

考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析

李晋鹏, 汪磊, 王俊, 陈洋, 徐永福

Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics

LI Jinpeng, WANG Lei, WANG Jun, CHEN Yang, and XU Yongfu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于支持向量机的膨胀土胀缩等级预测

Predicting of swelling-shrinking level of expansive soil using support vector regression

周苏华, 周帅康, 张运强, 聂志红, 雷瑜 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 117-126

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysis on the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53

石灰改良高液限土强度特性的函数模型研究

Research on function model of lime-improved high liquid limit soil strength characteristics

胡宏坤, 邵珠山 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 109-117

基于FLAC~(3D)的米贝复式滑坡稳定性分析

罗忠行, 雷宏权 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 52-62

考虑滑带强度参数分区取值的堆积层滑坡稳定性分析方法

闫玉平, 肖世国 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(2): 44-49

基于不同方法的江苏镇江地区下蜀土边坡稳定性分析与评价

Evaluation of Xiashu loess slope stability in Zhenjiang area using different methods

瞿婧晶, 陆燕, 吴曙亮, 刘健, 苟富刚 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(1): 35-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202109028

李晋鹏, 汪磊, 王俊, 等. 考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 29-36.

LI Jinpeng, WANG Lei, WANG Jun, *et al.* Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 29-36.

考虑抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析

李晋鹏¹, 汪磊^{1,2}, 王俊¹, 陈洋², 徐永福²

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620;

2. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240)

摘要: 针对传统膨胀土边坡稳定性分析中无法考虑膨胀土在降雨入渗过程中抗剪强度动态衰减的问题, 本文开展了室内直剪试验, 系统研究了干密度和含水量变化对膨胀土抗剪强度指标的影响; 同时, 以试验抗剪强度结果为参数, 开展了基于强度折减法的膨胀土边坡稳定性分析, 获得了抗剪强度动态衰减过程中边坡稳定性的变化规律。结果表明, 含水量的增加和干密度降低会造成膨胀土黏聚力和内摩擦角的衰减, 黏聚力衰减显著, 内摩擦角衰减较少; 膨胀土边坡稳定性主要受风化层土体含水量控制, 随着膨胀土含水量的增加, 膨胀土边坡逐渐由稳定状态演变为欠稳定状态; 干密度对膨胀土边坡稳定性的影响则相对较小。

关键词: 膨胀土; 抗剪强度衰减; 直剪试验; 强度折减法; 稳定性分析

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)06-0029-08

Stability analysis of expansive soil slopes considering shear strength decay characteristics

LI Jinpeng¹, WANG Lei^{1,2}, WANG Jun¹, CHEN Yang², XU Yongfu²

(1. College School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to address the problem that the dynamic decay of shear strength of expansive soil in the process of rainfall infiltration cannot be considered in the traditional slope stability analysis of expansive soil, indoor direct shear test was carried out to systematically study the influence of dry density and water content on the indicators of shear strength of expansive soil, viz., cohesion and internal friction angle. At the same time, the stability analysis of the expansive soil slope based on the strength reduction method was carried out with the shear strength testing results, and the change law of slope stability with the dynamic decay of shear strength was obtained. The results show that the increase of water content and the decrease of dry density will cause the decay of cohesion and internal friction angle of expansive soil, and the decay of cohesion is significant, while the decay of internal friction angle is less; the stability of expansive soil slope is mainly controlled by the water content of weathering layer, and with the increase of water content of expansive soil, the slope gradually evolves from stable state to unstable state, while the influence of dry density on the stability of expansive soil slope is relatively small.

Keywords: expansive soil; shear strength reduction; direct shear test; strength reduction method; stability analysis

收稿日期: 2021-09-27; 修订日期: 2021-12-07

投稿网址: <https://www.zgdzzyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC1509800)

第一作者: 李晋鹏 (1996-), 男, 四川渠县人, 硕士研究生, 主要从事膨胀土边坡稳定性研究。E-mail: lijinpeng_CD@163.com

通讯作者: 汪磊 (1985-), 男, 陕西延安人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程等方面研究。E-mail: wangleiwangjiang@163.com

0 引言

膨胀土边坡的稳定性一直是岩土界广泛关注的问题。目前,边坡稳定性分析的常用方法主要包括了极限平衡法、极限分析法等,都建立在极限平衡理论基础之上,并不适用于膨胀土边坡的稳定性分析^[1]。另一种常用的方法是有限元强度折减法,早在 1975 年该方法就被 Zienkiewicz 等^[2]用来求解边坡稳定问题,随着计算机硬件技术和有限元软件技术的飞速发展,运用有限元强度折减法分析边坡稳定已经成为新的趋势^[3-10]。国内很多学者将强度折减法运用到膨胀土边坡稳定分析中,取得了一系列成果。

