

网络出版时间:2013-06-20 15:47

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20130620.1547.018.html>

不同结构土壤固化剂集流面的力学与集流性能研究

樊恒辉^{1,2}, 高建恩^{1,2}, 吴普特^{1,2}, 杨世伟^{1,2}

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100)

[摘要] **【目的】**研究不同结构对土壤固化剂集流面的抗压强度、吸水性和集流效率的影响,为土壤固化剂在雨水集蓄工程中的推广应用提供指导。**【方法】**在雨水集蓄工程示范的基础上,针对土壤固化剂集流面的不同施工工艺,采用抗压强度、吸水率和集流效率试验,对不同结构土壤固化剂集流面的力学与集流性能进行研究。**【结果】**结构 3(10 cm 6% 固化土基层+5 cm 土壤固化剂混凝土)集流面的吸水率和集流效率与结构 8(15 cm 水泥混凝土)集流面的相近,但其抗压强度最高;结构 1(15 cm 12% 干性固化土+固化剂浆液罩面)与结构 2(15 cm 18% 塑性纤维固化土+固化剂浆液罩面)集流面的表面处理一样,故其集流效率也相近,但是前者的抗压强度高于后者,吸水率低于后者;结构 6(15 cm 12% 干性水泥土+固化剂浆液罩面)集流面表面由于采用固化剂浆液进行收光处理,所以表面抗压强度和集流效率均高于结构 7(15 cm 12% 干性水泥土)集流面;结构 5(表层掺粒径 4~8 mm 碎石+15 cm 12% 干性固化土)集流面的抗压强度比仅由单纯的固化土构成的集流面高,但是集流效率却有所降低;结构 4(40 cm×40 cm×5 cm 12% 砌块固化土)集流面抗压强度较高,但是由于砌块之间有施工缝隙,集流效率最低。**【结论】**干性固化土的抗压强度高于塑性固化土;土壤固化剂集流面表面采用固化剂浆液进行收光处理,或在固化土基础上铺设一定厚度的土壤固化剂混凝土面层,不仅可增强抗压强度,提高集流效率,而且能够延长集流面的使用寿命。

[关键词] 土壤固化剂;集流面;抗压强度;吸水率;集流效率

[中图分类号] TU472.5

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2013)07-0224-05

Mechanical and rainwater harvesting properties of catchments with different structures and soil stabilizers

FAN Heng-hui^{1,2}, GAO Jian-en^{1,2}, WU Pu-te^{1,2}, YANG Shi-wei^{1,2}

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University,

Yangling, Shaanxi 712100, China; 2 Research Centre of Soil and Water Conservation & Eco-environment,

Chinese Academy of Sciences and Education Ministry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】**The aim was to study the influence of different structures and soil stabilizers on mechanical and rainwater harvesting properties of catchments and improve the utilization of soil stabilizers in rainwater harvesting. **【Method】**Using the tests of the compressive strength, water absorption and rainwater harvesting efficiency, the mechanical and harvesting properties of catchments with different structures and soil stabilizers were studied. **【Result】**The results showed that the structure No. 3(10 cm 6% stabilized soil basements+5 cm concrete surface with soil stabilizer) had the similar rainwater harvesting efficiency as No. 8(15 cm concrete with cement), but the former had the maximum compressive strength. The structures No. 1(15 cm 12% dry stabilized soil+surface covered with slurry of soil stabilizer) and No. 2(15

* [收稿日期] 2012-10-16

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑计划项目(2011BAD31B05);西北农林科技大学国际科技合作基金项目

