

降雨条件下双层土斜坡稳定性的简化分析方法

吕特^{1,2}, 张洁^{1,2}, 郑文棠³, 于永堂⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663; 4. 机械工业勘察设计院有限公司, 西安 710043)

摘要: Green-Ampt 模型原理简单、使用方便, 在浅层滑坡的降雨入渗分析中有很大的应用潜力。推导了适用于双层土斜坡的 Green-Ampt 降雨入渗分析模型, 并给出了降雨入渗量随降雨时间变化的解析表达式。提出的模型预测的孔隙水压力分布与 Richards 模型预测结果类似。在此基础上, 基于极限平衡法提出了双层土斜坡的安全系数计算方法。研究表明, 随着降雨时间的增加, 湿润锋位置逐渐下移, 安全系数随着也慢慢减小。当下层土强度较高时, 最危险滑动面位于第一层土体的底部, 在一段时间内安全系数将不随时间发生变化。但当雨水入渗深度足够大时, 最危险滑动面重新位于湿润锋位置处, 此时安全系数将随着入渗深度的增加再次增加。斜坡安全系数降低的速率随着降雨强度和斜坡坡度的增加而增加, 因而在相同条件下高强降雨及坡度较陡斜坡更为危险。方法计算简便, 可以更方便的应用于工程实践, 并且具有继续研究的价值。

关键词: 降雨; Green-Ampt 模型; 斜坡; 稳定性

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)02-0119-05

Simplified Method for Stability Analysis of Two-layered Slope Under Rainfall Infiltration

LÜ Te^{1,2}, ZHANG Jie^{1,2}, ZHENG Wentang³, YU Yongtang⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Education Ministry, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

4. China Jikan Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: Due to its ease to use, the Green-Ampt model is potentially very useful for infiltration analysis for predicting of slope failure. In this study, the governing equation for infiltration analysis on sloping surfaces in layered soils is derived. The depth of wetting front predicted from the modified Green-Ampt model is close to that predicted based on Richards' function. Based on the limit equilibrium method, the safety factor calculation in layered slope is proposed. Research shows that along with the increase of the rainfall, the wetting front position down gradually and the safety factor decreases. When the lower soil's strength is higher, the most dangerous sliding surface will be at the bottom of the first layer of soil, the safety factor will not change with time. However, when the infiltration depth is large enough, the most dangerous sliding surface will locate at the wetting front again, the safety factor will change. And, the safety factor is influenced by the rainfall intensity and slope angle, thus the slope will be more instability under the condition of high rainfall strength and steep slopes. In this paper, the modified method is simple, can be more easily applied to the engineering practice, and has value to further study.

Key words: rainfall; green-ampt model; landslide; stability

我国是一个多山丘陵国家, 在地形起伏的区域

建设有大量的能源、交通等重要基础设施。而在这些区域, 降雨引起的斜坡失稳是常见的自然灾害之一。降雨入渗过程中斜坡体内孔隙水压力的分布是斜坡稳定性分析的关键。目前, 降雨入渗分析多基于 Richards 方程进行。该模型物理意义明确, 但存在求解难度大、且在一定条件下难以收敛的缺点^[1]。为克服这一不足, 近年来一些学者开始尝试

收稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372275); 国家科技支撑计划资助项目(2013BAJ06B00)

作者简介: 吕特(1989), 男, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性分析研究的工作(e-mail) celvte2014@gmail.com。

采用水文水资源领域常用的 Green-Ampt 模型来求解降雨条件下斜坡中的孔隙水压力分布^[2-3]。

Green-Ampt 模型最早由 Green 和 Ampt^[4] 提出, 该模型假设入渗过程存在明显的湿润锋, 该湿润锋将土层分成饱和区和非饱和区两个区域。由于 Green-Ampt 模型由于计算简单, 使用方便, 在农业、水文、水资源领域得到了广泛的发展和应用。例如, Bouwer 和 Childs 等^[5-6] 推导了适用于水平层状土的 Green-Ampt 入渗模型; Fok^[7] 将平均渗透系数的概念引入模型中, 得到了水平双层土中累计入渗量和降雨时间的解析解表达式。Moore^[8] 推到了考虑积水产生时间的层状土层条件下的 Green-Ampt 入渗模型。Chen 和 Young^[9] 研究了倾斜均质地层条件下的降雨入渗模型。

