

藏东南地区冰碛物斜坡钢花管注浆加固试验研究

杨 栋, 王军朝, 石胜伟, 杨东旭

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘要: 本文以藏东南地区帕隆藏布流域冰碛物斜坡为例, 针对其架空结构较多、固结程度欠佳的特点, 提出钢花管注浆加固技术。通过15个注浆孔现场注浆、现场开挖、取样测试等, 探讨其施工工艺及加固效果, 并结合FLAC3D数值模拟, 进一步阐明其加固机理及设计方法。研究表明, 冰碛物浅表层注浆有效加固半径为20~55 cm, 浆液扩展路径与架空结构展布息息相关; 注浆加固后土体粘聚力、内摩擦角、压缩模量均得到改善, 竖直渗透系数变小; 其注浆压力宜采用0.5~1.0 MPa; 水灰比宜选用2、1; 注浆孔间距与有效加固半径的比值不宜大于8。通过现场试验, 形成一套基于3.5 m³空压机、YT28型凿岩机、空心自钻式锚杆及气动式注浆机的花管注浆工艺, 轻便快捷, 施工效率高, 尤其适用于交通不便、施工条件差的情形。

关键词: 地质灾害; 冰碛物; 斜坡; 钢花管; 注浆加固; 藏东南地区

中图分类号: P642.2; X43; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)08-0089-07

Reinforcement of the moraine slope with steel screen pipe grouting

YANG Dong, WANG Junchao, SHI Shengwei, YANG Dongxu

(Institute of Exploration Technology, GAGS, Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: There are a large number of glacier relics in Southeastern Tibet, forming a large number of loose accumulations, which are prone to disasters. There are many voids in the moraines, and the structures are unstable. The technology of grouting reinforcement by steel screen pipe for moraines was studied with discussion of the construction technologies, the reinforcement mechanism, as well as the design method. The numerical simulation was also implemented. The field tests were performed, and the results showed that the effective reinforcement radius of shallow surface grouting of moraine is 20~55cm; the soil cohesion, internal friction angle and compression modulus improved after grouting reinforcement; the vertical permeability coefficient of the soil becomes smaller; the preferred grouting pressure is 0.5 to 1.0MPa, the water/cement ratio 2、1, the ratio of the grouting hole spacing to the effective reinforcement radius not greater than 8. Through field tests, a screen pipe grouting process has been formed on the basis of the 3.5 cubic air compressor, YT28 rock drill, hollow self-drilling bolt and pneumatic grouting machine, which is suitable for inconvenient traffic and poor construction conditions.

Key words: geological hazards; moraine; slope; steel screen pipe; grouting reinforce; Southeast Tibet

帕隆藏布流域是我国海洋性冰川最重要的发育区, 存在大量的冰川遗迹, 形成为数众多的松散堆积体, 孕育着密集的地质灾害。冰碛物堆积体存在3种不同结构, 其中以浅表冰碛层降雨蠕滑型最为常见。冰碛物是由粘粒、粉粒、砂、砾石和漂石组

成的非成层的冰川沉积土, 其特征是粒级级配宽、粒度极不均匀, 且固结程度差异极大^[1-3]。失稳的冰碛物斜坡往往存在较多架空结构, 且固结程度欠佳。针对上述情形, 拟对架空结构较多、固结程度欠佳的冰碛物斜坡进行一定网点密度的钢花管注

收稿日期: 2020-11-13; 修回日期: 2021-04-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.08.014

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“藏东昌都地区城镇灾害地质调查”(编号: DD20190644); 国家重点研发计划项目“膨胀土滑坡和工程边坡防护工程健康诊断和快速修复”(编号: 2019YFC1509904)

作者简介: 杨栋, 男, 汉族, 1985年生, 注册岩土工程师, 岩土工程专业, 硕士, 主要从事岩土体稳定性及防治技术方面的研究工作, 四川省成都市郫都区红光镇现代工业港(北区)港华路139号, 271062514@qq.com。

引用格式: 杨栋, 王军朝, 石胜伟, 等. 藏东南地区冰碛物斜坡钢花管注浆加固试验研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(8): 89-95.

YANG Dong, WANG Junchao, SHI Shengwei, et al. Reinforcement of the moraine slope with steel screen pipe grouting[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(8): 89-95.

