

含碎石粘性土边坡渗流系统的物理模拟试验

俞伯汀, 孙红月, 尚岳全

(浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 在含碎石粘性土边坡中常常发育地下水管排水系统, 为了掌握它的形成规律和特征, 进行了管道排水系统的物理模拟试验。结果表明, 在管道排水系统的形成过程中, 土体渗透性有一个先减小、后增大, 最后趋于稳定的过程; 土体深度越大形成管道排水系统所需的时间越长; 若土体中粘粒含量高, 则形成管道排水系统所需的时间长, 土体的渗透性也相对较低, 反之则所需的时间短且渗透性高; 当碎砾石含量和粒径较大时有利于管道排水系统的形成; 管道排水系统的存在使边坡具有良好的渗透性, 能有效减小坡体中的渗透力和潜在滑面的孔隙水压力; 当管道排水系统遭到破坏时, 边坡的地下水位将明显提高, 从而使边坡的稳定性降低。因此, 管道排水系统的存在对保持含碎石粘性土边坡的稳定是十分重要的。

关键词: 含碎石粘性土边坡; 渗流; 地下水; 管道排水系统; 物理模拟

中图分类号: TU411.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)06-0705-04

作者简介: 俞伯汀(1969-), 男, 浙江新昌人, 博士研究生, 主要从事地质灾害勘察与防治设计方面的研究。

Physical model simulation tests on seepage system in debris-containing clay slopes

YU Bo-ting, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Groundwater pipe drainage systems (GPDS) are often found in debris-containing clay slopes (DCS). Physical model simulation tests on seepage system in DCS were made to study the development and seepage behaviors of GPDS. From the test results, several conclusions were drawn as follows: (1) In the process of development of GPDS, the permeability of soil mass of DCS would decrease at the first stage, increase in the following stage, and be invariant at last; (2) In DCS, the deeper the soil mass was, the longer the time needed for the development of GPDS was; (3) The higher the clay particle content in DCS was, the longer the time needed for the development of GPDS was, and the worse the permeability of soil mass was; (4) It was more propitious to the development of GPDS for the soil mass with a higher debris and gravel content, bigger grain diameter; besides, the GPDS developed in this kind of soil mass often had larger permeability; (5) When GPDS developed in DCS, the permeability of soil mass would become dramatically larger, and the seepage force of groundwater and pore water pressure on sliding surface would reduce; (6) As GPDS in DCS was destroyed by external forces, such as construction loads, the groundwater level would rise obviously and this might induce the slope failure. Therefore, GPDS is a very important favorable factor for slope stability.

Key words: debris-containing clay slope; seepage; groundwater; pipe drainage system; physical model simulation

0 前 言

在边坡变形破坏的影响因素中, 地下水活动是大量滑坡发生的直接原因, 也是最复杂和变化最频繁的影响因素。目前很多学者就地下水对边坡稳定性的影响方式和作用机理进行了多方面的研究工作^[1-7]。在分析地下水对滑坡的影响时, 通常假定坡体具有均匀的渗流特性, 或仅就地下水的统计影响规律进行分析, 这对颗粒比较均匀的砂土和粘性土的分析是可行的, 但对于工程中经常遇到的含碎石土质边坡, 就会产生很大的误差。大量的现场地质调查结果表明, 含碎石

粘性土边坡和含粘性土碎块石边坡中地下水的流动通常具有管网状渗流特性^[8-10], 而且地下水的这种管网状渗流特性对松散土质边坡的稳定性具有关键作用。

为了掌握含碎石粘性土边坡地下水管排水系统的发育特点及其对边坡稳定性的影响, 笔者进行了含碎石粘性土边坡地下水管排水系统的物理模拟试验研究。本文主要介绍物理模拟试验及取得的初步成果。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40372118); 国家自然科学基金资助项目(40502026)

收稿日期: 2005-05-16

1 物理模型简介

试验模型箱采用浮法玻璃制成，以便于肉眼观察（图 1）。模型为 150 cm×20 cm×80 cm 和 150 cm×30 cm×80 cm 两种规格。模型箱内土体试验材料堆成 20°~30° 的斜坡，如图 1 所示。在坡体前缘、中部、后缘分别埋设一根塑料测压管，用以观察和测量地下水位；在模型箱前端底部埋设有排水孔以将从边坡体内渗流出的水排出模型箱。试验所采用的材料为含碎石粘性土，级配良好，其颗粒组成见表 1。