[作者简介] 樊恒辉(1973—),男,山西夏县人,副研究员,博士,主要从事特殊土的工程性质及其化学加固技术研究。

E-mail: yt07@nwsuaf.edu.cn

cm 18% plastic stabilized soil including fiber+surface covered with slurry of soil stabilizer) had similar treatments on surface, and similar rainwater harvesting efficiencies, but the former had the stronger strength and less water absorption. Because the surface of the structure No. 6(15 cm 12% dry cemented soil+surface covered with slurry of soil stabilizer) had been treated with slurry of soil stabilizer, its compressive strength and rainwater harvesting efficiency were higher than the structure No. 7(15 cm 12% dry cemented soil). Comparing with catchments made of only stabilized soil, the structure No. 5(surface mixed size 4—8 mm gravel+15 cm 12% dry cemented soil) had higher compressive strength and less rainwater harvesting efficiency. The structure No. 4(40 cm×40 cm×5 cm 12% brick of stabilized soil) had higher compressive strength, but the rainwater harvesting efficiency was the lowest among those different catchments due to the construction crack. 【Conclusion】 This study indicated that the compressive strength of dry stabilized soil was higher than plastic. Covering surface with the slurry or a certain concrete of soil stabilizer improved the compressive strength, increase rainwater harvesting efficiency and prolong the service life of the catchments.

Key words: soil stabilizer; catchments; compressive strength; water absorption; rainwater harvesting efficiency

雨水集蓄利用技术是解决黄土高原地区水资源短缺的重要途径,收集系统为其中的关键部分,直接影响整个系统功能的发挥^[1-2]。土壤固化剂集流面是近年来出现的一种新型集雨技术,其采用土壤固化剂、土(或砂石)、水等按照一定的比例进行拌合混匀并碾压成型。土壤固化剂在常温下能够有效提高土壤的工程性能^[3],作为一种土壤稳定与加固材料,主要应用于建筑和道路交通领域^[4-5]。由于土壤固化剂集流面具有固化土体、工艺简单、价格低廉、维修方便等特点,在雨水集蓄利用领域有着广阔的应用前景。自吴普特等^[6]提出将土壤固化剂应用于集流面建设后,陆续有科研工作者对土壤固化剂集流面进行了深入研究。冯浩等^[7]研究认为,土壤固化剂集流面具有较高的抗压和抗拉强度,集流效率可达到 78% 以上,建造成本仅为混凝土集流面的 1/3~1/2。高建恩等^[8]提出,在土壤固化剂集流面表面采用固化剂浆液进行收光处理,可以达到减少糙率、增加集流效率的目的。李少斌等^[9]认为,在土壤固化剂集流面表面喷洒 50 mL/m² 的防水剂可提高集流效率 10% 以上。陈涛等^[10]对固化土的渗透特性进行了研究,发现固化剂与黄土的掺配比例为 1:10 时,固化土的渗透系数降低为 $n \times 10^{-6}$ cm/s,仅为黄土的 1/20~1/9,抗渗性能有明显改善,成为相对不透水层。韩信来等^[11]对黄土高原不同地区土壤固化剂集流面固化土的强度变化规律进行了分析研究。张丽萍等^[12]采用 SSA 土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响进行了研究。樊恒辉等^[13-14]提出了土壤固化剂集流面的施工工艺,并对

水泥基土壤固化剂固土性能的影响因素进行了研究。这些研究有力地促进了土壤固化剂在雨水集蓄工程中的应用推广。

综上所述,目前对土壤固化剂集流面的研究主要集中在固化土强度、渗透系数和集流效率等影响因素方面,如剂量、龄期、压实度、含水率等,而很少关注不同结构对土壤固化剂集流面的力学与集流效率的影响。本研究在雨水集蓄工程示范的基础上,针对土壤固化剂集流面的不同施工工艺,研究了不同结构土壤固化剂集流面的抗压强度、吸水性和集流效率的变化,旨在为土壤固化剂在雨水集蓄工程中的推广应用提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验地点及土样性质 试验示范工程位于陕西省定边县郑尔庄村。土样基本性质为:土样的颗粒相对密度为 2.64,颗粒组成以砂粒(粒径 2~0.075 mm)为主,其含量为 52.0%,粉粒(粒径 0.075~0.005 mm)含量为 37.0%,粘粒(粒径<0.005 mm)含量为 11.0%。从界限含水率结果来看,液限为 22.0%,塑限为 13.5%,塑性指数为 8.5。按塑性图分类可知,该土样为低液限粉土(ML)。

