

# 干旱地区黄土包气带水分分布规律

张仁义, 顾强康, 王乐凡, 姜 乐, 李 婉, 苏立海

(空军工程大学 机场建筑工程系, 陕西 西安 710038)

**摘 要:**为了研究干旱地区黄土土基包气带内水分分布状态,依据非饱和渗流理论,研究了干旱地区黄土土基包气带内水分分布规律,得出了水分分布的理论规律,并用 3 个工程的实测数据验证了该理论规律。研究表明:干旱地区降雨量少且大气蒸发能力强,地下水位埋深超过 6 m 时,土基中水分分布可近似处于稳定状态;非饱和渗流理论分析结果表明,正常毛细水带高度等于土基的进气值,包气带内土基的饱和度  $S$  与深度  $z$  呈幂指数关系;干旱地区的 3 个黄土工程实测值与包气带水分分布规律吻合度高,相关系数达到 0.821~0.981,包气带水分分布规律适用于黄土原状土基和填土土基;依据 3 个工程实例得到水分分布规律参数  $\alpha$  和  $\beta$  值, $\alpha$  在 3.40~5.13 m 之间, $\beta$  在 -1.32~-1.08 之间;研究成果能为干旱地区土基水分分布规律的进一步研究与黄土强度变形参数测试时含水量控制提供参考依据。

**关键词:**道路工程;黄土;水分分布;包气带;非饱和土;饱和度;土-水特征曲线

**中图分类号:**U416.1

**文献标志码:**A

## Moisture distribution of aeration zone of loess in arid region

ZHANG Ren-yi, GU Qiang-kang, WANG Le-fan, JIANG Le, LI Wan, SU Li-hai

(Department of Airdrome Construction Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China)

**Abstract:** The moisture distribution in the aeration zone of loess in arid region was studied based on the seepage theory of unsaturated soil and was validated by three field tests. The results show that the moisture distribution can be considered as being in the nearly steady state when the groundwater depth is more than 6 meters due to the large evaporation and little rainfall in aeration zone. The height of normal capillary water zone is equal to the air-enter value of subgrade, and the relationship between saturation and depth of subgrade in the aeration zone can be expressed as exponential approximation. The test data from field test are consistent with the moisture distribution in the aeration zone, and the correlation coefficient is 0.821-0.981, which reveals that the obtained moisture distribution in the aeration zone can be used for undisturbed and remolded loess. The value of parameter  $\alpha$  is between 3.40 and 5.13 meter, and the value of parameter  $\beta$  is between -1.32 and -1.08. The conclusion in this paper can provide some reference for further research on the moisture distribution and the moisture controlling of the strength and modulus test of loess in arid area. 1 tab, 4 figs, 13 refs.

**Key words:** road engineering; loess; moisture distribution; aeration zone; unsaturated loess; saturation ratio; SWCC

## 0 引言

含水量是土基强度和模量的重要影响因素,自然条件下,大气蒸发降水、地下水和非饱和特性等因素使得土基一般处于非饱和状态。将非饱和土基当成整体来研究承载能力、变形和边坡稳定性问题时,为了使土基强度和变形参数能够反映土基的真实非饱和工作状态,需要对参数测试时的含水量进行控制。目前土基强度和变形参数测试一般在最优含水量条件下测得,而土基不一定在最优含水量条件下工作。为了解决土基强度和变形参数测试和土基实际工作状态之间的矛盾,需要对土基中水分分布规律进行研究。

近年来国内外学者在路基的抗水毁能力、非饱和参数测试和非饱和渗流场等方面取得了许多有益的成果<sup>[1-2]</sup>。目前关于地基水分分布规律研究大致有 3 类方法:其一是定性分析,许兆义用不等径葫芦状毛管网络模型表征土基中孔隙,定性分析了地下水之上土基水分分布状态<sup>[3]</sup>;其二是数学解析,针对地下水埋深较浅时土基的水分分布规律问题,雷志栋等得出了 4 种特殊情况的解析解<sup>[4]</sup>;其三是有限元计算,黄世奇等通过有限元计算,分别分析了降雨、大气蒸发和地下水埋深对粉土土基含水率分布的影响<sup>[5]</sup>。但是,现有土基水分分布的定性和定量研究未能很好地兼顾确定性、通用性和简易性。

