

文章编号: 1007-2993(2005)05-0241-04

水泥改良黄土力学特性试验研究

马学宁 梁波

(兰州交通大学土木工程学院, 甘肃兰州 730070)

【摘要】 通过大量土工试验和理论分析,研究了水泥改良黄土的击实特性、压缩特性、强度特性以及影响因素,在列车重复荷载作用下的动力特性,论证了水泥改良黄土作为高速铁路路基基床底层填料的可行性。

【关键词】 黄土;水泥改良黄土;强度特性;动力特性

【中图分类号】 TU 444

Experimental Study of Mechanical Performance of Cement-Improved Loess

Ma Xuening Liang Bo

(Civil Engineering Department of Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070 China)

【Abstract】 Through many soil laboratory and theory analysis, compaction characteristics, compressibility, intensity mechanism and some major factors and the dynamic performance of cement-improved loess under repeated load of train are discussed. It can be concluded that the performance of cement-improved loess meets the design demand of rapid transit railway subgrade.

【Key Words】 loess; cement improved loess; intensity mechanism; dynamic performance

0 引言

《京沪高速铁路设计暂行规定》要求基床底层填料必须使用 A、B 组填料或改良土。新建铁路郑州至西安高速客运专线对路基填筑质量以及工后沉降标准提出了很高的要求。该线路在三门峡市辖区段,沿线大部分地段为黄土,合格的 A、B 组填料很少,途径之一是对不合格填料进行改良,使其达到质量标准。

关于高速铁路路基填料的改良技术,韩文斌^[1]通过对下蜀粘土的改良试验研究,提出了最适合高速铁路路基填料在满足强度、水稳性以及压缩特性方面的控制标准;杨广庆^[2]通过室内试验对水泥土、石灰土、石灰粉煤灰土的物理力学特性进行了研究;丁庭^[3]利用直剪试验和无侧限抗压强度试验讨论了高速铁路路基改良填料的现场试验情况;文献^[4]通过室内静、动载试验,研究了石灰稳定土的基本特性及重复荷载下的耐久性;梁波^[5]通过静、动三轴试验对粉

煤灰的静力强度的水稳性和动力强度的水稳性进行了研究;文献^[6]从确保路堤稳定性的角度,利用离心机模型试验确定了水泥、石灰、固化剂改良填料的掺入质量比。本文通过对水泥改良后的黄土混合料进行物理力学试验,研究了其静态和动态的特性,论证了水泥改良黄土作为高速铁路路基基床底层填料的可行性。

1 试验材料和方法

1.1 试样材料

试验用黄土取自郑西高速客运专线某工点,土呈黄色,具有大孔隙,土体疏松,其物理性质指标见表 1。原状黄土的压缩系数在 $0.799 \sim 0.925 \text{ MPa}^{-1}$,属高压缩性土;水稳性较差,原状土饱和和无侧限抗压强度一般为 $15.1 \sim 23.2 \text{ kPa}$,与天然状态相比,其强度值降低了 70% 左右;该黄土在静水中 4 min 出现明显破坏,不能满足工程使用要求。水泥为甘肃祁连山 425[#] 普通硅酸盐水泥。

表 1 黄土的物理性质指标

天然含水量 $w/\%$	相对体积质量 G_s	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	最优含水量 $w_{op}/\%$	最大干密度 ρ_{dmax}/cm^3
23.7	2.66	1.73	0.910	34.5	18.7	15.8	10.5	2.005

1.2 试验方法

本试验严格按照《铁路工程土工试验规程》

(TB10102-2004)、《公路工程无机结合料稳定土试验规程》(JTJ057-94)、《硅酸盐水泥、普通硅酸盐

基金项目:甘肃省自然科学基金资助项目(ZS031-B25-005-G); 兰州交通大学“青蓝工程”基金资助项目。

作者简介:马学宁,1974年生,男,回族,宁夏中卫人,讲师,在读博士生。主要从事岩土工程方面的教学和科研。Email:mxn1974@163.com

水泥》(GB175-1999)进行。改良方案为在黄土中掺入质量比分别为3%、5%、7%的水泥,养护龄期分别为7d、14d和28d,压实系数分别为0.90和0.95,每一组作两个平行试验。