周健等^[11]利用强度折减法研究膨胀土边坡的稳定性,发现干湿循环会导致膨胀土抗剪强度衰减,且随着干湿循环次数的增加,边坡稳定性降低,安全系数减小。刘明维等^[12]研究了强度折减法在膨胀土斜坡地基路堤稳定性分析中的应用,发现强度折减法所得结果与实际情况相符。张硕等^[3]基于有限元强度折减法研究了雨季土体增重、强度降低和膨胀作用对膨胀土边坡稳定性的影响,发现强度降低是导致边坡失稳的主要原因,膨胀作用次之,土体增重较小。程灿宇等^[13]利用 MIDAS/GTS、FLAC 和 ANSYS 三种软件采用强度折减法分别对不同工况进行了稳定性分析,发现弱膨胀土边坡无论采用 M-C 屈服准则,还是 D-P 屈服准则所得结果差异不大。谭波等^[14]采用强度折减法对不同条件下的膨胀土边坡的安全系数进行了计算,发现次生裂隙面发育是导致膨胀土边坡失稳的主要原因之一。杨才等^[15]根据强度折减有限元法对不同条件失稳边坡稳定性分析结果,提出以最大塑性应变以及最小塑性应变的量级指标来判定塑性区贯通时刻。

然而,干湿循环、降雨入渗等因素会引起浅层膨胀土干密度降低、吸力衰减,从而使抗剪强度大幅度下降。目前,在采用强度折减法分析膨胀土边坡稳定性的同时系统考虑抗剪强度衰减影响的研究尚不多见。为此,本文采用试验与数值模拟相结合的方式,系统地考虑了抗剪强度衰减特性的膨胀土边坡稳定性分析。首先对广西南宁膨胀土开展了室内直剪试验,分析了含水量、干密度对膨胀土抗剪强度衰减的影响;再以此为依据,利用 Midas 有限元分析软件研究考虑抗剪强度衰减特性对膨胀土边坡稳定性安全系数的影响,获取了边坡安全系数随抗剪强度折减的动态变化规律,以期工程实践提供参考。

1 抗剪强度衰减特性试验设计

1.1 试验用土

土样取自广西崇左-夏石镇某高速公路膨胀土边坡路段,其天然含水量、最优含水量和天然干密度分别为 32.5%、24% 和 1.40 g/cm³,其他土性指标,比重(G_s),液限(W_L),塑限(W_p),塑性指数(I_p),自由膨胀率(σ_f)见表 1。自由膨胀率为 42.8%,按照《膨胀土地区建筑技术规范》^[16]的分类,该膨胀土为弱膨胀性膨胀土。

表 1 宁明膨胀土基本土体参数

Table 1 Basic soil parameters of Ningming expansive soil

参数	$G_s/(g \cdot cm^{-3})$	$w_L/\%$	$w_p/\%$	I_p	$\sigma_f/\%$
取值	2.80	59.11	24.68	34.43	42.8

1.2 试样制备及试验方法

1.2.1 试样制备

首先,将现场取回的扰动土试样碾散过 2 mm 筛,过筛后放入 105℃ 的烘箱中烘 24h,使试样具有相同的初始结构,并将烘干土用收纳箱密封保存备用。接着,按目标含水量(控制干密度为 1.6 g/cm³)和目标干密度(控制含水量 18%)要求配制成湿土,并装入保鲜袋,经闷料 24 h 后测得土样的最终含水量与目标含水量之间误差不超过 1%;最后,为保证环刀试样均匀一致,采用自制的模具(图 1)进行制样,并利用液压千斤顶脱模推出,控制试样的直径为 61.8 mm,高度为 15 mm,目的是使试样在竖直方向上能够充分膨胀,每组平行土样密度差不超过±0.02 g/cm³,否则废弃重做。试样配制过程如图 2,最终制成的每个环刀试样表面均平整无破损,且长度误差不超过 0.2 mm,则为满足要求的试样。



图 1 制样模具

Fig. 1 Sample preparation mould

1.2.2 试验方法

以初始干密度为 1.6 g/cm³,含水量分别为 9%、12%、15%、18%、21%、24% 和 27% 制取环刀试样 7 组,每组 4 个;并以初始含水量为 18%,干密度分别为 1.4、1.5、1.6 和 1.7 g/cm³ 制取环刀试样 4 组,每组 4 个,然



图 2 配土过程示意图

Fig. 2 Diagram of the soil preparation process

后进行常规直剪试验(图 3), 试验施加的竖向压力分别为 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa, 剪切速率为 0.02 mm/min, 初始剪切位移均保持在 3.850 mm 左右, 剪切位移量程 13.000 mm。



