

文章编号: 1673-9469(2019)04-0078-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.013

土-水特征曲线在雨后基坑边坡稳定性评价中的应用

高亚杰¹, 李新生^{1*}, 申正洋¹, 申亚慧²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中建七局安装工程有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 为研究雨型和基坑坡顶硬化长度对非饱和土基坑稳定性的影响, 采用 GeoStudio 中 SEEP/W 模块进行降雨模拟, 得到雨后坡体孔隙水压力和体积含水率的分布特征。然后将降雨模拟结果导入到 SLOPE/W 模块中, 结合固结快剪试验得到的抗剪强度参数进行数值计算, 并对基坑边坡的稳定性进行评价。结果表明: 瞬时强降雨入渗深度小, 长时普通降雨的入渗深度大; 坡顶硬化有利于限制雨水入渗, 可减少入渗至滑面内的量, 有利于基坑稳定; 当坡顶硬化长度为 3 m 时, 降雨对基坑稳定性影响不明显, 长度为 5 m 时, 基坑稳定性基本不受降雨的影响; 基坑边坡土体初始含水率较低时, 前期降雨对基坑稳定性不仅没有不良影响, 反而有利于基坑稳定。最后, 以实际滑坡为例, 对模拟结果进行了验证并说明了坡顶硬化对基坑边坡稳定性的重要性。

关键词: 非饱和土; 基坑支护; 稳定性系数; 不透水面层

中图分类号: TU432

文献标识码: A

Application of Soil-Water Characteristic Curve in Stability Evaluation of Foundation Pit Slope after Rain

GAO Yajie¹, LI Xinsheng^{1*}, SHEN Zhengyang¹, SHEN Yahui²

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shanxi 710054, China;

2. Installation Engineering Co., Ltd. of CSCEC 7th Division, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: The slope of the excavations often has the concrete surface layer and the hardened slope top which is impermeable to water. In order to study the effect of rain type and the length of hardened slope top on the stability of the unsaturated excavations, the rainfall simulation is obtained by GeoStudio SEEP/W module, and the distribution characteristics of the water pressure and volume moisture of the slope after the rain are obtained. Then, the rain simulation results are imported into the SLOPE/W module. The shear strength parameters obtained by the consolidated quick shear test are used in numerically calculation, and the stability of the excavations is evaluated. The results show that the depth of infiltration of instantaneous heavy rainfall is small, and the infiltration depth of ordinary rainfall is large in long periods. The hardened slope top tends to limit the infiltration of rainwater, reduce the infiltration at the slip surface, and is beneficial to the stability of the excavations. When the slope top hardening length is 3 m, the effect of rainfall on the stability of the excavation is not obvious, and when the length is 5 m, the stability of the excavation is basically not affected by rainfall. When the initial water content of the soil of the slope is low, instead of arousing adverse effect on the stability of the excavations, the early rainfall is beneficial to the stability of the excavations. Finally, taking the actual landslide as examples, the simulation results are verified and the importance of slope top hardening to the stability of the slope is explained.

收稿日期: 2019-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372330)

作者简介: 高亚杰(1990-), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 从事非饱和土方面研究。* 通讯作者: 李新生(1963-), 男, 山东肥城人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程与环境工程地质的研究工作。

Key words: unsaturated soil; retaining and protecting for foundation excavation; coefficient of stability; impermeable surface

