

工业废渣土壤改良剂对土壤固化性能试验分析*

Experimental Analysis of Soil Curing Properties of Industrial Waste Residue Soil Modifier

赵文波¹, 于世卿¹, 褚付克², 黄启龙¹, 赵秀松¹, 胡海华¹

(1. 中铁二十三局集团第四工程有限公司, 四川 成都 610000;
2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 450000)

摘要: 本文对比研究了水泥和以工业废渣为材料制备的2种土壤改良剂对路床土壤的改良作用。研究表明: 改良剂1#和P·F 32.5水泥基本具有相等的改性效果, 改良剂2#由于具有更高的钙含量, CBR和7d无侧限强度提升效果更明显; 材料成本降低10%~20%, 具有明显的价格优势, 相对水泥不会对周围农田产生环境破坏; 与传统的水泥固化剂施工工艺相同, 具有无需增加额外施工成本的优势; 同时改良剂2#对路基承载力及固化土层弹性模量的改善效果明显优于P·F 32.5水泥。

关键词: 工业废渣; 改良剂; 稳定土; CBR; 无侧限抗压强度

中图分类号: U414.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2023)06-0064-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.06.010

ZHAO Wenbo¹, YU Shiqing¹, CHU Fuke², HUANG Qilong¹, ZHAO Xiusong¹, HU Haihua¹

(1. China Railway 23rd Bureau Group 4th Engineering Co., Ltd., Chengdu 610000, China;

2. Henan Provincial Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China)

Abstract: This paper studies and compared the effect of cement and soil modifier prepared from industrial waste residue on the improvement of road bed soil. The results showed that modifier 1# and P·F 32.5 cement have almost the same modification effect; due to its higher calcium content, the CBR and 7 d unconfined strength of modifier 2# were improved more significantly. The material cost of modifier was reduced by 10%~20%, which had obvious price advantage. Compared with cement, Environmental damage was not caused to the surrounding farmland. With the traditional cement curing agent application process, it had the advantage of no additional construction cost. Meanwhile, the improvement effect of modifier 2# on the bearing capacity of roadbed and elastic modulus of solidified soil layer was obviously better than that of P·F 32.5 cement.

Keywords: industrial waste residue; modifier; stabilized soil; CBR; unconfined strength

0 引言

在我国豫北平原路基填方施工过程中, 土壤具有天然含水率高、塑性指数高、液限高, 强度低, 水稳性差等不良特征, 给施工巨大困难。传统的水泥、石灰和水泥石灰综合固化剂等胶凝材料^[1], 因其具备相对可观的强度和性能, 作为固

* 基金项目: 河南省交通运输厅科技项目项目(2021J9)。

作者简介: 赵文波(1972—), 男, 高级工程师, 主要从事土木工程建设管理工作。

收稿日期: 2023-09-26

化剂被广泛地应用在道路基础工程领域。但其早期强度高，水泥水化作用产生 C-S-H 胶结物过多引起体积收缩而导致路面开裂等问题^[2-4]。

利用工业废渣制备土壤改良剂技术用于道路施工，实现工业固体废物的资源化利用，成为新的研究方向，受到越来越多人的青睐。不仅可以缓解资源短缺、筑路材料匮乏且价格上涨的问题，还有助于实现节能减排和降低造价的目的。具有明显的经济效益和广阔的应用前景^[5-7]。

本文以电石渣、粉煤灰、钢渣粉、水渣、消石灰等原材料，制备工业废渣土壤改良剂，进行无侧限抗压强度、承载比（CBR）、耐水性能等试验，研究工业废渣土壤改良剂对路基填土的强度特性和路用性能改善效果，为工业固废在道路路

基、底基层中的应用提供科学依据。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

(1) 试验用土：本试验用土取自豫北平原某高速公路工程不同取土场，土质含水量高，黏聚性强，土的参数如表 1 所示。

(2) 水泥：水泥采用施工现场使用的 P·F 32.5 水泥，其主要物理学性能如表 3 所示。

(3) 工业废渣土壤改良剂：以电石渣、钢渣粉、水渣、消石灰等工业废渣为原材料，按一定比例，经过烘干除水、磨碎、筛分等一定工艺制备的环保型胶凝材料主要成分如表 2 所示，物理学性能如表 3 所示。

