



HAS 土壤固化剂 在长江航道削坡土上的固化试验

况宏伟, 余 珍, 雷国平, 谷祖鹏, 唐正涛

(长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 通过开展 HAS 高强耐水土壤固化剂 (HAS 固化剂) 室内固化长江航道削坡土的试验, 以及将成型固化土泡水及放置于户外自然环境的试验, 分析了不同的固化剂、石屑和土样的配比设计在不同时间和不同条件下对无侧限抗压强度的影响, 试验得到了 HAS 固化土的无侧限抗压强度的主要影响因素和变化规律。研究成果为实现长江航道削坡土的资源化利用提供了一定的技术基础。

关键词: 长江航道; 削坡土; 土壤固化剂; 无侧限抗压强度; 固化; 耐水性; 标准养护

中图分类号: TU 413

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)12-0205-06

Experimental study on HAS soil stabilizer applied to Changjiang waterway slope cutting soil

KUANG Hong-wei, YU Zhen, LEI Guo-ping, GU Zu-peng, TANG Zheng-tao

(Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: Based on the experimental study on Changjiang waterway slope cutting soil stabilization by HAS soil stabilizer and the experiment of soaking stabilized soil in the water and placing in outdoor, we analyze the influential factors of compressive strength at different time and conditions and proportion design of soil stabilizer, chips and soil, and obtain the changing rules and main influential factors of compressive strength of stabilized soil. The study results provide the technical basis for the utilization of Changjiang waterway slope cutting soil.

Keywords: Changjiang waterway; slope cutting soil; soil stabilizer; unconfined compressive strength; stabilization; water-resistance; standard curing

在长江航道整治护岸工程中, 绝大多数为斜坡式护岸, 单滩整治工程岸坡开挖削坡总量往往达数万立方米或数十万立方米。这部分削坡弃土土质复杂, 物理力学指标较差, 未经技术处理一般不能在工程中直接应用, 也不允许直接抛入江中。目前的处理方式: 在距坡顶马道 30 m 以外征地, 将弃土平铺堆积 (一般要求堆高不超过 2 m), 这样处理存在很大的弊病: 1) 对护岸工程结构稳定性产生不利影响; 2) 弃土涉及到复杂的征地、补偿等建设外部环境问题; 3) 弃土裸露堆积造成严重水土流失, 影响质量的总体评价。因此加强对

长江航道削坡弃土的处理, 解决工程削坡弃土的二次利用问题, 研究削坡弃土的固化应用有着明显的社会效益。

土壤固化剂是一种性能优异的新型土工复合材料, 能够快速显著地改善土壤的物理-力学性质。土壤固化剂在与土体混合后, 通过一系列物理化学反应, 能够降低土体的孔隙率、胶结土颗粒、提高土体的压密程度, 使土体成为致密的胶凝材料。目前土壤固化剂广泛地应用于公路的基层和底基层及水利工程等^[1-5]。土壤固化剂种类繁多, 主要有水化类、电离子类和生物酶类^[6]。本

收稿日期: 2014-10-08

作者简介: 况宏伟 (1981—), 男, 博士, 工程师, 从事河流演变的研究和航道工程的设计。

研究选取水化类中 HAS 固化剂。采取固化剂和适当的添加料来固化长江航道削坡土,使其满足强度、耐水性和持久性,期望可以将削坡弃土改造为可供航道整治工程使用的原材料,用于航道整治中压载或镇脚,从而达到减少弃土和使弃土得到再利用的目的,考虑到航道实际应用中护坡受撞击的可能性,要求:1) 固化土在自然环境和浸泡条件下强度稳定;2) 固化土 90 d 泡水强度达 8 MPa。

本文通过研究 HAS 固化土在不同泡水时间和不同放置条件下的无侧限抗压强度,分析 HAS 固化土强度的影响因素和变化规律,探讨将其应用于航道整治工程的最佳配合比和对它的经济分析,为实现削坡土的资源化再利用提供技术指导。

1 试验介绍

选用武汉产的 HAS 固化剂。HAS 固化剂是以工业废渣为主要原材料生产的一种水硬性硅铝基灰渣胶凝材料。该产品能有效固结土壤、粉煤灰、尾矿等细粒料。HAS 固化剂与土壤混合后,首先

