

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.03.025

碎石土滑坡渗流系统特征及防治措施研究

陈志超¹, 罗旋¹, 柳侃¹, 叶龙珍¹, 左昌群²

(1. 福建省地质灾害重点实验室, 福建 福州 350002; 2. 中国地质大学(武汉) 工程学院, 湖北 武汉 410069)

摘 要: 碎石土滑坡由于内部含有大量的碎块石, 容易形成架空结构, 使其内部拥有独特的渗流系统。不同结构的碎石土形成的渗流通道不同, 导致滑坡体的失稳情形也各不相同, 因此, 针对性的防治措施也难以制定。福建省安溪县岩山角落滑坡具有多元结构碎石土滑坡的特征。在对碎石土滑坡进行物探、钻探、水位监测等多重手段整体勘测的基础上, 利用 SketchUp 软件进行建模分析, 获取了多元结构碎石土滑坡渗流系统与滑坡物质结构在空间上的关系, 并对两类渗流系统的变形敏感性和降雨敏感性进行对比。结果显示, 粗石状碎石土区域以集中渗流为主, 假斑状碎石土区域以管网状渗流为主, 前者对降雨的敏感性较后者高, 而受渗流通道的整体强度和渗流稳定性的影响, 前者对于滑坡变形的敏感性要低于后者。基于上述分析, 确定采用抗滑桩和排水盲沟等工程措施进行治理, 根据地下水监测数据和现场验证, 治理效果良好, 可供其他类似滑坡防治工程提供借鉴与参考。

关 键 词: 碎石土滑坡; 多元结构; 渗流系统; SketchUp; 排水盲沟

中图分类号: TV 148

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 03-0813-07

Seepage characteristics and mitigation measures of a gravel soil landslide

CHEN Zhi-chao¹, LUO Xuan¹, LIU Kan¹, YE Long-zhen¹, ZUO Chang-qun²

(1. Fujian Provincial Key Laboratory of Geo-hazards, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 410069, China)

Abstract: Gravel soil landslide has a unique internal seepage system, since the soil contains a large number of gravels constituting a matrix structure. Depending on the diversity of gravel soil structures, the network of flow channels can be different and correspondently the landslide pattern is also different. Hence, it is difficult to make the targeted mitigation plans for slope failures. In this study, the case of Yanshanjiaoluo landslide, which is located in Anxi County of Fujian Province, is investigated. The relationship between the seepage system of the gravel soil with multivairiate-structure and the material composition of the landslide is obtained based on the comprehensive geotechnical investigation including geophysical prospecting, drilling, water level monitoring as well as SketchUp modeling analysis. Comparative analysis is performed to evaluate the deformation and rainfall sensibilities of two sorts of seepage system. The results indicate that the coarse gravel soil area is characterized by concentrated seepage, while the false porphyritic gravel soil area is characterized by pipe network seepage. The former is more sensitive to the rainfall than the latter. However, influenced by the overall strength of the seepage channel and seepage stability, the latter is more sensitive to the deformation of landslide than the former. Based on the above analysis, a combined measure of anti-slide pile and blind drainage ditch is employed to improve the stability of the landslide. The field observation confirms the effectiveness of the mitigating measures.

Keywords: gravel soil landslide; multivairiate -structure; seepage system; SketchUp; blind drainage ditch

1 引 言

碎石土是土体和岩石按一定比例混杂堆积形成

的地质体。主要为后山物源区块石泥土通过山洪、泥石流、滑坡等形式运移, 并在山前冲沟沟口或河漫滩处堆积卸载形成。由于其独特的物质结构, 往

收稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (No.41202201); 国土资源部公益性行业科研专项经费 (No.201211039); 福建省广义地质工作项目 (No.20141204); 福建省自然科学基金项目 (No.2015J01158)。

This work was supported by the Natural Science Foundation of China (41202201), the Special Funds for Public Welfare Industry of Ministry of Land and Resources (201211039), the Generalized Geological Project of Fujian (20141204) and the Natural Science Foundation of Fujian (2015J01158).