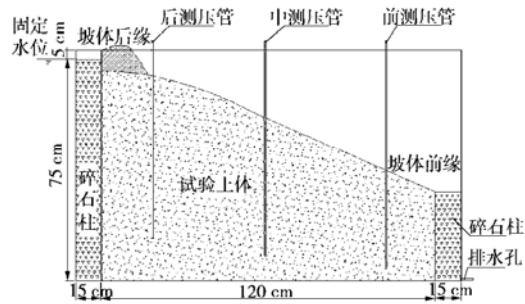


图 1 地下水管道排泄系统物理模型

Fig. 1 Physical model of groundwater pipe drainage system

表 1 试验土体颗粒组成

Table 1 Granulometric composition of soil mass in tests

颗粒直径 /mm	2002 年试验用土 的颗粒含量/%	2004 年试验用土 的颗粒含量/%	
		#1、#3、#4、#5	#2
>2.0	47	36.6	30.5
0.50~2.0	7	6.9	22.4
0.25~0.5	5	8.7	7.3
0.10~0.25	4	7.9	6.6
0.074~0.1	5	1.4	1.2
0.002~0.074	28	37.7	31.4
<0.002	4	0.8	0.7

2 物理模拟试验过程

在固定模型坡体前后缘的水位即在恒定水头差的条件下，进行地下水渗流过程试验，通过测定渗流量确定试验土体的渗透性，以记录渗流水注满同一容器（容器容积为 12 L）所需的时间来确定试验土体渗透性的变化。试验分 2 个阶段：①完成堆土后立即充放水，使模型土体基本完成湿陷压密过程；②正常的渗流试验过程。

本次试验除了模拟管道排泄系统的形成过程之外，还进行了管道排泄系统的破坏试验。管道排泄系统的模拟试验在#1~#3 模型中进行，破坏试验在#4 模型中进行，而#5 模型考察含碎石粘性土边坡中所含的碎石含量和颗粒大小对管道排泄系统形成的影响。

#1~#3 模型的试验用土稍有不同（表 1），#1 模型土体的颗粒组成和#3 模型的一致，而#2 模型土体是按照#1 模型所用土体和玄武岩碎石的重量比 5：1 的比例配置的；#2 模型土体经过了 30 d 的自然湿陷压密，

#1 模型的土体未经此过程，#3 模型的土体是经人工压实过的，密度比#2 模型大。

在#5 模型的中部有厚约 30 cm 的含碎砾石土层，该层土由与#1、#3 模型所用土体的颗粒组成一致的土体与 $\phi 20\sim 40$ mm 碎砾石按重量配合比 3：1 配合而成；#5 模型中其余土层的颗粒组成与#1 模型一致。

3 物理模拟试验结果分析

3.1 地下水管道排泄系统形成过程中土体渗透性变化规律

#1~#3 模型分别在 2004 年 12 月 7~26 日共 20 d 的时间内进行了试验土体渗流量的定量测定，其渗透性变化曲线见图 2，这期间模型中都逐渐形成了地下水的管道状排泄系统。

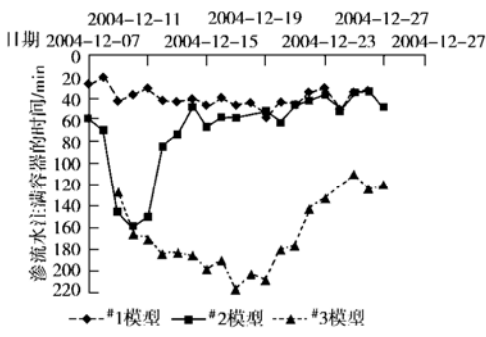


图 2 试验土体渗透性变化曲线

Fig. 2 Seepage time curve of test soil mass

#1 模型的管道排泄系统在 2 d 内就形成了（图 3（a）），因此土体渗透性变化不大，渗流水注满容器的时间稳定在 45 min 左右；#2 模型在试验初期注满容器需 159 min，其管道排泄系统大约形成于 2004 年 12 月 14 日（图 3（b）），最后稳定在 47 min 左右；#3 模型在试验期间需要 216 min，其管道排泄系统大约形成于 2004 年 12 月 24~25 日（图 3（c）），最后稳定在 120 min 左右（图 2）。可以看到，随着地下水管道排泄系统的形成，土体的渗透性大大提高。

