

MBER 固化土弹性模量的试验研究

冀璐¹, 高建恩^{1,2,3}, 郝连安², 张元星², 孙胜利¹

(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)

摘要: 弹性模量是固化土一项基本的力学性能指标, 直接影响结构的静力和动力力学分析计算, 对弹性模量的试验研究具有重要的实际意义。针对固化土弹性模量研究薄弱的问题, 以自主研发的 MBER 土壤固化剂为研究对象, 通过对杨凌试验区土样进行室内试验, 分别对影响 MBER 固化土的弹性模量的土壤固化剂剂量、不同含水率和不同龄期 3 种因素进行分析研究。根据试验结果, 获得了 MBER 固化土应力—应变关系曲线, 得出固化土弹性模量在 300~1 000 MPa。固化土的弹性模量随着土壤固化剂剂量, 含水率及龄期的增长呈增加趋势, 而当含水率达到一定值时, 固化土的弹性模量呈下降趋势。因此, 通过合理控制土壤固化剂剂量及含水率, 能够改善固化土的力学性能, 进而达到改良固化土的目的。

关键词: MBER 土壤固化剂; 弹性模量; 应力—应变曲线

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0261-04

中图分类号: S279.2

Experimental Research on Elastic Modulus of MBER Solidified Soil

Ji Lu¹, Gao Jian-en^{1,2,3}, Hao Lian-an², Zhang Yuan-xing², Sun Sheng-li¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest

A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of 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)

Abstract: As one of the indices for basic mechanical properties of stabilized soil, elasticity modulus affects structure's static and dynamic analysis and calculation. So, experimental research on elasticity modulus is of practical significance. In view of few researches on elasticity modulus of stabilized soil and by taking the independently developed soil stabilizer as a research object, the three factors of soil stabilizer dosages, different moisture contents and different ages affecting the MBER stabilized-soil's elasticity modulus are separately studied by laboratory experiment using soil samples collected in Yangling experimental area. A stress-strain relationship curve is obtained from experimental result and the stabilized-soil's elasticity modulus is found to be between 300 and 1 000 MPa. The stabilized-soil's elasticity modulus is increased with the increases in soil stabilizer dosage, moisture content and age and however, it begins to drop down as a threshold value of moisture content occurs. By reasonably controlling soil stabilizer dosage and moisture content, mechanical properties of the stabilized soil can be improved for an improved stabilized soil.

Keywords: MBER solid stabilizer; elasticity modulus; stress-strain relationship curve

降雨径流调控与高效利用是解决黄土高原干旱缺水与水土流失的重要手段^[1], 雨水集蓄利用技术是其中最重要的组成部分。土壤固化剂作为一种新型建筑材料, 在黄土高原和广大无砂石料地区, 以当地广泛存在的土壤作为固结对象, 就地取材, 性能稳定,

防渗性能好, 价格低廉, 可以广泛应用于雨水集蓄利用工程中^[2-5]。土壤固化剂在雨水集蓄利用工程方面的应用主要集中在集流工程和蓄水工程 2 个方面。陕西省定边县郑儿庄村和陕西省安塞县等地区修建了大量的固化土集流面和固化土水窖, 以解决困扰黄

收稿日期: 2012-02-11

修回日期: 2012-02-13

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“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”(2011BAD31B05); 水体污染控制与治理科技重大专项“保障渭河生态基流的关中地区农业节水及调控技术研究”(2009ZX07212-002-003-02)

作者简介: 冀璐(1986—), 女(汉族), 山西省左权县人, 在读硕士研究生, 研究方向为水利水电工程。E-mail: jilu2009@126.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, 研究方向为地表径流调控与利用。E-mail: gaojianen@126.com。

土高原丘陵沟壑区社会经济发展及饮水安全等问题。然而,固化土的复杂形成机理导致其理论研究远远滞后于应用实践,对固化土的研究仅处在探索阶段,对弹性模量的研究较少。

弹性模量作为固化土最基本的一项力学性能指标,反映了固化土应力与应变之间的关系,在固化土结构工程的内力分析等计算中,固化土的弹性模量更是不可缺少的依据,因此,对固化土弹性模量的研究显得至关重要,具有重要的实际意义。

本文以自主研发的 MBER 土壤固化剂^[6]为研究对象,通过室内大量试验,测定固化土弹性模量,讨论了剂量、含水率和龄期因素对固化土弹性模量的影响,为进一步开展固化土机理的研究奠定了坚实的基础。

