

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2016.09.006

山岭重丘区道路改扩建路基持续降雨 渗流数值模拟

马年祖¹, 建德琳¹, 代玉莉¹, 王鹏鹏¹, 王惠栋²

(1. 河南省弘阳高速公路有限公司, 河南 三门峡 472000; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘要:以连霍高速公路洛三临路段的改扩建工程为背景,应用岩土工程分析软件Geo-Studio对山岭重丘区高速公路中典型填方路基和挖方路基的持续降雨渗流问题进行了数值模拟,分析了路基中渗流场和孔隙压力随降雨时间的变化情况。计算结果表明:随着降雨时间的增加,存在负孔隙水压力的路基土区域不断缩小,路基稳定性逐渐变差;降雨初期,路基中主要是降雨引起的垂直渗流,随着降雨时间的增加,伴随垂直渗流的还有水位差引起的水平渗流;在持续降雨的条件下,应多注意路基边坡和挖方路段两侧边坡的稳定性。

关键词:道路工程;山区道路;数值模拟;降雨渗流;路基

中图分类号:U416.05;U418.5⁺4

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2016)09-0031-07

Numerical Simulation of Subgrade Persistent Rainfall Seepage of Reconstructed Highway in Mountainous and Heavy-hilly Area

MA Nian-zu¹, JIAN De-lin¹, DAI Yu-li¹, WANG Kun-peng¹, WANG Hui-dong²

(1. Henan Provincial Hongyang Expressway Co., Ltd., Sanmenxia Henan 472000, China;

2. School of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The seepage problem of typical fill-subgrade and cut-subgrade in Luoyang - Sanmenxia - Linbao section of Lianyungang - Huoerguosi expressway caused by persistent rainfall are numerical simulated by software Geo-Studio, and the variations of seepage field and pore-pressure of subgrade during the rainfall duration are analyzed. The calculation results show that (1) the subgrade area with negative pore pressure is steadily shrunk and the stability of subgrade is gradually getting worse and worse with the increase of rainfall time; (2) at the beginning of rainfall, the form of seepage in the subgrade is mainly vertical seepage caused by rain, subsequently, horizontal seepage induced by water-head difference arises along with vertical seepage; (3) more attention should be paid to the slope stability of highway soil subgrade under the condition of persistent rainfall.

Key words: road engineering; highway in mountain area; numerical simulation; rainfall infiltration; subgrade

0 引言

为适应社会经济发展的要求,对现有已出现结构破坏或是提前出现交通量饱和的道路进行改造或

扩建是十分必要的^[1]。在道路的改扩建工程中,如何防止水分进入到路基内部和将进入到路基内部的水分及时排出是道路改扩建和维修工程中的重要内容^[2]。山岭重丘区高速公路,因其所处区域水文和

收稿日期:2014-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51339006)

作者简介:马年祖(1965-),男,河南三门峡人,工学硕士,高级工程师。(726432253@qq.com)

地质条件复杂、降雨汇水区坡度陡^[3]，公路水毁现象严重，而且一旦出现问题，其建设和养护管理也极为不易。

每年雨季，我国公路因排水不善或排水系统水毁造成了大量的交通中断事件，带来了严重的经济损失。有关资料显示^[4]：1994年中国公路水毁损失达37亿元，1996年达69亿元，1998年达91亿元，2005年前后每年公路水毁直接经济损失达到了100亿元以上。为此，很多学者对公路水毁问题开展了研究。沈波^[4]通过对陕西、甘肃、宁夏、四川、重庆、云南等西部山区的公路水毁调查发现：新建高等级公路排水系统相对完善，一般情况下出现水毁的问题相对较少；但在水文及地形、地质条件相对恶劣，环境条件变化剧烈，公路防护、排水相对不完善的路段（旧路改造或扩建的高速公路），公路水毁灾害大量存在。在调查的基础上，沈波等人^[5-6]总结了公路排水存在的主要问题，重点归纳了排水沟渠易于水毁的4个特征，提出3个须解决的关键水力学问题，根据破坏成因总结出了8项工程防治措施。鄢启和^[7]结合广东省阳江至阳春高速公路的建设，研究了山区高速公路的排水系统，分析了排水系统的水毁机理，提出了适合于山区高速公路关键部位的排水设计优化方法及改进措施。2010年7月28日特大洪水造成吉林省东部山区公路多处严重水毁，赵文丁^[8]在调查的基础上，分析了山区公路水毁的原因，提出公路水毁的防治应坚持“必先治水”的原则，公路修建完成后，养护部门还要坚持“预防为主，防治结合”的方针政策。杨俊峰^[9]根据黄土地区高速公路加宽工程中新旧路基在汛期施工中易遭受雨水破坏的情况，总结了水毁的主要形式，分析了水毁发生的原因，提出了具体的预防和处治措施。张波等人^[10]结合重庆黔彭高速公路，介绍了多雨山区高速公路路基、路面排水系统设计要点。杨宏志等人^[11]认为山区高速公路易于水毁除山洪本身的原因之外，还与设计、施工以及人为活动等因素有关，指出了传统山区高速公路排水设计方法的弊端，提出了基于GIS的山区高速公路排水设计方法和流程。不难发现，上述研究工作多是从工程和设计的角度提出工程防治措施和设计方法的，对公路水毁的机理问题没有做过多的研究。

