

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.01.19

不同加固技术在散粒体斜坡表层的应用对比研究

杨晴雯,裴向军,吴梦秋,常志璐

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川成都 610059)

摘要:散粒体斜坡多发育于我国西部山区,由块度不一、黏粒含量较少的碎砾石土组成,由于胶结性差,遇雨水冲刷、风吹或人畜踩踏易失稳。传统坡面防护技术包括拦挡锚固和土工材料与植被构筑,新型护坡技术是结合了岩土材料加固和生态环境两方面所提出的新方法。本文中该新技术是指将浓度1.3%的改性钠羧甲基纤维素与边坡表层土拌合,后掺入植物纤维,喷洒到坡表形成加固层;加固层表面喷洒草籽,以达到边坡防护的目的。文章选择传统的护坡方法(格构和三维网)和新型土壤改良方法结合植草绿化技术对室外某散粒体斜坡进行加固处理,以天然斜坡为参照,统计降雨冲刷和径流冲刷后边坡表面侵蚀破坏、入渗和植被破坏特征,对比不同护坡方式的应用效果。试验结果表明:每个斜坡辅之相同的植草条件下,对比降雨和放水冲刷试验后各边坡的侵蚀破坏特征可以发现,材料改良植草边坡侵蚀弱,产沙量小,作用层能减缓雨水下渗,提高植被存活率和降低植被倒伏率,其效果优于三维网植草护坡和格构植草护坡。

关键词:改性钠羧甲基纤维素;散粒体斜坡;坡面侵蚀;植草护坡;斜坡稳定性

中图分类号:P642.2

文献标识码:A

文章编号:1000-3665(2019)01-0139-09

Research on the effect of different reinforcement methods on the surface of a granular slope

YANG Qingwen, PEI Xiangjun, WU Mengqiu, CHANG Zhilu

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geo-environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Most of the granular slopes exist in western mountainous areas of China. Granular slopes, which are made up of different sizes of lumpiness and few clay particles, are easy to collapse because of weak cementation between particles, rain eroding & wind eroding or the people and animals' tread. Traditional technologies for slope protection contain frame and geo-grid with plants. A new method involves geotechnical materials and ecological environment and focuses on the surface protection of slope by using topsoil which is stabilized with 1.3% of the modified sodium carboxymethyl cellulose (M-CMC) as well as plant fiber. Two traditional methods (rhombic frame beams and geo-grid) and this new environmental method for soil modification are used to increase the stability of a granular slope in the field in this study and natural slopes are taken as references. The values of soil loss, moisture content and vegetation deterioration rate of slopes suffering from rainfall and runoff erosion are observed and collected. Under the same condition of vegetation, it is found that the sediment yield, erosion deformation, infiltration rate of moisture and lodging rate of slope stabilized by M-CMC are much less than those of natural slopes and slopes stabilized by frame beams and geo-

收稿日期:2018-04-24;修订日期:2018-09-20

基金项目:国家自然科学基金创新性研究群体(41521002);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队重点项目(SKLP2014Z00);新疆交通建设集团股份有限公司资助项目(2016010)

第一作者:杨晴雯(1991-),女,博士研究生,主要从事地质工程岩土体稳定性评价与防治方面的研究。

E-mail:yangqingwen1991@outlook.com

通讯作者:裴向军(1970-),男,教授,主要从事地质工程岩土体稳定性评价与防治研究与教学工作。E-mail:peixj0119@tom.com

grid. The value of these indexes of natural slopes is less than that of frame beams and geo-grid. As a result, the slope treated with M-CMC protection is better than that with geo-grid, frame beams and natural slope.

Keywords: modified sodium carboxymethyl cellulose; granular slope; surface erosion; vegetation protection; stability of slope

散粒体斜坡是重力堆积于坡脚、达到动态临界平衡的碎石堆。该类斜坡最大特点是自然休止角镶嵌堆积、结构松散和缺少胶结物,其堆积成因主要有地震、风化、人类活动等,广泛发育于高山峡谷区公路和河流沿线^[1],尤其在四川盆地向青藏高原过渡地带及新疆天山、昆仑山等高寒、干旱半干旱地区大量发育^[2]。在外界扰动下,如地震、降雨冲刷、风吹及人畜活动等,散粒体均可能发生大面积移动,掩埋道路甚至堵塞河床,造成极大经济损失。

国内外现有散粒体斜坡防治措施多以拦挡和锚固为主^[3];拦挡类被动防治,可能由于散粒体持续堆积造成的土压力增加或碎石越顶造成措施失效,因而主动防护稳固散粒体获得了越来越多的研究。常用的主动防护有格构^[4],格构锚杆(索)穿过滑动面使锚固段位于稳定可靠地层中^[5],达到护坡的效果。

从20世纪30年代开始国内外进行植物与护坡构筑物或土工材料配合的坡面防护技术,如绿化墙、框格绿化法、土工网袋、植被型生态混凝土等的大量试验和理论研究^[6-7],并应用于大规模公路生物工程建设。研究表明植物对土体的水力学作用^[8],植物根系对土体的加筋作用^[9]、深根锚固作用^[10-12],茎叶减少坡面径流作用^[13]使得绿化护坡得以实施。吴淑安等^[14]以溅蚀量、贯入深度和崩解程度指标来反映土壤抗蚀性,通过试验发现具有植物根系的土壤崩解速率远比无根系或缺少根系的土壤崩解速率慢;蔡强国等^[15]将植物护坡的原因归结于植被能增加覆盖,减缓坡度,减小水流的泥沙携带能力。