图 3 四联直剪仪

Fig. 3 Quadruple direct shear testing device

2 抗剪强度衰减特性试验结果与分析

2.1 含水量对抗剪强度衰减的影响分析

为研究广西宁明膨胀土的抗剪强度随含水量变化的规律, 对不同含水量的土样进行直剪试验, 试验结果如表 2 所示。

根据表 2 可绘制出宁明膨胀土黏聚力和内摩擦角与含水量的关系如图 4 和图 5 所示, 拟合后可得到黏聚力和内摩擦角与含水量的关系式:

$$c = -5.192w + 147.9 \quad (1)$$

表 2 宁明膨胀土抗剪强度试验结果表

Table 2 Results of shear strength of Ningming expansive soils

试验参数	w/%	$\phi/(\circ)$	c/kPa
试验结果	8.80	27.3	100.36
	11.7	24.56	93.28
	14.6	21.80	67.34
	17.5	19.82	54.64
	20.8	17.92	41.22
	23.3	15.20	30.86
	26.1	12.38	9.90

$$\phi = -0.827w + 34.36 \quad (2)$$

由式(1)和(2)可知, c 和 ϕ 与 w 都存在近似线性的关系, 这与文献^[17-18]结果一致, 含水量每增大 5%, 其黏聚力约减小 26 kPa, 内摩擦角减小 4.2°左右; 为更好的表示 c 随 w 的衰减规律, 参考吕海波等^[19]的研究, 可计算出 c 的衰减率为:

$$\eta = \frac{|c_0 - c_1|}{c_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η ——黏聚力衰减率;

c_0 ——初始黏聚力;

c_1 ——随含水量变化后的黏聚力。

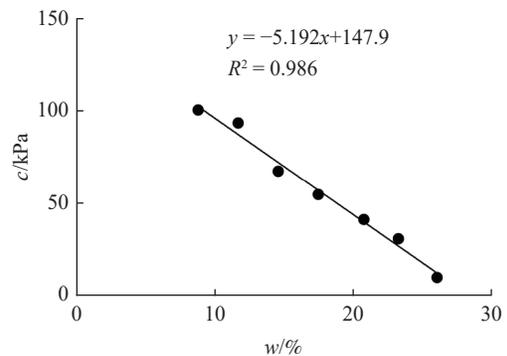


图 4 宁明膨胀土黏聚力随含水量变化规律

Fig. 4 Variation of cohesive force of Ningming expansive soil with water content

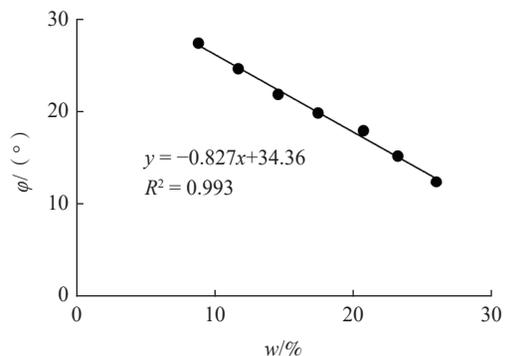


图 5 宁明膨胀土内摩擦角随含水量变化规律

Fig. 5 Variation of internal friction angle of Ningming expansive soil with water content

根据表 3 可知,随着宁明膨胀土含水量的逐渐增大黏聚力不断衰减,在最低目标含水量 9% 以 3% 递增至目标含水量 27% 的过程中,黏聚力的衰减率变化趋势为增大-减小-增大,说明膨胀土在低含水量和接近饱和含水量时,黏聚力对含水量的变化显得十分敏感。

表 3 宁明膨胀土黏聚力衰减率计算结果表
Table 3 Results of cohesion decay rate of Ningming expansive soil

试验参数	w/%	c/kPa	η/%
试验结果	8.8	100.36	-
	11.7	93.28	7.05
	14.6	67.34	27.81
	17.5	54.64	18.86
	20.8	41.22	24.56
	23.3	30.86	25.13
	26.1	9.9	67.92

在试样 ρ_d 保持一致的情况下(1.6 g/cm³),可从图 6 及图 7 中看出在相同垂直应力作用下,抗剪强度随着 w 的增大呈现减小的趋势。

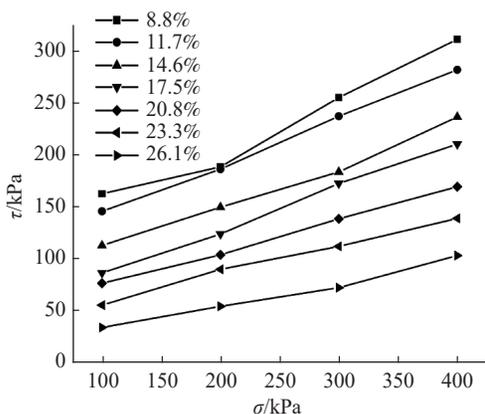


图 6 不同含水量试样抗剪强度随垂直压力的变化
Fig. 6 Change of the shear strength with vertical pressure of samples with different water contents

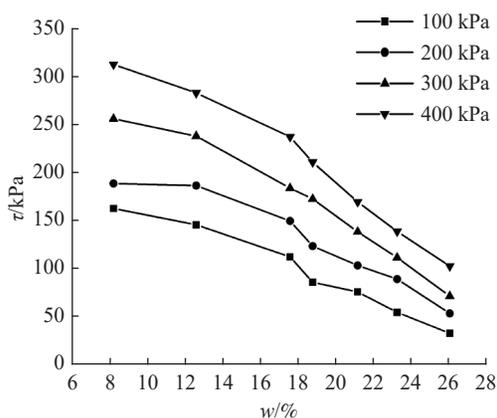


图 7 不同荷载下试样抗剪强度随含水量的变化
Fig. 7 Change of the shear strength with water content of specimens undergoing different vertical loads

