

基于渗流模型的路基排水设计计算方法初探

魏云杰, 许 模, 裴向军

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 成都 610059)

摘 要: 根据我国西部不同气候、地形地貌因素, 将有关农田水利排水的渗流模型引入了公路路基排水, 重点研究了完整盲沟的无降雨渗流模型、连续降雨入渗模型、降雨停止后渗流模型、阶段性降雨模型及其解析解。通过工程实例, 运用连续降雨入渗模型和降雨停止后渗流模型, 计算了路基内部盲沟的设置间距和排水时间, 实践证明该方法是有用的, 为西部公路盲沟排水设计中的排水计算提供了一定依据。

关 键 词: 盲沟排水; 渗流模型; 路基; 降雨

中图分类号: O 357.3

文献标识码: A

Preliminary study on calculation method of drainage inside roadbed based on seepage models

WEI Yun-jie, XU Mo, PEI Xiang-jun

(National Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Based on different conditions of climate and landforms, the mathematic models of seepage in farm drainage are used for drainage inside roadbed of expressway; and the seepage model without considering rainfall, seepage model with considering lasting rainfall, seepage model after stopping rainfall, seepage model with phase rainfall of full blind drainage and their analytic solutions are studied emphatically. It has been proved by engineering cases that the drainage design with seepage model is reasonable so as to provide definite experiences for drainage design of blind drain inside roadbed of expressway in the West China.

Key words: blind drainage; seepage model; roadbed; rainfall

1 引 言

我国西部公路路基排水构筑物多采用盲沟, 根据是否挖至隔水层, 其分为完整盲沟和非完整盲沟, 考虑到问题的复杂性和相似性, 本文重点研究完整盲沟排水的渗流模型。盲沟排水渗流计算解决的主要问题有: 确定不同条件下盲沟设置的合理间距; 计算不同条件下盲沟间的地下水位; 设计盲沟排水量计算和确定多雨地区盲沟的雨后排水时间。为了解决上述问题, 有必要建立不同条件下路基排水的渗流模型, 再根据初始条件和边界条件联立求解。根据西部地区的气候条件和地形地貌因素, 路基排水渗流模型的类型和适用条件见表 1。

2 路基排水的渗流模型

2.1 无降雨入渗模型

我国西北地区, 尤其新疆南部, 降雨量较少,

在水库渗漏或者山前溢出带附近地下水埋藏浅, 水位较高。在这些地区修建公路, 容易形成道路翻浆、路基沉陷、路基边坡塌方等灾害, 因此必须设置排水盲沟, 降低路基内部的地下水位, 使路基保持干燥^[1]。在这种情况下建立盲沟排水设计的数学模型可以不考虑降雨入渗, 只考虑降低潜水含水层水位, 可以概化为潜水含水层中地下水的稳定运动, 其建立力学模型为

$$\frac{d}{dx} \left(h \frac{dh}{dx} \right) = 0, \quad h|_{x=0} = h_0, \quad h|_{x=L'} = H \quad (1)$$

盲沟间地下水位为

$$h^2 = \left(\frac{H^2 - h_0^2}{L'} \right) x + h_0^2 \quad (2)$$

而单位长度渗沟由沟壁一侧流入沟内的流量由下式求得:

$$q = \frac{K}{2} \frac{H^2 - h_0^2}{L'} \quad (3)$$

式中 q 为单位长度渗沟由沟壁一侧流入沟内的流量 $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$; K 为含水层中水流的渗透系数 (m/s) ; H 为含水层内地下水位的高度 (m) ; h_0 为渗沟内的水流深度 (m) ; L' 为地下水位受渗沟影响而降落的水平距离 (m) 。

表 1 公路路基排水的渗流模型

Table 1 Seepage models for drainage inside roadbed of expressway

渗流方式	类型	适用条件
稳定流	无降雨入渗模型	西北干旱地区排水设计, 如新疆地区。
	连续降雨入渗模型	西南多雨地区降雨期间排水设计, 如四川地区。
非稳定流	降雨停止后模型	西南多雨地区, 降雨间断数日后盲沟排水设计。
	阶段性降雨模型	西南多雨地区, 阶段性降雨叠加后盲沟排水设计。

2.2 连续降雨入渗模型

我国西南地区春夏季节降雨频繁, 在排水设计时必须考虑连续降雨期间雨水入渗补给路基内部地下水使水位短期内抬高的情况, 以免水位过高而浸泡软化路基填土, 造成路基翻浆。连续降雨时可概化为降雨入渗补给地下水的水量与排水量相等^[2], 则路基内的地下水流属于稳定流, 盲沟布置如图 1 所示。