公路水毁是一个涉及到饱和-非饱和状态水分渗透和水分变化的问题。在机理上可归结为：特定边界条件下，路基受降雨作用出现的渗流和渗透破坏问题。虽有学者^[12-14]在该方面做过一些研究，但

对山岭重丘区道路在持续降雨条件下的渗流机制问题的研究较少。考虑到水渗流机制是进行公路防排水设计的理论基础，笔者认为仍有必要依据具体工程开展山岭重丘区高速公路在持续降雨条件下渗流机制问题的研究。

本文以连霍高速公路洛三灵（洛阳至三门峡至灵宝高速公路）路段的改扩建工程为背景，根据饱和-非饱和渗流理论，应用数值模拟的方法研究了改扩建的山岭重丘区高速公路典型填方路基和挖方路基在持续降雨条件下，渗流场与孔隙压力的变化规律，以期对山岭重丘区高速公路排水系统的设计提供理论指导。

1 工程概况

洛三灵高速公路于2001年年底建成通车，自建成运营以来，交通流量持续上升，公路服务水平逐渐下降，需要改建扩容。原洛三灵高速公路采用填方和挖方相结合的建设方案，按山岭重丘区高速公路建设，路基宽23.5m，其中中央分隔带2m，左侧路缘带2×0.5m，行车道2×2×3.75m，硬路肩2×2.5m，土路肩2×0.75m。路面横坡为2%，路肩横坡为3%，图1所示为原路基横断面图示意图（图中只给出了路基断面右半侧图）。为了提高公路的服务水平，扩建时采用单侧整体式加宽、单侧分离式加宽和双侧整体式加宽相结合的建设方案，将原来的双向四车道改扩建为标准的双向八车道。

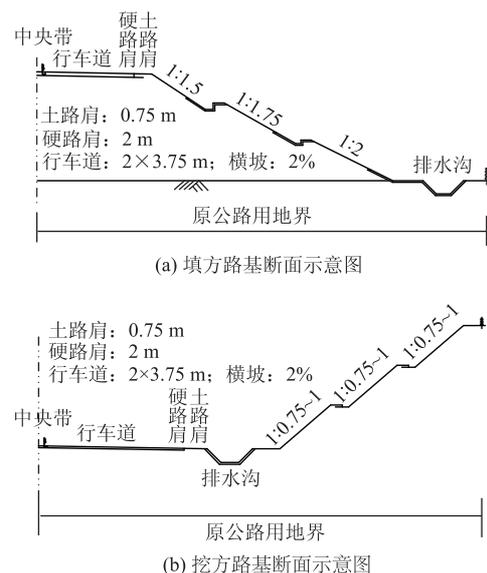


图1 原洛三灵高速公路路基断面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of subgrade section of original Luoyang - Sanmenxia - Linbao expressway

该工程所在区域年平均降水量为 600 ~ 700 mm, 多集中在 7—9 月份, 占全年降水量的 50% 以上。原洛三灵高速公路路基填方段采用集中排水方式; 挖方段采用分散排水方式; 中央分隔带有顶面敞开和封闭两种形式。在运行期间, 该高速公路部分高填方段排水沟淤泥较多, 路堑截水沟有水毁现象。而且, 中央分隔带底部的土工防水材料逐渐老化, 出现了储存于中央分隔带底部的水分逐渐渗入到路面结构或路基土壤中的现象。在该改扩建工程中, 路基、路面排水问题是该改扩建工程重点考虑的内容。

2 渗流分析基本原理

本文采用岩土工程分析软件 GeoStudio 中的 SEEP/W 模块, 对改扩建后的洛三灵高速公路典型填方路基和挖方路基进行了二维数值模拟。SEEP/W 是基于有限元方法进行土体渗流分析的数值模拟软件, 能够很好地分析非饱和土渗流方面的问题^[16]。

2.1 降雨入渗过程分析

降雨入渗是一个动态的、随时间和空间变化的过程^[14]。雨水的入渗量受降雨强度、降雨历时、土壤的渗透性能、初始土壤含水率、入渗面坡度、植被情况等诸多因素的影响。当降雨强度超过土壤的入渗能力时, 地表面将产生径流或积水, 土壤内部形成不断扩大的饱和区。一般降雨入渗过程可分为两个阶段: 开始时, 地表的含水率梯度很大, 入渗率也很高; 随着入渗的进行, 含水率梯度不断减小, 入渗率也不断降低, 当小于降雨强度时, 开始形成地表径流或积水。