上述试验结果表明,宁明膨胀土的抗剪强度随着含水量的改变发生显著变化;主要表现为在含水量增大时黏聚力和内摩擦角发生衰减,其中黏聚力的衰减较内摩擦角更为明显。

2.2 干密度对抗剪强度衰减的影响分析

根据表 4 数据可拟合出试样黏聚力和内摩擦角随干密度的变化规律,如图 8、图 9 所示。

表 4 不同干密度下试样试验结果记录表
Table 4 Record table of test results under different dry densities

试验参数	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	c/(kPa)	$\varphi/(^\circ)$
试验结果	1.7	97.26	26.5
	1.6	54.64	19.82
	1.5	40.34	17.82
	1.4	37.57	16.87

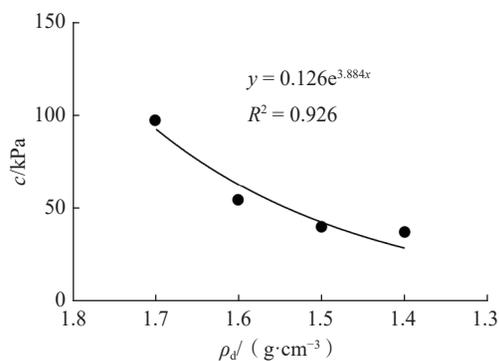


图 8 宁明膨胀土黏聚力随干密度变化规律
Fig. 8 Variation of cohesive force of Ningming expansive soil with dry density

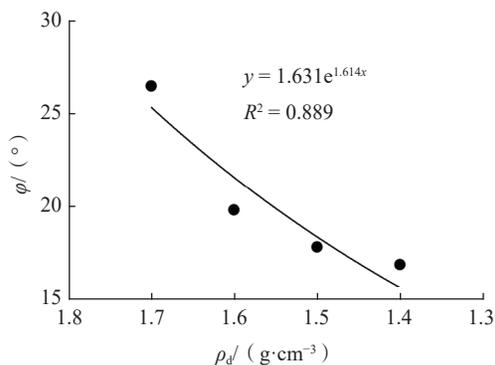


图 9 宁明膨胀土内摩擦角随干密度变化规律
Fig. 9 Variation of internal friction angle of Ningming expansive soil with dry density

由图 8 和图 9 可观察到宁明膨胀土的黏聚力和内摩擦角随干密度的变化曲线符合乘幂函数的拟合结果,其中:

$$c = 0.126e^{3.884\rho_d} \quad (4)$$

$$\varphi = 1.631e^{1.614\rho_d} \quad (5)$$

分析式(4)可知试样 c 随着 ρ_d 的减小而减小,且随着 ρ_d 的减小, c 的衰减速率由快到慢,并最终趋于稳定;而在接近最大干密度(1.78 g/cm^3)时变化较为显著,在干密度由 1.4 g/cm^3 增大至 1.6 g/cm^3 时, c 增加了 17.07 kPa ;在干密度由 1.6 g/cm^3 增大至 1.7 g/cm^3 时, c 增加了 42.62 kPa 。而由式(5)能看出 φ 亦随着 ρ_d 的减小而减小,但其整体的变化幅度并不大,干密度 1.4 g/cm^3 与 1.7 g/cm^3 的试样 φ 相差约 9.6° ;图 10 中各级载荷下的抗剪强度都随着试样 ρ_d 的减小而降低,且其变化幅度在高垂直应力条件下更为显著。

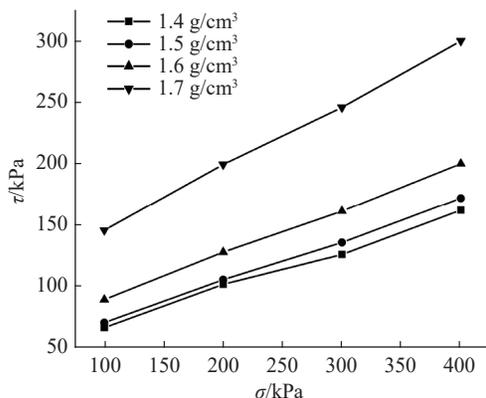


图 10 不同干密度下试样抗剪强度随垂直应力的变化

Fig. 10 Variation of shear strength with vertical stress of specimens of different dry densities

干密度对宁明膨胀土抗剪强度的影响主要体现在黏聚力上,试样干密度越小,单位体积土体的土颗粒越少,土粒间水膜越薄,其抗剪强度越小;此外,膨胀土干密度越小,其吸力越大,试样的抗剪强度越低;而干密度对于内摩擦角的整体影响并不显著,其变化在 10° 以内。