第一作者简介: 陈志超, 男, 1988 年生, 硕士, 主要从事岩土体稳定性与防灾减灾方面的研究工作。E-mail: czc.wxq@163.com

往形成局部集中、渗流快的渗流网。尚岳全等^[1]、许建聪等^[2]将其称之为管网渗流系统,李玉峰等^[3]则将这种局部集中的渗流形态定义为优先流。尚岳全等^[1]通过物理模型试验对碎石土滑坡进行建模,模拟出扰动碎石土内部管状渗流系统的形态并据此对管状渗流系统的形成过程和特征进行分析;俞伯汀等^[4]通过模型试验模拟了渗流系统对边坡稳定性的影响,均具有重要参考价值。但研究并未对模型试验与现场渗流情况的对应关系进行分析,因此,无法完全代表现场渗流系统特征。目前,对于管状渗流系统的现场认识仅限于坡体的开挖出露的点状出水口,对于现场坡体渗流系统形态特征的分析与描述并未涉及。一般的勘察是以钻孔、井探、槽探为主,无法揭露滑坡体的渗流情况,因此,必须辅以物探手段,才能得出坡体渗流通道的分布特征。

此外,目前的研究多数针对单一颗粒级配的土体,对存在不同组分的多元结构的碎石土体渗流通道研究较少。碎石土结构以粗石状结构和假斑状结构^[5]为主。其中,粗石状结构是由相互挤靠着的粗大碎屑形成骨架,假斑状结构是较细颗粒组成的土体混杂着一些较粗或较大颗粒。李玉峰等^[3]则将这两类土体分别称为密实结构和悬浮结构。碎石土的级配特征直接控制地下水渗流系统形态,从而控制着滑坡的形态和破坏过程。目前,对于不同级配碎石土形成的渗流通道存在哪些差异,尚缺乏较典型的分析实例。

关于碎石土滑坡的治理,目前的工程实例较少,姚晓阳等^[5]、徐兴华等^[6]在文献中提及的官家滑坡是通过排水隧洞和垂直排水孔等方式有效地减少水体对滑坡的影响,治理效果明显。但排水隧洞工程量大、造价高,仅适用于大型滑坡。孙红月^[7]则在五度山采取了排水盲沟的治理手段,排水效果良好。但并未采取综合治理。也有人利用室内模型试验进行支护措施的研究^[8],但未进行现场实践分析,其实用性尚待研究。综上所述,针对碎石土滑坡一般采用以排水为主的治理手段,但对包括排水在内的综合工程措施的分析介绍尚少涉及。

福建省安溪县蓬莱镇蓬溪村岩山角落滑坡坡体具备多元碎石土结构,在碎石土渗流系统的研究中具有重要的研究价值。本次研究运用 SketchUp 软件对滑坡的钻孔和物探成果进行处理,首次将 SketchUp 软件运用于滑坡渗流系统分析。利用模型的直观性,分析福建省安溪县蓬莱镇岩山角落滑坡的渗流系统特征及其对滑坡的影响。在此基础上对采用排水盲沟与锚索抗滑桩的治理措施,取得良好

效果,希望对碎石土滑坡研究提供参考和借鉴。

2 滑坡概况

岩山角落滑坡位于福建省安溪县蓬莱镇蓬溪村清水岩旅游景区。由于修建清水祖师佛像平台,对坡体前缘进行开挖,形成高约 5 m 的临空面。2012 年 7 月 3 日由于持续性强降雨影响诱发滑坡。

2.1 滑坡形态

滑坡在平面上呈不规则的扇形,主轴方向为 NW66°,长约 178 m,前缘宽约 105 m,滑坡体呈中、后部厚,前缘薄的特点,滑坡体厚 10~13 m,涉及土石方量约 $20 \times 10^4 \text{ m}^3$,属中型碎石土滑坡,平面图见图 1,详细立体剖面见图 2。滑坡周界和滑坡内部共发育 5 条拉张裂缝。坡体变形强烈,部分区域已解体。坡体前缘两道挡墙已发生破坏,第 1 道挡墙顶部往下 1 m 发生破坏,底部出现开裂、前移;第 2 道挡墙北段已被冲垮,南段挡墙出现倾倒开裂现象,倾倒距离约 30 cm,往前推移 1~2 m,挡墙底部出现开裂现象。