1.1.2 土壤固化剂 土壤固化剂选用 MBER(The material of becoming earth into rock)^[15],其是由水泥熟料、矿渣、石膏和核心原料等混合磨细而成的一种粉末状材料,属于一种环保型的无机胶凝材料,在常温下可固结一般土体。MBER 加入土体后可直

接胶结土体颗粒,同时其中的活性组分深入土粒内部的基本单元,发生水化反应生成水化硅酸钙、水化铝酸钙以及硅酸和铝胶等产物,且所有产物均不溶于水。MBER 固结的土体具有良好的水稳定性、较高的强度和低渗透特性。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤固化剂集流面不同结构的设计 根据材料的组成不同,可将土壤固化剂集流面分为土壤固化剂混凝土集流面(由土壤固化剂、水、砂、石等组成)和土壤固化剂固化土集流面(由土壤固化剂、水、土等组成);根据施工过程中含水率的大小,可分为

干性固化土(含水率在击实试验确定的最优含水率附近)和塑性固化土(含水率接近液限)。

本试验示范工程选取的 6 组不同结构土壤固化剂集流面见图 1。为了说明土壤固化剂与水泥集流面的差异,以干性水泥土和水泥混凝土作为对照组(结构 7 和结构 8)。其中,土壤固化剂混凝土和水泥混凝土集流面中 m (水泥(或土壤固化剂)): m (砂): m (碎石)=1: 1.84: 3.42,水灰比(W/C)=0.53。每种结构集流面面积均为 3 m×10 m,坡度 2%。