表 1 土的基本参数
Table 1 Basic parameters of soil

取土编号	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	自由膨胀率/%	累计通过粒径/mm 百分率/%					
					5	2	1	0.5	0.25	0.075
1	33.1	18.5	14.6	39	100	97.6	93.1	86.2	79.3	57.4
2	39	21.7	17.3	45	100	100	92.32	89.73	84.22	62.31
3	38.7	21.6	17.1	59	100	98.8	94.3	88.6	81.4	51.3
4	48.2	24.3	23.9	45	100	100	97.6	94.2	86.4	55.9

表 2 工业废渣土壤改良剂主要化学成分
Table 2 Main chemical constituents of industrial waste residue soil modifier

改良剂成分	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	SiO ₂	SiO ₃
改良剂 1#	6.94	15.33	31.57	6.24	16.42	13.54
改良剂 2#	6.10	12.17	42.71	4.91	13.62	10.06

表 3 不同固化剂物理力学性能
Table 3 Physical and mechanical properties of different curing agents

型号	安定性	抗压强度/MPa		凝结时间/min		比表面积/(m ² /kg)	烧失量/%
		3 d	28 d	初凝	终凝		
改良剂 1#	合格	12.4	34.5	720	1410	404	2.57
改良剂 2#	合格	14.6	37.5	630	1140	382	2.86
P·F 32.5 水泥	合格	17.2	35.8	184	243	322	3.47

1.2 试验方案

使用两种改良剂和水泥分别采用 3%、4% 掺量下（土壤固化剂掺量为土壤固化剂与土壤的质量之比），对 4 种土进行改良效果分析试验。按照 JTG E40-2007《公路土工试验规程》分别进行击实、承载比（CBR）、无侧限抗压强度和耐水性能等试验，检验其路用性能。

2 土壤固化剂作用原理

土壤固化剂的作用机理包括物理过程和化学过程。物理过程是土体强度形成最基本的加固手段，土体在荷载作用下变得密实，使土体强度增长。化学过程是指土壤固化剂中的 CaO 与土中的水分形成 Ca(OH)₂，所含有的 SiO₂、Al₂O₃ 和 Ca(OH)₂ 发生物理化学反应形成水化硅酸钙以及水化铝酸钙，把不固结的土颗粒凝结成块状，显著增加固化土的强度。同时残留的 Ca(OH)₂ 能够和二氧化碳发生反应，变为 CaCO₃，本质上无法增加固化剂的强度，但 CaCO₃ 能填充土体间隙，间接增加土体强度。

3 试验结果与分析

使用改良剂 1#、改良剂 2# 和 P·F 32.5 水泥分别采用 3%、4% 掺量下对 4 种土的击实、承载比（CBR）、无侧限抗压强度等试验结果如表 4 所示。

表 4 试验测试结果
Table 4 Test results

编号	材料	掺量/%	最大干密度 / (g/cm ³)	最佳含水率 /%	CBR/%			无侧限抗压强度 /MPa (K=96%)
					93 区	94 区	96 区	
1	改良剂 1#	3.0	1.873	12.9	27.4	33.7	45.2	0.59
	改良剂 2#	3.0	1.860	13.2	31.3	36.5	50.0	0.67
	水泥	3.0	1.890	13.4	30.4	33.8	43.0	0.62
	改良剂 1#	4.0	1.862	13.4	47.4	50.9	57.6	0.74
	改良剂 2#	4.0	1.851	13.7	50.5	53.2	61.9	0.90
	水泥	4.0	1.882	13.6	46.1	50.2	58.3	0.80
2	改良剂 1#	3.0	1.876	13.8	17.6	19.7	25.9	0.56
	改良剂 2#	3.0	1.868	14.2	21.2	23.0	28.5	0.60
	水泥	3.0	1.893	13.4	18.7	21.0	27.8	0.57
	改良剂 1#	4.0	1.857	14.2	33.7	36.4	42.9	0.77
	改良剂 2#	4.0	1.850	14.6	36.5	39.8	47.2	0.85
	水泥	4.0	1.870	14.1	35.2	37.6	43.8	0.76
3	改良剂 1#	3.0	1.863	13.3	45.1	51.2	59.6	0.55
	改良剂 2#	3.0	1.857	13.8	50.4	55.3	65.1	0.64
	水泥	3.0	1.884	13.2	43.2	46.1	52.6	0.59
	改良剂 1#	4.0	1.842	14.8	59.6	62.4	67.4	0.73
	改良剂 2#	4.0	1.831	15.6	66.7	71.1	81.2	0.80
	水泥	4.0	1.855	14.6	57.2	59.5	65.8	0.70
4	改良剂 1#	3.0	1.825	12.8	44.2	47.3	50.6	0.62
	改良剂 2#	3.0	1.818	13.0	53.5	54.9	60.3	0.67
	水泥	3.0	1.840	15.0	40.8	42.3	47.9	0.57
	改良剂 1#	4.0	1.820	14.7	53.7	56.4	67.6	0.80
	改良剂 2#	4.0	1.817	15.1	64.9	69.8	81.8	0.85
	水泥	4.0	1.825	15.2	55.1	56.8	65.2	0.76

