋面稳定后,冻结区域土样含水量随时间变化很小.可见,无论是否设置格栅,土样密度、含水量、时间对冻结作用导致的水分迁移进程的影响规律是相同的.

图7 初始含水量13.6%土样冻结7 d
含水量分布

Fig. 7 The initial water content of 13.6% soil
moisture distribution of frozen 7 d

图8 初始含水量20.8%土样冻结7 d
含水量分布

Fig. 8 The initial water content of 20.8% soil
moisture distribution of frozen 7 d

图 9 干密度 1.28 g/cm^3 土样冻结 7 d
含水量分布

Fig. 9 Dry density of 1.28 g/cm^3 soil
moisture distribution of frozen 7 d

图 10 干密度 1.40 g/cm^3 土样冻结 7 d
含水量分布

Fig. 10 Dry density of 1.40 g/cm^3 soil
moisture distribution of frozen 7 d

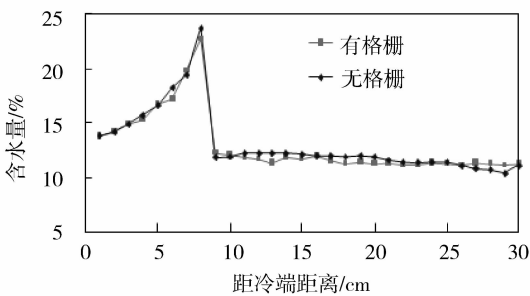
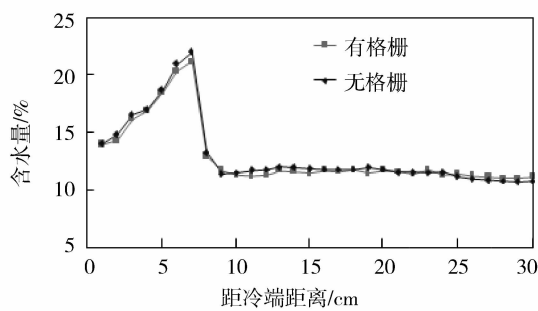


图 11 不同冻结时间含水量分布
Fig. 11 Water content distribution
at different freezing time

图 12 $W=13.6\%$ 、 $\rho_d=1.28\text{ g/cm}^3$
土样冻结 7 d 水分分布
Fig. 12 $W=13.6\%$ 、 $\rho_d=1.28\text{ g/cm}^3$
soil moisture distribution of frozen 7 d

为了便于比较,图 12-16 给出了水分混合迁移和设置格栅水分迁移的对比试验结果.从图 12-13 可以看出,当土样初始含水量比较小时,混合迁移试验结果和设置格栅水分迁移试验结果几乎是相同的,表明格栅阻断液态水通道对冻结作用导致的水分迁移进程影响不大.此时,通过格栅的气态水迁移量与混合迁移水量几乎相同,说明低含水量下气态水迁移现象是显著的,向冻结锋面迁移水量主要来源于气态水迁移.

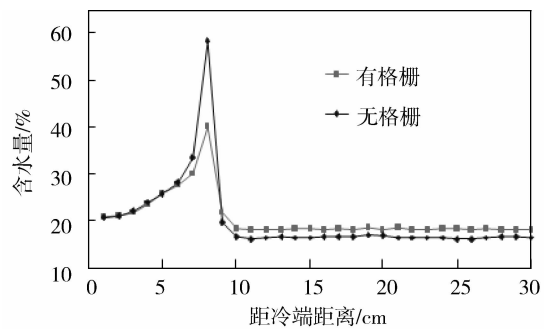
图 14-15 显示出,当土样初始含水量比较大时,混合迁移试验结果和设置格栅水分迁移试验结果是不同的,和混合迁移试验结果相比较,设置格栅阻断液态水迁移通道后向冻结锋面迁移水量明显减小,表明格栅阻断液态水通道对冻结作用导致的水分迁移进程影响较大.试验过程也揭示出,和混合迁移结果相比较,设置格栅后冻结锋面处的含冰量明显减少.比较图 15 和图 16 可以发现,虽然混合迁移冻结锋面处含水增量大于设置格栅时的含水增量,但无论是否设置格栅,冻结锋面处含水增量均随时间的增加而增加.

