

张 彧,罗 阳,徐安花,等.含水量与抗剪强度关系影响下高盐量盐渍土路基边坡稳定性[J].长安大学学报:自然科学版,2020,40(3):22-32.

ZHANG Yu,LUO Yang,XU An-hua,et al. Stability of high salinity saline soil subgrade slope under the influence of water content and shear strength[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2020, 40(3): 22-32.

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2020.03.003

含水量与抗剪强度关系影响下高盐量盐渍土路基边坡稳定性

张 彧^{1,2}, 罗 阳², 徐安花³, 房建宏¹

(1. 青海省交通科学研究院,青海 西宁 810001; 2. 兰州交通大学 交通运输学院,甘肃 兰州 730070;

3. 青海交通职业技术学院,青海 西宁 810003)

摘 要:针对盐渍土中不同盐分类型的溶解度和亲水性差异较大问题,分析高盐量盐渍土含水量与抗剪强度关系变化对盐渍土路基边坡稳定性的影响。结合降雨量调查和现场含水量沿深度分布情况,开展适应环境条件的室内试验。针对不同含水量条件下高氯盐渍土(CL-1)和高硫低氯盐渍土(CL-2)路基填料进行直剪试验,得出含水量与抗剪强度参数关系函数。基于 Geostudio 建立盐渍土路基含水量-强度参数等值分层计算模型,通过体积压力板仪试验测量土样基质吸力随体积分含水量的变化规律。通过采用饱和/非饱和渗流的有限元分析与路基边坡稳定性的极限平衡分析相结合的方法,利用 GeoStudio 中 SLOPE/W 模块,分别计算和分析降雨强度、降雨持续时间等对盐渍土路基边坡稳定性的影响。考虑含水量和抗剪强度变化关系函数,通过建立的盐渍土路基含水量-强度参数等值分层计算模型对 CL-1 和 CL-2 盐渍土边坡稳定性进行了分析。结果表明:含水量在最优含水量的基础上增加 3% 时,CL-1 和 CL-2 的黏聚力较最优含水量时分别下降 94.3% 和 54.0%,内摩擦角的变化不大;在最优含水量的基础上减少 3% 时,CL-1 和 CL-2 的黏聚力较最优含水量时分别提高了 277.1% 和 89.7%,对 CL-2 的内摩擦角影响不大,CL-1 的内摩擦角出现明显减小;当降雨强度相同时,CL-1 填筑的路基的安全系数较 CL-2 填筑的路基变化更为明显,主要原因在于高氯盐的亲水性较硫酸盐强,抗剪强度参数受到水分变化的影响更大。

关键词:道路工程;盐渍土;边坡稳定性;含水量-强度参数等值分层

中图分类号:U416.16 文献标志码:A 文章编号:1671-8879(2020)03-0022-11

Stability of high salinity saline soil subgrade slope under influence of water content and shear strength

ZHANG Yu^{1,2}, LUO Yang², XU An-hua³, FANG Jian-hong¹

(1. Qinghai Transportation Research Institute, Xining 810001, Qinghai, China; 2. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Qinghai Communications Technical College, Xining 810003, Qinghai, China)

Abstract: Amid at the solubility and hydrophilicity of different salinity types in saline soils were

收稿日期:2019-11-09

基金项目:青海省应用基础研究计划项目(2018-ZJ-784)

作者简介:张 彧(1981-),男,山东莱州人,教授,工学博士,E-mail:zhangyu@mail.lzjtu.cn

quite different, the influence of the relationships between the water content and shear strength of saline soils on the stability of saline soil roadbed slopes were analyzed, combined with the rainfall survey and the depth distribution of the on-site moisture, the indoor test adapted to the environmental conditions was carried out. Direct shear tests were performed on the high-chlorine saline soil (CL-1) and high-sulfur low-chlorine saline soil (CL-2) under different water content conditions, and the relationships between water content and shear strength parameters were obtained. Based on Geostudio, a water content-strength parameter equivalent layered calculation model for saline soil subgrade was established, and the change law of soil sample matrix suction with volumetric water content was measured by volume pressure plate test. By combining the finite element analysis of saturated/unsaturated seepage and the limit equilibrium analysis of the stability of the roadbed slope, the SLOPE/W module in GeoStudio was used to calculate and analyze the operating conditions of rainfall intensity and rainfall duration influence of saline soil subgrade slope stability. Considering the relationship function between the water content and the shear strength, the stabilities of the CL-1 and CL-2 saline soil slopes were analyzed through the establishment of an equivalent layered calculation model of the saline soil roadbed moisture content-strength parameters. The results show that when the water content is increased by 3% on the basis of the optimal water content, the cohesion of CL-1 and CL-2 decreases by 94.3% and 54.0%, respectively, the internal friction angle does not change much. When the optimal water content is reduced by 3%, the cohesion of CL-1 and CL-2 are increased by 277.1% and 89.7%, respectively, compared with the optimal water content, which has little effect on the internal friction angle of CL-2, the internal friction angle of CL-1 has decreased significantly. When the rainfall intensity is the same, the safety factor of the roadbed filled with CL-1 is more obvious than that of the roadbed filled with CL-2. The main reason is that the high chloride is more hydrophilic than the sulfate and the shear strength parameters are more affected by changes in moisture. 3 tabs, 14 figs, 25 refs.

Key words: road engineering; saline soil; slope stability; water content-strength parameter equivalent layering

0 引言

盐渍土是盐土和碱土以及各种不同程度盐化、碱化土壤的总称。盐渍土与一般土的最大区别在于盐渍土含有一定量的易溶盐,含水量较高时,易溶盐完全溶解于水中,含水量较低时,过饱和的盐分会以晶体的形式存在于土颗粒之间,起一定的骨架作用。因此,盐渍土在含水量较低时土质坚硬,土颗粒间存在微-弱胶结,有一定的承载力^[1]。

在不同土质抗剪强度参数与含水量关系的试验研究方面,Fredlund等提出非饱和土抗剪强度公式^[2]。程小勇等分别针对原状黄土、膨胀土、非饱和土进行直剪试验,分析含水量和抗剪强度参数之间的关系,通过曲线回归发现:黏聚力的对数与含水量成线性关系,而内摩擦角与含水量也成线性关系^[3-5]。