在上世纪, 饱和岩土体的抗剪强度问题已经被解决^[1]。而实际工程中遇到的多数都是非饱和土体, 其强度高于饱和土体。现行的工程设计规范均假定土体处于饱和状态, 虽然这种思路使得工程设计的安全性得到了提高, 但经济性下降了^[2]。这显然不利于将非饱和土理论的研究成果应用于工程实践。国内学者对非饱和土边坡研究较多, 研究结果表明水是导致边坡失稳的主要因素之一。王桂生^[3]等考虑了非饱和因素并对岸坡稳定性进行评价, 结果表明利用非饱和强度理论的岸坡安全性能比利用饱和强度理论的安全性有所提高, 能更客观地对岸坡稳定性进行评价。付新平^[4]等研究了基质吸力对黄土边坡稳定性的影响, 结果表明, 黄土由饱和至非饱和和状态转变时内摩擦角增大。刘子振^[5]等研究了非饱和土边坡抗剪强度的力学参数影响及灵敏度分析, 并结合了工程算例, 其结果表明土体含水率对稳定系数影响最为显著。以上研究成果主要运用非饱和土理论、数值模拟和实验方法分析了在考虑非饱和因素时边坡的稳定性。基坑边坡与自然边坡有很多不同之处, 基坑边坡的坡度更大、边界条件规则而且一般有支护结构、不透水面层和坡顶硬化。在基坑工程中, 非饱和土的基质吸力产生的抗剪强度对于基坑的稳定有很大的贡献, 而一旦降雨或其他因素使土中含水率增加, 造成吸力消减, 可能会引发基坑倒塌事故^[6]。因此, 需考虑水对基坑土体强度的影响。实际基坑工程中水的来源主要是降雨, 基于此, 本文主要研究了基坑坡面是不透水面层时, 雨型和坡顶硬化长度对有土钉支护的非饱和土基坑边坡稳定性的影响, 以期将非饱和土理论成果应用于工程实践, 为非饱和土基坑支护设计提供参考。

1 固结快剪试验及土-水特征曲线

1.1 试验材料及仪器

本文选用的试验用土取自西安市高新区军民融

合园项目, 其基本物理性质如表1所示。

固结快剪试验所用仪器为WG-1A型固结仪、WL-1型电动直剪仪。试验前制备了饱和土样, 测定其饱和和体积含水率为44.6%, 其对应的抗剪强度参数为 $c'=21.4\text{ kPa}$, $\phi'=18.0^\circ$ 。

1.2 土-水特征曲线的获取

为计算雨后渗透系数和土体强度, 需先获取土-水特征曲线。试验法获取土-水特征曲线所需时间长、试验要求高, 不利于工程的实际应用, 使用SEEP/W内置的方法可快速得到土-水特征曲线。考虑到实际工程要求, 本文采用SEEP/W内置的样本函数法来获取土-水特征曲线。根据试验, 土样饱和和体积含水率为44.6%, 通过样本函数法得到的土-水特征曲线如图1所示。

2 降雨模拟

根据实际工程, 按照不同硬化长度设置三种工况, 然后建立模型, 设置边界条件。依据西安地区降雨特点, 给定雨型及持时, 进行降雨模拟。

2.1 模型建立及边界条件

军民融合园项目位于西安市高新区上林苑一

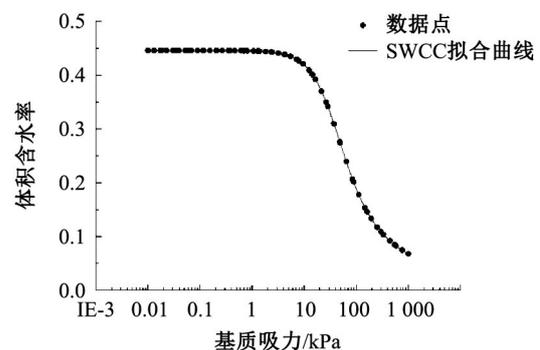


图1 土-水特征曲线

Fig.1 Soil-water characteristic curve

表1 试验用土物理性质参数

Tab.1 Physical properties of the tested soil

含水率 /%	天然重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	孔隙比	饱和度 /%	液限 /%	塑限 /%
13.8	16.76	1.71	0.89	41.9	28.5	17.5

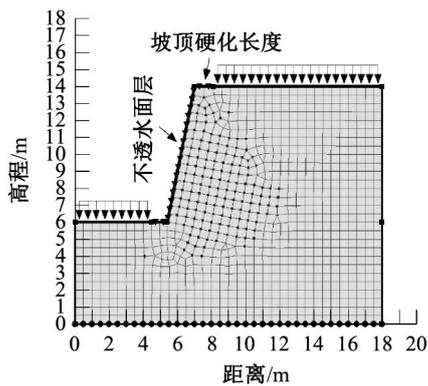


图2 模型及边界条件

Fig.2 Model and boundary conditions

路以东, 毕原二路以南, 基坑开挖深度为 8 m, 本文选取一段建立模型进行研究。土层信息由勘察报告获得, 水位线在地下 14 m 处。土钉竖向间距为 1.4 m, 由上往下共 5 根, 第 1、2 和 5 根长度为 4.5 m, 第 3 和 4 根长度为 6.5 m。