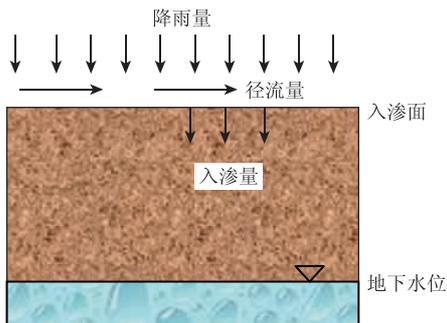


图2 入渗概念模型

Fig. 2 Rainfall infiltration concept model

在理论分析中, 通常将降雨模型可分为显著泊松过程的瞬态降雨模型和遵循随机矩形脉冲的有限持续降雨模型^[15]。其中, 瞬态降雨模型假设降雨量不会引起地表径流, 所降雨水直接被土壤吸收; 有限持续降雨模型考虑了降雨产生的径流现象。本文

在分析中采用了后者。

2.2 渗流分析基本理论

渗流分析的基本理论公式为达西定律, 如式 (1) 所示:

$$q = ki, \quad (1)$$

式中, q 为单位体积的流量; k 为渗透系数; i 为总水头梯度。

二维渗流条件下的渗流控制微分方程如式 (2) 所示:

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (2)$$

式中, H 为总水头; k_x 为 x 方向的渗透系数; k_y 为 y 方向上的渗透系数; Q 为施加的边界流量; θ 为单位体积含水量; t 为时间。

单位体积含水量的变化 $\partial \theta$ 与孔隙水压力的变化 ∂u_w 可用如下关系表示^[16]:

$$\partial \theta = m_w \partial u_w, \quad (3)$$

式中, m_w 为储水曲线的斜率。最后被用于 SEEP/W 有限元公式中的控制方程为^[11]:

$$k_x \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (4)$$

上式中, γ_w 为水的体积质量。

对控制方程应用加权余量的伽辽金方法, 可以得到二维渗流方程的有限元格式:

$$\tau \int_A (\mathbf{B}^T \mathbf{C} \mathbf{B}) dA \{ \mathbf{H} \} + \tau \int_A (\lambda \langle \mathbf{N} \rangle^T \langle \mathbf{N} \rangle) dA \left\{ \frac{\Delta \mathbf{H}}{\Delta t} \right\} = \tau q \int_A (\langle \mathbf{N} \rangle^T) dL, \quad (5)$$

式中, \mathbf{B} 为插值函数梯度矩阵; \mathbf{C} 为单元渗透系数矩阵; \mathbf{H} 为节点水头向量; \mathbf{N} 为插值函数向量; q 为穿过单元边界的单位流量; τ 为单元厚度; t 为时间; λ 为存储项, 对瞬态渗流等于 $m_w \gamma_w$; A 为单元面积; L 为单元边界长度。

3 扩建路基降雨渗流数值模拟

3.1 计算模型概述

本文选取连霍高速公路洛三灵路段中典型填方路基和挖方路基进行持续降雨渗流分析, 计算了持续降雨 24 h 过程中, 路基土中渗流场和孔隙压力的变化情况。在数值模拟中, 结合地勘资料同时为了便于计算和分析本文作了如下假定: (1) 不考虑水汽蒸发及雨水流失; (2) 路基土均质且各向同性; (3) 初始水位线为直线; (4) 数值模拟中的路基结

构左右对称。

填方段和挖方段的数值模型分别如图3(a)和(b)所示,整个模型长60.44 m。填方路面最高点(中央分隔带所在位置)距模型底部距离为12.635 m。行车道、路肩及中央分隔带共计41 m,其中,中央分隔带为3.5 m,路肩为 2×3.75 m,行车道为 2×15 m,行车道的横坡坡度为2%。路基边坡坡度1:1.5,填高2 m。排水沟深1 m,底部宽0.75 m,排水沟边坡坡度为1:1。排水沟到路基边坡坡脚和模型边界的距离均为2 m。挖方路面最高点距模型底部距离为8.635 m。行车道、路肩、中央分隔带尺寸及行车道的横坡坡度均和填方路基一样。边沟深1 m,底部宽1 m,边沟边坡坡度为1:0.75。边沟内侧紧挨土路肩。距边沟外侧2.5 m,是开挖路基形成的边坡,边坡坡度1:0.75,挖深8 m,边坡最高点距模型底部的距离为15.16 m。填方路基和挖方路基的初始水位线都设在距边沟或排水沟底部1 m处的路基土中。

