

固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究

樊恒辉^{1,2}, 吴普特^{1,2*}, 高建恩^{1,2}, 王广周¹, 孙胜利³

(1. 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 3. 海威建材厂, 河南巩义 451200)

摘要: 该文采用无侧限抗压强度作为反映指标, 对影响固化土强度的剂量、龄期、密度、含水率、凝结时间和养护环境等主要因素进行研究, 提出增强土壤固化剂集流面强度的措施。研究结果表明: 固化剂集流面的剂量选择 12% 左右, 养护龄期需要 7 d 以上, 压实度控制在 0.94 以上。在同一密度下含水率为最优含水率的 (80±5)% 范围内时, 固化土的强度达到最大。在混合料拌和好 12 h 内尽快完成施工。施工结束后, 应立即进行覆盖防蒸发处理, 24 h 后方可进行洒水或浸水养护。温度和湿度越高越有利于固化剂集流面强度的增长和外观的平整。

关键词: 土壤固化剂; 无侧限抗压强度; 集流面

中图分类号: TU 472. 5; TV 223. 2+ 6

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)09-0011-05

樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 固化土集流面无侧限抗压强度影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(9): 11- 15.

Fan Henghui, Wu Pute, Gao Jian'en, et al. Principal factors in unconfined compression strength of the solidified soil for the catchment area[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(9): 11- 15. (in Chinese with English abstract)

0 引言

近年来, 由于地下和地表水资源的缺乏, 雨水利用已成为干旱半干旱地区满足人们生产生活重要途径之一^[1-2]。随着雨水利用技术的发展, 采用自然而成的集流面, 包括坡面、道路、屋顶等已经不能满足人们对水资源的消费需求, 出现了许多专门用以收集雨水的人工集流面。人工集流面常用的材料有混凝土、灰土、塑料薄膜和水泥土等^[3-4], 但是这些材料均具有造价高或耐久性差的缺点^[5]。土壤固化剂是一种新型建筑材料^[6], 可以利用当地广泛存在的土壤作为固结对象, 具有高效低廉的特点。吴普特等^[7]利用土壤固化剂发明了一种坡地集流面的制备方法。冯浩等^[8]研究认为固化剂集流面的集流效率可以达到 78% 以上, 建造成本仅为混凝土集流面的 1/3~ 1/2。高建恩等^[9]提出了固化剂集流面的减糙增流技术。李少斌等^[10]认为在固化剂集流面表面喷洒防水剂可以有效地提高集流效率 10% 以上。樊恒辉等^[11]提出了固化剂集流面设计和干硬性施工工艺。陈涛等^[12]对固化土的渗透特性进行研究, 认为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

$n \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 。但是, 对于影响固化剂集流面强度的剂量、龄期、密度等主要因素却未进行深入研究。本文采用无侧限抗压强度作为反映指标, 对影响固化土强度的剂量、龄期、密度、含水率、凝结时间和养护环境等主要因素进行研究, 提出增强土壤固化剂集流面强度的措施, 为土壤固化剂在雨水集蓄领域应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土样选用陕西省杨凌区渭河 II 阶地的黏壤土。土样取自 40~ 200 cm 深度范围内的土壤, 混匀风干, 过 5 mm 筛。土样的物理性质列于表 1。

土壤固化剂选用 MBER 土壤固化剂^[13] (Material of Becoming Earth Into Rock), 该固化剂是由胶凝材料、碱性催化剂、表面活性剂和矿渣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 能够充分发挥土体中铝酸盐矿物潜在的活性, 可改善土颗粒相界面接触的本质, 因此具有良好的水稳定性、较高的强度和抗渗性能。

表 1 供试土样物理性质

Table 1 Physical characteristics of soil samples

比重 G_s	液限 W_L /%	塑限 W_P /%	塑性指数 IP	颗粒组成/%			土样名称 (SD 128- 84)	
				砂粒 (2~ 0.05 mm)	粉粒 (0.05~ 0.005 mm)	黏粒 (< 0.005 mm)	按塑性图	按颗粒组成
2.71	35.5	18.6	16.9	8.2	56.8	35.0	中液限黏土	粉质黏土

收稿日期: 2005-09-19 修订日期: 2006-03-14

基金项目: 国家“863”节水重大专项新型高效雨水集蓄与利用技术研究(2002AA 2Z4051- 2)

