

EN-1 固化剂对 4 种土壤抗剪强度的影响

丁小龙^{1,3}, 张兴昌², 王建玉¹

(1. 宁夏回族自治区环境保护执法局, 宁夏 银川 750011; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 水利部水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为了探讨离子固化剂路邦 EN-1 对黄土性土壤的固化性能。[方法] 对塬土、风沙土、黄绵土、黄棕壤 4 种土在不同固化剂掺量、养护龄期的固化进行了直剪试验。[结果] 路邦 EN-1 固化剂可以有效提高 4 种土壤的抗剪强度, 特别是大幅度提高了塬和黄棕壤的黏聚力。[结论] 固化剂的掺量并非越大越好, 掺入量过多反而会降低土壤的抗剪强度。掺量为 0.01%, 养护时间为 28 d 时固化效果最佳。路邦 EN-1 固化剂适用于黏粒含量较大的土壤, 不适用于砂粒含量较大的土壤。

关键词: 固化剂; 抗剪强度; 内摩擦角; 黏聚力

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)01-0159-04

中图分类号: S157.1, X522

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.01.030

Effect of EN-1 Soil Stabilizer on Soil Shear Strength

DING Xiaolong^{1,3}, ZHANG Xingchang², WANG Jianyu¹

(1. Environmental Monitoring Corps of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan, Ningxia 750001, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Science & Ministry of Water Resources, Research Centre on Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] To investigate the solidifying capability of soil stabilizer EN-1 on loess soil. [Methods] Direct shear experiments with 4 loessial soils of Lou soil, sand soil, loessal soil and yellow brown soil, with different solidifying agent content and curing age are conducted. [Results] EN-1 can improve the shear strength of the four types of soil, especially the cohesion of soil in Yangling District and Ankang City. [Conclusion] The amount of EN-1 needs to be appropriate, as excessive amount of EN-1 may reduce the shear strength of soil. The optimal amount of EN-1 is 0.01%, and the optimal curing age is 28 d. Soil stabilizer EN-1 is more suitable for soil with high clay content, rather than soil with high sand content.

Keywords: soil stabilizer; shear strength; internal friction angle; cohesion

黄土广泛分布于中国西北地区, 具有大孔隙性和多洞性, 结构性强, 呈现架空结构, 具有垂直节理, 在天然情况下能经常保持垂直边坡^[1]。在各种自然条件的影响下, 边坡表面土体容易出现失稳的现象, 其中, 水的冲刷作用尤为明显, 由于水流对边坡侵蚀、浸润, 使得边坡土体颗粒之间抗剪能力减小而造成的边坡表面土体失稳现象屡见不鲜^[2]。而现在很多黄土地区都是使用土壤固化剂来加固土壤, 改善路基状况和保护公路边坡。20 世纪 70 年代, 美、日等国家由于工程建设的需要, 对土壤固化技术进行了深层次的研发, 加固土壤的材料由原来单一的水泥、石灰、粉煤灰发展到专门的用来固结土壤的新材料——土壤固化剂^[3]。由于土壤固化剂具有较高的性价比, 被广泛

应用于道路路基^[4-6]、渠道防渗^[7]和水利工程^[8-9]各个领域^[10]。中国 20 世纪 80 年代开始引进这项技术, 目前已有近 50 家机构和公司在进行开发应用, 并通过实验和实际工程应用取得了一些进展, 获得了良好的效益。路邦土体固化剂是现在使用较多的土体固化剂, 在红土^[11]、无砂石和贫砂石地区^[12]以及黄土地区^[13]都有应用, 但对于沙土的研究报道不多。本文采用路邦 EN-1 作为土体固化剂, 土壤样本分别采自陕西省杨凌区的塬土, 安康市的黄棕壤, 安塞县的黄绵土和靖边县的风沙土, 依照中华人民共和国国家标准 (GB/T50123—1999) 进行试验。首先对所选土样进行击实试验, 得出土的最优含水率和最大干密度, 依据每种土的最优含水率配制试样^[14-16], 研究了在不同固化

收稿日期: 2013-12-19

修回日期: 2014-01-10

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土区典型人工植被演替过程植物—土壤水养过程及耦合”(41471437)

第一作者: 丁小龙(1985—), 男(回族), 宁夏吴忠市人, 硕士研究生, 研究方向为环境毒理与资源清洁利用。E-mail: dinxiaolong@126.com。