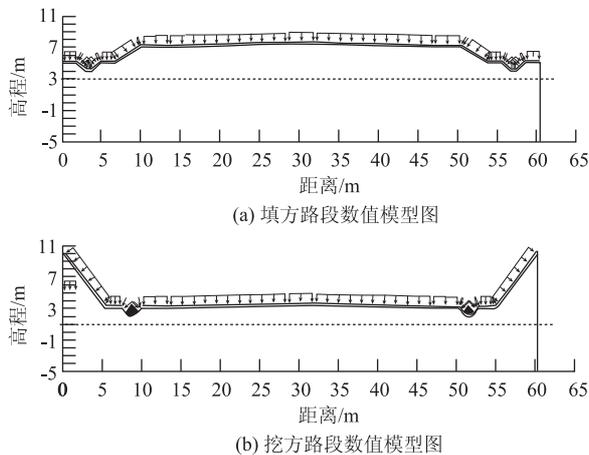


图3 路基计算模型

Fig. 3 Calculation models of subgrade

根据排水规范^[17],平均降雨强度取 5.15×10^{-6} m;路基土饱和体积含水量为0.47%;体积压缩系数为 0.0015 kPa^{-1} ;饱和渗透系数为 $5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$;地基土水土特征曲线和水力传导曲线分别如图4、图5所示,沥青面层设为不透水层。

3.2 计算结果与分析

计算结果如图6、图7所示,分别给出了每隔8 h填方路基和挖方路基土中渗流场和孔隙压力的状态。

由图6、图7路基中渗流场的变化可知,中央分隔带、路肩、排水沟或边沟、路基边坡是雨水渗入路基的主要通道,为防止雨水大量进入路基内部,应着重解决以上部位的排水问题。降雨初期,路基

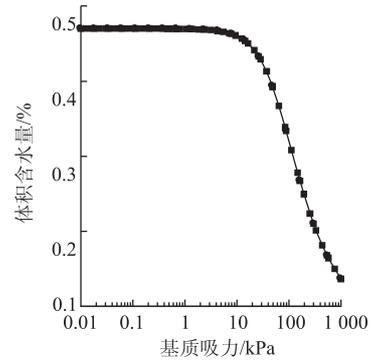


图4 路基土水土特征曲线

Fig. 4 Soil water characteristic curve of subgrade soil

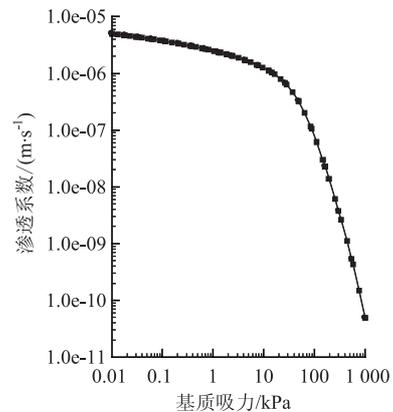


图5 路基土水力传导曲线

Fig. 5 Hydraulic conductivity curve of subgrade soil

中的渗流主要是降雨引起的垂直渗流,除了行车道表面,所降雨水都能渗入到路基内部。随着降雨时间增加,路肩及中央分隔带区域提前进入饱和状态,而行车道下面还处于负孔隙水压力状态,这时会在路基中出现因水位差引起的水平渗流。持续降雨还会在路基表面出现径流现象,雨水沿着路基表面不断向低处汇流,最后进入排水沟或边沟。如果进入到排水沟或边沟中的水不能顺利被排走,雨水浸泡路基,对路基稳定性非常不利,所以在持续降雨的条件下排水沟或边沟具有良好的排水能力非常重要。

由图6、图7路基中孔隙压力和水位线的变化可知,降雨0小时(即没有降雨)时,水位线为初始水位线。位于水位线之上的路基土存在负孔隙水压力,距初始水位线越远的路基土,其内负孔隙水压力越大。持续降雨时,随着降雨时间的增加,水位线逐渐上移,存在负孔隙水压力的路基土区域不断缩小。不同部位水位线上升的速度也不一样,排水沟或边沟下面的水位线上升速度最快。行车道表面由于铺设了不易透水的沥青材料,降雨引起的垂直

