

红砂岩碎石土路基强夯加固工艺研究

刘城志

(湖南省高速公路集团有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要: 为保证红砂岩碎石土路基压实质量,减小工后沉降和不均匀沉降,对红砂岩碎石土路基试验段开展强夯加固试验,分析路基强夯加固效果。研究表明,路基填筑高度一致时,路基加固效果随夯击能量增加而提高,且夯坑 1.5 m 半径范围内土体出现明显裂缝和回弹;单击夯沉量随夯击次数增加而减小,路基密实度提高,夯击能量 $\geq 1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,累积夯沉量在 680 mm 以上,且夯击次数超过 5 次后,夯坑周围土体变形趋于稳定;随夯击能量增大,强夯加固后路基土体压缩模量提高,最大提高 111%。

关键词: 公路;碎石土路基;红砂岩;强夯;夯击能量;夯沉量

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)01-0063-04

红砂岩是中国华中地区常见岩土材料,主要呈泥状胶结结构,强度差异大、遇水易崩解、压实质量难控制,且采用红砂岩填筑公路路基易产生工后沉降和不均匀沉降。针对红砂岩路基填料的特殊性,选用强夯法加固红砂岩路基,保证路基压实质量,减少土体空隙率,防止路基出现工后沉降和不均匀沉降。冯世进、谢为等研究了路基强夯加固效果影响因素,指出随夯击次数增加,夯沉量和影响深度逐渐增大;随落距增大,夯坑深度和影响深度也逐渐增大。侯伟乐结合工程案例分析了强夯法在高速公路路基中的应用效果,表明强夯路基的压实度和沉降量满足设计要求。程磊、李绮依托高速公路路基工程,研究了强夯法在黄土路基中的应用,并制定了湿陷性黄土路基强夯作业标准。梅涛涛等对比研究了中、欧、美强夯法设计参数及土质应用情况。黄达等的研究表明强夯加固碎石土地基的承载力良好,随土石比降低,承载力逐渐提高,但后期出现差异沉降。仇文岗等分析了碎石土地基强夯加固效果,并提出了强夯效果综合检测法。张衡通过强夯法解决了杂填土承载力低、压缩性高的难题。但由于中国地质条件差异,强夯工艺缺少相应标准和理论依据,且强夯法在红砂岩碎石土路基中应用较少。该文依托某山区高速公路路堤试验段,对红砂岩碎石土路基开展强夯加固工艺研究。

1 试验段地质及红砂岩技术性质

1.1 试验段地质概况

试验段为高山深沟地貌,地形起伏较大,地质构

造简单,多为单斜构造岩层;红砂岩节理裂隙中含有大量孔隙水,受大气降水和山间流水的影响,地下水丰富,场区含水量季节性变化明显。

路基填料取自边坡开挖和隧道渣,主要由根植土、亚黏土和红砂岩等组成,红砂岩含量为 60%~80%。亚黏土呈褐红色,主要为硬塑状态,含有少量碎石;红砂岩呈紫红色,主要由石英、长石、蒙脱石等矿物组成,质地偏硬,以弱风化类型为主,属于第二类红砂岩。

1.2 红砂岩技术性质

参照 JTG E40-2007《公路土工试验规程》测定红砂岩化学成分、物理力学性质,试验段红砂岩的性质见表 1~2,红砂岩风化碎屑物颗粒组成见表 3。

表 1 红砂岩的化学成分

化学成分	含量/%	化学成分	含量/%
SiO ₂	49.7	Fe ₂ O ₃	15.6
Al ₂ O ₃	14.2	其他	12.6
CaO	7.9		

表 2 红砂岩的物理力学性质

项目	试验结果	
比重	2.68	
吸水率/%	2.55	
孔隙率/%	6.1	
最大干密度/(g·cm ⁻³)	2.06	
最佳含水率/%	4.39	
单轴抗压强度/MPa	干燥	91.8
	饱和	33.6
软化系数	0.22	

表3 红砂岩风化碎屑物的颗粒组成

粒径/mm	通过质量 百分率/%	粒径/mm	通过质量 百分率/%
60	100.0	2.000	78.6
40	100.0	1.000	71.2
20	95.0	0.500	64.6
10	92.8	0.250	38.2
5	87.9	0.075	2.4

由表2~3可知:红砂岩的孔隙率高、强度较低、水稳定性差,风化碎屑物粒径不一,以0.25~2 mm为主。

1.3 红砂岩的崩解处理

相关研究结果表明,红砂岩遇水崩解后形成红砂岩碎石土,崩解性消除,水稳定性提高,满足公路路基填料设计要求。因此,对填料场红砂岩进行预崩解处理,在阳光和雨水等自然因素作用下使其崩解性消除,再运往工地填筑路基。红砂岩预崩解处理阶段至少连续10 d,其中晴天每天浇水1次,使其含水率为2.10%~2.60%。红砂岩处理10 d后,若粒径 ≥ 35 cm的红砂岩块表面出现大量裂缝,且用羊角锤轻敲产生碎屑和碎块,则认为红砂岩崩解处理完毕。