现如今,使用环保土壤加固材料对表层土性能进行改良的研究也在发展,如采用改性聚乙烯醇(SH)^[16]、聚醋酸乙酯(STW)^[17]、高模数硅酸钾(PS)^[18]、沙嵩胶^[19]等对沙土、黄土、粉土和普通壤土中的一种或多种的力学和理化性能进行改善。但以上方法用于块石粒径较大、黏粒含量较低的散粒体斜坡的尝试还较少。钠羧甲基纤维素(CMC)是一种天然有机物,溶于水且具有黏度高、稳定性好、胶结力强的特点,多用于农田土壤改良^[20]、河岸边坡防护^[21]。李元元等^[22]利用风洞试验发现聚丙烯酰胺(PAM)防治沙黄土表面风蚀的效果较好,而CMC在防治风积沙风

蚀效果较好。此外,Abu-Zreig^[23]研究发现PAM还能有效控制坡面径流冲刷和水土流失。成都理工大学自主改良研发了一种有机环保聚合混合物——改性钠羧甲基纤维素(M-CMC),其可溶于水,溶液有黏性,无色无味。由于聚合物分子量大,吸附作用强;分子链上携带大量亲水基团羧甲基($-\text{CH}_2\text{COON}_a$)使其易溶于水,形成水凝胶。试验发现^[24],M-CMC与砂土混合后,土壤强度和防渗性能都得到明显改良,且随材料掺量增加,强度增加,渗透系数(K)减小。材料掺量为0.325%(材料粉末与干土质量百分比)时,土体内摩擦角和渗透系数达到最优值 46° 和 $2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,强度相比未加固土增长了近1倍,渗透系数为未加固土的1/10。此外,加固土也表现出良好的抗崩解性和吸水持水性,用于边坡表层具有较好的抗冲蚀效果。材料已在我国西北多个沙土、粉土质边坡中成功应用,护坡效果明显。

因此,本文选择了传统的菱形格构生态护坡和三维网生态护坡技术和新型土壤改良材料生态加固技术,对四川理县某散粒体斜坡进行加固处理,并辅之生态植草。通过模拟降雨冲刷,研究不同护坡技术对散粒体斜坡的防护效果。

1 试验设计方案

1.1 试验区概况

四川省阿坝藏族羌族自治州位于龙门山构造带高山峡谷区,降雨较充沛,集中在5—9月,年均降雨量达610 mm。受2008年“5.12”汶川地震影响,区内形成大量散粒体斜坡。试验场地位于州内理县境内,杂谷脑河左岸某散粒体斜坡中部。斜坡宽约50 m,长约35 m,坡度约 30° ,有少量稀疏杂草覆盖,斜坡表层没有明显冲沟,左侧有一条开挖的排水通道(图1)。试验区为宽约20 m,长约10 m的矩形,均分为四块(图1)。斜坡基岩为板岩,坡脚露头揭示地震前散粒堆积层粒径均质堆积,地震后散粒体分层堆积明显(图2);震后粒径大于震前,新堆积层结构更松散,雨季受降雨冲刷和上升河水浸泡,发生局部溜滑。

1.2 边坡模型试验所用土质

试验区天然碎石土碎石含量大于30%,大块石会

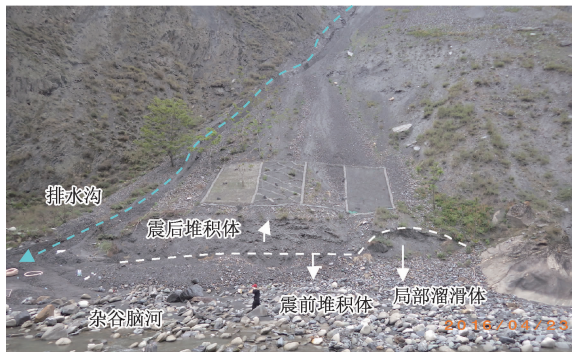


图1 试验区全貌图

Fig. 1 A close-up view of the study area

妨碍 M-CMC 材料与土的搅拌,阻碍土壤向三维网垫中填充,因此,试验所用土均是将天然碎石土统一过孔径 0.05 m 筛,天然密度为 $1.4 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,天然含水率约 5% (图 2)。

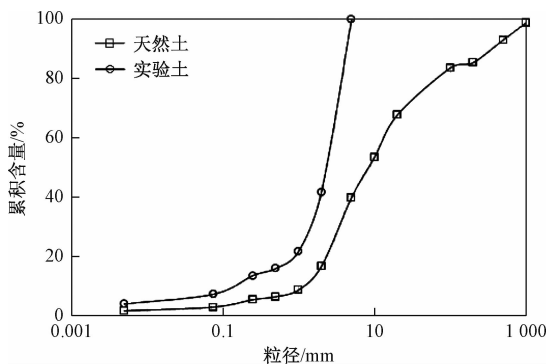


图2 散粒体筛分曲线

Fig. 2 Sieving curve of granular soil

1.3 加固措施设计

首先对试验区进行平整,处理后坡度约为 28° 。将试验区划为 $10 \text{ m} \times 4.5 \text{ m}$ (长 \times 宽) 的四个区,从左向右分别为 M-CMC 材料护坡区 (A 区),格构护坡区 (B 区),天然坡 (C 区)、三维网护坡区 (D 区)。在 A、B 和 D 方式材料预算相同时,各方案技术要求及施工方法如下:

A 区:材料包括 M-CMC 溶液与椰纤维。植物纤维可以提高土壤抗拉强度,减缓大面积处理中表层土失水开裂^[25]。具体步骤是将 M-CMC 溶液、植物纤维与试验用土均匀混合,形成“加固土浆”,铺于坡表,表层播撒草籽后抹平,设计加固土厚度为 0.15 m。加固土中 M-CMC: 土粒 (散粒体): 水为 0.325: 100: 25; 植物纤维长度 1 ~ 3 mm,直径 0.5 ~ 1 mm,掺量为 0.5% (与干土的质量百分比)。

B 区:采用菱形格构形式,无锚杆。首先用 C325

水泥加河沙制成混凝土料,而后将混凝土料浇注成梁并嵌置于试验区边坡中形成格构网。格构梁断面宽 0.2 m,断面高 0.2 m,格构间距为 1.5 m。试验用土混合草籽加水拌合后填充在格构间。

C 区:天然斜坡仅需在坡表播撒混合草籽 (草籽提前与干燥的沙子混合便于播撒),表面洒水养护。

D 区:三维网采用的是合成物 - 聚酯土工格栅,韧性强,孔隙度达 90%,孔隙中可充填土壤、沙砾和细石,促进植物根系生长^[26]。网垫铺设前先整平坡表以保证三维网垫,紧贴坡面,每隔 0.5 m 设置一行 U 型锚钉。固定好网垫后,单位面积均匀覆土 (试验用土),充满网垫后压实清除浮土。

各试验小区草籽均为紫花苜蓿、高原茅和多花木兰的混合草种,其主要特点为发芽时间短、抗寒耐旱、根茎粗壮,可作牲畜牧草;四个试验场地草籽播撒密度相同,为 30 g/m^2 。

从边坡处理结束至冲刷试验前是边坡稳定期和草籽生长期,该阶段为 60 d。

1.4 试验方案及测试指标

研究 M-CMC 加固、三维网、格构、天然边坡在有雨滴作用和无雨滴作用下的土壤侵蚀特征,需考虑雨滴对地表的打击的人工降雨方式和不考虑雨滴打击作用的放水冲刷方式。各个区域依次进行降雨冲刷,然后依次进行放水冲刷,各个区域的雨量和放水量完全相等。

(1)冲刷试验装置由抽水泵、流量计、水管、喷头 (仅降雨中使用) 组成 (图 3),水箱 (放水冲刷中使用),水箱中水头恒定^[27],水源来自杂谷脑河。现场首先进行的是降雨冲刷试验,设计雨强为 0.2 mm/min ,降雨持续 150 min;放水冲刷设计流量为 45 L/min ,持续时间 30 min,降雨量 30 mm。

(2)试验区域中部不同埋深 (表面以下 0.05 m 和表面以下 0.15 m——加固层与天然层分界处) 埋设水分传感器,监测降雨和放水冲刷过程中,土壤含水率 (W) 变化;坡脚修建泥沙收集槽,间隔 5 min 测算产砂量 (Q),高清摄像机实时拍摄试验区侵蚀变化。

(3)统计冲刷试验前后植被覆盖率 (S_1),测算冲刷后植被倒伏率 (S_2)。

2 坡面冲刷试验结果对比分析

2.1 坡面水土流失特征

图 4(a) 和 (b) 分别是降雨冲刷和放水冲刷后加

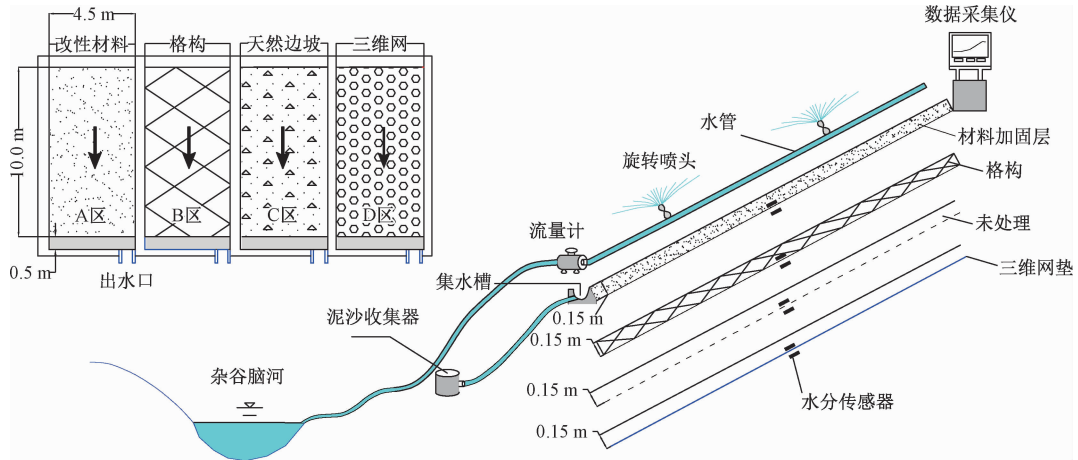


图3 冲刷试验装置

Fig. 3 Apparatus of the erosion test

固边坡表层冲蚀特性。降雨试验后,M-CMC 加固边坡坡面几乎没有冲蚀痕迹,雨水前期以下渗作用为主,后期以表面径流冲刷为主,集水槽中水质较清澈,含沙量低,无粗粒块石;格构加固区冲沟发育不明显,但表面侵蚀较严重,大量泥沙块石分散在格构马道上;而天然边坡上部区域大块石多,雨水下渗快,下部区域常年生植被发育,冲刷不显著,雨水主要沿坡面对角方向冲刷;三维网加固区雨水以下渗为主,表面冲刷较弱。降雨后期天然边坡、格构加固区及三维网加固区前缘坡脚有水流渗出,掏蚀坡脚。