通信作者: 张兴昌(1965—), 男(汉族), 陕西省武功县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤学研究。E-mail: zhangxc@ms.iswc.ac.cn。

剂掺量以及不同培养龄期土壤的抗剪强度指标,为离子固化剂路邦 EN-1 在 4 种土壤地区的使用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验选用黄土分别取自陕西杨陵、安康、安塞和靖边,试验前将土样混匀风干,过 5 mm (击实实验) 和 2 mm (直剪实验) 备用,其物理性质指标见表 1。

试验选用的路邦 EN-1 固化剂,是由美国 C. S. S 技术公司生产,由溶解能力很强的酸性溶剂、天然分

散剂和氧化剂组成的合成物。路邦 EN-1 固化剂属于酸基化合物,是一种浓缩状态下无挥发性、有强烈刺激性酸味、不燃烧,有腐蚀性、溶于水的酱黑色液体,一经经过稀释,则是无毒、无公害、无污染、不破坏生态环境的高分子复合材料。硫酸含量 $>1\%$,表面活性剂含量 6% ,沸点 $282\text{ }^{\circ}\text{C}$,密度 1.709 g/cm^3 , $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时比重为 1.70, pH 值 1.05,挥发率 $<1\%$ 。路邦 EN-1 土体固化剂用来固化土体,实际上是固化剂对土体中的成分发生分解—化合—重新结晶的化学反应,最终使土体形成强度,改善其工程性质。

表 1 供试土壤的物理性质

土样	液限/%	塑限/%	塑性指数	颗粒组成/%			pH 值	有机质/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土质分类
				砂粒	粉粒	黏粒			
杨陵区塋土	26	16	10	36.08	51.73	12.19	8.03	4.5	低液限黏土
靖边县风沙土	26	13	13	91.84	6.62	1.54	8.56	14.6	含沙粒土砂
安康市黄棕壤	46	24	22	50.40	36.02	13.58	6.87	3.1	黏土质砂
安塞县黄绵土	30	17	13	66.84	26.24	6.74	8.35	0.6	粉土质砂

注:土质划分根据《土的分类标准 GBJ145—90》。

1.2 试验设计与方法

1.2.1 试验设计 试验设计固化剂掺量(0.01%, 0.05%, 0.10%, 1%)和养护龄期(7, 14, 21 和 28 d) 2 个因素;压实度为 0.95^[17],含水率分别为最优含水率。

1.2.2 制样及养护 称取一定量的风干备用土料,测其自然含水率,计算干土重量,称取相应比例的固化剂,按素土的最优含水率加水搅拌并和土料充分混合,静置于密闭容器中待含水均匀后测定含水率,按预定的干密度(0.95)制样。计算称取对应制样环刀容积的试验土料(环刀容积为 60 cm^3),用千斤顶静压成型。成型试样用塑料袋封闭放在室内自然环境中静置养护。制样密度、含水率与试验设计之差值不超过 0.02 g/cm^3 ,以素土(不掺加固化剂)作为对照。

1.2.3 试验指标及方法 观测指标为素土的最优含水率、固化土的内摩擦角和黏聚力。试验方法按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—1999)进行。含水率采用称重法测定,每样 3 个平行。击实试验采用轻型击实试验仪,单位体积击实功约为 592.2 kJ/m^3 ,分 3 层击实,每层土料的质量为 $600\sim 800\text{ g}$ (使击实后试样的高度略高于击实筒的 $1/3$),每层 25 击,以击实后各试样的含水率为横坐标,干密度为纵坐标,绘制含水率—干密度关系曲线,曲线峰值点对应的横纵坐标分别代表土样的最优含水率和最大干密度。直剪试验采用应变控制式直剪仪进行快剪试验,施加垂直压力分别为 100, 200, 300 和 400 kPa,剪切速度控制在 6 r/min 。

2 试验结果及分析

黏性土抗剪强度的两个重要参数是黏聚力 C 和内摩擦角 φ 。黏聚力包括土粒间分子引力形成的原始黏聚力和土中化合物的胶结作用形成的固化黏聚力,主要来源于黏土颗粒之间的胶结作用、静电引力、电磁引力和毛细管水压力等;内摩擦角是指岩体在垂直重力作用下发生剪切破坏时错动面的倾角,与土颗粒的滑动、体积变化阻力、颗粒重新排列和颗粒破裂等因素有关^[18]。砂土不存在黏聚力,其抗剪强度由内摩擦角 φ 决定。