浆加固试验,以填充冰碛物中架空结构,并在压力注浆下形成球形或类柱状结石体,极大改善冰碛物物理力学特征,并形成类似桩土“土拱效应”,从而达到加固冰碛物不稳定斜坡的目的。

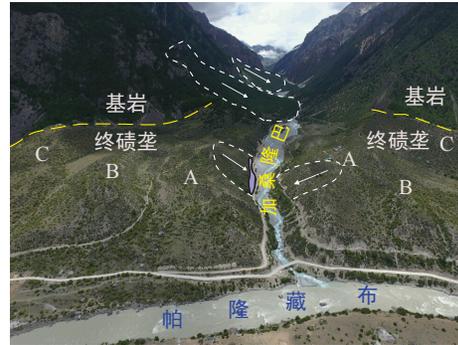
注浆加固松散堆积体既可改善岩土体的稳定性,又可保留原有坡面进行绿化,是一种经济、有效且环保的技术手段,因此应用较为广泛。雷进生^[4]以三峡库区广泛存在的碎石土地基为工程研究背景,考虑非均质土物性参数空间分布的结构性和随机性、注浆参数的动态和时变特性及渗流场与应力场的流固耦合作用,探讨了非均质松散岩土体浆液随机扩散过程。牛小玲等^[5]在喀喇昆仑公路隧道洞顶松散崩坡积体进行注浆加固试验研究,其注浆扩散半径为9~18 cm。孙子正等^[6]、杨树才等^[7]、李术才等^[8]研究了软流塑地层注浆加固机理,对注浆加固的可行性、注浆加固范围、注浆施工及加固效果进行了探讨。周科峰等^[9]对顺层边坡加固机理进行了探索。王成华等^[10]开展了粒状碎屑溜砂坡注浆树根桩技术研究,注浆深度1 m,压力为0.2~0.3 MPa。路文琴等^[11]使用斜导管注浆框架梁加固路堤边坡。为方便研究注浆加固机理,张家奇等^[12]研制了一套新型多功能综合注浆加固试验系统,该系统成功应用于断层角砾介质注浆加固室内模拟试验,分别从应力响应—传递特征、加固体强度增长规律及加固模式等方面探究了断层角砾介质的注浆加固机理。目前关于钢花管注浆加固松散冰碛物斜坡的研究较少,其注浆加固范围、加固机理、设计及施工是亟待解决的问题。

1 现场试验概况

1.1 现场试验点概况

地理位置:位于波密县玉普乡政府对岸的格巴村,加桑隆巴汇入帕隆藏布的汇口两岸,为末次冰期的侧碛垄,可见多期次堆积,如图1中A、B、C所示,至少可分为3个不同时期的堆积。冰川主谷走向约19°,为宽大的U形谷,且多处存在堰塞体。冰碛垄在沟口两侧呈不对称分布,左岸垄长约900 m,宽度范围700 m;右岸垄长930 m,宽度范围约1120 m,平均垄高60 m。垄内侧坡面长度约100 m,平均宽度930 m,前缘高程最低为3220 m,后缘高程最高为3350 m,最大高差130 m,坡向115°,平均坡度约37.3°,坡形基本为直线形,微地貌属于缓坡,平面形

态呈长条形。沟谷两侧由于修建公路及水渠,发育多处浅层溜滑(见图1)。



图例: [] 滑坡 [] 试验点

图1 试验点全貌

Fig.1 Test point panorama

冰碛垄顶部可见大量冰漂砾分布,粒径多为0.5~1.5 m,最大可见3 m×2 m巨石,砾石母岩为晚石炭统来姑组变质砂岩。经现场颗分试验及侧窗分析其粒径大小,冰碛土粒径以6 cm以下含量居多,物质整体呈灰白色,较松散且存在大量架空结构(见图2)。

