

文章编号:1671-8879(2006)04-0005-03

压实黄土路基中水分迁移的数值模拟

刘巍然¹, 高江平²

(1. 广东省公路建设有限公司, 广东 广州 510600;

2. 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:根据达西定律和质量守恒原理得到路基土中水分运动的基本方程,并以此方程作为黄土路基中水分迁移研究的理论基础。采用离心机法测定路基土的水分特征曲线,由土中水分再分布过程的原理,通过室内渗透试验得出路基土的导水参数;结合路基实测含水量来确定边界条件;应用有限元法对路基内的水分迁移规律进行数值模拟。结果表明,数值模拟结果与实测值吻合较好,能较准确地反映压实黄土路基土内的水分运动。

关键词:道路工程; 压实黄土; 路基; 水分迁移; 数值模拟

中图分类号:U416.169 **文献标识码:**A

Numerical modelling on water migration in loess subgrade

LIU Wei-ran¹, GAO Jiang-ping²

(1. Guangdong Provincial Highway Construction Company, Guangzhou 510600, Guangdong, China; 2. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: The basic equation for water flow in unsaturated soil is deduced with Darcy law and the conservative equation of mass. Taking this equation as the theory basis, the numerical modelling of water migration in loess subgrade is carried out. According to the redistribution of soil moisture, the soil water as migrating parameters are determined. The rule of the water migrating in subgrade is studied with finite element method, its numerical modelling results are given. It is found that the numerical modelling results are in accordance with the surveying results, it can accurately reflect the law of water migrating in compacted loess subgrade. 4 tabs, 1 fig, 6 refs.

Key words: road engineering; compacted loess; subgrade; water migration; numerical modelling

0 引言

近年来,随着中国交通事业的快速发展,越来越多的高速公路穿越黄土地区。路基沉陷、冲刷、翻浆、坍塌等病害,都不同程度地与地表水和地下水的侵蚀有关。水的作用使路基土的含水量增大、强度降低、稳定性下降,加剧了路基和路面结构的损害,加快了路面使用性能的破坏,缩短其使用寿命。但

对路基土中的水分迁移,目前还缺乏深入的研究,还不能确定当某种条件变化时水分迁移的规律,仅停留于定性的解释,理论计算还很不成熟,且基本局限于用差分法对一维问题进行探讨^[1-2]。本文通过一维土柱水分入渗试验,测定压实黄土路基平均湿度和湿润锋湿度的关系,计算出压实黄土导水率和扩散率,并应用有限元法对路基内的水分迁移规律进行数值模拟,分析压实黄土路基内水分迁移与压实

收稿日期:2005-04-20

作者简介:刘巍然(1973-),男,河南开封人,硕士。

度的规律。

1 基本原理

1.1 路基土中水分运动的基本方程

假定路基土的固相骨架不变形且水不可压缩,不考虑温度对路基土中水分迁移的影响,应用达西定律及质量守恒原理^[3],可得描述路基土中水运动的基本方程

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \times q \quad (1)$$

$$\text{即 } \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K_z(\theta) \frac{\partial \psi}{\partial z} \right] \quad (2)$$

式中: θ 为体积含水率; t 为时间; q 为水分运动通量。

设土壤为各向同性,则 $K_x(\theta) = K_y(\theta) = K_z(\theta) = K(\theta)$, $K(\theta)$ 为导水率。对于非饱和流动,总水势 ψ 由基质势 ψ_m 和重力势 ψ_g 组成。取单位重量土壤水分的水势,则 $\psi = \psi_m \pm z$,将此关系代入式(2),可得非饱和土中水运动的基本微分方程式

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right] \pm \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (3)$$

1.2 路基土中二维水分运动的基本方程

本文采用有限元法,结合路基工程的水分运动特性,压实黄土路基的水分迁移问题近似为在与路基轴线垂直的平面上的二维水分扩散的问题。定义非饱和土壤水的扩散率 $D(\theta)$ 为导水率 $K(\theta)$ 和比水容量 $C(\theta)$ 比值,即 $D(\theta) = K(\theta)/C(\theta) = K(\theta)/(d\theta/d\psi_m)$,此时的路基土中水分运动的基本方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} \quad (4)$$