滑坡坡体西南侧和东北侧各发育局部小滑坡(简称滑坡 B、C)。滑坡 B 在平面上呈长条形,主轴方向为 NW0°,长约 45 m,前后缘宽约 22 m,滑坡体厚约 2 m,体积约 2 000 m^3 ,滑坡东侧有两棵马刀树,树顶向山顶方向倾斜。滑坡 C 在平面上呈扇形,主轴方向 SW1°,长约 42 m,前缘宽约 45 m,滑坡体厚 1~4 m,体积约 3 500 m^3 ,滑坡体冲毁前缘挡墙,滑坡体目前已解体,堆积于坡脚。

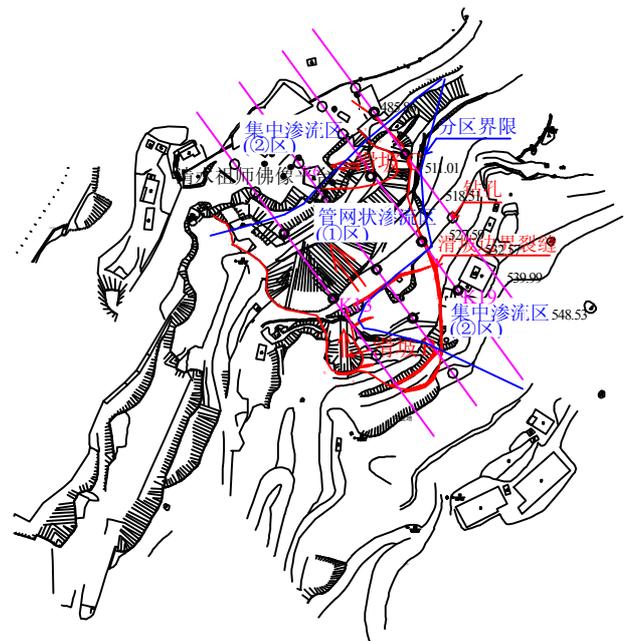


图 1 滑坡平面图

Fig.1 Landslide plan

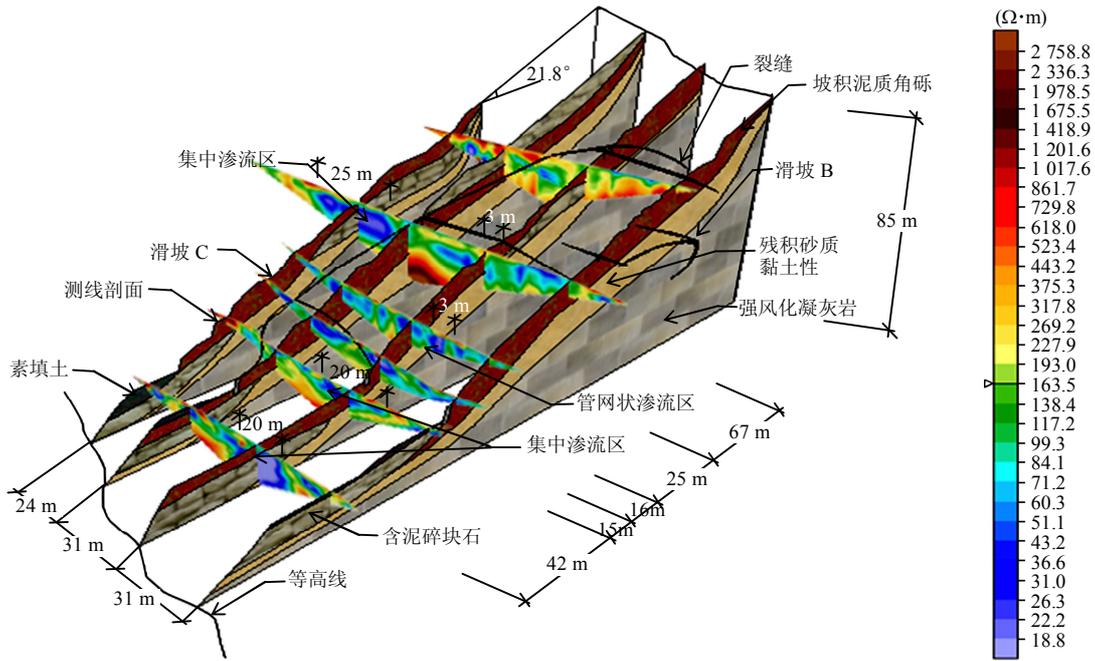


图 2 地下水渗流系统模型
Fig.2 Model of groundwater seepage system

2.2 滑体多元结构特征

根据现场勘查和钻探结果,滑体物质结构复杂,主要物质组成为坡积泥质角砾、含泥碎块石,局部含素填土,各土层颗粒级配见表 1。

表 1 碎石土级配
Table 1 Gradation of gravel soil

| 地层代号 | 颗粒组成/ % | | | | | 结构 |
|-------------------------------|----------|-----------|------------|----------------|-------------|-----|
| | >20 / mm | 20~2 / mm | 2~0.1 / mm | 0.1~0.005 / mm | <0.005 / mm | |
| Q ₄ ^{ml} | 26.1 | 25.2 | 14.2 | 17.8 | 16.7 | 假斑状 |
| Q ₄ ^{dl} | 20.2 | 30.1 | 18.5 | 15.3 | 15.9 | 假斑状 |
| Q ₄ ^{del} | 80.6 | 10.1 | 5.4 | 3.9 | 0.0 | 粗石状 |

①素填土 (Q₄^{ml})：灰黄色,湿,松散~稍密,成分主要为黏性土及碎石,碎石粒径为 3~50 cm,碎石含量约占 10~70%,均匀性差,整体呈假斑状结构。主要分布于坡脚等地形平缓区表面。

②坡积泥质角砾 (Q₄^{dl})：灰黄色,可塑状,湿-饱和,部分地段相变为黏土,局部钻孔该层含砾碎石,含量 20~30%,粒径为 1~6 cm,呈棱角状,整体呈假斑状结构,角砾母岩成分为强风化凝灰岩。

