

黄土路基降雨入渗现场试验

刘海松^{1,2}, 倪万魁¹, 杨泓全³, 颜斌¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2 九江学院 土木工程与城建学院, 江西 九江 332005;
3. 广西壮族自治区公路桥梁工程总公司, 广西 南宁 530000)

摘要: 为了寻求适合黄土地区公路路基湿陷性评价的方法, 找到符合公路工况的实际水分入渗规律, 通过现场人工降雨试验, 观测了湿陷性黄土路基在百年一遇降雨强度下的入渗以及饱和深度, 并结合有限元数值模拟, 分析了湿陷性黄土降雨入渗的规律。结果表明: 在降雨条件下湿陷性黄土路基入渗的影响深度小于 2.7 m, 饱和深度为 20 cm。该结果可为黄土地区路基处理设计中的黄土湿陷性评价、施工提供依据。

关键词: 黄土; 路基; 湿陷性; 人工降雨; 入渗; 数值模拟

中图分类号: P642 131; U412.22 文献标志码: A 文章编号: 1672-6561(2008)01-0060-04

Site Test on Infiltration of Loess Subgrade under Rainfall Circumstance

LIU Hai-song^{1,2}, NI Wan-kui¹, YANG Hong-quan³, YAN Bin¹

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. School of Civil Engineering and Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang 332005, Jiangxi, China;
3. Highway and Bridge Engineering General Company of Guangxi Zhuang
Autonomous Region, Nanning 530000, Guangxi, China)

Abstract: To find an effective method for evaluating the collapsibility of loess subgrade, site tests on the saturated depth and infiltration of subgrade loess under artificial rainfall circumstance were done. The infiltration and saturated depth were observed on site, the process of infiltration also was simulated. It is found that the depth of infiltration is not more than 2.7 m, and the saturated depth of loess is just 20 cm. This conclusion can provide a reference for designers and constructors.

Key words: loess; subgrade; collapsibility; artificial rainfall; infiltration; numerical simulation

0 引言

在中国黄土地区公路的建设和使用过程中, 由于黄土湿陷原因造成了许多路基和人工构造物的沉陷开裂等病害, 严重影响了工程质量和营运效果, 甚至造成重大交通事故和巨大的经济损失。目前对黄土地区路基修筑技术研究已取得许多成果^[1-2], 但有些关键技术尚未得到解决, 黄土地区的公路建设仍采用房建规范和试验规程进行。而公

路路基的工作环境和受力状态与房建工程地基差异很大, 尤其表现在不同水源条件下。引起房建工程地基湿陷的主要原因是各种上下水管道或蓄水池的渗漏, 水源表现为长期性、隐蔽性及不可量测性, 可能造成整个湿陷性黄土地基的浸水饱和, 湿陷沉降量的计算考虑全部湿陷性黄土厚度是合理的。大多相关研究也是基于浸水试验^[3-4], 而针对符合路基水源的现场试验研究还未见相关报道。笔者通过人工降雨, 模拟百年一遇的降雨条件, 分

收稿日期: 2007-10-28

基金项目: 国家西部交通建设科技项目(200131836115)

作者简介: 刘海松(1971-), 男, 内蒙古通辽人, 博士研究生, 从事地质工程研究。E-mail: lhsong@mail.pub.xaonline.com

析路基黄土的降雨入渗深度及其规律,旨在解决有限和短期降雨及灌溉水对湿陷沉降量计算的影响,为公路湿陷性黄土路基的设计施工提供依据。

1 试验场地概况

试验场地选在西安至禹门口高速公路 K165+400 处右侧富平服务区内。这里年平均降雨量为 292~493 mm,多年最大降雨量为 800 mm,一次降雨量为 108 mm,而降雨时间仅为 26 min,所以一次最大降雨强度可达 4.2 mm/min,其中 50 年一遇的降雨量为 90.6 mm,百年一遇的降雨量为 230.6 mm^[5]。