2 试验方案

2.1 强夯设计方案

强夯加固红砂岩碎石土路基设计方案见表4。结合工程实际和试验段工程地质条件,将试验段划分为A、B、C、D 4个试验区段且面积均不小于15 m \times 30 m。最后2次夯击量平均值 ≤ 6 cm时,停止夯击。

表4 强夯设计方案

试验区段	主夯			满夯	
	单点夯 击能量/ (kN \cdot m)	夯距/ m	夯点 布置 形式	单点夯 击能量/ (kN \cdot m)	夯距/ m
A	800	3.0	正方形	800	1/3 锤印搭接
B	1 000	3.0		800	1/3 锤印搭接
C	1 200	3.5		800	1/3 锤印搭接
D	1 400	3.5		800	1/3 锤印搭接

2.2 原位试验方案

对强夯路基开展原位试验,包括土体变形试验、平板荷载试验,评价红砂岩碎石土路基强夯加固效果,确定合理的红砂岩碎石土路基强夯加固工艺。

2.2.1 土体变形试验

(1) 采用灌水法测定红砂岩碎石土路基压实

度,分析夯击能量对路基的加固效果。试坑尺寸为80 cm \times 80 cm \times 80 cm。

(2) 采用水准仪和塔尺测定路基夯沉量和夯坑周围土体隆起量,分析夯击次数对路基的加固效果。

2.2.2 平板荷载试验

参照GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》中平板荷载试验方法,分别在强夯前后对路基进行试验,研究强夯红砂岩碎石土路基的承载力。试验选用圆形刚性承压板,直径为40 cm;试坑宽度大于承压板直径的3倍;加载设备选用液压千斤顶,量程为200 kN。试验中,保证试坑表面压实时的含水率,并用中砂抹平。压缩模量 E_0 按下式计算。

$$E_0 = 0.785(1 - \mu^2)pd/s \quad (1)$$

式中: μ 为路基土泊松比,红砂岩碎石土取0.27; p 为上覆荷载(kPa); d 为承载板直径(cm); s 为路基沉降量(mm)。

3 试验结果与分析

3.1 土体变形试验

夯击能量对红砂岩碎石土路基压实度的影响见图1;路堤高度为6 m时,夯击次数对单点夯沉量的影响见图2。

由图1、图2可知:1)红砂岩碎石土填筑路基高度一致的情况下,随夯击能量增加,压实度增大,说明路基加固效果不断提高。路堤高度为6 m时,夯击能量达到1 400 kN \cdot m,D区段压实度为94%,满足JTG D30—2015《公路路基设计规范》中路堤压实质量要求。路堤高度为5 m时,夯击能量只需达到1 200 kN \cdot m时就能满足压实质量要求;路堤高度为4 m时,夯击能量达到1 000 kN \cdot m时满足压实质量要求。2)不同试验区段累积夯沉量变化