③含泥碎块石 (Q₄^{del})：灰黄色,稍密-中密,湿-饱和,主要成分为黏性土及碎块石,碎块石含量为 65~85%,呈棱角-次棱角状,粒径 5~80 cm,最大达 300 cm,均匀性差,块石主要成分为中-微风化凝灰岩,碎块石之间黏性土充填,整体呈粗石状结构。该地层主要分布于滑坡体西北侧和坡脚处,

呈透镜状堆积于斜坡缓坡区域,推测为古滑坡堆积体。

滑床为残积砂质黏性土,滑面基本沿碎石土地层与残积砂质黏性土交界面发育。

3 渗流系统模型建立

为探明岩山角落滑坡坡体地下水渗流系统特征,采用地质钻探和高密度电法相结合的综合勘测手段。钻探勘测为 20 个钻孔,共获得 4 条地层剖面。高密度电法探测共布置 6 条测线,测线垂直滑坡运动方向,获取 6 条剖面。在 SketchUp 软件平台上对钻探获取的地层剖面和高密度电法得出的测线剖面进行建模,建模结果见图 2。

由图 2 可知,碎石土视电阻率在 300~1 000 Ω,底部基岩视电阻率在 2 000 Ω 以上。电法剖面中存在电阻率低于 85 Ω 的低阻异常区。根据现场情况,低阻异常区为坡体内部滞水区域或地下水渗流通道。低阻异常区由大量近圆形区域组成,近圆形区域直径在 0.5~25.0 m 不等,呈现明显二元结构,整体呈带状分布于地下 3~15 m。这与钻探得出地下水分布情况一致,表明钻探与物探成果较高的一致性,可信度较高。

从模型中可以直观获取渗流系统在坡体内部分布特征,根据渗流场、地层结构和坡体形态在空间上的相互关系,容易得到渗流系统的特征和发育规律。

4 多元渗流系统特征

4.1 基本特征

坡体整体为“凹”坡，地下水呈漏斗状向坡脚渗流。渗流以点状渗流为主，根据渗流形式可将渗流系统分为两类。渗流通道直径较大($d \geq 20$ m)、渗流形式集中的称为集中渗流系统。渗流通道直径小($0.5 \text{ m} \leq d \leq 10 \text{ m}$)、渗流形式分散的称为管网状渗流系统。管网状渗流系统地下水在局部形成集中渗流通道，因此，也存在优势流效应。根据渗流系统不同，可将坡体分为两大区域，即管网状渗流区(以下简称①区)和集中渗流区(以下简称②区)，见图 1、2。集中渗流系统主要分布于坡顶右侧及坡脚处，管网状渗流系统主要分布于坡体中部。不同渗流系统的形成与土体结构密切相关，因此，不同区域土体结构往往差异较大，各区基本特征见表 2。

