

考虑流固耦合的公路高边坡稳定性 分析与加固措施研究

曹 正

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610036)

摘 要: 高边坡失稳是渗流场与应力场共同作用下的结果, 降雨入渗下边坡含水量增大而土体抗剪强度减小, 对于非饱和状态下土体的抗剪强度利用 Fredlund 公式进行分析, 建立流固耦合的分析模型, 并通过 Soilworks 软件对工程边坡进行分析, 评估加固效果, 指导设计制定合理的加固方案, 以保障运营安全、减少人员伤亡和经济损失。

关键词: 公路边坡; 稳定性; 流固耦合; 加固

中图分类号: U417.1+2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)11-0168-04

0 引 言

高边坡失稳破坏与水作用密切相关, 是在渗流场和应力场联合作用下发生的, 其失稳破坏也是渗流作用与应力耦合作用的结果, 在研究高边坡稳定时, 若只研究其中一个物理环境, 显然是管中窥豹, 出现误判。因而, 对于高边坡, 需要研究渗流场和应力场的耦合作用, 尽可能贴合实际分析边坡的稳定状态, 指导设计制定合理的加固方案, 并对可能的滑坡进行预测和加固, 以保障安全、减少经济损失。

流固耦合的相关研究, 最早是 Terzaghi 与 Biot 从研究多孔介质开始, 分别建立两套体系, 在有效应力、饱和均质土、土颗粒不可压缩、土中水的运动遵循 Darcy's 定律等基础上建立一维固结理论, 然后推广至三维状态, 建立 Terzaghi-Randulic 扩散方程, 为后续土力学中流固耦合理论奠定基础, 而 Biot 从土体固结的机理出发, 提出三维状态下可反映和土骨架变形的流固耦合方程, 该方程中的变量是水头和 x 、 y 、 z 方向的位移, 直接反映了渗流场与应力场的耦合作用, 这也是渗流场与应力场直接耦合分析的理论基础。

随着数值计算手段的成熟, 流固耦合分析也越来越成熟完善, 间接耦合也得到发展, 并且广泛应用于工程实践中。目前, 基于渗流场与应力场耦合的研究越来越多, 利用现场试验、模型试验、数值计算, 并结合理论分析, 构建出诸多符合工程实际的本构模型, 研究成果被广泛用于工程实践中。

1 降雨对边坡的影响

1.1 失稳机理

降雨入渗, 尤其是持续性的降雨, 很容易引起边坡失稳, 一般情况下, 边坡表层残积土在植被根系改造作用下, 较为松散, 渗透系数较大, 降雨后很快达到饱和状态, 降雨持续, 入渗深度加大, 湿润峰面向下迁移, 导致土体容重增大, w 增加, S 减小, 土体的抗剪强度参数变小, 同时降雨入渗到潜在滑动面, 润滑滑动面, 土体吸水导致下滑力加大, 而抗剪强度衰减导致抗滑力减小, 因而诱发边坡失稳。

1.2 土体强度理论

对于渗流条件下, 土质边坡失稳破坏, 其本质是非饱和土边坡的某一潜在滑动面的抗剪强度达到极限值, 对于降雨入渗工况下的边坡稳定问题, 应先对降水对土体抗剪强度的影响进行研究分析, 目前常用的主要是 Bishop 和 Fredlund 等推导的计算公式。

Bishop 关于非饱和状态下土体有效抗剪强度可按式(1)计算:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + \chi(u_a - u_w) \tan \varphi' \quad (1)$$

式中: σ 为总应力; u_a 、 u_w 分别为孔隙气压、水压力; χ 为吸力参数; c' 、 φ' 为有效应力状态下的抗剪强度参数。

Fredlund 的非饱和抗剪强度计算公式为:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi^b \quad (2)$$

式中: $\tan \varphi^b$ 为吸力摩擦角的正切值, 其余参数同上。

针对以上两种计算理论, 在实际研究中, 常采用 Fredlund 理论, 较 χ 、 $\tan \varphi^b$ 更容易通过试验测得, 吸力摩擦角 φ^b 是一个随基质吸力和体积含水

收稿日期: 2020-05-15

作者简介: 曹正(1987—), 男, 学士, 工程师, 从事路桥设计工作。

率影响而变化的,鉴于此, Vanapalli 提出用基质吸力 S 和 φ' 表示, Fredlund 计算公式可以改写成式(3):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \cdot \tan \varphi' \quad (3)$$

引入 Van Genuchten (1980) 提出的 V-G 模型代入式(3),可得式(4):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \cdot \frac{1}{[1 + (\psi/a)^n]^m} \cdot \tan \varphi' \quad (4)$$

