

文章编号: 1000-7598 (2013) 11-3141-04

# 压实方式影响路基湿度场演变规律 相似模拟试验研究

柳志军

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘 要:** 探究路基湿度场演变规律是解决路基工程水损害的基础问题之一, 为研究路基湿度场受压实方式影响所产生的变化与分布问题, 在相似准则推导的基础上构建了 4 种具备不同压实方式的室内路基相似物理试验模型。通过分析二维入渗方式的降雨试验结果, 总结了不同压实方式影响下路床湿度场扰动区扩距、前扰动区湿度分布、湿度梯度和路堤湿度值变化的主要规律, 并阐述其作用机制以及提出了相关工程建议。研究表明: 路床湿度扰动区扩距随着路床压实度的增加呈线性递减; 整个湿度扰动区可划分为前、后两个区域, 前扰动区湿度分布基本呈线性速降状态, 湿度梯度值随着路床压实度的增加呈线性提高; 路床压实度对其下的路堤湿度影响效果显著, 综合效应表现为路堤湿度随路床压实度增加呈线性递减; 工程中严格控制上部路基压实效果对防止下部路基水毁病害有显著作用。

**关 键 词:** 压实方式; 路基; 湿度场; 演变规律; 相似模拟试验

中图分类号: TU 433

文献标识码: A

## Simulation test on evolutions of subgrade humidity field affected by compaction methods

LIU Zhi-jun

(State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, School of Mechanics & Civil Engineering,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** As one of the basic issues, the evolutions of humidity field must be studied to avoid roadbed water damage. To study changes and distributions of the subgrade humidity field affected by compaction methods, 4 kinds of scale-down laboratory subgrade physical models with different compaction methods were tested. Through analyzing tow-dimensional infiltration rainfall test results, the influences of different compaction methods on the extended distances in roadbed humidity disturbed zone, humidity distributions in front disturbed zone, humidity gradients and humidity values of embankment were summarized. Their mechanisms were explained and relevant engineering suggestions were proposed. The results show that extended distances in roadbed humidity disturbed zone decrease linearly with the increase of compaction degree. The whole humidity disturbed zone can be divided into front and back zones. The front zone humidity shows a quick linear decrease distribution and humidity gradient increases linearly with the increase of roadbed compaction degree. Embankment humidity is affected significantly by the compaction degree of its upper roadbed. The combined effect reveals that embankment humidity decreases linearly with the increase of roadbed compaction degree. It should place a strict control on the upper subgrade impaction to avoid deeper subgrade damages due to water in engineering construction.

**Key words:** compaction method; subgrade; humidity field; evolution rule; similar simulation test

## 1 引 言

水损害是主要路基工程病害之一, 水分浸入路基引起湿度场的变化, 进而使得路基工程力学性能显著改变, 强度降低, 承载能力减弱。为此, 探究

路基湿度场演变规律是解决路基工程水损害的基础问题之一。受降雨入渗影响是路基湿度场波动的最常见形式, 而这种波动规律受公路状态差异影响<sup>[1]</sup>, 公路状态差异的最大体现之一就是因公路等级不同, 而路基具备不同压实方式<sup>[2]</sup>, 进而直接造成路

收稿日期: 2013-06-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(No. 51108452)。

作者简介: 柳志军, 男, 1978 年生, 博士, 讲师, 从事路基工程稳定性技术研究。E-mail: liuzhijun0331@163.com

基土的孔隙比差异对水迁移过程具有较大影响<sup>[3]</sup>,即压实方式作为重要因素影响路基湿度场的演变与分布有待深入研究。

调查表明<sup>[4-10]</sup>,目前相关研究及成果存在的主要问题是:①主要基于一维土柱的入渗后湿度场的分布,而大多忽略了路基入渗为二维入渗分布问题;②凡涉及二维入渗问题的研究目前也大多考虑水由路基上部入渗,明显与实际工况不符;③凡涉及由边坡入渗研究仅限于分析边坡表层一定厚度的湿度场分布,未深入研究路基内部主体湿度场入渗演变规律;④对于路基状态来说,仅基于单一压实度,未考虑各压实区的组合变化,未反映出路基真实的压实度状态。因此,本文基于降雨二维入渗扰动路基湿度场方式,紧密结合工程实际工况,研究不同压实方式条件下的路基湿度场演变规律,结论更具实际意义,为路基设计和水病害防治工作提供理论参考。