3.1 对土样物理性质的影响

使用改良剂 1#、改良剂 2#和 P·F 32.5 水泥分别采用 3%、4%掺量下对 4 种土的击实试验,测得每种素土不同固化剂、不同掺量下的最大理论密度如图 1 所示,最佳含水率如图 2 所示。

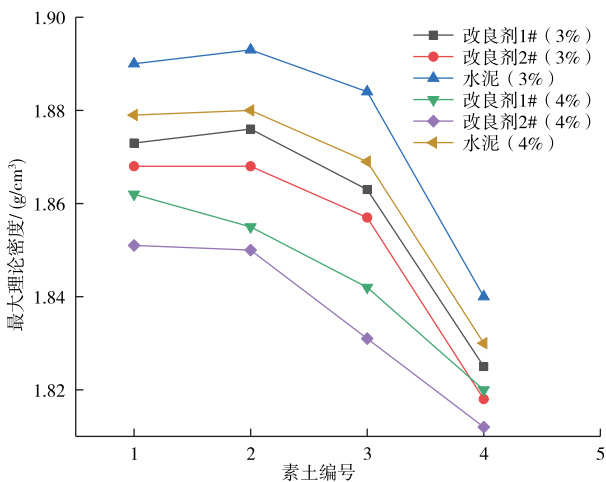


图 1 土的最大理论密度变化趋势

Fig. 1 The trend of maximum theoretical density of soil

稳定土由素土、固化剂和水 3 部分组成,其中素土占总量的 80%以上,因此,密度主要受素土影响。由图 1 得出,随着土的种类不同,相同固化剂相同掺量下的最大理论密度保持相同的变化趋势。同类型的土,相同掺量下最大理论密度变化趋势是:水泥>改良剂 1#>改良剂 2#,这是因为水泥的密度比改良剂高,同时由于改良剂 1#含有更高的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 , 密度高于改良剂 2#。并且由于水泥、改良剂密度均小于素土;4%掺量下比 3%含有更多水(水的密度远低于水泥、改良剂),导致 4%掺量的改良剂稳定土最大理论密度小于 3%掺量。

由图 2 得出,最佳含水率同样受土的种类影响,基本保持相同的变化趋势。同类型的土,4%掺量下的最佳含水率高于 3%,这是由于水泥和改良剂中含有超过 30%的 CaO , CaO 起固化作用需要大量水的缘故。 CaO 起固化作用需要的水远高于 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 , 含有更高 CaO 的改良剂 2#的最