在自然界中不少滑坡是在双层土地层中发生的^[10]。然而, 现有 Green-Ampt 模型仅能模拟水平成层土层或倾斜均质土层中的入渗过程, 这为 Green-Ampt 模型在降雨条件下斜坡稳定性评价中的进一步应用形成了障碍。针对这一不足, 本文的目的是推导适用于双层土斜坡降雨入渗分析的 Green-Ampt 模型, 在此基础上提出降雨条件下双层土斜坡的稳定性分析方法。论文将首先推导双层土斜坡条件下累计入渗量和降雨时间的解析表达式。然后, 通过与现有解析解以及 Richards 方程求解结果进行对比, 对提出的模型进行验证。之后, 基于提出的 Green-Ampt 模型建立降雨条件下双层土斜坡安全系数的求解方法, 并利用提出的模型对双层土斜坡稳定性的影响因素进行分析。本论文将为降雨条件下双层土斜坡的稳定性分析提供一种简单、实用、高效的计算方法。

1 适用于双层土斜坡的 Green-Ampt 模型

1.1 多层土斜坡中降雨入渗控制方程

本文考察的多层土斜坡如图 1 所示, 边坡的坡角为 α , 降雨强度为 q 。根据达西定律, 通过土体的流量 Q 可以表达为:

$$Q = \frac{iA \sum_{j=1}^m y_j}{\sum_{j=1}^m \frac{y_j}{k_j}} \quad (1)$$

式中: i 为土层的总水力梯度; y_j 为第 j 层土的厚度; k_j 为第 j 层土的渗透系数; A 为渗流的土体断面积。

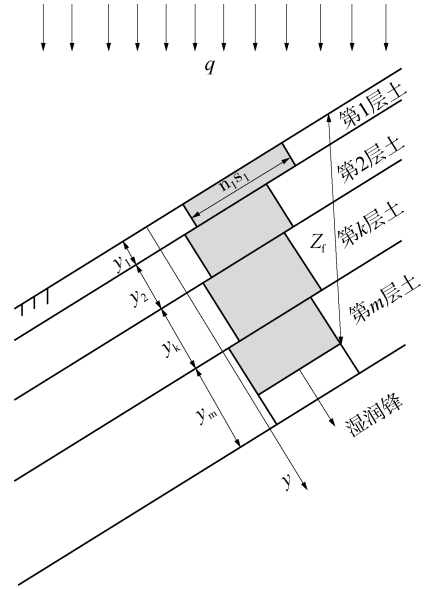


图1 倾斜成层地层中降雨入渗分析示意图

Fig. 1 Infiltration Analysis in a Layered Slope

根据连续方程, 流量 Q 也可按下式计算:

$$Q = An_k s_k \frac{dy_k}{dt_k} \quad (2)$$

式中: n_k 为第 k 层土的孔隙度; s_k 为第 k 层土的饱和度净增量; $n_k s_k$ 为第 k 层土中的含水量的变化量; t_k 为第 k 层土中的入渗时间。

垂直于斜坡坡面的水力梯度 i 可按下式计算

$$i = \frac{s_{f_m} + \cos\alpha \sum_{j=1}^m y_j}{\sum_{j=1}^m y_j} \quad (3)$$

综合式(1)、(2)、(3), 可得成层土中降雨入渗深度的控制方程为:

$$\frac{dy_m}{dt_m} = \frac{(s_{f_m} + \cos\alpha \sum_{j=1}^{m-1} y_j) + y_m \cos\alpha}{n_m s_m \left(\sum_{j=1}^{m-1} \frac{y_j}{k_j} + \frac{y_m}{k_m} \right)} \quad (4)$$

1.2 双层土斜坡中累计入渗量与降雨时间的解析关系

在很多情况下, 浅层滑坡是在双层土体中发生的^[8]。双层土斜坡中降雨入渗可分为两个阶段: (1) 雨水在第一个土层中入渗, 此时湿润锋位于第一层土中; (2) 第一层土全部饱和, 雨水入渗至第二层, 此时湿润锋位于第二层土中。第一种情况与 Chen 和 Young^[9] 中研究的问题相同, 即为倾斜均质土层中的降雨入渗问题。本文重点研究降雨入渗