在对不同土质边坡受含水量变化影响后的稳定性研究方面,Saada等对饱和岩质边坡的稳定性进行了分析,特别强调孔隙水压力对岩土结构整体稳定性的影响,并通过超孔隙压力分布梯度来解释渗流规律^[6]。很多学者针对裂隙岩质边坡、红层路堑边坡、含软弱夹层黏性土坡、排土场层状碎石土边坡和炭质泥灰岩路基等诸多不同土质类型的路基边坡,开展了在不同降雨强度、降雨持续时间等条件下的边坡稳定性研究^[7-11]。余涛分析了粗粒土路堤的边坡渗流(孔隙水压力和土体含水量的分布)和不同降雨条件下的路堤边坡稳定性问题^[12]。蒋中明等研究了软岩边坡在极端长期降雨条件下的稳定性^[13]。综上,关于降雨入渗下边坡的稳定性研究,众多学者已经针对不同土质类型路基边坡进行了诸多研究,并提出了相应的分析理论和方法。盐渍土较其他类型土体在常规条件下多一相盐分,盐分在

干燥状态下发挥土颗粒的骨架作用,抗剪强度高。然而,由于盐渍土中不同盐分亲水性强弱的差异性以及盐颗粒溶于水后会丧失原有的骨架支撑作用,在很大程度上会影响高氯盐渍土(CL-1)和高硫低氯盐渍土(CL-2)在遇水后其抗剪强度参数、基质吸力与含水量关系,造成高盐量盐渍土边坡稳定性变化。然而针对在降雨条件下,高盐量盐渍土含水量与强度关系引起的边坡稳定性问题研究还少见报道。

众多学者在研究降雨条件下土质边坡的稳定性过程中考虑了诸多因素:包括初始含水量对降雨的入渗过程影响;初始渗流场的分布对坡积土边坡降雨入渗的影响;不同深度处基质吸力与降雨深度的关系;降雨条件下暂态饱和区形成条件;多因素影响下暂态饱和区的分布;降雨过程中地下水位暂态饱和区的变化规律;路堤内部饱和度、孔隙水压力、渗透力等^[14-17]。Van Damme等提出了一种新的基于粒子的布拉夫形态模型(BMM),研究了二维渗流对土坡和堤坝稳定性和坍塌的影响,该模型很好地预测了部分饱和土壤由于受到渗流引起的水力传导率变化^[18]。Khanh等给出了瞬态非饱和和渗流条件下无限边坡稳定性分析的简单数值模拟方程,其优点是可以预测部分饱和边坡稳定性的变化以及降雨数据,且适用于不同类型的土-水特征曲线(SWCC)模型的水力边界条件和土壤性质的不均匀性^[19]。白雪亮针对填方黄土的渗流特性及边坡稳定性问题,通过数值模拟的方法,对不同降雨条件下的边坡稳定性进行分析^[20]。宋亮亮针对非饱和红砂岩土路基边坡稳定性问题,通过试验得到红砂岩土基质吸力与含水量的关系,绘制出红砂岩土的土水特征曲线,得到降雨条件下非饱和红砂岩土的水分运动方程,并利用ABAQUS软件进行降雨入渗过程中边坡稳定性模拟^[21]。本文针对高盐量盐渍土强度参数、土质吸力等参数受含水量影响较大的特性,利用GeoStudio系统软件中的SEEP/W模块模拟降雨条件下盐渍土路基土体内部的含水量分布情况,提出并建立盐渍土路基含水量-抗剪强度参数计算模型,分析在不同降雨强度 q 、降雨时间 t 下盐渍土路基边坡稳定性,为内陆盐渍土地区受降雨影响后高盐量盐渍土的路基边坡稳定性分析提供依据。

1 工程背景

格尔木市位于柴达木盆地中南部格尔木冲击平

原上,平均海拔2 780 m,辖区属大陆高原气候,少雨、多风、干旱,冬季漫长寒冷,夏季凉爽短促,该地区短时强降水及暴雨是夏季主要的灾害性天气。由于短时强降水及暴雨具有突发性、局地性的特点,以及盆地干旱期长、植被覆盖率低、地形复杂等自然因素的共同作用下,夏季容易出现由降水引发的洪涝、泥石流等次生灾害,所以短时强降水和暴雨是影响该地区路基边坡的主要因素。图1是在青海省察尔汗盐湖地区察格(察尔汗—格尔木)高速公路实际调查过程中发现的由于降雨作用造成盐渍土路基边坡发生裂缝和沉降的现场图。



(a) 路基沉降裂缝



(b) 路基冲刷

图1 察格高速公路路基边坡裂缝现象

Fig. 1 Phenomenon of cracks on subgrade of Cha-Ge Expressway

根据中国气象科学数据共享服务网对格尔木市的气候资料进行调查,该城市2001年~2015年的月平均降雨量如图2所示。同时考虑到极端气候,例如2018年6月30日夜间~7月3日,海西州出现了一次大范围的强降水天气过程,降水主要集中在海西东部地区。此次有21个站点累计降雨量在50 mm以上,降水中心在乌兰县哈里哈图,降雨量为109.1 mm,其次为乌兰县察汗诺,降雨量为99.7 mm。其中6月30日08时~7月1日08时乌兰县降雨量为34.6 mm,接近1961年以来,7月单日历

史极值,位列历史同期第2位。此次降水过程范围广,持续时间长,东部地区降雨量普遍较大,以短时强降水为主,期间伴有雷暴、大风天气。通过气象数据的调查可以看出,降雨对该地区路基边坡的影响不容忽视。

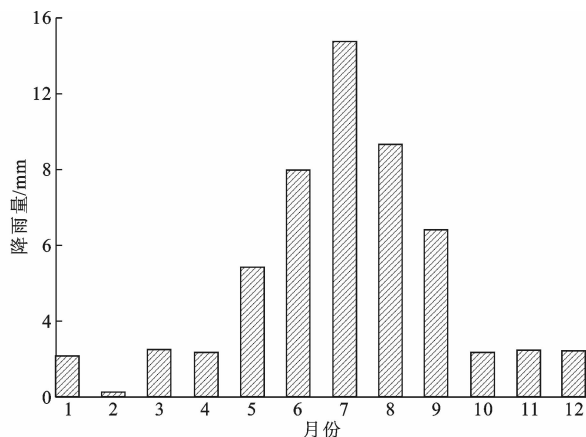


图2 格尔木市月平均降雨量

Fig. 2 Monthly average precipitation in Golmud

从图2可以看出,7月份平均降雨量达到了13.6 mm,居全年最高,其他月份则均小于10 mm,因此7月份也是该地区盐渍土路基受降雨影响最严重的时间段。通过对该地区盐渍土路基钻芯取样测得的不同深度下的含水量分布情况,如图3所示^[1]。可以看出,由于该地区干燥和蒸发量大的缘故,浅层土体含水量小。在降雨作用下,上层土体含水量迅速升高,考虑到高盐量盐渍土呈现较强的亲水性,因此其边坡稳定性变化较大。

