

水泥改良建筑垃圾再生填料填筑高速公路
路床施工技术研究^{*}

张名成, 徐希娟

(西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

摘要:为解决将城市建筑垃圾再生利用应用于高速公路路基工程的实际问题,降低工程造价,以陕西省西咸北环高速公路采用建筑垃圾再生填料填筑路床工程为例,分析了建筑垃圾再生填料的工程特性及路用性能,探讨了建筑垃圾再生填料填筑路床的施工工艺,验证了采用建筑垃圾再生填料填筑高速公路路床的可行性。

关键词:公路;建筑垃圾;再生填料;路床施工;施工工艺

中图分类号:U418.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2017)04-0115-05

近年来,随着城市化的加速发展及大规模的旧城改造,建筑垃圾逐年增多,全国每年产生的建筑垃圾超过 20 亿 t,且年均增速保持在 10%以上。建筑垃圾露天堆放或沟壑填埋不仅占用土地,而且污染环境。同时,公路交通行业的可持续发展与碎石、砂砾等建设地材短缺的矛盾日益突出,将建筑垃圾再生利用替代砂石材料是解决公路建设地材短缺的有效途径。该文通过陕西西咸北环高速公路采用建筑垃圾再生填料填筑路床的施工,探讨建筑垃圾路床的施工工艺及关键施工环节。

1 工程概况

陕西省西咸北环高速公路全长约 121 km,是《关中—天水经济区发展规划》确定的交通建设重点工程,也是陕西省“2637”高速公路网规划中的重要联络线。黄土地区公路修筑过程中往往对黄土采用

掺石灰固化处理后用于填筑路基,但施工时存在扬尘现象且石灰价格日益上涨。另外一种传统的路基填料——砂砾的禁采禁挖导致砂砾填料相对较少且价格较高。另一方面,沿线建筑垃圾达 2 000 万 m³,具备收集加工后再生利用的条件。

2 建筑垃圾再生填料的工程特性及技术要求

建筑垃圾的主要成分是砖块、砂浆块、砼石块,属于无机非金属材料,耐酸,耐碱,透水性良好,物理和化学性质稳定,不具备塑性,遇水不冻胀、不收缩,其性能优于黏土、粉性土甚至砂土和石灰土,是难得的水稳定性和冻稳定性好的道路工程材料。将其加工后用作路基填料,其良好的透水性能阻断地下毛细水上升,且作为路面基础持力层,强度变化不大。

采用建筑垃圾再生填料填筑高速公路路床,其各项技术指标应满足表 1 的要求。

表 1 建筑垃圾路床填料的技术要求

项目	规定值或允许值/%	检测频率	试验方法
杂物含量	≤0.1	1 次/(10 000 m ³)	见表注
颗粒分析	见表注	1 次/(10 000 m ³)	JTG E40—2007 T0115—1993
有机质含量	≤5.0	1 次/(50 000 m ³)	JTG E40—2007 T0151—1993
易溶盐含量	≤0.3	1 次/(50 000 m ³)	JTG E40—2007 T0153—1993

注:1) 杂物指建筑垃圾再生填料中除砼、砂浆、砖瓦、石和土之外的其他物质,包括木块、塑料袋、布条、纸屑、泡沫等轻物质生活垃圾。其含量试验方法为取具有代表性的样品不少于 50 kg,放入 105℃±5℃烘箱中烘干至恒重,冷却后按照四分法称取 15 kg±1 g 试样不少于 3 份,准确至 1 g;人工分筛上述杂物并称重,计算杂物占混合料总质量的百分比;进行 3 次平行试验,以平均值作为试验结果。2) 要求建筑垃圾路床填料的粒径不超过 31.5 mm,大于 4.75 mm 的颗粒含量为 50%~70%,大于 0.075 mm 的颗粒含量为 90%~100%,不均匀系数不小于 5。

^{*} 基金项目:交通运输部建设科技项目(2013318J16490)