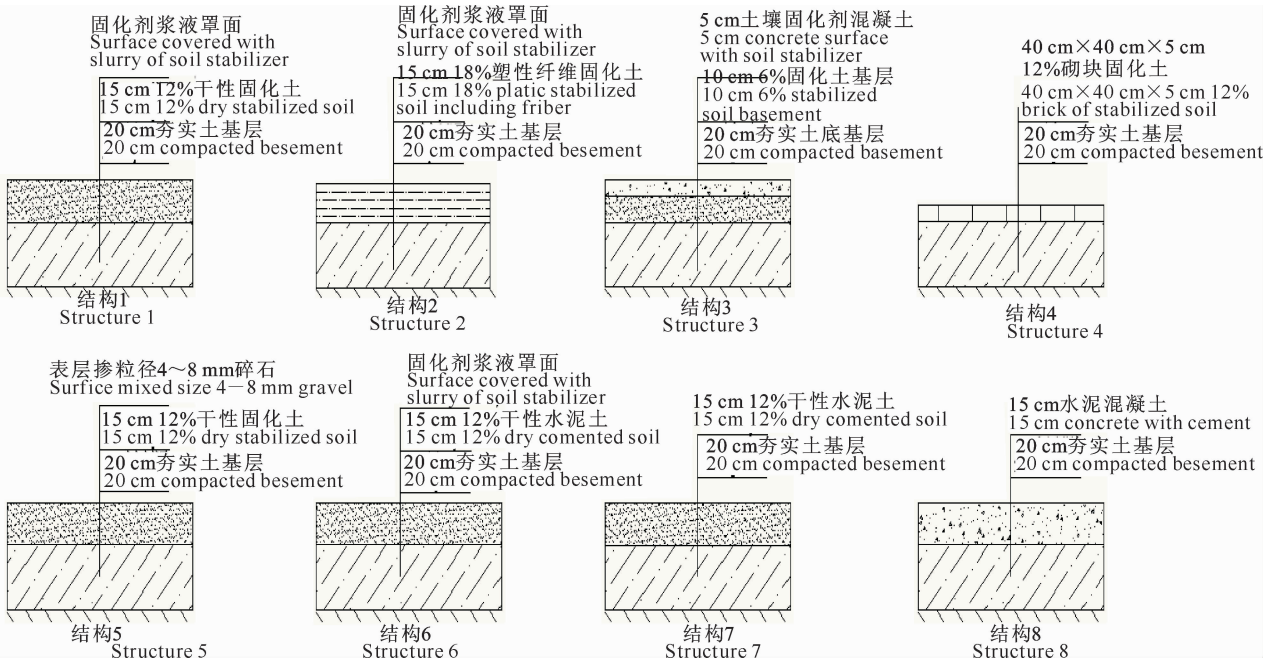


图 1 不同结构的集流面
Fig. 1 Catchments with different structures

1.2.2 集流面性能的测定方法 抗压强度采用 2 种方法进行测定,第 1 种按照《钻芯法检测混凝土强度技术规程》(CECS 03—2007)的方法^[16]测定整体强度,第 2 种按照《公路路基路面现场测试规程》(JTGE 60—2008)^[17]中规定的“回弹仪测定水泥混凝土强度试验方法”测定表面强度;吸水率参照《水工混凝土砂石骨料试验规程》(DL/T 5151—2001)^[18]中的方法测定;集流效率是指在大气降水条件下集流面收集的水量与降水量的比值。

2 结果与分析

为了评价不同结构土壤固化剂集流面的力学与集流性能,对集流面的抗压强度、吸水率和集流效率进行了测定,结果见表 1 和 2。

2.1 不同结构土壤固化剂集流面抗压强度的变化 采用钻芯取样法和回弹法对各种结构集流面的抗压强度进行了测定,前者测定的是集流面整体强度,后者测定的是集流面表面强度。由表 1 可以看出,从整体强度(钻芯取样法)来看,结构 3(10 cm 6% 固化土基层+5 cm 土壤固化剂混凝土)集流面的整体强度最高,可达 30.9 MPa;其次为结构 8(15 cm 水泥混凝土)集流面,其整体强度为 28.1 MPa;其他结构土壤固化剂集流面的整体强度均较小。在固化土类的材料中,结构 5(表层掺粒径 4~8 mm 碎石+15 cm 12% 干性固化土)集流面由于其表面掺有粒径 4~8 mm 的碎石,所以整体强度较高,为 6.2 MPa;其次为结构 4(40 cm×40 cm×5 cm 12% 砌块固化土)集流面,其整体强度为 4.3 MPa,这是由于

加工砌块的压力机压强较高,生产的砌块干密度较大;结构 1(15 cm 12%干性固化土+固化剂浆液罩面)集流面的整体强度为 3.7 MPa,而结构 2(15 cm 18%塑性纤维固化土+固化剂浆液罩面)集流面的整体强度为 2.3 MPa,只有结构 1 集流面的62.2%;结构 6(15 cm 12%干性水泥土+固化剂浆液罩面)集流面的整体强度为 1.9 MPa,仅为结构 1 集流面的 51.4%,这充分说明了 MBER 固化剂具有加固土的优良特性。

不同结构土壤固化剂集流面表面强度的变化趋势与整体强度基本相似。从结构 6(15 cm 12%干性水泥土+固化剂浆液罩面)与结构 7(15 cm 12%干

性水泥土)集流面相比较来看,前者由于表面采用土壤固化剂浆液进行收光处理,表层形成了一层 2~4 mm 厚的致密层,所以表面强度高于后者。

值得提及的是,由于塑性纤维固化土(结构 2)的含水率接近液限,水分蒸发后会在土体中留下大量的孔隙,导致其干密度降低,只有干性固化土(结构 1)干密度的 86.2%,所以结构 2 集流面的整体强度最低。但是,由于塑性纤维固化土施工简单方便,故在承载力较低或难以采用碾压设备的集流面修建中可采用这种固化材料。而干性固化土强度较高,适用于农村道路、庭院、学校操场等承载力大的区域。