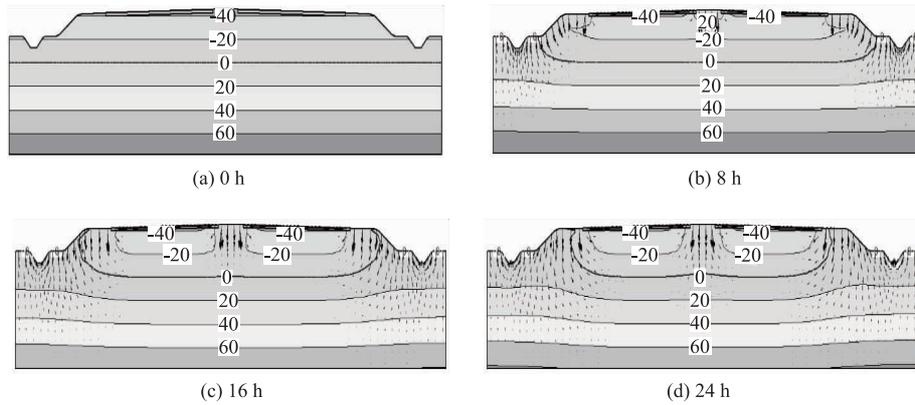


图 6 填方路基渗流场和孔隙压力随降雨时间的变化情况 (单位: kPa)

Fig. 6 Seepage field and pore pressure of filling subgrade varying with rainfall time (unit: kPa)

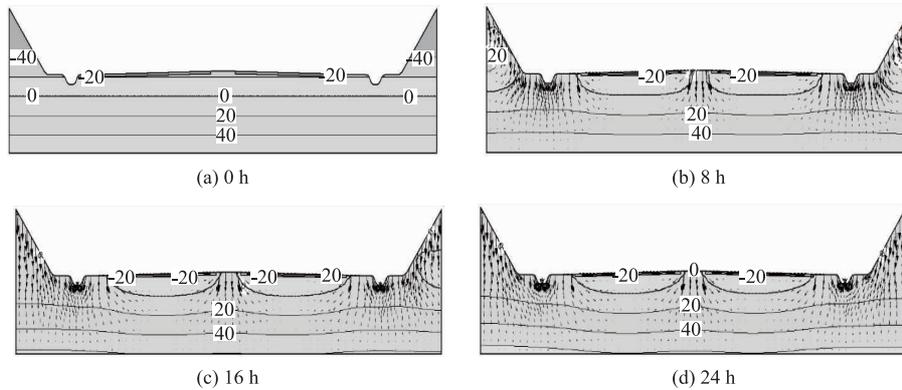


图 7 挖方路基渗流场和孔隙压力随降雨时间的变化情况 (单位: kPa)

Fig. 7 Seepage field and pore pressure of excavating subgrade varying with rainfall time (unit: kPa)

入渗很难引起行车道下面的水位线上升。

为详细研究持续降雨过程中, 路基土中孔隙水压力随降雨时间的变化情况。本文分别给出了如图 8 所示的填方路基和挖方路基几个典型断面中孔隙水压力随降雨时间的变化情况。计算结果分别如图 9、图 10 所示。

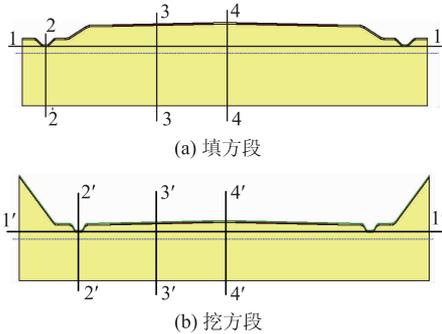


图 8 所取断面

Fig. 8 Selected sections

图 9 (a) 表示填方段路基 1-1 断面各点孔隙水压力随降雨时间的变化情况。没有降雨时, 该断面

各点的孔隙水压力均为 -10 kPa。持续降雨 4 h 后, 排水沟底部的孔隙水压力最先由负值变为正值, 该区域也是整个路基中孔隙水压力最大的区域。随着降雨时间继续增加, 最大孔隙水压力区域逐渐由排水沟转移到两侧的路肩中, 持续降雨超过 8 h 后, 路肩两侧对应的 1-1 断面上的区域孔隙水压力最大。在整个降雨过程中行车道对应的 1-1 断面上的区域始终处于负孔隙水压力状态, 且孔隙水压力变化很小。如图 10 (a) 所示, 挖方路基 1-1 断面中各点孔隙水压力随降雨时间的变化和填方路基基本一样, 所不同的是随着持续降雨时间的增加, 开挖路基形成的边坡内孔隙水压力最大。这说明随着降雨时间的增加, 挖方路基处的边坡很容易发生破坏, 在设计和施工时应多注意其在持续降雨情况下的稳定性。

由图 9 (b) 和图 10 (b) 可知, 持续降雨 4 h 之后, 除路基表面, 填方路基和挖方路基 2-2 断面各点处孔隙水压力均大于 0。随着降雨时间的增加, 2-2 断面各点处孔隙水压力的连线由曲线逐渐变为