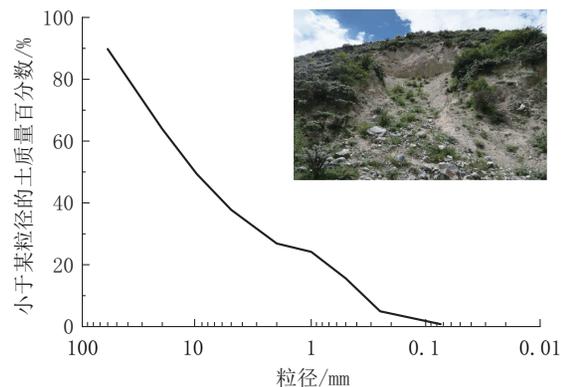


图2 斜坡物质

Fig.2 Exposed substances

1.2 注浆方案

由于藏区属于生态脆弱区,土壤层较薄,为尽量减少对生态脆弱区环境的影响,地面以下1 m深度范围内不使用压力注浆,在中空注浆锚杆孔下1 m处,设置特制的止浆塞,在1~2 m深度范围内进行注浆加固,通过浆液填充架空结构及入渗土体孔隙来加固土体,增加斜坡的自稳性,而坡面则进行植物护坡(见图3)。

因所加固冰碛物为欠固结、颗粒级配宽的土石

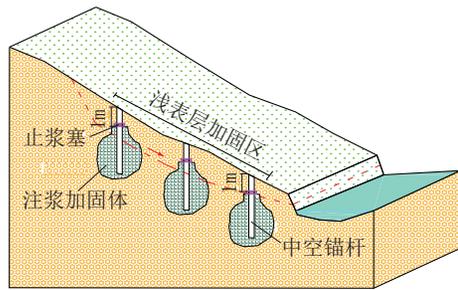


图3 冰碛物不稳定斜坡钢管注浆加固示意

Fig.3 Sketch of grouting reinforcement

混合体,成孔较难,极易产生垮孔、卡钻等现象,且部分冰碛物不稳定斜坡坡高较高、交通不便,因此考虑轻型成孔、注浆工艺,具体如下。

(1)成孔:主要设备及材料为3.5 m³空压机、YT28型凿岩机及空心自钻式锚杆。锚杆为1 m+1 m,其中下部1 m锚杆上钻有直径10 mm、间距20 cm呈螺旋型分布的小孔。

(2)上部封闭:在上部1 m处进行封闭。将土工布包裹在锚杆周围,使用水灰比0.5的水泥浆液自重灌浆,待其凝固后,再进行下一步注浆。

(3)注浆:在上部封闭12 h后,进行注浆试验。注浆主要设备及材料:3.5 m³空压机、空心自钻式锚杆及气动式注浆泵。由于注浆量较少,可用人工搅拌的方式进行。水灰比按照设计应控制在0.5、1及2。根据《地质灾害治理工程施工技术手册》,注浆压力以不扰动岩体为原则,该处注浆深度较浅,故拟定注浆压力分别为0.5、1、1.5 MPa及2 MPa。注浆时应记录注浆时间、注浆压力变化、注浆量、终止压力等。当注浆孔周围土体有返浆现象时,说明当前注浆压力与土体结构下,注浆达到饱和无法再注入浆液,结束注浆。

(4)开挖:注浆完成2周后,使用挖机开挖,观测记录结石体形状,取样、送检。主要检测指标为抗压强度、弹性模量、抗剪强度参数。并取相应深度土样进行检测,主要包括土体的重度、含水量、渗透系数、孔隙率、颗粒级配、抗剪强度参数。

2 试验成果分析

2.1 冰碛物有效加固半径

现场根据不同水灰比及注浆压力,共进行15组现场试验,记录其终孔压力、注浆时间及注浆量,结果见表1。

表1 注浆试验统计

Table 1 Grouting test data

编号	压力/ MPa	水灰比	终孔压力/ MPa	耗时/ min	注浆量/ L
1	0.5	0.5	0.5	9	110.96
2	1	1	0.6	37	179.22
3	1.5	1	0.7	46	218.62
4	2	1	0.7	39	172.18
5	2	1	0.8	25	234.48
6	1.5	1	0.8	12	93.57
7	1	2	1	21	284.03
8	1.5	2	1	60	851.09
9	1.5	2	1	9	220.06
10	2	2	1.1	6	112.23
11	1	2	1	22	199.40
12	2	2	1	8	128.20
13	2	2	1.0	27	199.20
14	1	1	0.8	14	91.97
15	2	1	1.1	35	294.74