2 试验设计

2.1 试验区域

据规范^[9],选取 3 m×8 m 场地作为模拟降雨入渗试验区,为避免遇水蒸发以及风对降雨均匀程度的影响,特设置试验工棚(图 1)。试验区内外共埋设沉降观测标点 25 个,其中地表标 8 个,分层沉降标 17 个,水分观测孔 1 个(图 2)。距试验区 25 m 处设置水准基点 1 个,用精密水准仪及沉降标尺配合定期观测标点的下沉量。试验区周围受入渗影响的范围用 TDR 土壤水分测量仪进行观测。

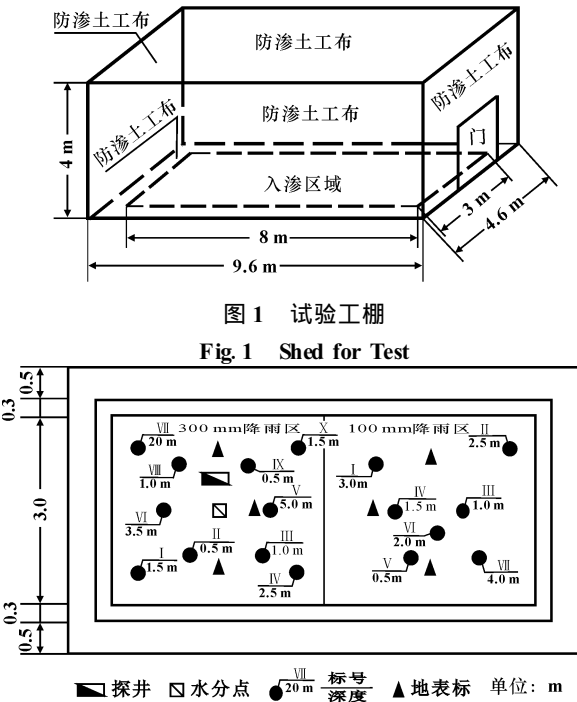


图 1 试验工棚
Fig. 1 Shed for Test

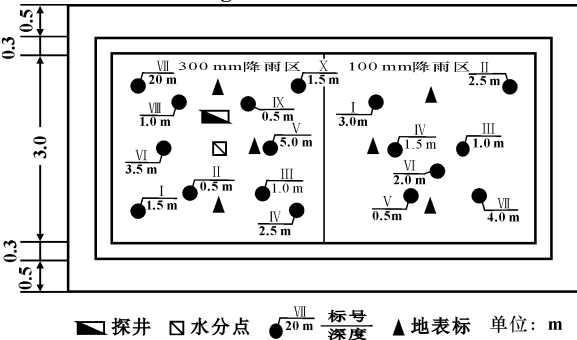


图 2 测点平面布置
Fig. 2 Arrangement of Observing Points in Plane

2.2 试验设备

2.2.1 降雨器

采用杨凌水土保持所研究开发的降雨喷头,配合普通扬程水泵。

2.2.2 沉降观测设备

沉降观测孔采用人工钻孔,埋设直径为 50 mm PVC 管;用不锈钢管焊接配重铁制成沉降观测标(图 3);分层深度布置为:0.5、1.0、1.5 m 各 2 个,2.0、2.5、3.5、5.0 m 各 1 个;测量采用德国 Ni004 精密水准仪。



图 3 沉降标
Fig. 3 Subsiding Staff

2.2.3 含水量观测设备

用德国 TDR 土壤水分测量仪进行观测。观测孔用人工钻孔,埋设与 TDR 配套的合成材料管。

2.3 试验方案

2.3.1 雨强及降雨量

依据当地气象资料,采用 300 mm(相当于百年一遇)降雨量,雨强 21.4 mm/h,降雨 14 h。

2.3.2 含水量观测频率

观测深度为:0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、2.7 m。降雨前对 6 个观测深度取样测定初始含水量。降雨期间每 1 h 观测 1 次,雨后 3 d 内每 2 h 观测 1 次,1 周内每 4 h 观测 1 次,之后每天观测 1 次,再其后每 2 d 观测 1 次,最后 7 h 观测 1 次,直至含水量变化趋于稳定。