到第二层土体中的情况。令 $m=2$, 由式(4)可得:

$$\frac{dy_2}{dt_2} = \frac{s_{p2} + \cos\alpha(y_1 + y_2)}{n_2 s_2 \left(\frac{y_1}{k_1} + \frac{y_2}{k_2} \right)} \quad (5)$$

根据质量守恒定律, 累积入渗量 F 可按下式计算:

$$F = n_1 s_1 y_1 + n_2 s_2 y_2 \quad (6)$$

将式(6)代入(5)中, 替换掉参数 y_2 得到累积入渗量与降雨历时的关系式:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{k_1 k_2 F \cos\alpha + d}{k_1 F + b} \quad (7)$$

其中:

$$b = (k_2 n_2 s_2 - k_1 n_1 s_1) y_1$$

$$d = k_1 k_2 n_2 s_2 (s_{p2} + y_1 \cos\alpha) - k_1 k_2 n_1 s_1 y_1 \cos\alpha$$

式(7)给出了第二层土中产生积水后入渗率与累积入渗量之间的关系。令 t_{p2} 代表斜坡第二层土体表面产生积水的时刻、 F_{p2} 代表第二层土表面产生积水时的累积入渗量。假设第二层土中产生积水前降雨入渗速率为 $q \cos\alpha$, 则 $t_{p2} = F_{p2}/q \cos\alpha$ 。根据方程(7), 刚刚产生积水时累积入渗量 F_{p2} 与入渗率的关系为:

$$q \cos\alpha = \frac{k_1 k_2 F_{p2} \cos\alpha + d}{k_1 F_{p2} + b} \quad (8)$$

整理得:

$$F_{p2} = \frac{d - q \cos\alpha b}{k_1 q \cos\alpha - k_1 k_2 \cos\alpha} \quad (9)$$

对式(7)进行积分, 并代入初始条件 $t_2 = t_{p2}$ 时, $F = F_{p2}$, 得到入渗至第二层土层中降雨时间与累积入渗量的关系为:

$$t_2 = t_{p2} + \frac{(F - F_{p2})}{k_2 \cos\alpha} + \left(\frac{b}{k_1 k_2 \cos\alpha} - \frac{k_1}{(k_1 k_2 \cos\alpha)^2} d \right) \ln \frac{|k_1 k_2 F \cos\alpha + d|}{|k_1 k_2 F_{p2} \cos\alpha + d|} \quad (10)$$

2 模型验证

2.1 与解析解的比较

令式(10)中 $\alpha = 0$, 累积入渗量与降雨时间的关系为:

$$k_2 (t_2 - t_{p2}) = F - F_{p2} + \left(\frac{y_1 n_2 s_2 k_2}{k_1} - n_2 s_2 (y_1 + s_{p2}) \right) \times \ln \left(\frac{F + n_2 s_2 (y_1 + s_{p2}) - y_1 n_1 s_1}{F_{p2} + n_2 s_2 (y_1 + s_{p2}) - y_1 n_1 s_1} \right) \quad (11)$$

式(11)与文[8]中给出的水平双层地面降雨入渗分析的解析解表达式相同。

2.2 与 Richards 方程的比较

为进一步对本文提出的方法进行验证, 本节将对本文方法计算所得的孔隙水压力分布与 Richards 方程求解的孔隙水压力分布进行比较。算例中斜坡坡角取 $\alpha = 30^\circ$, 土体的水土特征曲线采用文献中常用的 Van Genuthen 模型^[11]:

$$\Theta = [1 + (\alpha h)^n]^{-m} \quad (12)$$

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (13)$$

式中: θ 为体积含水量; Θ 为相对含水量; α 、 m 、 n 为曲线拟合参数; h 为压力水头。当 $m = 1 - 1/n$ 时, 对应于上述水土特征曲线的渗透系数方程可按下面方程计算^[11]:

$$k = k_s \Theta^{1/2} [1 - (1 - \Theta^{1/m})^m]^2 \quad (14)$$

式中: k_s 为土体饱和渗透系数。

在 Green-Ampt 模型中, 输入的水力参数为湿润锋以上土体的渗透系数及湿润锋处的基质吸力。研究表明, Green-Ampt 模型中渗透系数可取为土体饱和渗透系数的 0.7 倍^[12]。湿润锋基质吸力可基于渗透系数方程按下式计算^[13]:

$$s_f = \frac{1}{k_s} \int_{s_i}^0 k(s) ds \quad (15)$$

式中: s 为基质吸力; s_i 为降雨前土体中的初始吸力。

算例中土体参数见表 1。假设斜坡承受的降雨强度为 $q = 1.25 \times 10^{-6}$ m/s, 土体中初始吸力为 20 kPa。取第一层土层厚度 $y_1 = 0.5$ m, 第二层厚度 $y_2 = 1.0$ m。本例中 Richards 方程采用 Seep/W 软件求解。

图 2(a) ~ (d) 给出了不同降雨时刻本文推导的 Green-Ampt 入渗模型和 Richards 方程预测的孔隙水压力分布对比图。从图中可以看出, Richards 方程计算所得的孔隙水分布可分为三个区域: 饱和区、未受降雨影响的非饱和区、以及位于两者之间的过渡区。在不同降雨历时下, 由 Green-Ampt 模型计算的孔隙水压力一直位于 Richards 方程计算所得的孔隙水压力分布的过渡区域内。在第二层土体表面, Richards 方程预测结果中出现了约 2kPa 的正孔隙水压力。在 Green-Ampt 模型中, 湿润锋以上孔隙水压力均为零。总体而言, Green-Ampt 模型计算

所得的孔隙水压力的分布与 Richards 方程计算结果类似。

表 1 土性参数
Table 1 Soil Parameters

	Q_r	Q_s	a /(cm ⁻¹)	n	k_s /(m/s)	c /kPa	φ /°
第一层土	0.034	0.45	0.02	1.41	1.25×10^{-6}	4	15
第二层土	0.067	0.46	0.016	1.37	6.94×10^{-7}	6	21

3 降雨条件下双层土斜坡的安全系数计算方法

本文采用 Green-Ampt 模型计算降雨条件下的孔隙水压力分布,采用极限平衡方法计算出边坡的安全系数。根据 Fredlund 等^[14],降雨条件下无限体斜坡的安全系数可按下式计算:

$$F_s = \frac{c + (\sigma_n - u_a)\tan\varphi + (u_a - u_w)\tan\varphi^b}{\gamma_t z_f \sin\alpha \cos\alpha} \quad (16)$$

式中: c 为有效粘聚力; φ 为有效内摩擦角; z_f 为滑动面沿重力方向距地表的深度(见图 1); u_a 为孔隙气压力; σ_n 为滑动面上总的法向应力,其值为 σ_n 为 $\gamma_t z_f \cos^2\alpha$; u_w 为孔隙水压力; φ_b 为与基质吸力相关的内摩擦角; $u_a - u_w$ 为基质吸力; r_t 为土的重度; z_f 为湿润锋处的人渗深度。

在匀质土层中,最危险滑动面常位于湿润锋处^[3]。因此,在湿润锋位于第一层土体中时,最危险滑动面位置可按湿润锋位置计算。在双层土斜坡的稳定性分析中,如果第二层土的强度较第一层土高,最危险滑动面除可能出现在湿润锋位置,还可能出现在两层土体的界面上。因此,当雨水入渗到第二层土中时,应分别取湿润锋位置和第一层土体底部为最危险滑动面计算斜坡的安全系数,取两者的小值作为斜坡的安全系数。当最危险滑动面在湿润锋位置处时,基质吸力为 $u_a - u_w = s_f \gamma_w$ 。当吸力水平较低时, $\varphi_b \approx \varphi$ ^[14]。由于湿润锋处基质吸力较低,本文假定 $\varphi_b = \varphi$ 。将上述关系带入式(16),可得湿润锋处安全系数的计算表达式为:

$$F_s = \frac{c + \gamma_t z_f \cos^2\alpha \tan\varphi + s_f \gamma_w \tan\varphi}{\gamma_t z_f \sin\alpha \cos\alpha} \quad (17)$$