基坑边坡的模型尺寸、边界条件和网格划分如图 2 所示, 节点数 875 个, 单元数 816 个。模型底面设置为零压力线, 坡面为不透水层。工况 1、2、3 的坡顶硬化长度分别为 1、3、5 m, 其他条件均相同。

2.2 渗透系数函数

在饱和土中土颗粒间的孔隙被水充填, 当空气进入非饱和状态时, 空气充填的孔隙就成了非传导通道, 水的渗流路径相应变得曲折, 使得土传导水的能力下降, 即土的渗透系数减小。虽然渗透系数随着含水率的变化, 不再是一个常数, 但它与含水率有着如式 (1) 的对应关系。结合土-水特征曲线可通过下式求得渗透系数^[7]:

$$k_w = k_s \frac{\sum_{i=j}^N \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^{yi}} \theta'(e^{yi})}{\sum_{i=1}^N \frac{\theta(e^y) - \theta_s}{e^{yi}} \theta'(e^{yi})} \quad (1)$$

其中: k_w —指定含水率或者负孔隙水压力计算所得渗透系数 (m/s); k_s —饱和渗透系数, 此处取 $k_s=0.432$ m/d; θ_s —饱和体积含水率; e —自然对数的底; y —负孔隙水压力算法的虚拟变量; $i-j$ 到 N 之间的数值间隔; j —最终函数描述的最小负孔隙水压力; N —最终函数描述的最大负孔隙水压力; ψ —对应第 j 步的负孔隙水压力; θ' —方程的起始值。

在 SEEP/W 模块中, 可通过式 (1) 计算不同含水率下土的渗透系数, 结合初始条件 (未下雨时)

模拟雨水在土中的渗流, 由此可得到降雨后孔隙水压力和体积含水率的分布特征。

2.3 降雨入渗模拟

西安地区多为强对流降水, 持时短且强度大。据报道, 西安在 2016 年, 4 h 降雨量达到了 126 mm。同时西安地区也会有持续几天的暴雨, 为体现西安地区的降雨特征, 确定如表 2 所示的两种降雨条件。

表 2 雨型及持时

Tab.2 Rainfall pattern and duration

降雨类型	降雨强度 (mm·h ⁻¹)	降雨历时 /d
瞬时暴雨	30	0.5
暴雨	4	7.5

2.4 降雨模拟结果与分析

如图 3 所示, 瞬时暴雨条件下, 就土体含水率等值线变化趋势而言, 工况 1、2、3 基本相同, 影响深度均在 2 m 左右。从坡顶往下 0.7 m 深度范围内三者的体积含水率改变量均达到了 28%; 0.7 ~ 2 m 范围内, 体积含水率等值线逐渐变疏, 含水率变化较小。在水平方向上三者的影响范围不同, 三者的区别是坡顶的硬化长度不同, 这说明加长硬化长度对阻止水的入渗是有利的。

如图 4 所示, 暴雨条件下, 工况 1 在降雨 1 d 后, 雨水入渗对体积含水率的影响深度在 1.4 m 左右; 在降雨 3 d 后达到了 2.7 m 左右; 在降雨 7.5 d 后在 5.2 m 左右。与雨前 (稳态) 相比, 在影响范围内, 体积含水率增加了 4% ~ 18%, 5.2 m 以下含水率变化不大。入渗深度相较于前人的研究结果偏大, 其原因是: 渗透系数大、降雨量大。对于硬化面层右侧土体, 三个工况的入渗深度和含水率变化幅度均相同。工况 2 和 3 硬化面层下的土体含水率改变量都比较小, 而工况 1 的改变量比较大。由此可知, 为减少降雨入渗对基坑造成的不利影响, 坡顶硬化要有足够的长度。

对比两种降雨条件可知: 瞬时暴雨入渗深度小, 暴雨的入渗深度大; 雨强越大, 在短时间内, 入渗速度越快。虽然瞬时暴雨入渗速度快, 但其影响时间短, 未入渗的水会通过表面径流的方式排走, 因此影响范围浅。