形成针状结晶体,成为土壤空隙间的骨架,硅酸盐类水化物填充在骨架中使固化更密实,最后是土壤固化剂与部分土壤发生化学反应,使加固土具有较高的强度。HAS 固化剂固结对象广泛,可以用于淤泥固化、矿山尾矿胶结填充、重金属固化、道路路基和渠道衬砌、粘结桩软基处理。本试验选用的 HAS 固化剂型号为 H4000。

长江航道削坡土主要是砂土和黏土,本试验的砂土和黏土分别取自长江荆江周天河段的天星洲和新厂镇边滩。本试验研究用 HAS 固化剂分别固化砂土和黏土,试验前分别对其锤细、烘干备用。砂土土样的级配分析见表 1,砂土的平均中值粒径 $D_{50} = 0.1323 \text{ mm}$,该砂土为粉细砂。根据地勘资料,黏土取土位置是第 4 系全新统 (Q_4^{al}) 冲积层上层的②₁ 灰黄色粉质黏土。该土层的物理力学参数建议值为:含水率 29.8%,湿密度 1.88 t/m^3 ,干密度 1.45 t/m^3 ,孔隙比 2.72,压缩系数 0.31 MPa^{-1} ,压缩模量 6.18 MPa,粘聚力 32 kPa,摩擦角 11° 。

表 1 砂土土样级配

粒径/mm	2	1	0.5	0.355	0.25	0.18	0.125	0.09	0.062	0.045	0.031
累计含量/%	<100.0	<99.69	<99.59	<99.45	<99.31	<96.85	<40.18	<4.77	<1.28	<0.48	<0.00

2 试验结果分析

2.1 试验设计

本研究开展有石屑和无石屑的对比试验。长江航道削坡土的固化实际要求尽可能多用削坡土,尽可能不用或少用石屑。根据 HAS 固化剂应用的搅拌桩中石屑不少于 30%^[7]和湖北中固科技股份有限公司资料说明 HAS 固化土在长江铜陵段的护岸工程第 1 层加有 50%、第 2 层加有 70% 石屑的 HAS 固化剂工程应用情况,本研究开展的是无石屑和有 35% 石屑的对比固化试验。由于 HAS 固化试验组次较多,就没有开展击实试验。试验固化土中含水量通过逐渐增减水量来试压获得较好的固化效果,即含水量为经验取值。试验的不同配合比及其含水量见表 2。

2.2 试件制备

HAS 固化土成型压强为 20 MPa。其中不加石

屑的固化土按 $\phi 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 尺寸制备,所施加的外在压力是 40 kN;掺加石屑的固化土按 $\phi 10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 尺寸制备,所施加的外在压力是 160 kN。固化土成型后置于标准养护室(温度 $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,湿度为 95% 以上)中养护。固化土制备、标准养护和固化土无侧限抗压强度检测依照 JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》^[8]开展。

2.3 固化土的结果

固化土试验开展 2 次,第 1 次试验只考察标准养护 28 d 的抗压强度和标养 28 d 后泡水中不同时间的强度。第 2 次试验考察了标养 7 d 和 28 d 的抗压强度和标养 28 d 后泡水、户外和继续标养不同时间的强度。2 次具体试验配合比及强度结果见表 2、3。第 1 次成型日期 2013 年 5 月 28 日—6 月 5 日,第 2 次成型日期 2013 年 12 月 2 日—8 日。