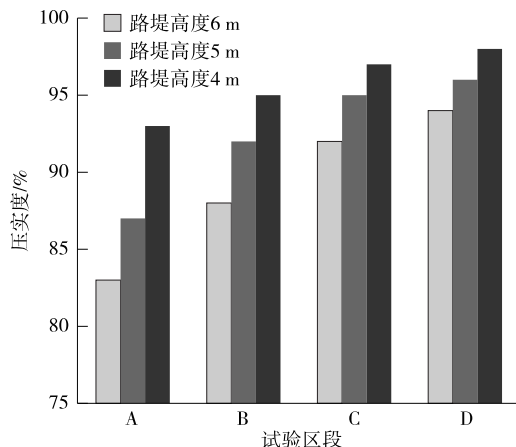


图1 夯击能量对红砂岩碎石土路基压实度的影响

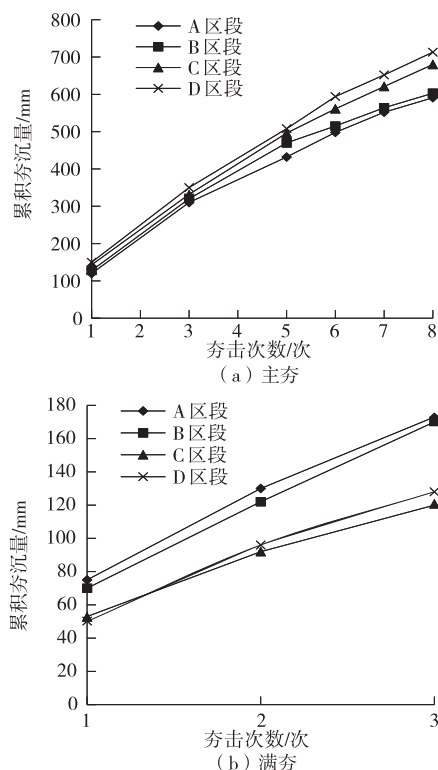


图2 夯击次数对红砂岩碎石土路基夯沉量的影响

基本一致,单击夯沉量随夯击次数增加而减小,说明路基密实度逐渐提高,强夯加固红砂岩碎石土路基的效果良好,其中初始夯击产生的夯沉量最大,至少为120 mm。在主夯阶段,夯击能量 $\leq 1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,路基累积夯沉量不超过605 mm,且第5次后单击夯沉量 $< 6\text{ cm}$;夯击能量 $\geq 1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,路基累积夯沉量在680 mm以上,且第6次后单击夯沉

量 $\leq 6\text{ cm}$ 。在满夯阶段,夯击能量 $\leq 1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,路基初始单击夯沉量 $\geq 6\text{ cm}$,第2次后单击夯沉量接近6 cm,说明路基压实度有提升空间;夯击能量 $\geq 1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$ 时,路基初始单击夯沉量 $< 6\text{ cm}$,说明主夯阶段路基加固效果良好。

另外,随夯击能量增加,夯坑1.5 m半径范围内土体出现明显裂缝和回弹,超过夯坑中心点3 m半径范围后,土体基本无变形;夯击次数超过5次后,周围土体隆起高度趋于稳定,试验区段A、B、C、D最大隆起高度分别约为主夯阶段累积夯沉量的11%、12%、12%和14%。选用夯击能量 $< 1\,200\text{ kN}\cdot\text{m}$ 的强夯工艺加固6 m红砂岩碎石土路基的效果不明显,建议适当增加夯击能量,但需注意过大夯击能量对路基土体的破坏。

3.2 平板荷载试验

试验区段A、B、C、D强夯前后上覆荷载 p 与路基沉降量 s 的关系见图3,压缩模量见表5。

由图3和表5可知:1) 红砂岩碎石土路基强夯前,沉降量随荷载增加逐渐增大,且增大趋势比强夯后沉降量明显,荷载为300 kPa时,平均沉降量为196 mm;路基强夯加固后,沉降量与上覆荷载近似成线性关系,沉降量增大趋势缓慢,荷载增加50 kPa,沉降量不超过7 mm。说明强夯前路基较松散、承载力低,在荷载作用下产生较大变形;在强夯作用下,路基密实度显著提高、承载力增强,路基变形显著减小,强度得到提高。2) 红砂岩碎石土路基强夯加固后,随荷载增加,较大夯击能量的路基产生