1 材料与方法

1.1 试验方案

通过击实试验得到试件的最优含水率为 18.5%,

最大干密度为 1.731 g/cm^3 。为了进一步探索固化土的弹性模量。

本文在前人固化土试验研究的基础上^[7-8],选取土壤固化剂剂量(6%,9%,12%,15%和 18%)、含水率(14.5%,16.5%,18.5%,20.5%,22.5%)和龄期(7 d,28 d,90 d)进行研究。每组试验制作 6 个试件,总共 180 个试件。具体固化土弹性模量试验准备数据如表 1 所示。

1.2 试验材料

MBER 土壤固化剂是由水泥熟料和核心原料等材料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,具有固结强度高、耐久性强、变形小及使用范围广等特点,克服了以往固化剂强度低、抗冻性差等缺点^[1]。

试验土样选取陕西杨凌区黏壤土,土样取自 40—200 cm 深度的土壤,混合风干,过 5 mm 筛。土样的物理性质如表 2 所示。

表 1 固化土弹性模量试验设计

%

组成成分/g	固化剂剂量					土壤含水率				
	6	9	12	15	18	14.5	16.5	18.5	20.5	22.5
固化剂	10.63	15.95	21.27	26.58	31.90	22.01	21.63	21.27	20.09	20.57
土	166.58	161.27	155.95	150.63	145.32	161.40	158.63	155.95	153.36	150.86
水	32.78	32.78	32.78	32.78	32.78	26.59	29.74	32.78	35.73	38.57

表 2 杨凌黏壤土物理性质

密度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	土壤颗粒组成/%			液限/%	塑限/%	塑性指数	土壤分类
	>0.075 mm	0.075~0.005 mm	<0.005 mm				
2.71	4.8	60.2	35.0	35.5	18.6	16.9	CI

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,尺寸为直径×高=50 mm×50 mm 的圆柱体。具体方法:试件制备前将风干土和水混合,配制一定的含水率,使加入土壤固化剂后的混合料含水率达到试验设计的含水率,将土样放入封闭容器内浸润 12 h 以上;将以配好的定量土壤固化剂加入土中拌合均匀;拌合后的固化土样在 1 h 内用千斤顶压制成型^[9]。

试件标准养护条件是 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度 > 95%。

1.4 测试方法

采用微机液压万能材料试验机(YAW-4206)对试件施加荷载,加载速率为 25 N/s,荷载从 10~15 N 开始。初期每级荷载为 5~10 N,后期每级荷载为 10 N,直至破坏。

2 结果与讨论

2.1 MBER 固化土应力—应变关系曲线

试验所得龄期为 90 d,含水率为 18.5%时,不同剂量固化土单轴受压时其应力—应变关系曲线如图 1 所示。随着土壤固化剂剂量的增加,应力—应变曲线的斜率越来越大,达到的峰值也不断提高。破坏后期下降段不断变陡,材料趋于脆性,即在工程应用时土壤固化剂的剂量不是越大越好。

以剂量 12%的应力—应变曲线为例,从图 1 中可以看出曲线分为 3 个阶段。(1) 第 1 阶段为线弹性阶段,应力—应变曲线近似为一条直线,此时固化土的应力达到峰值应力的 60%~70%,表明其弹性形变阶段大致处于固化土轴压强度 0.6 倍左右,所以本文取正应力达到 60%峰值应力时的固化土的应力与应变比值作为固化土的弹性模量;(2) 第 2 阶段为应力—应变

曲线进入塑性上升段, 应力逐渐增大并达到峰值, 应力—应变曲线在接近峰值时发生弯转, 此时试件内部有裂缝, 并且在阶段末出现可见裂缝; (3) 第 3 阶段为材料破坏阶段, 应变增加不大的情况下应力迅速减小, 此时裂缝贯通, 试件产生了较大的塑性变形。