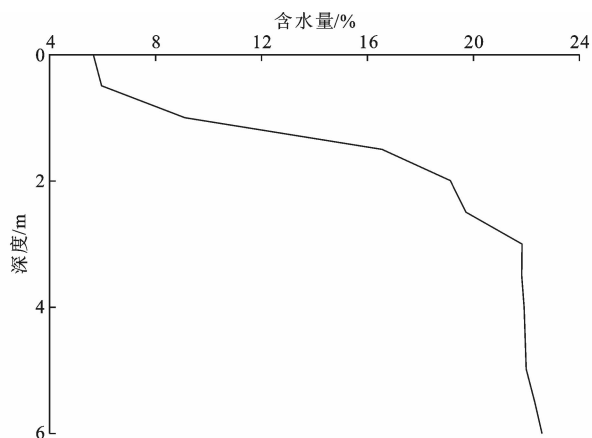


图3 路基内含水量随深度变化

Fig. 3 Water contents changes with depth in subgrade

2 含水量与盐渍土抗剪强度关系试验

2.1 物理参数试验

青藏高原察格高速公路沿线盐渍土主要以氯盐渍土和硫酸盐渍土为主。本文选取道路沿线盐含量较高的具有典型代表性的2组高盐量盐渍土:氯盐含量高的土样CL-1,氯盐含量低硫酸盐含量较高的土样CL-2。根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)分别进行了相对密度、液限与塑限含水量、最大干密度与最优含水量、颗粒分析及易溶盐化学试验等。试验结果表明,这2种盐渍土土样都属于饱和度在75%~96%的非饱和和低塑限黏土。2种土样的物理特征参数及化学成分分析见表1、表2,图4为2种土样的粒径分布曲线^[1]。

表1 盐渍土的物理特征参数

Tab. 1 Physical properties parameters of saline soil

土样编号	相对密度	液限/%	塑限/%	土的分类	最优含水量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	饱和度/%
CL-1	2.42	26.3	17.4	低塑限黏土	6.6	1.96	75.6
CL-2	2.65	38.7	25.4	低塑限黏土	16.9	1.77	95.5

表2 盐渍土中不同盐分的含量

Tab. 2 Contents of different salinities in saline soil

土样编号	8大离子含量								总含盐量
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	总计	
CL-1	0.03	0.13	17.93	0.48	0.60	0.98	9.69	29.84	36.1
CL-2	0.00	0.01	3.37	1.49	0.70	0.24	1.62	7.43	11.9

2.2 直剪试验

根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007),在室温条件下,对选出的2种盐渍土土样在96%压实度下,选取最优含水量、最优含水量±1.5%、±3%,进行环刀制样。为保证含水量不发生变化,将制好的土样用保鲜膜包裹,然后将数字应变控制的直剪设备放在步入式低温恒温室中进行直剪试

验。所有直剪试验均采用0.02 mm/min的剪切速率进行,剪切试样尺寸为内径61.8 mm,高度20 mm,应力 σ 取100、200、300、400 kPa。同时用数显式游标卡尺量取不同含水量下的变形情况,绘制其剪切应力-应变曲线。

2.3 试验结果

2种土样在96%压实度条件下,基于最优含水

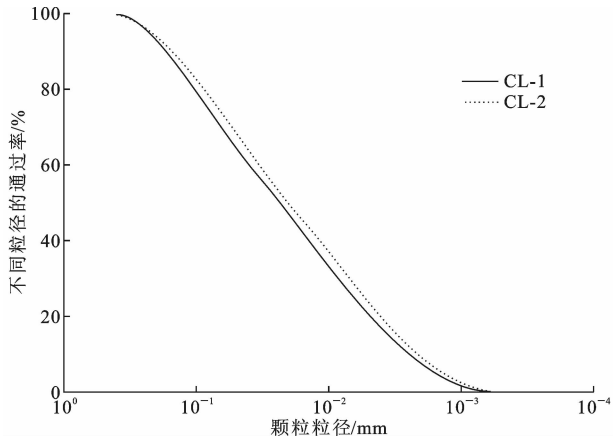


图4 CL-1、CL-2 粒径分布

Fig. 4 Particle size distributions of CL-1 and CL-2

量 w_{opt} 增加和减少 3% 后在常温下进行直剪试验, 其剪切应力-应变曲线如图 5 所示, 峰值剪切强度与上覆压力的关系如图 6 所示。通过线性回归和 Mohr-Coulomb 破坏标准, 从而获得土样的黏聚力和内摩擦角。

CL-1 和 CL-2 两类盐渍土黏聚力、内摩擦角随含水量变化如图 7 所示。可知, 含水量在最优含水量的基础上减少 3% 后, 土样的黏聚力明显高于在最优含水量时的黏聚力。CL-1 含水量在最优含水量的基础上减少 3%, 其黏聚力为 79.2 kPa, 比最优含水量下土样的黏聚力 (21 kPa) 增加了 277.1%。CL-2 含水量在最优含水量的基础上减少 3% 后, 其黏聚力由 34.8 kPa 增长至 66.0 kPa, 增长幅度为

89.7%。相比之下, 在最优含水量的基础上减少 3% 对 CL-2 的内摩擦角的影响很小, 但对 CL-1 的内摩擦角有较大影响, 从 37.27° 变为 43.02°。

含水量在最优含水量的基础上提高 3% 后, 两类土样的黏聚力均低于在最优含水量时, CL-1 含水量在最优含水量的基础上增加 3% 后, 其黏聚力降至 1.2 kPa, 比最优含水量下土样的黏聚力 (21 kPa) 降低了 94.3%。CL-2 含水量在最优含水量的基础上增加 3% 后, 其黏聚力降至 16.0 kPa, 较最优含水量条件下降低了 54.0%。在最优含水量的基础上增加 3% 对 2 种土样的内摩擦角的影响都不明显。

CL-1 黏聚力、内摩擦角和含水量变化的关系如下所示

$$c = \begin{cases} -19.4\Delta w + 21 & w \in [w_{opt} - 3\%, w_{opt}] \\ -6.6\Delta w + 21 & w \in [w_{opt}, w_{opt} + 3\%] \end{cases} \quad (1)$$

$$\varphi = \begin{cases} -1.92\Delta w + 37.27 & w \in [w_{opt} - 3\%, w_{opt}] \\ -0.09\Delta w + 37.27 & w \in [w_{opt}, w_{opt} + 3\%] \end{cases} \quad (2)$$