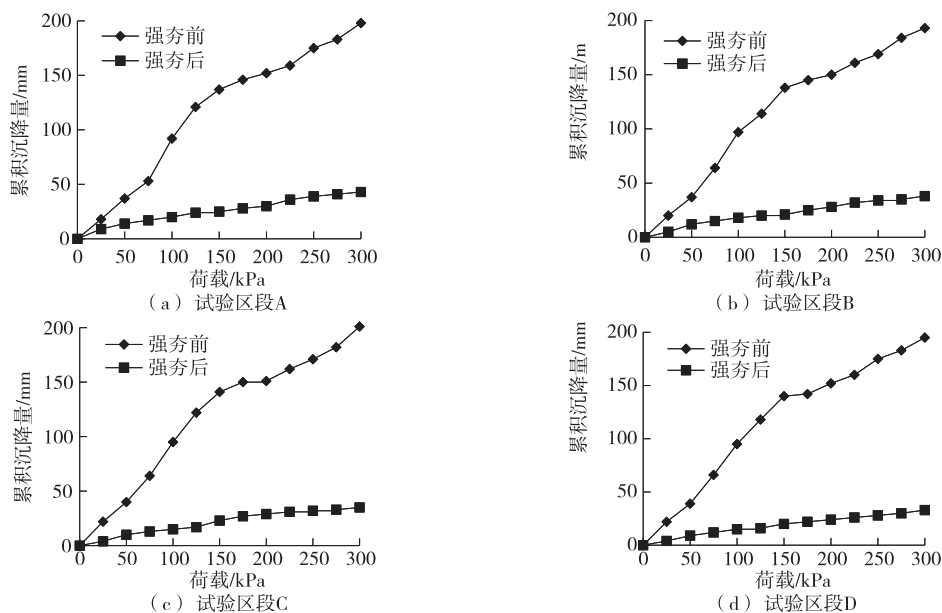


图3 上覆荷载与红砂岩碎石土路基沉降量的关系

表5 强夯前后红砂岩碎石土路基的压缩模量

试验区段	压缩模量/MPa	
	强夯前	强夯后
A	1.87	2.79
B	2.04	3.66
C	1.97	3.94
D	1.92	4.12

的沉降量更小,但沉降量相差较小,荷载为 300 kPa 时产生的平均变形量约为 37 mm,约为强夯前路基变形量的 19%。表明路基强夯加固后承载力显著提高,一定程度上减小了路基工后沉降和不均匀沉降。3) 随夯击能量增大,强夯加固后路基土体压缩模量逐渐提高,与路基强夯前土体压缩模量平均值 1.95 MPa 相比,试验区段 A、B、C、D 的压缩模量分别提高 43%、88%、102%、111%。说明红砂岩碎石土路基强夯加固后,压缩模量显著提高,压缩性能得到明显改善。但夯击能量 $>1\ 200\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 后压缩模量提高幅度较小。

综上,采用强夯法加固红砂岩碎石土路基的效果良好,压实度、承载力和强度提高。路堤填筑高度为 4~5 m 时,建议采用 B 区段强夯工艺;路堤填筑高度为 5~6 m 时,建议采用 C 区段强夯工艺。

4 结论

(1) 路堤填筑高度一致时,路基加固效果随夯击能量增加逐渐提高。路堤高度分别为 4、5、6 m,夯击能量分别达到 1 000、1 200、1 400 $\text{kN} \cdot \text{m}$ 时,压实度在 94% 以上,满足公路路堤压实质量要求。

(2) 夯击能量一致时,单击夯沉量随夯击次数增加而减小,路基密实度逐渐提高;夯击能量越高,路基主夯阶段产生的累积夯沉量越大,夯击能量 $\geq 1\ 200\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 时,累积夯沉量在 680 mm 以上;随夯击能量增加,夯坑 1.5 m 半径范围内土体出现明显裂缝和回弹,且夯击次数超过 5 次后,周围土体变形趋于稳定。

(3) 路基强夯加固后强度和承载力提高,变形量比强夯前显著减小,荷载为 300 kPa 时产生的平均变形量约为强夯前路基变形量的 19%;随夯击能量增大,强夯加固后路基土体压缩模量逐渐提高,最大提高 111%。

(4) 路堤填筑高度为 4~5 m 时,建议采用 B 区段强夯工艺;路堤填筑高度为 5~6 m 时,建议采用 C 区段强夯工艺。

参考文献:

- [1] 喻雅琴.湘西地区路用红砂岩改良土力学特性研究[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [2] 胡振南,杨建华,黄庆,等.强夯法处理红砂岩碎石土路基试验研究[J].公路交通科技(应用技术版),2007(3):12-17+22.
- [3] 刘汉龙,赵明华.地基处理研究进展[J].土木工程学报,2016,49(1):96-115.
- [4] 唐彩云.红砂岩路堤的强夯处理与沉降特性研究[D].长沙:长沙理工大学,2012.
- [5] 冯世进,胡斌,张旭,等.强夯参数对夯击效果影响的室内模型试验[J].同济大学学报(自然科学版),2012,40(8):1147-1153.
- [6] 谢为.强夯施工参数对路基加固效果的影响[J].湖南交通科技,2019,45(1):42-45.
- [7] 侯伟乐.强夯法在高速公路路基中的应用[J].华东公路,2019(6):93-95.
- [8] 程磊.强夯法在阜朝高速公路路基施工中的应用技术研究[J].公路,2014(8):171-176.
- [9] 李绮.公路湿陷性黄土地基处理技术应用:以惠深高速公路为例[J].工程技术研究,2019,4(3):64-65.
- [10] 梅涛涛,王德咏,王新,等.中欧美强夯法地基处理对比[J].水运工程,2019(2):118-121+144.
- [11] 黄达,金华辉,吴雄伟.碎石土强夯加固效果荷载试验分析[J].西南交通大学学报,2013,48(3):435-440+454.
- [12] 仇文岗,侯中杰,钟祖良,等.基于综合检测法的碎石土地基强夯效果评价[J].武汉大学学报(工学版),2019,52(9):788-795+801.
- [13] 张衡.公路工程杂填土的处理方法与路基加固研究[D].西安:长安大学,2019.
- [14] 卿笃干,朱自强,杨铠.常吉高速沿线红砂岩工程地质特性研究[J].公路工程,2008,33(6):1-4+15.
- [15] 刘跃.UGM(1,1)模型在特殊路基沉降中的应用[J].公路与汽运,2020(3):69-71+80.
- [16] 朱沙.灰色 Verhulst 模型在高速公路路基沉降预测中的应用[J].公路与汽运,2018(3):103-105.
- [17] 张锐,滕煜晨,刘闯.路基回弹弯沉控制方法及试验验证[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2019,16(2):8-14.
- [18] 谢宇航,赵健,郭昕,等.组合预测模型在路基沉降中的应用研究[J].交通科学与工程,2019,35(4):28-33.