

边坡软式排水管的淤塞试验研究

谢经辉¹, 樊秀峰^{1,2}, 吴振祥^{1,2}

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108;

2. 国土资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室, 福建 福州 350108)

摘要: 针对排水管在运营过程中的淤塞问题, 借鉴土工织物的梯度比准则, 利用梯度比试验, 从水力梯度、土体类型以及排水管壁面积大小因素考虑, 对软式排水管淤塞机理展开研究。研究表明: 不同土体的梯度比 G_r 值随时间均呈现出明显的三阶段特征, 即渗流通道开始快速发育时梯度比快速下降的现象, 渗流通道逐渐成型时梯度比下降速度变缓的现象, 以及土体细颗粒对排水管壁开始淤塞时梯度比缓慢上升的现象; 土体黏粒含量的多少对排水管淤塞起主要影响作用, 其次为排水管面积大小和水力梯度大小; 通过稳定梯度比 G_r 值与相应单位体积含土量的对比, 验证了梯度比对排水管壁在土体和水流作用下的变化的反映具有客观有效性。

关键词: 排水管; 梯度比; 水力梯度; 淤塞; 单位体积含土量

中图分类号: TU46

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)06-0105-06

Siltation Experiment of Soft Drainage Pipe on Slope

XIE Jinghui¹, FAN Xiufeng^{1,2}, WU Zhenxiang^{1,2}

(1. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Land and Resources, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: Focusing on the siltation problem in the operation process, the gradient ratio experiment is carried out to study the problem of the drainage pipe siltation, considering the hydraulic gradient, the type of soil and the area of the drainage pipe. The results show that: the gradient ratio (GR) of different types of soil shows a distinct three stage features, the GR decreases rapidly when the seepage channel begins to develop rapidly. The GR gradually slows down when the seepage channel is gradually formed, and the GR increases slowly when the fine particles of soil begin to silt up the drainage pipe wall. The amount of clay content in the soil plays a major role in the silting of drainage pipes, followed by the drainage area and hydraulic gradient. Through the comparison of the GR and the soil volume of the corresponding unit volume, it is proved that the GR reflects the change of the drainage tube wall under the action of soil and water, and it is objective and effective.

Keywords: drainage pipe; gradient ratio; hydraulic gradient; silting up; soil content per unit volume

随着人口的急速增长和土地资源的过度开发, 边坡问题已变成同地震和火山相并列的全球性三大地质灾害之一^[1-3]。大量的工程实践证明, 地下水对边坡的稳定性危害极大^[4-11]。对于地下水含量丰富的边坡, 深层软式排水管在及时、快速排除地下

水方面有广泛的应用, 能够有效提高边坡的稳定性^[12-16]。然而, 软式排水管在进入运营期后排水功能将逐渐衰弱, 甚至失效, 使边坡治理工程的长期效果得不到保障, 危及边坡稳定性, 其中排水管淤塞问题是导致排水效果减弱的直接诱因^[17-20]。

Mininger K T 等^[21]对最大服役年限为 11 a 的一系列排水管进行开挖,研究发现淤塞在最初几年中发展速度较快,细颗粒含量小于等于 60% 的土,因为淤塞而导致减少的流量最大达到 42%;细颗粒含量大于等于 85% 的土,因为淤塞而导致减少的流量最大达到 85%。田卿燕等^[22]对服役 15 年的公路边坡排水管进行开挖,研究发现经过十几年的运营,排水管产生严重淤塞,淤堵物物质性质分析表明,排水孔淤堵物主要为细颗粒黏土, Ca^{2+} 含量仅为 141.32 mg/L,总体 Ca^{2+} 含量较低,不存在钙质淤堵物,也不存在生物的生长现象。目前,已有的一些研究表明土体类型、水动力条件、排水管壁面积等因素都会对淤塞效应产生较大的影响^[23-31],但是排水管的淤塞效应的主控因素是什么?排水管淤塞与土体类型、水动力条件、排水管壁面积之间的关系如何描述?这些问题都有待深入的研究。