3 考虑抗剪强度衰减特性的边坡稳定性分析

3.1 几何模型

根据广西崇左-夏石镇某高速公路膨胀土边坡为研究对象,并参考该公路的地质勘察报告,该边坡土质主要由填土(①₁和①₂)、黏土②、强风化泥岩③和中风化泥岩④组成。同时根据地质调查及钻探、探槽揭示,该边坡滑动带基本位于黏土层,且下部强风化泥岩等土体不透水,大气影响深度为 7 m ,刚好大致为填土厚度和黏土厚度之和,影响急剧层深度为 2.5 m 。相关土层天然状态下基本参数指标见表 5。

结合上述实际工程地质勘察报告,将膨胀土边坡考

表 5 土层相关参数

Table 5 Soil layer related parameters

地层岩性	厚度 /m	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内摩擦角 /($^\circ$)	黏聚力 /kPa	其它
填土① ₁	0.2~1	18.0	5	24	成分黏土
填土① ₂	2.5~3.3	18.8	30	7	上层砾砂, 下层碎石
黏土②	0.3~4	18.4	8.4	35.6	中等膨胀土
强风化泥岩③	0.6~1	19.3	25	45	质量等级 V 级
中风化泥岩④	未钻穿	19.6	35	65	质量等级 V 级

虑为非匀质边坡,同时为提高模型求解时间,取黏土弹性模量 $12\,000 \text{ kPa}$,容重 18.4 N/m^3 ,泊松比 0.3 ,边坡高 20 m ,坡比 $1:1.5$ 。为避免尺寸效应带来的误差和便于模型求解收敛,坡顶取 15 m ,坡底取 25 m ,网格按线性梯度(长度)划分,起始长度 1.2 m ,结束长度 0.5 m 。由于填土土层由于土体较松散,易膨胀开裂,在降雨作用下容易引发降雨入渗,易软化下部土体,因此实际工程中对该部分填土进行了挖除。填土挖除后,为充分合理考虑到大气影响层对膨胀土边坡中黏土的影响,同时又不会影响到下部不透水泥岩,取大气影响层为距离坡面 4 m 范围的土体,正好为黏土厚度,急剧层为距离坡面 1.5 m 范围的土体(图 11)。

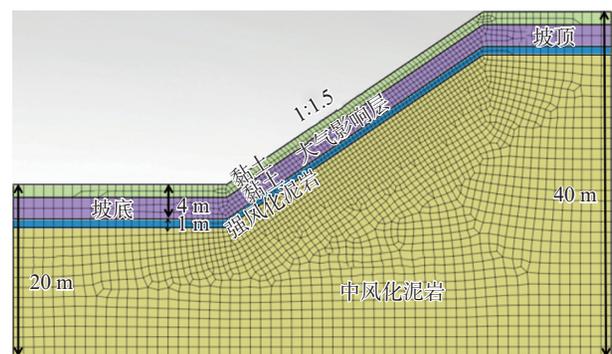


图 11 模型示意图

Fig. 11 Numerical simulation model

3.2 含水量对稳定性的影响

根据室内直剪试验结果,同时考虑到膨胀土具有浅层性,将测得的 7 个含水量下(干密度均为 1.6 g/cm^3)的膨胀土抗剪强度参数指标 c 和 φ 赋予给受大气影响的风化层土体,即距离坡面 4 m 范围内的黏土。强、中风化泥岩层土体参数指标取地质勘察报告的值,具体数值见表 5。计算得到不同含水量 w 下膨胀土边坡整体位移和潜在滑移面,如图 12、图 13 所示。

分析图 12 和图 13 可知,随着含水量 w 的增大,边坡的整体位移整体呈增大趋势,非饱和膨胀土边坡的浅

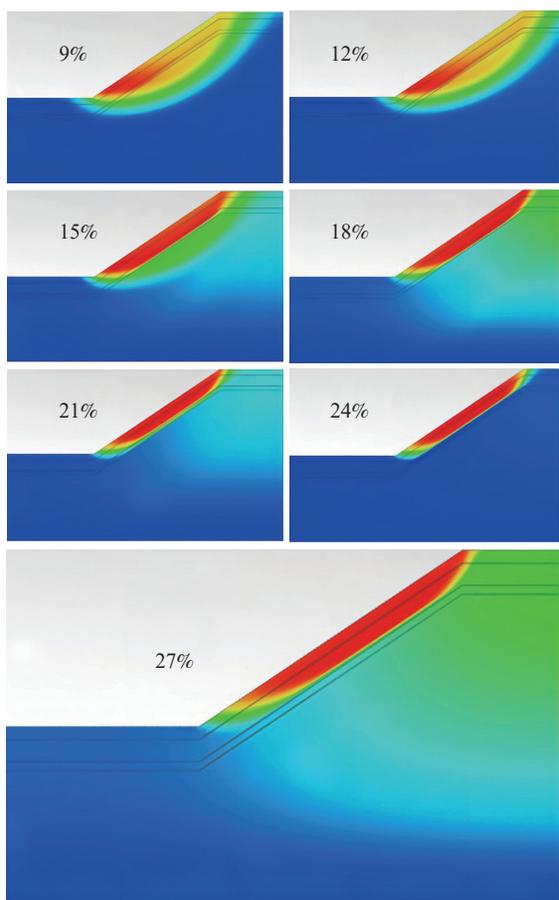


图 12 1.6 g/cm³ 干密度不同含水量条件下的边坡位移
 Fig. 12 Slope displacement with the 1.6 g/cm³ dry density under different moisture content conditions