2 水泥改良黄土的强度特性

2.1 击实特性

通过重型击实试验,做出重塑黄土以及黄土中掺入不同比例的水泥的干密度 ρ_d 和含水率 w 关系曲线(见图1)。从图1中可看出,水泥改良黄土随着掺入质量比的增加,最大干密度 ρ_{dmax} 逐渐减小,最优含水量 w_{opt} 变化幅度很小,但改良黄土的最优含水量都比重塑黄土的最优含水量 w_{opt} 大。

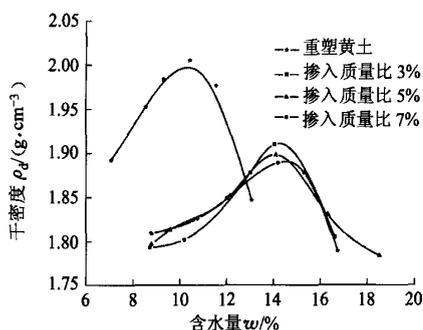


图1 水泥改良黄土干密度与含水率关系曲线

2.2 压缩特性

在上部荷载作用下,适当的路基刚度既不产生过量的塑性变形,也不产生过大的接触应力。在黄土中加入水泥后,可提高土的强度,降低土的压缩性。还可以减小土的孔隙率。通过对不同含灰率、不同密度的水泥改良土标准养护28d后的试样(在各自的最优含水量下制备)进行压缩试验,试验结果见表2,其中 η 为压实系数。压缩系数数据都小于 0.1 MPa^{-1} ,即都属于低压缩性土,且同一种含灰率下,随着密实度的增加,压缩系数减小,压缩模量增大,在同一密实度下,随含灰率的增长,压缩系数减小趋势较明显。

表2 水泥改良土的压缩性

改良黄土类别	压缩系数		压缩模量	
	$a_{0.1+0.2} / \text{MPa}^{-1}$		$E_{0.1+0.2} / \text{MPa}$	
	$\eta = 0.90$	$\eta = 0.95$	$\eta = 0.90$	$\eta = 0.95$
含3%水泥	0.066	0.041	25.75	36.98
含5%水泥	0.061	0.039	26.39	40.26
含7%水泥	0.057	0.032	29.88	45.39

2.3 强度特性

2.3.1 应力应变特性及抗剪强度特性

笔者分别对三种掺和质量分数(3%、5%、7%)的

水泥改良土在不同密实度、不同龄期的条件下,作三轴不固结不排水剪切试验。应力应变关系见图2。

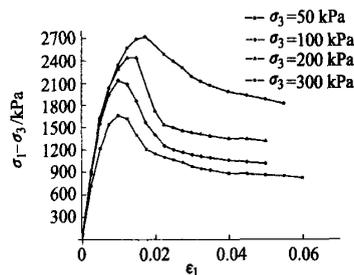


图2 水泥改良土的应力应变关系曲线

(注:含灰率为5%,龄期为14d, $\eta = 0.95$)

从试验中的应力应变曲线可以看出:

1)对于密实度较大的水泥改良土,其应力应变曲线具有明显的峰值,达到峰值后强度降低呈明显的加工软化特性,峰值强度所对应的应变值较小,一般不超过2%,远远小于达到极限状态时的应变值,呈明显的脆性破坏,并且试样破坏后的残余强度仍然很高。

2)侧压力大小直接影响试件破坏形态和峰值强度。侧压力越大,试件破坏时的峰值强度越大,而且试件破坏时的应变值也随侧压力的增大而略有增大。

3)试件在破坏时有典型的破裂面,且与最大主应力方面呈 $(45^\circ + \varphi/2)$ 的角度,三轴试件破坏时有竖向裂缝产生。

2.3.2 掺合比对改良黄土抗剪强度的影响

掺合质量比对水泥改良黄土抗剪强度的影响见表3。笔者对三种掺和质量比的水泥改良黄土进行了三轴剪切试验。试样是在密实度为 $\eta = 0.95$,含水量为各种掺合比下的最优含水量下制备的,在密闭条件下经过28d养护后,进行三轴不固结不排水剪,所测得的大小主应力数值及抗剪强度指标见表3和图3。

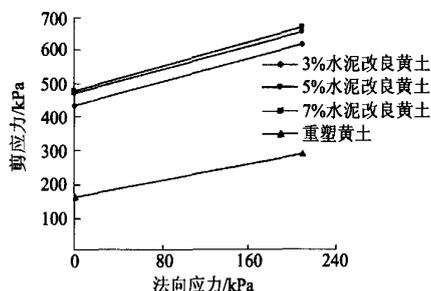


图3 水泥改良黄土的抗剪强度线

由表3图3可看出,水泥掺合比的大小对水泥改良黄土在同一围压的各组试件的大主应力值影响

较明显。水泥改良黄土的强度随水泥的质量分数增加而增加,即掺和比为7%的水泥改良黄土28d强度最高。从表3中给出的抗剪强度指标可以看出,水泥加入土中并加水拌和,水泥中各成分与土中水发生了强烈的水解和水化反应,分解出 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 并生成各种水化物,各水化物继续硬化形成水泥石骨