2.3.3 湿陷性沉降观测频率

观测深度为 10 个沉降标的埋设深度。降雨结束后开始观测,7 h 内每 0.5 d 观测 1 次,之后 1 h 观测 1 次,再其后 2 d 观测 1 次,最后 7 h 观测 1 次,直至不再沉降。

3 试验结果

3.1 入渗规律

人工降雨入渗试验后,得到大量观测数据,统计分析发现:原状黄土路基在百年一遇降雨条件下,仅地表 0~20 cm 内土层在降雨过程中处于饱和状态,其下土层均处于非饱和状态,降雨影响深度为 2.5~2.7 m。各深度土层含水量随时间的变化规律见图 4。由图 4 可知:在降雨条件下,地表土层含水量变化很大,先急剧增大,甚至达到饱和,随

着时间的延长又慢慢降低, 25 d 后基本恢复初始含水量, 而 2.5 m 以下土层含水量变化很不明显(图 5、6)。充分说明降雨入渗对黄土路基的影响深度小于 2.7 m。除 1.0 m 深度土层外, 各深度含水量变化幅度不大, 主要发生在 30 d 左右。

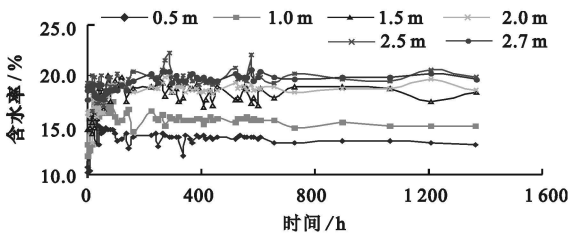


图 4 各深度土含水率曲线

Fig. 4 Water Content Curves of Every Depth Earth

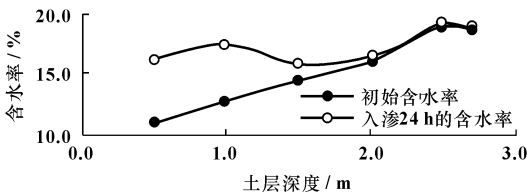


图 5 入渗 24 h 各深度土层含水量变化

Fig. 5 Water Content Curves after 24 h Infiltration

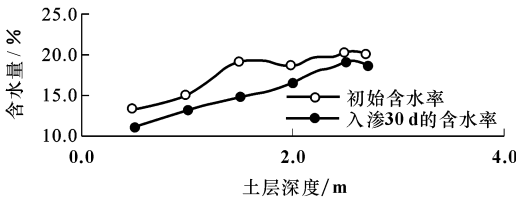


图 6 入渗 30 d 各深度土层含水量变化

Fig. 6 Water Content Curves after 30 Days Infiltration

3.2 数值模拟

结合现场观测数据, 用渗流分析有限元软件, 对湿陷性黄土路基在降雨入渗中内部渗流场的变化进行数值模拟, 得出一定时段内降雨入渗范围。

3.2.1 渗流有限元分析的基本原理

首先将土体离散为三角形或四边形等许多单元, 计算时再次将每个三角形离散成 2 个三角形。分割单元的线在节点处相交, 根据边界条件求解水流控制方程可得出每一点的水头。

稳态流的有限元形式用 Galerkin 的加权参数法原理推导出来

$$\int_A \left[\frac{\partial}{\partial x} \{L\} \right]^T \begin{bmatrix} k_{wx} & 0 \\ 0 & k_{wy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \{L\} \\ \frac{\partial}{\partial y} \{L\} \end{bmatrix} dA \{h_{wn}\} + \int_S \{L\}^T \bar{v}_w ds = 0$$

非稳态渗流问题相对稳态流公式方面有些差异, 其 Galerkin 解可由三角形单元的面积和边界表面积分得到

$$\int_A [B]^T [k_w] [B] dA \{h_{wn}\} + \int_A [L]^T \lambda [L] dA \cdot \frac{\partial \{h_{wn}\}}{\partial t} - \int_S [L]^T \bar{v}_w ds = 0$$