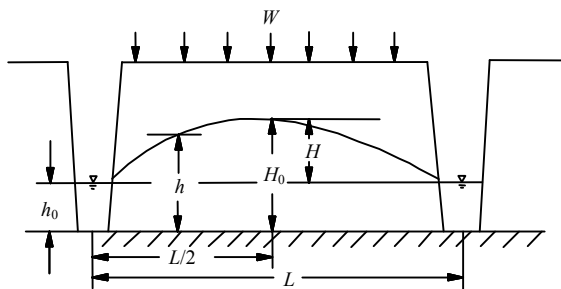


图 1 盲沟布置图

Fig.1 The layout of blind channel

路基盲沟排水的数学模型为

$$K \frac{d}{dx} \left(h \frac{dh}{dx} \right) + W = 0, \quad h|_{x=0} = h_0, \quad h|_{x=L} = h_0 \quad (4)$$

将式 (4) 微分号中 h 看作平均值 h_m , $h_m = \frac{1}{2}(H_0 + h_0)$, 此时方程可简化为

$$\frac{d^2 h}{dx^2} = -\frac{W}{Kh_m} \quad (5)$$

求出其解为

$$h^2 = h_0^2 + \frac{W}{K}(Lx - x^2) \quad (6)$$

式中 W 为入渗强度 (m/d) ; L 为两沟间距 (m) 。式 (6) 就是绘制盲沟间浸润曲线方程。在盲沟间中心, 当 $x=L/2$ 处水位最高, 此时最高水位为 $h_{\max}$, 一般用中心点水位 H_0 表示:

$$h_{\max}^2 = H_0^2 = h_0^2 + \frac{WL^2}{4K} \quad (7)$$

由式 (7) 可以解出入渗条件下盲沟间距:

$$L = 2\sqrt{\frac{K}{W}(H_0^2 - h_0^2)} \quad (8)$$

2.3 降雨停止后渗流模型

春夏季节连续降雨期间, 雨水入渗补给地下水, 使路基内水位抬高。降雨停止后, 尽管盲沟在排出地下水, 降低水位, 但是水位将降至设计值仍需一段时间, 如果排水时间过长, 容易形成路基软化、塌陷^[3,4], 有必要建立降雨停止后路基排水的渗流模型, 用于计算排水时间。雨停后沟内地下水很快排出, 降为原来水位, 而盲沟间地下水位不能立即恢复, 接近水平。设此时水位作为初始水位 H_0 , 沟内水位为 h_0 , 降雨停止, $W=0$, 所以路基排水的渗流模型可用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} K \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial h}{\partial x} \right) &= \mu \frac{\partial h}{\partial t}, & 0 < x < L, & t > 0 \\ h(x, 0) &= H_0, & 0 < x < L \\ h(0, t) &= h_0, & t > 0 \\ h(L, t) &= h_0, & t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

仍将微分号中的 h 看作 h_m , 并令 $a = \frac{Kh_m}{\mu}$ (导压系数 (m^2/d)), 采用拉氏变换求出式 (9) 的解:

$$h - h_0 = H[1 - G(\bar{x}, \bar{t})] \quad (10)$$

式中 h 为盲沟间任一点、任一时刻的地下水位值 (m) ; H 为水头差, $H = H_0 - h_0$; $G(\bar{x}, \bar{t})$ 为系数, 其值可以用下面级数表示:

$$G(\bar{x}, \bar{t}) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{2 \cos[(1-\bar{x})\frac{(2n-1)\pi}{2}]}{(2n-1)\pi} e^{-\left[\frac{(2n-1)^2}{2}\right] \bar{t}} \quad (11)$$

式中 $\bar{t}$ 为相对时间, $\bar{t} = 4at/L^2$; $\bar{x}$ 为相对距离, $\bar{x} = 2x/L$ 。

式 (10) 为盲沟间浸润曲线方程。当 $\bar{t} > 0.3$ 时, 级数只需取第一项, 即 $n=1$, 此时盲沟中心点 $x=L/2$ 处水位值 $h=h_1$, 将 $\bar{x}=2x/L=1$ 代入式 (10),

取对数并整理得:

$$L = \pi \sqrt{\frac{Kh_m t}{\mu \ln 4H/(h_1 - h_0)}} \quad (12)$$

在此情况下渗沟中水流量为

$$q = K \frac{h_1^2 - h_0^2}{L} \quad (13)$$

式中 h_1 为 t 时刻沟中点的水位; μ 为含水层给水度; t 为计算时刻; 其它符号意义同前。

2.4 阶段性降雨渗流模型

西部多雨地区两次降雨期间, 路基内部地下水未来得及排出, 使地下水位再次抬升, 这时需要计算在阶段性入渗的影响下地下水位变化规律, 利用水流迭加原理来求得^[5, 6]。