这也是 Midas 进行计算时所采用的理论。

2 渗流 - 应力耦合求解原理与分析方法

2.1 渗流 - 应力耦合求解原理

渗流—应力耦合分析模型的前提是建立初始和边界条件,目前常用的耦合处理方式有直接耦合和间接耦合,直接耦合是对计算所涉及到的渗流、应力物理参数,建立对应的耦合刚度矩阵、影响矩阵、荷载向量等。此耦合方式计算参数清晰直观,参数调整便捷,但是其存在两个以上的偏微分方程,计算量偏大,计算收敛困难。而迭代耦合,则是用 2 个或者 2 个以上的相互独立且关联的分析模块,以计算分析不同的物理环境下因变量的变化过程,然后各个物理分析模块的计算结果互为其他模块的边界条件或者附加荷载,而在边坡的流固耦合分析中,先分别计算应力和渗流工况,然后再将计算结果进行交叉和迭代计算,从而求解,迭代求解在算法上更容易实现。

渗流场与应力场耦合分析的有限元模型为:

$$\begin{cases} [K] + \{H\} + \{f\} = 0 \\ \{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{\delta\} \\ [M]\{\delta\} = \{X\} + \{F\} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $[K]$ 为渗透系数矩阵; $\{f\}$ 为渗流场水头分布函数; $\{H\}$ 为形函数; $\{F\}$ 为渗透力矩阵; $[M]$ 为整体刚度矩阵; $\{X\}$ 为节点外荷载矩阵。

2.2 渗流 - 应力耦合求解原理

工程中常用的边坡稳定求解方法有极限平衡法和有限元法,极限平衡是利用滑面上的静力平衡来计算求解在极限状态下边坡土体的安全系数,通过搜索多个可能的滑面,试算安全系数,安全系数最小的滑面即为最可能的滑面。对于均质土坡、极软岩、风化破碎岩石边坡,可以采用圆弧滑动分析。条分法又根据是否同时满足力平衡和力矩平衡分为严格条分法和非严格条分法,目前规范推荐采用简化 Bishop 法,此方法虽然是一种非严格条分法,但根据国内外大量的边坡稳

定性分析计算的工程应用表明,该方法求解的边坡安全系数与 Morgenstern-Price 法、Spencer 法等严格条分法的计算结果较为接近,一般只相差 3%~4%。而 Fellenius 法忽略条间力,使得计算安全系数 F_s 偏小,在边坡比较平缓或存在较高孔隙水压力条件下,求解的安全系数误差较大,误差超过允许的范围,有时过于保守而造成巨大的资源浪费,不再被列入建筑边坡规范。而国际上采用摩根斯坦法,计算精度较高,是国内外水利水电等部门所推荐的计算方法。有限元分析法,可分为滑面有限元应力分析方法和直接方法,目前常采用的是直接方法中的强度折减法,其屈服准则采用摩尔库伦准则,强度折减法的计算公式为:

$$\begin{aligned} c_f &= c/F_{\text{trial}} \\ \varphi_f &= \tan^{-1}[(\tan \varphi)/F_{\text{trial}}] \end{aligned} \quad (6)$$

3 工程概况与影响性分析

3.1 工程概况

一深挖路堑边坡,位于里程 K18+360~K18+953,根据勘察揭露结果,表层为含块石粉质粘土,湿~饱和,松散状,层厚 10.0~13.0 m,坡表植被覆盖,表层 1~2 m 范围内被植被改造,呈现腐殖质状,其下依次为全风化的炭质板岩,层厚约 5.0~7.0 m,强风化的炭质板岩,岩体呈现层状结构,部分矿物有风化变质现象,岩芯多呈碎块状及柱状, RQD=47%,层厚约 7.0~9.0 m,中风化的炭质板岩, RQD=73%。