为此,本文基于潜水蒸发方面的已有试验成果,首先依据非饱和土渗流理论讨论土基水分分布的理论规律,然后以干旱地区黄土工程实例对水分分布理论规律进行验证,重点研究黄土包气带中水分分布的一般规律。

## 1 问题描述与基本假定

### 1.1 问题描述

自然条件下,地下水位维持不变时,土基的含水量剖面如图 1 所示。

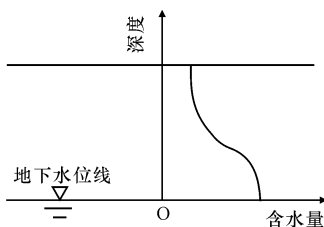


图 1 含水量剖面

Fig. 1 Water content section plane

任意深度  $z$  的水分通量  $q$  与该截面的非饱和渗透系数  $K(\theta)$  和基质吸力  $\psi$  密切相关,由非饱和土达

西定律可知三者的关系为

$$q = K(\theta) \frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} \quad (1)$$

边界条件为

$$\psi = 0, z = 0 \quad (2)$$

### 1.2 基本假定

依据式(1)分析土基中的水分分布规律,需要在以下 2 个方面辅以假定。

#### 1.2.1 关于土-水特征曲线

与数学解析和有限元计算方法一样,讨论非饱和土基的水分分布规律,先要确定土基的土-水特征曲线,这样才能使整个问题能够求解。

Fredlund、VG 和 Brooks & Corey 等常用模型能够很好地描述室内试验测定土-水特征曲线。自然状态下,土基密度和性质等因素的不均一使得土基的土-水特性曲线难以精确描述,故不计干湿循环特性,假定自然土基的土-水特征曲线满足式(3)和式(4)所示的简洁形式,即

$$S = 1, \psi(S) \leq \alpha \quad (3)$$

$$\psi(S) = \alpha S^\beta, \psi(S) > \alpha \quad (4)$$

式中: $S$  为饱和度; $\alpha$  为进气值; $\beta$  为土-水特征曲线的形状参数。

#### 1.2.2 关于水分通量 $q$

在自然状态下,地表的蒸发和降雨入渗会引起土基中存在不为 0 的水分通量  $q$ ,而水分通量  $q$  增加了式(1)求解难度。

在西北干旱地区,大气的蒸发能力强,降雨量小,雨水入渗到土基中有限深度后会很快蒸发,土基长期处于蒸发状态。在蒸发状态下,大气蒸发是土基中存在水分通量  $q$  的最主要原因,而且大气蒸发所需的水量必然由地下水补充,故潜水蒸发量能间接反映出土基中水分通量  $q$  的大小。

前苏联阿维里扬诺夫认为地下水埋深超过一定深度后潜水停止蒸发<sup>[6]</sup>;付秋萍等建议潜水停止蒸发深度的确定,以蒸发强度小于  $0.1 \text{ mm/d}^{[7]}$ ;黄梦琪等试验研究年水面蒸发量为  $1\,203.25 \text{ mm}$  的宝鸡峡灌区中土壤潜水蒸发问题<sup>[8]</sup>;来剑斌等对年水面蒸发量为  $2\,400 \text{ mm}$  的渭干河灌区的重壤、中壤、轻壤、沙壤、细沙和砂石土的潜水蒸发进行了试验研究<sup>[9]</sup>;周金龙等分析了新疆 7 个场区内多种土的年潜水蒸发系数<sup>[10]</sup>。以上试验成果表明,潜水蒸发量随着地下水埋深增加而减小,地下水位埋深为  $4 \sim 6 \text{ m}$  时多种土质的年潜水蒸发量仅几毫米到几十毫米之间。