根据目前已有的理论有球形结石体理论、柱形结石体理论,假设结石体的形状为球形或者柱形,注浆速率恒定,则扩散半径与渗透系数、注浆孔半径、注浆时间、浆液粘度比相关,注浆时间越长则扩散半径越大。实际上本次现场试验开挖注浆结石体发现,由于冰碛物特有的架空结构使得其渗透性质存在很大的不均匀性,浆液沿着优势渗流路径扩展较远,最远达到1.7 m;且由于注浆难度不同,注浆速率很难保持恒定,实际上,影响注浆时间的因素很多,与注浆泵压力、流量有关(压力与时间的乘积并不等于注浆量),还与采取的工艺相关。实际操作时并非时间越长注浆量越大,个别孔由于注浆困难,耗时长,但注浆量小。现场试验时,由于记录了实际注浆量,因此,选择使用地基处理规范中的公式计算有效加固半径:

$$r_1 = 0.6 \sqrt{\frac{Q}{nl \times 1000}} \quad (1)$$

式中:Q——注浆量(取值按照现场试验记录),L;l——注浆长度,此处取1 m;n——孔隙比,根据岩矿测试中心出具的室内试验报告,该点孔隙率约为1。

开挖后发现,由于钻头直径为75 mm,锚杆直径为51 mm,中间有较大空隙,浆液在空隙中和孔周土

体形成硬壳层,其半径为8~10 cm。有效半径、最远扩散距离、硬壳体半径如图4所示。

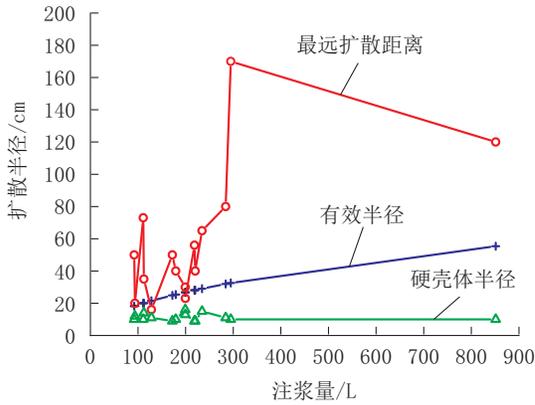


图4 冰碛物注浆加固试验扩散半径
Fig.4 Diffusion radius of grouting tests

本次冰碛物浅表层注浆试验的有效加固半径为20~55 cm,其符合期望为27.14 cm、方差9.07362的正态分布(见图5)。

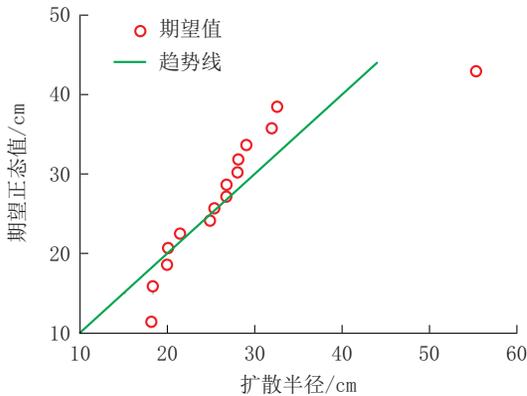


图5 扩散半径正态分布检验
Fig.5 Distribution of diffusion radius

2.2 加固后土体物理力学性质

将原土样、加固后土体及开挖出的硬壳层采取一定数量样本送检,其力学性质指标如表2所示,需要指出的是,由于冰碛物原状土样难以获得,而且室内试验时剔除了粒径较大的砾石,因此室内试验难以反映真实的土体物理力学性质,但可以作为对比。从表2中可见,加固后土体(TR)与原土体(TY)相比,其粘聚力、内摩擦角、压缩模量均得到了改善,竖直渗透系数变小;而硬壳层(YK)的抗压强度达到21 MPa。

表2 注浆加固实验力学测试结果

Table 2 Mechanical test results

土样	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa	渗透系数/(10 ⁻³ cm·s ⁻¹)	抗压强度/MPa
TY	9.3	21.5	5.23	54.7	
TR	13.9	29.6	16	1.29	
YK	1.8	40.9	2.1×10 ⁴		21