表 2 HAS 固化土第 1 次试验无侧限抗压强度

材料	编号	比例	含水量/%	抗压强度/MPa			
				标养 28 d	泡水 90 d	泡水 180 d	泡水 360 d
石屑:砂土:固化剂	S1	0:89:11	9.90	4.07	3.590	4.07	-
	S2	0:85:15	10.46	7.78	7.778	7.69	6.604
	S3	0:80:20	9.21	4.37	10.258	10.61	9.967
	S4	0:75:25	11.81	11.15	12.922	10.65	10.240
	S5	35:54:11	8.41	15.01	16.707	17.63	17.092
	S6	35:50:15	9.62	22.48	26.630	29.22	32.405
	S7	35:45:20	9.93	29.32	37.930	39.78	36.456
	S8	35:40:25	9.24	35.64	44.220	40.62	39.784
石屑:黏土:固化剂	N1	0:93:7	17.71	2.10	3.080	2.97	-
	N2	0:89:11	19.36	2.60	3.730	4.82	6.811
	N3	0:85:15	18.65	3.00	7.030	3.34	6.432
	N4	0:80:20	18.81	5.10	7.550	8.37	9.754
	N5	35:58:7	16.67	5.60	7.720	4.88	7.583
	N6	35:54:11	12.84	10.60	17.250	14.77	16.998
	N7	35:50:15	11.16	11.50	20.160	20.27	22.805
	N8	35:45:20	12.25	17.30	29.290	29.38	34.267

注: 标注“-”的为试件因故丢失, 没有检测。

表 3 HAS 固化土第 2 次试验无侧限抗压强度结果

材料	编号	比例	含水量/%	抗压强度/MPa					
				标养 7 d	标养 28 d	标养 90 d	泡水 90 d	户外 90 d	泡水 180 d
石屑:砂土:固化剂	ZS1	0:89:11	9.90	2.793	3.92	3.701	4.497	-	3.716
	ZS2	0:85:15	10.46	4.093	6.07	6.432	6.407	-	6.714
	ZS3	0:80:20	9.21	5.833	7.49	7.683	10.225	-	14.117
	ZS4	0:75:25	11.81	7.063	8.82	13.678	12.905	9.945	10.281
	ZS5	35:54:11	8.41	8.341	11.09	13.261	14.923	12.882	16.177
	ZS6	35:50:15	9.62	14.072	18.31	23.618	20.886	21.107	26.867
	ZS7	35:45:20	9.93	20.269	19.18	33.681	32.748	33.702	38.931
	ZS8	35:40:25	9.24	32.070	39.10	45.299	44.846	46.671	51.057
石屑:黏土:固化剂	ZN1	0:93:7	17.71	0.406	-	0.979	-	散	-
	ZN2	0:89:11	19.36	1.276	-	2.138	2.196	散	2.902
	ZN3	0:85:15	18.65	1.630	1.95	4.222	4.039	散	4.886
	ZN4	0:80:20	18.81	2.319	3.31	4.172	5.158	散	7.464
	ZN5	35:58:7	16.67	3.820	2.57	3.593	3.426	2.845	11.036
	ZN6	35:54:11	12.84	6.290	7.68	10.387	11.629	9.592	19.014
	ZN7	35:50:15	11.16	7.280	13.58	16.508	16.440	16.014	22.633
	ZN8	35:45:20	12.25	10.950	15.560	20.560	18.198	20.254	25.908

注: 标注“-”的为试件因故丢失, 没有检测; 标注“散”的是试件崩解散体。

2.3.1 两次试验结果的比较

两次试验固化土浸泡水中后都没有崩解, 说明其耐水性较好。将两次试验泡水 90 d 的强度结果进行对比。不论是有石屑还是没有石屑的配合比设计, 在同配合比条件下, 固化砂土的 90 d 泡

水强度相差不大。但第 2 次比第 1 次普遍略小, 最大到 22%, 最小到小于 2% (图 1), 尤其是固化剂含量越高, 两次强度差别越小。固化黏土的 90 d 泡水强度两次相差略微偏大, 尤其是无石屑固化黏土, 第 2 次比第 1 次小约 40% (图 1)。两次

试验中各项条件保持不变，但结果仍然出现不同。初步估计两次制备时间不一样是主要原因。第1次是在气温较高的6月份，第2次是在12月份。温度低的第2次的试验结果略偏低。为了保证结果在实际应用时偏安全，后面的分析将用第2次的试验结果。

