

郑西铁路客运专线石灰改良黄土路基填料的室内及现场试验研究

郭建群¹, 郑 琮², 陶福金¹, 杨有海²

(1. 中铁七局集团有限公司, 郑州 450016; 2. 兰州交通大学土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 基于高标准铁路路基对填料的严格要求, 结合郑(州)西(安)铁路客运专线建设, 通过室内试验分析了黄土及石灰改良黄土的物理力学性质, 着重研究了不同石灰掺量、养护龄期、压实系数和含水率等对强度的影响。试验结果表明: 石灰改良黄土的最大干密度和压缩系数都随掺和比的增大而减小, 无侧限抗压强度随掺和比、龄期以及压实系数的增大而增大, 且石灰黄土水稳性明显好于重塑黄土。本文还通过现场试验总结了石灰改良黄土填筑路基基床底层的施工工艺。

关键词: 铁路; 客运专线; 路基; 石灰; 改良; 黄土

作者简介: 郭建群(1966—), 男, 宁夏中卫人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程相关研究。

0 引言

路基是轨道的基础, 高速铁路对路基提出的要求是: 强度高、刚度大、稳定性和耐久性好、不易变形、纵向变化均匀或变化缓慢等^[1]。郑西铁路客运专线正线要求全程铺设无碴轨道, 路基工后沉降量一般不应超过扣件允许的沉降调高量 15 mm; 沉降比较均匀的路基, 允许的最大工后沉降量为 30 mm。如此严格的工后沉降控制对路基工程的质量提出了更高的要求。实际观测表明, 采用优质、级配良好的粗粒料可以大大减少路基的后期沉降, 因此路基工程质量的好坏关键在于路基填料的选择。高速铁路路基基床底层应优先使用 A、B 组填料或经过改良的 C、D 组填料^[2]。郑西客运专线沿线可供采用的填料均属于 C 组黄土填料, 为节省工程造价, 必须对黄土填料进行改良后使用。本文结合郑西铁路客运专线建设, 研究了石灰改良黄土的工程特性及填筑路基基床底层的施工工艺。

1 石灰改良黄土的室内试验

1.1 试验原料

试验所用的黄土取自郑西铁路客运专线郑州至澠池 ZXZQ01 标段内某取土场, 土壤呈黄色发

白, 具有大孔隙, 土体疏松。试验所用石灰产自河南省荥阳市贾峪镇, 粉末干燥且活性强, 其有效 CaO、MgO 含量为 86.73%, 试验时经充分消解后使用。

1.2 试验方案

配合比采用了 0、3%、5%、7%、10% (质量比) 几种情况, 试验内容包括黄土及石灰改良黄土的击实试验、界限含水率试验、压缩试验、强度试验和干湿循环试验。

1.3 试验结果分析

(1) 击实试验

土在反复荷载作用下体积减小, 密度增加的性质称为土的压实性。在试验室研究土的压实性质是通过击实试验完成的。击实试验是测定试样在标准击实功作用下含水率与干密度之间的关系, 从而确定该试样的最优含水率和最大干密度。本试验采用的是重型击实标准, 试样制备采用干法, 击实试验结果见表 1。

表 1 击实试验结果

类 型	配合比 (%)	最大干密度 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含水率 (%)
素黄土	0	1.91	12.0
	5	1.83	13.4
	8	1.79	13.4
石灰土	10	1.80	13.1
	13	1.78	13.9

从试验结果可以看出:随着石灰掺入量的增大,最大干密度逐渐减小,最优含水率逐渐增大,且最大干密度比黄土小,最优含水率比黄土大。出现上述结果是因为试验过程中将石灰与土拌和后,基于细小颗粒的凝聚和絮凝,土的结构即刻发生变化,成为较大颗粒,这种变化影响了土的压实性能,同时由于石灰与土的水化反应消耗了一部分水分,因此石灰的加入不会降低颗粒间的摩阻力^[3]。

(2) 界限含水率试验

本试验采用液、塑限联合测定仪测定黄土及改良黄土的液限、塑限,并得到塑性指数,重塑黄土的液限含水率 $w_L = 26.0\%$, 塑限含水率 $w_P = 15.7\%$, 塑性指数 $I_P = 10.3\%$, 试验结果如图 1 所示。