2.3 合理注浆压力及水灰比

单孔注浆量与注浆压力及水灰比的关系见图6。由图6可见,注浆压力越大,单孔注浆量越大,但其趋势线斜率较缓,增长得并不快,且在浅层注浆加固中,不易保持较稳定的压力,因此注浆压力使用0.5~1.0 MPa即可。浆液水灰比0.5时,可灌性较差,渗透性太差,而水灰比2时,浆液太稀,无法保证加固效果。水灰比2、1时比较适宜。

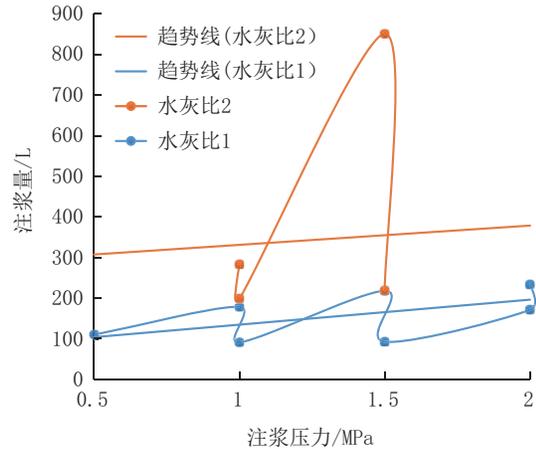


图6 注浆量与水灰比及注浆压力关系
Fig.6 Curve of grouting volume vs water/cement ratio and grouting pressure

2.4 基于土拱效应的数值模拟

基本假定:

- (1)有效注浆加固区为一圆柱体。
- (2)加固柱体非刚性。

由于冰碛物裂缝分布的随机性大大增加了计算难度,为方便计算,假定有效注浆加固区为一圆柱体;以往讨论合理桩间距多假定抗滑桩为刚体,不产生水平位移^[13-16]。由于注浆加固体与刚度较大的抗滑桩不同,它与土体一样会产生位移。

使用岩土计算软件FLAC3D建立如下简化后

的冰碛物浅层滑动三维计算模型(见图7),滑床及滑体均为冰碛物,滑面设置为水平接触面,模型荷载为均布荷载 10 kPa,按照不同的距径比(s/r)进行模拟。

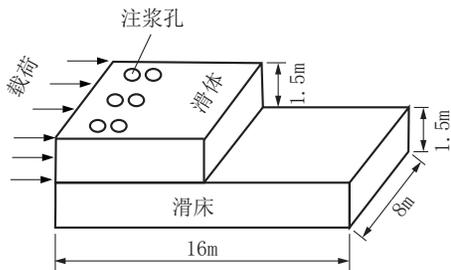


图7 花管注浆加固试验计算模型

Fig.7 Sketches for numerical simulation

计算参数见表3。土体、滑床采用弹塑性模型,其中土体弹性模量取压缩模量的5倍,滑面采用接触面模型,注浆孔采用FLAC3D自带桩单元建模,其孔径为有效加固半径,计算中取 $r=25\text{ cm}$,剪切耦合弹簧内聚力为 $1.3\times 10^8\text{ Pa}$,刚度 $1.0\times 10^9\text{ Pa}$,内摩擦角 40° ;法向耦合弹簧内聚力为 $1.3\times 10^8\text{ Pa}$,刚度

$1.0\times 10^9\text{ Pa}$,内摩擦角 40° 。考虑到有效加固区内存在硬壳层及未拔出的注浆钢管,其弹性模量综合考虑后取弹模为 $5.0\times 10^8\text{ Pa}$ 。

表3 花管注浆加固试验数值模拟参数

Table 3 Numerical simulation parameters

加固部位	弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
土体	26.2×10^6	0.25	1.68	9.3	21.5
滑床	26.2×10^6	0.25	1.68		
加固区	5.0×10^8	0.25			
接触面				0	10

按照距径比分别为4、6、8、9、10进行计算,由于规律的相似性,限于篇幅,本文重点讨论距径比为8和9时的应力应变规律。不同埋深下(离滑面距离 $z=1.5、1、0.5、0\text{ m}$)的位移云图及应力云图见图8和图9(二图中的a、b、c、d为位移云图,e、f、g、h为应力云图)。