式中: c 为土体黏聚力; φ 为土体内摩擦角; Δw 为在最优含水量下增加或减少的含水量。

CL-2 黏聚力、内摩擦角和含水量变化的关系如下所示

$$c = \begin{cases} -10.4\Delta w + 34.25 & w \in [w_{opt} - 3\%, w_{opt}] \\ -6.93\Delta w + 34.25 & w \in [w_{opt}, w_{opt} + 3\%] \end{cases} \quad (3)$$

$$\varphi = \begin{cases} 0.06\Delta w + 34.25 & w \in [w_{opt} - 3\%, w_{opt}] \\ -0.09\Delta w + 34.25 & w \in [w_{opt}, w_{opt} + 3\%] \end{cases} \quad (4)$$

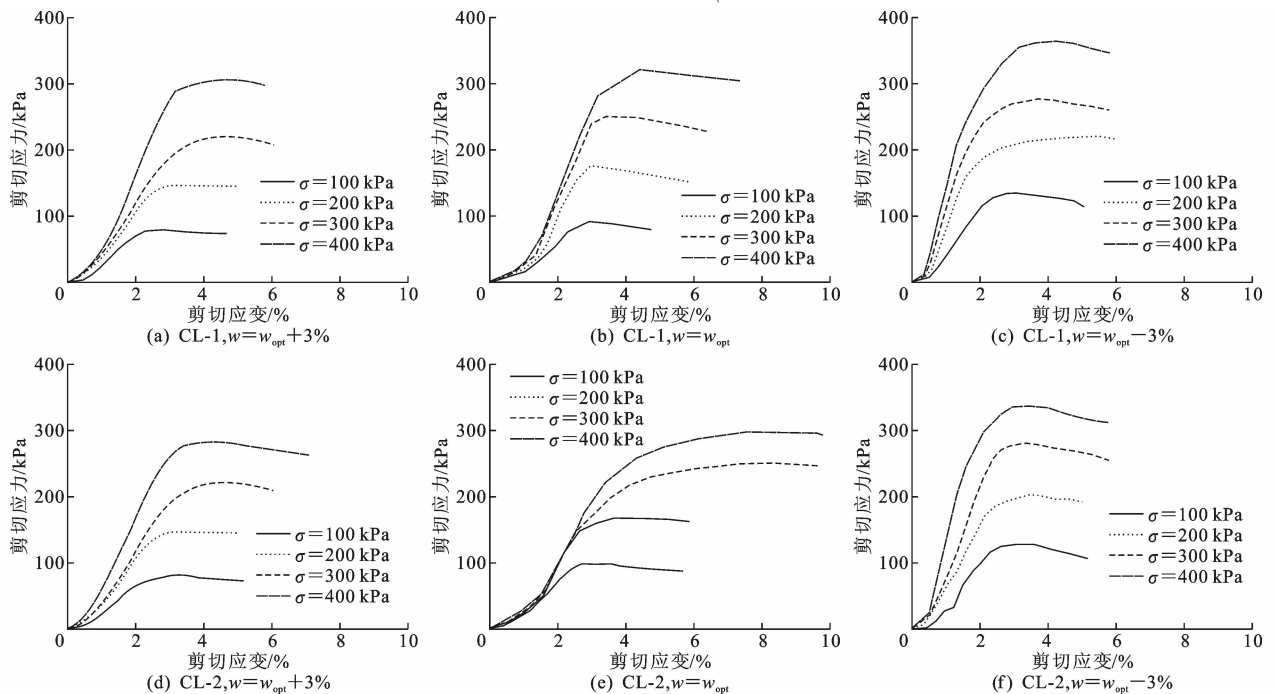


图5 剪切应力-应变曲线

Fig. 5 Shear stress-strain curves

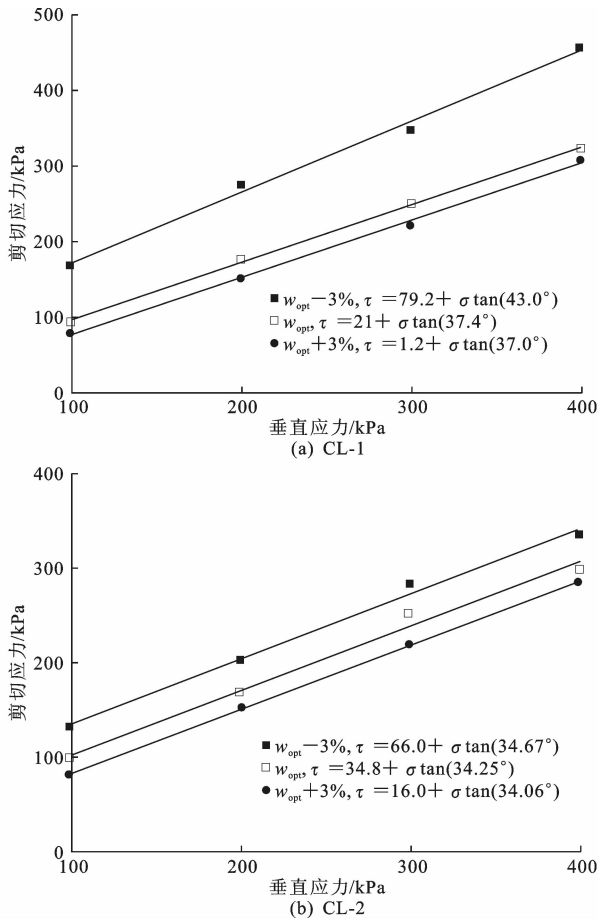


图 6 峰值剪切强度与上覆压力的关系

Fig. 6 Relationships between peak shear strength and overburden pressure

目前,许多学者在研究路基边坡稳定性的问题时,应用传统的方法,将路基看成一个整体,赋予单一的抗剪强度参数值。未能充分考虑在不同的降雨条件下,由于不同土体渗透系数差异导致路基不同位置的含水量不同,进而造成路基土体抗剪强度参数值出现差异的问题。所以根据含水量与抗剪强度参数之间的分段变化规律,导入至建立的路基含水量-强度参数等值分层计算模型,能更好地反映含水量变化对盐渍土路基边坡的影响。

3 非饱和土渗流强度理论

3.1 非饱和土渗流理论

在同种土中,渗透系数随着含水量的增大而增大。路基土体渗流场分析中,由于雨水入渗时的渗流是瞬态流,不考虑水的压缩性、渗流固结问题,则土体内非恒定渗流偏微分方程如下

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = m_w \rho_w g \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