## 2 研究方案与设计

### 2.1 研究方案

本文拟采用室内相似模拟物理试验的手段进行研究。通过推导相似准则确定物理模型适宜的缩比尺寸以及试验降雨参数。保持路堤区压实度不变,路床区控制不同的压实度,通过降雨入渗试验观测路床区的湿度场分布状态,从而分析获得不同压实度对于湿度场分布状态的影响规律。通过测试不同路床压实度下的路堤湿度值,从而分析获得不同组合压实方式对其下部路堤湿度的影响规律。

### 2.2 试验设计

确定试验系统参数并推导相似准则(解略)为

$$\left. \begin{aligned} \pi_1 &= \frac{Ct}{v_f^2}, \pi_2 = \frac{q}{v_f^2}, \pi_3 = \frac{F}{v_f^3 \omega} \\ \pi_4 &= \frac{M_a}{\omega}, \pi_5 = \frac{S}{t_2^2 v_f^2}, \pi_6 = \frac{k}{v_f} \\ \pi_7 &= \frac{Q}{v_f \omega}, \pi_8 = \frac{t_1}{t_2}, \pi_9 = \frac{\rho}{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $C$  为比热容 ( $\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ );  $t$  为温度 ( $^\circ\text{C}$ );  $v_f$  为风速 ( $\text{m/s}$ );  $q$  为蒸发潜热 ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ );  $F$  为太阳辐射强度 ( $\text{kg/s}^3$ );  $S$  为面积 ( $\text{m}^2$ );  $M_a$  为湿度 ( $\text{kg/m}^3$ );  $k$  为渗透系数 ( $\text{m/s}$ );  $Q$  为降雨强度 ( $\text{kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ );  $\omega$  为含水量 ( $\text{kg/m}^3$ );  $t_1$  为降雨时间 ( $\text{s}$ );  $t_2$  为间歇时间 ( $\text{s}$ );  $\rho$  为土基干密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

按照一级公路路幅制备各路基模型,考虑路基厚度应满足湿度探头测试尺寸的最小要求,确定物理

模型的适宜尺寸缩比为 1:4。因路幅形状为轴对称,则按照半幅进行制作,模型纵向长度取 3 m 以去除边界效应影响。路基下部设置地基,路基坡面和地基顶面裸露以作为入渗面,其余各面使用塑料薄膜封闭以模拟路面防水层,详细尺寸见图 1。

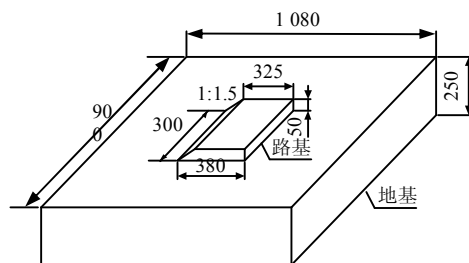


图1 室内模型 (单位: cm)

Fig.1 Test model (unit: cm)

根据相似准则以及确定的 1:4 模型缩比尺寸,计算得出模型降雨强度与足尺原型相同,确定为 144 mm/d;模型降雨时间为足尺原型的 1/4,原型降雨时间确定为 4 d,因此,模型降雨时间确定为 24 h;路基模型的压实度与足尺原型压实度相同,路堤压实度为 95%,为研究不同压实度影响路床区压实度分别取 92%、94%、96%、98%制建 4 种模型。

湿度测点沿着水平方向分两层安排在距路基顶面以下 8 cm 和 30 cm,获测湿度可分别代表路床区和上路堤区湿度,每层横向间隔 65 cm 布置,见示意图 2。

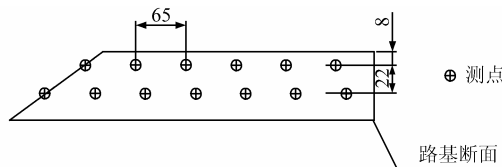


图2 探头布置 (单位: cm)

Fig.2 Probe arrangement (unit: cm)

## 3 试验测试与结果分析

### 3.1 试验测试

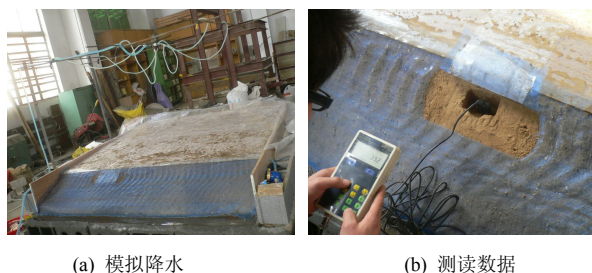
土样的液限为 35.9%,塑限为 21.0%,塑性指数  $I_p$  为 14.9,最佳含水率为 11.6%,最大干密度为 1.87  $\text{g/cm}^3$ 。筛分颗粒分析见表 1。