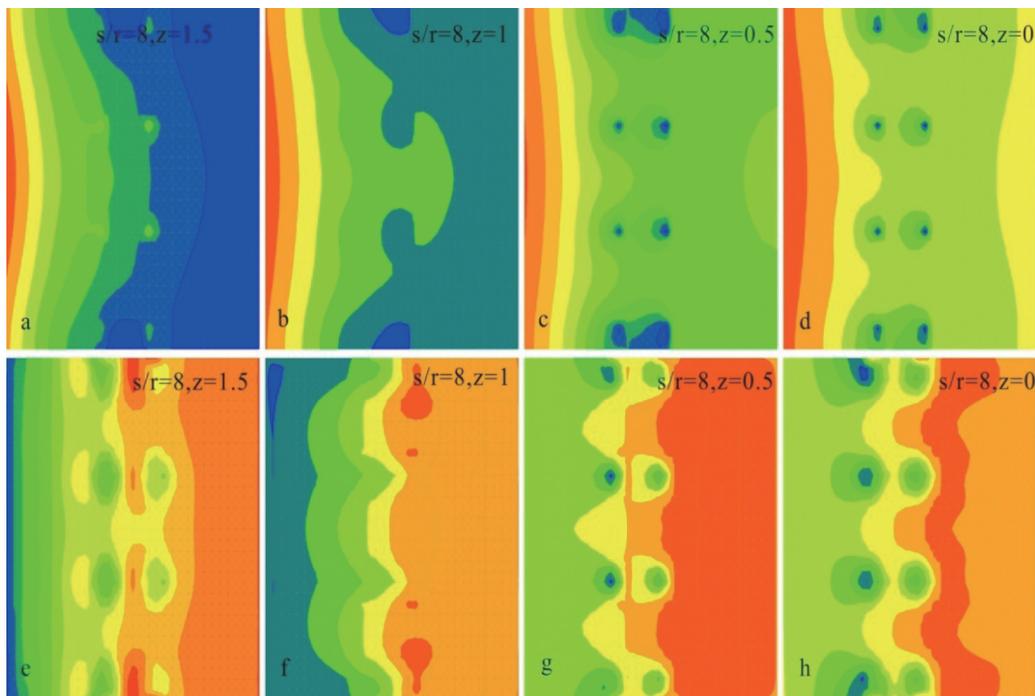


图8 距径比为8时的位移云图、应力云图

Fig.8 Displacement cloud and stress cloud map when the distance to radius ratio is 8

距径比为8时, $z=1\sim 1.5\text{ m}$,位移拱不明显,加固区土体位移大于非加固土位移,这是因为由于加固柱体下部受力大于上部受力,在土压力的作用下

产生指向坡外的位移,而由于其刚度远大于周围土体,则加固柱体上部也产生指向坡外的位移或者位移趋势; $z=0\sim 1\text{ m}$ 时,位移拱明显,加固区土体位移