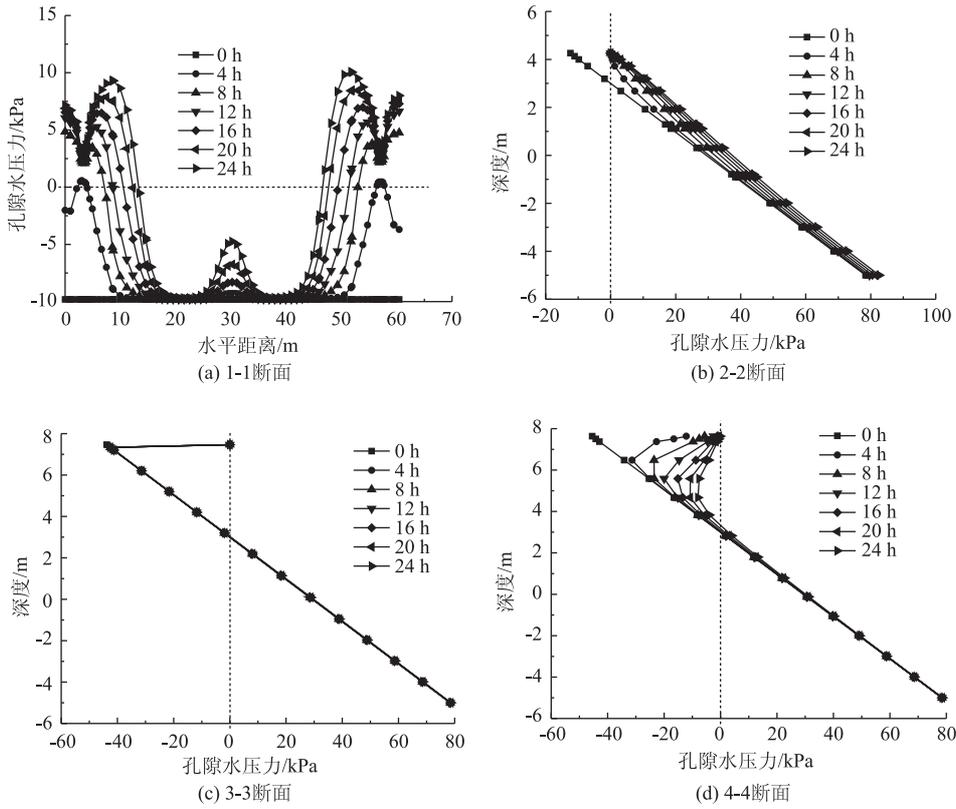


图9 填方段路基所取断面孔隙水压力随持续降雨时间的变化情况

Fig. 9 Pore water pressure of selected section of filling subgrade varying with rainfall time

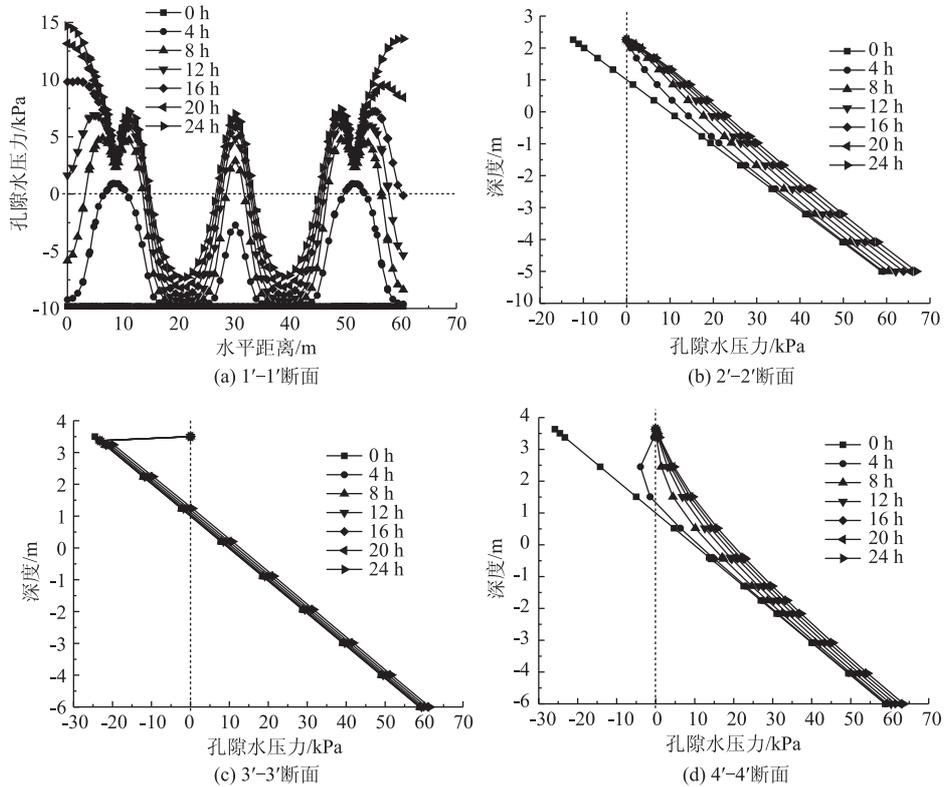


图10 挖方段路基所取断面孔隙水压力随持续降雨时间的变化情况

Fig. 10 Pore water pressure of selected section of excavating subgrade varying with rainfall time