从图 2 的土体渗透性随时间变化曲线中还可以看出，#2 和#3 模型注满容器所需要的时间有一个先增加后减少并最后趋于稳定的过程，说明试验土体的渗透性是先降低、后来逐渐增强，最后趋于稳定，其中#2 模型的曲线最为典型。这是因为：在渗流初期，土体处于自然湿陷压实过程中，土体中虽有细小颗粒和粘土颗粒被渗流水带走，但以土体自然湿陷压实为主，因此渗透系数减小；当土体压实趋于完成时，渗流水带走土粒的作用逐渐占据主导地位，排泄管道逐渐增多、变大，因此土体渗透系数逐渐增大；当管道排泄系统形成后，地下水主要沿管道排泄，不再带走土体颗粒，因而土体渗透性趋于恒定。

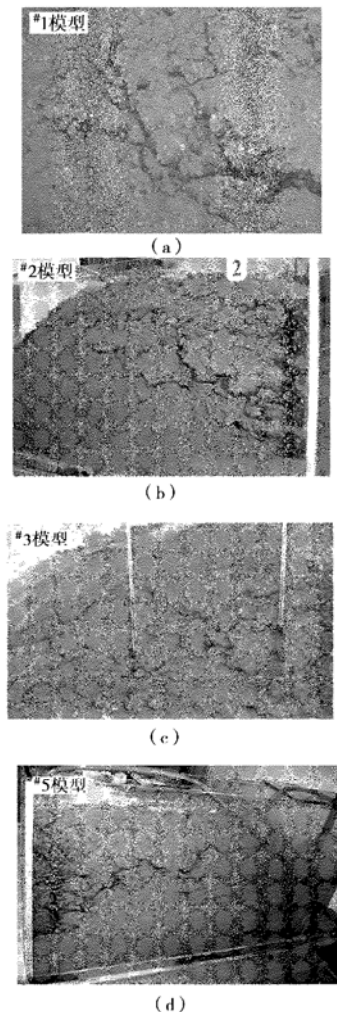


图3 试验中形成的管道排泄系统

Fig. 3 Pipe drainage systems formed in model tests

3.2 土体压实程度和深度对地下水管道排泄系统形成的影响

#1~#3 模型形成管道排泄系统所需时间是不同的, #1 模型在试验开始的 2 d 内就形成了, 表明在恒定水头差作用下松散堆积的或未经压实的含碎石粘性土边坡中能快速形成地下水管道排泄系统, 所以在图 2 中 #1 模型的渗透性变化曲线近于水平线, 土体渗透性变化不大。#2 模型中形成管道排泄系统历时 10 d, #3 模型中形成管道排泄系统历时 18 d。说明在同样的水头差作用下, 在经过较长时间自然湿陷压实过程的含碎石粘性土边坡中形成地下水管道排泄系统要经历相对较长的时间, 而在经人工压实的或者说密实度更高的含碎石粘性土边坡中形成地下水管道排泄系统需要经历更长的时间。反映出在含碎石粘性土边坡的不同深度, 其渗透性存在着一定的规律性, 浅部土层的渗透性比深部土层要高, 因为深部土层比浅部土层承受更大的压应力, 其孔隙率减少, 使渗透性能降低。

3.3 粘粒和碎砾石含量及颗粒大小对地下水管道排泄系统的形成和土体渗透性能的影响

笔者在 2002 年做过地下水管道排泄系统的模拟

试验(土的颗粒组成见表 1), 成功地模拟了地下水管道排泄系统的形成过程, 管道排泄系统形成后渗流水注满相同容器所需的时间稳定在 8 min 左右。本次试验所用的土体粘粒含量比 2002 年的物理模拟试验的高, 形成管道排泄系统所需的时间比前次试验要长得多, 形成管道排泄系统后注满同样容器所需的时间也长得多。这说明土体中粘粒含量的高低对管道排泄系统的形成和渗透系数的大小有很大影响。土体中粘粒含量高, 形成管道排泄系统所需的时间就长, 而且虽然管道排泄系统形成了, 其渗透系数也比较低; 反之则形成管道排泄系统所需的时间短且渗透系数高。