施工现场相同料源、规格的建筑垃圾再生填料作为同一批次材料检测和储存,当填料粗细料比例及组分发生明显变化时,应立即取样进行检测。

3 建筑垃圾再生填料的性能分析

3.1 颗粒分析试验

于西咸北环高速公路沿线建筑垃圾加工场取得具有代表性的样品(见图1),对其进行颗粒分析试验,得到再生填料的级配组成(见图2)。



图1 加工后的建筑垃圾路床填料

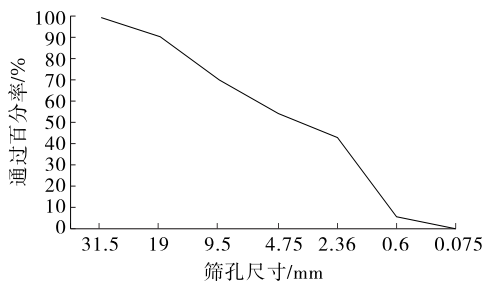


图2 建筑垃圾路床填料的颗粒级配曲线

试验表明再生填料的最大粒径为 31.5 mm, 4.75 mm 关键筛孔通过率为 54.6%, 不均匀系数为 $23.33 > 5$, 说明填料粒径分布范围广, 易于压实; 曲率系数为 $0.30 < 1$, 说明其级配不连续。经过加工的建筑垃圾再生填料属于级配不良的路基填料, 中间颗粒的缺失容易导致粗细颗粒离析, 影响工程质量, 需开展施工技术研究, 采取措施保证其均匀性。

3.2 重型击实试验

为研究水泥掺量对建筑垃圾再生填料性能的影响, 采用 1.0%、1.5%、2.0% 掺量的 P.C42.5 缓凝水泥对再生填料进行改良, 通过预定 5~6 个含水量制取试样进行重型击实试验, 测定不同水泥掺量试样的最大干密度和最佳含水量, 试验结果见表 2。

3.3 无侧限抗压强度试验

根据重型击实试验确定的最大干密度和最佳含水量, 分别制取不同水泥掺量的水泥改良建筑垃圾再生填料试件(见图3), 在 $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 条件下保湿

表2 建筑垃圾路床材料重型击实试验结果

水泥掺量/%	最佳含水量/%	最大干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1.0	16.0	1.86
1.5	14.2	1.85
2.0	14.0	1.86

养护 6 d、浸水 1 d 后测定其 7 d 无侧限抗压强度, 试验结果见表 3。



图3 成型的无侧限抗压强度试件

表3 不同水泥掺量建筑垃圾路床材料的
7 d 无侧限抗压强度

水泥掺量/%	7 d 无侧限抗压强度/MPa
1.0	2.4
1.5	3.3
2.0	3.5

由表 3 可知: 随着水泥掺量的增大, 路床材料 7 d 无侧限抗压强度逐渐增大, 能达到 2.4~3.5 MPa, 且 1.5% 和 2.0% 水泥掺量下的 7 d 无侧限抗压强度相差不大。考虑现场实际应用的经济性, 水泥掺量选用 1.5%。

4 建筑垃圾再生填料填筑路床施工工艺

4.1 施工准备

(1) 施工前对洒水车、推土机、平地机、压路机等施工机械进行调试, 对机械设备的配套情况、技术性能等进行检查与标定。

(2) 施工完毕的路床下承层表面应平整、密实, 对施工完毕的路床下承层进行压实度、高度、横坡等检测, 检测合格后方可进行水泥改良建筑垃圾再生填料路床填筑。

(3) 测放出试验段左边桩、中桩和右边桩, 使用指示桩标识出填筑厚度。

4.2 运输填料

(1) 建筑垃圾再生填料装运前采用机械设备进

行拌和,尽量使填料混合均匀,避免大粒径填料集中装运。

(2) 运输车辆数量、运输能力应满足填筑需要,保证施工连续不中断。

(3) 为防止运输途中扬尘污染,采取洒水或加盖篷布等防护措施。

4.3 布设填料

填筑前在下承层采用白灰洒出 $6\text{ m}\times 10\text{ m}$ 网格,路床每层压实厚度为 0.20 m ,松铺厚度初定为 0.25 m (建筑垃圾再生填料的松铺系数为 $1.20\sim 1.35$),每个网格 15 m^3 填料。运输车将填料运输至填筑面上,按照石灰网格卸料。