架,强度很高,粘聚力 c 值可达到478 kPa。

2.3.3 密实度对改良黄土抗剪强度的影响

笔者对三种掺和比的水泥改良黄土分别按压实系数为0.90和0.95进行制样,在标准养护条件下养护28d后,进行了三轴不固结不排水剪,试验所得的 c 、 φ 值及大主应力值见表4。

表3 改良黄土在不同掺和比下的强度特性

土类类别	掺合量 $w(\text{水泥})/\%$	大主应力 σ_1/kPa				c/kPa	$\varphi/(\circ)$
		围压/50	围压/100	围压/200	围压/300		
重塑黄土		645.95	934.25	1 252.99	1 445.91	159.90	30.90
	3	2 001.90	2 316.77	2 757.43	3 186.41	435.06	40.13
水泥改良黄土	5	2 264.65	2 478.02	3 089.34	3 403.89	469.50	40.59
	7	2 410.35	2 667.51	3 191.77	3 521.07	478.44	41.64

表4 密实度对改良土强度特性的影响

土类类型	掺合量 $w(\text{水泥})/\%$	压实 系数	大主应力 σ_1/kPa				c/kPa	$\varphi/(\circ)$
			围压 50	围压 100	围压 200	围压 300		
重塑土		0.90	636.69	685.89	1 196.33	1 294.73	138.74	29.49
		0.95	645.95	934.25	1 252.99	1 445.91	159.90	30.90
水泥改良土	3	0.90	1 344.06	1 565.25	1 949.05	2 279.91	305.09	35.25
	3	0.95	2 001.90	2 316.77	2 757.43	3 186.41	435.06	40.13
	5	0.90	1 592.06	1 783.60	2 267.79	2 614.32	339.21	37.84
	5	0.95	2 264.65	2 478.02	3 089.34	3 403.89	469.50	40.59
	7	0.90	1 677.05	2 112.25	2 333.11	2 841.48	374.22	38.36
	7	0.95	2 410.35	2 667.51	3 191.77	3 521.07	478.44	41.64

在围压、掺和质量比以及养护条件及龄期相同的条件下,随密实度的增加,试件破坏时的大主应力值随着增加,抗剪强度指标也相应增加。

2.3.4 龄期对改良土强度的影响

不同掺和质量比,密实度为0.95的条件下,改良黄土三种龄期的无侧限抗压强度试验结果见表5。水泥改良黄土的优点是具有足够高的强度,其7d无侧限抗压强度值都大于1 MPa,能满足高速铁路对基床底层的要求,并且受水分变化的影响不大,它的强度越高,稳定性越好。

表5 养护龄期对抗剪强度的影响

土样 类型	掺和量 $w(\text{水泥})/\%$	无侧抗压强度/ kPa		
		7 d	14 d	28 d
水泥改良黄土	3	1 084.7	1 251.8	1 395.1
	5	1 484.6	1 597.4	1 746.3
	7	1 626.5	1 799.2	2 102.6

2.3.5 含水量对改良黄土强度的影响

水泥改良黄土在不同掺和质量比,密实度为0.95,标准养护28d后的无侧限抗压强度试验结果见表6。通过对最优含水量条件下的试样和饱和试样的无侧限抗压强度对比发现,随含水率的增加,改良黄土的无侧限抗压强度降低,水泥改良黄土随掺和质量比的增加强度衰减率逐渐降低,但强度衰减率都小于50%,即两种类型的改良黄土都具有较好的水稳定性,尤其是5%、7%的水泥改良黄土水稳定性最好。

在最优含水量和最大干密度的条件下,按压实系数为0.95制作试件,试样直径为3.8 cm,高7.8 cm的圆柱体。标准养护28d龄期后测定各试件在喷头水流作用下的抗冲刷能力和在静水中浸泡时的抗崩解性能。冲刷时把试件放在水压力为0.08 MPa的喷头下,喷头距试块30 cm,进行冲刷试验;做崩解试验时把试件放在静水中浸泡,让水淹没圆柱体试件顶部,记录试验中试件表面及整体发生破坏的时间。从