放水冲刷后 M-CMC 加固区水流侵蚀不明显,但由于径流量增加,集水槽水流溢出冲刷坡脚;格构加固区和三维网加固区侵蚀、搬运加剧,其中格构梁埋设处冲刷掏蚀尤其严重(图 4b),格构梁底部“架空”;三维网加固区表层土流失严重,绿色网垫裸露(4b);天然边坡冲沟加宽加深。

降雨冲刷和放水冲刷试验结束后各区域坡脚集水槽中产沙量随降雨时间的变化见图 5~6。M-CMC 加固区不管是降雨冲刷还是放水冲刷过程中产沙量都近乎为 0,表现出很好的防冲效果。而格构加固和三维网加固不管在降雨冲刷还是放水冲刷中产沙量均大于天然边坡产沙量:降雨结束后最终产沙量较小,不超过 0.5 kg;放水冲刷产沙量直线攀升,总量大于 15 kg。降雨冲刷时格构加固区产沙量大于三维网加固区;而放水冲刷时 22 min 前格构区产沙量先低于三维网区,但最终产沙量仍大于三维网区。对于散粒体斜坡,长时间普通降雨条件下,雨强稍大于雨水下渗速度,表面冲刷侵蚀较弱,侵蚀量较小;而短时强降雨时,雨强远大于雨水下渗速度,表面径流增多,冲刷加强,侵蚀量



(a) 降雨冲刷后边坡现状



(b) 放水冲刷中边坡现状

图4 冲刷试验结果

Fig. 4 Final picture of the erosion test

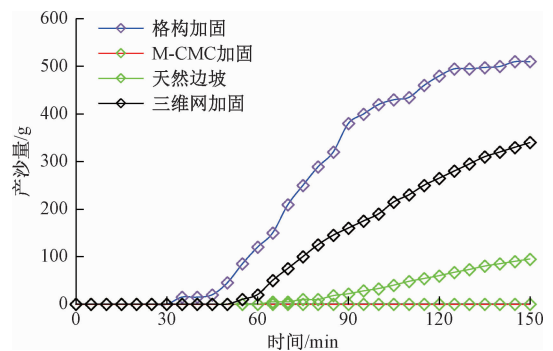


图5 降雨冲刷产沙量随时间变化

Fig. 5 Soil loss by rainfall with time

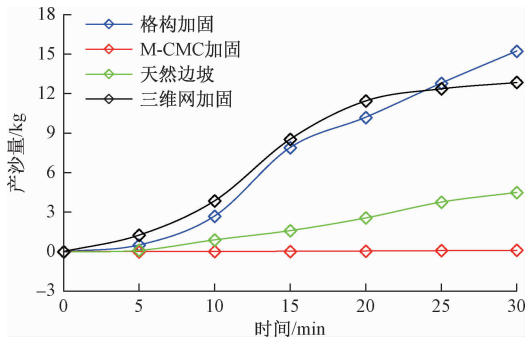


图 6 放水冲刷产沙量随时间变化

Fig. 6 Soil loss by flow eroding with time

就会增大。

2.2 水流入渗特征

对比图 4(a) 和 (b) 可知, 散粒体斜坡普通降雨很难形成径流, 主要以下渗为主, 而强径流冲刷作用下才会出现明显土壤流失。长期降雨及放水冲刷过程后, 格构加固区、三维网加固区和自然区坡脚断面上会有水流渗出, 掏蚀坡脚; 而 M-CMC 材料加固层未显示出明显的渗出特性。

含水率表征了土层的渗透特性和持水性, 浅层含水率变化越小 (图 7a), 深层含水量增长越快 (图 7b), 表明雨水下渗越快, 土壤持水性越低; 反之, 浅层含水率变化越大, 深层含水率增加越慢, 表明土壤下渗较慢, 土壤持水性越高。图 7 中 M-CMC 加固和三维网加固位于主坐标轴, 天然斜坡和格构加固位于次坐标轴。

图 7(a) 显示未经处理的天然试验区降雨 2 min 后浅层含水率快速增加至 7%, 后基本保持不变, 而深层含水量在降雨 4 min 后快速增加至 10%, 降雨 4 ~ 70 min 波动变化后达到稳定含水率 13%。70 min 后深层含水率不再变化, 浅层渗流通道完全打开达到稳定, 表明天然散粒体斜坡表层土层结构疏松, 透水性强, 雨水下渗量大; 而深层相对密实, 具有一定持水性, 也表明当雨水下渗量达到土壤最大持水能力后继续降雨便不会引起含水量变化, 而是沿前缘渗出。