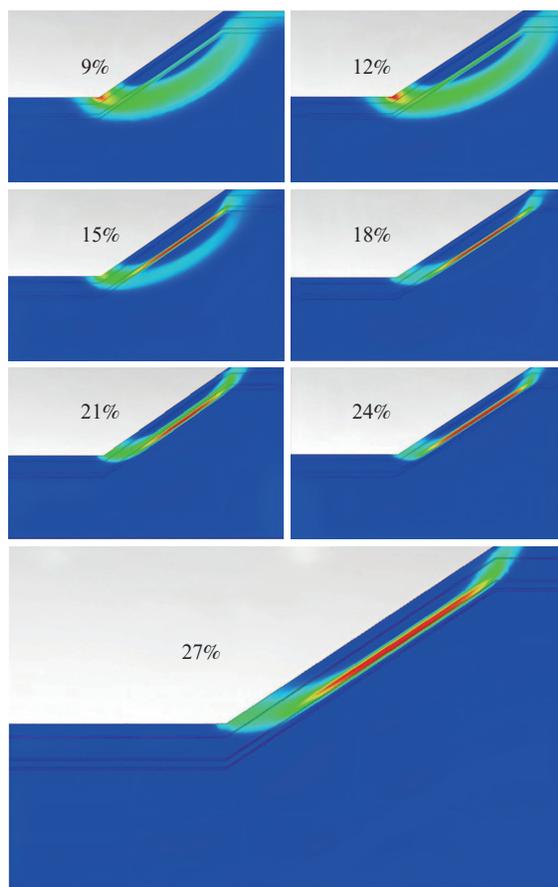


图 13 1.6 g/cm³ 干密度不同含水量条件下的边坡潜在滑移面
 Fig. 13 Potential slip surface of slope with the dry density of 1.6 g/cm³ under different moisture content

层破坏由受大气影响层膨胀土强度衰减导致。随着含水量的增加,土体的 c 不断减小,边坡位移不断增大,滑移面逐渐变浅;破坏形式为浅层滑塌式的破坏。边坡失稳的滑移面位置位于大气影响层和不透水泥岩的交界处,且与黏土的底部相切。

基于相同干密度,不同含水量下膨胀土的剪切试验和地质勘察报告,利用有限元分析软件对边坡进行稳定性分析,可得到随着膨胀土含水量的变化对边坡稳定性安全系数的影响规律,如图 14 所示的曲线,表达式为:

$$y = -0.008x^2 + 0.1884x + 2.025 \quad (6)$$

随着 w 的增大,膨胀土的强度参数指标不断衰减,含水量较高比低含水量情况下的衰减速度更大。同时,膨胀土边坡在天然状况下处于稳定状态,但当 w 增大至 27% 时,其 F_s 为 0.850,稳定性转变为失稳状态,发生滑坡、坍塌等工程现象;在此基础上,若继续增大含水量,膨胀土边坡将可能由浅层失稳进入完全失稳状态,这与实际工程中,在长时间降雨后,曾出现的多次滑坡现象类似。

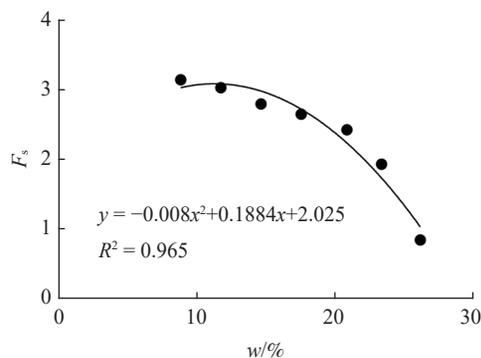


图 14 边坡安全系数随含水量的变化规律
 Fig. 14 The variation of slope safety factor with water content

3.3 干密度对稳定性的影响

根据试验结果,将测得的四个干密度下(含水量均为 18%)的膨胀土抗剪强度参数指标 c 和 φ 赋予给距离坡面 4 m 范围的黏土。强、中风化泥岩层土体抗剪强度参数指标取地质勘察报告值,具体数值见表 5。计算得到不同 ρ_d 下膨胀土边坡整体位移和潜在滑移面,如图 15、图 16 所示。

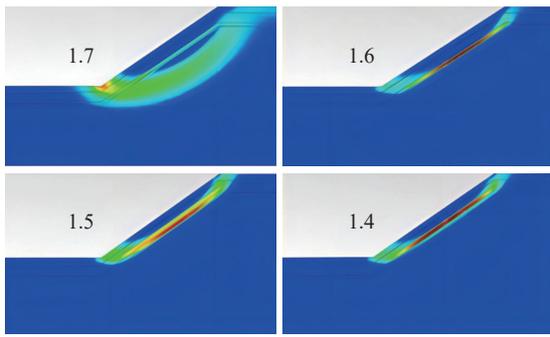


图 15 18% 含水量不同干密度条件下的边坡位移

Fig. 15 Slope displacement under different dry densities with the moisture content of 18%