作者简介: 樊恒辉(1973-), 男, 山西省夏县人, 博士生, 主要从事岩土工程试验研究和新材料研究工作。陕西省杨凌区渭惠路 23 号 西北农林科技大学水利所校区, 712100。Email: fanhenghui@56.com

*通讯作者: 吴普特(1963-), 男, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事节水灌溉技术与水土保持研究。杨凌 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 712100。Email: gjzwpt@vip.sina.com

1.2 试验方法

试件采用直径 \times 高=50 mm \times 50 mm的圆柱体,用千斤顶压制成型。每组试件为6个。标准养护条件是温度(20 \pm 1) $^{\circ}$ C,相对湿度>95%。养护期的最后一天将试件浸泡在水中,水面高出试件顶部约2.5 cm。将浸水24 h的试件从水中取出,用软布吸去表面可见自由水,采用应变控制式三轴仪进行无侧限抗压强度试验^[14,15]。

2 结果与分析

2.1 固化剂剂量和养护龄期与抗压强度的关系

采用不同的固化剂剂量在不同的养护龄期测定无侧限抗压强度,研究固化剂剂量和龄期对抗压强度的影响规律,用以确定固化剂集流面的剂量和养护时间。试验选择固化剂的剂量为6%、9%、12%、15%和18%,龄期为7、28、60和90 d,标准养护条件下养护。制备的试件干密度和含水率均采用击实试验^[15]确定的最大干密度(ρ_{dmax})和最优含水率(W_{op}),分别为1.723 g/cm³、18.2%。绘制剂量与固化土强度的关系曲线见图1,龄期与固化土强度的关系曲线见图2。

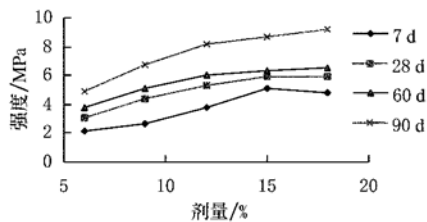


图1 剂量与MBER固化土强度关系曲线

Fig. 1 Relationships between MBER dosage and strength

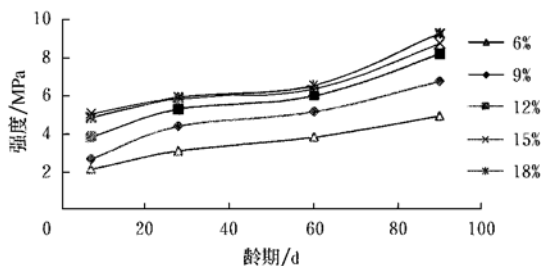


图2 龄期与MBER固化土强度关系曲线

Fig. 2 Relationships between aging and strength

从图1可以看出,在7 d龄期时,15%剂量的固化土强度最高;但在随后的28、60和90 d龄期,随着固化剂剂量的增加,固化土的无侧限抗压强度上升,但上升幅度减缓。在60 d和90 d龄期,固化剂剂量为12%时,曲线有一明显的转折点。从图2中可以看出,7 d龄期的强度在2.15~4.84 MPa之间。固化土的强度在7 d和28 d之间增长较快,而在28 d和60 d增长缓慢,随后在60 d和90 d之间,增长又开始加快。因此可以认为固化土的强度不仅前期强度高,而且后期仍有较大的增长。根据“经济、高效、耐久”的原则和固化剂集流面设计要求^[11],并考虑固化剂集流面的现场施工拌和均匀性要求,认为固化剂集流面的剂量选择12%为宜,养护龄

期至少在7 d以上。

2.2 含水率和密度与抗压强度的关系

采用正交试验来研究含水率和密度与抗压强度的关系,用以确定含水率和密度对抗压强度的影响。选定MBER剂量为12%。试验因素考虑含水率和压实度(压实度=密度/最大干密度)两种因素,各因素考虑水平数为5(表2)。试验设计采用完全正交设计试验,5因素5水平的试验组次(处理)共计25组。在试验过程中密度根据试样的体积和质量来控制;由于含水率难以控制,所以含水率以实际测定的含水率为准。

表2 正交试验因素水平表

因素	水平				
	1	2	3	4	5
含水率(A)/%	$W_{op} - 4$	$W_{op} - 2$	W_{op}	$W_{op} + 2$	$W_{op} + 4$
压实度(B)	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00

试件在标准养护条件下养护7 d。采用极差分析法对试验结果进行分析,试验结果见表3。分别以压实度、含水率为横坐标,抗压强度为纵坐标,绘制压实度与抗压强度关系趋势图、含水率与抗压强度关系趋势图,分别见图3、图4。