在西北干旱地区,地下水埋深超过  $6 \text{ m}$  时,土基中的年潜水蒸发很小,据此认为地基中水分通量

$q$  很小。基于潜水蒸发试验结果,假定在干旱地区地下水埋深超过 6 m 时,土基中水分通量  $q$  为 0,此项假定是将土基水分分布近似看做处于稳定状态,忽略蒸发对土基水分分布的影响。

## 2 土基中水分分布规律理论分析

### 2.1 正常毛细水带高度理论分析

地下水位之上正常毛细水带内土基几乎完全饱和,故其渗透系数为饱和渗透系数  $K_s$ ,且其范围内任意截面水分通量  $q$  为常量,由式(1)有

$$\frac{\partial(\phi-z)}{\partial z} = \frac{q}{K_s} \quad (5)$$

结合边界条件得正常毛细水带基质吸力  $\phi$  与  $z$  的关系为

$$\phi = \left( \frac{q}{K_s} + 1 \right) z \quad (6)$$

$\phi$  仅与土体的饱和度相关,故正常毛细水带的顶面土体的基质吸力为进气值  $\alpha$ ,正常毛细水带的高度  $h$  为

$$h = \frac{\alpha}{(q/K_s) + 1} \quad (7)$$

式(7)表明正常毛细水带高度与水分通量  $q$ 、饱和渗透系数  $K_s$  和进气值  $\alpha$  有关。当蒸发时  $q \geq 0$ ,正常毛细水带高度小于进气值;当入渗时  $q < 0$ ,正常毛细水带高度大于进气值。

由水分通量  $q=0$  的假定,有正常毛细水带饱和度  $S$  与深度  $z$  的关系

$$S=1, z \leq \alpha \quad (8)$$

土中孔隙由直径不等的孔隙组成,当孔隙水的重力不足以克服最大直径的孔隙对应的表面张力作用时,孔隙中水分不会被排出,土基会处于完全饱和状态。在  $q=0$  时,进气值对应正常毛细水带高度这一结论可由稳定含水量剖面测定土-水特征曲线的方法证明。

### 2.2 包气带水分分布规律理论分析

正常毛细水带之上的毛细悬挂水带和毛细网状水带统称为包气带<sup>[11]</sup>。由水分通量  $q=0$  的假定,可知土基任意截面的水分分布不随时间变化,因非饱和渗透系数  $K(\theta)$  不为 0,故式(1)可简化为

$$\frac{\partial(\phi-z)}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

式(9)积分后,结合式(2)边界条件可得

$$\phi = z \quad (10)$$

将式(4)代入式(10)有

$$\alpha S^\beta = z, z > \alpha \quad (11)$$

包气带土基的饱和度  $S$  与  $z$  的关系为

$$S = \left( \frac{z}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}}, z > \alpha \quad (12)$$

为了与地质勘察的习惯保持一致,以地面为原点、向下为深度  $z$  的正方向建立新坐标,需增加未知参数  $H$  表征地下水埋深。在新坐标系下,包气带饱和度和  $S$  与深度  $z$  关系为

$$S = \left( \frac{H-z}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}}, H-z > \alpha \quad (13)$$

在新坐标下,正常毛细水带饱和度  $S$  与深度  $z$  的关系为

$$S=1, H-z \leq \alpha \quad (14)$$

式(13)蕴含了式(14)中的正常毛细水带高度等于进气值这一结论。

## 3 工程实例验证

干旱地区地下水埋深超过 6 m 时,理论分析表明,土基的毛细水正常高度等于其近气值,包气带内土基的饱和度  $S$  与深度  $z$  呈幂指数关系。下面以 3 个干旱地区黄土工程实例对土基包气带内水分分布规律进行检验。

### 3.1 宁夏和平镇工程实例

黄雪峰等通过浸水试验分析了宁夏和平镇大厚度自重黄土场地湿陷特性<sup>[12-13]</sup>。在浸水试验场区内测得 6 处(分别为  $T_1, T_2, \dots, T_6$ ) 36 m 深度范围内含水分分布,已探明 36 m 深度范围内主要是粉土和粉质粘土,包气带水分分布实测与拟合结果如图 2 所示。