2.1 击实试验

如图 1 所示,各种土样的最优含水率是塋土 17.6%,黄棕壤 18.9%,黄绵土 12.5%,风沙土 12.6%,最大干密度分别为塋土 1.67 g/cm^3 ,黄棕壤 1.56 g/cm^3 ,风沙土 1.71 g/cm^3 ,黄绵土 1.65 g/cm^3 。

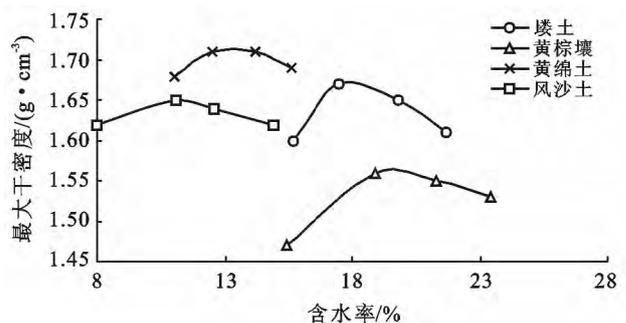


图 1 4 种土壤素土的击实试验

2.2 直剪实验

2.2.1 固化剂掺量对 4 种土壤抗剪强度的影响 如图 2 所示,以 28 d 培养期为例,在固化剂掺量为 0.01% 时,4 种土壤的内摩擦角有明显增加,矮土固化土的内摩擦角增加了 8.77°;黄棕壤固化土的内摩擦角增加了 19.53°。黄绵土的黏粒含量为 6.74%,而风沙土的黏粒含量仅为 1.54%,属于砂质土壤,因此黄绵土与风沙土的黏聚力均为 0,固化以后的内摩擦角分别增加了 2.88°和 6.48°。

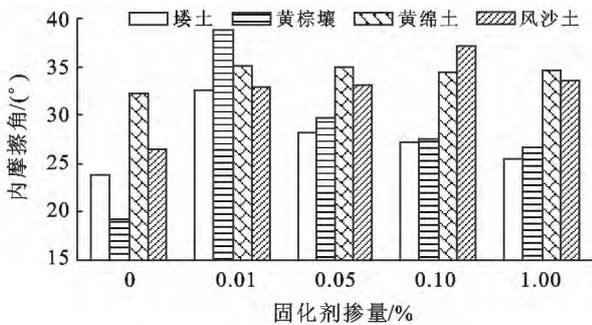


图 2 固化剂掺量对土样内摩擦角的影响(以 28 d 为例)

如图 3 所示,固化剂掺量对土样黏聚力的影响,可以看出路邦 EN-1 对黄棕壤和矮土的固化效果比较明显,特别是对黄棕壤,与对照相比当固化剂掺量为 0.01%,0.05%,0.1%和 1% 时,其黏聚力分别增加了 144.6%,136.21%,121.14%,124.49%。而对黄绵土与风沙土影响不显著,不同固化剂掺量下,它们的黏聚力依然为 0。

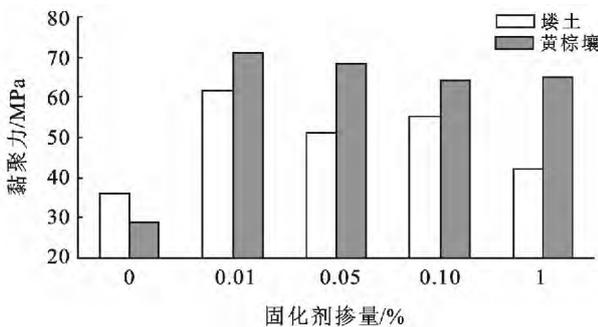


图 3 固化剂掺量对 28 d 土样黏聚力的影响

2.2.2 培养龄期对 4 种土壤抗剪强度的影响 图 4 表示不同培养龄期下土样的内摩擦角,培养龄期为 28 d 时,固化土的固化效果最佳。以固化剂掺量 0.01% 为例,矮土固化土培养 28 d 后,与培养 7 d 时相比,内摩擦角增加了 6.05°,黄棕壤固化土的内摩擦角增加了 15.66°,黄绵土固化土的内摩擦角增加了 0.46°,风沙土固化土的内摩擦角增加了 0.4°。