4 双层土斜坡稳定性的影响因素分析

下面以 2.2 节中研究的双层土斜坡为例对其稳定性的影响因素进行分析。土体的强度参数如表 1 所示。

4.1 降雨历时的影响

假设降雨强度 $q = 1 \times 10^{-6} \text{m/s}$,图 3 给出了安全系数随降雨时间的变化曲线。由图 3 可知,随着降雨时间的增加,湿润锋位置逐渐下移,安全系数随

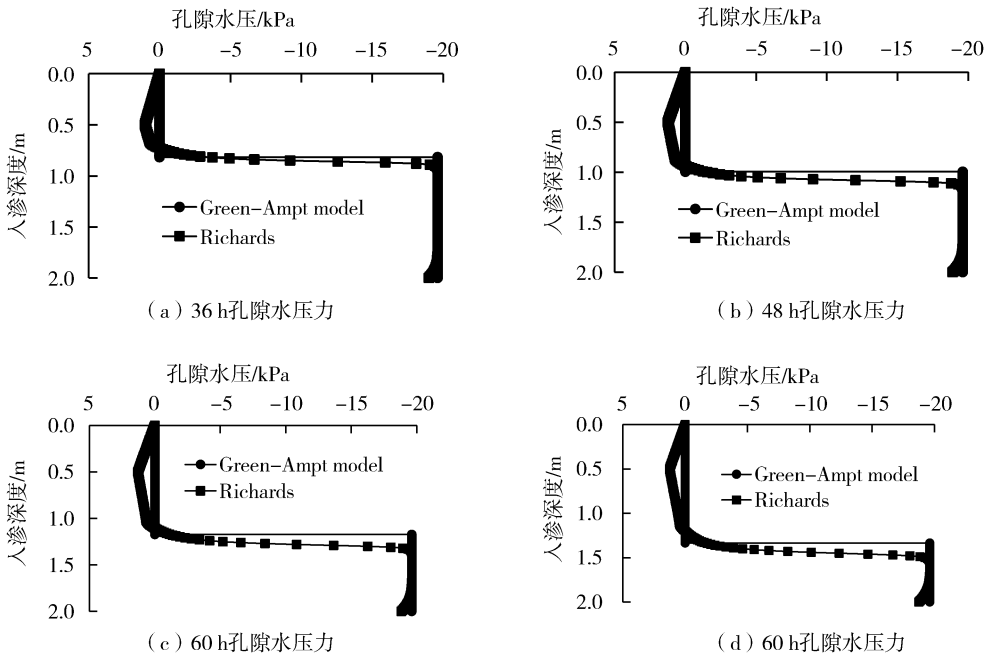


图 2 本文模型和 Richards 方程预测的孔隙水压力分布图

Fig. 2 Comparison of Pore Water Pressure Predicted by the suggested Model and by Richards' Equation

着也慢慢减小。当降雨历时达到 27 h 后, 雨水入渗至第二层土体。由于下层土强度较高, 此时最危险滑动面位于第一层土体的底部, 因此斜坡安全系数维持不变。当雨水入渗深度足够大时, 最危险滑动面重新位于湿润锋位置处, 此时安全系数将随着入渗深度的增加再次增加。在降雨历时 72 h 内, 边坡安全系数始终大于 1.0, 不会发生斜坡失稳。

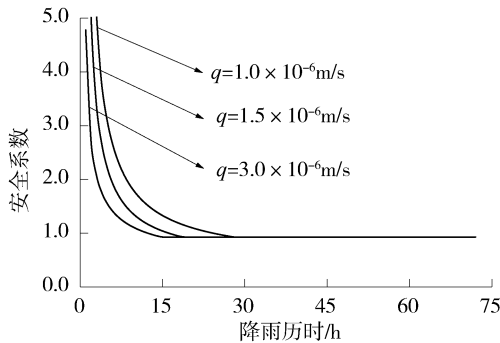


图3 不同雨强条件下边坡安全系数变化曲线

Fig. 3 Variation of Factor of Safety Under Rainfall with Different Intensities

4.2 降雨雨强影响

为研究降雨强度的影响, 图3分别给出了降雨强度分别为 1.0×10^{-6} m/s、 1.5×10^{-6} m/s、 3.0×10^{-6} m/s 条件下安全系数与降雨历时的关系。由图可知, 不同降雨强度下安全系数随降雨时间的变化规律类似: 即在降雨初期, 安全系数随着降雨历时的增加而减小; 一定时间后, 安全系数维持不变。如前所述, 这是因为此时最危险滑动面的位置位于第一层土的底部, 其不随入渗深度的增加而增加。图4还表明, 不同降雨强度下安全系数下降的速度不同, 安全系数下降的速度随降雨强度的增加而增加。