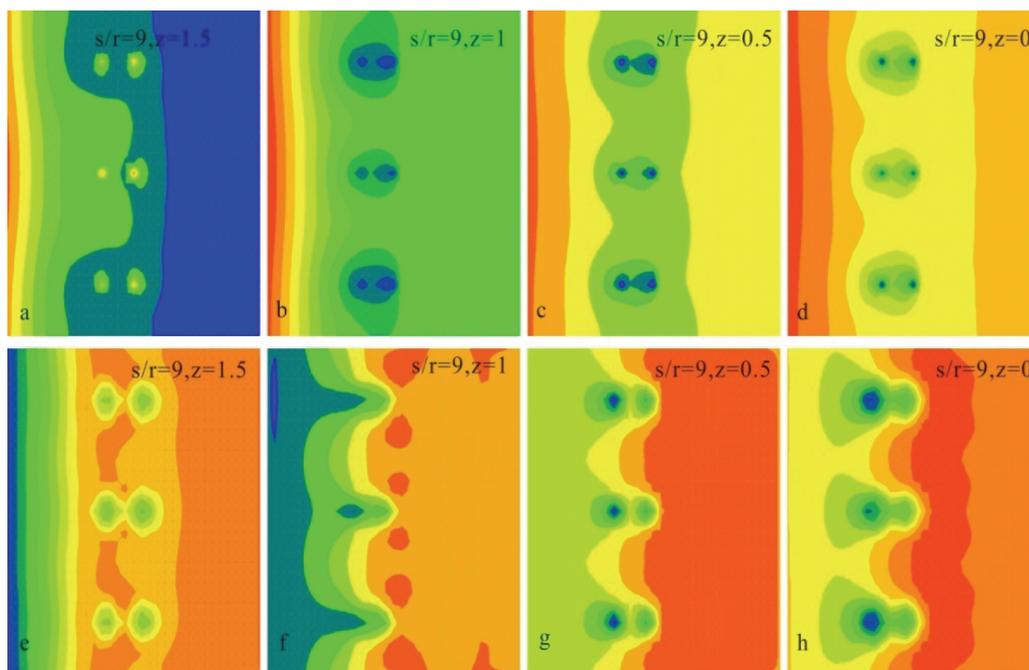


图9 距径比为9时的位移云图、应力云图

Fig.9 Displacement cloud and stress cloud map when the distance to radius ratio is 9

大于加固柱体的位移,柱体前土体被楔紧,形成拱形;注浆有效加固区的水平位移明显小于其他部分土体位移,可视为拱支座。其两排注浆加固区 x 方向应力也相应呈明显的拱形分布,说明此时两排注浆加固区能协调工作,共同发挥作用;滑面以上 $2/3$ 范围内,由于外力的作用,在两排注浆加固柱体前均形成了有限的位移拱,且能共同发挥抗滑作用。

距径比为9时, $z=0\sim 1.5$ m处,未加固区土体位移大于加固柱体的位移,但位移云图不呈拱形分布,且除加固柱体附近外,中间土体与加固区后土体位移一致,有绕加固柱体运动的迹象;从 x 方向应力云图来看, $z=0\sim 1$ m时,加固柱体外围产生应力脱空,说明未加固土体已绕过柱体运动。

综上,距径比应不大于8,据现场试验结果,合适的注浆孔间距约为2 m。

3 结论

(1)随着灾害治理的生态化需求越来越突出,浅表层崩滑带注浆加固技术将改善岩土体性质与坡面绿化结合起来,在生态脆弱区、景区灾害治理中有较好的前景。且冰碛物由于自身具有较多架空结构,因此注浆加固是一种较好的防治对策。

(2)本文通过现场试验及数值计算表明,冰碛

物浅表层注浆有效加固半径为20~55 cm,注浆加固后土体粘聚力、内摩擦角、压缩模量均得到了改善,竖直渗透系数变小,其注浆压力宜采用0.5~1.0 MPa;水灰比宜选用1:0.5、1:1;注浆孔间距与有效加固半径的比值不宜大于8。

(3)由于研究区处于藏区,交通不便,因此提出 3.5 m^3 空压机、YT28型凿岩机、空心自钻式锚杆及气动式注浆机的施工工艺,设备轻便,施工效率较高。

(4)冰碛物的各向不均匀性较为显著,本文未讨论其空间分布的随机性对其加固力学行为的影响,是后续研究的重点方向。

参考文献(References):

- [1] 杨栋,王军朝,杨东旭.帕隆藏布流域冰碛物斜坡结构及稳定性评价方法[J].人民长江,2019,50(1):108-112.
YANG Dong, WANG Junchao, YANG Dongxu. Moraine slope structure in Palongzangbu River basin and its stability evaluation method[J]. Yangtze River, 2019,50(1):108-112.
- [2] 李骅锦,冯文凯,许强,等.四川理县小枝村冰碛物角砾土抗剪强度特性研究[J].人民长江,2015,46(12):38-41.
LI Huajin, FENG Wenkai, XU Qiang, et al. Study on shear strength properties of moraine breccia soil at Xiaoqi village of Lixian county[J]. Yangtze River, 2015,46(12):38-41.
- [3] 冯俊德,李建国,汪稔.云南某铁路冰碛土大型直剪强度特性试