表 2 多元结构渗流系统

Table 2 Multivairiate-structure seepage system

| 区号 | 渗流管道 直径/m | >20 mm 颗 粒含量/% | 主要土体 结构 | 渗流 形式 | 小型滑 坡发育 |
|----|--------------|-------------------|------------|----------|------------|
| ① | 0.5~10.0 | 22.2 | 假斑状 | 分散 | 有 |
| ② | 20.0~25.0 | 80.6 | 粗石状 | 集中 | 无 |

①区基本为假斑状碎石土，粗颗粒碎石含量少，土质较为均一，不存在粗石结构。地下水渗流优势流不明显，即一般意义上的管网状渗流。这里主要因碎石土细颗粒含量高，粗颗粒悬浮于细颗粒内部，故难以形成骨架，因此，地下水渗流通道仍受细颗粒组分控制，易形成细小而密集的渗流通道。

②区主要特征是存在粗石状碎石土层，这类土层块石占绝大部分，块石间相互接触形成骨架，水流将粗粒块石间的细颗粒带走，形成架空构造，从而为集中渗流通道形成创造良好条件。受块石直径的影响，渗流通道一般直径较大，渗流形态则以集中渗流为主。

4.2 降雨敏感性分析

从地下水位监测数据来看，K6 孔(坡脚②区地下水位测孔)和 K19 孔(坡顶②区地下水位测孔)的地下水位降雨后抬升速率更快，K13 孔(坡体中部①区地下水位测孔)则在降雨后抬升不明显，且存在一定的滞后性，见图 3。这是由于②区渗流通道直径大，渗透能力强，地下水基本不存在流通阻力。因而容易产生优势流效应，分担周边土体地下水渗流，在汛期将作为主要排水通道。另外，②区渗

流通道较管网状渗流场具有更小的过水断面，使其地下水抬升更为迅速，这与文献[3]的分析结果一致。

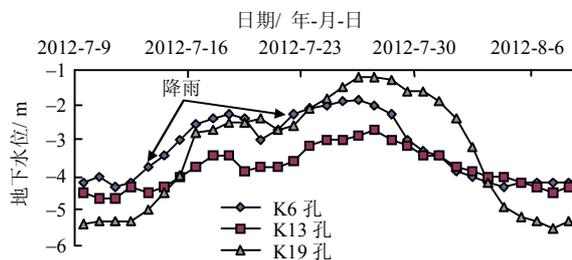


图 3 地下水监测

Fig.3 Groundwater monitoring

管网状渗流系统小而密的特点，使地下水与渗流管道壁接触面积较大，产生较大的流通阻力。此外，一些毛细管道的存在也容易使地下水张力发挥作用，产出额外的基质吸力，阻碍水流运移。宏观上表现为渗透能力减弱。从而使地下水抬升具有一定的滞后性。

综上所述，假斑状碎石土地下水渗流系统对于降雨的敏感性要高于粗石状碎石土地下水渗流系统。

4.3 变形敏感性分析

碎石土滑坡的稳定性主要受地下水控制，因此，地下水渗流通道的稳定性直接决定了坡体的稳定性。由于伴随滑坡产生的两处局部滑塌均位于①区，这表明假斑状碎石土渗流通道对坡体变形的敏感性要高于粗石状碎石土，坡体变形情况下，①区的渗流通道更容易发生改变。

其原因可分为两方面，一方面，由于粗石结构碎石土物质组成以块石为主，块石间相互接触，强度较高，相比之下假斑状结构碎石土强度主要由细粒土决定，强度低。变形条件下，①区渗流通道更容易发生塌孔、错位等现象，使渗流通道破坏；另一方面，①区渗流通道以管网状渗流为主，孔径小，变形条件下更易发生堵塞，影响渗流。

5 渗流系统对滑坡稳定性影响

渗流系统对滑坡稳定性的影响主要表现在水流的渗透力产生的附加应力场和地下水对碎石土间细颗粒冲蚀带走而引起的结构性失衡。

根据图 2 显示，坡体裂缝主要发生在与含泥碎块石边缘接触的坡积泥质角砾内，这主要是由于地下水在含泥碎块石内部是以集中渗流形式运移，速

度快、流量大,具有较高的能量。而在碎块石和泥质角砾的接触位置,由于渗流场的突然改变,优势流效应减弱,渗透能力差,致使流速减慢,地下水必然在该处产生滞留,对坡体施加附加应力。由于人工开始使坡体变形,泥质角砾对变形的高敏感性使得其排水能力劣化更为明显,从而使碎块石边缘附加应力瞬间增大,坡体发生拉裂变形。这类附加应力的产生与传统意义上的渗透性理论不同,虽然其宏观上看,类似两类土体的渗透力差异产生的扬压力,但实际上其地下水渗流主要以管道状渗流为主,而不是一般土体的颗粒间孔隙渗流。因此,附加应力的产生主要还是来自于渗流形态的改变。