表1 土样颗粒分析

Table 1 Soil grain size analysis

| 粒径/mm   | 10    | 5     | 2    | 1    | 0.5  | 0.25 | 0.075 |
|---------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| 小于筛孔粒径的 | 100.0 | 100.0 | 99.8 | 99.4 | 81.4 | 73.2 | 42.9  |
| 质量百分比/% |       |       |      |      |      |      |       |

雨水喷头距离路基顶面高 1.5 m, 控制均匀喷洒至入渗面, 试验过程中每隔 4 h 测读一次湿度值, 见图 3。



(a) 模拟降水

(b) 测读数据

图 3 试验与测试

Fig.3 Test and measurement

### 3.2 路基湿度场演变规律分析

施加降雨历时 24 h 后, 读取路床压实度为 92% 和 98% 两种模型的第 1 层各测点湿度值, 绘制路床区湿度横向分布曲线图 4。

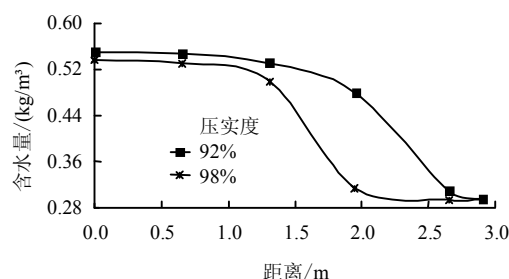


图 4 路床区湿度分布

Fig.4 Humidity distributions in roadbeds

图 4 表明, 路床湿度沿着边坡水平向内形成湿度扰动区并不断扩展, 在扰动区中由饱和过渡到非饱和状态, 最终降至初始湿度。绘制 4 种模型的湿度扰动区扩距随路床压实度变化规律见图 5。

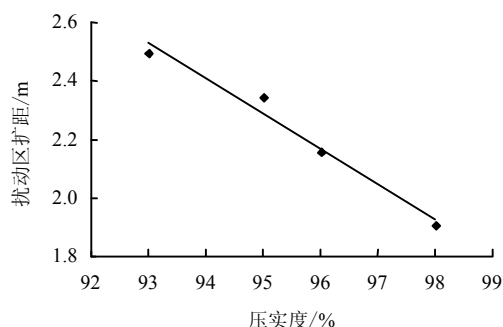


图 5 扰动区扩距与压实度关系

Fig.5 Relationship between extended distance in disturbed zone and compaction degree

图 5 表明, 湿度扰动区扩距随着路床压实度的增加而递减, 其规律基本符合线性变化, 见式(2):

$$D_w = -0.14K + 15.34 \quad (R^2 = 0.97) \quad (2)$$

式中:  $D_w$  为扰动区扩距 (m);  $K$  为路基土压实度 (%)。

分析原因认为, 压实度增大路基土孔隙率减小, 结构致密使得水分入渗越发困难, 迁移速度减小, 因此, 在实际工程中严格控制路基压实对于防治水毁病害是非常必要的。

按照扩展的方向整个湿度扰动区又可划分为前、后两个区域: 后扰动区为靠近边坡一侧, 表现为湿度值较大、降速慢、湿度梯度值较小的区域 (与路基坡表湿度相差 10% 之内); 前扰动区为靠近湿度前锋一侧, 表现为湿度值较小, 湿度分布基本呈线性速降、湿度梯度值较大。绘制 4 种模型前扰动区湿度梯度随路床压实度变化规律见图 6。

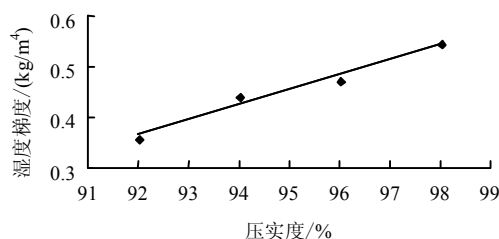


图 6 前扰动区湿度梯度与压实度关系

Fig.6 Relationship between humidity gradient in front disturbance zone and compaction degree