式中: h 为岩体裂隙中的总水头; k_x 、 k_y 分别为 x 和

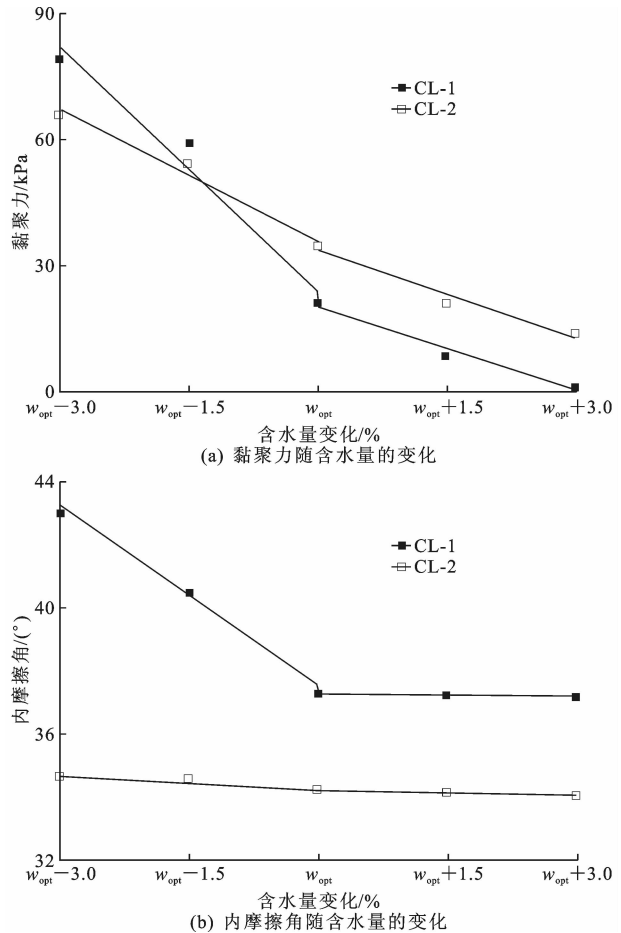


图 7 水分含量增加过程抗剪强度参数的变化

Fig. 7 Changes of shear strength parameters during process of increasing moisture contents

y 方向的渗透系数; W 为源汇项; m_w 为比水容量; ρ_w 为水的密度。

3.2 盐渍土抗剪强度分析

Fredlund 等对非饱和土的特性进行了深入的研究,在考虑基质吸力的基础上,提出了非饱和土的抗剪强度理论公式^[2]如下

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan(\varphi) \quad (6)$$

式中: τ 为非饱和土抗剪强度; u_a 土体内的孔隙气压力。

黏聚力的计算如下

$$c = c' + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) \quad (7)$$

式中: c' 为土体有效黏聚力; u_w 为土体内的孔隙水压力; φ_b 为随基质吸力($u_a - u_w$)变化的内摩擦角。

在考虑含水量影响的情况下,建立新的非冻结盐渍土黏聚力表达式如下

$$c = c' + K \Delta w + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) \quad (8)$$

式中: K 为每增加 1% 含水量,抗剪强度参数的变化量。

CL-1 的总黏聚力可表示为

$$c = c'_{CL-1} + K'_{CL-1} \Delta w + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) \quad (9)$$

式中: c'_{CL-1} 为 CL-1 土样的有效黏聚力; K'_{CL-1} 为 CL-1 土样每增加 1% 含水量, 抗剪强度参数的变化量。下标 CL-2 表示 CL-2 土样的参数。

含水量在 $[\omega_{opt} - 3\%, \omega_{opt}]$ 时, $c'_{CL-1} = 21 \text{ kPa}$, $K'_{CL-1} = -19.4 \text{ kPa}$ 。

含水量在 $[\omega_{opt}, \omega_{opt} + 3\%]$ 时, $c''_{CL-1} = 21 \text{ kPa}$, $K''_{CL-1} = -6.6 \text{ kPa}$ 。

因此, 可将其总结为

$$\begin{cases} \tau = -c'_{CL-1} + K'_{CL-1} \Delta w + (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) & [\omega_{opt} - 3\%, \omega_{opt}] \\ \tau = -c''_{CL-1} + K''_{CL-1} \Delta w + (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) & [\omega_{opt}, \omega_{opt} + 3\%] \end{cases} \quad (10)$$

同理可得到 CL-2 土样受含水量影响的抗剪强度表达式

$$\begin{cases} \tau = -c'_{CL-2} + K'_{CL-2} \Delta w + (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) & [\omega_{opt} - 3\%, \omega_{opt}] \\ \tau = -c''_{CL-2} + K''_{CL-2} \Delta w + (\sigma - u_a) \tan(\varphi') + (u_a - u_w) \tan(\varphi_b) & [\omega_{opt}, \omega_{opt} + 3\%] \end{cases} \quad (11)$$

由数据拟合可得 $c'_{CL-2} = 34.25$, $K'_{CL-2} = -10.4$; $c''_{CL-2} = 34.25$, $K''_{CL-2} = -6.93$ 。

4 数值分析模型及计算方案

4.1 计算模型、边界与初始条件

研究对象以察格高速公路路基剖面为例, 建立路基模型, 路面宽度 26 m, 路基高度 4 m, 坡度 1:1.5。路基填土是压实度为 96% 的盐渍土, 地基土为粉质黏土。路基边坡没有采取任何防护措施。采用有限元与极限平衡相结合的方法, 进行降雨入渗引起的路基边坡稳定性分析, 有限元划分网格见图 8。

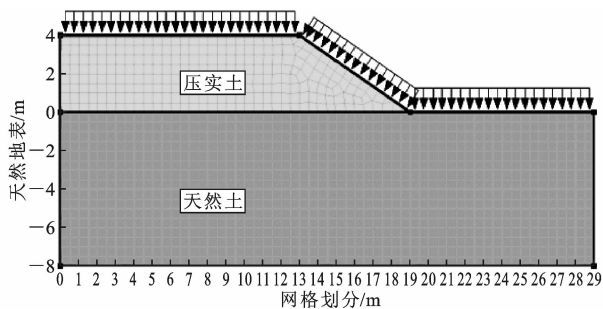


图 8 有限元网络划分

Fig. 8 Finite element network partition

4.2 计算参数

在察格高速公路 K603+260 和 K636+000 边坡附近分别采集 CL-1 和 CL-2 土样, 随后进行室内变水头试验, 测得密实状态和天然状态下盐渍土的

饱和渗透系数。同时, 进行体积压力板仪试验测量土样基质吸力随体积含水量的变化规律, 得到盐渍土体积含水量与基质吸力(土-水特征)的关系曲线, 如图 9 所示^[22-25]。