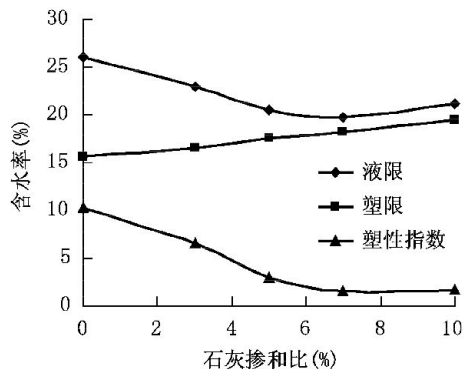


图 1 改良黄土的液、塑限随石灰用量的变化

可以看出,石灰土的塑性指数随石灰掺入量的增大而减小,其原因是石灰土塑限的提高所致。所以在黄土中加入一定量的石灰后,塑性显著降低,亲水性大大减弱,工程性质得到改善。

(3) 压缩试验

压缩性(刚度)是土的一个重要的力学性质指标。适当的路基刚度既能在上部荷载作用下不产生过量的有害变形,也不产生过大的接触面应力,减少结构或构件发生破坏的概率,延长其使用寿命^[4]。

通过对不同石灰掺和比的石灰改良土标准养护 28 d、90 d 后的试样(在各自的最优含水率下制备)进行压缩试验,可以获得压缩系数和压缩模量。试验分六级加荷,分别为 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa、800 kPa。试验仪器采用南京土壤仪器厂生产的 WG-1A 型三联固结仪,试验结果见表 2。

表 2 石灰改良黄土的压缩特性

类 型	压缩系 $a_{v0.1-0.2}(\text{MPa}^{-1})$		压缩模量 $E_{s0.1-0.2}(\text{MPa})$	
	T = 28 d	T = 90 d	T = 28 d	T = 90 d
重塑黄土	0.162	0.128	21.25	22.83
3%石灰	0.053	0.044	28.92	31.34
5%石灰	0.047	0.043	34.28	37.45
7%石灰	0.045	0.040	35.56	38.93

可以看出:石灰改良土的压缩系数都小于 0.1 MPa^{-1} , 属于低压缩性土,符合高速铁路路基的要求,有利于线路的平稳和高速列车的安全运行。

(4) 强度特性试验

强度特性试验的石灰掺和比为 3%、5%、7%、10%, 分别在不同围压($\sigma_3 = 25 \text{ kPa}$ 、 50 kPa 、 100 kPa 、 150 kPa)、压实系数 $\eta = 0.95$ 下做三轴剪切试验以及无侧限抗压强度试验。对于非饱和状态的试件做不固结不排水三轴剪切试验(UU), 对于饱和状态的试件做固结不排水三轴剪切试验(CU), 用以模拟一般状态和降雨时等作用上路基填料处于高含水率状态。试验结果如表 3 所示。

表 3 石灰改良黄土的抗剪强度指标 ($\eta=0.95$)

类 别	龄期 T (d)	试样剪切状态	内摩擦角 ϕ (°)	黏聚力 c (kPa)	无侧限抗压强度 q_u (kPa)	软化系数	含水率 (%)
重塑黄土	—	UU	34.8	100.7	384.5	—	13.3
		CU	37.6	25.8	105.0	0.27	17.0
3%石灰	7	UU	36.5	178.3	706.4	—	14.7
		CU	38.3	114.7	472.6	0.67	18.6
	28	UU	28.7	331.8	1117.4	—	13.3
		CU	38.8	171.4	713.7	0.64	17.7
5%石灰	7	UU	37.3	220.9	890.0	—	13.1
		CU	36.5	162.0	641.2	0.72	18.1
	28	UU	42.3	254.4	1148.5	—	12.8
		CU	44.1	158.8	747.7	0.65	18.5

续表 3

类别	龄期 T (d)	试样剪切状态	内摩擦角 ϕ ($^{\circ}$)	黏聚力 c (kPa)	无侧限抗压强度 q_u (kPa)	软化系数	含水率 (%)
7%石灰	7	UU	38.7	185.6	771.1	—	14.5
		CU	40.2	103.5	445.1	0.58	19.4
	28	UU	39.3	265.2	1 119.5	—	14.0
		CU	43.0	164.3	754.8	0.67	19.7
10%石灰	7	UU	37.3	218.2	880.2	—	14.0
		CU	39.5	137.4	582.0	0.66	18.3
	28	UU	33.4	368.4	1367.2	—	13.0
		CU	39.7	216.8	992.7	0.73	17.5