图 6 表明, 前扰动区的湿度梯度随着路床压实度的增加基本呈线性提高, 见式 (3):

$$G_w = 0.03K - 2.37 \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

式中:  $G_w$  为扰动前区湿度梯度 ( $\text{kg/m}^4$ )。

4 种模型的路堤区压实度相同, 但上部路床区压实度不同, 为此路堤区湿度将受何种影响。通过试验获测距离边坡 2.6 m 处 (第 2 层第 5 测点) 路堤湿度值, 绘制其受路床压实度差异影响的曲线图 7。

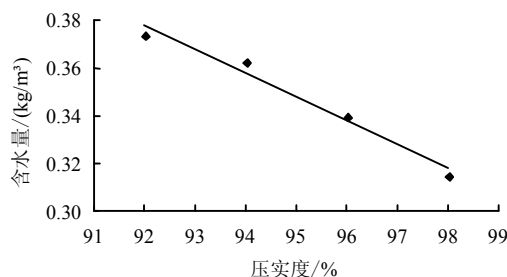


图 7 路堤湿度随路床压实度变化

Fig.7 Relationship between moisture content in embankment and compaction degree in roadbed

图7表明,受上部路床压实度影响,下部路堤测点湿度值呈线性递减,见式(4):

$$\omega = -0.01K + 1.298 \quad (R^2 = 0.97) \quad (4)$$

分析其原因认为,路堤水分主要来自上部路床竖向迁移和自横向边坡水平迁移,而上部路床压实度不同造成雨水竖向迁移速度差异,综合效应表现出路床压实度越大,路堤湿度越小。而图7的线形斜率较大充分表明上部水迁移作用为主,横向水平迁移量较小,因此,路床压实度对其下部路堤湿度影响效果显著。实际工程中严格控制路基上部压实效果不仅对于上部路基本身并且对于防止其下的路基水毁病害都有显著作用。

## 4 结 论

(1) 压实度增大导致路基土孔隙率减小,结构致密使得水分入渗越发困难,迁移速度减小,湿度扰动区扩距随着路床压实度的增加呈线性递减,因此,在实际工程中严格控制路基压实效果对于防治水毁病害是非常必要的。

(2) 按照扩展的方向整个湿度扰动区又可划分为前、后两个区域,前扰动区湿度分布基本呈线性速降状态,湿度梯度值随着路床压实度的增加呈线性提高。

(3) 路堤水分主要来自上部路床竖向迁移和自横向边坡水平迁移,而上部路床压实度不同造成雨水竖向迁移速度差异,综合效应表现为路堤测点湿度值随路床压实度增加呈线性递减。

(4) 路床压实度对路堤湿度影响效果显著,因此,实际工程中严格控制上部路基压实效果,不仅对于上部路基本身,并且对于防止其下部路基水毁病害都有显著作用。

## 参 考 文 献

- [1] 李同祥. 基于土力学剪应力理论的沥青路面开裂分析[J]. 公路交通科技, 2005, 22(7): 14—18.  
LI Tong-xiang. Analysis of bituminous pavement crackings based on soil mechanics shear stress theory[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2005, 22(7): 14—18.
- [2] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. JTGD30—2004 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [3] ASSOULINE S. A model for soil relative hydraulic conductivity based on the waterretention characteristic curve[J]. *Water Resources Research*, 2001, 37(2): 265—271.
- [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 of moisture migration in loess subgrade under rainfall[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 39(5): 593—597.
- [5] HALL K D, RAO S. Predicting subgrade moisture content for low-volume pavement design using in situ moisture content data[C]//Seventh International Conference on Low-Volume Roads. Washington, DC: Transportation Research Board, 1999.
- [6] 程海涛, 刘保健, 柳学花. 黄土地基积水入渗规律研究[J]. 中外公路, 2008, 28(6): 29—31.  
CHENG Hai-tao, LIU Bao-jian, LIU Xue-hua. Study of the moisture infiltration law of loess subgrade[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2008, 28(6): 29—31.
- [7] KIM J, JEONG S, PARK S, et al. Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils[J]. *Engineering Geology*, 2004, 75(4): 251—262.
- [8] PHAN T H, CUSHMAN M D, WHITE D J. Seasonal variation in the subgrade and base layers of U.S. Highway 20, Iowa[C]//Proceedings of the 2007 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Iowa: Iowa Department of Transportation, 2007.
- [9] 景宏君. 黄土路基积水入渗规律研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(4): 40—42.  
JING Hong-jun. Study on water infiltration pattern into loess subgrade[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2004, 21(4): 40—42.
- [10] 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.