格构加固试验区浅层和深层含水率变化基本一致, 而深层含水率变化滞后于浅层。降雨初期 (约第 12 ~ 15 分钟内) 浅层和深层含水率缓慢增长致 5%, 而后 (第 17 ~ 22 分钟内) 浅层和深层含水率分别快速增长至 18% (浅层) 和 22% (深层), 在第 22 ~ 37 分钟含水率维持不变, 而后快速下降至 10% (浅层) 和 7% (深层), 不断循环反复。且该区深层含水率在 90 min 后达到稳定, 说明浅层到深层的入渗通道此时完全连

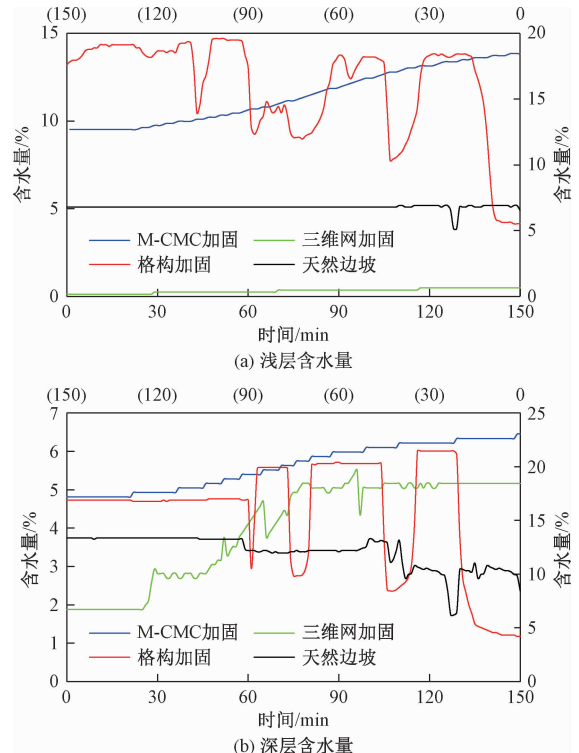


图 7 降雨冲刷作用下各边坡不同深度含水量变化

Fig. 7 Effect of eroding time on change in moisture content of different slopes

通。浅层含水率极大值基本不变, 深层含水率极大值不断减小。从加固结构分析, 格构区含水率变化与格构梁分布阻挡有很大关系。格构加固需要将纵横交错的格构梁埋于散粒体内部以稳定坡体物质, 横梁隔断水流渗流通道。雨水下渗使得土壤含水率增加, 当水流穿越格构横梁后含水率降低。

三维网加固区土壤含水率变化特征与天然斜坡最为相似, 不同的是浅层和深层含水率均低于天然区。主要原因为: 三维网浅层传感器位于回填堆积体内, 回填物结构较松散, 透水性好; 而深层传感器位于原始边坡的表层, 土层相对致密; 故三维网深层土最终含水率与天然土浅层含水率相近。而 90 min 后深层含水率几乎稳定, 此时从浅层到深层的渗流通道完全打开并达到稳定。

材料加固区浅层和深层含水率均随降雨时间的增加而缓慢均匀增加, 未出现如格构和三维网加固区的波动变化。降雨结束后浅层含水率增加约 4.5%, 达到 13%, 深层增长约 1.5%, 达到 6.5%。且该区浅层土壤含水率始终大于深层, 表明 M-CMC 加固层土壤渗透性明显降低, 雨水下渗作用减弱, 而持水能力增强。

此外,通过比较发现:天然边坡深层含水率最快达到稳定,其次是格构加固区和三维网加固区,最晚为M-CMC加固区,可推知天然边坡土渗透性大于格构和三维网加固土,大于M-CMC加固土。从各试验段初始含水量(图8)可以看出,M-CMC加固区表层含水率高于其他区,也表明了M-CMC加固土持水性较好;浅层土持水性增强,有助于减缓深层含水率的增加,进一步减弱水流深部渗流。

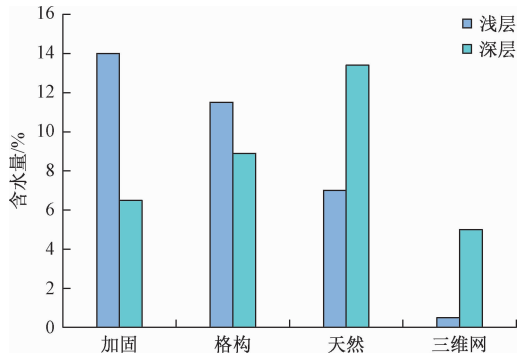


图8 试验后各边坡最终含水量

Fig.8 Final moisture content of different slopes

放水冲刷过程中水土流失较大,格构区、天然边坡及三维网区埋置的大量传感器被冲出,数据采集不完整,故未进行讨论。

2.3 植被破坏特征对比分析

降雨冲刷试验后各加固区坡面侵蚀搬运较轻微,故植被破坏率也较低,而放水冲刷试验前后植被破坏增加(图9)。冲刷试验前材料加固区植被密度明显大于其余三个区,格构防护区和三维网防护区相近,均大于天然边坡。

