

干旱地区路堑边坡失稳的机理及稳定性分析方法

冯守中^{1,2}, 闫澍旺², 崔 琳²

(1. 上海朗琦土木工程有限公司 上海 200092; 2. 天津大学 建工学院, 天津 300072.)

摘 要: 水对边坡的失稳有很大的影响, 在内蒙古西部干旱地区, 往往由于集中降雨导致大量的路堑边坡失稳破坏, 本文分析了降雨对边坡的不利影响, 提出了考虑降雨作用的边坡稳定分析方法, 并通过工程实例对该地区的边坡稳定性进行数值分析计算, 其方法对干旱地区的路堑边坡设计及稳定性评价具有重要的借鉴意义。

关 键 词: 干旱地区; 路堑边坡; 降雨; 稳定性分析; 有限元法

中图分类号: T 547

文献标识码: A

Instability mechanism of highway slope in arid areas and its stability analysis

FENG Shou-zhong¹, YAN Shu-wang², CUI Lin²

(1. Shanghai Lucky Civil Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Rainfall in the western part of Inner Mongolia Autonomous Region is very rare. In this area, the limited rainfalls usually concentrate in a short period, which sometimes cause the instability of highway slope. The instability mechanism of highway slope caused by rainfalls in arid area is discussed; and the analysis method for slope stability evaluation is suggested. A practical case study is carried out by using the proposed theory and FE method. The method proposed can be for reference in researching and designing highway slopes in similar area.

Key words: arid area; highway slope; rainfall; stability analysis; FEM

1 概 述

边坡的失稳与许多因素有关, 如地质构造、岩土性质、地形地貌、气候条件、地表水作用、地下水活动、地震、人类工程活动等都可以引起滑坡等边坡失稳现象。但水是导致边坡失稳的重要条件之一, 崩塌、滑坡、泥石流等边坡失稳现象的发生和发展多受降水等因素的控制。国内外统计结果表明, 降雨型滑坡约占滑坡总数的 70 %, 而 95 % 的滑坡发生于雨季^[1-6], 因此有必要对滑坡与降雨的关系进行研究。国内外研究人员对降雨型滑坡的形成机理、降雨强度与滑坡的关系、以及预测预报理论与防治对策等方面进行了比较全面的研究^[7-12]。我国内蒙古西部广大西北部地区, 平均年降雨量往往较小, 但降雨期较集中, 一般雨季常占全年降雨量的

70 %, 一次降雨时间短, 强度大, 对公路边坡极具破坏力, 在干旱地区, 公路建设和营运过程中, 往往在雨季发生公路边坡的垮塌和毁坏现象。边坡破坏按运动方式可分为崩塌、倾倒、滑动、侧向扩离和流动等五种基本类型。这其中, 尤以土坡在降雨浸润下由于土体强度降低而产生的崩塌和滑动破坏最为常见。目前国内对这方面有针对性的研究工作还比较少。随着高速公路建设的快速发展, 此类问题发生越来越频繁, 因此有必要进行比较深入的研究。

2 降雨对边坡稳定影响的机理分析

水是产生边坡失稳的重要因素, 地表水的冲刷, 地下水的活动与其水压力以及暴雨激发等往往是诱发边坡失稳的主要因素。边坡失稳与降雨历时

有密切关系。资料表明, 降雨时间越集中, 滑坡发生的越多。内蒙古干旱地区即属于这种情况。降雨对岩石边坡和土质边坡稳定性的作用机理不同。

2.1 降雨对岩石边坡的影响

对岩石边坡而言, 降雨的不利作用主要表现在降低岩体强度、抬高地下水位和加大边坡内孔隙压力等方面:

(1) 对于岩石边坡稳定来说, 起控制作用的是岩体结构面的强度。岩体结构面分为硬质结构面与软弱结构面。水的介入对于硬质结构面的强度并无影响, 而软弱结构面遇水后, 特别是在原来充填介质含水量很少, 降雨后却显著加大时, 充填的软弱物进一步软化, 其抗剪强度显著降低。

(2) 一次降雨使山体地下水位升高的幅度与水文地质条件有密切关系。在某些条件下, 地下水位能大幅度升高, 而在山坡较缓且地下水位在弱风化层以上条件下, 由于岩体孔隙率大, 水位升高可能极为有限。

(3) 一般情况下, 岩石裂隙发育程度随深度而减弱, 雨水从地表渗入裂隙很容易, 而从深层岩体排走则十分困难。雨水入渗裂隙, 在重力作用下, 首先以较快的速度沿裂隙向下流, 然后再缓慢地由裂隙渗入岩体孔隙。降雨可使山体地下水位以上非饱和区形成暂态饱和区, 使边坡内孔隙压力加大, 这对边坡稳定的影响不能忽视。