为了研究软式排水管的淤塞效应及其机理,借鉴了前人提出的梯度比准则^[32-35]。梯度比准则是将梯度比 $G_r = 3$ 作为土工织物判定淤塞的分界点,并依据其变化趋势作为淤塞产生与否的判定依据。若 $G_r > 3$ 且呈现增长趋势,则排水管壁试样的渗透性发生了改变,细颗粒对排水管壁中的孔隙产生了淤塞,而且形成了有效的淤塞作用;反之,则未产生有效淤塞。

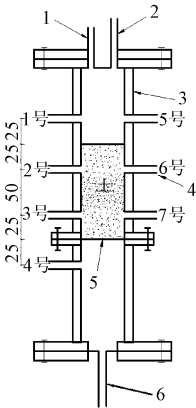
基于已有的研究积累,考虑福建省广泛分布的区域性残积土质边坡深层排水问题,本文选用了残积砾质黏性土、残积砂质黏性土、残积粉质黏性土 3 种土体做了 3 种水力梯度以及 2 种排水管壁面积的梯度比试验。通过梯度比准则已有的理论和判别标准^[36-41],对软式排水管淤塞效应及淤塞机理进行探讨,为深层排水管淤塞效应奠定理论基础及工程借鉴。

1 室内模型试验

1.1 试验模型

本文采用的淤塞试验模型如图 1 所示,在有机玻璃圆筒两侧分别布置测压管(1 号—7 号),测压管下端用软管与渗透仪测压管出口相连,接口处设置滤层;测压管固定在侧压板上,侧压板上装有最小分度值 1 mm 的刻度尺。试验采用两种排水管壁,试样直径分别为 100 mm 和 150 mm。采用常水头渗透

试验,通过调节进水水头改变试验渗透水力梯度,试验设置平均水力梯度 i 分别为 6、8、10,每个试样的试验周期初步定为 72 h,试验过程中根据土与排水管壁的梯度比变化适当延长或缩短。

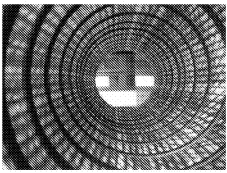


1—进水口; 2—出气口; 3—透明圆筒; 4—测压管
5—排水管壁试样; 6—排水口

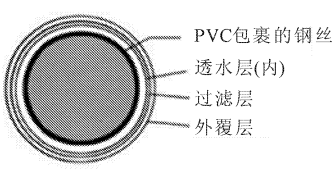
图 1 试验模型(单位:mm)

1.2 试验材料

(1) 软式排水管。软式排水管是一种能侧向集水的软管,其管体由承力的螺旋钢丝及其管壁组成,管壁由内外两层纤维交叉的编织布和中间的无纺土工布组成。管壁的这种特殊结构使其具有侧向透水反滤和纵向排水的双重功能(如图 2 所示)。本试验采用的软式透水管单位面积质量 400 g/m²,厚 1.5 mm,等效孔径 O_{95} 为 0.226 mm。试验前将软式排水管管壁按照《土工织物材料测试规程》^[42](SL 235—2012)裁剪成相应的试样,即直径为 100 mm 和直径为 150 mm 的圆形试样。



(a) 排水管实物图



(b) 排水管示意图

图 2 排水管构成示意图

(2) 土体类型。试验用土分别取自福州三个施工工地,经过室内试验测定分别为:残积砾质黏性土、残积砂质黏性土以及残积粉质黏性土,其黏粒含量分别为:砾质黏性土 27.7%,砂质黏性土 33.1%,粉质黏性土 43.4%(颗粒分布如表 1 所示)。试验模型土层密度按照土的天然密实度($\rho = 1.91 \text{ g/cm}^3$),采用击实法分层击实成型。

表 1 土的颗粒分布区间含量

土体类型	不同区间颗粒(mm)分布含量/%								
	>5	5~2	2~0.5	0.50~0.25	0.25~0.10	0.10~0.05	0.05~0.01	0.01~0.075	<0.075
砾质黏性土	6.5	7.4	8.4	3.1	3.3	4.1	22.3	17.2	27.7
砂质黏性土	3.5	5.9	12.6	5.7	4.7	5.2	10.9	18.4	33.1
粉质黏性土	1.7	3.4	9.8	4.4	4.3	6.4	9.4	17.2	43.4