4.3 边坡坡角的影响

为研究坡角的影响, 图5给出了边坡坡角分别为 25° 、 30° 、 35° 、降雨强度为 $q = 1.0 \times 10^{-6}$ m/s 条件下安全系数随降雨历时的变化关系。由图可知, 在研究的坡角变化范围内, 不同坡角条件下安全系数随降雨时间的变化趋势类似; 但坡角越大, 边坡安全系数下降的速度越快。因此, 坡度更大的斜坡在降雨条件下可能更容易失稳。

5 结语

本文推导了适用于双层土斜坡的 Green-Ampt

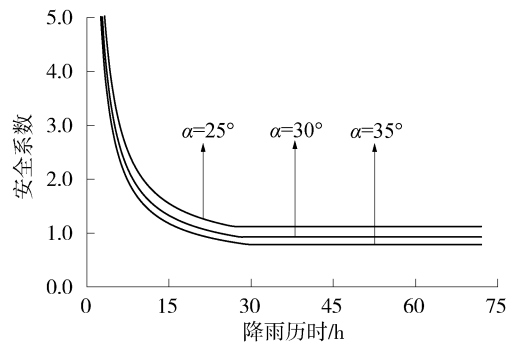


图5 不同坡角下边坡安全系数变化曲线

Fig. 5 Variation of Factor of Safety with Time of Slopes with Different Slope Angles

降雨入渗分析模型, 并给出了双层土斜坡中累计入渗量与降雨时间之间的解析表达式。算例表明: 双层土斜坡中本文模型预测的孔隙水压力分布与 Richards 模型预测结果类似。在此基础上, 基于极限平衡法提出了双层土斜坡的安全系数计算方法。研究表明: 随着降雨时间增加, 湿润锋位置逐渐下移, 安全系数随着也逐渐减小。当湿润锋进入下层土体且下层土强度较高时, 最危险滑动面将位于第一层土体底部, 在一段时间内安全系数不随时间发生变化。但当雨水入渗深度足够大时, 最危险滑动面重新位于湿润锋位置, 此时安全系数将随入渗深度的增加再次增加。此外, 斜坡安全系数降低的速率随着降雨强度和斜坡坡度的增加而增加, 因而在相同条件下高强度降雨和坡度较陡斜坡更为危险。

参考文献:

- [1] PHOON K K, TAN T S, CHONG P C. Numerical simulation of Richards Equation in Partially Saturated Porous Media: Under-Relaxation and Mass Balance [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2007, 25: 525-541.
- [2] MUNTOHAR A S, LIAO H J. Analysis of Rainfall-Induced Infinite Slope Failure During Typhoon Using A Hydrological Geotechnical model [J]. Environmental Geology, 2009, 56 (6): 1145-1159.
- [3] ZHANG J, HUANG H, ZHANG L, et al. Probabilistic Prediction of Rainfall-Induced Slope Failure Using A Mechanics-Based Model [J]. Engineering Geology, 2014, 168: 129-140.
- [4] GREEN W H, AMPT G A. Studies of Soil Physics, Part 1-the Flow of Air and Water Through Soils [J]. Agricultural Science, 1911, 4(1): 1-24.
- [5] BOUWER H. Infiltration of Water into Nonuniform Soil [J]. Irrigation and Drainage Division of ASCE, 1969, 95: 451-462.

