

# 影响 MBER 固化土劈裂抗拉强度的因素试验

张通<sup>1</sup>, 高建恩<sup>1,2,3</sup>, 李兴华<sup>1</sup>, 高哲<sup>4</sup>, 王飞<sup>2</sup>, 孙胜利<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100;  
3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4. 西安石油大学, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 采用 MBER 土壤固化剂和水泥, 对剂量、含水率和龄期影响固化土和水泥土的劈裂抗拉强度的规律性进行了试验研究。结果表明, 固化土劈裂抗拉强度在 0.08~0.43 MPa, 水泥土劈裂抗拉强度在 0.09~0.35 MPa。在其他条件一定时, 固化土和水泥土的劈裂抗拉强度随着剂量增加而增大, 劈裂抗拉强度在试件含水率为最优含水率时达到最大值; 随龄期增大, 固化土和水泥土的劈裂抗拉强度均有不同程度的增大。在龄期相同条件下, 固化土劈裂抗拉强度略高于水泥土。

**关键词:** MBER 土壤固化剂; 固化土; 水泥土; 劈裂抗拉强度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0049-04

中图分类号: S277

## Factor Test for Splitting Tensile Strength of MBER Stabilized Soil

ZHANG Tong<sup>1</sup>, GAO Jian-en<sup>1,2,3</sup>, LI Xing-hua<sup>1</sup>, GAO Zhe<sup>4</sup>, WANG Fei<sup>2</sup>, SUN Sheng-li<sup>3</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China)

**Abstract:** This paper studied the influences of dose, moisture content and maintenance period on splitting tensile strengths of MBER stabilized and cement stabilized soils. Results indicated that the splitting tensile strength of MBER stabilized soil was between 0.08 and 0.43 MPa, and of cement stabilized soil, between 0.09 and 0.35 MPa. When other factors remained unchanged, the splitting tensile strengths of the two stabilized soils increased with the increase in applied dose and reached the peak value at the optimum moisture content. The two splitting tensile strengths also increased with maintenance period. Under the same age, the splitting tensile strength of MBER stabilized soil was slightly higher than that of cement stabilized soil.

**Keywords:** MBER soil stabilizer; stabilized soil; cemented soil; splitting tensile strength

水土流失和干旱缺水并存是黄土高原地区的一大环境问题,亦是一对难以调和的矛盾。由于黄土高原地区缺石少砂,且大部分地区水质较差,对混凝土的应用造成了一定的限制。由于土壤固化剂能充分利用当地的水土资源,即利用当地水质等级不高的水,固结当地广泛存在的土壤,逐渐受到了人们的关注。土壤固化剂是一种新型建筑材料,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,目前已大量应用在水利工程、道路工程、机场跑道等方面,效益非常显著。在农业工程中固化剂集中应用在池塘、湖泊清淤及其淤泥的处理、农田水利设施的节水改造等方面<sup>[1-5]</sup>。此外,固化剂还可用于土壤

固化剂免烧砖以及水利工程中的堤坝填筑固化、土壤固化剂墙体等。美国《工程新闻》称之为 30 世纪的伟大发明创造之一,日本称之为 21 世纪的新材料。

目前,对固化土的研究集中在其抗压强度、抗渗和抗冻性能方面,而且主要集中在对土壤固化剂在集雨工程技术体系,特别是集流面建设中的应用的研究。吴普特等<sup>[6]</sup>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<sup>[7]</sup>研究认为,固化剂集流面的集流效率可以超过 78%,建造成本仅为混凝土集流面的 1/3~1/2。高建恩等<sup>[8]</sup>提出了固化剂集流面的减糙增流技术。李少斌等<sup>[9]</sup>认为通过在固化剂集流面表面喷洒防水剂可以将集流效率有效提高 10%

收稿日期:2012-08-23

修回日期:2012-09-15

资助项目:国家支撑计划项目“黄土丘陵沟壑区水土保持与高效农业关键技术集成与示范”(2011BAD37B05); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-003-02)

作者简介:张通(1989—),男(汉族),山东省潍坊市人,在读研究生,主要研究方向为农业水土工程。E-mail:zhangtong029@163.com。

通信作者:高建恩(1962—),男(汉族),山西省运城市人,研究员,博士生导师,主要研究方向为水土资源高效利用与保育。E-mail:gaojianen@126.com。