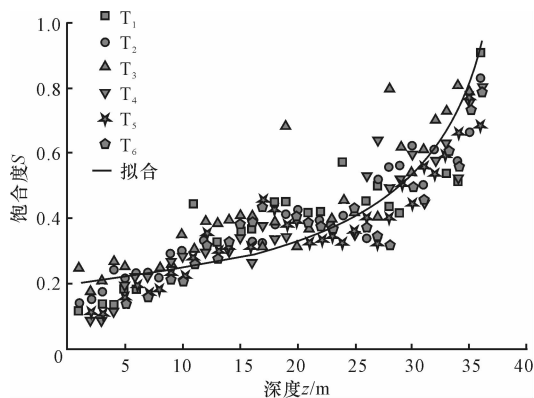


图2 和平镇工程实例

Fig. 2 Engineering example in Heping town

6 个探坑集中在浸水试验场区内,蒸发条件、地下水埋深、土基情况等基本相同,多点测试能够减少土工试验误差。拟合得到的地下水埋深  $H=41.50$  m,  $\alpha=5.13$  m,  $\beta=-1.30$ ,判定系数  $R^2=0.821$ ,实测与包气带水分分布规律的吻合性好。

### 3.2 宁夏固原机场工程实例验证

工程位于固原城区西北部,属于黄土残垣地貌。

固原地区年平均降雨量 439 mm,年蒸发量 1 300~2 100 mm。场区内土的塑限指数在 6~10 之间,为粘质粉土。该工程取样共计 133 处,限于篇幅,列举

取样深度分别为 16、20、25 m 的探坑,每类深度探坑各列举 3 个探坑实测数据进行拟合分析,图形拟合结果如图 3 所示,参数拟合结果如表 1 所示。

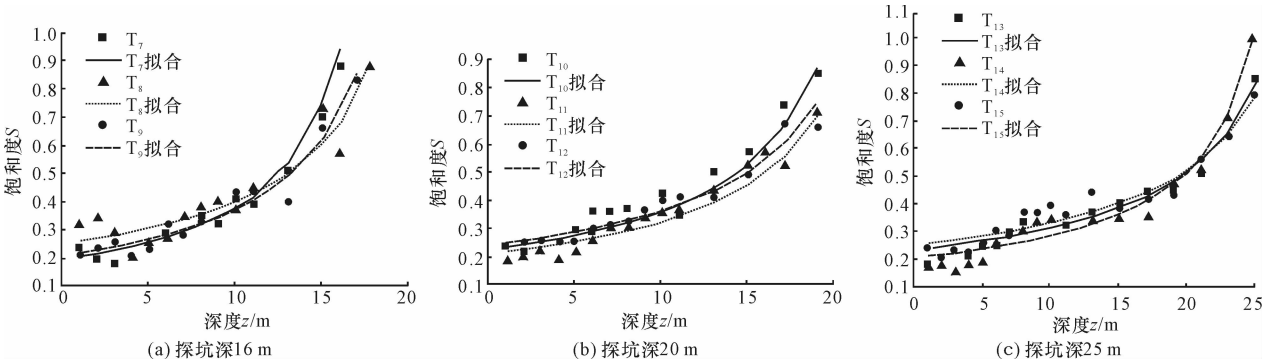


图 3 固原地区工程实例  
Fig. 3 Engineering examples in Guyuan

表 1 固原地区工程实例拟合参数

Tab. 1 Fitting parameters of engineering examples in Guyuan

编号	$H/\text{m}$	$\alpha/\text{m}$	$\beta$	$R^2$
$T_7$	19.74	3.41	-1.08	0.981
$T_8$	21.81	3.40	-1.35	0.888
$T_9$	22.18	4.33	-1.04	0.951
$T_{10}$	24.34	4.53	-1.11	0.927
$T_{11}$	25.45	4.21	-1.14	0.848
$T_{12}$	25.58	4.58	-1.19	0.914
$T_{13}$	30.27	4.09	-1.37	0.962
$T_{14}$	28.46	3.50	-1.32	0.956
$T_{15}$	31.49	4.60	-1.32	0.934