1.3 试验方法及方案

1.3.1 试验方法

(1) 梯度比 G_r 值测定。排水管淤塞试验在梯度比渗透仪上进行,其原理是通过测定渗透 24 h 后土工织物及其上 25 mm 厚土层的水力梯度 i_1 以及土工织物上部 25 mm 至 75 mm 这段土层的水力梯度 i_2 ,按照下式求出梯度比 G_r 值:

$$G_r = \frac{i_1}{i_2}$$

(1)

通过试验记录 72 h 试验周期梯度比的变化趋势和稳定的梯度比 G_r 值,进而来判断土工织物是否在运行过程中会发生淤塞。若梯度比呈现上升趋势且稳定的梯度比 $G_r > 3$,则表明在运行期间会发生严重淤塞,反之则不会发生淤塞。

(2) 试样单位体积含土量测定。本文将通过测定排水管试样质量 m_1 与试验结束排水管试样烘干后的质量 m_2 以及排水管表面积 A 和厚度 δ ,按下式计算出试样单位体积含土量 μ :

$$\mu = \frac{m_1 - m_0}{A\delta}$$

(2)

通过排水管壁试样单位体积含土量检验相应梯度比 G_r 值对排水管壁淤塞程度反应的准确性,若排水管壁试样单位体积含土量与相应的梯度比 G_r 值规律相似,则说明梯度比 G_r 值对土体和试样在水流作用下的变化反应较为准确,试验的结果判断较为理想。

1.3.2 试验方案

为了考虑不同因素对排水管的淤塞作用,揭示排水管的淤塞机理,本试验分别考虑了 3 种类型土体(残积砾质黏性土、残积砂质黏性土、残积粉质黏性土)、3 种水力梯度(6、8、10)、2 种排水管壁面积(试样直径 100 mm、试样直径 150 mm)的影响作用,进行了 18 组正交试验。

2 试验结果分析

在 3 种条件下进行的 18 组试验,获得的试验结果如下。

2.1 排水管梯度比 G_r 值的发展演化规律

选取水力梯度 $i = 6$ 条件下,3 种土体梯度比 G_r 值随时间的变化曲线(如图 3 所示),揭示排水管在水的渗流作用下淤塞的发展演化过程。

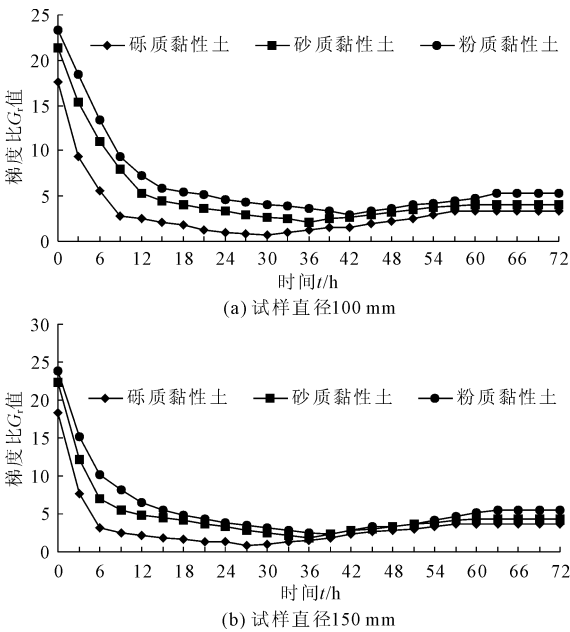


图 3 不同土体的梯度比与时间曲线

由图 3 可以看出:

(1) 在 2 种排水管壁面积条件下,3 种土体的梯度比 G_r 均经历了相似的三个阶段的变化过程:第一阶段梯度比 G_r 快速下降;第二阶段梯度比 G_r 下降速度变缓;第三阶段梯度比 G_r 缓慢上升。