表3 极差分析表

水平数	强度/MPa	
	含水率($\sum A_i$)	压实度($\sum B_i$)
1	13.83	9.36
2	14.06	11.47
3	12.16	12.06
4	10.91	13.67
5	10.14	14.54
max	14.06	14.54
min	10.14	9.36
极差R	3.92	5.18

从表3可看出,含水率的水平数为2时的抗压强度最大(14.06 MPa),水平数为5时的抗压强度最小(10.14 MPa),极差为3.92 MPa;压实度的水平数为5时的抗压强度最大(14.54 MPa),水平数为1时的抗压强度最小(9.36 MPa),极差为5.18 MPa。根据正交试验设计的极差分析^[16],认为在这2个因素中,密度对抗压强度的影响较大,含水率影响较小。

图3表明,随着压实度的增加,固化土的抗压强度增大,且两者呈明显的线性关系。因此,在施工过程中,尽可能地提高压实度对于增加固化土的强度具有重要作用。从表3中可看出,在压实度水平数为2(压实度0.94)时,固化土7 d的平均强度才大于2 MPa。考虑固化剂集流面的强度设计要求^[11],建议固化剂集流面的压实度控制在0.94以上。从图4可以看出,在含水率为14%~16%之间,抗压强度最大。含水率大于16%,随着含水率的增加,抗压强度呈现明显下降趋势。在最优含水率18.2%处,抗压强度约为11.68 MPa,是最大值

的 84%。因此, 固化土的含水率在最优含水率时, 其抗压强度不一定最大, 而含水率在最优含水率的 (80 ± 5) % 范围内时, 固化土的强度可以达到最大。

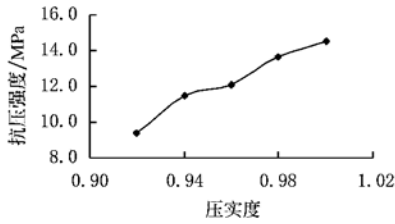


图 3 压实度与无限抗压强度关系趋势图
Fig. 3 Relationships between compactness and unconfined compression strength

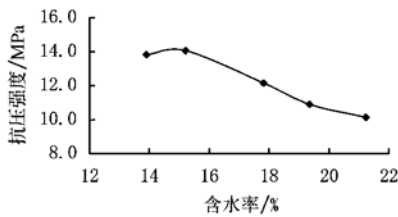


图 4 含水率与无限抗压强度关系趋势图
Fig. 4 Relationships between water content and unconfined compression strength

2.3 凝结时间与抗压强度的关系

凝结时间是固化土施工的主要参数之一, 它可以反映固化土的允许施工时间。试验选择 MBER 固化剂的剂量为 12%, 制备的试件干密度和含水率分别为 1.723 g/cm³、18.2%。将固化土混合料拌和后, 密封保存。从拌和开始计时, 放置 1、2、4、8 和 12 h 制备试件。在标准养护条件下养护 7 d、28 d。试件的强度与标准强度 (1 h 内制备试件和标准养护) 的比值, 即为凝结时间影响强度系数 (h_R)。测定与计算结果见表 4。

表 4 MBER 土壤固化剂凝结时间

Table 4 Concreting time of MBER soil stabilizer

凝结时间 /h	抗压强度/MPa		7 d 龄期凝结时间影响强度系数/ h_{R7}	28 d 龄期凝结时间影响强度系数/ h_{R28}
	7 d	28 d		
< 1(标准强度)	3.74	4.94	0.0	0.0
1	3.69	4.73	1.3	4.3
2	3.54	4.53	5.3	8.3
4	3.50	4.54	6.4	8.3
8	3.46	4.52	7.5	8.5
12	3.41	4.50	8.8	8.9

规范规定^[14], 7 d 龄期时 4 h 凝结时间影响强度系数应小于 10%。从表 4 中可看出, 7 d 龄期时 12 h 凝结时间的影响强度系数为 8.8%, 小于 10%, 这说明 MBER 土壤固化剂的凝结时间应大于 12 h, 远远超过规范的规定, 具有较长的允许施工时间。固化剂加入土体后, 由于在水的作用下, 固化剂本身立刻发生水解水化反应, 应当尽快施工。由于 MBER 土壤固化剂中加入了一定的缓凝成分, 具有较长的凝结时间, 使得施工条