宁夏固原工程的实测值与本文规律拟合的判定系数在 0.848~0.981 之间,该工程支持本文得到的土基包气带水分分布规律。较之和平镇工程实例,所列举的固原地区工程实例 9 个探坑分布在更大的区域内,土基情况更为复杂,拟合结果进一步说明本文规律具有一定的普遍适用性。

3.3 陕西延安工程实例验证

延安地区高填土工程,黄土填土料为粉质粘土和粘质粉土,最大干密度在 1.83~1.87 g/cm<sup>3</sup> 之间,最优含水率在 12.8%~13.5%之间,按照 95%密实度控制填土压实质量。填土施工到一定高度后,为检验填土压实施工质量,人工挖孔取样进行室内土工试验,饱和度  $S$  与深度  $z$  实测与拟合结果如图 4 所示。

拟合判定系数为 0.860,延安地区工程实例与包气带水分分布规律吻合性好。宁夏和平镇和固原地区的工程实例都为原状黄土土基,延安地区工程实例说明本文规律也能适用于高密实度的黄土填土土基。

4 结 语

(1)西北干旱地区大气蒸发强、降雨量少,土基

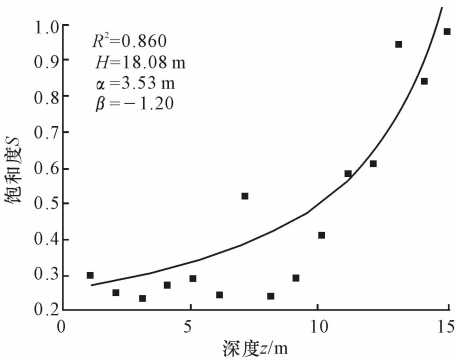


图 4 延安工程实例  
Fig. 4 Engineering example in Yanan

将长期处于蒸发状态。潜水蒸发的研究表明,当地下水埋深超过 6 m 时多种土质的潜水蒸发微弱,基于此假定土基中水分通量  $q=0$ 。通过非饱和渗流理论推导,认为干旱地区地下水埋深超过 6 m 时,正常毛细水带高度等于土基的进气值,得到了包气带土基饱和度  $S$  与深度  $z$  呈幂指数关系的水分分布理论规律。

(2)以西北干旱地区 3 个黄土工程实例检验了包气带内水分分布理论规律。拟合相关系数在 0.821~0.981 之间,本文得出的包气带水分分布规律在原状土土基和填土土基中都具有良好的适用性。3 个工程拟合得到的  $\alpha$  值在 3.40~5.13 m 之间, $\beta$  值在 -1.32~-1.08 之间。