图 13 $W=13.6\%$ 、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$

土样冻结 7 d 水分分布

Fig. 13 $W=13.6\%$ 、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$

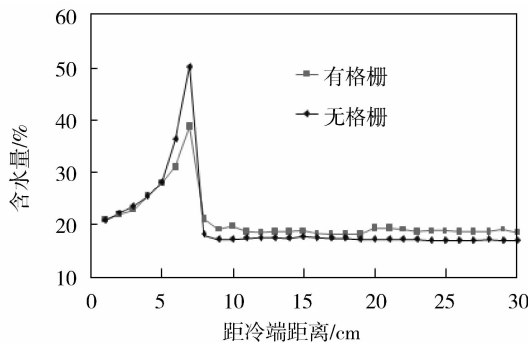
soil moisture distribution of frozen 7 d

图 14 $W=20.8\%$ 、 $\rho_d=1.28 \text{ g/cm}^3$

土样冻结 7 d 水分分布

Fig. 14 $W=20.8\%$ 、 $\rho_d=1.28 \text{ g/cm}^3$

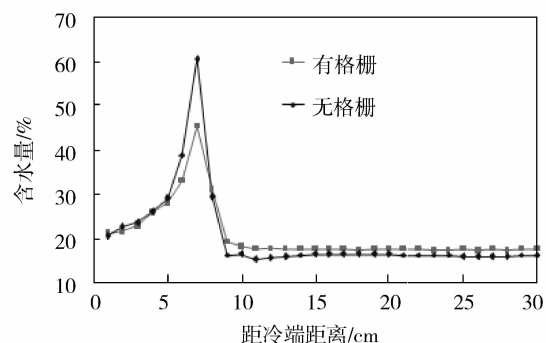
soil moisture distribution of frozen 7 d

图 15 $W=20.8\%$ 、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$

土样冻结 7 d 水分分布

Fig. 15 $W=20.8\%$ 、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$

soil moisture distribution of frozen 7 d

图 16 $W=20.8\%$ 、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$

土样冻结 14 d 水分分布

Fig. 16 $W=20.8\%$ 、 $\rho_d=1.40 \text{ g/cm}^3$

soil moisture distribution of frozen 14 d

3 结 语

首先自制了冻结作用导致水分迁移的试验装置,采用未设置格栅试验装置得到了液态水和气态水混合迁移结果,采用设置格栅试验装置得到了阻断液态水迁移通道情况下水分迁移结果.试验结果揭示出,冻结过程冻结锋面的推进使冻结区域含水量明显增大,未冻结区域含水量明显减小,冻结锋面处含水量增加最大.相对于未冻结区域水分迁移进程,水分向冻结锋面的迁移是比较缓慢的.干密度较小时土样冻结区域含水量增加值小于干密度较大土样,干密度大,冻结锋面处的含水量增量相对较少.初始含水量越大,冻结锋面土体含水量增加值越大,有冰层存在.随着时间增加,冻结锋面处的含水量(含冰量)增加,但后期含水量随时间的增加值明显小于前期,在冻结锋面冰层形成初期,未冻结区域水分向冻结锋面迁移量大,冰层形成以后水分迁移量小.当土样初始含水量比较小时,混合迁移试验结果和设置格栅水分迁移试验结果几乎是相同的,表明格栅阻断液态水通道对冻结作用导致的水分迁移进程影响不大,向冻结锋面迁移水量主要来源于气态水迁移.当土样初始含水量比较大时,和混合迁移试验结果相比较,设置格栅阻断液态水迁移通道后向冻结锋面迁移水量明显减小.