以上。樊恒辉等<sup>[10]</sup>提出了固化剂集流面设计方法以及干硬性施工工艺。陈涛等<sup>[11]</sup>对固化土的渗透特性进行研究。樊恒辉等<sup>[12]</sup>对密度和含水率等因素对固化土无侧限抗压强度的影响进行过研究,但是对于影响土壤固化剂集流面的劈裂抗拉强度这一重要施工参数尚未进行深入的研究。

固化土由于其具有干缩特性,会使土体产生裂缝<sup>[13]</sup>,从而降低其抗压强度和抗渗、抗冻性能,在一定程度上限制了推广应用。劈裂抗拉强度作为一项基本的力学性能指标,是静力和动力力学分析计算中不可或缺的一项重要内容,因此,对固化土体的劈裂抗拉强度的研究具有重要的实际意义。本文以 MBER 土壤固化剂<sup>[14-15]</sup>为研究对象,采用水泥土作

为对照,通过测定固化土、水泥土的劈裂抗拉强度,讨论剂量、含水率及龄期等因素对固化土劈裂抗拉强度的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

MBER 土壤固化剂是由水泥熟料及核心原料等材料混合磨细而制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,具有固结强度高、耐久性强、变形小及使用范围广等特点<sup>[16]</sup>。试验土样选取陕西省延安地区黄土,土样取自 40—200 cm 深度的土壤,混合风干,过 5 mm 筛。延安地区土样的物理性质如表 1 所示。

表 1 延安地区土样的物理性质

颗粒相对密度	颗粒组成/%			液限/%	塑限/%	塑性指数	土壤分类
	>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm				
2.68	7.0	76.0	17.0	30.8	17.9	12.9	低液限黏土(CL)

### 1.2 试验方案

为了确定延安黄土样的最优含水率和最大干密度,按照《土工试验方法标准》(GB-T50123-1999)进行击实试验,试验采用轻型击实试验仪,击实试验的单位体积击实功约为 592.2 kJ/m<sup>3</sup>,分 3 层击实,每层 25 击。以含水率为横坐标,以干密度为纵坐标,绘制含水率( $w$ )—干密度( $\rho$ )曲线,曲线的峰值点对应的横、纵坐标分别为最优含水率(在一定的击实功能下,能使土达到最大密度所需的含水率, $w_{op}$ )和最大干密度(最优含水率相应的干密度, $\rho_{dmax}$ )。

试验考虑剂量、含水率和龄期 3 个影响因素,根据大量的前期试验,并考虑到实际应用和性能价格比,选取不同土壤固化剂剂量(6%,9%,12%,15%和 18%)和含水率(12.5%,14.5%,16.5%,18.5%,20.5%),分别养护 7 d 和 28 d 龄期。试件密度为 2.15~2.34 g/cm<sup>3</sup>。

### 1.3 试件制备及养护

试件采用静力压实法制备,即用千斤顶压制成型,试件尺寸为 50 mm(直径)×50 mm(高)的圆柱体。具体方法:试件制备前按一定含水率将风干土和水混合,混合完成后将土样放入封闭容器内浸润 24 h;将已配好的定量土壤固化剂(水泥)加入土中拌合均匀;拌合完成后的固化土样(水泥土样)在 1 h 内用千斤顶压制成型<sup>[17]</sup>。试件成型后放入养护室内进行养护。试件标准养护条件为(20±2)℃,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。浸水 24 h 后将试件从水中取出,用软布吸去表面可见自由水,并测量试件质量。

### 1.4 测试方法

劈裂拉伸试验时,在试件上下方向各放置 1 个垫条,垫条截面为 3 mm×3 mm。采用微机液压万能材料试验机(YAW-4206)对试件施加荷载,初始荷载从 10~15 N 开始,荷载每级初期为 5~10 N,后期为 10 N,直至破坏。

劈裂抗拉强度采用式(1)计算<sup>[18]</sup>:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi DL} \quad (1)$$

式中: $f_{ts}$ ——劈裂抗拉强度(MPa); $D$ ——圆柱体直径(mm); $L$ ——试件边长(mm); $F$ ——破坏荷载(kN)。

## 2 结果与分析

### 2.1 MBER 土壤固化剂剂量对固化土劈裂抗拉强度的影响

由图 1 可以看出,在龄期相同的情况下,固化土、水泥土的劈裂抗拉强度均随剂量的增大而增大,且在剂量为 18%时达到强度最大值。对相同龄期条件下 2 种试件比较,7 d 龄期时,6%的固化土强度比水泥土低 50%,9%的固化土强度比水泥土高 60%,12%的固化土比水泥土高 24%,15%的固化土强度比水泥土高 19%,18%的固化土强度比水泥土高 7%;28 d 龄期时,6%的固化土强度比水泥土低 0.7%,9%的固化土强度比水泥土高 26.3%,12%的固化土强