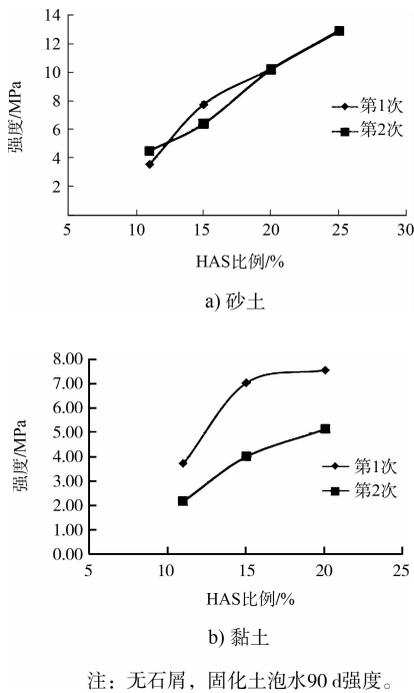


图1 HAS 两次固化砂土、黏土强度比较

2.3.2 不同标养及泡水时间的强度比较

第2次试验和第1次试验结果有着相似的强度发展趋势，即固化土标养及泡水强度随着时间都有明显的增长。对于第2次试验，除了图2c)无石屑固化黏土4个试件因缺失没有检测以外(图中强度为0)，试验强度增长是逐渐加大的。固化剂含量高，固化土的强度就大，并且固化剂含量大的强度值随着时间总是大于固化剂含量低的固化土强度值（除砂土无石屑，固化剂含量25%固化土在泡水180 d情况下），即固化剂高的强度值曲线总在固化剂低的强度曲线之上。掺加石屑的固化土强度与无石屑的固化土相比，强度增加更迅速，见图2b)与a)、d)与c)对比。以泡水7 d为例，在固化剂含量一样条件下，有石屑的砂土固化土强度值是无石屑的2.9~4.5倍，强度值大5.5~25.0 MPa；有石屑的黏土固化土强度值

是无石屑的4.5倍以上，强度值大3.4~8.6 MPa。

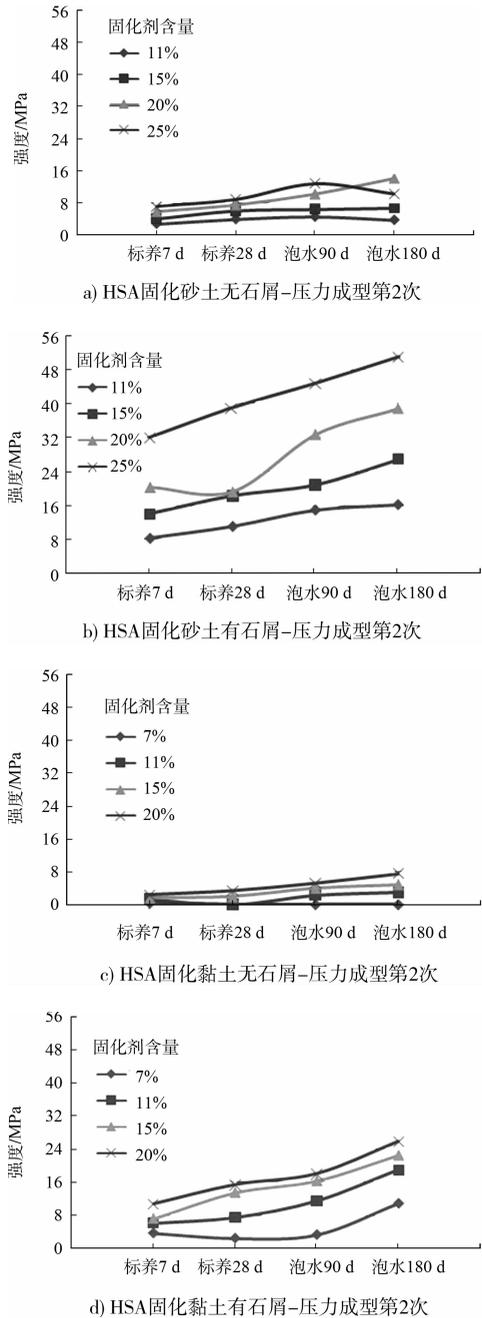
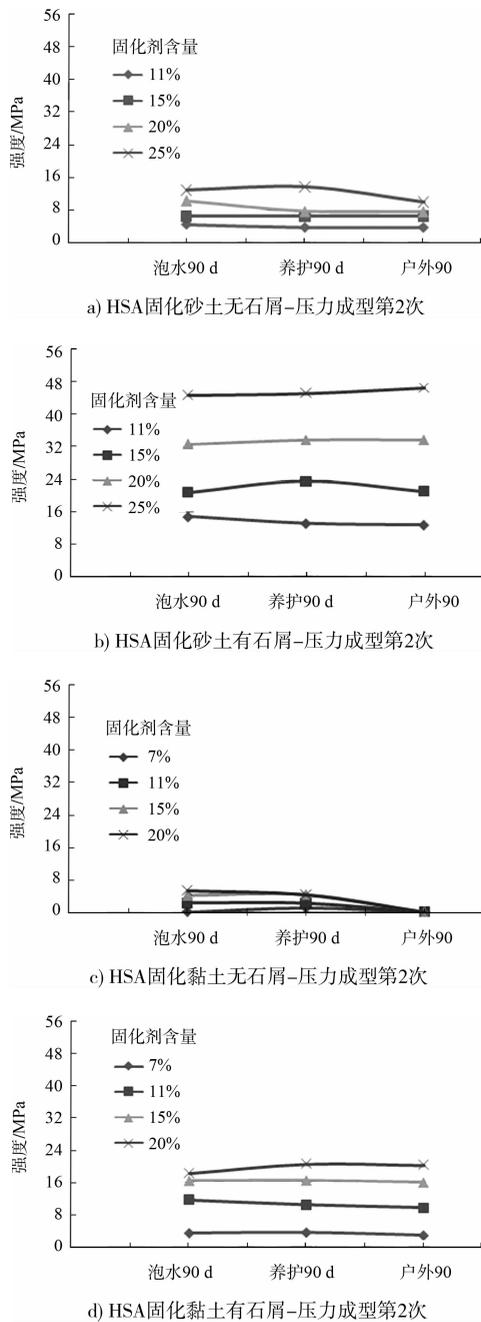