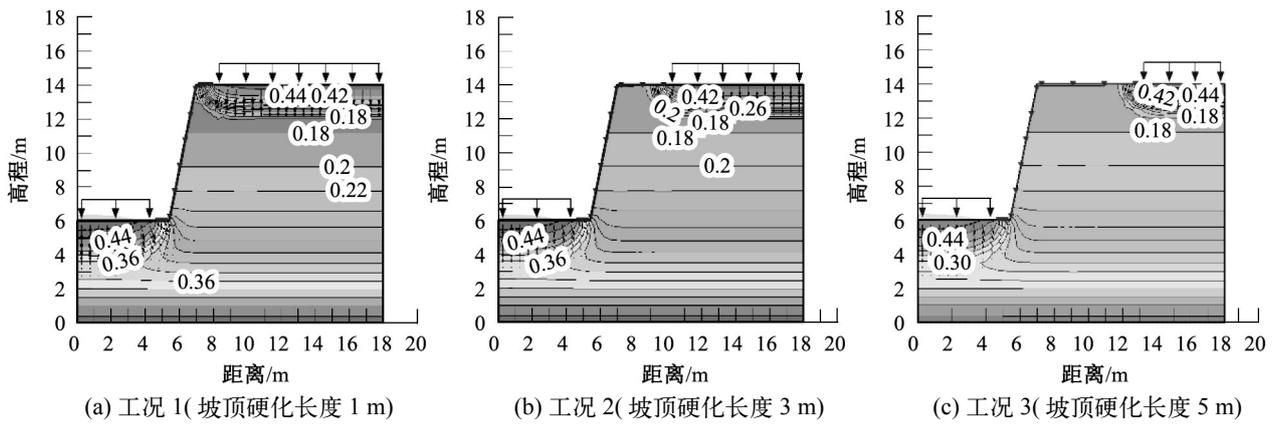


图 3 瞬时暴雨后体积含水率分布

Fig.3 Volume content of soil distribution after instantaneous rain

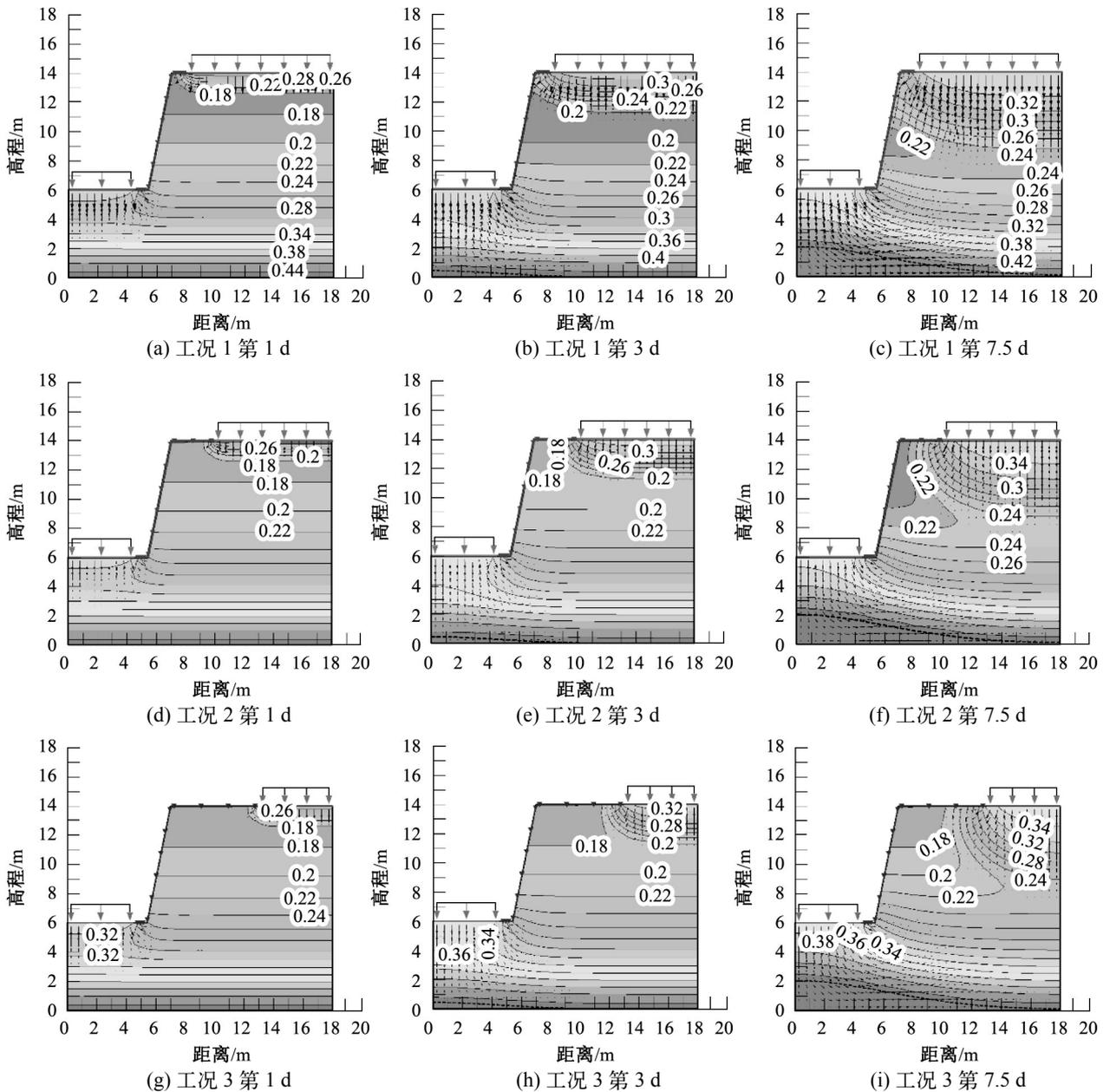


图 4 暴雨后体积含水率分布

Fig.4 Volume content of soil distribution after rainstorm

3 基坑稳定性及实例分析

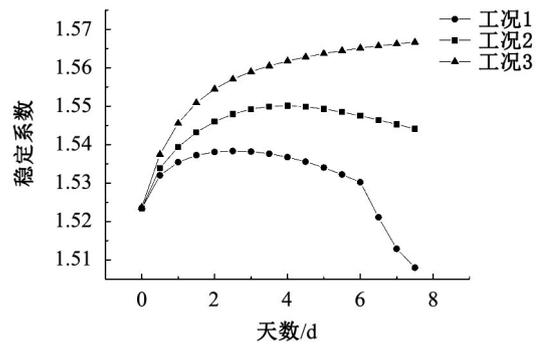
3.1 基坑稳定性模拟和分析

降雨模拟结束后,对雨后的基坑边坡稳定性进行评价。首先将降雨模拟结果导入SLOPE/W模块中,然后根据固结快剪试验得到的土体抗剪强度参数和土-水特征曲线即可计算土体各点强度,从而对其稳定性进行评价。本文采用Morgenster-Price法对不同工况下基坑稳定性进行分析。

瞬时暴雨条件下,工况1和2在降雨0.5d后,稳定系数分别降低了0.032、0.017,工况3增加了0.004,稳定系数的变化幅度与文献[4,8]的研究结果类似。三种工况的模拟结果为:工况1受降雨影响最大,工况2次之,工况3最小。工况3的稳定系数随降雨过程持续增加。