根据详勘资料,将拟建边坡场区内主要土层的物理力学参数汇总在表 1 中。

根据地勘揭露的地层分布,在软件中建立如图 1 所示的分析模型,根据地区经验,一二级边坡拟采用锚杆+格构梁加固,三级边坡,采用骨架护坡,四级边坡采用自然放坡方式。

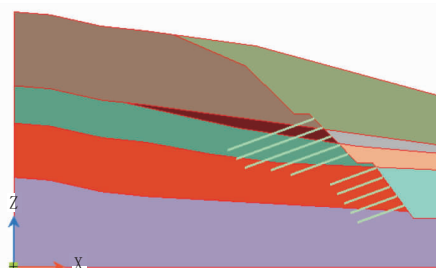


图 1 边坡分析模型

3.2 降雨对土体抗剪强度的影响

降雨工况下,随着降雨持续,坡表水体不断下渗,下层土体的 w 不断增大,而根据相关研究,含

表 1 主要土层物理参数

土层	模型类型	E/kPa	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$\gamma_{\text{sat}}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	$K/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
堆积层	摩尔-库伦	7 000	18.0	19.1	0.4	19.6	22	6.35E-6
全风化层	摩尔-库伦	36 000	18.5	19.5	0.33	17.5	31	1.0E-7
强风化层	摩尔-库伦	150 000	21	22	0.30	50	33	4.5E-6
中风化层	摩尔-库伦	1 850 000	22	23	0.28	180	35.5	1.0E-6
堆积层	摩尔-库伦(LEM)	—	18.0	—	—	19.6	22	6.35E-6
全风化层	摩尔-库伦(LEM)	—	18.5	—	—	17.5	31	1.0E-7
强风化层	摩尔-库伦(LEM)	—	21	—	—	50	33	4.5E-6
中风化层	摩尔-库伦(LEM)	—	24	—	—	180	35.5	1.0E-6

水率增减对土体的抗剪强度有直接且显著的影响,当土体的饱和度 S_r 处于 40%~60%内时,土体的 c 值处于最大值,当 w 持续升高, c 值将衰减,而内摩擦角 φ 值则变化不明显。

先制备如表 2 所示不同含水率下的土样,并测得相应的抗剪强度参数,同时将参数用于边坡稳定性计算中,天然边坡的稳定性计算结果(强度折减法)绘制在图 2 中。

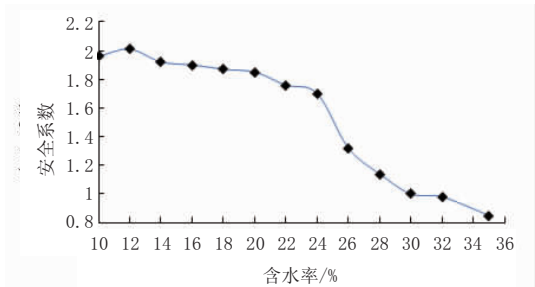


图 2 不同含水率下土体的抗剪强度指标

根据计算分析结果,当 w 超过 26%后, F_s 快速衰减,边坡稳定性将不再满足规范的要求,可见,如果在计算分析中,单一考虑应力场的作用,而忽略渗流场的作用,会对边坡稳定性造成误判。

4 加固设计与流固耦合分析

4.1 加固与防护设计

根据地层和地区经验,采用工程类比法进行初步加固设计方案,见表 3。

边坡平台浇筑 8cm 的 C20 现浇混凝土封闭。

4.2 考虑渗流条件下稳定分析

根据设计方案,建立边坡分析模型,并考虑流固耦合作用,假定降雨强度为中到大雨,降雨量换

表 3 边坡加固与防护设计

位置	坡高	坡率	加固措施
一级	8	1:0.75	锚杆(8 m)+ 格构梁
二级	8	1:1.0	锚杆(10~15 m)+ 格构梁
三级	6	1:1.2	骨架护坡
四级	—	—	自然放坡

算成软件单位为 35 mm/d/m²,降雨持时为 12 h。

(1)整体稳定分析

计算分别采用极限平衡法(LEM)和强度折减法(SRM),计算安全系数汇总在表 4 中。未设置加固措施额边坡安全系数,在采用 LEM 计算时,不满足规范对一级边坡的要求,而采用有限元计算时,天然工况下基本满足,而降雨工况下则不满足要求。

表 4 安全系数表

计算方法	未加固工况	安全系数	加固工况	安全系数
极限平衡法 LEM	天然工况	1.28	天然工况	1.63
	连续降雨	0.86	连续降雨	1.32
	降幅	32.8%	降幅	19.0%
强度折减法 SRM	天然工况	1.37	天然工况	1.50
	连续降雨	0.90	连续降雨	1.21
	降幅	34.3%	降幅	19.3%

未加固工况,在连续降雨工况下,采用 LEM 和 SRM 计算时,安全系数衰减幅度较大,而采取支护措施后,安全系数衰减幅度较小,考虑渗流作用时,边坡整体稳定性满足规范的要求。

表 2 不同含水率下土体的抗剪强度指标

含水率 $w/\%$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	35
黏聚力 $/\text{kPa}$	47.2	45.6	41.9	37.1	32.6	27.0	23.4	19.8	17.6	15.3	14.6	13.2	9.5
内摩擦角 $/(\text{^\circ})$	21.9	21.2	20.3	18.7	17.1	15.9	14.0	13.5	12.8	12.5	12.2	11.9	10.2