图2 HAS 固化土无侧限抗压强度比较

2.3.3 不同条件下的比较

固化土在泡水、标准养护和户外自然3种情况下的强度比较见图3。从图3中可以清晰看出，没有石屑的固化土强度(图3 a)、c))差别略大，有石屑的固化土(图3b)、d))强度变化不大。没有石屑的固化土特点是泡水强度要比标养强度大，标养强度要比户外强度大。在图3 a)、c)中表现就是强度曲线是向下的。尤其是没有石屑的黏土固化

土在户外情况下崩解, 强度为 0。对于有石屑固化土(图 3b)、d), 总体规律是固化剂含量低的固化土泡水强度较大, 户外强度最低, 强度曲线向下。随着固化剂含量增加, 强度曲线变平; 固化剂含量继续提高, 强度曲线则向上, 此时户外强度略微大于标养强度, 泡水强度最低。当固化剂含量一样, 有石屑的固化土强度值是无石屑固化土强度的 3 倍左右。



注: 户外 90 d 试件缺失, 采用的是养护强度数据; 泡水、标准养护和户外自然 90 d 都是在标养 28 d 后继续在不同条件下开展 90 d。

图 3 第 2 次试验中固化土强度比较

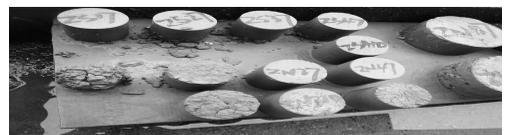
对于没有石屑的固化黏土在户外 90 d 情况下, 所有的 4 个配比固化土全部崩解, 其最后崩解状态见图 4。固化剂含量最低 (7%) 的 ZN1 最先崩解, 然后是其它含量的固化黏土。崩解原因是无石屑的固化黏土不能承受户外的自然雨雪冻融条件。可以看出, 旁边砂土的固化土和有石屑的固化黏土完好无损。HAS 固化剂固化砂土的耐久性和强度比其黏土固化土要好。



a) 2014年1月11日



b) 2014年2月10日



c) 2014年3月3日



d) 2014年5月9日

图 4 无石屑固化黏土户外崩解过程

根据固化土在航道工程中应用的两个条件和经济性的考虑, 对有、无石屑的固化砂土和黏土中选定的配合比是能满足 2 个条件的固化剂含量最小的配合比, 即 ZS3 (石屑:砂土:固化剂 = 0:80:20)、ZS5 (石屑:黏土:固化剂 = 35:54:11) 和 ZN6 (石屑:砂土:固化剂 = 35:54:11)。如果按照混凝土 C15 的强度要求, 则 ZS6 和 ZN7 满足要求。