#5 模型先经自然湿陷压实然后进行地下水管道排泄系统模拟试验。结果在中部的含碎砾石土层中形成了地下水管道排泄系统(图 3(d)), 渗流速度比 #1 模型还要快, 渗流水注满相同容器仅需 6 min 左右。在该含碎砾石土层中形成了地下水管道排泄系统后, 其余土层中再没有出现排泄管道, 地下水排泄主要通过含碎砾石土层的排泄管道进行。反映出当土体中碎砾石含量和粒径较大时有利于地下水管道排泄系统的形成, 并且土体渗透系数更大。

3.4 地下水管道排泄系统的破坏试验

在含碎石粘性土边坡中, 由于坡脚开挖或坡体堆载, 引起局部坡体破坏后, 常常导致地下水管道排泄系统的破坏, 从而使边坡的地下水位明显提高, 增加潜在滑面上的孔隙水压力, 降低坡体的稳定性, 最终导致滑坡的发生^[8]。为了研究地下水管道排泄系统遭受破坏后地下水渗流条件的变化规律及对边坡稳定性的影响, 在 #4 模型中进行了地下水管道排泄系统的破坏试验, 结果见图 4。

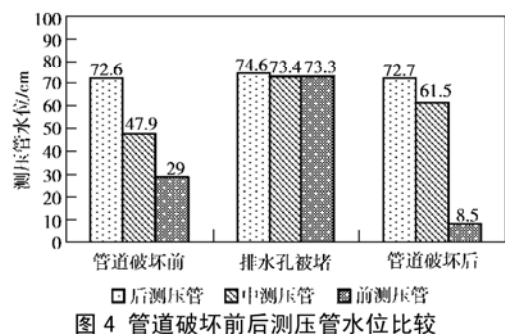


图4 管道破坏前后测压管水位比较

Fig. 4 Comparison of water level in piezometers before and after destruction of seepage pipes

#4 模型中的地下水管道排泄系统形成于 2004 年 12 月 20 日, 此时渗流稳定, 后缘、中部、前缘测压管水位值顺次递减。12 月 23 日将排水孔堵住, 测压管水位迅速上升, 5 min 内水位到达稳定状态, 后、中、前测压管水位近于相等, 土体中孔隙水压力明显增大。12 月 25 日进行了管道破坏试验。模拟坡体堆载, 先将坡体前缘人工压实, 使原有的地下水排泄管

道遭到人为破坏,然后再进行渗流试验。测压管中测得了地下水位数据,中部测压管中的水位从管道破坏前的 47.9 cm 上升到 61.5 cm,提高了 28%,而前缘测压管中的水位由管道破坏前的 29 cm 下降到 8.5 cm,地下水位明显下降。从破坏试验结果来看,地下水管道的排泄系统遭受破坏将严重降低坡体的渗透性,引起坡体地下水位快速上升,危及边坡的稳定。在实际工程中由于坡脚开挖或坡体堆载导致地下水位上升而引发滑坡^[11],小旦滑坡就是典型的例子^[8]。

4 结 语

(1) 在含碎石粘性土边坡中,深度越大形成地下水管道的排泄系统所需的时间越长。因为深度越大,上覆土层越厚,土体所受的压应力越大,从而使孔隙率减小,渗透性能降低。

(2) 在本次模拟试验中,地下水管道的排泄系统的形成过程中,土体渗透性有一个先减小、后增大,最后趋于稳定的过程。这说明在自然界的含碎石粘性土边坡中,土体在自然湿陷压实期间渗透性减小,而随着坡体中逐渐形成地下管道排泄系统,其渗透性逐渐增强,最后渗透性趋于恒定。