直线, 这说明在降雨过程中该断面处路基土逐渐由非饱和状态向饱和状态转变。

图9(c)和图10(c)分别表示填方段路基和挖方段路基行车道中间位置纵断面各点的孔隙水压力随降雨时间的变化情况。由图可知: 在路面无渗水到路基的情况下, 3-3断面路基土的孔隙水压力几乎不受降雨的影响。

图9(d)和图10(d)分别表示填方路基和挖方路基中央分隔带中间位置纵断面各点孔隙水压力随降雨时间的变化情况。由图可知: 降雨初期路面孔隙水压力就为0, 但靠近路面的路基土中在降雨初期呈负孔隙水压力状态, 并随着降雨时间的增加, 逐渐由负孔隙水压力向正孔隙水压力状态转变。由于填方道路表面距初始水位线较挖方道路远, 在本研究给定的降雨条件下, 填方道路中央分隔带总有一部分路基土始终处于负孔隙水压力状态。

4 结论

本文以连霍高速公路洛三临路段的改扩建工程为背景, 对山岭重丘区高速公路典型填方路基和挖方路基的持续降雨渗流问题进行数值模拟, 主要得到以下结论:

(1) 降雨初期, 路基中的渗流主要是降雨引起的垂直渗流; 随着降雨时间的增加, 伴随垂直渗流的还有水位差引起的水平渗流。

(2) 在本研究中, 沥青路面被设为不透水层, 在给定的降雨条件下, 无论是填方段路基还是挖方段路基, 中央分隔带、路肩、排水沟或边沟、路基边坡均是降雨入渗的主要通道, 而行车道中间位置受降雨的影响很小。为防止雨水大量进入路基内部, 在设计和施工时应着重注意以上位置排水系统的防、排水能力。

参考文献:

References:

- [1] 李永祥. 道路改扩建工程综合排水系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
LI Yong-xiang. Study on Integrated Drainage System in Road Reconstruction and Extension [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [2] 邓云潮. 高速公路扩宽路基综合防排水系统研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
DENG Yun-chao. Study on Integrated Drainage System in Road Reconstruction and Widening [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [3] 李庆贺. 山区高速公路路基排水技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2010.
LI Qing-he. Research of Freeway Subgrade Drainage Technology in Mountain Areas [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [4] 沈波. 山区公路排水系统灾害评价方法及指标体系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2006.
SHEN Bo. Study on the Risk Evaluation of Rainfall Drainage System of Mountainous Highway [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [5] 沈波, 艾翠玲. 我国山区公路排水问题及水毁调查分析 [J]. 公路交通科技, 2010, 23 (10): 5-9.
SHEN Bo, AI Cui-ling. Mountain Area Highway Drainage and Water Damage Survey and Analysis [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 23 (10): 5-9.
- [6] 沈波, 田伟平, 郭平, 等. 多雨土石山区高速公路排水系统水毁及防治 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25 (6): 29-33.
SHEN Bo, TIAN Wei-ping, GUO Ping, et al. Prevention of Highway Drainage System Destruction in Pluvial Mountain Area [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 25 (6): 29-33.
- [7] 鄢启和. 山区高速公路排水系统的水毁现象及处治措施 [J]. 公路, 2010 (4): 186-191.
YAN Qi-he. Damag Phenomenon and Treatment Measures for Mountain Expressway Drainage System [J]. Highway, 2010 (4): 186-191.
- [8] 赵文丁. 吉林省东部山区公路水毁调查及防治 [J]. 路基工程, 2012 (6): 38-41.
ZHAO Wen-ding. Survey and Prevention of Water Damage to Highway in the Eastern Mountainous Area in Jilin Province [J]. Subgrade Engineering, 2012 (6): 38-41.
- [9] 杨俊峰. 黄土路堤高速公路加宽工程中的水毁防治措施 [J]. 西部交通科技, 2010 (4): 32-35.
YANG Jun-feng. Flood Damage Control in Widen Construction Project of Highway in Yellow Soil Conditions [J]. Western China Communications Science & Technology, 2010 (4): 32-35.
- [10] 张波, 谭剑松, 高曙光. 多雨山区高速公路排水设计浅析 [J]. 华东公路, 2008 (3): 51-56.
ZHANG Bo, TAN Jian-song, GAO Shu-guang. Analysis of Drainage Design of Rainy Mountain Expressway [J]. East China Highway, 2008 (3): 51-56.
- [11] 杨宏志, 许金良, 高超, 等. 基于GIS的山区高速公路排水建模与设计方法 [J]. 中国公路学报, 2011, 24 (4): 26-32. (下转第45页)