卸料后立即采用大功率推土机进行初平,按标高采用渐进式方法,对超粒径的填料采用人工拣出和机械破碎相结合的方法,破碎不了的采用装载机清出场外。

大致粗平后采用单钢轮压路机稳压 $1\sim 2$ 遍,再用平地机进一步精平。整平后及时测定填料的松铺厚度,不满足要求时立即采用平地机继续整平,直至满足要求。

施工布料过程中消除粗细集料离析和“窝”或“带”现象,保证填料的均匀性。

4.4 洒水闷料

严格控制建筑垃圾再生填料的含水率是建筑垃圾路床施工的关键环节。由于建筑垃圾再生填料的材料组成的特殊性,砖块、砂浆块等为疏松多孔结构,空隙率较大,导致再生填料的吸水率较大。同时由于材料组成的不均质性,再生填料吸水是一个较为缓慢的过程,施工过程中应控制好再生填料吸水所需时间。为保证路基碾压质量,出于对填料的洒水均匀性考虑,洒水分 2 次进行。

洒水前应测定建筑垃圾填料的含水率,并通过计算确定所需补水量。洒水车洒水应均匀,防止出现表面局部水分过多的现象,保证其处于最佳含水

量 $1\%\sim 4\%$ 范围内。如施工时路基裸露时间长、气温过高,应适当补水。

洒完水后进行闷料, $2\sim 4\text{ h}$ 后挖开数点检查,待渗透深度达到松铺厚度,且路基表面无明显积水时,采用羊角碾压路机振动碾压 $2\sim 3$ 遍。

4.5 摊铺水泥

采用白灰洒出 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ 网格,每个网格放 1 袋水泥(50 kg),人工均匀摊开。

4.6 水泥拌和

水泥均匀摊开后,采用路拌机对掺拌水泥拌和 2 遍(路拌机最大拌和深度 30 cm),第一遍从两侧向中心拌和,第二遍从中心向两侧拌和。拌和完毕后随机抽取灰剂量进行滴定,符合要求后进行进一步碾压。如果实测灰剂量达不到要求,则补水泥,再次检测直至合格后才能转入下道工序。

4.7 碾压

路基压实度是路基施工中极为重要的控制指标,直接影响路基的使用要求。正确的压实方法是保证路基压实度的重要条件,包括压实厚度、压路机具、碾压速度、碾压遍数等。碾压前应对填筑层的松铺厚度进行检查,符合要求后方可进行碾压。应提供足够的压实功,将砖块和砼块等进一步破碎,使粒径变小、颗粒重新排列,以填充空隙,减少混合料的空隙率。

选用 26 t 单钢轮振动压路机和 22 t 拖式振动羊角碾进行组合碾压。路拌机拌和后,碾压必须在 $3\sim 4\text{ h}$ 内完成,以免水泥初凝,确保路床填筑质量。碾压按照先路边后中间、先轻后重、先慢后快和轮迹重叠的原则进行,压实路线纵向互相平行,横向接头重叠 $0.4\sim 0.5\text{ m}$,前后相邻两区段纵向重叠 $2.0\sim 5.0\text{ m}$ 。碾压技术参数见表 4。应全面均匀压实,保证无漏压、无死角。如施工时气温过高或干燥、风速过大、表面水分流失过快,后几遍碾压应在洒水后进行。最终碾压遍数根据试验段确定。

表 4 建筑垃圾路床碾压技术参数

碾压阶段	压路机类型	碾压速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	碾压遍数/遍	工艺要求
稳压	单钢轮压路机	$1.5\sim 2$	$1\sim 2$	静压
复压	羊角碾压路机	$2\sim 4$	$4\sim 6$	先弱振,再强振
终压	单钢轮压路机	$2\sim 4$	$4\sim 6$	先弱振,再强振,最后静压收面