佳含水率高于改良剂 1#。

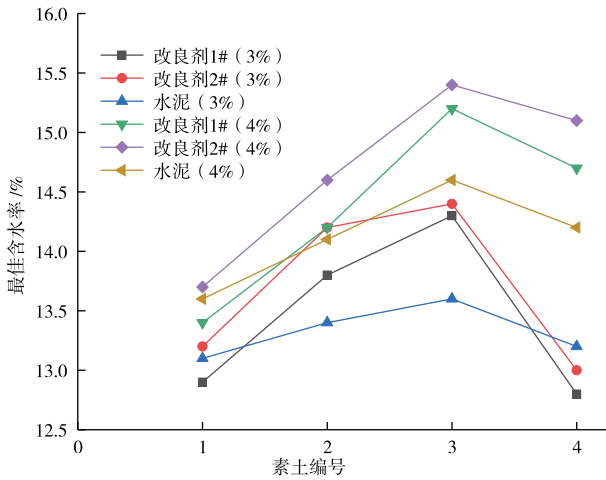


图 2 土的最佳含水率变化趋势

Fig. 2 The variation trend of optimum moisture content of soil

3.2 承载比

每种土不同固化剂、不同掺量下的 96 区承载比 (CBR) 如图 3 所示, CBR 受土的种类影响, 基本保持相同的变化趋势, 素土物理特征对 CBR 有决定性影响。对同类型的土, 3 种固化剂对土的 CBR 提升效果, 4% 掺量明显高于 3% 掺量。同掺量下, 改良剂 1# 和 P. F 32.5 水泥基本具有相等的改性效果, 改良剂 2# 由于具有更高的钙含量, CBR 提升效果更明显。

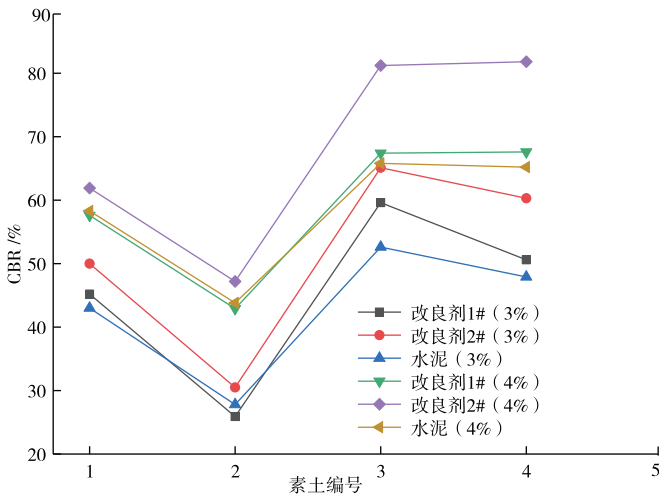


图 3 土的承载比变化趋势

Fig. 3 CBR variation trend of soil

固化剂稳定土 CBR 值随土壤固化剂掺量的增加而不断升高, 这是因为土颗粒表面带有负电荷, 使得土颗粒之间相互排斥。固化剂添加到稳定土

中, 使得土壤固化剂与水反应, 产生的钙离子和镁离子与土颗粒吸附层的钠离子和钾离子进行交换, 并中和土颗粒表面的负电荷, 使得土颗粒之间的排斥力减小, 相互靠近更加紧密。所以固化剂稳定土在击实作用下更加密实, CBR 值有所提高。土壤固化剂在未达到饱和之前, 随着固化剂掺量提升, 钙镁含量不断提升, CBR 不断提升; 同时固化剂 2# 具有更高的钙镁含量, CBR 改善效果也更明显。

3.3 7 d 无侧限强度试验

根据土样最佳含水率以及最大干密度, 采用静压法制备每种固化剂 3%、4% 掺量下的 50 mm×50 mm 的圆柱体试件。将制好的试件在标准养护条件 (20±2 °C, 湿度≥95%) 下养护 6 d, 水中浸泡 1 d, 利用万能试验机测试其无侧限抗压强度, 试验加载速率设定为 1 mm/min。无侧限抗压强度结果如表 4、图 4 所示。