(3) 在含碎石粘性土边坡中,若土体的粘粒含量高,则形成管道排泄系统所需的时间就长,土体的渗透性也相对较低;反之则所需的时间短且渗透性高。另一方面,当边坡土体中碎砾石含量较大、粒径较大时更有利于地下水管道的排泄系统的形成,土体渗透性也相对较高。

(4) 地下水管道的排泄系统的存在使含碎石粘性土边坡具有良好的渗透性,能有效排泄坡体中的地下水,避免雨季时坡体地下水位的大幅度上升,有效减少坡体中的渗透力和潜在滑面的孔隙水压力。当地下水管道排泄系统遭到破坏时,地下水位将明显提高,使边坡的稳定性降低。因此,地下水管道的排泄系统的存在对保持含碎石粘性土边坡的稳定性是十分重要的。

参考文献:

- [1] 高小育,廖红建,丁春华.渗流对土质边坡稳定性的影响[J].岩土力学,2004,25(1): 69 - 72.(GAO Xiao-yu, LIAO Hong-jian, DING Chun-hua. Seepage effects on soil slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 69 - 72.)
- [2] 朱文彬,刘宝琛.降雨条件下土体滑坡的有限元数值分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(4): 509 - 512. (ZHU Wen-bin, LIU Bao-chen. Forming and development process of soil landslide during rainfall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(4): 509 - 512.)
- [3] 王旭升,常宏,谭建民.斜坡地下水渗透力计算与稳定性分析[J].水文地质工程地质,2003(2):41 - 45.(WANG Xu-sheng, CHANG Hong, TAN Jian-min. Calculation of groundwater seepage force and stability analysis of slopes[J]. Hydrogeology & Engineering geology, 2003(2): 41 - 45.)
- [4] 刘耀儒,杜广林,周维垣,等.降雨入渗条件下三峡船闸边坡渗流场的变化[J].岩石力学与工程学报,2002,21(2): 238 - 241.(LIU Yao-ru, DU Guang-lin, ZHOU Wei-yuan, et al. Seepage field changes of shiplock slope of TGP under raining and percolation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(2): 238 - 241.)
- [5] 何满潮,姚爱军,鹿粗,等.边坡岩体水力学作用的研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(6):662 - 666.(HE Man-chao, YAO Ai-jun, LU Cu, et al. Study of mechanical functions of underground water in slope rockmass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(6): 662 - 666.)
- [6] 梁冰,刘晓丽,薛强.低渗透地下环境中水—岩作用的渗流模型研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(5):745 - 750.(LIANG Bing, LIU Xiao-li, XUE Qiang. Seepage model study of water—rock interaction in low permeability groundwater environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(5): 745 - 750.)
- [7] 钟声辉.水岩体系中地下水效应与边坡稳定性研究[J].铁道工程学报,1999(4):86 - 90.(ZHONG Sheng-hui. Studies on groundwater effects and slope stability of water-rock system[J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999(4): 86 - 90.)
- [8] 尚岳全,周建峰,童文德.含碎块石土质边坡的稳定性问题[J].地质灾害与环境保护,2002,13(1):41 - 43. (SHANG Yue-quan, ZHOU Jian-feng, TONG Wen-de. The influence of pipe seepage system on the stability of a pebbly-clay slope[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2002, 13(1): 41 - 43.)
- [9] 吴永锋,石林,吴铭远,等.三峡库区滑坡中的地下水若干问题初探[J].湖北地矿,2002,16(4): 9 - 14.(WU Yong-feng, SHI Lin, WU Ming-yuan, et al. Probe on questions of groundwater inside landslide bodies of the three gorges reservoir region[J]. Hubei Geology & Mineral Resources, 2002, 16(4): 9 - 14.)
- [10] UCHIDA T, KOSUGI K, MIZUYAMA T. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: A review of pipeflow studies in forested headwater catchments[J]. Hydrological Processes, 2001, 15 (11): 2152 - 2174.
- [11] 王洲平.浙江省地质灾害现状及防治措施[J].灾害学,2001,16(4): 63 - 66. (WANG Zhou-ping. Current situation of geological disasters and the prevention measures in Zhejiang Province[J]. Journal of Catastrophology, 2001, 16(4): 63 - 66.)