其原因是:降雨时间短,在稳态(未下雨)时坡顶基坑土体的含水率小于残余含水率;降雨后,在一定体积含水率范围内,基质吸力对非饱和土体的强度有增大作用,该作用的大小随含水率变化,且存在一个含水率的临界值^[9],含水率小于临界值时,体积含水率增加,基质吸力降低,对强度的提高作用逐渐降低。工况3坡顶硬化较长,雨水对滑移面部分土体影响范围小,且起加强作用,使稳定系数增加。由此可知:在实际工程中加长坡顶硬化对基坑稳定是有利的。

暴雨条件下,3个工况的稳定系数变化如图5所示。工况1在降雨的前2.5d内稳定系数逐渐增加,2.5d后开始降低,到6.5d时稳定系数降低到与雨前相同的水平,在7.5d时与未降雨时相比降低了0.015。其原因是:在2.5d之前,体积含水率对应的含水率小于临界值,即:此时土体强度随含水率增加而增加;当超过临界值时(2.5d后),含水率继续增加土体强度会降低,稳定系数也随之降低。工况2在降雨的前4d内,稳定系数是增加的,其原因与工况1相同。第7.5d时的稳定系数比降雨前的高了0.021。原因是:一方面,坡顶硬化长度为3m,使入渗至滑移面范围内的雨水减少了;另一方面,体积含水率超过临界值土体范围小于工况1。工况3的稳定系数持续上升,原因是:硬化面以下的土体含水率基本没有改变,硬化面右侧、滑移面处的土体强度相较于未降雨时有所提高,即体积含水率在临界值内,基质吸力增强了土体强度。