表6可看出,水泥改良黄土的抗冲刷能力大于2 h,抗崩解能力大于72 h,即水稳定性较好。

表6 水泥改良黄土的水稳定性

土样类型	掺和量 w (水泥)/%	无侧限抗压强度/kPa		强度衰减 率/%	抗冲刷 能力/min	抗崩解 能力/min
		28 d	28 d 饱和			
重塑土		420.2	158.4	62.30	<2	<5
水泥改良土	3	1 395.1	733.2	47.44	>120	>4 320
	5	1 746.3	1 355.1	22.40	>120	>4 320
	7	2 102.6	1 881.2	10.53	>120	>4 320

3 水泥改良黄土的动力特性^①

铁路路基基床,除了承受上部结构的静荷载外,还要受到列车动荷载的反复作用。列车动应力沿路基深度的衰减可按布辛纳斯克(Boussinesq)理论求解,路基面以下0.7 m处(基床底层顶面)的动应力为92 kPa^[2]。当基床底层填料的临界动应力小于作用其上的列车动应力时,一方面会引起路基的翻浆冒泥,另一方面列车动荷载下的路基累计塑性应变过大,会使线路产生不平顺,影响列车的安全、平稳、高速运行。列车通过路基时产生过大的弹性应变,会加剧线路与车辆的相互作用力。当临界动应力大于列车动荷载传递到基床底层顶面的荷载大小时,在动荷载作用下,土体被逐渐压密,应变增量逐渐减少,当加载到一定次数后,土体密度达到一定程度,能抵抗外荷载的作用,土体只产生弹性变形。

对三种掺和质量比的水泥改良黄土进行动三轴试验。试样底面直径为6.18 m,高为12.5 cm,压实系数95%。将试件在标准养护条件下养护25 d后,再取出来饱和3 d,到第29 d进行试验。动荷载以正弦波的方式输入,加载的基本频率为5 Hz。通过动三轴试验,得出土样的动力参数特征值见表7。

表7 水泥改良土的动力参数特征值

土样类型	掺和量 w (水泥)/%	σ_{dr} /kPa	E_{dr} /MPa
水泥 改良土	3	179	73.5
	5	203	81.2
	7	217	93.4

试验表明:水泥改良黄土的临界动应力和临界动弹性模量均随掺和质量分数的增加而增加,且临界动应力均大于92 kPa,能满足高速铁路路基基床底层要求。

4 结论与建议

- 1)黄土不能直接用作基床底层填料。
- 2)密实度较高的水泥改良黄土具有明显的脆性,当 σ_1 达到最大峰值时,所对应的应变值小于2%。
- 3)水泥改良黄土的抗剪强度、无侧限抗压强度受密实度、掺和质量比以及龄期的影响。且强度值随水泥掺量质量分数的增加而增加,应用时应考虑经济方面的因素综合确定。
- 4)水泥改良黄土随掺和量的增加强度衰减率逐渐降低,但强度衰减率都小于50%,并且其抗冲刷能力大于2 h,抗崩解能力大于72 h,即具有较好的水稳定性。
- 5)动三轴试验结果表明,三种掺和质量分数的水泥改良黄土,都能够满足高速铁路路基基床底层要求。
- 6)在施工质量得到保证的前提下,郑西客运专线在基床底层可采用含5%水泥改良黄土。

参 考 文 献

- 1 韩文斌,王元汉.京沪高速铁路路基基床填料改良试验研究.岩石力学与工程学报,2001,20(增):1910~1916
- 2 杨广庆,管振祥.高速铁路路基改良填料的试验研究.岩土工程学报,2001,23(6):682~685
- 3 丁庭,周锡九,史培新.高速铁路路堤改良填料现场试验研究.北方交通大学学报,2000 24(1):59~63
- 4 Etsuo S, Katsumi M. Study on properties of road bed chemically stabilized. [J] Railway Technical Research Institute Report. 1993, 7(10):55-62
- 5 梁波,丁立.粉煤灰作为填料的水稳定性试验研究.岩土工程学报,2002,24(1):112~114
- 6 王炳龙,方为民,周顺华,等.高速铁路路基填料改良离心试验研究.上海铁道大学学报.1999,2(10):22~26,

收稿日期:2005-07-07

①铁道第二勘察设计院.郑西高速客运专线填料改良及地基处理工程实验研究阶段报告.2004