度比水泥土高 47.4%，15%的固化土强度比水泥土高 13.3%，18%的固化土强度比水泥土高 22.9%。这是由于随着时间的增长，导致固化剂加入土体中引起颗粒间空隙减小体积缩减的同时，H<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 被固化成固相，质量增加，使得固化土体系密度增大，强度提高，劈裂抗拉强度提高。在实际应用中，过多的固化剂用量在经济上不合理，在效果上也不一定显著，所以应根据实际情况取较为合适的固化剂用量。

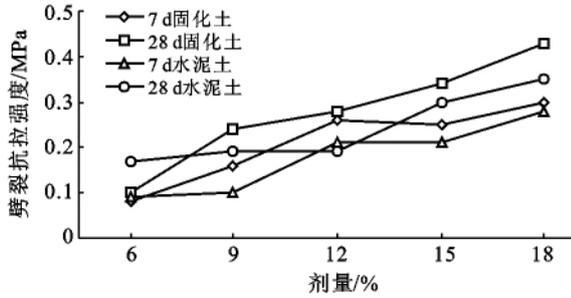


图 1 剂量对劈裂抗拉强度的影响

对固化土 28 d 强度曲线进行最小二乘法回归分析，求出剂量的与抗压强度的变化关系，根据此公式可以预测固化土的强度：

$$P = -0.0264m^2 + 0.01916m - 0.056 \quad (R^2 = 0.9622) \quad (2)$$

式中： $P$ ——劈裂抗拉强度(MPa)； $m$ ——剂量。

由式(2)可以看出，固化土的劈裂抗拉强度与剂量基本成二次非线性关系，且在剂量为 18%左右达到最大值，与试验结果基本相符。因此，在龄期相同时，固化土强度总体强于水泥土。根据“经济、高效、耐久”的原则和实际施工要求<sup>[19]</sup>，认为固化剂集流面的剂量选择 12%为宜，养护龄期不少于 7 d。

### 2.2 含水率对固化土劈裂抗拉强度的影响

由图 2 可以看出，含水率在 14.0%~16.5%时，固化土劈裂抗拉强度随含水率的增加而增加；当含水率在 16.5%~20.5%时，固化土劈裂抗拉强度随含水率的增加呈降低趋势。含水率为 16.5%时，劈裂抗拉强度最大。水泥土的劈裂抗拉强度变化趋势与固化土类似，但总体上略小于固化土强度。

试验表明，在固化土掺水初期，无水的水泥熟料矿物转变为水化物与空气中的 CO<sub>2</sub> 发生反应生成碳酸盐，提高了固化土的强度，使劈裂抗拉强度增加。含水率过大会使土壤固化剂有效成分流失而很难形成稳定均匀的固化土，固化土的劈裂抗拉强度因此会大大降低。实际应用中，由于含水率过低，固化土样

不饱和，固化剂有效成分利用率低，影响固化土的劈裂抗拉强度，所以取最优含水率利于控制。

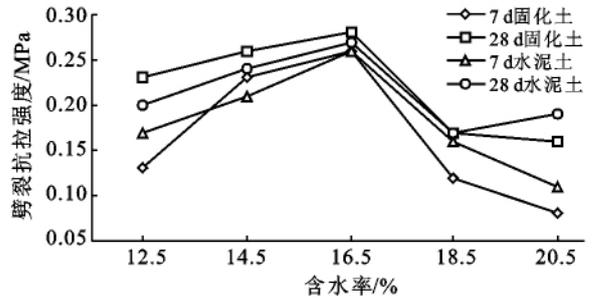


图 2 不同含水率对劈裂抗拉强度的影响

### 2.3 龄期对固化土劈裂抗拉强度的影响

从图 3—4 可以看出，随着龄期的增长，固化土和水泥土的劈裂抗拉强度均有不同程度的增大，其中以固化土相同剂量对比，其强度的增幅为 11.5%，50%，8%，36%，43%，相比 7 d 强度，固化土的 28 d 强度有了较大提高。