- (S2): 422-427.
- [5] AVGHERINOS P J, SCHOFIELD A N. Drawdown Failures of Centrifugal Models [C] // Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: [s. n.], 1969: 497-505.
- [6] GEMPERLINE M C, KO H Y. Centrifugal Model Tests for Ultimate Bearing Capacity of Footings on Steep Slopes in Cohesionless Soils [C] // Proceedings of a Symposium, the Application of Centrifuge Modelling to Geotechnical Design. Manchester: A A Balkema, 1988: 203-221.
- [7] KIM M M, KO H Y. Centrifugal Testing of Soil Slope Models [J]. Transportation Research Record, 1982; 872: 7-14.
- [8] 谢永利, 胡晋川. 黄土公路路堑边坡稳定性离心模型试验 [J]. 中国公路学报, 2009, 22 (5): 1-7.
XIE Yong-li, HU Jin-chuan. Centrifugal Model Test for Stability Characteristics of Highway Cut Slope in Loess [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22 (5): 1-7.
- [9] 于玉贞, 邓丽军. 砂土边坡地震动力响应离心模型试验 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47 (6): 789-792.
YU Yu-zhen, DENG Li-jun. Centrifuge Model Test of the Seismic Response Behavior of a Sand Slope [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology Edition, 2007, 47 (6): 789-792.
- [10] 肖红兵, 蒋关鲁, 王景芝. 深厚全风化花岗岩铁路地基沉降离心模型试验研究 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (8): 40-44.
XIAO Hong-bing, JIANG Guan-lu, WANG Jing-zhi. Experimental Research on Settlement of Railway Embankment on Deep Layer Completely Decomposed Granite Foundation Based on Centrifugal Model Test [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (8): 40-44.
- [11] 张嘎, 王爱霞. 边坡破坏过程离心模型试验的应力位移场研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (10): 2637-2641.
ZHANG Ga, WANG Ai-xia. Study of Stress and Displacement Fields in Centrifuge Modeling of Slope Progressive Failure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (10): 2637-2641.
- [12] Itasca Consulting Group, Inc. Flac3D User Manuals [M]. Minnesota: Itasca Consulting Group Inc., 2005.
- [13] 《工程地质手册》编写委员会. 工程地质手册 [M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
Compile Committee of Handbook of Engineering Geology. Handbook of Engineering Geology [M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2007.
- [14] FREDLUND D, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: Wiley, 1993.
- [15] 林鸿州, 李广信, 于玉贞, 等. 基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (9): 1932-1936.
LIN Hong-zhou, LI Guang-xin, YU Yu-zhen, et al. Influence of Matric Suction on Shear Strength Behavior of Unsaturated Soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (9): 1932-1936.
- [16] 董倩, 侯龙. 基质吸力对非饱和粉质砂土抗剪强度的影响 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43 (10): 4017-4021.
DONG Qian, HOU Long. Influence of Matric Suction on Shear Strength of Unsaturated Silty Sand [J]. Journal of Central South University: Science and Technology Edition, 2012, 43 (10): 4017-4021.
- (上接第37页)
- YANG Hong-zhi, XU Jin-liang, GAO Chao, et al. Drainage Modeling and Design Method of Mountainous Expressway Based on GIS [J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24 (4): 26-32.
- [12] 沈水进. 公路水毁机理与决策系统研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
SHEN Shui-jin. Mechanism of Highway Flood Damage and Decision System Research [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [13] 李焕强. 台风暴雨引发公路水毁特征与边坡水毁机理 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
LI Huan-qiang. Characteristics of Road Water Damage and Mechanism of Slope Failure Caused by Typhoon Rainstorm [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [14] 张林洪. 山区公路工程地质环境中的水渗流机制研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2006.
ZHANG Lin-hong. Study on Water Seepage Mechanism in Highway Engineering Geology Environment [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2006.
- [15] RIGBY J R, PORPORATO A. Simplified Stochastic Soil-moisture Models: a Look at Infiltration [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2006, 3 (4): 861-871.
- [16] GEO-SLOPE International Ltd. Seepage Modeling with SEEP/W 2007: An Engineering Methodology [M]. 3rd ed. Calgary, Canada: GEO-SLOPE International Ltd., 2008.
- [17] JTC/T D332012, 公路排水设计规范 [S].
JTC/T D332012, Specifications for Drainage Design of Highway [S].