件得到改善。但是应当注意到, 固化土的强度随着施工时间的延长而降低, 因此, 必须尽可能的增加施工速度。

2.4 养护起始时间与抗压强度的关系

养护起始时间试验是确定固化剂集流面施工完成后何时进行养护。试验选择 0、1、2、4、8、12 和 24 h 作为起始养护时间。将试件制备好, 首先置于标准养护箱中进行养护, 达到规定的养护起始时间后, 开始进行养护, 考虑到极端情况, 养护选择浸水养护 (水温 20℃)。龄期选择 7 d。浸水养护结束后, 描述试件形状, 并测定试件强度。选择 MBER 固化剂的剂量为 12%, 制备的试件干密度和含水率分别为 1.723 g/cm³、18.2%。试验结果列于图 5。

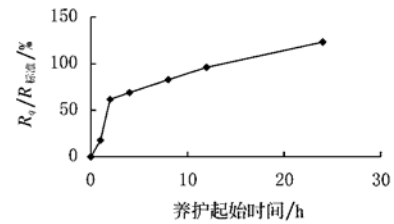


图 5 养护起始时间与无限抗压强度关系
Fig. 5 Relationships between beginning times of curing and unconfined compression strength

从图 5 可看出, 随着养护起始时间的增加, 试件的强度也在增长。在试件制备好后, 立刻进行浸水养护, 由于固化剂与土体的反应很弱, 试件没有形成一定的强度和水稳性, 因此导致试件全部崩解。同样, 在试件制备好后 1 h 进行浸水养护, 部分崩解。在试件制备好后 2 h 和 8 h 浸水, 养护 7 d 后试件具有明显的裂缝, 但是随着养护起始时间的增加, 裂缝明显减少。在试件制备好后 12 h 和 24 h 进行浸水养护, 养护结束后, 未发现裂缝。在 12 h 进行浸水养护的试件强度低于标准养护, 而 24 h 浸水养护的试件强度高于标准养护的 20% 以上。

在实际施工过程中, 养护起始时间对强度的形成具有非常重要的作用。固化剂集流面施工完成后, 应当首先采取防蒸发措施, 不应洒水, 然后经过 24 h, 再进行洒水养护。同时这个实验也说明了养护过程中水是不可缺少的因素。由于 24 h 后浸水的固化土 7 d 强度大于 7 d 标准养护的固化土强度 23%, 所以可认为在一定阶段可以将固化剂集流面进行浸水养护, 在水的参与下, 固化剂与土体之间反应更加彻底和完全, 在较短的时间内达到较高的强度。

2.5 养护环境与抗压强度的关系

养护环境主要指养护过程中固化剂集流面周围的湿度和温度, 通过养护环境试验确定湿度和温度与抗压强度的关系。试验选择 4℃、20℃、室温 (夏季, 平均气温 30℃)、50℃、80℃作为主要条件, 分别在风干和相对湿度 ≥95% 的条件下进行养护 7 d, 测定试件的抗压强度, 研究温度和湿度变化对固化土强度的影响。选择 MBER 固化剂的剂量为 12%, 制备的试件干密度和含水率分别为 1.723 g/cm³、18.2%。试验结果列于表 5, 温度与抗压强度的关系见图 6。

表5 不同养护类型下无侧限抗压强度
Table 5 Unconfined compression strength with different types of curing

养护类型		强度	养护 6 d, 浸水 1 d 后试件形状描述
温度	湿度	/MPa	
4℃	风干	2.24	表面具有裂缝, 边角有较多的掉块 表面光整, 未见裂缝
	> 95%	3.54	
20℃	风干	1.47	表面裂缝严重, 边角掉块严重 表面光整, 未见裂缝
	> 95%	3.74	
室温	风干	2.18	表面裂缝较少, 边角掉块现象少 表面光整, 未见裂缝
	> 95%	4.46	
20℃	风干	3.20	表面光整, 边角掉块现象少 表面光整, 未见裂缝
	> 95%	5.70	
80℃	风干	4.67	表面光整, 边角偶有掉块 表面光整, 未见裂缝
	> 95%	7.44	