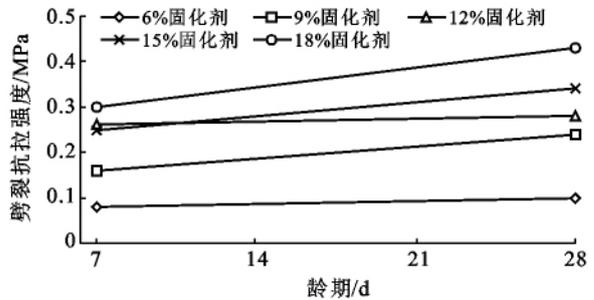


图 3 龄期对固化土劈裂抗拉强度的影响

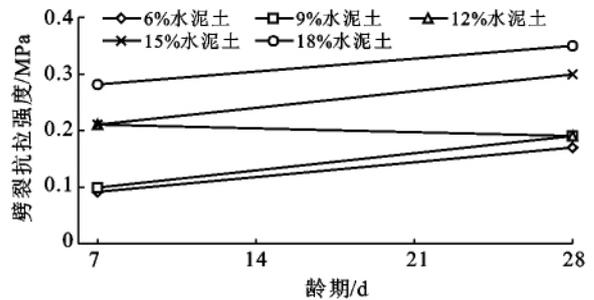


图 4 龄期对水泥土劈裂抗拉强度的影响

## 3 因素的影响效果分析

通过以上分析可以看出，在其他条件相同的情况下，剂量的变化对固化土的劈裂抗拉强度增幅最大可提高 47.4%，含水率的变化对固化土的劈裂抗拉强度最大可以提高 10%，龄期的变化对固化土的劈裂抗拉强度可以提高 36%，3 种因素比较，剂量对固化土的影响效果最为明显。

## 4 结论

(1) MBER 固化土的劈裂抗拉强度在 0.08~0.43 MPa, 水泥土的劈裂抗拉强度在 0.09~0.35 MPa, 固化土劈裂抗拉强度强度总体上比水泥土略大。

(2) 固化土和水泥土的劈裂抗拉强度随着剂量和龄期的增加而增大, 在含水率为最优含水率时达到最大值。

(3) 在含水率较低时, 固化土的劈裂抗拉强度随着含水率的增加而增大, 当含水率达到一定水平时固化土的劈裂抗拉强度随着含水率的增加而减小。实际应用中取最优含水率利于控制。建议固化土工程施工过程中, 将固化土的含水率控制在最优含水率附近进行施工, 并且至少养护 7 d, 确保固化土的性能充分发挥。

(4) 在本文研究的影响固化土的劈裂抗拉强度 3 种因素中, 剂量对固化土劈裂抗拉强度的影响最大, 在施工时应尤为注意对固化剂剂量的控制。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 胡军. 土壤固化剂在路基处理、道路基层中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [2] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [3] 吕其林. 土壤固化剂在治理堤坝渗漏中的应用[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(3): 229-231.
- [4] 季仁保, 周福国. 渠道防渗技术新进展[J]. 中国农村水利水电, 2003(4): 28-31.
- [5] 徐燕. 滨海淤泥的快速固化研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院, 2007.
- [6] 吴普特, 高建恩, 岳宝蓉. 一种坡地集流面的制备方法:

中国, CN 03128093 · 5[P]. 2003-10-29.

- [7] 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.
- [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, CN 200310118985. X[P]. 2004-11-17.
- [9] 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, 2004(S): 44-47.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 樊恒辉, 吴普特, 高建恩, 等. 密度和含水率对固化土无侧限抗压强度的影响[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(3): 54-58.
- [13] 柯结伟, 庞有师, 陈志勇. 土壤固化剂技术与工程应用现状[J]. 华东公路, 2007(5): 49-52.
- [14] 高建恩, 孙胜利, 吴普特. 一种新型土壤固化剂: 中国, CN200410073273. 5[P]. 2005-06-29.
- [15] 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.
- [16] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论: 基于降雨地表径流调控利用的水土保持学[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006.
- [17] TJ057-94. 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.
- [18] 史庆轩. 混凝土圆柱体劈裂抗拉强度公式推导[J]. 治院科技, 1994, 34(4): 32-34.
- [19] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 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.

(上接第 48 页)

- [10] Collins H P, Elliott E T, Pustian K, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 157-168.
- [11] 杨丽霞, 潘剑君, 苑韶峰. 森林土壤有机碳库组分定量研究[J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 241-244.
- [12] Ellert B H, Gregorich E G. Management induced changes in the actively cycling fractions of soil organic

matter[M]// Mcfee W W, Kelly J M. Carbon Forms and Functions in Forest Soils. Wisconsin, Madison, USA; Soil Science Society of America, Inc, 1995: 119-138.

- [13] Cook B D, Allan D L. Dissolved organic carbon in old field soils: Compositional changes during the biodegradation of soil organic matter[J]. Soil Biol. Biochem., 1992, 24(6): 595-600.