3.2.2 参数的选取及计算模型

降雨量为 300 mm, 降雨时间为 14 h, 强度为 5.94×10^{-3} mm/s, 同时在现场观测和取样, 并进行室内实验。计算模型见图 7, 模拟结果见图 8、9(因为降雨过程仅为 14 h, 故未作数值模拟, 只选择了 24 h 和 30 d 模拟结果说明)。

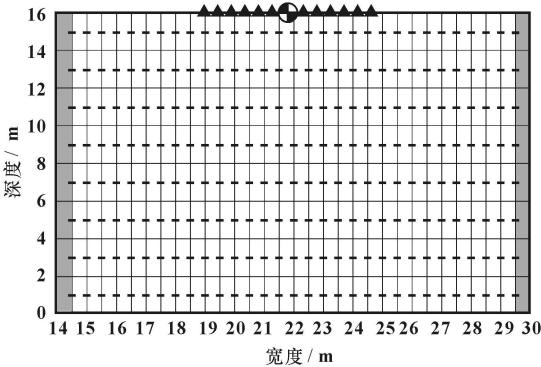


图 7 有限元分析网格

Fig. 7 Grids of Finite Element Analysis

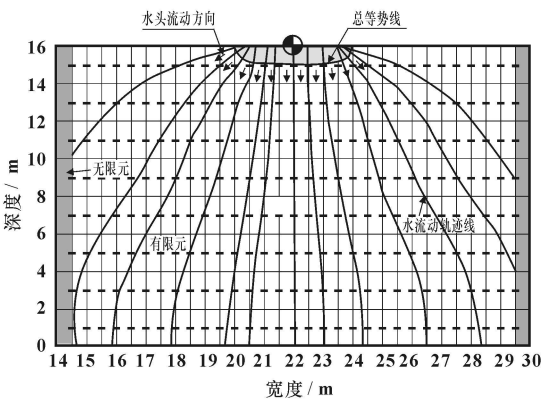


图 8 入渗 24 h 渗流云图

Fig. 8 Infiltration Diagram of Loess Bed for 24 h

由模拟结果可知: 入渗 24 h 和 30 d, 水头分别可达 1.0、2.3 m 左右, 这与现场试验观测数据非常接近(表 1、2)。而且入渗 30 d 以后, 1 m 左右深土层含水量已经开始降低, 逐渐恢复初始含水量。

3.3 湿陷沉降规律

现场试验同时还测得湿陷性黄土路基在降雨条件下不同深度土层的沉降变形。根据统计分析

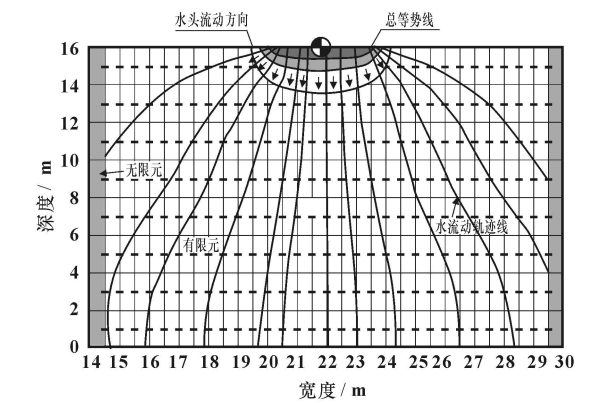


图 9 入渗 30 d 渗流云图

Fig. 9 Infiltration Diagram of Loess Bed for 30 Days

表 1 降雨入渗 24 h 含水量变化

Tab. 1 Water Content Datum of Infiltration for 24 h

项目	观测深度/m									
	0	00	0	25	0	50	0	75	1	00
含水量	降雨前/%	8	7	13	7	16	5	18	3	20
含水量	降雨后/%	23	3	19	7	20	6	17	5	22

表 2 降雨入渗 30 d 含水量变化

Tab. 2 Water Content Datum of Infiltration for 30 Days

项目	观测深度/m									
	0	00	0	25	0	50	0	75	1	00
含水量	降雨前/%	8	7	13	7	16	5	18	3	20
含水量	降雨后/%	17.1	15.2	16.7	16.0	18.6	23.8	22.9	24.5	23.7