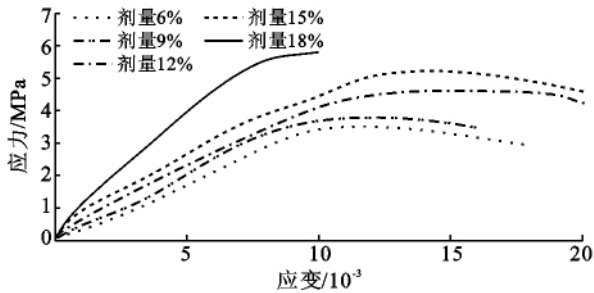


图 1 龄期 90 d 时不同剂量 MBER 固化土应力—应变关系

2.2 MBER 土壤固化剂剂量对固化土弹性模量的影响

通过实验得出含水率为 18.5% 时, 不同剂量土壤固化剂在不同龄期的弹性模量值见表 3, 绘制了剂量、龄期与固化土弹性模量的关系曲线见图 2—3。图 2 表明在龄期相同的情况下, 固化土弹性模量随着剂量的增加而增大。这是由于随着固化剂剂量的增加, 碳酸盐含量在增加, 碳化反应增加固化土中的固相, 而且生成的碳酸盐晶粒能够提高溶液的碱性, 有利于水泥熟料水解水化进行, 使固化土的强度提高, 进而弹性模量也在增加^[10]。

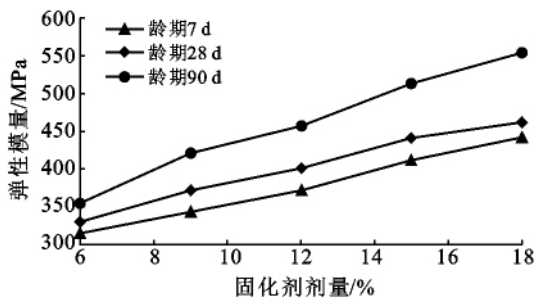


图 2 剂量与 MBER 固化土弹性模量关系曲线

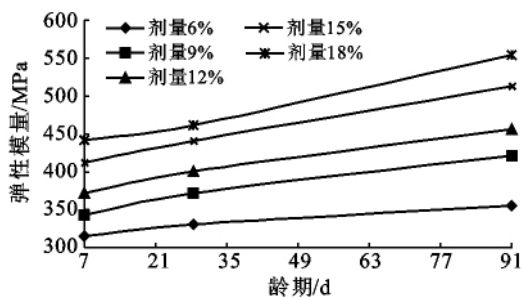


图 3 龄期与 MBER 固化土弹性模量关系曲线

由表 3 与图 3 可知, 当土壤固化剂剂量为 6% 时, 7 d 和 28 d, 28 d 和 90 d 弹性模量分别增加 4.4%, 7.6%; 剂量为 9% 时, 7 d 和 28 d, 28 d 和 90 d 弹性模量分别增加 8.1%, 13.4%; 剂量为 12% 时, 7 d 和 28 d, 28 d 和 90 d 弹性模量分别增加 7.8%, 14.0%; 剂量为 15% 时, 7 d 和 28 d, 28 d 和 90 d 弹性模量分别增加 7.0%, 16.3%; 剂量为 18% 时, 7 d 和 28 d, 28 d 和 90 d 弹性模量分别增加 4.5%, 19.7%。因此在剂量相同的情况下, 固化土弹性模量随着龄期的增长而增大。在前期, 随着土壤固化剂剂量的增加, 固化土弹性模量的增长速率呈现先增后减的现象, 但是差异不大, 固化土的弹性模量在 28 d 和 90 d 之间有较大的增长。这是由于随着时间的增长, 固化土加入土体中体积缩减的同时, H₂O 和 CO₂ 被固化成固相, 质量增加, 使得固化土体系密度大大增加, 强度在提高, 弹性模量也在提高^[10]。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, 所以根据实际情况取较为合适的固化剂用量即可。

表 3 不同剂量固化土的弹性模量 MPa

龄期/ d	固化剂剂量/%				
	6	9	12	15	18
7	316	344	372	412	442
28	330	372	401	441	462
90	355	422	457	513	553

2.3 含水率对固化土弹性模量的影响

不同含水率在不同时期的弹性模量值见表 4, 含水率与弹性模量关系曲线见图 4。图 4 表明, 含水率在 14%~16.5% 时, 弹性模量增加, 当龄期为 7, 28, 90 d 时, 增长率分别为 21.4%, 8%, 5%。当含水率大于 16.5% 时, 随着含水率的增加, 弹性模量呈明显下降趋势。

表 4 不同含水率固化土弹性模量 MPa

龄期/ d	固化土含水率/%				
	14.5	16.5	18.5	20.5	22.5
7	327	397	372	309	285
28	413	437	401	328	296
90	451	474	457	393	339

