

浅滞水区域钢渣处理软土路基的工程实践

刘素娟

(邯郸市金地工程勘察有限责任公司, 邯郸 056002)

王瑜

(邯郸市住宅公司, 邯郸 056002)

叶洪东

(河北建筑科技学院, 邯郸 056038)

【摘要】 结合钢渣垫层加固软土路基工程实例,从填料的工程特征、工艺设计、施工质量控制及处理效果、检测等方面进行了较系统的理论分析和试验研究。实践证明,该方法具有显著的技术和经济效果。

【关键词】 软土路基;钢渣垫层;干密度;压实系数;锤击数;弯沉值

【中图分类号】 TU 472

Application of Steel-ash Cushion for Treating Soft Clay Ground in Shallow Ground Water Zone

【Abstract】 Researching a series of problems about using steel-ash cushion to consolidate the soft clay ground, such as properties of materials, construct process, quality control and examination. The result shows, using steel-ash cushion to consolidate the soft clay ground is a reliable and economic method.

【Key words】 soft clay ground; steel-ash cushion; dry density; coefficient of compaction; blow count; road surface deflection

0 引言

马峰高等级公路是京深高速公路在邯郸市马头镇的出口,由马头至峰峰市区,全长约27 km,是邯郸市“九五”重点工程之一。在马峰公路K0+000~K3+500路段遇到软土路基。该路段为二级公路标准,设计标准轴载为BZZ-100,沥青混凝土路面,路基全宽12 m,均为填方路堤,填方高度1.2~3.5 m。技术标准高,对路基要求严格。而该段路基软土承载力低,压缩性高,强度小,变形大,且地处浅滞水区域,天然路基无法满足设计要求,必须采取地基处理措施。

1 工程地质条件

马峰公路K0+000~K3+500路段位于

太行山东麓、华北平原西部边缘。地面标高59.87~62.53 m。沿线地表水发育,沟渠纵横,稻田、荷塘大面积分布。稻田废耕及荷塘多年淤积而变成软土区。地下水埋深均小于1.0 m,属上层滞水。路基土层为:①淤泥质粉质粘土,灰黑色,饱和,软塑~流塑,高压缩性,层厚0.8~1.2 m。②粉质粘土,灰褐色,很湿~饱和,软塑,夹灰黑色粘土薄层或团块,土质不均匀,高压缩性,厚1.1~1.8 m。③粉土,黄褐色,很湿,稍密~中密,中等压缩性,厚2.4~4.2 m。④粉质粘土,灰褐色,很湿,可塑~硬塑,土质均匀,中等压缩性,厚度大于4.0 m。各土层物理力学性质见表1。

作者简介:刘素娟,1967年生,女,汉族,河北邯郸人,大学毕业,学士学位,工程师。现从事岩土工程勘察及地基处理。

表1 各土层物理力学性质统计表

土层名称	塑性指数 I_p	液性指数 I_L	含水量 $w/\%$	重度 γ $/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	饱和度 $S_r/\%$	孔隙比 e_0	压缩系数 α_{1-2} $/\text{MPa}^{-1}$	压缩模量 E_s/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	承载力 f_k/kPa
①淤泥质粉质粘土	16.8	0.90	39.0	16.0	85.5	1.256	0.82	2.5	28	3	65
②粉质粘土	14.3	0.67	30.3	18.0	84.5	0.975	0.66	2.8	26	11	80
③粉土	9.5	0.88	24.3	19.3	92.1	0.715	0.17	9.9	19	21	125
④粉质粘土	11.2	0.71	24.7	19.4	94.2	0.780	0.23	7.1	22	17	130

该路段第①、②层土含较多有机物,含水量高,呈饱和,软塑~流塑状态,压缩性高,承载力低,沉降变形大,抗剪强度小,属软弱土层。为保证路基工程质量,必须对其进行加固处理。

2 路基处理方案比选

根据规范^[1],考虑到本浅滞水区域软土层厚度($<3\text{ m}$)、填料来源、工程造价、工期及施工难易程度等因素,先后共提出抛石挤淤、砂桩挤密、粉煤灰换填、钢渣换土垫层及砂石垫层5种处理方案。钢渣换土垫层具有较多优点,该方案是将路基上部①、②层软土全部挖除后,采用钢厂排出的钢渣废料作回填料,进行换土回填。该材料运距近,料源丰富,成本低廉(16元/ m^3),又可废物回收利用,既能降低工程造价,产生经济效益,又可防止污染,保护环境。钢渣属

无粘性粗粒散体材料,压实后承载力高,沉降变形小,渗水性及抗冻性较好,且含水量变化对压实干密度影响小,雨季施工不受影响。经技术、经济、工期等多方面综合分析比较和充分论证后,决定采用钢渣换土垫层处理方案。