表 1 不同结构集流面的抗压强度和吸水率

集流面 结构编号 No. of structures of catchments	钻芯取样法 Method of drilled core sampling			回弹法 Method of rebound	
	饱和密度/(g·cm ⁻³) Saturated density	干密度/(g·cm ⁻³) Dry density	吸水率/% Water absorption	整体强度/MPa Strength	表面强度/MPa Strength
1	1.836	1.590	15.4	3.7	9.2
2	1.803	1.370	31.6	2.3	8.4
3	2.412	2.363	2.1	30.9	31.0
4	2.066	1.775	16.4	4.3	10.8
5	2.173	2.004	8.5	6.2	20.4
6	1.850	1.592	16.2	1.9	8.9
7	1.849	1.572	17.6	1.8	7.1
8	2.306	2.262	2.0	28.1	22.9

2.2 不同结构土壤固化剂集流面吸水率的变化

吸水率是反映材料在一定大气压力下吸水的能力,与材料的空隙数量和大小、颗粒相互排列的方式有关。通过测定集流面的吸水率,可评价集流面的集流性能。集流面吸水率越高,则集流效率越差,尤其在雨强较低的状况下,对集流效率影响更大;并且,集流面吸水率高,则集流面的干湿循环、抗冻性能等耐久性就差。从表 1 可以看出,8 种不同结构集流面中,结构 3 和结构 8 集流面的吸水率均较低,结构 5 集流面次之,结构 1、结构 4、结构 6 和结构 7 集流面较高,结构 2 集流面最高。这说明如果其他

条件都相同时,在低雨强时集流面产生径流的首先是结构 3 和结构 8 集流面,最后是结构 2 集流面。但是,如果采用水泥浆液或固化剂浆液对集流面的表面进行收光处理,使其表面形成一层低渗透的致密固化层,则可有效降低集流面表面的吸水率,提高集流效率。

2.3 不同结构土壤固化剂集流面集流效率的变化

影响集流面集流效率的因素比较复杂,如降雨特性、集流面材料、集流面坡度与面积、集流面前期含水率等。在不同降水条件下,对不同结构集流面的集流效率进行了测定,结果见表 2。

表 2 不同结构集流面的集流效率

集流面结构编号 No. of structures of catchments	日降雨量/mm Daily rainfall				
	4.8	7.1	12.2	21.6	39.4
1	0.618	0.586	0.800	0.848	0.860
2	0.602	0.547	0.784	0.830	0.867
3	0.654	0.624	0.834	0.868	0.897
4	0.167	0.162	0.324	0.463	0.576
5	0.626	0.568	0.784	0.802	0.826
6	0.615	0.576	0.780	0.814	0.861
7	0.484	0.458	0.668	0.684	0.786
8	0.654	0.624	0.834	0.868	0.897

从表 2 可以看出,在不同日降雨量下,结构 3 集流面的集流效率与结构 8 集流面相近。结构 1 与结构 2 集流面的表面处理一样,故其集流效率也相近。结构 1 集流面的表面由于采用固化剂浆液进行收光处理,所以其集流效率高于结构 7 集流面。因此,在修建集流面时,建议表面采用固化剂浆液进行收光处理。结构 5 集流面由于表面掺有碎石,表层平整度较差,“填凹现象”严重,故其集流效率降低。结构 4 集流面由于砌块之间有施工缝隙,故集流效率最低。有必要指出的是,由于固化土的抗冻性能较差,因此如果土壤固化剂集流面表面采用固化剂浆液进行收光处理,或在固化土基础上铺设一定厚度的土壤固化剂混凝土作为面层,不仅可增加抗压强度和集流效率,而且能够起到保护作用,提高集流面的耐久性,延长集流面的使用寿命。

从表 2 还可以看出,集流效率基本随着日降雨量的增加而增大,但日降雨量为 4.8 mm 时各集流面的集流效率均高于日降雨量为 7.1 mm,这是由于在测定前者集流效率的前 1 d 下了小雨,导致该条件下各集流面含水率较高。因此,虽然日降雨量较低,但是集流效率较高。

3 结 论

1)土壤固化剂固化土的抗压强度是水泥混凝土的 2.1 倍,土壤固化剂混凝土的抗压强度是水泥混凝土的 1.1 倍。土壤固化剂集流面的干性施工与塑性施工相比较,前者干密度较大,吸水率降低,而且抗压强度是后者的 1.6 倍。因此,土壤固化剂加固土体或砂石具有较强的优势。