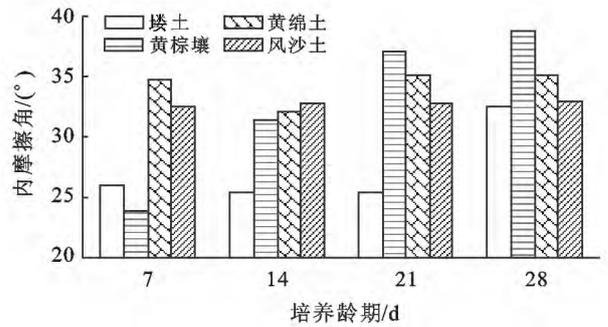


图 4 0.01% 固化剂掺量在不同培养龄期对土样内摩擦角的影响

不同培养龄期下土样的黏聚力(图 5)表明,对于矮土与黄棕壤而言,培养龄期为 28 d 时,固化土的固化效果最佳。以固化剂掺量 0.01% 为例,矮土固化土培养 28 d 后,与培养 7 d 时相比,黏聚力增加了 62.6%;黄棕壤固化土的黏聚力增加了 72.5%。黄绵土和风沙土的黏聚力依然为 0,说明 EN-1 固化剂对砂质土壤黏聚力没有影响。

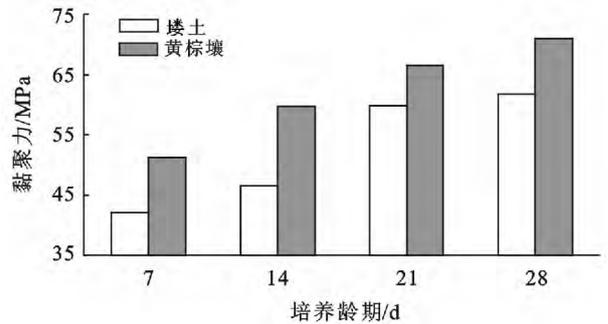


图 5 0.01% 固化剂掺量在不同培养龄期对土样黏聚力的影响

2.3 固化剂对土壤抗剪强度的影响

试验结果表明,在掺量为 0.01% 时,土样的抗剪强度较素土增加最为显著。之后随着固化剂掺量的增加,抗剪强度反而下降。因此,固化剂的掺量并非越大越好,掺入量过多反而会降低土壤的抗剪强度,从而降低固化剂的有效利用率。以 28 d 培养期为例,矮土固化土的内摩擦角增加了 8.77°,黏聚力增加了 70.1%;黄棕壤固化土的内摩擦角增加了 19.53°,黏聚力增加了 144.6%。黄绵土素土中的黏粒含量为 6.74%,而风沙土素土的黏粒含量仅为 1.54%,属于砂质土壤,因此黄绵土固化土与风沙土固化土的黏聚力均为 0,固化以后内摩擦角分别增加了 2.88°和 6.48°。

路邦 EN-1 对土壤进行固化时,对黏性土壤的固化效果比较明显,对砂质土壤的固化效果不明显,可能是因为黏性土的抗剪强度主要与连结有关,路邦 EN-1 属于电离子溶液类固化剂,其固化的机理主要是经水稀释后,与土壤中的矿物质发生溶解、结晶、吸

收、扩散、再结晶链式化学反应,增强黏土颗粒之间的连结结构。对砂土而言,由于其黏粒含量很低,原始黏聚力与固化黏聚力低,抗剪强度主要是由颗粒间的摩擦力组成,与粒度、密实度和含水情况有关,因此固化剂的化学作用对抗剪强度的影响不明显。

2.4 培养龄期对土壤抗剪强度的影响

如表 2 所示,培养龄期为 28 d 时,固化土的固化效果最佳。以固化剂掺量 0.01% 为例,黄土固化土培养 28 d 后,与培养 7 d 时相比,内摩擦角增加了 6.05° ,黏聚力增加了 62.6%;黄棕壤固化的内摩擦角增加了 15.66° ,黏聚力增加了 72.5%;黄绵土固化土的内摩擦角增加了 0.46° ,风沙土固化土的内摩擦角增加了 0.4° 。