可知: 原状黄土地基表面在降雨过程中产生湿陷变形, 沉降量 1~4 mm; 降雨停止后, 黄土层表面至 2.5 m 深度均产生不同程度膨胀(图 10), 地表最大膨胀量为 8 mm(图 11), 表明原状黄土地基在降雨入渗条件下不会产生明显的自重湿陷变形。由图 10 可知: 随着雨水的入渗, 初期各深度土层沉降变化很不规律, 但均出现不降反胀的现象; 之后各深度土层逐渐稳定沉降, 但沉降量很小, 观测 30 d 时, 最大沉降不超过 10 mm, 只有 1.0 m 深度土层沉降较大, 接近 20 mm。这与 1.0 m 深度土层含水量变化的不稳定有直接关系。

4 结语

- (1)通过现场降雨试验, 研究黄土的水分入渗规律是可行的。
- (2)关中地区湿陷性黄土路基在降雨条件下入渗的影响深度小于 2.7 m。
- (3)关中地区湿陷性黄土路基在降雨条件下的饱和深度仅为 20 cm。

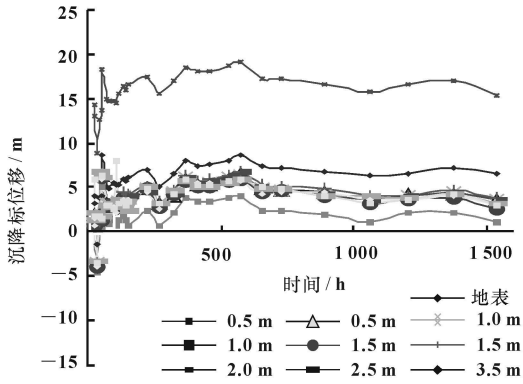


图 10 不同深度土层观测曲线汇总

Fig. 10 Subsiding Curves of Every Depth

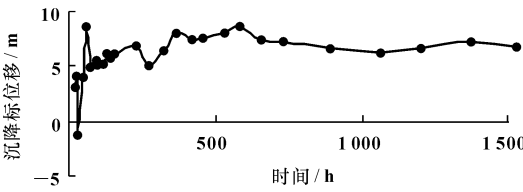


图 11 地表沉降观测曲线

Fig. 11 Subsiding Curve of Surface Earth

- (4)针对公路路基黄土湿陷性评价时, 应该结合公路工程的实际工况, 考虑水分的入渗深度影响, 不宜照搬建筑规范的规定进行。
- (5)黄土高原东南地区原状黄土不会发生明显的自重湿陷现象。

参考文献:

[1] 李 萍, 薛振年, 王治军, 等. 陇东地区黄土工程地质特征 [J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(2): 59-62.

[2] 叶为民, 崔玉军, 黄 雨, 等. 黄土的湿陷性及其评价准则 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 550-555.

[3] 倪万魁, 牛富俊, 刘东燕. 降雨入渗对非饱和黄土强度的影响分析 [J]. 工程勘察, 2002(3): 15-18.

[4] 高 鹏, 穆兴民, 刘普灵, 等. 降雨强度对黄土区不同土地利用类型入渗影响的试验研究 [J]. 水土保持通报, 2006, 26(3): 1-5.

[5] 钱林清. 黄土高原气候 [M]. 北京: 气象出版社, 1991.

[6] GBJ25-90, 湿陷性黄土地区建筑规范 [S].

[7] 富平地方志编纂委员会. 富平县志 [M]. 北京: 中国人事出版社, 2005.

[8] 景宏军. 黄土路基积水入渗规律研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21(4): 40-42.

[9] 戴经梁, 伍石生, 盛安连. 压实黄土路基积水入渗规律研究 [J]. 西安公路交通大学学报, 1998, 18(3): 155-158.

[10] 刘保健, 谢永利, 于友成. 黄土非饱和入渗规律原位试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(24): 4156-4160.