2)修建土壤固化剂集流面,应因地制宜,考虑经济性、耐久性和施工条件,选取合理的固化土集流面结构形式。建议修建土壤固化剂集流面尽可能采用干性施工工艺,并且在集流面表面采用固化剂浆液进行收光处理或铺设土壤固化剂混凝土面层,其不仅可增强抗压强度,提高集流效率,而且能够延长集流面的使用寿命。

[参考文献]

[1] 吴普特,黄占斌,高建恩,等. 人工汇集雨水利用技术研究 [M]. 郑州:黄河水利出版社,2002:1-2.
Wu P T, Huang Z B, Gao J E, et al. Study on techniques of rainwater collection, storage and utilization [M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press,2002:1-2. (in Chinese)
[2] 张祖新,龚时宏,王晓玲. 雨水集蓄工程技术 [M]. 北京:中国水利水电出版社,1999:3-4.

Zhang Z X, Gong S H, Wang X L. Techniques of rainwater collection and storage engineering [M]. Beijing: China Water Power Press,1999:3-4. (in Chinese)
[3] 北京市市政工程设计研究总院. CJJ/T 80—98 固化类路面基层和底基层技术规程 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,1998. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute, CJJ/T 80—98 Technical specification of roadbases and subbases with chemical stabilization [S]. Beijing: China Architecture and Building Press,1998. (in Chinese)
[4] Edeh J E, Eberemu A O, Agnes O. Lateritic soil stabilization of reclaimed asphalt pavement as flexible highway pavement materials [J]. Advanced Materials Research, 2012, 367: 3-11.
[5] Huo J S, Geng Y J, Yu Z Q. Experimental study on the weathered red sandstone soil road performance stabilized with EN-1 soil stabilizer [J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260: 3190-3194.
[6] 吴普特,高建恩,岳宝蓉,等. 一种坡地集流面的制备方法: 中国, CN1451820A [P]. 2003-10-29.
Wu P T, Gao J E, Yue B R, et al. Method of building rainwater harvesting catchments on slope: Chinese, CN1451820A [P]. 2003-10-29. (in Chinese)
[7] 冯 浩,吴普特,彭红涛,等. HEC 和 AAM 添加剂对提高黄土集流效率的试验研究 [J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 28-31. Feng H, Wu P T, Peng H T, et al. Effect of the additives HEC and AAM on the efficiency and capability of rainwater catchment materials [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(3): 28-31. (in Chinese)
[8] 高建恩,吴普特,岳宝蓉,等. 一种固化黄土集流面增流减糙施工方法: 中国, CN200310118985. X [P]. 2004-11-17. Gao J E, Wu P T, Yue B R, et al. Method of increasing rainwater harvesting efficiency in catchments with stabilized soil: Chinese, CN200310118985. X [P]. 2004-11-17. (in Chinese)
[9] 李少斌,冯 浩,吴普特,等. 砷砂岩地区土壤固化剂集流场集水量的试验研究 [J]. 四川水利, 2004(增刊): 44-47. Li S B, Feng H, Wu P T, et al. Experimental study on water-harvesting quantity of stabilized catchment in the arsenic rock zone [J]. Sichuan Water Conservancy, 2004 (S1): 44-47. (in Chinese)
[10] 陈 涛,周俊荣,孙明星. HEC 固化剂对土壤渗透特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 192-194. Chen T, Zhou J R, Sun M X. Influence of solidifying agent HEC on loess permeability [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 192-194. (in Chinese)
[11] 韩信来,高建恩,樊恒辉,等. 黄土高原不同地区固化土强度变化规律研究 [J]. 人民长江, 2009, 40(22): 76-78. Han X L, Gao J E, Fan H H, et al. Research of strength rules on stabilized soil in different regions of the Loess Plateau [J]. Yangtze River, 2009, 40(22): 76-78. (in Chinese)