2.2 降雨对土质边坡的影响

对土质边坡而言, 土体的无侧限抗压强度随着含水量的增长而逐步降低, 降雨对土质边坡具有侵蚀作用。

(1) 降雨溅蚀是垂直降落的雨滴击溅边坡土壤将其搬离原位而产生的侵蚀。在边坡面上击溅起来的土粒大部分向下坡方向运动。雨滴溅蚀力的大小与雨滴到达地面时所具有的动能成正比。雨强越大, 雨滴直径越大, 其动能越大, 溅蚀力越强。

(2) 面状侵蚀是坡面发育中的主要侵蚀形式。它是指面流在流动过程中比较均匀地冲刷整个坡面的松散物质, 长期的侵蚀将使边坡中部表土下移, 中部凹陷而坡顶凸出。由坡面上搬运的侵蚀物质大都堆积在坡脚, 久而久之, 坡脚处形成深厚的堆积层。坡面剖面为上凸、中凹、下直的形态。

(3) 水流汇集于低凹处或浅状延伸的沟槽, 在超过低凹处或沟槽的蓄水能力后开始形成线状流。时分时合的线状流随着后续水流的汇集。逐渐聚集成股状水流, 并产生细沟侵蚀, 形成细沟。侵蚀沟是坡面最显著的特征之一, 在侵蚀严重的边坡上,

密布的侵蚀沟将坡面切割得支离破碎。沟状水流所具有的侵蚀和搬运力远远大于雨滴溅蚀和坡面水流的侵蚀和搬运力, 因而是新开挖边坡破坏直至失稳的重要外力。

3 考虑降雨作用的边坡稳定分析的极限平衡方法

边坡稳定性计算方法广泛采用极限平衡条分法, 但残积土、膨胀土、黄土人工边坡这类降雨雨水入渗作用明显的边坡, 由于常规的计算方法(如 Bishop 法等)难以准确反映降雨作用的影响, 因而这类情况的稳定性分析尚未达到令人满意的程度。目前针对这个问题的主要有如下几种极限平衡分析方法:

(1) 在极限平衡条分法中考虑雨水水分入渗的影响的方法。该方法通过在分析中引入一个孔隙水压力系数来反映其作用效果, 但孔隙水压力系数是一个非常粗略的概念, 并且计算中如何根据雨水入渗的情况确定其大小尚未从理论上解决。

(2) 考虑渗透力作用的边坡稳定计算方法。通过有限单元法或其他一些简化方法得到边坡的渗流场及各个节点的渗透力, 将渗透力作为边坡稳定计算中的外荷载求其安全系数。该方法从渗流角度考虑土中水分运动产生的渗透力对边坡稳定的影响, 这样的处理方法并没有从理论上解决土中水分的入渗使土体软化, 导致土体抗剪强度下降的问题。严格来说, 降雨入渗的水分运动情况和通常的渗流是有差异的, 二者得到的解答不一样, 因而通常的渗流分析并不完全符合降雨入渗的情况。

(3) 考虑残余强度的分析方法。认为雨水入渗导致土体发生软化, 使土体抗剪强度随着变形的发展逐渐趋于残余强度, 因而在分析中通过对土体抗剪峰值强度进行折减, 直至取土的残余强度来反映降雨作用的不同影响程度。该方法也属于近似处理方法, 在计算中如何确定降雨影响作用的程度, 依经验选取土的强度指标。

(4) 非饱和土抗剪强度理论的分析方法。虽然国内外不同学者都提出了不同的抗剪强度理论, 但被工程界广泛接受的是 Fredlund 提出的抗剪强度公式, 他突破了传统只用单值的有效应力描述非饱和土特性的方法, 用 $(\sigma_n - u_a)$ 和 $(u_a - u_w)$ 两个独立的变量来描述非饱和土的应力状态, 相应公式为

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (1)$$

式中: φ^b 为因基质吸力作用而引起的抗剪强度增长

率的角; $(\sigma_n - u_a)$ 为净法向压力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力。

然后, 用极限平衡方法 (简化的 Bishop 方法或 Janbu 方法) 得出土坡的安全系数。

4 降雨入渗深度的计算

国内外对于非饱和土在降雨作用下的入渗深度的计算大致有两种方法。

国外经验方法。国外计算方法以 Pradel & Raad 为代表。对于评价长时间降雨作用下的土坡稳定性, Pradel & Raad 提出了一种可以考虑降雨强度、降雨持时、重现期以及前期条件的方法。为了使土体饱和和浸润到一定深度 z_w , 必须满足两个条件: ①降雨强度必须大于土的入渗率; ②降雨的时间必须足够长以便饱和和浸润土体至深度 z_w 。通过扩展 Green & Ampt 的入渗模型, Pradel & Raad 提出了降雨饱和和浸润到深度 z_w 所需要的时间如下式:

$$T_w = \frac{(\theta_s - \theta_0)}{k} \left[z_w - s \ln \left(\frac{s + z_w}{s} \right) \right] \quad (2)$$