3 钢渣材料工程特性

3.1 颗粒组成特征

作为垫层材料,其颗粒组成、颗粒形状及化学成分是决定材料工程性质的重要因素,也是选择垫层材料的科学依据。选用钢渣是某钢厂排出的工业废料,为研究颗粒组成与最大干密度之间的关系,采用自然级配和人工级配分别进行颗粒分析,针对钢渣颗粒组成特征进行重型Ⅱ.2法击实试验。试验结果见表2。颗粒级配曲线见图1。

表2 钢渣颗粒分析和击实试验结果

	颗粒组成质量分数/%									击实试验		
	>80	$80\sim60$	$60\sim40$	$40\sim20$	$20\sim10$	$10\sim5$	$5\sim0.5$	$0.5\sim0.074$	<0.074	最大干密度 $/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	最佳含水量质量分数 $/\%$	
自然级配	1#	11.5	9.3	19.3	22.3	10.0	6.4	10.5	7.9	2.8	2.37	7.5
	2#	10.0	8.7	16.7	19.3	8.5	4.0	14.6	13.7	4.5	2.25	7.9
过40mm筛后级配	3#			37.2	16.7	10.7	17.6	13.2	4.6		2.15	8.0

由表2和图1可见,自然钢渣主要有两种粒组,即直径大于5mm的粗粒和小于5mm的细粒^[2]。3条钢渣级配曲线均较平缓,其均匀系数都远大于10,说明材料颗粒极不均匀,各种粒组成成分连续级配,均属级配良好,用于填方工程可以获得较大的干密度。

试验研究表明^[2],影响粗粒土工程特性的主要因素是材料的颗粒组成、粗料($d >$

5mm)含量、细料($d < 5\text{ mm}$)性质等。颗粒组成不同时,性质差别甚大。在粗粒含量(体积分数) $\rho_5 \leq 30\%$ 范围内,细料占绝大多数,粗料颗粒被细料颗粒所包裹,干密度乃决定于细料,粗料只起影响作用,故在此范围密度增长率较小;当 $\rho_5 > 30\%$ 以后,粗料开始起骨架作用,在粗细料彼此充填的联合作用下,干密度值增长较快;当 ρ_5 达70%左右时,粗料形成

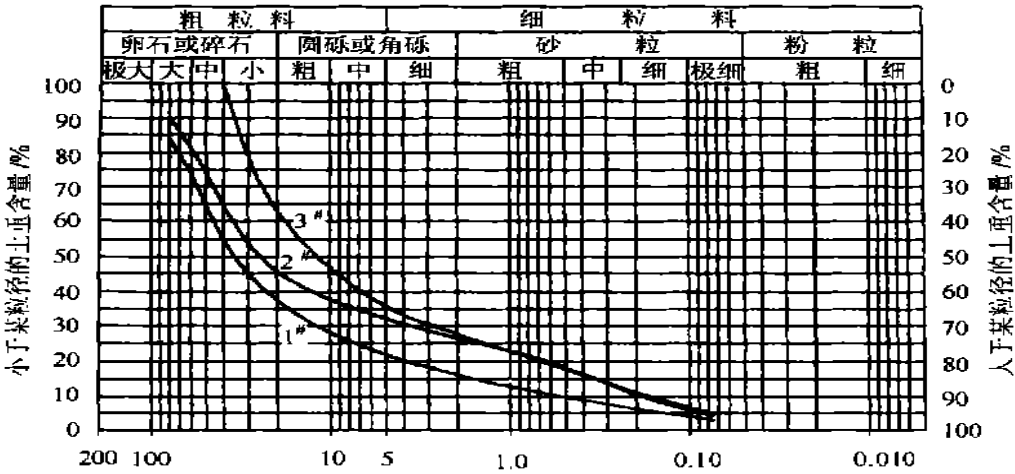


图1 钢渣颗粒级配曲线图

完整骨架,细料又能填满空隙,干密度值最大;而 $\rho_s > 70\%$ 以后,由于细料含量减少,填不满粗料的空隙,故粗料起主要作用,细料只起影响作用,出现干密度随粗料增加而减少的现象。当 ρ_s 为70%左右时,细料和粗料相互充填密实,空隙最小,沉降变形最小。填料抗剪强度由3部分组成,即细料本身的强度;粗料间的强度和粗、细料间的强度;当 $\rho_s < 30\%$ 时,抗剪强度随粗料含量的增加稍有增大,但基本上仍决定于细料;当 ρ_s 在30%~70%时,抗剪强度随粗料含量增加而显著增大;当 $\rho_s > 70\%$ 时,因细粒填不满粗粒空隙,抗剪强度主要取决于粗料之间的摩擦力和咬合力,因而强度不再提高。粗粒土中小于0.1 mm的细料含量大于10%以后,内摩擦角及渗透系数都有明显减少。