(2) 试验初期,不同土体的梯度比 G_r 值下降速度也不一致。在排水管试样直径为 100 mm 条件下,砾质黏性土在第 9 h 梯度比 G_r 下降速度变缓,砂质黏性土在第 12 h 梯度比 G_r 下降速度变缓,粉质黏性土到第 15 h 梯度比 G_r 下降速度变缓。梯度比下降速度大小为:砾质黏性土 > 砂质黏性土 > 粉质黏性土。

(3) 试验初期,排水管壁面积的大小会影响土体梯度比 G_r 值下降速度。与小直径排水管壁试样相比,在大直径试样条件下,砾质黏性土下降速度变缓的时间比小直径试样早 3 h,砂质黏性土早 3 h,粉

质黏性土早 1 h。梯度比下降速度大小为:大直径排水
管壁试样>小直径排水管壁试样。

(4) 试验结束后,不同土体的稳定梯度比 G_r 值
不一致,稳定梯度比 G_r 值大小为:粉质黏性土>砂
质黏性土>砾质黏性土。

2.2 梯度比 G_r 值与各个影响因素间的关系

本文以 72 h 为试验周期,将梯度比 G_r 值上升
趋势作为重要参考,将梯度比 G_r 值逐渐上升且最终
稳定梯度比 G_r 值>3 作为判定淤堵的准则。以下的
试验结果都是梯度比 G_r 值呈现上升趋势后得到的
稳定梯度比 G_r 值结果。

2.2.1 梯度比 G_r 值与水力梯度的关系

本组试验选取的数据为排水管壁试样直径 $d =$
100 mm 条件下,3 种土体分别在 3 种水力梯度下的
试验结果(如图 4 所示)。图 4 显示:在试样面积、土
体类型一致的条件下,与水力梯度 $i = 6$ 相比,水力
梯度 $i = 8$ 时稳定梯度比 G_r 值增长了 9%~15%,与
水力梯度 $i = 6$ 相比,水力梯度 $i = 10$ 时稳定梯度比
 G_r 值增长了 24%~27%,稳定梯度比 G_r 值随着水力
梯度的增大而增大。

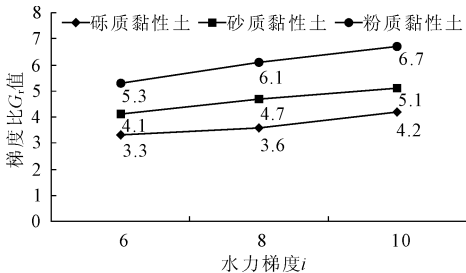


图 4 不同水力梯度稳定梯度值对比

2.2.2 梯度比 G_r 值与排水管壁面积的关系

本组试验选取的数据为水力梯度 $i = 6$ 条件下,
3 种土体在 2 种排水管壁面积条件下的试验结果
(如图 5 所示)。图 5 显示:在土体类型、水力梯度一
致的条件下,与排水管壁试样直径 $d = 100$ mm 相
比,排水管壁试样直径 $d = 150$ mm 时稳定梯度比 G_r

值增长了 3%~9%,稳定梯度比 G_r 值随着排水管
壁面积增大而增大。

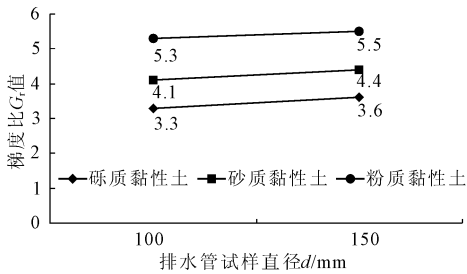


图 5 不同排水管壁试样面积稳定梯度值对比

2.2.3 梯度比 G_r 值与土体类型的关系

本组试验选取的数据为排水管壁试样直径 $d =$
100 mm、水力梯度相同的条件下,不同土体的稳定
梯度比 G_r 值进行对比(如图 6 所示)。图 6 显示:在
试样面积、水力梯度一致的条件下,与残积砾质黏性
土相比,残积砂质黏性土的稳定梯度比 G_r 值增长了
21%~30%,残积粉质黏性土的稳定梯度比 G_r 值增
长了 60%~69%,稳定梯度比 G_r 值随着黏性土中
黏粒含量的增加而增大,且增大幅度较其他两种影
响因素大。