- 验研究[J].岩土力学,2008,29(12):3206-3210.
- FENG Junde, LI Jianguo, WANG Ren, et al. Large scale direct shear test on strength behavior of railway moraine soils in Yunnan [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29 (12) : 3206-3210.
- [4] 雷进生. 碎石土地基注浆加固力学行为研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- LEI Jinsheng. Research on mechanical behavior of grout in gravelly soil foundations [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2013.
- [5] 牛小玲, 程寅, 李霖, 等. 喀喇昆仑公路隧道洞顶松散崩塌积体注浆加固试验研究[J]. 公路, 2017(10):280-282.
- NIU Xiaoling, CHENG Yin, LI Lin, et al. Experimental research on grouting reinforcement of loose colluvial deposit on tunnel outlet of Karakoram highway [J]. Highway, 2017 (10) : 280-282.
- [6] 孙子正, 刘人太, 李术才, 等. 软流塑地层注浆加固作用量化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(S1):3386-3391.
- SUN Zizheng, LIU Rentai, LI Shucai, et al. Quantitative research on grouting reinforcement of soft fluid-plastic stratum [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016(S1): 3386-3391.
- [7] 杨树才, 杨旭, 程曦, 等. 软流塑淤泥质粉质黏土地层注浆加固试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(6):1284-1287.
- YANG Shucai, YANG Xu, CHENG Xi, et al. Experimental analysis of grouting consolidation in stratum of soft rheology-plastic sludge and powder clay [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(6):1284-1287.
- [8] 李术才, 刘人太, 张庆松, 等. 基于黏度时变性的C-S浆液扩散机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 12(12):2377-2396.
- LI Shucai, LIU Rentai, ZHANG Qingsong, et al. Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 12(12):2377-2396.
- [9] 周科峰, 李宇峙. 注浆加固对顺层边坡力学特征的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012(2):724-729.
- ZHOU Kefeng, LI Yuzhi. Influence of grouting on the mechanical characteristic of stratified rock slope [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012(2):724-729.
- [10] 王成华, 徐骏, 何思明, 等. 粒状碎屑溜砂坡树根桩固砂防护技术[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1):93-96.
- WANG Chenghua, XU Jun, HE Siming, et al. Consolidation techniques by micro-root pile [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1):93-96.
- [11] 路文琴, 周群华, 徐家智. 斜钢管注浆框架梁在路堤边坡变形加固中的应用[J]. 公路交通科技, 2017(5):44-49.
- LU Wenqin, ZHOU Qunhua, XU Jiazi. Application of grouted oblique steel pipe grid-work girder in embankment slope deformation reinforcements [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017(5):44-49.
- [12] 张家奇, 李术才, 张霄, 等. 一种新型综合注浆加固试验系统的研制及应用[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8):1268-1277.
- ZHANG Jiaqi, LI Shucai, ZHANG Xiao. Development and application of a new comprehensive grouting reinforcement test system [J]. Chinese Journal of Engineering, 2017, 39(8):1269-1277.
- [13] 张国信, 陈豫津, 王谦, 等. 边坡抗滑桩加固的三维有限元计算[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(9):81-89.
- ZHANG Guoxin, CHEN Yujin, WANG Qian, et al. 3D finite element computations for slope reinforcement with anti-slide piles [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9):81-89.
- [14] 王成华, 陈永波, 林立相. 抗滑桩间土拱力学特性与最大桩间距分析[J]. 山地学报, 2001, 19(6):556-559.
- WANG Chenghua, CHEN Yongbo, LIN Lixiang. Soil arch mechanical character and suitable space between one another anti-sliding pile [J]. Journal of Mountain Research, 2001, 19(6): 556-559.
- [15] 石胜伟, 梁炯, 韩新强. 微型组合抗滑桩距径比的模型试验[J]. 地质通报, 2013, 32(12):2008-2014.
- SHI Shengwei, LIANG Jiong, HAN Xinqiang. Model research on the distance-to-diameter ratio of the micro-piles composite structure [J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32 (12):2008-2014.
- [16] 王江荣, 刘硕, 蒲晓妮, 等. 地震工况下兰州南绕城高速公路路堑高边坡格构支护效果评价[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(10):53-60.
- WANG Jiangrong, LIU Shuo, PU Xiaoni, et al. Evaluation on the lattice support performance for the high cutting slope along Lanzhou South Ring Expressway under the earthquake condition [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10):53-60.

(编辑 荐华)