2 压实黄土导水参数的测定

2.1 供试土壤

测试用的土壤为兰州黄土,在甘肃兰(州)海(石湾)高速公路的路基上现场取样,其颗粒组成如表1所示^[4]。

表1 黄土颗粒组成

粒组/ mm	各级颗粒(mm)含量百分数/%					
	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
含量/ %	0.001	3.470	29.650	16.220	10.710	39.940

2.2 试验方法

将风干土样过1mm的筛,放入烘干箱(105℃,8h)烘除吸湿水后,按规定压实度(80%、85%、91%)装入有机玻璃管中(圆管横截面积为22.5cm²,高40cm),把装好的土柱垂直放在实验台上。

按要求的水量给水,然后覆盖,防止蒸发。待管中水层刚消失时即开始记录湿润度和时间的关系。

每次试验设置4个重复,同时设10个重复土柱,这10个土柱给以不同的水量,待试验结束时,用以测定平均湿度和湿润锋湿度的关系。湿润锋湿度取4mm的干湿交界层测定。

2.3 试验结果

试验结果见表2、表3。

表2 导水率计算表 $10^{-5}(\text{cm}/\text{h})$

容积 含水量	压实度/%		
	80	85	91
0.45	2.50817×10^{-7}	2.24201×10^{-12}	6.05908×10^{-13}
0.41	1.70209×10^{-7}	1.43998×10^{-12}	3.04488×10^{-13}
0.35	8.80559×10^{-8}	6.78482×10^{-13}	9.45462×10^{-14}
0.30	4.63303×10^{-8}	3.25937×10^{-13}	3.02547×10^{-14}
0.26	2.55235×10^{-8}	1.65026×10^{-13}	1.05054×10^{-14}
0.22	1.27249×10^{-8}	7.45582×10^{-14}	3.05592×10^{-15}
0.18	5.51461×10^{-9}	2.87079×10^{-14}	6.93352×10^{-16}
0.14	1.93513×10^{-9}	8.68759×10^{-15}	1.08191×10^{-16}

表3 扩散率计算表 cm^2/h

容积 含水量	压实度/%		
	80	85	91
0.45	3.00306×10^{-7}	4.23705×10^{-13}	5.51672×10^{-14}
0.41	1.26534×10^{-7}	1.50658×10^{-13}	1.62296×10^{-14}
0.35	2.91192×10^{-8}	2.59844×10^{-14}	2.02834×10^{-15}
0.30	6.95887×10^{-9}	4.68902×10^{-15}	2.67439×10^{-16}
0.26	1.84261×10^{-9}	9.56656×10^{-16}	4.07741×10^{-17}
0.22	3.9058×10^{-10}	1.49582×10^{-16}	4.53748×10^{-18}
0.18	6.05884×10^{-11}	1.61002×10^{-17}	3.24606×10^{-19}
0.14	5.87216×10^{-12}	9.87364×10^{-19}	1.19348×10^{-20}

3 计算区域网格的划分及参数的选取

应用有限元法计算路基内的水分迁移时,首先对计算区域进行网格划分。结合路基横断面的形状,本文采用矩形单元和三角形单元相结合的网格划分方式^[5]。计算区域及网格的划分如图1所示。

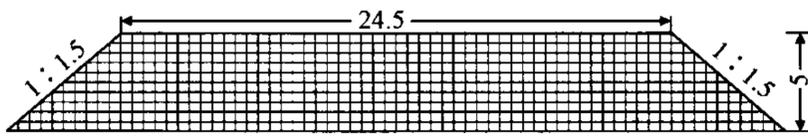


图 1 路基计算区域网格划分图(单位:m)