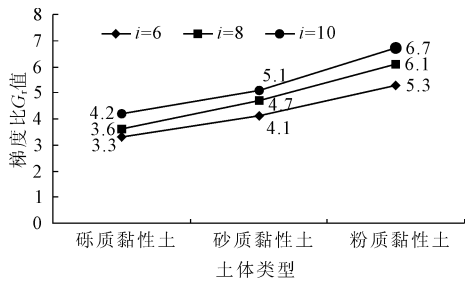


图 6 不同土体稳定梯度值对比

2.3 排水管壁单位体积含土量

为了确保梯度比 G_r 值对排水管淤塞程度反映
的准确性,对各组试验结束后的排水管壁试样进行
烘干称重,得出各组试样的排水管壁试样单位体积
含土量,并且将稳定的梯度比 G_r 值和相应排水管壁
试样单位体积含土量进行对比,结果如表 2 所示。

表 2 梯度比稳定后试样单位体积含土量

试样直径 /mm	土体类型	稳定后梯度比 G_r 值			单位体积含土量 $\mu/(mg \cdot cm^{-3})$		
		$i = 6$	$i = 8$	$i = 10$	$i = 6$	$i = 8$	$i = 10$
100	砾质黏性土	3.3	3.6	4.2	29	33	38
	砂质黏性土	4.1	4.7	5.1	38	45	49
	粉质黏性土	5.3	6.1	6.7	48	57	62
150	砾质黏性土	3.6	3.9	4.4	33	38	41
	砂质黏性土	4.4	4.9	5.7	42	50	53
	粉质黏性土	5.5	6.5	6.9	55	64	71

从表2可以看出:

(1) 在排水管壁试样面积大小、土体类型一致的情况下,与水力梯度 $i=6$ 相比,水力梯度 $i=8$ 时单位体积含土量增长了 $14\% \sim 19\%$,水力梯度 $i=10$ 时单位体积含土量增长了 $22\% \sim 31\%$,排水管壁试样单位体积含土量随着水力梯度的增大而增大。

(2) 在水力梯度、土体类型一致的情况下,与排水管壁试样直径 $d=100\text{ mm}$ 相比,排水管壁试样直径 $d=150\text{ mm}$ 时单位体积含土量增长了 $8\% \sim 15\%$,排水管壁试样单位体积含土量随着试样面积的增大而增大。

(3) 在排水管壁试样面积大小、水力梯度一致的情况下,与残积砾质黏性土相比,残积砂质黏性土的单位体积含土量增长了 $20\% \sim 36\%$,残积粉质黏性土的单位体积含土量增长了 $43\% \sim 73\%$,排水管壁试样单位体积含土量随着土体中黏粒含量的增大而增大,且增大幅度较其他两种变量大。

3 试验结果讨论

3.1 梯度比 G_r 值三阶段变化分析

本试验土层根据土的天然密实度 ($\rho=1.91\text{ g/cm}^3$) 击实成型,在试验过程中,不同土体的梯度比 G_r 值均呈现三个阶段的变化趋势(如图3所示)。在试验初始时刻,各个测压管水位齐平后,打开排水阀,由于土体内部的渗流通道未发育完整,导致土样下部相对于土样上部水压消散得快,使下部梯度瞬时变化大,土体内部渗流通道的快速发育(第一阶段梯度比 G_r 值下降速度快);随着土体内部渗流通道的逐渐发育,渗透水流也逐渐稳定后,梯度比也趋于稳定(第二阶段梯度比 G_r 值下降速度变缓);随着土体内部渗流通道的逐渐发育成型,细颗粒向排水管壁试样移动速度加快,滞留在排水管壁表面和进入排水管壁孔隙中的细颗粒也增多(第三阶段梯度比 G_r 值缓慢上升)。且通过对比发现(如图3所示),在试验初期,不同条件下梯度比 G_r 值的下降速度:(1) 残积砾质黏性土 > 残积砂质黏性土 > 残积粉质黏性土;(2) 大排水管壁试样面积 > 小排水管壁试样面积。