入渗条件下地下水运动方程为

$$\left. \begin{aligned} a \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{W}{\mu} &= \frac{\partial h}{\partial t}, & 0 < x < L, t > 0 \\ h(x, 0) &= H_0, & 0 < x < L \\ h(0, t) &= h_0, & t > 0 \\ h(L, t) &= h_0, & t > 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

如果设降雨入渗强度为 W , 降雨入渗持续时间为 t_1 , 求出任一时间两沟中心点处的水位升幅 ΔH 表达式为

$$\Delta H = \frac{Wt}{\mu} \eta \quad (15)$$

式中 Wt/μ 为无排水设备的水位升幅; η 为调节系数, 反映渗沟对中心点地下水位上升的控制作用。 η 为相对时间 $\bar{t}$ 的函数, 在 $\bar{t} < 0.05$ 时, η 接近于 1; 在 $\bar{t} > 0.05$ 时 η 可用下式表示:

$$\eta = \frac{1}{\bar{t}} \left[\frac{1}{2} + \frac{16}{\pi^3} e^{-\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \bar{t}} \right] \quad (16)$$

如果在某段时间内水位有 n 次变化, 可求其 n 次和, 即

$$\Delta H = \frac{Wt}{\mu} \eta + \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^n [(W_i - W_{i-1})(t - t_i) \eta_{\bar{t}-\bar{t}_i}] \quad (17)$$

可求得在盲沟间距已知条件下地下水位随时间的变化规律。

3 工程应用

3.1 工程概况

重庆万县—梁平高速公路 B 合同段 (k6+790~k6+970) 横穿过唐家院子滑坡后缘, 属于半挖半填高填方路基。该段因施工填土松散和连降暴雨, 致使坡体失稳产生滑移变形破坏, 滑坡体及周界出现

多处张开拉裂, 危及高速公路路基。设计方案中针对滑坡体拟采用堵、截、排地表水和地下水的措施, 即边沟排除坡体和路面地表水, 盲沟排除路基地下水, 截水沟拦截边坡地表水, 排水孔排除边坡地下水。已知条件为: 路基内初始水位 $H_0 = 4.5$ m, 盲沟内初始水位 $h_0 = 0$ m, 要求路基最大水位降深 $H_{\max} = 2.0$ m, 路基填土的渗透系数 $K = 0.032$ 3 m/d, 设计降雨入渗强度 $W = 0.08$ m/d, 路面入渗系数 $\alpha = 0.02$ m/d, 路基填土给水度 $\mu = 0.08$, 设计排水盲沟的间距和排水时间。

3.2 盲沟间距和排水时间的设计

因该工程处于重庆地区, 产生滑坡及路基沉降的主要原因为连降暴雨, 地下水位迅速增长所致。因此路基排水盲沟设计时应选用连续降雨入渗模型。

将上述已知条件代入式 (8), 同时考虑在一定时间内需要达到预期降水效果, 可得出盲沟间距 $L = 8.0$ m。降雨停止后, 盲沟排出地下水所需时间的确定, 应选择降雨停止后渗流模型。盲沟间距确定后, 由式 (12) 可推导出 2 个盲沟中点位置处水位降深 h_1 与排水时间 t 的关系式, 即可得到他们的变化关系曲线, 见图 2。由式 (12) 和式 (13) 得到盲沟单位长度排水量 q 随排水时间 t 的变化关系曲线见图 3。

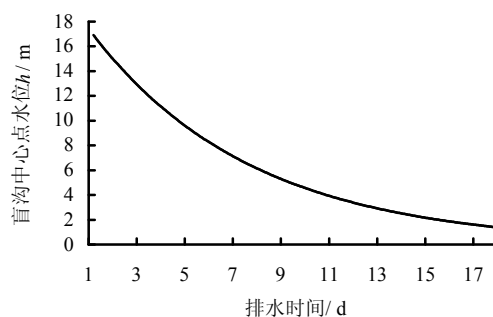


图2 h - t 关系图

Fig.2 The curve of relation of h and t

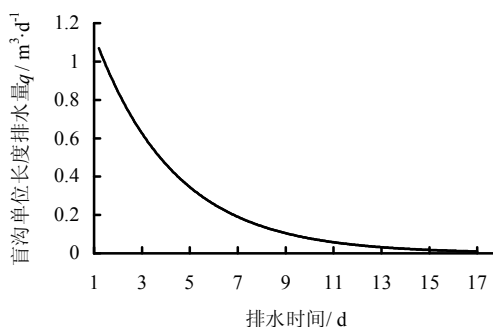


图3 q - t 关系曲线图

Fig.3 The curve of relation of q and t

从图 2 和图 3 可以看出,盲沟在地下水位较高时排水量较大,随着时间增长排水量逐渐减小,水位下降速度逐渐减慢。盲沟间距设置为 8.0 m,在路基内水位最高时,单位长度盲沟的最大排水量达 $1.0 \text{ m}^3/\text{d}$,盲沟最大排水量符合规范要求。降雨停止 16 d 内排水系统可将路基内地下水位降至设计值。