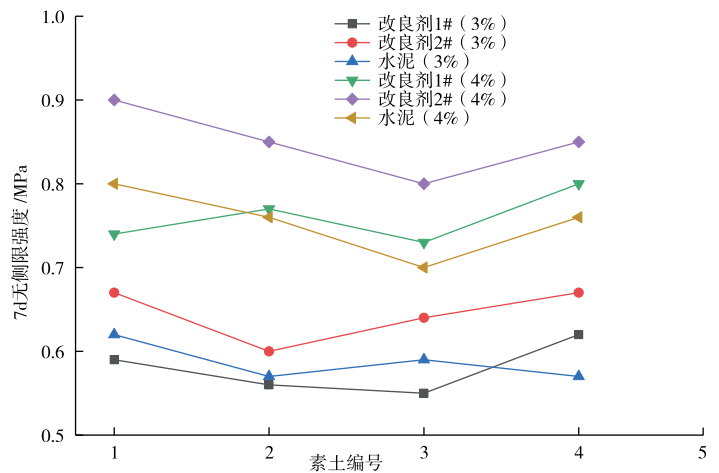


图 4 土的 7 d 无侧限强度变化趋势

Fig. 4 7 d unconfined strength variation trend of soil

每种土不同固化剂、不同掺量下的 7 d 无侧限强度如图 4 所示 7 d 无侧限强度受土的种类影响, 基本保持相同的变化趋势, 并且与 CBR 变化趋势并不相同。对同类型的土, 同掺量下, 改良剂 1# 和 P·F 32.5 水泥基本具有相同的改性效果, 改良剂 2# 对 7 d 无侧限强度提升效果更明显。3 种固化剂的 4% 掺量对土的 7 d 无侧限强度提升效果明显高于 3% 掺量。

4 种土的 7 d 无侧限抗压强度随土壤固化剂的

材料科学

增加而不断提高。这是因为土壤固化剂与土壤反应产生含有结晶水的钙矾石结晶体，填充于土颗粒之间，使得固化剂稳定土击实后更加密实。所以试件的无侧限抗压强度有所提高。

4 效益分析

4.1 经济效益

工业固废改良剂与传统的水泥固化剂施工工艺完全相同，使用的主要机械有撒布车、冷再生机、刮平机、压路机等，无需要添加任何额外的设备。与水泥唯一不同的是材料成本，工业固废改良剂与水泥成本如表 5 所示。

表 5 不同固化剂价格比较
Table 5 Price comparison of different curing agent

固化剂类型	改良剂 1#	改良剂 2#	P · F 32.5 水泥
材料成本/t	360	410	450

改良剂 1#在性能与 P · F 32.5 水泥持平情况下，材料成本降低约 20%；改良剂 2#材料成本降低约 10%，CBR、7 d 无侧限强度等路用性能远高于 P · F 32.5 水泥，2 种工业固废改良剂具有明显的经济效益优势。

4.2 环保效益

表 6 浸出液 PH 值和重金属离子测试值

Table 6 PH value and heavy metal ion test value of leaching solution

样品 (浸出液) 名称	pH 值	色度/ PCU	铜/ (mg · L-1)	锌/ (mg · L-1)	铅/ (mg · L-1)	镉/ (mg · L-1)
1#素土	8.3	14	未检测出	0.24	未检测出	未检测出
1#素土+ 改良剂 1#	9.6	21	未检测出	0.42	未检测出	未检测出
1#素土+ 改良剂 2#	10.1	19	未检测出	0.37	未检测出	未检测出
1#素土+ 水泥	10.2	22	未检测出	0.42	未检测出	未检测出
空白样品 (纯水)	7.3	9	未检测出	未检测出	未检测出	未检测出

高速公路工程处于平原地带，是我国的主产粮区，农田靠近路基施工作业区，因此，需杜绝绝对改良剂对农田土壤的污染。以 1#素土为试验样，分别掺入 4%的改良剂 1#、改良剂 2#和 P · F 32.5 水泥，进行 pH、色度和重金属离子测试，试验结果见表 6 所示。两种改良剂和水泥稳定土的浸出液均未检测出铜、铅和镉等重金属离子含量，改

良剂 1#的锌含量与水泥基本持平，改良剂 2#锌含量较低，相对水泥，不会对周围农田产生环境破坏。三种稳定土的 pH 值均在 9.5~10.5 之间，稍高于素土呈现弱碱性，这是由于改良剂和水泥含有大量碱性物质的缘故。由于改良剂中各组分不同，改良剂 2#较改良剂 1#清澈。