试验表明, 在固化土中掺入水初期, 无水的水泥熟料矿物转变为水化物与空气中的 CO₂ 发生反应生成碳酸盐, 提高了固化土的强度, 使弹性模量增加。含水率过大会使土壤固化剂有效成分流失很难形成

稳定均匀的固化土,使固化土的强度大大降低,弹性模量减少。实际应用中,由于含水率过低,固化土样不饱,固化剂有效成分利用率低,影响固化土的强度和弹性模量,所以取最优含水率利于控制^[10-11]。

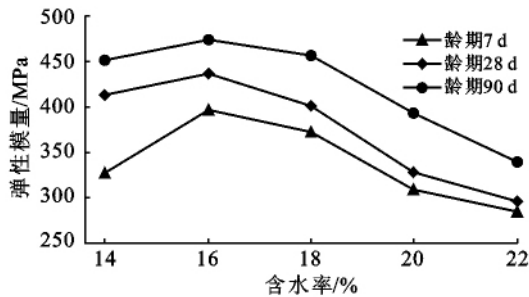


图 4 含水率与固化土弹性模量关系曲线趋势

3 结论

(1) 试验获得 MBER 固化土单轴受压应力—应变过程曲线,揭示了固化土破坏过程,为进一步对固化土理论分析提供依据,并且分析得出固化土的弹性形变阶段大致处于峰值应力的 0.6 倍左右,取正应力达到 60%峰值应力时的固化土的应力与应变比值作为固化土的弹性模量。试验得出 MBER 固化土的弹性模量在 300~1 000 MPa。

(2) 在剂量相同的情况下,固化土弹性模量随着龄期的增长而增大。在前期,随着土壤固化剂剂量的增加,固化土弹性模量的增长速率呈现先增后减的现象,但是差异不大,固化土的弹性模量在后期有较大的增长;在龄期相同的情况下,固化土弹性模量随着剂量的增加而增大。

(3) 在含水率较低时,固化土的弹性模量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弹性模量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。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
- [2] 於春强,郑尔康.高性能土壤固化剂及在地基处理中的应用[C]//中国土木工程学会第9届土力学及岩土工程学会会议论文集.北京:清华大学出版社,2003.
- [3] 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):48-51.
- [4] 刘铁宏,王义新.土壤固化剂在防汛抢险中的应用现状分析[J].吉林水利,2009(3):46-49.
- [5] 宋南京,陈新中,赵洪义.土壤固化剂的研究进展和应用[J].中国建材科技,2009(1):55-61.
- [6] 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.
- [7] 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(9):11-15.
- [8] 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(6):54-58.
- [9] 中华人民共和国交通部.中华人民共和国行业标准(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.
- [10] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.水泥基土壤固化剂固化土的物理化学作用[J].岩土力学,2010(12):3741-3745.
- [11] 储诚富.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[D].南京:东南大学,2005.
- [12] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [13] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [14] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [15] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [16] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [17] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [18] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [19] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [20] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [21] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [22] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [23] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [24] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [25] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [26] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [27] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [28] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [29] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [30] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [31] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [32] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [33] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [34] 储诚富,高建恩,吴普特,等.水泥土搅拌法加固特殊软土的试验与应用研究[J].中国水土保持科学,2006(6):54-58.
- [35] 水利部水利信息中心.“八五”国家科技攻关计划(85-913-03-03)“气候变化对中国水文水资源影响及适应对策研究”技术报告[R].北京:水利部水利信息中心,1996.
- [36] 李秀彬.土地覆被变化的水文水资源效应研究:社会需求与科学问题[C]//中国地理学会自然地理专业委员会.土地覆被变化及其环境效应.北京:星球地图出版社,2002:1-6.
- [37] 余兴修,杨桂山,王瑶.土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向[J].地球科学,2004(4):191-197.
- [38] 万荣荣,杨桂山.流域土地利用/覆被变化的水文效应及洪水响应[J].湖泊科学,2004,16(3):259-264.
- [39] 王军德,李元红,李赞堂,等.基于SWAT模型的祁连山区最佳水源涵养植被模式研究:以石羊河上游杂木河流域为例[J].生态学报,2010,30(21):5875-5885.
- [40] 张建云,王国庆.气候变化对水文水资源影响研究[M].北京:科学出版社,2007.

(上接第 219 页)