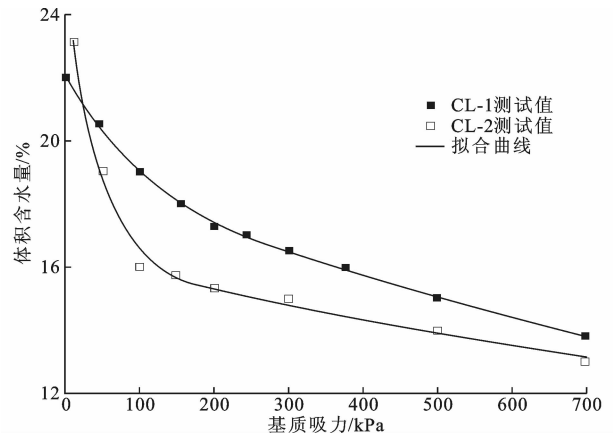


图 9 土样土-水特征曲线

Fig. 9 Curves of soil-water characteristic of sample

从土样物理特性参数可以看出, CL-1 和 CL-2 的最优含水量分别为 6.6% 和 16.9%。盐渍土在较干燥状态下, 土体里的盐颗粒发挥骨架支撑作用, 遇水盐颗粒融水后便丧失了骨架性能。由于 CL-1 中总含盐量以及氯盐含量高, 而氯盐亲水性要远高于其他类型盐, 这是 CL-1 最优含水量较 CL-2 低的原因之一。参考李永红^[25]在氯盐渍土的变形和强度特性研究中关于氯盐含量对盐渍土基质吸力的影响, 结合图 9 所示的土-水特征曲线, 可验证在相同含水量条件下, CL-1 的基质吸力高于 CL-2。

4.3 方案设计

为了研究不同降雨强度、降雨持续时间对路基边坡稳定性的影响, 基于路基含水量-强度参数等值分层计算模型, 对 CL-1、CL-2 填筑的路基边坡在 8 种降雨工况下的边坡稳定性进行计算, 具体计算方案见表 3。

表 3 计算方案

Tab. 3 Calculation plan

土样编号	方案编号	降雨强度/($10^{-2} \text{ m} \cdot \text{h}$)	降雨持续时间/h
CL-1	1	0.2	2
	2	0.2	4
	3	0.2	8
	4	0.2	12
CL-2	1	0.1	6
	2	0.2	
	3	0.5	
	4	1.0	

5 边坡稳定性分析

路基含水量-强度参数等值分层计算模型指的是结合室内测定的土体强度参数与含水量的函数关系,根据含水量确定路基土体具体位置的强度参数,然后将路基进行横向分层,计算路基边坡安全系数,分析路基边坡稳定性。图10是稳态条件下的路基含水量-强度参数等值分层计算模型示意,路基土体内的含水量主要受到降雨和地下水的的影响。图10中 c_i 、 φ_i 分别为第 i 分层的黏聚力、内摩擦角,实线表示等水分线,其能够更加准确反映土体强度参数的变化。通过查阅资料,了解到该地区的地下水位一般位于天然地面以下6~8 m的位置^[1]。

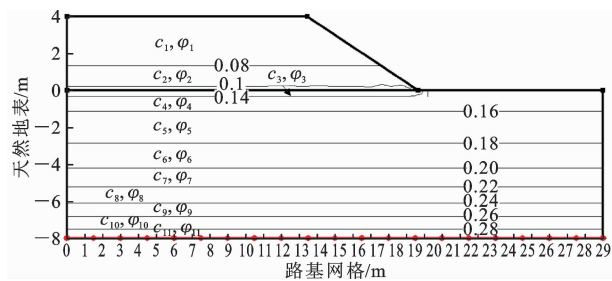


图10 含水量-强度参数等值分层计算模型

Fig. 10 Equivalent layered calculation model of water content-strength parameters

5.1 降雨持续时间对边坡稳定性的影响

图11是2种土样填筑的路基边坡在降雨强度为2 mm/h的情况下,含水量随时间的变化。从图11可以发现,由于降雨强度较小,降雨仅对边坡下50 cm以内的土体含水量有影响。

当降雨强度为2 mm/h时,路基填土分别为CL-1、CL-2的路基边坡安全系数随降雨持续时间的变化如图12所示。从图12可以看出:CL-1相对于CL-2变化较为明显,安全系数从稳态条件下的3.729到降雨12 h之后的3.16,降低了15%;CL-2安全系数从稳态条件下的4.02到降雨12 h之后的3.72,降低了7.4%。主要是因为氯盐的亲水性较硫酸盐强,抗剪强度参数受到水分变化的影响更大。

5.2 降雨强度对边坡稳定性的影响

选取4种降雨强度(1、2、5、10 mm/h)对路基边坡稳定性进行分析。当地降雨量较少,本文选取10 mm/h的降雨强度是为了模拟极端条件下的降雨。

图13为CL-1填筑的路基在不同降雨强度下,路基边坡安全系数随时间的变化关系。从图13可以看出:在降雨强度为1 mm/h的情况下,安全系数的变化很小;随着降雨强度的增加,安全系数随着时

间变化的范围越来越大,当降雨强度为10 mm/h的时候,安全系数从3.479降到了2.229。

图14为CL-2填筑的路基在不同降雨强度下,路基边坡安全系数随时间的变化关系。从图14可以看出:在降雨强度为1 mm/h的情况下,安全系数略有下降;随着降雨强度的增加,安全系数随着时间变化的范围越来越大,当降雨强度为10 mm/h时,安全系数从3.895降到了3.27。

综上,随着降雨强度的增加,单位时间内安全系数的变化范围逐渐增大,且CL-1比CL-2受降雨的影响更大,其原因为CL-1的强度参数较CL-2更易受含水量的影响,且同一含水量下CL-1的基质吸力大于CL-2的基质吸力。

6 结 语

(1)含水量在最优含水量的基础上增加3%后,土样黏聚力变化较大,CL-1和CL-2的黏聚力较最优含水量时分别下降了94.3%和54.0%;内摩擦角在最优含水量的基础上减少3%时,CL-1和CL-2的黏聚力较最优含水量时分别提高了277.1%和89.7%。

(2)提出了含水量-强度参数等值分层路基计算模型。降雨强度相同时,CL-1相对CL-2填筑的路基安全系数变化较为明显,主要是因为氯盐的亲水性较硫酸盐强,抗剪强度参数受到水分变化的影响更大,从而进一步导致CL-1填筑的路基安全系数降低比CL-2更明显。

(3)降雨强度对盐渍土路基边坡稳定性的影响程度取决于盐渍土的渗透性和降雨的持续时间,随着降雨强度的增加,安全系数随着时间变化的范围越来越大。

(4)本文含盐类型、盐量范围参数取值较单一,且未考虑温度对盐渍土抗剪强度参数的影响。下一步,应拓展含盐量范围和含盐类型,进行强度试验,同时进行水分和温度耦合,以更好适应盐渍土路基工程。

参考文献:

References:

[1] 张 彧,房建宏,刘建坤,等.察尔汗地区盐渍土水热状态变化特征与水盐迁移规律研究[J].岩土工程学报,2012,34(7):1344-1348.