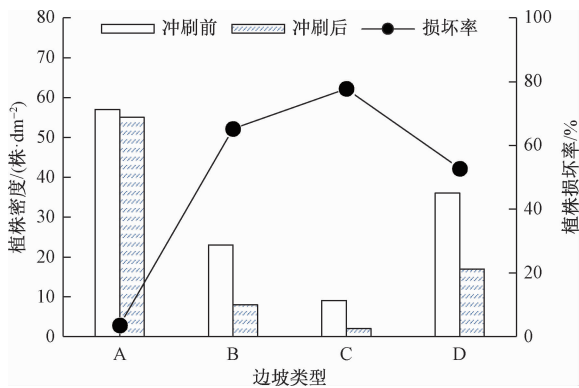


图9 冲刷前后植被生长密度及倒伏率

Fig.9 Density and lodging rate of vegetation growth

冲刷试验后,M-CMC加固边坡(A区)侵蚀轻微,植物基本无倒伏(图10a);另两种加固边坡侵蚀严重,植被根系裸露,植株残留在坡表(图10b)。

格构加固区植被倒伏率约65%,三维网加固区植被倒伏率约52%。各加固区植被存活率与坡面抗冲刷侵蚀相一致,说明土壤抗冲刷性对初期植被生长影响较大。



(a) 材料加固



(b) 三维网加固

图10 试验后坡表植被状态

Fig.10 Current vegetation situation at the end of test

3 加固边坡作用机制对比分析

长期一般降雨和短期大暴雨条件下,M-CMC加固区表现出较好的抗冲刷性,格构加固区及三维网加固区相对来说土壤搬运更明显,而天然边坡由于现场有利条件(原生植被)限制,表现出较小的侵蚀、搬运。植被根系对于散粒体斜坡抗冲刷侵蚀具有较好的改善作用。

从加固机理看,M-CMC从散粒体自身性质着手,增加颗粒间胶结作用,提高土壤内摩擦角和黏聚力^[23],改善散粒体自身因缺乏细粒组分和胶结矿物而结构松散,应用于坡表,提高斜坡表层抗冲刷能力。此外,土壤渗透性降低,持水性增强,能减缓水流入渗,提高斜坡降雨工况下的稳定性。表层土抗侵蚀性能增强利于植被生长。

格构加固边坡主要是格构梁在边坡岩土体产生相对位移时发挥摩擦阻力作用^[5],而水流冲刷时格构梁也能形成阶梯降低水流梯度,减缓冲刷。一般降雨时,雨水能缓慢入渗,表面的径流冲刷较弱;但集中强降雨

过程中,雨水下渗增加,超过土壤通道容量,表面径流增强,侵蚀加剧,植被冲刷破坏严重,存活率低,将会影响后期植草护坡。

天然边坡是表层原生植被减缓雨水击打及雨水入渗,降低坡面径流,根系与土壤相互交织形成网状结构,增强土壤抗冲性能。但由于散粒体颗粒级配不均,天然植被发育不均且较少,植草护坡作用受限。

三维网加固边坡是网垫的上下层面与土体相互作用,产生的摩擦能提高坡面的稳定性,且网垫面上的凹凸起伏也能降低坡面流能量,减轻坡面侵蚀^[25]。一般降雨时,虽然由于三维网垫几乎未出露在坡面上,坡面流所受的阻力较小,有较多的能量用于侵蚀、搬运坡面土体,但由于散粒体碎石、粗砾石较多,胶结性差,颗粒排列疏松,雨水下渗快,故表面冲刷产沙量较低。但随着冲刷流量增加,网垫外的土随着坡面流冲刷的进行被搬运,导致网垫层裸露,坡面流阻力增加,侵蚀减弱,产沙量降低。由于网垫层的保护,土壤侵蚀、搬运低于格构加固区,同时植被冲刷破坏程度低于格构加固区,可以提高后期植草护坡效果。

综上所述,采用提高土体胶结作用降低雨水入渗的方式(M-CMC加固)和降低坡面流能量、增强坡面阻力(三维网加固)的方式能较好地减缓坡面侵蚀和泥沙搬运,结合植草护坡可以达到长期稳定的效果。

由于M-CMC材料是一种有机水溶液,主要通过高分子与土颗粒间的电荷吸附和分子间作用力实现土壤胶结,起到防渗防冲蚀的效果,促进表层植被生长,有利于边坡自我修复和长期防护。如果土壤中以大块石为主,细粒含量较少,孔隙增大,则材料与土壤间作用会减弱,土壤与材料间胶结作用减弱,土壤防渗性和水稳性均得不到有效改良,雨水大量下渗影响边坡稳定性和表层植被生长。因此,该加固方式应用前,需提前了解碎石土级配,小范围检测应用效果。如果确实因大块石的存在产生了不利效果,可以多种方式相结合的方式对边坡加固。比如下层天然碎石土采用注浆加固,表层土过筛后使用M-CMC材料加固;或是下层天然碎石土采用三维网加固,表层过筛土使用M-CMC材料加固;将大块石的影响削弱,从而实现边坡的整体加固。

4 结论

(1)M-CMC材料加固散粒土在水流冲蚀作用下流失少,抗侵蚀效果更好,土壤蓄水能力增强,植被自然生长密度和冲刷后存活率大于其他区域,显示良好

的胶结结构和生态适宜性。植被的加筋防冲刷和水力作用能增强边坡稳定性,因此M-CMC材料加固边坡后期护坡作用将极大可能优于三维网加固边坡和格构加固边坡。

(2)三维网护坡由于填充土自身结构松散,胶结差,冲刷前期抗侵蚀性能差;三维网网垫能改变水流流动方向,削减坡面流能力,后期防冲性能较好。

(3)格构梁能减缓水流流速,减少表面冲刷。但格构护坡由于表面开放,强冲刷下抗侵蚀性差。

参考文献:

- [1] 卜祥航,傅荣华,李宁,等.散粒体斜坡注浆固坡工程防治技术实验研究[J].工程地质学报,2015,23(3):415-419.[PU X H, FU R H, LI N, et al. Physical model tests on the grouting sand consolidation engineering for slope with granular mixtures [J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(3): 415-419. (in Chinese)]
- [2] 张元才,黄润秋,傅荣华,等.溜砂坡大规模失稳动力学机制试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):65-72.[ZHANG Y C, HUANG R Q, FU R H, et al. Experimental research on dynamic failure mechanism of large-scale talus slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(1): 65-72. (in Chinese)]
- [3] 马刚,周伟,常晓林,等.锚杆加固散粒体的作用机制研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(8):1577-1584.[MA G, ZHOU W, CHANG X L, et al. Study of anchorage mechanism of granular mixture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(8): 1577-1584. (in Chinese)]
- [4] 朱大鹏,晏鄂川,宋琨.格构梁与边坡岩体相互作用机制及现场试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(增刊1):2947-2953.[ZHU D P, YAN E C, SONG K. Research on interaction mechanism between lattice beam and slope rock mass and field test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Sup1): 947-2. (in Chinese)]
- [5] 吴礼舟,胡瑞林,黄润秋,等.护坡格构与坡面相互作用的研究[J].工程地质学报,2005,13(2):275-279.[WU L Z, HU R L, HUANG R Q, et al. Frictional resistance influence on internal force of frame beams used in roadcut slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 275-279. (in Chinese)]
- [6] 张霄,张红玉,陆兆华,等.高寒地区路堑边坡植被恢复效果[J].生态学报,2017,37(5):1450-

1457. [ZHANG X, ZHANG H Y, LU Z H, *et al.* Vegetation restoration effects of rock cutting slopes in the cold region of China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(5):1450-1457. (in Chinese)]
- [7] 仓田益二郎. 绿化工程技术[M]. 成都:四川科学技术出版社,1989:25-28.
- [8] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1):1-47. [WU H W. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1):1-47. (in Chinese)]
- [9] 王桂尧, 胡圣辉, 张永杰, 等. 小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(6):64-69. [WANG G Y, HU S H, ZHANG Y J, *et al.* An outdoor drawing test study of the root soil interaction force for a small tree root system [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2017, 44(6): 64-69. (in Chinese)]
- [10] ÁLVAREZ-MOZOS J, ABAD E, GOÑI M, *et al.* Evaluation of erosion control geotextiles on steep slopes. Part 2: Influence on the establishment and growth of vegetation[J]. *Catena*, 2014, 121: 195-203.
- [12] 李国荣, 胡夏嵩, 毛小青, 等. 寒旱环境黄土区灌木根系护坡力学效应研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 94-97. [LI G R, HU X S, MAO X Q, *et al.* A study of the mechanical effects of shrub roots for slope protection in frigid and arid-semiarid loess area [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2008, 35(1): 94-97. (in Chinese)]
- [12] 胡夏嵩, 陈桂琛, 周国英, 等. 青藏铁路沱沱河段路基边坡植物护坡根系力学强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 107-113. [HU X S, CHEN G C, ZHOU G Y, *et al.* A study of the mechanic strength of vegetation roots for road bed slope protection in the Tuotuohe river region along the Qinghai-Tibet railway [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2012, 39(1): 107-113. (in Chinese)]
- [13] 李勉, 姚文艺, 陈江南, 等. 草被覆盖下坡面一沟坡系统坡面流阻力变化特征试验研究[J]. 水利学报, 2007, 38(1): 112-119. [LI M, YAO W Y, CHEN J G, *et al.* Experimental study on runoff resistance of hilly slope-gullied surface with grass coverage [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2007, 38(1): 112-119. (in Chinese)]
- [14] 吴淑安, 蔡强国. 土壤表土中植物根系影响及其抗蚀性的模拟降雨试验研究-以张家口试验区为例[J]. 干旱区资源与环境, 1999, 13(3): 35-40. [WU S A, CAI Q G. Experimental study on influences of plant roots with in soil on soil erosion resistance-with an example, Zhangjiakou small experimental area [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 1999, 13(3): 35-40. (in Chinese)]
- [15] 蔡强国, 黎四龙. 植物篱笆减少侵蚀的原因分析[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(2): 54-60. [CAI Q G, LI S L. Effect of contour hedgerows on control of soil erosion[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1998, 4(2): 54-60. (in Chinese)]
- [16] 谏文武, 张起勇, 刘宏伟, 等. 高分子材料SH渗透加固遗址土的效果研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(5):1307-1313. [CHEN W W, ZHANG Q Y, LIU H W, *et al.* Reinforcing effect of relic soil sites penetrated with high polymer material sh [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(5): 1307-1313. (in Chinese)]
- [17] 刘瑾, 施斌, 姜洪涛, 等. STW型高分子土壤稳定剂改良粘性土团聚体水稳性实验研究[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(2): 77-80. [LIU J, SHI B, JIANG H T, *et al.* Research on the calculation of stochastic m-method of the anti-slide pile with the excavation of front soil [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(2): 77-80. (in Chinese)]
- [18] 赵海英, 王旭东, 李最雄, 等. PS材料模数、浓度对干旱区土建筑遗址加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 557-562. [ZHAO H Y, WANG X D, LI Z X, *et al.* Impact of modulus and concentration of potassium silicate material on consolidating earthen architecture sites in arid region [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(3): 557-562. (in Chinese)]
- [19] 刘军, 孙延菲, 王莉, 等. 不同喷洒浓度沙蒿胶固沙效果试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 149-155. [LIU J, ZHANG Y F, WANG L, *et al.* Sand fixation experiment of *Artemisia sphaerocephala* Krasch. gum with different concentrations [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(5): 149-155. (in Chinese)]
- [20] 吴军虎, 陶汪海, 王海洋, 等. 羧甲基纤维素钠对土壤团粒结构及水分运动特性的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 117-123. [WU J H, TAO W H, WANG H Y, *et al.* Influence of sodium carboxyl methyl cellulose on soil aggregate structure and soil water movement [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 117-123. (in Chinese)]
- [21] 岳桓陞, 杨建英, 杨阳, 等. 不同降雨强度条件下植被毯护坡技术的产流特性[J]. 中国水土保持科