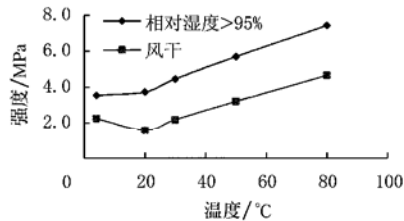


图6 温度、湿度与抗压强度关系
Fig. 6 Relationships among temperature, humidity and strength

从表5和图6中可以看出,在20~80℃范围内,固化土强度不论是风干还是相对湿度为95%条件下,强度随着温度的升高而呈直线上升。在同一种温度下,随着相对湿度的增加,固化土不仅强度增加,而且外表平整,未见裂缝。在4℃时,由于温度低,试件中的水蒸发较少,所以在风干条件下,4℃条件下试件的强度反而比20℃条件下风干的试件强度高,而低于30~80℃范围内的强度。所以建议固化剂集流面在夏季修建最为适宜,施工结束后进行覆盖防蒸发处理,尽可能增加周围环境的湿度,24 h后洒水或浸水养护。

3 结论

1) 固化剂集流面的强度随着剂量和龄期的增加而增大。根据“经济、高效、耐久”的原则,认为固化剂集流面的剂量选择12%左右,养护龄期需要7 d以上。

2) 密度对固化土的强度影响较大,含水率影响小。随着密度的增加,固化土的强度呈直线上升。建议固化

剂集流面的压实度控制在0.94以上。在保证密度的前提下,尽可能的使混合料含水率在击实试验确定的最优含水率的(80±5)%范围内。

3) 在混合料拌和好12 h内尽快完成施工,施工结束后,应立刻进行覆盖防蒸发处理,24 h后方可进行洒水或浸水养护。温度和湿度越高越有利于固化剂集流面强度的增长和外观的平整。

[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.
- [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.
- [3] 朱强, 武福学, 金彦兆. 甘肃省雨水集蓄利用技术[J]. 水利水电技术, 1994, (6): 6-11.
- [4] Li Xiaoyan, Gong Jiadong, Gao Qianzhao. Rainfall harvesting and sustainable agriculture development in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Desert Research, 2000, 20(3): 150-162.
- [5] 齐广平. 几种常用人工集流面的应用现状及存在问题分析[J]. 甘肃农业科技, 2000, (2): 27-29.
- [6] 於春强, 郑尔康. 高性能土壤固化剂及在地基处理中的应用[A]. 中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学会会议论文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 729-735.
- [7] 吴普特, 高建恩, 岳宝蓉. 一种坡地集流面的制备方法[P]. 中国: CN1451820A, 2003. 10. 29.
- [8] 冯浩, 彭红涛. 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.
- [9] 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[P]. 中国: CN200310118985. X, 2004. 11. 17.
- [10] 李少斌, 冯浩, 吴普特, 等. 砒砂岩地区土壤固化剂集流面集水量的试验研究[J]. 四川水利(第四次全国雨水利用技术研究会暨学术年会专辑), 2004(增刊): 44-47.
- [11] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 等. MBER土壤固化剂集流面的施工工艺研究[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 56-59.
- [12] 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.
- [13] 高建恩, 孙胜利, 吴普特. 一种新型土壤固化剂[P]. 中国: CN200410073273. 5, 2005. 06. 29.
- [14] CJ/T 3073-1998. 土壤固化剂[S]. 北京: 中华人民共和国建设部发布, 1998.
- [15] JTJ 057-94. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.
- [16] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析(第1版)[M]. 西安: 世界图书出版公司, 1998: 120-128.

Principal factors in unconfined compression strength of the solidified soil for the catchment area

Fan Henghui^{1,2}, Wu Pute^{1,2*}, Gao Jian'en^{1,2}, Wang Guangzhou¹, Sun Shengli³

(1. *Research Centre of Soil and Water Conservation and Eco-Environment, Chinese Academy of Sciences and Education Ministry, Yangling 712100, China;* 2. *College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, China;* 3. *Factory of Building Material, Gongyi Henan 452100, China*)

Abstract: Taking the unconfined compression strength as an indicated index, the principal factors such as dosage, aging, density, water content, the concreting time and the condition of concrete curing, which affected the solidified soil strength, and the measures to enhance the strength of the solidified soil for the catchment with soil stabilizer were analyzed. Results show that the dosage of soil stabilizer is about 12%, the aging is at least 7 d and the compactness is controlled above 0.94. Under the same density, the strength is the greatest if the water content is in the range of 75% ~ 85% as optimum moisture content. The mixture must be compacted in 12 hours as soon as possible. After the catchment area is constructed, the surface is covered to defend the water evaporation at once and it is not sprayed water or immersion cured until 24 hours. The strength and appearance of the catchment area with soil stabilizer are better with the higher temperature and humidity than those of lower ones.

Key words: soil stabilizer; unconfined compression strength; catchment area