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 S A, BIGL S 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] 李述训, 程国栋, 刘继民. 兰州黄土在冻融过程中水热输运实验研究[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 319-324.
LI Shu-xun, CHENG Guo-dong, LIU Ji-min. Experimental study on heat moisture transfer in lanzhou loess during freezing thawing processes[J]. Frozen Soil Engineering, 1996, 18(4): 319-324.
- [4] NASCAR I N, HORTON R, GLOBUS A M. Thermally induced water transfer in salinized unsaturated soil[J]. Soil Science Society of American Journal, 1997, 61(6): 1293-1298.
- [5] HEITMAN J L, HORTON R, REN T. A test of coupled soil heat and water transfer prediction under transient boundary temperatures[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(5): 1197-1207.
- [6] 邵生俊, 龙吉勇, 杨生. 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. Analysis of structural deformation properties of collapsible loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1668-1672.
- [7] 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 Universitatis Agriculture Boreau-occidentalis, 1996, 24(1): 56-60.
- [8] KOK H, MCCool D K. Quantifying freeze/thaw-induced variability of soil strength[J]. Transactions of the ASAE, 1990, 33(2): 501-506.
- [9] 宋春霞, 齐吉琳, 刘奉银. 冻融作用对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 1077-1080.
SONG Chun-xia, QI Ji-lin, LIU Feng-yin. Influence of freeze-thaw on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 1077-1080.
- [10] 张引科, 杨林德, 咎会萍. 非饱和土的结构强度[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2003, 35(1): 33-36.
ZHANG Yin-ke, YANG Li-De, JI Hui-Ping. The structural strength of unsaturated soil[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2003, 35(1): 33-36.
- [11] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1081-1084.
WANG Tie-hang, LU Hai-hong. Moisture migration in unsaturated loess considering temperature effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1081-1084.
- [12] 李 宁, 程国栋, 徐学祖. 冻土力学的研究进展与思考[J]. 力学进展, 2001, 31(1): 95-102.
LI Ning, CHENG Guo-dong, XU Xue-zu. The advance and review on frozen soil mechanics[J]. Advances In Mechanics, 2001, 31(1): 95-102.
- [13] 王铁行, 岳彩坤, 鲁洁. 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. 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.
- [14] 吴青柏, 沈永平, 施斌. 青藏高原冻土及水热过程与寒区生态环境的关系[J]. 冰川冻土, 2003, 25(3): 250-255.
WU Qing-bai, SHEN Yong-ping, SHI Bin. Relationship between frozen soil together with Its water-heat process and ecological environment in the tibetan plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(3): 250-255.

Study on classification of sulfate saling soil the highway engineering

LIANG Jun-long^{1,2}, GAO Jiang-ping²

(1. Highway school, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Jiangxi Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330025, China)

Abstract: The identification and classification with indicators for saline soil has much influence on formulating the engineering measures. Therefore, choosing reasonable indications to reflect the engineering properties of saline soil is very important. This paper makes a start with the study on the salt heaving characteristics of sulfate saline soil and the melt sinking rules of chlorate saline soil, analyzing water, salt, mechanics and temperature impact on the engineering properties of saline soil. According to the levels of distress the degrees of saline soil is divided and the dividing value of influencing factors is determined. With the investigation of the highway distress characteristics in typical saline soil area and the summarization of the relevantly experimental study on the indoor engineering properties and field test, summarizing and analyzing of the classifications date for the saline soil are carried out. With the study and close connection with the construction of highway production practices, for the first time a systematically a comprehensive system of saline soil highway engineering classification with indicators of salinity, salt content, water content and temperature is established, which exert influence on saline soil engineering properties.

Key words: sulfate saline soil; saline soil; engineering classification

Biography: LIANG Jun-long, Candidate for Ph. D., Xi'an 710064, P. R. China, Tel:0086-15870608125, E-mail:liangjunlonghappy@163.com

(上接第 13 页)

Experimental research on moisture migration in freezing unsaturated loess

WANG Tie-hang^{1,2}, WANG Juan-juan¹, ZHANG Long-dang¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State key Laboratory of Architecture Science and Technology in west China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: The test equipment is designed for measuring moisture migration in freezing unsaturated loess, using the equipment with no grill the liquid water and vapor water mixed migration results is obtained, and using the equipment with grill the moisture migration results is obtained in situation the liquid water migration channel has been blocked. Freezing the frontal advancement causes water content to increase obviously in frozen region, and freezing frontal water content increases in a big way. Opposite to moisture migration in warm region, the moisture migration to the freeze frontal area is quite slow. The increase in water content frozen region of small density loess is smaller than with the big density loess, and the freeze frontal water content increase in big density loess is relatively smaller than in small density loess. Whese initial water content is bigger, the freeze frontal water content increase in value is bigger, so is the ice layer existence. The freeze frontal water content increase along with the time in later period is smaller than earlier period. When the initial water content in loess is quite small, the mixed migration results and the establishment grill water migration results is nearly the same. This indicates that the grill blocking the liquid water migration pass has no advancement influence on moisture migration in freezing loess. When the initial water content is quite big, in comparison with the mixed migration test result, the grill is established to block the liquid water migration channel backward freeze frontal area migration water volume from reducing obviously.

Key words: loess; water content; moisture migration; freeze; density

Biography: WANG Tie-hang, Professor, Xi'an 710055 P. R. China, Tel:0086-13709208202, E-mial:1273620386@qq.com