综上所述,基坑土体含水率较小时,降雨前期基坑的稳定系数是增加的;瞬时强降雨入渗深度小,



注:工况1-坡顶硬化长度1m;工况2-坡顶硬化长度3m;工况3-坡顶硬化长度5m

图5 稳定性系数随降雨持时的变化

Fig.5 Variation of the safety factors with rainfall time

长时暴雨的入渗深度大;两种降雨条件下,坡顶硬化5m的效果最好,3m的次之,1m的基本没有效果,所以在本工程中,选择坡顶硬化3m来降低降雨对基坑造成的不利影响较为经济、合理。综合两种雨型三种工况下的稳定系数的变化可知,坡顶硬化长度合理的情况下,降雨不但不会降低基坑稳定性,反而有可能提高基坑的稳定性。

3.2 实例分析

陕西华县高楼村滑坡是由于水渠渗漏引起的一个典型滑坡,许多学者对此进行过研究,水渠位于坡顶,事故发生前,水渠流了13d的水^[10],这与基坑坡顶硬化质量差是相似的。随着入渗量的增加土体强度逐渐降低,导致事故的发生,这与模拟结果一致。

延安炼油厂滑坡位于陕西省延安市洛川县交口河镇,边坡高度约为40m,边坡所处地形不利于积水^[11]。为使管道和油罐中的原油在冬季不凝结,油罐和管道有充满高压水蒸气的加热管,加热管的减压阀不时释放出大量水蒸气,水蒸气冷凝渗入地下,虽然地面经过水泥砂浆硬化,但有大量裂隙,导致水渗入土体,浸润边坡滑面,导致滑坡的发生,此例也是由于硬化问题导致的滑坡,与本文对坡顶硬化效果的模拟结果一致。

上述两例中事故发生的原因都与模拟结果吻合,同时也反映了坡顶硬化对防止滑坡发生的重要性。

4 结论

1) 两种降雨条件下,瞬时暴雨的入渗深度小,

暴雨的入渗深度大,但前者仅对浅层土体的含水率影响比较大。

2) 坡顶硬化有利于阻止雨水入渗和基坑稳定,能有效减少水入渗至滑面土体的量。本工程中,当坡顶硬化长度为3 m时,降雨对基坑稳定性影响不明显,长度为5 m时,基本不受降雨的影响,因此,选取3 m的硬化长度较为经济、合理。实际工程中,坡顶硬化长度合理的情况下,降雨对基坑稳定性的影响有限。

3) 基坑边坡土体初始含水率较低时,前期降雨对基坑边坡的稳定性不仅没有不良影响,反而有利于基坑的稳定。

参考文献:

- [1] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1943: 3-5.
- [2] 包承纲, 詹良通. 非饱和土性状及其与工程问题的联系[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 130-136.
- [3] 王桂生, 常星, 韩福涛. 基于非饱和土渗流和强度理论的三维边坡稳定分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 199-203.
- [4] 付新平, 丁勇. 考虑基质吸力下的黄土边坡稳定性研究[J]. 铁道标准设计, 2011(5): 21-25.
- [5] 刘子振, 言志信, 凌松耀, 等. 非饱和土边坡抗剪强度的力学参数影响及灵敏度分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4508-4513.
- [6] 吴剑敏, 李广信, 王成华. 非饱和土基质吸力对基坑支护计算的影响[J]. 工业建筑, 2003, 33(7): 6-10.
- [7] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The Shear Strength of Unsaturated Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [8] 邱海兵. 雨入渗对非饱和土基坑围护结构稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [9] 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): 1931-1936.
- [10] 蔺晓燕, 李同录, 张子然, 等. 陕西华县高楼村黄土滑坡-泥流的成因分析[J]. 工程地质学报, 2013, 21(2): 282-288.
- [11] 习羽, 李同录, 李萍, 等. 蒸汽凝水滴渗透诱发的一个非饱和黄土滑坡机理研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 145-152.

(责任编辑 王利君)