(上转第 114 页 Continued on Page 114)

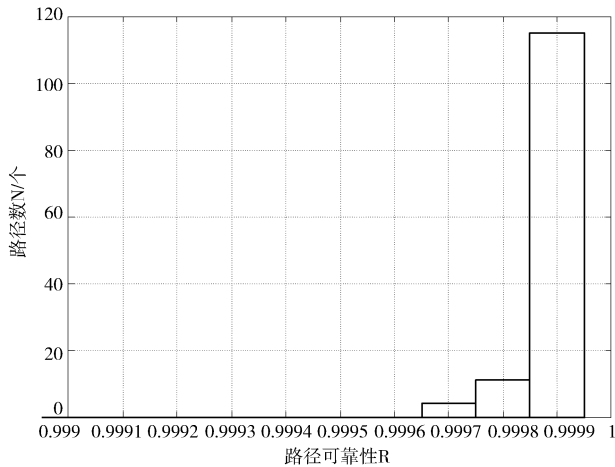


图5 传输网优化后可靠性分布图

Fig. 5 Reliability Distribution Map After Network Optimization

2 结论

本文提出了一种传输网络综合可靠性指数的计算方法,该方法分别求取所有厂站到中心局的双条不相交最短路集并联组成的电路的可靠性,再对各厂站到中心局的电路可靠性求取加权均值去评价传输网的综合可靠性。本方法符合传输网的业务流向特征,符合业务及保护路径配置的一般原则,易于用计算机求解,且得到的综合可靠性指数可以直接反映单位节点的集中型业务的年度故障持续时间,具有较强的实际意义。本方法可用于传输网的可靠性评估、比较和优化效果验证,在实际应用中,直观量化的验证了网络优化对网络可靠性提高的作用。

参考文献:

- [1] 张志华. 可靠性理论及工程应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012年.
- [2] ANTONOPOULOS A, O'REILLY J J, LANE P. A framework for the Availability Assessment of SDH Transport Networks [C]. Proceeding of the Second IEEE Symposium on Computers and Communications, 1997: 666-670.
- [3] WAYNE G. High Availability Path Design in Ring-Based Optical Networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1999, 7(4): 558-574.
- [4] RADOS I, TURALIJA P, SUNARIC T. Availability Model of Bidirectional Line Switched Ring Transparent Optical Networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference, 2001: 312-316.
- [5] DONG T, TRIVEDI K S. Hierarchical Computation of Interval Availability and Related Metrics [C]. Proceeding of Dependable Systems and Networks, 2004 International Conference, 2004: 693-698.
- [6] Massimo T, Guido M, Achille P. Availability Design of Optical Transport Networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(8): 1520-1532.
- [7] VERBRUGGE S, COLLE D, DEMEESTER P. General Availability Model for Multilayer Transport Networks [C]. Design of Reliable Communication Networks, 2005: 85-92.
- [8] 高会生, 赵建立, 王宇, 等. SDH自愈环网有效性模型的研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 91-94.
GAO Huisheng, ZHAO Jianli, WANG Yu. Research on Availability Module in SDH Self-healing Ring Network [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36(1): 91-94.

(责任编辑 郑文棠)

(下接第123页 Continued from Page 123)

- [6] CHILDS E C, BYBORDI M. The Vertical Movement of Water in Stratified Porous Material-1 Infiltration [J]. Water Resources Research, 1969, 5: 446-459.
- [7] FOK Y S. One-Dimensional Infiltration into Layered Soils [J]. Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1970, 90: 121-129.
- [8] MOORE I D. Infiltration Equation Modified for Subsurface Effects [J]. Irrigation and Drainage Division, ASCE, 1981, 107: 71-86.
- [9] CHEN L, YOUNG M H. Gren-Ampt Infiltration Model for Sloping Surfaces [J]. Catena, 1991, 1(18): 91-111.
- [10] SUNG Euncho. Infiltration Analysis to Evaluate the Surficial Stability of Two-Layered Slopes Considering Rainfall Characteristics [J]. Engineering Geology, 2009, 105: 32-43.
- [11] GENUCHTEN M T Van. A Closed-Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.

- [12] 吕特, 张洁, XUE Jianfeng. Green-Ampt模型渗透系数取值方法研究 [J]. 岩土力学(增刊)录用, 2015.
- [13] TE L V, ZHANG Jie. On Permeability Coefficient of Green-Ampt Model [J]. Rock and Soil Mechanics, Accepted.
- [14] MEIN R G, FARRELL D A. Determination of Wetting Front Suction in the Green-Ampt Equation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1974, 38: 872-876.
- [15] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The Shear Strength of Unsaturated Soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.

(责任编辑 林希平)