① 龄期对改良黄土强度的影响

非饱和状态下, 重塑黄土以及 3%、5%、7%、10% 等掺合比的石灰改良黄土的无侧限抗压强度与龄期的关系如图 2 中所示。

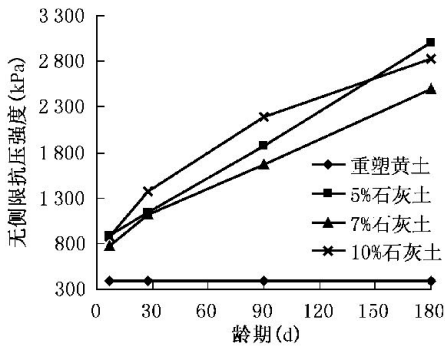


图 2 改良土无侧限抗压强度随龄期的变化

可以看出, 随着龄期的增加, 石灰改良黄土的强度在不断增加。石灰的水化反应是一个缓慢的物理、化学过程, 石灰改良黄土具有早期强度低的特性, 但 7 d 的无侧限抗压强度基本都大于 500 kPa。本次研究中发现, 无论是饱和状态还是非饱和状态, 黏聚力 c 和无侧限抗压强度随龄期的增长而增大, 7~28 d 和 28~90 d 石灰黄土的强度增长都很快, 且增长率基本相同; 90~180 d 非饱和状态下石灰黄土强度仍有很大程度的增长, 饱和状态下强度的增长速度减缓。

② 掺和比对改良黄土强度的影响

从表 3 和图 2 可以看出, 黄土经过石灰改良后强度指标明显提高, 相同条件下, 石灰改良黄土的强度随着石灰掺量的增加而增大。非饱和状态下, 5% 石灰黄土 28 d 时的无侧限抗压强度已大于 1 MPa, 饱和状态下的强度也达到了 0.7 MPa, 能够满足高速铁路路基基床底层的要求, 出于经济考虑, 现场试验时石灰改良黄土的掺和比取 5%。

③ 压实系数对改良黄土强度的影响

为控制路基填筑质量, 必须掌握填料的压实特性, 压实系数是影响压实特性的重要因素, 改良黄土的力学特性也与压实系数有关。对 3%、5%、7% 的石灰改良黄土试样按 $\eta=0.92$ 、0.95 进行制样, 在标准条件下养护 28 d 后, 进行了三轴不固结不排水剪切试验, 试验所得的抗剪强度指标见表 4 所示。

表 4 不同压实系数下的改良土抗剪强度指标

土样类型	掺和比 (%)	压实系数	ϕ ($^{\circ}$)	c (kPa)	q_u (kPa)
重塑黄土	0	0.92	29.4	83.4	285.1
		0.95	34.8	100.7	384.5
	3	0.92	35.2	186.9	720.5
		0.95	28.7	331.8	1 117.4
石灰改良黄土	5	0.92	37.8	203.9	831.6
		0.95	42.3	254.4	1 148.5
	7	0.92	35.3	254.0	983.0
		0.95	39.3	265.2	1 119.5
10	0.95	33.4	368.4	1 367.2	

可见在围压、掺和比以及养护条件及龄期相同的条件下, 随压实系数的增加, 试件抗剪强度指标随之增加, 其中内摩擦角增长幅度较小, 而黏聚力增长较明显。所以在其他条件相同的情况下, 压实系数大的试件其强度值较高。

④ 含水率对改良黄土强度的影响

由表 3 可以看出: 石灰改良黄土强度随含水率增大而减小, 但灰土的软化系数远大于重塑黄土, 这说明石灰黄土的水稳定性明显好于重塑黄土。虽然随含水率的增加石灰黄土的强度在减小, 但在相同含水率下, 石灰黄土的强度随掺和比和龄期的增长而增大, 即使在饱和状态下, 当掺和

比达到一定量时,石灰黄土的强度($T = 28$ d)指标仍然较大,可以满足工程需要。

(5) 干湿循环试验

表5是 $\eta = 0.95$ 的5%、7%石灰改良黄土在标准条件下养护28天后,在干湿循环次数为0次、1次、5次、10次下的抗剪强度指标。

表5 不同循环次数下的改良土抗剪强度指标

次数	5%			7%		
	ϕ (°)	c (kPa)	q_u (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	q_u (kPa)
0	42.3	254.4	1 148.5	39.3	265.2	1 119.5
1	43.4	184.5	857.2	39.6	242.7	1 030.9
5	40.6	301.3	1 309.0	41.6	308.3	1 371.8
10	44.6	342.2	1 637.5	39.8	478.1	2 040.8

可以看出:干湿循环1次时,无侧限抗压强度明显减小,但随着干湿循环次数的增加,石灰改良黄土的无侧限抗压强度逐渐增大。经分析认为,随着循环次数的增加,龄期也在增加,到第5次、10次循环时,龄期对黏聚力的影响就比循环次数的影响显著,因而无侧限抗压强度呈增长趋势。