5 工程应用

在正修建的高速公路路床 96-1 区铺设试验路段，试验段左半幅采用改良剂 2#，右半幅作为对照采用 P · F 32.5 水泥，如图 5 所示，掺量均设定为 3%。路基宽度为 34 m，厚度为 20 cm，铺松系数为 1.25。利用气泵将固化剂放入撒布车中，根据固化剂密度、行车速度等确定撒布量，并混合均匀。碾压方式为轻型压路机静压 1 遍，刮平，再用强振碾压 4 遍，采用灌砂法进行现场压实度检测；随后进行 7 d 洒水养生，养生结束后，进行弯沉检测，试验结果如表 7 所示。



图 5 试验段改良剂与水泥对比
Fig. 5 Comparison of modifier and cement in the test section

表 7 试验段压实度和弯沉检测

Table 7 Compaction and bending test in the test section

测试项目	压实度/%		弯沉代表值/0.01mm	
	改良剂	水泥	改良剂	水泥
测试结果	96.2	96.4	128.41	220.04

由表 7 可知，试验路段改良剂稳定土路基压实度为 96.2%，与水泥稳定土 96.4%的压实度基本相同，满足>96%的技术指标，验证了工业废渣土壤改良剂作为土壤固化剂，使用传统的水泥固化剂施工工艺即可满足性能要求，具有无需增加额

外施工成本的优势。试验路段的改良剂稳定土路基弯沉代表值为 128.41，相同掺量下水泥固化剂为 220.04。弯沉检测结果表明，改良剂稳定土的弯沉值远远低于水泥稳定土，说明改良剂 2#对路基承载力及固化土层弹性模量的改善效果明显优于 P·F 32.5 水泥，这与室内强度试验得出的结论基本一致。

6 结论

本文主要分析平原地区粘土，研究利用纯工业废料作为改良剂的使用情况，并与 P·F 32.5 水泥作对比，具体结论如下：

(1) 两种改良剂在 4%掺量下的改良剂稳定土比 3%掺量下最大干密度降低、最佳含水率增大。

(2) 对 4 种土的 CBR 和 7d 无侧限强度提升效果，4%掺量明显高于 3%掺量，且随着土的不同，变化趋势基本一致；同掺量下，固化剂 1#和 P·F 32.5 水泥基本具有相等的改性效果，固化剂 2#由于具有更高的钙含量，CBR 和 7d 无侧限强度提升效果更明显。

(3) 改良剂 1#在性能与 P·F 32.5 水泥持平情况下，材料成本降低约 20%；改良剂 2#材料成本降低约 10%，CBR、7d 无侧限强度等路用性能远高于 P·F 32.5 水泥，2 种工业固废改良剂具有明显的价格优势；pH、色度和重金属离子等与水

泥基本持平，相对水泥，不会对周围农田产生环境破坏。

(4) 试验段施工表明，工业废渣土壤改良剂与传统的水泥固化剂施工工艺相同，具有无需增加额外施工成本的优势，同时改良剂 2#对路基承载力及固化土层弹性模量的改善效果明显优于 P·F 32.5 水泥。

参 考 文 献

- [1] 陈胜, 王琦, 岳云龙. 高性能土壤固化剂的制备与性能 [J]. 硅酸盐通报, 2006 (1): 109-113.
- [2] 杨林, 张秉夏. TG-2 型土壤固化剂水泥石灰土的强度和稳定性试验 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (9): 27-32.
- [3] 方祥位, 孙树国, 陈正汉, 等. GT 型土壤固化剂改良土的工程特性研究 [J]. 岩土力学, 2006 (9): 1545-1548.
- [4] 征西遥, 刘秀秀, 吴俊, 等. 超细水泥对固化软土早期抗压强度影响的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2020 (1): 1-20.
- [5] 董邑宁, 张青娥, 徐口庆, 等. 固化剂对软土强度影响的试验研究 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (2): 475-478.
- [6] ZHU Z D, LIU S Y. Utilization of a new soil stabilizer for silt subgrade [J]. Engineering Geology, 2008, 97 (3): 192-198.
- [7] LIU J, SHI B, JIANG H T, et al. Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer [J]. Engineering Geology, 2011, 117 (1): 114-120.

杂志社网址：<http://fmhzhly.com/>