(2) 边坡潜在滑面

根据计算结果,边坡潜在的滑面(塑形应变区)出现在边坡表层,见图 3,自然放坡段,在表层土体,出现一条贯穿的塑形区域,这一现场,和诸多工程案例相吻合,在采取加固措施的边坡中,滑坡多出现未加固的自然放坡段(天然边坡)。

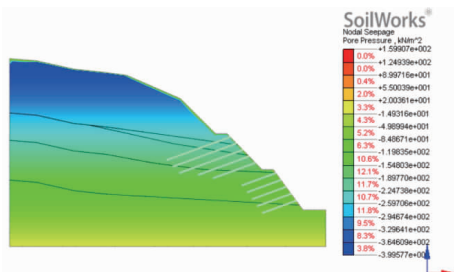


图 3 边坡塑形变形云图

因此,对于坡表区域,除进行加固设计,还应进行坡面防护,并对排水设施进行合理设计,以较小降雨入渗对边坡的不良影响。

另一方面,根据渗流计算分析结果(见图 4),在降雨 12 h 后,空隙水压力变化较大的区域集中在破表杂填土和全风化层,考虑在表层土体设置排水渗沟,以减小降雨对边坡的影响。

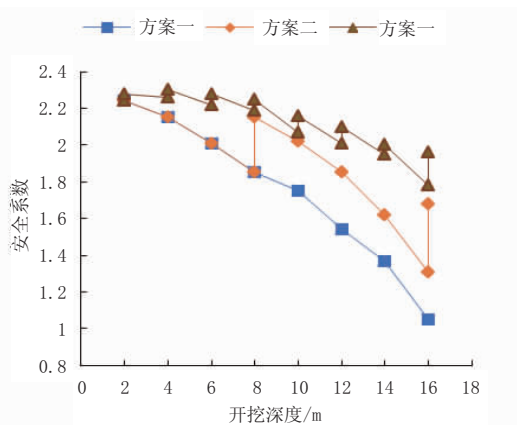


图 4 边坡空隙水压力云图(降雨 12 h)

4.3 施工顺序对边坡稳定的影响

根据 4.2 节分析,加固可大幅提高边坡的稳定性,在此前提下,加固措施的施作时机则尤为重要,是“一坡到底”(方案一),还是逐级开挖逐级加固

(方案二),还是边开挖边加固(方案三),本文分别计算以上三种工况下的安全系数,见图 4。

由图 4 可知无论何种开挖方式,安全系数都会随开挖深度的增加而减少,无论是逐级开挖逐级支护还是边开挖边支护,均会提高边坡的安全度,但采用一坡到底然后再加固的方式,当开挖到底部时,存在失稳的可能性,而边开挖边加固,在开挖期间,可以很好的控制边坡施工期间的稳定,但是由于其施工工序转变次数过多,导致工期延长,造价增加,因而推荐逐级开挖,逐级支护。

5 结论

本文从非饱和土体抗剪强度理论为切入点,研究降雨(含水量)变化对抗剪强度的影响,介绍流固耦合的基本原理,并建立目标边坡的流固耦合分析模型,主要结论有:

(1) 边坡的含水率的改变影响土质边坡的稳定性,体现在当 $w > 26\%$ 时,边坡的 FS 突降,因而应加强边坡的防排水设计,减少降雨入渗对边坡的破坏;

(2) 根据流固耦合计算结果,边坡整体稳定性在加固后满足规范要求,但是坡顶未加固区域出现贯穿的塑形应变带,可采用骨架护坡+植草的方式,减少降雨入渗,提高表层稳定;

(3) 根据数值计算,推荐使用逐级开挖随机支护的方式进行,可确保施工过程中,边坡的稳定。

参考文献:

- [1] 李庆文,郭奇峰.基于流固耦合的高陡边坡开挖稳定性研究[J].中国矿业,2011(4):100-104.
- [2] 向娟,陈占锋,范文臣.考虑渗流作用的城门山铜矿临湖露天开采边坡稳定性研究[J].金属矿山,2019(1):163-167.
- [3] 叶帅华,时轶磊.降雨入渗条件下多级黄土高边坡稳定性分析[J].工程地质学报,2018,26(6):1648-1656.
- [4] 李继祥,姜兆华,何翔,等.降雨条件下非饱和土边坡流固耦合数值模拟[J].武汉理工大学学报,2009,31(2):133-136.
- [5] 魏淑艳,吴碧中.某公路高边坡稳定性分析及防护措施研究[J].公路工程,2018,43(6):274-277.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

电话:021-55008118 传真:021-55008850 投稿及联系邮箱:cdq@smedi.com