在土壤固化剂加入比例相同的情况下,对黏土而言,土样静置时间越长,固化剂因其较高的电荷强度,置换出更多土颗粒表面的阳离子,促使土颗粒表面双电层厚度减薄的越多,土料间的排斥力减小程度越大,土颗粒之间的吸引力增加的更多,促使颗粒间的连结力增强,土体骨架更坚硬,相应地使土体承受外荷载的能力增强,抵抗变形和破坏的能力提高,因而凝聚力和内摩擦角增大^[11]。对砂土而言,影响抗剪强度的因素的粒度、密实度和含水情况与颗粒间的连结力无关,因此,培养龄期的长短对抗剪强度的影响也不显著。

3 结论

(1) 路邦 EN-1 固化剂可以有效提高黄土、黄棕壤、黄绵土和风沙土土壤的抗剪强度,特别是大幅度提高了黄土和黄棕壤土壤的黏聚力;本实验中,最佳掺量为 0.01%,养护时间越长,固化效果越好。在最佳条件下,与素土相比,黄土固化土的内摩擦角增加了 8.77° ,黏聚力增加了 70.1%;黄棕壤固化土的内摩擦角增加了 19.53° ,黏聚力增加了 144.6%;黄绵土固化土与风沙土固化土的内摩擦角分别增加了 2.88° 和 6.48° 。

(2) 建议在使用路邦 EN-1 固化剂时掺量以 0.01% 为宜,养护时间大于 28 d。

(3) 路邦 EN-1 固化剂对黄土、黄棕壤土壤的影响效果明显优于对黄绵土和风沙土的土壤,路邦 EN-1 固化剂适用于黏粒含量较大的土壤,不适用于砂粒含量较大的土壤。

[参 考 文 献]

- [1] 牛育华,李仲谨,郝明德. 保水剂在黄土高原旱地农业应用效果的研究[J]. 水土保持研究,2007,14(3):11-12.
- [2] 张丽萍. 黄土边坡坡面稳定及防治技术研究[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.
- [3] 樊恒辉,高建恩,吴普特. 土壤固化剂研究现状与展望[J]. 西北农林科技大学学报,2006(2):141-146.
- [4] Heikki K. Stabilization of clay with inorganic by-products[J]. Journal of Materials of Civil Engineering, 2000,12(4):307-309.
- [5] Vatsala A, Nova R, Srinivasa Murthy B R. Elastoplastic model for cemented soils[J]. Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, 2001,127(8):679-687.
- [6] 戴文婷,陈瑶,陈星. BS-100 型土壤固化剂在季冻区的路用性能试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(8):2257-2261.
- [7] 张海燕,张传森,李元婷,等. 采用土壤固化剂改善渠道基本性能初探[J]. 水利与建筑工程学报,2003,1(2):38-40.
- [8] 邵玉芳,徐日庆,刘增永,等. 一种新型固化土的试验研究[J]. 浙江大学学报:工业版,2006,40(7):1196-1200.
- [9] 雷胜友,惠会清. 固化液改良膨胀土性能的试验研究[J]. 岩土工程学报,2004,26(5):612-615.
- [10] 张丽萍,张兴昌,孙强. SSA 土壤强固剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报,2009,25(7):45-49.
- [11] 金克盛,黄英,龚羊庆. 路邦土壤强固剂对红土力学特性的影响研究[J]. 云南水力发电,2005,21(1):16-19.
- [12] 李惠,毕宏宇,田月华. 美国路邦 EN-1 型土壤强固剂在无砂石和贫砂石地区的应用[J]. 黑龙江交通科技,2009(10):22-23.
- [13] 张丽萍,张兴昌,孙强. 2 种离子固化剂改善黄土抗剪强度和抗渗性的研究[J]. 节水灌溉,2009(5):35-38.
- [14] 李翠华,张路,詹长久. 固化剂对土的性能影响的试验研究[J]. 武汉大学学报:工学版,2003,36(4):92-94.
- [15] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:中国水利电力出版社,1984:23-26.
- [16] 中华人民共和国水利部. GB/T50123-1999 土工试验方法标准[S]. 北京:中国计划出版社,1999.
- [17] 张丽萍,张兴昌,孙强. EN-1 型土壤固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. 中国水土保持科学,2009,7(4):60-65.
- [18] 唐朝生,堪文武,高玮,等. 含沙量对聚丙烯纤维加筋黏性土强度影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(S1):2968-2973.