碾压结束后,路基表面应平整,无骨料离析、翻浆、泥泞、弹簧、松散、起皮等现象(见图 4)。

4.8 施工过程检测

水泥改良建筑垃圾路床填料碾压完成后,采用



图 4 碾压成型的路床表面

灌砂法按规定检测频率检测压实度,并采用动态变形模量测试仪检测动态变形模量,同时测定路基中线位置、宽度、填筑层厚度、边坡、平整度等几何尺寸。质量检测指标应符合表 5 的规定。

4.9 养生

每层水泥改良建筑垃圾路床填料填筑完成、验收合格后进行养生,养生期不少于 7 d,每天洒水 5~7 次。养生期间禁止任何车辆通行。

表 5 水泥改良建筑垃圾路床施工质量控制标准

项目	实测值	规定值或允许偏差	检测方法和频率
外观	表面平整、密实,无明显轮迹、裂缝、沉降等缺陷,无明显骨料离析现象	表面平整、密实,不得有明显轮迹、裂缝、沉降等缺陷,且无明显骨料离析现象	目测;每 2 000 m ² 检测 6 处
松铺厚度	24 cm	≤25 cm	尺量;每 200 m 不少于 5 个横断面,每个横断面不少于 3 个点
压实度	98.1%	≥96%	灌砂法检验;每 1 000 m ² 至少检验 2 个点,不足 1 000 m ² 时检验 2 个点,必要时根据需要增加检测点
动态变形模量	76.2 MPa	≥40 MPa	动态变形模量测试仪检测;每 100 m 等间距检测 2 个断面 6 个点,每断面左、中、右各 1 个测点,其中左、右点距路基边缘 1 m

4.10 施工验收

要求路基表面层平整、密实,无明显杂物、凹凸、

粒料离析现象,路床顶面横坡与路拱横坡一致。相关指标应符合表 6 的规定。

表 6 建筑垃圾再生填料填筑路床验收标准

项目	实测值	规定值或允许偏差	检查方法和频率
压实度	97.3%	≥96%	灌砂法检测;每 200 m 每压实层测 4 处
动态变形模量	88.9 MPa	≥40 MPa	动态变形模量测试仪检测;每 200 m 抽样检验 6 个点,其中左、右距路肩边线 1.5 m 处各 2 个点,路基中部 2 个点
弯沉	78 (0.01 mm)	≤100 (0.01 mm)	贝克曼梁检测;双车道(不超过 1 km)检查 80~100 个点,单车道或多车道按车道数与双车道之比减少或增加测点
纵断高程	合格	+10 mm, -20 mm	水准仪检测;每 200 m 测 4 个断面
中线偏位	合格	50 mm	经纬仪检测;每 200 m 测 4 个点,弯道增加 HY、YH 两点
宽度	合格	符合设计要求	米尺检测;每 200 m 测 4 处
平整度	合格	20 mm	3 m 直尺检测;每 200 m 测 2 处×10 尺
横坡	合格	±0.3%	水准仪检测;每 200 m 测 4 个断面
边坡	坡度合格 平顺度合格	不陡于设计值 符合设计要求	每 200 m 抽查 4 处

4.11 施工注意事项

(1) 路床填筑过程中安排专人清捡现场的木

块、塑料袋、布条、纸屑、泡沫等杂物,将超大粒径颗粒及时清出场外。

(2) 掺灰必须按照计算出的掺灰量人工均匀撒布,并采用路拌机拌和,保证掺灰均匀,避免出现夹层和花脸现象。

(3) 严格控制填料的含水量和灰剂量,灰剂量必须达到设计要求,掺灰必须在全松铺厚度范围内且拌和均匀。碾压时,含水率控制在最佳含水率 $-1\% \sim +4\%$ 范围内。