式中: θ_s 、 θ_0 分别为土体的饱和体积含水量和实测体积含水量; s 为土体浸润锋面的毛细吸力 (以水柱高度 m 计); k 为土体湿润区的导水率 (渗透系数)。

为了保证浸润锋面穿透直至深度 z_w , 临界降雨持续时间 $T_{\min} \geq T_w$ 并且界限降雨强度 $I_{\min} \geq v_i$ 以确保浸润锋面以后的土体充分饱和。水进入土体的入渗率用下式计算:

$$v_i = k \left[\frac{z_w + s}{z_w} \right] \quad (3)$$

国内方法。具有代表性的是李焯芬等人在多年研究香港地区土坡的基础之上, 提出了求解降雨浸湿带 (100 % 饱和区) 的公式。他把上覆饱和土与下覆非饱和土之间的过渡带简化成“浸湿前带”。该带的极限发展率为下式:

$$v = \frac{k}{(1 - s_0)n} \quad (4)$$

浸湿带的深度为下式:

$$h = \frac{kt}{(1 - s_0)n} \quad (5)$$

式 (4)、(5) 中: k 为饱和导水率; s_0 为初始饱和度; n 为孔隙率; t 为降雨持时。

根据对本地区的实际工程和研究测试, 结果表明对于实际的高填土土坡, 降雨入渗很难超过 2.0 m。

5 边坡稳定性计算的有限元方法

在边坡稳定性分析中, 有限元方法可以考虑比较复杂的边界条件和岩土参数的变化, 给出边坡在环境条件变化时的位移场和应力场, 为研究者提供更丰富的有价值的信息, 特别是通用的商业软件 PLAXIS 有限元程序采用了强度参数降低法, 还可以给出传统意义上的安全系数。通常在结构工程中, 安全系数定义为极限荷载与工作荷载之比值。但在岩土工程中, 这一定义过于笼统, 不能反映岩土性质变化对土工结构物整体稳定的影响。土工结构的安全系数一般定义为结构所具有的承载力与承受荷载所需要的承载力之比, 即

$$F_s = \frac{S_{\max}}{S_{\text{needed}}} \quad (6)$$

式中: $S_{\max}$ 为最大的剪应力; S_{needed} 为维持整体平衡所需的最小剪应力。

PLAXIS 有限元程序为了考虑岩土性质变化对土工结构物整体稳定的影响, 当采用莫尔-库仑模型时, 将安全系数 F_s 定义为

$$F_s = \frac{c + \sigma_n \tan \varphi}{c_r + \sigma_n \tan \varphi_r} \quad (7)$$

式中: c 和 φ 为计算前输入程序的土体强度参数; σ_n 为正应力, c_r 和 φ_r 为降低后的强度参数值, 是维持整体稳定平衡的最小值。

根据上述分析和作者在对内蒙古部分干旱地区土坡稳定的研究体会, 本文认为采用 PLAXIS 程序进行考虑降雨条件下的土坡稳定分析比较恰当。

6 工程实例

内蒙古西部地区某边坡在降雨后发生了坍塌。该边坡土质为粗粒土, 坡率为 1:1, 坡高 22 m, 根据勘察报告和室内试验确定土层参数见表 1。

表 1 模型计算参数
Table 1 Parameters of calculation model

土 层	重度 (kN/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	凝聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)
粗 粒 土	18.5	25	0.30	20	35
饱和粗粒土	20.0	20	0.35	9	30
基 岩	27.0	5 000	0.25	500	45