分析可知:

(1) 试验初期,土体在渗透水流和压重的作用下细颗粒被带动向排水管壁方向移动,土体中较粗的颗粒逐渐形成新的稳定结构。当土体骨架中的粗颗粒粒径越大时,则粗颗粒间的孔隙越大,细颗粒能够快速通过粗颗粒间的孔隙,加速渗流通道的形成。

(2) 随着排水管壁面积的增大,整个系统的渗流量也随之增大,土体细颗粒流失速度加剧,土体内部渗流通道的发育速度也加快。在试验过程中,不同土体梯度比 G_r 值在下降一段时间后开始缓慢上升(如图3所示),分析可知:在水的渗流力和压重的双重作用下,土体内细颗粒被带动向排水管壁表面及孔隙中移动,土体内的渗流通道开始发育,细颗粒在流经排水管壁时会滞留在排水管壁表面或者淤积在排水管壁孔隙中,当渗流通道发育完全后,梯度比 G_r 值不再下降而是随着滞留在排水管壁表面或淤积在排水管壁孔隙中的细颗粒含量的增大而缓慢上升。

3.2 梯度比 G_r 值与影响因素关系分析

(1) 土体在水的渗透作用下,土体内部的细颗粒向排水管壁的方向移动,从而附着在排水管壁表面形成“滤饼”(附着在排水管壁表面的密实防水层)以及进入排水管壁孔隙造成淤堵。当水力梯度增大时,水的渗透力也增大,土体细颗粒流失增加,附着以及进入排水管壁的细颗粒量增加,使最终的梯度比 G_r 值增大,从而表现为稳定梯度比 G_r 值和相应试样单位体积含土量随着水力梯度的增大而增大(如图4所示)。

(2) 随着排水管壁试样面积的增大,在渗流力作用下流失的细颗粒能够进入排水管壁内部的面积也相应增大,附着在排水管壁表面形成“滤饼”和进入排水管形成淤塞的概率也增大,从而表现为稳定梯度比 G_r 值和相应试样单位体积含土量随着排水管壁试样面积的增大而增大(如图5所示)。

(3) 随着黏性土中的黏粒含量的增多,通过排水管壁的细颗粒也就越多,细颗粒附着在排水管壁表面形成“滤饼”和淤堵在排水管壁内部的概率就越大,所以越容易发生淤塞,相应的梯度比也就越大,从而表现为稳定梯度比 G_r 值和相应试样单位体积含土量随着黏粒含量的增大而增大,而且增大幅度较其他两种影响因素大,说明土体中黏粒含量是影响排水管淤塞的主要因素(如图6所示)。

4 结论

本文分别以水力梯度、土体类型、排水管壁面积3种因素为变量进行淤塞试验,得出了梯度比、单位体积含土量与上述3种变量间的一些关系,总结得出以下结论。

(1) 通过试样单位体积含土量和相应的稳定梯度比 G_r 值的对比,验证了 G_r 值能够较为准确地反映排水管壁的淤塞程度,可以此为依据,对排水管淤

塞进行更深入的研究。

(2) 试验过程中,不同土体梯度比变化都呈现出三阶段特性,反映出了土体内部渗流通道以及排水管的淤塞的形成过程,具有规律性。

(3) 三种因素都会对排水管的淤塞造成影响,随着水力梯度、排水管壁面积以及土体黏粒含量的增大,排水管的淤塞会有不同程度上的加剧。

(4) 相对于水力梯度、试样面积,土体类型对排水管的淤塞的影响更为明显,所以在黏粒含量较大的土层中布设排水管应做好相应的反滤措施,以确保排水系统的有效性和长期性。

参考文献:

- [1] 黄润秋,张倬元,王士天.高边坡稳定性研究现状及发展展望[J].水文地质工程地质,1991,6(1):31-34.
- [2] 赵明阶.边坡工程处治技术[M].北京:人民交通出版社,2003.
- [3] 景 锋,冷先伦,朱泽奇.层状岩坡变形破坏及其治理的离散元分析[J].水利与建筑工程学报,2010,8(4):61-64.
- [4] 王乾程.水作用下土坡稳定性分析及防治对策探讨[J].西部探矿工程,2003,84(5):29-32.
- [5] Vandamme J, Zou Q P. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method[J]. Computers and Geotechnics, 2013,48(3): 9-20.
- [6] 孙志杰.降雨对非饱和土质边坡含水率的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):75-78,99.
- [7] 霍晨琛.地下水位上升对黄土高填方边坡稳定性的影响研究[D].西安:长安大学,2016.
- [8] 王宁伟,颜克顺,梁家豪.不同降雨类型对边坡稳定性的分析与研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):148-152.
- [9] 闫 林,杨秀娟,樊恒辉,等.水位变化诱发均质黄土库岸失稳试验研究[J].宁夏大学学报(自然科学版),2017,38(3):267-271.
- [10] 李绍红,朱建东,王少阳,等.考虑降雨类型的基岩型浅层边坡稳定性分析方法[J].水文地质工程地质,2018,45(2):131-135.
- [11] 刘振红,张 一.地下水位抬升对非湿陷地基变形的影响[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(5):52-55.
- [12] 刘吉福,刘启党,杨春林.深层排水管在边坡加固中的应用[J].工程勘察,2002(4):28-31.
- [13] 李加峰,毕德合,刘万东,等.钢塑软式透水管在渠道衬砌工程中的应用[J].山东水利,2005(11):42-42.
- [14] 徐 猛,黄家青,唐彤芝.软式透水管在高速公路真空预压工程中的应用研究[J].水利与建筑工程学报,2007,5(2):22-26.
- [15] 李 千,樊秀峰,吴振祥.软式透水管作用下边坡排水效应数值模拟[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):44-49,58.
- [16] 李 千,樊秀峰,吴振祥.软式透水管作用下边坡排水效应试验研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):143-148.
- [17] 姚海林,游慧杰,范永丰,等.柳家凹黄土滑坡滑动机制研究[J].岩土力学,2013,34(1):182-188.
- [18] 刘新荣,张 梁,余 瑜,等.降雨条件下西阳大涵边坡滑动机制研究[J].岩土力学,2013,34(10):2898-2904.
- [19] 乔 娟,张立仁,阮祥明.三峡库区滑坡土体降雨产流及入渗试验研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5):183-188,193.
- [20] 李风增.基于 GEO-Slope/W 的土质高边坡稳定性分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(5):67-70.
- [21] Mininger K T, Santi P M, Short R D. Life span of horizontal wick drains used for landslide drainage[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2011,17(2):103-121.
- [22] 田卿燕,钱尼贵,郝钟钰.公路边坡新型仰斜排水孔机械淤堵室内试验研究[J].公路,2016,61(7):39-44.
- [23] 张爱军,董为民,骆亚生.尾矿坝排水管的反滤、淤堵试验研究[J].防渗技术,2001(1):1-3,17.
- [24] Cornforth D H. Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils[M]. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken, NJ, 2005:596.
- [25] 巨娟丽.土工无纺布工程特性试验研究[J].水利与建筑工程学报,2005,3(3):43-46.
- [26] 王初生,叶为民,王园,等.土工织物加筋柔性台背路堤非线性计算与评价[J].水文地质工程地质,2006,33(1):84-87.
- [27] D'Acunto B, Parente F, Urciuoli G. Numerical models for 2D free boundary analysis of ground - water in slopes stabilized by drain trenches[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2007,53(10):1615-1626.
- [28] 安 杰,宗全利,汤 骅.低压输浑水管道临界不淤流速的试验研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2012,30(1):83-86.
- [29] 陈 尧.仰斜式排水孔在滑坡治理中的应用研究和影响因素分析[D].重庆:重庆交通大学,2015.
- [30] Palmeira E M, Gardoni M G. The influence of partial clogging and pressure on the behavior of geotextiles in drainage systems[J]. Geosynthetics International, 2015, 7(4/6):403-431.
- [31] 陈星柏.关于土工织物反滤层的渗透准则[J].水利学报,1990(9):47-51.