ZHANG Yu, FANG Jian-hong, LIU Jian-kun, et al. Study on the variation characteristics of hydrothermal

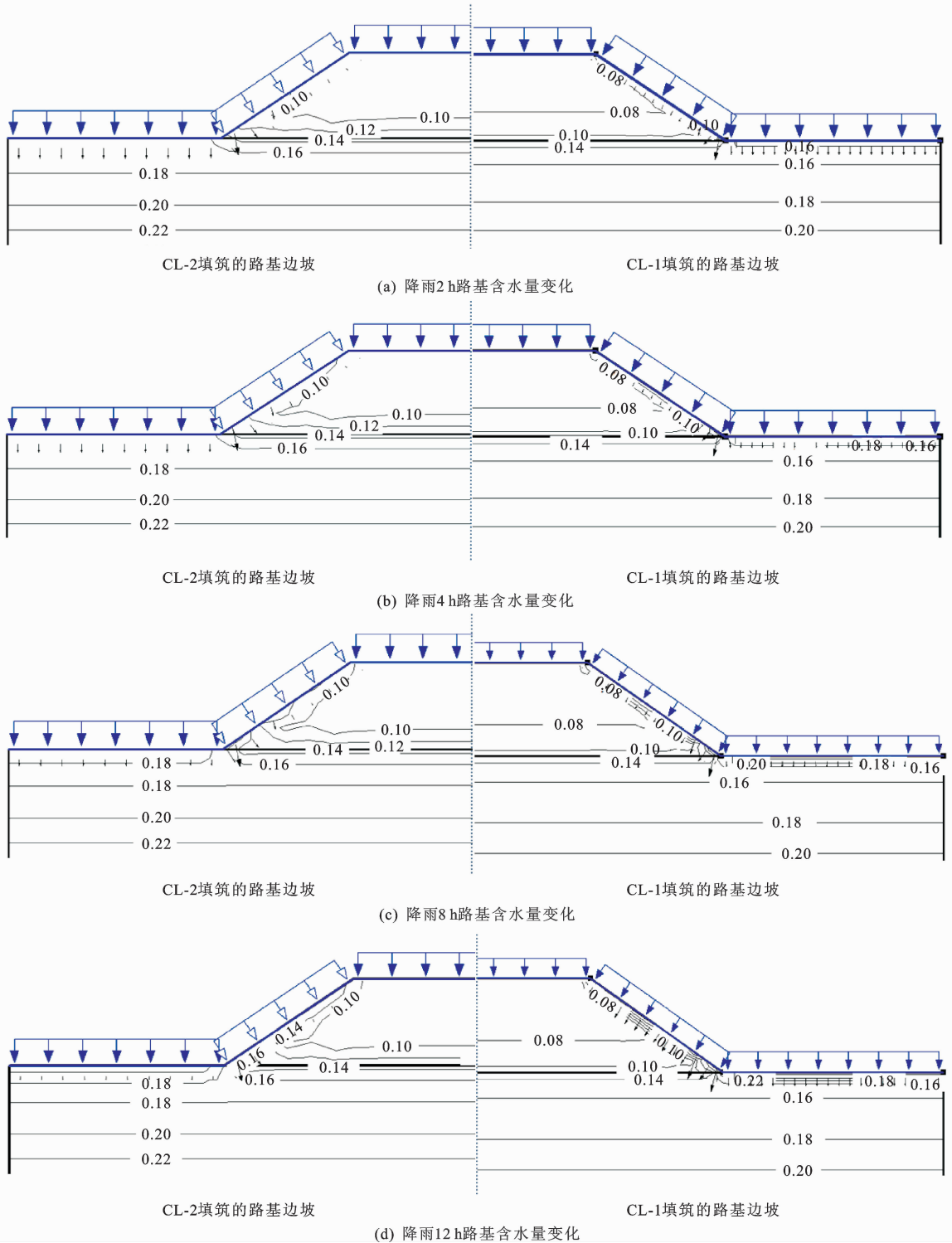


图 11 路基含水量随时间变化

Fig. 11 Roadbed water contents change with time

state and the law of water and salt migration of saline soil in Chaerhan Area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(7): 1344-1348.

[2] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.

[3] 程小勇. 含水量对黄土强度的影响试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2009.

CHENG Xiao-yong. Experimental study on the effect of water content on the strength of loess[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009.

[4] 杨庆, 张慧珍, 栾茂田. 非饱和膨胀土抗剪强度的试

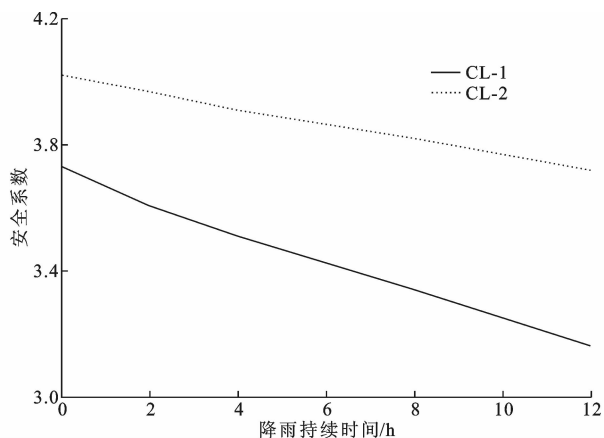


图12 安全系数与降雨时间的关系

Fig. 12 Relationships between safety factor and rainfall time

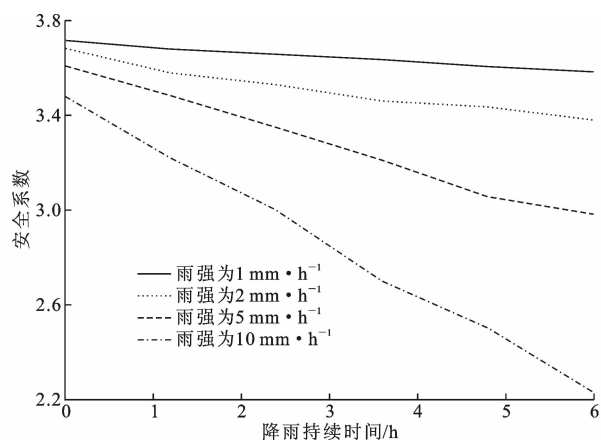


图13 CL-1在不同降雨强度下,安全系数和降雨时间的关系

Fig. 13 Relationships between safety factor and rainfall time of CL-1 under different rainfall intensities