另一方面,集中渗流通道产生可使坡体内部地

下水迅速排出,对坡体稳定起关键作用^[9]。但地下水的冲刷带走碎块石间泥土,长期的冲刷容易使块石间悬空,使块石间发生相互错动可能性增高,稳定性下降,在人工开挖扰动下发生解体。这与一般的土质滑坡地下水侵蚀作用类似,只是块石的错动往往具有突发性、不一致性,容易使坡体变形难以协调,产生解体式破坏,这在岩山角落滑坡以及文献[1-2]中均得到体现。

6 渗流综合防治措施

6.1 防治措施

边坡采取抗滑桩+削坡+排水措施+坡面防护的综合防治措施,治理剖面见图4。以下仅对排水措施进行介绍。

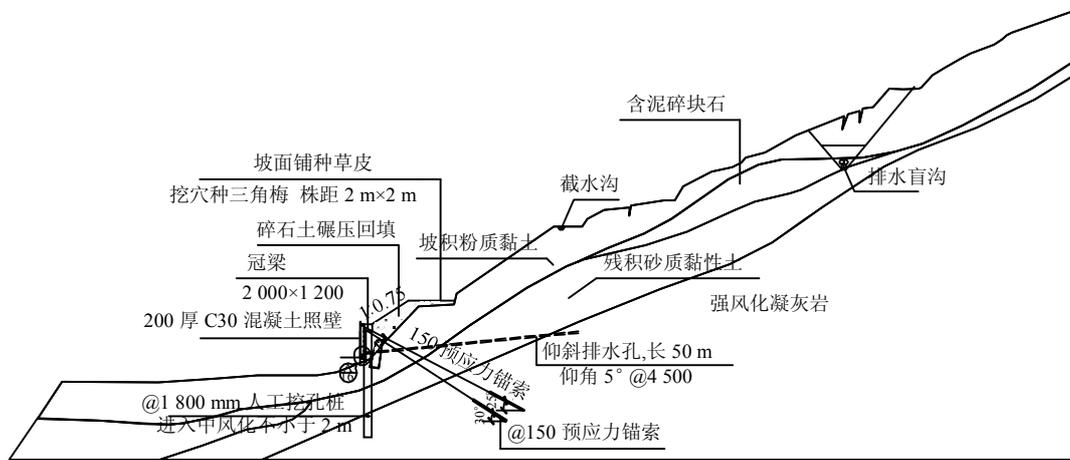


图4 滑坡综合治理断面图

Fig.4 Comprehensive treatment section of landslide

6.1.1 排水措施

碎石土区孔隙发育,地下水入渗迅速,仅采用表面排水措施难以达到排水效果。因此,除了坡顶设置截水沟、纵向排水系统(急流槽)、坡脚及平台内侧设置排水沟外,还采用坡体内深层排水孔以及滑坡后缘开挖排水盲沟进行。深层排水孔采用透水软管 $\phi 76$ mm广式透水软管外套PVC塑料管,深入坡体内部50 m,仰角 5° 。施工过程中,在地下水集中渗漏处预留泄水孔。排水盲沟呈梯形,高6~8 m,要求进入残积砂质黏性土层不小于1 m。下部用黏土封底,中部铺设3根MY300塑料盲沟,回填碎石,上部原土碾压回填。施作位置位于含泥碎块石上部或中部,这样可以有效截断集中渗流,提高排水效果。

6.1.2 支护措施

坡脚设置圆形抗滑桩,采用人工挖孔,桩径

为1.8 m,桩长为24 m,其中地面以上7 m,基础深入地下17 m,进入中风化层不小于2 m。桩顶冠梁处施作两排预应力锚索,上排预应力锚索直径为150 mm,长为39~42 m,水平间距2.25 m,梅花状布设。