2.4 技术经济分析与评价

根据试验结果分析, HAS 固化剂作为一种新型建筑材料, 应用于强度要求较低、有耐久性和持久性的航道工程建设中, 技术上是可行的, 其固化砂土的效果比固化黏土的效果显著。为了便于推广应用, 必须对其经济造价进行分

析评价, 将其造价与混凝土造价进行比较。其中材料单价成本为: HAS 固化剂 550 元/t, 石屑 60 元/t, 原状土 15 元/m³。运距为 250 km, 运费 0.40 元/(km·t)。固化土的密度根据试验结果给出, 在不考虑压制费用情况下, 生产 1 m³ 固化土材料费见表 4。

表 4 HAS 固化材料价格分析

土类别	石屑比例/%	编号	固化剂比例/%	第 2 次试验		密度/(kg·m ⁻³)	生产 1 m ³ 的材料费/元
				标养 28 d	泡水 90 d		
砂土	0	ZS3	20	7.49	10.225	1 951	268.63
	35	ZS5	11	11.09	14.923	2 090	208.33
		ZS6	15	18.31	20.886	2 199	275.58
黏土	35	ZN6	11	7.68	11.629	2 290	226.83
		ZN7	15	13.58	16.440	2 241	280.56

以混凝土生产六角块的基价是 260 元/m³, 市场价是 404 元/m³[9]。由经济分析可见, 以 HAS 固化剂生产 1 m³ 的固化土材料费用在 208 ~ 281 元, 已经较接近混凝土生产的六角混凝土块费用, 这还不包括固化土压制所需人工、机械和电力费用。由经济分析可见, HAS 固化剂用来固化长江航道削坡土, 强度满足技术要求, 但造价偏高。应在保证技术的条件下, 努力降低固化土的固化过程费用, 使其市场费用低于混凝土制备的市场价格, 固化航道削坡土才有广阔的市场应用前景。

3 结论

通过固化试验及不同时间不同条件下对固化土的试验, 证明 HAS 固化剂固化航道削坡土在 20 MPa 压强下成型的固化土在一定固化剂含量和石屑比例下, 能够获得满足航道工程技术要求的强度、耐久性和耐久性要求。

1) HAS 固化黏土在户外雨雪冻融环境下, 会崩解。

2) 在其它同等条件下 HAS 固化剂含量高, 固化土强度也高; 同配比的固化土强度随泡水时间增加而变大; 在固化剂含量一样的条件下, 掺加石屑的固化土强度是无石屑的 3 倍左右。

3) 对 HAS 固化土应努力降低固化过程费用,

使其低于混凝土的市场价才有广阔的市场应用可能。

由于试验含水量为经验取值, 为更好地发挥固化土特性, 在固化土应用时还应开展击实试验研究, 得到其最佳含水量和最大干密度。

参考文献:

- [1] 乐旭东. 土壤固化剂稳定砂土的路用性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2011.
- [2] 齐铁军. 泰然酶固化土技术室内试验研究[J]. 科技创新导报, 2007(33): 154-155.
- [3] 魏伟, 彭军, 张华. 土壤固化剂在水利工程中的应用试验[J]. 宁夏工程技术, 2004(2): 174-178.
- [4] 涂晋. HAS 固化粉煤灰作渠道衬砌材料的应用试验研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [5] RISN-TG003—2007 土壤固化剂应用技术导则[S].
- [6] 李刚, 张振, 王红, 等. 土壤固化剂在天津市堤防道路上的应用研究[J]. 海河水利, 2008(3): 58-60.
- [7] WJG 219—2012 武汉市土壤固化剂粘结桩复合地基技术规范[S].
- [8] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [9] 长江航道规划设计研究院. 长江下游东流水道航道整治二期工程初步设计第三篇: 工程概算[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2012.

(本文编辑 武亚庆)