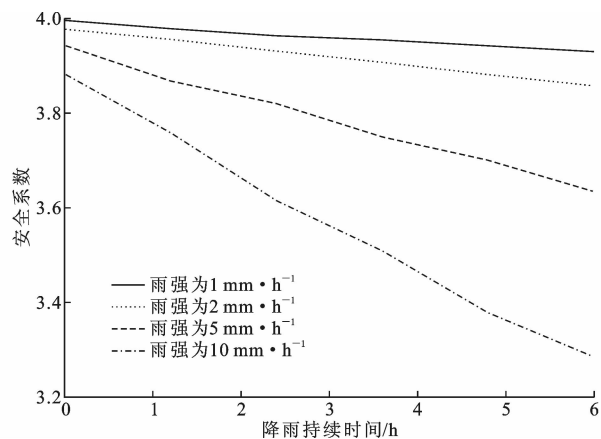


图14 CL-2在不同降雨强度下,安全系数和降雨时间的关系

Fig. 14 Relationships between safety factor and rainfall time of CL-2 under different rainfall intensities

验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 420-425.

YANG Qing, ZHANG Hui-zhen, LUAN Mao-tian. Experimental study on shear strength of unsaturated

expansive soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(3): 420-425.

[5] 边加敏,王保田. 含水量对非饱和土抗剪强度参数的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(1): 17-21, 43.

BIAN Jia-min, WANG Bao-tian. Influence of water content on shear strength parameters of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(1): 17-21, 43.

[6] SAADA Z, MAGHOUS S, GARNIER D. Stability analysis of rock slopes subjected to seepage forces using the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2012, 55: 45-54.

[7] 史绪鑫,张永彬. 降雨入渗对裂隙岩质边坡稳定性的影响[J]. 济南大学学报:自然科学版, 2014, 28(6): 429-433.

SHI Xu-xin, ZHANG Yong-bin. Influence of rainfall infiltration on the stability of fractured rock slope[J]. Journal of Jinan University: Natural Science Edition, 2014, 28(6): 429-433.

[8] 向章波,张家铭,周晓宇,等. 基于Slide的某红层路堑边坡稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(4): 90-95.

XIANG Zhang-bo, ZHANG Jia-ming, ZHOU Xiao-yu, et al. Analysis of the stability of a red layer cutting slope based on slide[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2015, 42(4): 90-95.

[9] 何忠明,王保林,胡庆国. 强降雨条件下含软弱夹层黏性土坡稳定性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(5): 109-116.

HE Zhong-ming, WANG Bao-lin, HU Qing-guo. Stability analysis of cohesive soil slope with weak inter-layer under heavy rainfall conditions[J]. Civil Engineering and Environmental Engineering, 2018, 40(5): 109-116.

[10] 郑开欢,罗周全,罗成彦,等. 短时强降雨对排土场碎石土边坡稳定性的影响[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2016, 36(6): 39-47.

ZHENG Kai-huan, LUO Zhou-quan, LUO Cheng-yan, et al. Effects of short-term heavy rainfall on stability of gravel soil slope in dumping site[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2016, 36(6): 39-47.

[11] 付宏渊,邱祥,李光裕,等. 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性[J]. 长安大学学报:自然科学版,

- 2017,37(1):33-42.
- FU Hong-yuan, QIU Xiang, LI Guang-yu, et al. Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(1):33-42.
- [12] 余涛. 降雨条件下粗粒土路堤边坡的渗流及稳定性分析[D]. 长沙:长沙理工大学, 2013.
- YU Tao. Analysis of seepage and stability of coarse-grained soil embankment slope under rainfall conditions[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2013.
- [13] 蒋中明, 曾铃, 付宏渊, 等. 极端久雨条件下软岩边坡动态稳定性分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(2): 27-34.
- JIANG Zhong-ming, ZENG Ling, FU Hong-yuan, et al. Analysis of dynamic stability of soft rock slope under extremely long rain conditions[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(2): 27-34.
- [14] 谭新, 陈善雄, 杨明. 降雨条件下土坡饱和-非饱和渗流分析[J]. 岩土力学, 2003, 24(3): 381-384.
- TAN Xin, CHEN Shan-xiong, YANG Ming. Analysis of saturated-unsaturated seepage of soil slope under rainfall conditions [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(3): 381-384.
- [15] 何忠明, 邱祥, 卞汉兵, 等. 考虑初始渗流场影响的坡积土边坡降雨入渗过程[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2017, 37(5): 39-48.
- HE Zhong-ming, QIU Xiang, BIAN Han-bing, et al. Rainfall infiltration process of slope soil slope considering initial seepage field[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2017, 37(5): 39-48.
- [16] 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.
- YE Shuai-hua, SHI Yi-lei. Analysis of stability of multi-level loess high slope under rainfall infiltration conditions[J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1648-1656.
- [17] 曾铃, 史振宁, 付宏渊, 等. 降雨入渗对边坡暂态饱和和区分布特征的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(1): 25-34.
- ZENG Ling, SHI Zhen-ning, FU Hong-yuan, et al. Influence of rainfall infiltration on distribution characteristics of transient saturation zone of slope [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(1): 25-34.
- [18] VAN DAMME J, ZOU Q. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method [J]. Computers & Geotechnics, 2013, 48: 9-20.
- [19] KHANH P, DONGKU K, HYUN-JUN C, et al. A numerical framework for infinite slope stability analysis under transient unsaturated seepage conditions [J]. Engineering Geology, 2018, 243: 36-49.
- [20] 白雪亮. 降雨入渗条件下非饱和黄土高填方边坡稳定性研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- BAI Xue-liang. Study on stability of unsaturated loess high fill slope under rainfall infiltration condition[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
- [21] 宋亮亮. 降雨条件下非饱和红砂岩土边坡的稳定性研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2018.
- SONG Liang-liang. Study on stability of unsaturated red sandstone soil slope under rainfall conditions[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2018.
- [22] VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [23] 王利莉, 党进谦, 杨晓松. 盐渍土土水特征曲线的研究[J]. 工程勘察, 2009, 37(2): 19-23.
- WANG Li-li, DANG Jin-qian, YANG Xiao-song. Study on soil water characteristic curve of saline soil [J]. Engineering Investigation, 2009, 37(2): 19-23.
- [24] 孙德安, 张谨绎, 宋国森. 氯盐渍土土-水特征曲线的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 955-960.
- SUN De-an, ZHANG Jin-yi, SONG Guo-sen. Experimental study on soil-water characteristic curve of chloride saline soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 955-960.
- [25] 李永红. 氯盐渍土的变形和强度特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- LI Yong-hong. Study on deformation and strength characteristics of chloride saline soil [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006.