(3)水分分布规律的研究不仅能够解决土基参数测试与实际工作状态之间的矛盾,还在盐渍土、膨胀土和冻土土基危害评价和处治等方面有一定的参考价值。

(4)3 个黄土工程实例从不同的角度支持了干旱地区黄土包气带饱和度  $S$  与深度  $z$  呈幂指数关系的水分分布规律,但还只能说明本文得到的为经验规

律,而本文水分分布规律中参数与土基的土-水特征曲线参数和地下水位埋深之间的关系尚待进一步的研究论证,适用性也有待更多的工程检验。

## 参考文献:

## References:

- [1] 赵法锁,戚 炜,王艳婷.三向应力及湿度状态改变对非饱和黄土力学特征的影响[J].地球科学与环境学报,2007,29(1):80-84.  
ZHAO Fa-suo, QI Wei, WANG Yan-ting. Influence of spherical stress and humidity state on mechanical property of unsaturated loess[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 80-84. (in Chinese)
- [2] 刘海松,倪万魁,杨泓全,等.黄土路基降雨入渗现场试验[J].地球科学与环境学报,2009,31(1):60-63.  
LIU Hai-song, NI Wan-kui, YANG Hong-quan, et al. Site test on infiltration of loess subgrade under rainfall circumstance[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2009, 31(1): 60-63. (in Chinese)
- [3] 许兆义.包气带的水分分布特征及给水度的探讨[J].长春地质学院学报,1986(3):89-94,62.  
XU Zhao-yi. Feature of moisture distribution in aeration zone and specific yield[J]. Journal of Changchun Geology Institute, 1986(3): 89-94, 62. (in Chinese)
- [4] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.  
LEI Zhi-dong, YANG Shi-xiu, XIE Sen-zhuan. Soil water dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988. (in Chinese)
- [5] 黄世奇,韩立志,穆 柯,等.基于非饱和渗流原理的粉土路基水份分布规律研究[J].公路交通科技,2011,28(12):57-61.  
HUAN Shi-qi, HAN Li-zhi, MU Ke, et al. Distribution of silty soil subgrade moisture content based on unsaturated seepage principle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(12): 57-61. (in Chinese)
- [6] 阿维里扬诺夫.防治灌溉土地盐渍化的水平排水设施[M].北京:中国工业出版社,1985.  
Aviriyandr. The horizontal drainage facilities for the prevention and control of soil salinization of irrigation [M]. Beijing: China Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [7] 付秋萍,张江辉,王全九.常用潜水蒸发经验公式在新疆地区适用性研究[J].干旱地区农业研究,2008,26(3):182-188.  
FU Qiu-ping, ZHANG Jiang-hui, WANG Quan-jiu. Adaptability study on empirical formulae of frequent

phreatic evaporation in Xinjiang[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2008, 26(3): 182-188. (in Chinese)

- [8] 黄梦琪,蔡焕杰,黄志辉.黄土地区不同埋深条件下潜水蒸发的研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(3):233-237.  
HUANG Meng-qi, CAI Huan-jie, HUANG Zhi-hui. Research on the evaporation of under-ground water in different burying depth conditions on the Loess area [J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2007, 35(3): 233-237. (in Chinese)
- [9] 来剑斌,王永平,蒋庆华,等.土壤质地对潜水蒸发的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2003,31(6):153-157.  
LAI Jian-bing, WANG Yong-ping, JIANG Qing-hua, et al. Study on phreatic evaporation under different soil textures[J]. Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition, 2003, 31(6): 153- 57. (in Chinese)
- [10] 周金龙,董新光,王 斌.新疆平原区潜水蒸发研究[J].工程勘察,2003(5):23-27.  
ZHOU Jing-long, DONG Xin-guang, WANG Bin. Research on the evaporation of under-ground water in Xinjiang[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003(5): 23-27. (in Chinese)
- [11] 王丽娟,王文科,王 哲,等.奎屯河流域包气带盐分分布特征与影响因素[J].地球科学与环境学报,2008,30(4):429-433.  
WANG Li-juan, WANG Wen-ke, WANG Zhe, et al. Distribution regularity and the formative factor soil salt of the Kuitun river basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(4): 429-433. (in Chinese)
- [12] 黄雪峰,刘长玲,姚志华,等.采用TDR水分计研究非饱和黄土入渗及自重湿陷变形规律[J].岩石力学与工程学报,2012,31(增1):3231-3238.  
HUAN Xue-feng, LIU Chang-ling, YAO Zhi-hua, et al. Study of infiltration and collapsible deformation law of unsaturated loess under over burden pressure by using TDR soil water probe[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 3231-3238. (in Chinese)
- [13] 姚志华,黄雪峰,陈正汉,等.兰州地区大厚度自重湿陷性黄土场地浸水试验综合观测研究[J].岩土工程学报,2012,34(1):65-74.  
YAO Zhi-hua, HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, et al. Comprehensive soaking tests on self-weight collapse loess with heavy section in Lanzhou region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(1): 65-74. (in Chinese)