6.2 防治效果分析

根据防治工程施工后地下水位监测情况(表3),地下水位已经得到不同程度的降低(见图5),尤其雨季水位降低更为明显。雨季水位与旱季水位差异较小,可见盲沟可有效降低地下水位对降雨的敏感性。从表3数据还可得出与排水盲沟距离越近,降低效果越好。可见排水盲沟在碎石土滑坡排水过程中起到较大作用。根据现场调查,盲沟沟口常年出水,雨季水量可达2 L/s。盲沟对地下水渗流场起到较好的分流作用。

表3 防治效果对比
Table 3 Contrast of control effect

| 孔号 | 旱季/m | | | 雨季/m | | | 测点与盲沟距离/m |
|-----|------|-------|------|------|------|------|-----------|
| | 原水位 | 现水位 | 变化量 | 原水位 | 现水位 | 变化量 | |
| K6 | -4.3 | -6.5 | -2.2 | -2.0 | -6.0 | -4.0 | 140.0 |
| K13 | -4.5 | -8.3 | -3.8 | -2.9 | -7.1 | -4.6 | 60.0 |
| K19 | -5.5 | -11.2 | -5.7 | -1.1 | -9.2 | -8.1 | 0.5 |



图5 盲沟排水效果
Fig.5 Drainage blind ditch

7 结论

(1) 碎石土结构直接影响地下水的渗流形式。假斑状碎石土渗流场仍受土体内细颗粒影响，易形成管网状渗流通道；粗石状碎石土块石相互接触形成架空构造，易形成集中渗流通道。

(2) 粗石状碎石土具备明显的优势流效应，渗透能力强，分担较多的泄水任务。其对降雨的敏感性较管网状渗流系统高。

(3) 粗石状碎石土地下水渗流系统在流通管道强度和渗流稳定性两方面要优于假斑状碎石土。因此，前者在对变形的敏感性方面要低于后者。

(4) 碎石土滑坡的产生主要受地下水的影响。其影响主要来自于渗流场突变产生的附加应力以及坡体冲蚀造成的坡体强度降低。

(5) 以排水为主，抗滑桩支护的福建岩山角落滑坡防治工程取得较好的防治效果。在施工过程中要注意排水盲沟要切穿碎石土层，抗滑桩要伸入中风化层。

目前对于多元结构碎石土尚存在较多问题，如对于碎石土不同结构如何界定尚缺乏定量方法、土体颗粒级配与形成的渗流场之间存在何种对应关系，目前还没有得出更深入结果。亟待进一步开展研究工作。

参考文献

[1] 尚岳全, 孙红月, 侯利国, 等. 管网渗流系统对含碎石

黏性土边坡的稳定作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1371—1375.

SHANG Yue-quan, SUN Hong-yue, HOU Li-guo, et al. Study on the stability of pebbly clay slopes with pipe drainage system[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(8): 1371—1375.

[2] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 106—112.

XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 106—112.

[3] 李玉锋, 马强, 李显平. 降雨诱发碎石土斜坡优先流机理研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 56—59.

LI Yu-feng, MA Qiang, LI Xian-ping. Study on rain-induced gravel slope mechanism of preferential flow[J]. *Water Resources and Power*, 2009, 27(6): 56—59.

[4] 俞伯汀, 孙红月, 尚岳全. 含碎石黏性土边坡渗流系统的物理模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(6): 705—708.

YU Bo-ting, SUN Hong-yue, SHANG Yue-quan. Physical model simulation tests on seepage system in debris-containing clay slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(6): 705—708.

[5] 姚晓阳, 杨小永, 曾钱帮. 碎石土滑坡工程地质特性及防治方案研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(3): 369—376.

YAO Xiao-yang, YANG Xiao-yong, ZENG Qian-bang. Engineering geology characteristics and prevention measure of landslide in soil and rock debris slopes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(3): 369—376.

[6] 徐兴华, 尚岳全, 王迎超. 碎石土滑坡综合治理及评价决策方法[J]. 吉林大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 484—491.

XU Xing-hua, SHANG Yue-quan, WANG Ying-chao. Comprehensive treatment and evaluation decision method of gravel soil landslide[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2011, 41(2): 484—491.

[7] 孙红月. 含碎石黏性土滑坡的成因机制与防治对策[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

SUN Hong-yue. Formation mechanism and control measures of the pebbly clay landslide[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.