据上述研究成果和表2试验数据,本工程拟采用自然级配钢渣(1#、2#),其粗料含量67.2%

~78.8%,平均73.0%,接近70%,只要保证施工质量,可望获得较大干密度和较小沉降变形,并达到较大的抗剪强度值。另外,其粒径小于0.1 mm的细料含量为2.8%~4.5%,小于10%,这也使其具有较高的抗剪强度和较大的渗透系数,具有良好的工程性质。相对而言,过40 mm筛的人工级配钢渣,因 ρ_s 降至64.6%,比70%偏低较多,因而其最大干密度较小(见表2),渗透系数较低,工程性质稍差。

3.2 钢渣的化学特性

本地钢渣及粉煤灰的化学成分及其含量见表3。由表3可见,组成钢渣的化学成分是高温煅烧产生的多种氧化物,因此在吸水条件下可表现出火山灰活性^[3],发生如下化学反应:

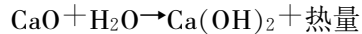


表3 钢渣与粉煤灰化学成分分析结果

	$w(\text{SiO}_2)/\%$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	$w(\text{CaO})/\%$	$w(\text{MgO})/\%$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	合计/%	烧失量/%	pH值
钢渣	24.53	3.56	30.6	6.67	32.36	97.72	6.81	10.5
粉煤灰	49.68	4.49	8.15	1.34	24.08	87.74	10.37	11.0

上述反应的产物如水化硅酸钙、水化铝酸钙均具有较高的强度,但反应的进行有赖于

CaO的含量。实践证明^{[3]①}只有当活性CaO含量高于5%时,废渣才表现出一定的水硬

① 闫树旺等·碳化碱渣的工程特性检测·岩土工程师,1996(4):43~44

性,而活性 CaO 大于 10 % 时,废渣才有较好的水硬性。从表 3 看出,该地区粉煤灰的 CaO 含量仅 8.15 %,远低于钢渣,显然其水硬性不如钢渣好。从废渣浸提液的 pH 值可见废渣均属碱性,不会对钢筋砼结构物(桥、涵等)造成腐蚀。按钢渣的粒度成分和有机质含量,可定名为工业无机碎石土。

3.3 钢渣的水稳定性

因该路段地下水埋深很浅,加之地表稻田、荷塘、沟渠积水的影响,作为路基填料应具有足够的水稳定性。由于钢渣主要为粗颗粒材料组成,含水量的变化对其强度影响很小,在水的浸湿或浸泡下不会产生超限的沉降变形。同时,该填料属粗颗粒碎石土,不会产生冻胀,具有足够的水稳定性。

4 钢渣垫层工艺设计与施工

4.1 工艺设计

该路基处理采取先夯实,后振动碾压,夯实、振动与碾压联合作用的施工工艺。经试验性施工确定施工参数为:夯锤重 2 t,落高 10 m;压路机采用 21 t 振动压路机。自然级配钢渣,为确保压实的均匀性,填筑前清除粒径大于 20 cm 的块体。因含水量对粗粒填料的压实效果影响很小,且本工程使用钢渣的天然含水量与击实试验最佳含水量较接近,因此可采用天然含水量的钢

渣。控制钢渣的含泥量不超过 5 %。分层虚铺厚度为 50 cm。夯实(搭夯)一遍并整平后再碾压 4~5 遍。钢渣最大干密度为 2.37 g/cm^3 ,施工控制干密度不小于 2.21 g/cm^3 ,即垫层的压实度不小于 0.93。路基弯沉值不超过 2.5 mm。

4.2 路基处理施工

根据施工工艺设计参数,于 1998 年 8 月 16 日开始全面施工。首先将上部①、②两层软土挖除,必要时应配合人工降低地下水位,每层虚铺 50 cm 厚钢渣,先用重锤搭夯一遍,整平后再用振动压路机碾压 4~5 遍,检测干密度合格后再施工上一分层。对含泥量较大的钢渣,须用清水冲洗干净后方可填筑。施工期间质检人员认真检查,严格控制施工质量,确保每一道工序均达到设计要求。

5 路基处理效果检测及评价

5.1 干密度检测

施工过程中对钢渣垫层每分层采用灌水法检测干密度,检测结果见表 4。表中数据为每个测点各碾压分层干密度的平均值,测得干密度为 $2.22 \sim 2.65 \text{ g/cm}^3$ 。压实系数在 0.94 ~ >1.00 之间,均满足设计要求。由于钢渣材料含有超尺寸颗粒(击实试验时被筛除),使部分施工压实干密度大于室内击实干密度,压实系数出现大于 1 的情况。