计算范围取至坡脚,深度取 5 m。

结合公路路基路面的结构形式,在计算过程中边界条件采用第一类边界条件,即边界的含水量已知。边界含水量的取值根据路基含水量的实测结果来确定,根据实测的结果取平均值。因此上边界含水量取 19.2%,左右边界取 21.2%,下边界取 24.5%。导水率和扩散率的取值采用室内的试验结果。计算过程中不考虑蒸发的作用。

4 数值模拟结果

本文的数值模拟结果是用长安大学自行开发的计算路基水分场的程序,结合本文所测定的压实黄土的导水参数,进行数值模拟,数值模拟结果与路基实测含水量结果见表 4。

表 4 数值模拟结果与路基实测含水量结果对比表

路基深度/cm	坡脚		边坡(中)		路肩		行车道	
	实测结果/%	数值模拟结果/%	实测结果/%	数值模拟结果/%	实测结果/%	数值模拟结果/%	实测结果/%	数值模拟结果/%
50	—	—	—	—	19.12	19.20	19.28	19.20
100	—	—	—	—	20.86	20.48	19.97	19.79
150	—	—	20.86	21.20	20.97	21.01	20.59	20.38
200	—	—	21.01	21.50	21.36	21.47	21.17	20.97
250	—	—	22.05	21.85	22.14	21.93	22.3	21.56
300	21.24	21.20	20.93	22.25	21.54	22.38	22.78	22.15
350	21.81	21.69	22.37	22.69	21.99	22.84	23.01	22.73
400	22.11	22.23	23.73	23.18	22.91	23.30	23.54	23.32
450	23.56	23.46	24.03	23.68	23.60	23.76	24.23	23.91
500	25.63	24.50	25.12	24.50	24.35	24.50	24.86	24.50

由表 4 可见,路基的含水量变化随深度的增加而逐渐变大;随着压实度的增加,水分扩散对路基内部含水量的变化影响很小,这点也与前面的导水参数的测定结果一致,但是个别点实测的结果与计算的结果差别较大,这是由于边界条件的不同,引起水分扩散的趋势也不同;另外,黄土性质的差异也会影响路基含水量的分布。路基含水量的分布可能受到水分入渗的影响,水量的分布是非稳定的,水分便继续向下迁移,使表层土中的含水量减小,下部土中的含水量变大。因此,在路基施工过程中严格控制路

基的压实度,尤其是路基表面和边坡的压实度,对防止外界水分向路基内部扩散有重要意义^[6]。

5 结 语

(1)利用离心机法可以测定压实黄土的水分特征曲线,得出了黄土在较大密实度下的导水参数。

(2)根据实测导水参数,采用有限元法对压实黄土路基内水分迁移规律进行数值模拟,从数值模拟结果看,数值模拟结果与实测值吻合较好,能较准确地反映压实黄土路基土内的水分运动。

(3)只要边界条件取值合理,采用有限元法可较好地模拟出压实黄土路基中水分迁移的实际情况。对于压实度较大的黄土路基的导水参数的测定还需要进一步的研究。

参考文献:

References:

[1] 王铁行. 多年冻土地地区路基计算原理及临界高度研究[D]. 西安: 长安大学, 2001.
WANG Tie-hang. Calculation theory and study of the marginal depth of road embankment in the long-term frozen soil region[D]. Xi'an: Chang'an University, 2001.

[2] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.
LIU Zu-dian. Loess mechanics and engineering[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997.

[3] 雷志栋. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
LEI Zhi-dong. Soil fluid dynamic mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.

[4] JTJ051-93. 公路土工试验规程[S].
JTJ051-93. Highway soil experiment specification[S].

[5] 李景湧. 有限元法[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 1999.
LI Jing-yong. Finite element method[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 1999.

[6] 沈波, 艾翠玲, 徐岳, 等. 公路路基压实黄土坡面人工降雨侵蚀试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 11-14.
SHEN Bo, AI Cui-ling, XU Yue, et al. Corrode test of highway impact loess roadbed slope surface with man-made rainfall[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 1-14.