2 现场试验

为了研究改良土的特性,在郑西客运专线郑州至渑池ZXZQ01标段内进行了路基基床填筑试验,试验标段为DK24+787.62~DK25+119.92,根据室内试验结果,基床底层采用5%石灰改良土。

2.1 改良土施工工艺

(1) 施工技术要求

① 生石灰应与未改良黄土拌和均匀,色泽一致,无灰团、灰条和化面现象。拌和物中不得含有超尺寸颗粒土块、未消解石灰颗粒和留有“素土层”。

② 拌和料碾压时其含水率宜保持在最优含水率的 $\pm 2\%$ 左右。

③ 碾压后压实层不得有明显轮迹,并且不得有“弹簧”、松散、起皮现象。压实层平整,拱坡应符合设计要求。

④ 严格控制填土速度,并加强对观测桩的观测,观测桩的位移允许值为5 mm/d,如果位移超过上述值时,立即停止填筑,待位移稳定后,才可继续填筑。

(2) 施工工艺与参数

现场施工工艺流程为:验收下承层→测量放样→拌和→运输→摊铺→碾压→养生。本试验段石灰改良土采用厂拌法施工,用稳定土拌和设备在拌和场集中进行拌和,混合料中不应含有大于10 mm的土块和未消解的石灰颗粒。考虑到石灰的吸水作用,一般石灰土拌和前后含水率降低2%~3%,因此生石灰拌和前原填料的含水率应高于最优含水率2%~3%。

试验段石灰土的分层厚度大约为25~35 cm;碾压机型号为DYNAPAC-CA602,该机静压时击振力为21 t,强振时击振力可达39 t,碾压速度为4.5 km/h。碾压方式为静压1遍,强振3遍,弱振3遍,最后再静压1遍。

2.2 改良土施工质量控制及检测

(1) 施工质量控制

改良土施工工程质量控制要点主要为5个方面:①原材料(土、石灰);②配合比;③改良土含水率控制;④均匀性;⑤压实度。

(2) 施工质量检测

根据《客运专线铁路路基工程施工质量验收暂行标准》,每层改良土压实完毕后,沿线路纵向每100 m抽样检验压实系数6点,其中:左、右距路肩边线1 m处各2点,路基中部2点;每100 m每填高约90 cm(即填筑3层改良土)抽样检验变形模量 E_{v2} 或地基系数 K_{30} 、动态变形模量 E_{vd} 各4点,其中:距路肩边线2 m处左、右各1点,路基中部2点。试验结果如表6所示。

表6 现场试验改良土检测结果

试验点	验收标准		
	压实系数	地基系数 K_{30} (MPa/m)	动态变形模量 E_{vd} (MPa)
	≥ 0.95	≥ 110	≥ 40
1	0.958	210	62
2	0.972	259	75
3	0.966	235	69

因此,按本试验段确定的施工参数进行路基基床填筑能够满足设计要求。

3 结 语

(1) 黄土不能直接作为高速铁路基床底层填料。石灰的掺入能有效改善黄土的力学性能,石

灰改良黄土随着掺入量的增加,最大干密度逐渐减小,最优含水率逐渐增大。

(2) 黄土中加入石灰后塑性显著降低,亲水性减弱,工程性质得到改善。且在一定的压实度下随着含灰率的增加,压缩性减小,刚度增加。

(3) 石灰改良黄土的抗剪强度指标受龄期、掺和比、压实系数等因素的影响,无侧限抗压强度随掺和比、龄期以及压实系数的增大而增大。

(4) 石灰改良黄土的强度随含水率增大而减小,其水稳定性明显好于重塑黄土。

(5) 在进行现场填筑路基基床施工时,生石灰拌和前原填料的含水率应高于最优含水率 2%~3%。石灰土路基的分层厚度可按 25~35 cm 标

准控制。

参 考 文 献

- [1] 杨广庆,刘树山,刘田明. 高速铁路路基设计与施工[M]. 北京:中国铁道出版社,1999.
- [2] 中华人民共和国行业标准. 客运专线无碴轨道铁路设计指南[S]. 中华人民共和国铁道部,2005.
- [3] 杨广庆,管振祥. 高速铁路路基改良填料的试验研究[J]. 岩土工程学报,2001,23(6):682~685.
- [4] 要文堂. 高速铁路路基粉黏土填料改良技术的探讨及应用[J]. 铁道标准设计,2004(1):18~22.