表 4 干密度检测结果(测点 1#~16#)

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#
干密度/ (g cm^{-3})	2.51	2.47	2.65	2.63	2.65	2.51	2.50	2.52	2.43	2.35	2.45	2.33	2.22	2.32	2.25	2.33
压实系数	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	>1.0	0.99	>1.0	0.98	0.94	0.97	0.95	0.98

5.2 重(Ⅱ)型动力触探试验

为检测处理路段整体施工质量,全部钢渣垫层完工后,布置动力触探检测点,从地面向

下连续进行重(Ⅱ)型动力触探,记录每贯入 10 cm 的锤击数,检测结果见表 5。

表 5 重(Ⅱ)型动力触探检测结果(测点 1#~15#)

深度/m	重(Ⅱ)型动力触探检测结果(测点 1#~15#)															平均击数
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	
0.0~0.1	27	35	31	38	35	32	26	32	29	26	33	31	26	32	27	30.7
0.1~0.2	36	40	32	35	38	37	33	27	35	30	28	35	31	28	39	33.6
0.2~0.3	45	42	35	43	46	41	38	37	43	34	36	38	42	41	30	39.4

续表

深度/m	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	10#	11#	12#	13#	14#	15#	平均击数
0.3~0.4	46	45	39	43	43	46	46	41	45	34	52	30	42	48	46	43.1
0.4~0.5	50	44	42	53	45	54	35	46	53	40	45	47	46	55	46	46.7
0.5~0.6	56	51	50	56	47	53	45	54	42	49	46	51	58	69	68	53.0
0.6~0.7	52	56	57	52	52	57	47	57	46	58	54	58	66	66	63	56.1
0.7~0.8	58	45	54	57	56	48	58	68	56	73	79	69	41	56	47	57.7
0.8~0.9	69	68	65	62	51	54	64	116	67	68	71	55	30	38	29	67.5
0.9~1.0	88	99	70	73	67	66	98		119	62	62	39				83.2
1.0~1.1	106		118	113	115	112				45	47	28				112.8
0.1~1.2										40						

注：“—”代表几乎不进尺或不进尺。

由表5可知,钢渣路基水平方向压密较均匀,垂直方向上贯入击数与垫层厚度有关,对垫层较厚路段(1~9号点),击数随深度增加而增大,至一定深度(约0.9~1.1 m),因垫层已变得极为密实,探头阻力与锤击能量接近或达到平衡,使进尺很慢甚至不进尺。这说明:除击数深度效应以外,上层碾压夯实对下伏各分层的密实度仍有叠加影响。垫层较薄路段(10~15点)贯入击数则先随深度增加而增大,而后因下伏较软的地基土层影响,使击数又随深度不断下降,产生超前反映。从动探结果可以看出,贯入击数水平向稳定,虽然沿深度变化,但平均击数大于40击,最小26击,说明垫层强度和密实度均很高。

5.3 路基弯沉值检测

弯沉值是指在规定的标准轴载作用下,路基或路面表面轮隙位置产生的回弹变形值。在路表测试的弯沉值可以反映路基、路面的综合承载能力,弯沉值越小,承载能力越大,反之则越小。钢渣换填处理后按BZZ-100标准车型采用贝克曼梁法进行了路基弯沉值的检测,按照技术要求共检测100个点,测得实际弯沉值变化在1.46~2.03 mm,平均值1.84 mm,小于设计容许弯沉值2.5 mm,满足技术要求。

6 结论

软土路基是控制公路施工工期,制约工程质量的关键路段,必须选择有效的地基处理措施。实践证明,钢渣垫层是处理该类路基的经济有效的方法。钢渣属工业无机碎石土类,粗料含量高,级配良好,具有很好的填筑性能,可达到很高的密实度。钢渣的粒度组成及化学成分使其具有良好的水稳定性和水硬性。只要保证施工质量,可以获得很高的路基强度和很小的路基变形。钢渣处理软土路基可以就地取材,工艺简单,施工方便,工期短,工程造价低。据估算本工程采用钢渣垫层造价约176万元,比砂石垫层节约264万元,工期缩短25 d,经济效益显著。此外,采用大量钢渣作填料可以收旧利废,变废为宝,还能带来可观的环境和社会效益。

参 考 文 献

- 1 JTJ 017-96 公路软土地基路堤设计与施工技术规范
- 2 郭庆国·粗粒土的工程特性及应用·郑州:黄河水利出版社,1998.91~93
- 3 张建国等·工业废渣的分类·岩土工程学报,1997,19(3):113~115

收稿日期:2001-09-12