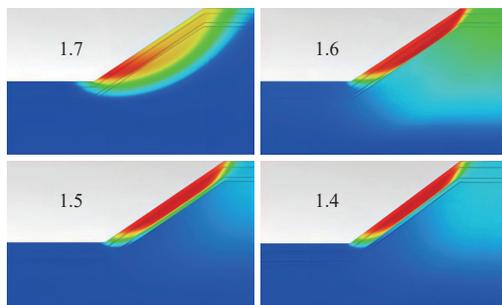


图 16 18% 含水量不同干密度条件下的边坡潜在滑移面

Fig. 16 Potential slip surface of slope under different dry densities with the 18% moisture content

从图 15 和图 16 中可以看出试样的 ρ_d 越小, 边坡位移越大, 潜在滑移面变浅; 这是因为土体的 c 随着 ρ_d 的减小而减小, 使得其抗剪强度降低; 此时, 边坡的破坏形式由整体滑动变为浅层滑塌。基于相同含水量, 不同干密度下膨胀土的剪切试验和地质勘察报告, 利用有限元分析软件对边坡进行稳定性分析, 可得到随着膨胀土干密度的变化对边坡稳定性安全系数的影响规律, 如图 17 所示的曲线, 其表达式为:

$$y = 8.375x^2 - 23.24x + 18.41 \quad (7)$$

试样 ρ_d 越小, 其抗剪强度越低; 且在 ρ_d 越大时其 F_s 增大趋势越为显著; 1.5 g/cm³ 干密度下的 F_s 为 2.409, 比 1.4 g/cm³ 的高出 0.124, 而 1.7 g/cm³ 干密度下的 F_s 与 1.6 g/cm³ 条件下的差值为 0.459。

4 结论

(1) 含水量的增大、干密度的减小都会引起膨胀土的峰值抗剪强度、黏聚力以及内摩擦角发生不同程度的衰减, 其中, 黏聚力的衰减幅度相较于内摩擦角更大。

(2) 通过多次膨胀土强度折减的方法可以很好地模拟降雨过程中由抗剪强度衰减引起的边坡稳定性的动态变化: 风化层土体强度接近未风化层土体强度时, 边

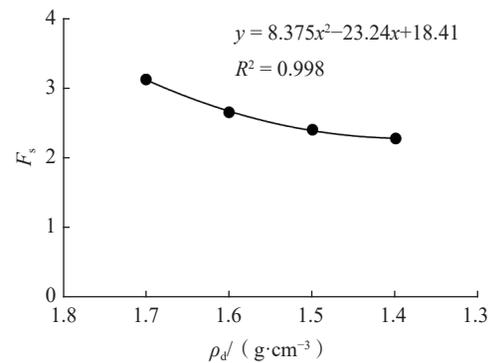


图 17 边坡安全系数随干密度的变化规律

Fig. 17 The variation of slope safety factor with dry density

坡处于稳定状态, 潜在滑动面穿过分层界面; 随着含水量增大、干密度变小, 风化层抗剪强度会不断衰减, 引起潜在滑动面逐渐外移, 边坡稳定性降低。

(3) 数值模拟结果表明: 与干密度减小相比, 含水量的增大对边坡稳定更为不利, 含水量增加到 27% 以后, 膨胀土边坡由稳定状态变为欠稳定状态, 因此在分析膨胀土边坡稳定性时, 应着重考虑含水量变化的影响。

参考文献 (References):

- [1] 谭波, 杨和平. 有限元强度折减法在膨胀土边坡滑塌分析中的应用 [J]. 长沙理工大学学报 (自然科学版), 2006, 3(4): 18-22. [TAN Bo, YANG Heping. Strength reduction method with FEM for analyzing the expansive soil cutting slope collapse and slide [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2006, 3(4): 18-22. (in Chinese with English abstract)]
- [2] ZIEKIEWICZ O C, HUMPHESON C, LEWIS R W. Associated and nonassociated visco-plasticity in soil mechanics [J]. Géotechnique, 1975, 25(4): 689-691.
- [3] 张硕, 蒋良滩, 罗强, 等. 增湿条件下膨胀土边坡稳定性影响因素有限元分析 [J]. 铁道标准设计, 2018, 62(10): 31-36. [ZHANG Shuo, JIANG Liangwei, LUO Qiang, et al. Finite element analysis of influencing factors on stability of expansive soil slope subject to humidification induction [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(10): 31-36. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 黄盛锋, 陈志波, 郑道哲. 基于灰色关联度法和强度折减法的边坡稳定性影响因素敏感性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 35-40. [HUANG Shengfeng, CHEN Zhibo, ZHENG Daozhe. Sensitivity analysis of factors influencing slope stability based on grey correlation and strength reduction method [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 35-40. (in Chinese with English abstract)]