4 结 语

西部公路路基排水设计中大多采用盲沟排水,但是对于设置盲沟的间距和排水时间的计算并没有统一模式。本文将农田水利排水渗流模型的研究成果引入公路路基排水的设计计算中,以重庆市某半挖半填路基为例,说明该模型能够反映路基内部地下水运动的基本规律,并可以预测路基内部地下水位降至设计值所需要的时间和进行排水量计算,而且方法简单,具有较好的实用性和操作性。

参 考 文 献

- [1] 魏云杰,许模,卢书强,等.西部公路路基内部排水效果模拟研究[J].中国地质灾害防治学报.2003,14(1): 31—34.
WEI Yun-jie, XU Mo, LU Shu-qiang, et al. Simulation study of drainage effect inside roadbed of expressway in the west of China[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard And Control*, 2003, 14(1): 31—34.
- [2] 魏云杰,许模,刘健. Visual Modflow 软件及其在砂岩型铀矿成矿水文地质条件研究中的应用潜力分析[J]. 铀矿地质, 2003, (1): 53—57.
WEI Yun-jie, XU Mo, LIU Jian. Visual Modflow software and analysis of its application potential in study hydrogeological conditions of metallogenesis of sandstone-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 2003, 19(1): 53—57.
- [3] 刘杰,王媛,刘宁.岩土工程渗流参数反问题[J].岩土力学,2002,4(2): 152—161.
LIU Jie, WANG Yuan, LIU Ning. Parameter inverse problem in geotechnical engineering seepage[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 4(2): 152—161.
- [4] 杨米加,贺永年.岩体裂隙结构模型及其渗流规律研究[J].岩土力学,1998,19(4): 8—13.
YANG Mi-jia, HE Yong-nian. Fissure model of rock mass and its application to seepage analyses[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 19 (4): 8—13.
- [5] 速宝玉,詹美理,张祝添.充填裂隙渗流特性实验研究[J].岩土力学,1994,15(4): 46—52.
SU Bao-yu, ZHAN Mei-li, ZHANG Zhu-tian. Experimental research of seepage characteristic for filled fracture [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(4): 46—52.
- [6] 宋晓晨,徐卫亚.非饱和带裂隙岩体渗流的特点和概念模型[J].岩土力学,2004,25(3): 407—411.
SONG Xiao-cheng, XU Wei-ya. Features and conceptual models of flow in fractured vadose zone[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(3): 407—411.

Third Asian Conference on Unsaturated Soils Call for papers

The Third Asian Conference on Unsaturated Soils will be jointly organised by Hohai University, Nanjing Hydraulic Research Institute and Zhejiang University. The conference will be held in Nanjing, China, in 21-23 April, 2007.

Conference Theme: The theme of the conference is "From theory to practice". Abstracts are invited for topics related to the following sub-themes: - Fundamental behavior of unsaturated soils; - Testing techniques and field measurements; - Expansive soils and loess; - Slope stability; - Waste disposal and contaminated sites

Official Language: The official language of the conference will be English.

Conference Program: The three days conference program consists of keynote lectures, state of the art presentations and paper presentations. A half-day technical visit will be organised to visit selected infrastructure projects in Nanjing, geotechnical engineering laboratory of Hohai University and geotechnical centrifuge facility of Nanjing Hydraulic Research Institute. Post-conference tour to the region will be arranged. Further details of the program, registration procedures, transportation, accommodation and other issues relating to the Conference will be announced in January 2006.

Call for papers: Authors are invited to submit abstracts with approximately 300 words. Abstracts shall clearly summarise purposes, development and conclusions of the potential paper. Authors should specify the topic(s) addressed by the paper. Abstracts, including the complete title of the paper, authors' names, addresses, phone and fax numbers, and e-mail addresses, should be submitted by mail, fax or e-mail.

Abstracts shall be submitted to Conference Secretariat (c/o Dr Zhonghui Zhao)

Third Asian Conference on Unsaturated Soils Institute of Geotechnical Engineering

Hohai University : 1 Xikang Road, Nanjing 210098 CHINA

Fax: 86 (0)25 8371 3073 E-mail: geotech2@hhu.edu.cn

(www.geohohai.com)