- 学. 2015, 13(1): 35 - 41. [YUE H B, YANG J Y, YANG Y, et al. Runoff producing characteristics of vegetation carpet greening technology at different rainfall intensities [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(1): 35 - 41. (in Chinese)]
- [22] 李元元, 王占礼. 高分子多肽衍生物防治风蚀的风洞试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 149 - 155. [LI Y Y, WANG Z L. Wind tunnel experiment on polypeptide derivatives in controlling wind erosion [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(5): 149 - 155. (in Chinese)]
- [23] ABU-ZREIG, M. Control of rainfall-Induced soil erosion with various types of polyacrylamide[J]. Journal of Soils and Sediments, 2006, 6(3): 137 - 144.
- [24] 裴向军, 杨晴雯, 许强, 等. 改性钠羧甲基纤维素胶结固化土质边坡机理与抗冲刷特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2316 - 2327. [PEI X J, YANG Q W, XU Q, et al. Research on glue reinforcement mechanism and scouring resistant properties of soil slopes by modified carboxymethyl cellulose [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2316 - 2327. (in Chinese)]
- [25] 常志璐, 裴向军, 吴梦秋, 等. 植物纤维加筋固化土抗压强度和渗透试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 912 - 919. [CHANG Z L, PEI X J, WU M Q, et al. Experimental study on compressive strength and per-meability of soil solidified with coconut-fiber and double polyethylene material [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 912 - 919. (in Chinese)]
- [26] 王广月, 王艳, 徐妮. 三维土工网防护边坡侵蚀特性的试验研究[J]. 水土保持研究, 2017, 24(1): 79 - 83. [WANG G Y, WANG Y, XU N. Test and study on erosion characteristics of 3D geonet protection slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 24(1): 79 - 83. (in Chinese)]
- [27] 王爱娟, 丁文峰, 王万君. 人工降雨和放水冲刷条件下紫色土坡面产流产沙特征分析[J]. 长江科学院院报, 2015, 10(3): 31 - 34. [WANG A J, DING W F, WANG W J. Characteristics of runoff and sediment yield of purple soil slope surface in the presence of artificial rainfall and scouring[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 10(3): 31 - 34 (in Chinese)]
- 编辑: 汪美华
-
- (上接第 138 页)
- [25] 殷跃平, 李滨, 王文沛, 等. 深圳“12·20”渣土场灾难滑坡成灾机理与岩土工程风险控制研究[J]. Engineering, 2016, 2(2): 176 - 216. [YIN Y P, LI B, WANG W P, et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization[J]. Engineering, 2016, 2(2): 176 - 216. (in Chinese)]
- [26] 刘传正. 深圳红坳弃土场滑坡灾难成因分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 1 - 5. [LIU C Z. Genetic mechanism of landslide tragedy happened in Hong ao dumping place in Shenzhen, China[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 1 - 5. (in Chinese)]
- [27] PENG R, HOU Y, ZHAN L, et al. Back-analyses of landfill instability induced by high water level: Case study of shenzhen landfill [J]. International journal of environmental research and public health, 2016, 13(1): 126.
- [28] ZHAN L, ZHANG Z, CHEN Y, et al. The 2015 Shenzhen catastrophic landslide in a construction waste dump: Reconstitution of dump structure and failure mechanisms via geotechnical investigations [J]. Engineering Geology, 2018, doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.02.019.
- [29] BENZ W. Smooth particle hydrodynamics; a review //The numerical modelling of nonlinear stellar pulsations. Springer Netherlands, 1990: 269 - 288.
- [30] HUANG Y, ZHU C. Simulation of flow slides in municipal solid waste dumps using a modified MPS method [J]. Natural hazards, 2014, 74(2): 491 - 508.
- [31] HUNGR O, EVANS S G. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides. Trondheim, Norway, 1996: 233 - 238.
- [32] YIN Y, CHENG Y, LIANG J, et al. Heavy-rainfall-induced catastrophic rockslide-debris flow at Sanxicun, Dujiangyan, after the Wenchuan Ms 8.0 earthquake[J]. Landslides, 2016, 13(1): 9 - 23.
- [33] XING A, YUAN X, XU Q, et al. Characteristics and numerical runout modelling of a catastrophic rock avalanche triggered by the Wenchuan earthquake in the Wenjia valley, Mianzhu, Sichuan, China[J]. Landslides, 2016: 1 - 16.
- 编辑: 汪美华