采用了摩尔-库仑模型, 考虑降雨以及雨水浸润对边坡稳定性的影响, 用有限元分析软件 PLAXIS 对该边坡进行数值分析, 有限元模型见图 1。

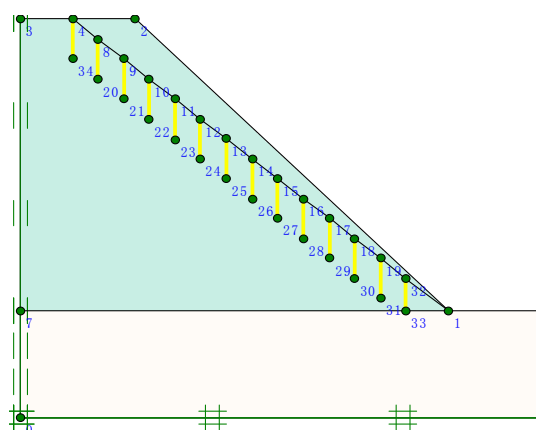
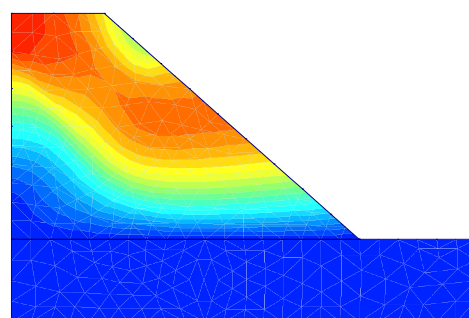
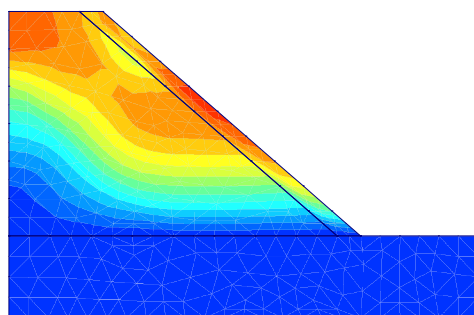


图1 有限元分析模型
Fig.1 Finite element analysis model

计算降雨影响时入渗深度范围内的土体参数取饱和时的参数，浸润深度 2 m，考虑降雨和不降雨两种情况。计算结果如图 2、3。通过计算发现降雨对边坡的稳定性影响很大，该边坡在不采取其它任何措施的情况下，不考虑降雨时的安全系数达 1.21，而考虑降雨影响时安全系数只有 0.89，安全系数降低了 0.32；该边坡在不降雨的情况下最大位移变形 48.6 mm，而在降雨情况下边坡的最大位移变形为 54.3 mm，位移增量增大了 11.73 %。计算结果与实际情况比较吻合。据此对该边坡采取了削坡措施进行处置，降低坡率到 1:1.2，计算的考虑降雨时的安全系数达到 1.1。根据实际工程监测结果，该边坡稳定状态良好。

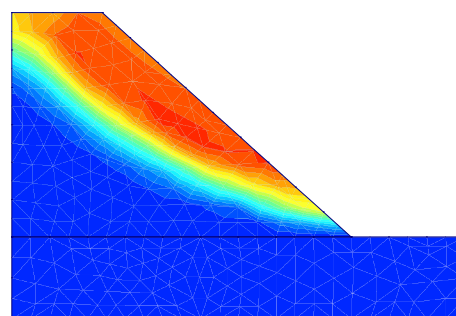


(a) 未考虑降雨（最大位移 48.6 mm）

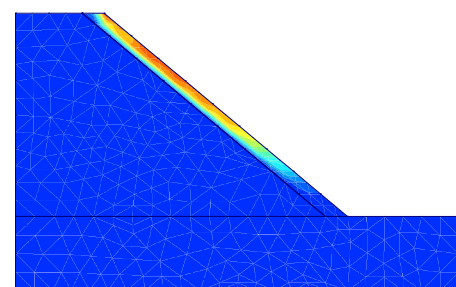


(b) 考虑降雨（最大位移 54.3 mm）

图2 边坡位移变形图
Fig.2 Contours of slope displacements



(a) 未考虑降雨（安全系数 1.21）



(b) 考虑降雨（安全系数 0.89）

图3 边坡滑弧位置图
Fig.3 Contours of slope slip circle

6 结 论

通过以上分析，干旱地区路堑边坡的失稳机理及稳定性分析方法总结如下：

(1) 干旱地区的边坡失稳主要是因降雨集中引起的，边坡设计时因充分考虑雨水对边坡稳定性的影响。

(2) 比较目前采用较多的边坡稳定性分析的极限平衡法，有限元方法可以提供更多的有价值信息，如位移场和应力场，以及边坡潜在危险滑弧的位置。

(3) 可用 PLAXIS 程序的强度折减法可以模拟降雨时岩土参数变化对边坡稳定性的影响，还可以给出安全系数，对研究干旱地区的边坡稳定比较适用。

(4) 为了减少雨水对边坡的破坏，可考虑植物对边坡的防护，这样可减少雨水对坡面的冲刷和入渗，同时植物的根系对边坡具有一定加筋作用。

参 考 文 献

- [1] 张玉成, 杨光华, 张玉兴. 滑坡的发生与降雨关系的研究[J]. 灾害学报, 2007, 22(1): .
- [2] 张珍, 李世海, 马力. 重庆地区滑坡与降雨关系的概率分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3185—