(4) 严格控制填筑层平整度,要求层层找平。保证碾压均匀,无漏压、无死角,严禁压路机在施工作业面上调头、急刹车。

5 结语

建筑垃圾再生填料填筑路床的质量控制重点是严格控制建筑垃圾再生填料的颗粒组成,施工过程中尤其应注意对其均匀性的控制;通过试验段确定合适的碾压次数,根据施工实际情况严格控制施工工艺参数,包括摊铺层厚、压路机碾压遍数、洒水时机和次数等。鉴于建筑垃圾再生填料疏松多孔的特性,其吸水率大,吸水缓慢,施工中洒水应分2次进行,并进行一定时间的闷料。

建筑垃圾经过加工处理后是一种良好的路基填

料,可替代传统的砂砾和灰土填料。将建筑垃圾再生利用作为路床填料大规模应用于高速公路建设中,既能保护环境,又能大幅降低工程建设成本,做到物尽其用、变废为宝。

参考文献:

- [1] 谢士杰.建筑渣土在城市道路建设中应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2001.
- [2] 夏慧慧,王坚,李巍.建筑垃圾在路基处理中的应用[J].城市道桥与防洪,2009(7).
- [3] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [4] 牛永宏,郭藤藤,王鑫.建筑垃圾回填路基施工技术研究[J].筑路机械与施工机械化,2014(9).
- [5] 陈子玉,曾华.我国城市建筑渣土处理的现状与对策[J].南京晓庄学院学报,2003,19(4).
- [6] 陈福东.城市道路路基填筑中建筑垃圾的处理[J].筑路机械与施工机械化,2008(9).
- [7] 秦健,赵建新.建筑垃圾渣土在世博园区道路工程中的应用[J].中国市政工程,2009(3).

收稿日期:2017-04-16

(上接第114页)

路基土饱和度具有一定控制作用,可防止由于土体饱和和带来的砂土路基液化问题。微生物在反应中分泌的胞外聚合物具有一定粘附作用,极易在土体颗粒之间形成一种类似于膜的结构,使土体的渗透性降低,可运用于具有防渗要求的工程。

(3) 采用分步灌浆法,通过砂土中的微生物反应所生成的凝胶填充物加固较为软弱的砂土体。

(4) 微生物矿化碳酸钙技术可有效解决软弱地基中砂桩力学性质不稳定的问题,可在传统砂桩施工技术的基础上增加微生物注浆加固砂桩。

参考文献:

- [1] Li M, Cheng X H, Guo H X. Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2013, 76(1).
- [2] Dejong J T, Soga K, Kavazanjian E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges[J]. Geotechnique, 2013, 63(4).
- [3] 程晓辉,麻强,杨钻,等.微生物灌浆加固液化砂土地基

- 的动力反应研究[J].岩土工程学报,2013,35(8).
- [4] Warthmann R, Van Lith Y, Vasconcelos C, et al. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J]. Geology, 2000, 28.
- [5] 许朝阳,张莉.微生物改性对粉土强度的影响[J].建筑科学,2009,25(5).
- [6] 荣辉,钱春香,李龙志.微生物水泥胶结机理[J].硅酸盐学报,2013,41(3).
- [7] 黄磊,杨永强,李金洪.生物矿化研究现状和展望[J].地质与资源,2009,18(4).
- [8] 张刚生,谢先德. CaCO_3 生物矿化的研究进展:有机质的控制作用[J].地球科学进展,2000,15(2).
- [9] 范珊珊.微生物反硝化土体加固新技术初探[D].武汉:华中科技大学,2013.
- [10] Qabany A A, Soga K. Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils[J]. Geotechnique, 2013, 63(4).
- [11] 成亮,钱春香,王瑞兴,等.碳酸岩矿化菌诱导碳酸钙晶体形成机理研究[J].化学学报,2007,65(19).
- [12] 李沛豪,屈文俊.细菌诱导矿化保护历史建筑遗产的机理及效果[J].硅酸盐学报,2009,37(4).

收稿日期:2017-03-23