- [5] 吴珺华, 杨松. 超固结膨胀土抗剪强度特性及边坡稳定研究 [J] . 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 70 - 74. [WU Junhua, YANG Song. Study on shear strength property of over-consolidated expansive soil and slope stability [J] . Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(4): 70 - 74. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 陈星, 李建林. 基于ADINA、ANSYS、FLAC的强度折减法 [J] . 水文地质工程地质, 2010, 37(3): 69 - 73. [CHEN Xing, LI Jianlin. The strength reduction method based on ADINA, ANSYS and FLAC [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2010, 37(3): 69 - 73. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 蒋武军, 李得建, 瞿拓宇. 基于强度折减法的浅埋隧道掌子面三维主动稳定性上限解析 [J] . 现代隧道技术, 2020, 57(6): 55 - 62. [JIANG Wujun, LI Dejian, QU Tuoyu. Upper bound analysis of three-dimensional active stability of a shallow tunnel face based on the strength reduction method [J] . Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(6): 55 - 62. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 高冯, 李小军, 迟明杰. 基于有限元强度折减法的单双面边坡稳定性分析 [J] . 工程地质学报, 2020, 28(3): 650 - 657. [GAO Feng, LI Xiaojun, CHI Mingjie. Analysis of stability of single and double side soil slopes with fem strength reduction method [J] . Journal of Engineering Geology, 2020, 28(3): 650 - 657. (in Chinese with English abstract)]
- [9] MANZARI M T, NOUR M A. Significance of soil dilatancy in slope stability analysis [J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(1): 75 - 80.
- [10] 李宁, 刘冠麟, 许建聪, 等. 降雨条件下边坡有限元强度折减法计算平台开发及其应用 [J] . 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 63 - 70. [LI Ning, LIU Guanlin, XU Jiancong, et al. Development of shear strength reduction method for slope stability analysis under rainfall conditions and its application [J] . Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 63 - 70. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 周健, 徐洪钟, 胡文杰. 干湿循环效应对膨胀土边坡稳定性影响研究 [J] . 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 152 - 156. [ZHOU Jian, XU Hongzhong, HU Wenjie. Impact of wetting-drying cycle effects on stability of expansive soil slopes [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 2): 152 - 156. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 刘明维, 黄世武, 尹健. 膨胀土斜坡地基路堤失稳破坏有限元极限分析 [J] . 岩土力学, 2008, 29(增刊1): 426 - 430. [LIU Mingwei, HUANG Shiwu, YIN Jian. Limit analysis of subgrade filling failure on expansive clay slope foundation with finite element method [J] . Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(Sup 1): 426 - 430. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 程灿宇, 罗富荣, 戚承志, 等. 有限元强度折减法计算边坡稳定的对比分析 [J] . 岩土力学, 2012, 33(11): 3472 - 3478. [CHENG Canyu, LUO Furong, QI Chengzhi, et al. Comparative analysis of slope stability by strength reduction method [J] . Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(11): 3472 - 3478. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 谭波, 郑健龙. 考虑次生裂隙结构面发育条件下的膨胀土边坡稳定分析 [J] . 桂林理工大学学报, 2010, 30(4): 561 - 565. [TAN Bo, ZHENG Jianlong. Analysis on expansive soil slope stability of epigenetic fissured structural plane deformation [J] . Journal of Guilin University of Technology, 2010, 30(4): 561 - 565. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 杨才, 王世君, 丰土根. 基于塑性区开展的边坡失稳判据研究 [J] . 中国科技论文, 2016, 11(13): 1461 - 1464. [YANG Cai, WANG Shijun, FENG Tugen. Study on slope's failure criterion based on the development of plastic zone [J] . China Sciencepaper, 2016, 11(13): 1461 - 1464. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013 [S] . 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for buildings in expansive soil regions: GB 50112—2013 [S] . Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)]
- [17] 贾磊柱, 胡春林, 杨新. 考虑膨胀土抗剪强度衰减特性的深基坑支护工程设计研究 [J] . 岩土工程学报, 2014, 36(增刊1): 66 - 71. [JIA Leizhu, HU Chunlin, YANG Xin. Design of supports for deep foundation pits considering attenuation properties of strength of expansive soils shear [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(Sup 1): 66 - 71. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 何芳婵, 李宗坤. 南水北调南阳段弱膨胀土增湿膨胀与力学特性试验研究 [J] . 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 190 - 194. [HE Fangchan, LI Zongkun. Experimental study of wetting expansibility and mechanical properties of weak expansive soil in Nanyang section of South-to-North Water Diversion Project [J] . Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup 2): 190 - 194. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 吕海波, 曾召田, 赵艳林, 等. 胀缩性土强度衰减曲线的函数拟合 [J] . 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 157 - 162. [LYU Haibo, ZHENG Zhaotian, ZHAO Yanlin, et al. Function fitting on strength attenuation curve of swell-shrinking soils [J] . Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Sup 2): 157 - 162. (in Chinese with English abstract)]