

DOI: 10.20035/j.issn.1671-2668.2024.02.011

不同碎石化技术下旧水泥路面力学响应对比分析

杨森顺¹, 周怀德², 邓尚瑛¹

(1. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 广西北投交通养护科技集团有限公司, 广西 南宁 530025)

摘要: 通过碎石化效果评价、弯沉测试、回弹模量测试, 对比分析多锤头碎石化路面和共振碎石化路面在力学响应方面的差异。结果表明, 共振碎石化路面水泥混凝土块的粒径更小、更均匀; 在路基较软弱路段, 多锤头碎石化技术在旧路面下层的粒径保证率仅为 21%, 而共振碎石化技术在旧路面上、中、下层的粒径保证率均在 75% 以上; 与多锤头碎石化技术相比, 采用共振碎石化技术破碎的路面其弯沉更低、模量更高; 碎石化施工后短暂开放交通能有效提高碎石化路面的力学性能, 相比刚施工完成时, 开放交通 1 d 后多锤头碎石化路面和共振碎石化路面的弯沉分别降低 23.47%、30.59%。

关键词: 公路; 水泥路面; 多锤头碎石化; 共振碎石化; 力学响应

中图分类号: U416.216

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2024)02-0051-04

20 世纪末以来, 中国修建了大量水泥混凝土路面。随着经济的快速发展, 交通量飞速增长, 在长时间重载交通及雨水等自然环境因素作用下, 绝大部分水泥路面出现裂缝、破碎板、板角断裂等病害^[1-3], 服务能力急速下降, 严重影响人们的出行品质及行车安全, 必须进行大修或改建。但水泥路面修补较麻烦, 维修费用较高, 耗时较长, 且效果难以保证。因此, 将破损的水泥路面碎石化后改建为沥青路面最普遍。在水泥路面碎石化中常用的工艺有多锤头碎石化技术^[4-5]和共振碎石化技术^[6-8]。国外对路面碎石化的研究起步较早, 设备发展也较完善。在高速公路维护方面, 美国许多州大量使用碎石化技术^[9], 2002 年密苏里州颁布的《路面养护手册》中指出破碎后的水泥碎块可以作为路面的基层, 其上可以加铺沥青路面也可以加铺水泥路面^[10]。目前国际上碎石化后常规的路面处置方法是在其上面加铺一层厚度不小于 15 cm 的沥青混凝土^[11]。中国的许多学者也对碎石化技术进行了研究, 如王令虎通过弯沉测试发现旧路面采用共振碎石化后弯沉变异系数大幅度减小, 认为共振碎石化技术可以有效改善路面结构承载能力不均匀的问题^[12]; 杨凯提出了多锤头碎石化的标准化施工工艺^[13]; 刘展瑞等在碎石化层顶部增设富油沥青 AC-10 抗疲劳夹层, 通过疲劳试验和数值计算分析了不同荷载方式下碎石化层顶抗疲劳夹层的抗裂性能及抗裂力学机制^[14]。然而大部分研究只研究单一的碎石化技术或对两种

碎石化技术进行施工工艺方面的对比, 很少对其力学响应进行对比分析。本文以实体工程为依托, 在对比两种碎石化技术施工工艺的基础上, 对比分析多锤头碎石化、共振碎石化施工前后路面的力学响应, 为不同路面工况合理选取碎石化施工技术提供参考。

1 工程概况

某国省干道大中修养护工程全长 5.8 km, 原水泥混凝土路面宽 9.0 m, 两侧土路肩每侧宽 0.5 m, 路面结构层为 18 cm 级配碎石底基层+20 cm 水泥稳定碎石基层+1 cm 封油层+26 cm 水泥混凝土面层。设计速度为 60 km/h。

根据前期调查结果, 初选路基地质情况较好、路面状况类似的正常路段共 1 000 m, 为保证对比的科学性、可信度, 以 100 m 为一段, 通过贝克曼梁测试 10 个路段的弯沉值, 选取两个弯沉测试值相近的路段, 一段 100 m 用于多锤头碎石化施工, 另一段 100 m 用于共振碎石化施工。同时选取路基软弱路段 100 m, 分别取 50 m 用于多锤头碎石化施工、共振碎石化施工(见图 1、图 2)。



(a) 多锤头碎石化前

(b) 多锤头碎石化

图 1 多锤头碎石化

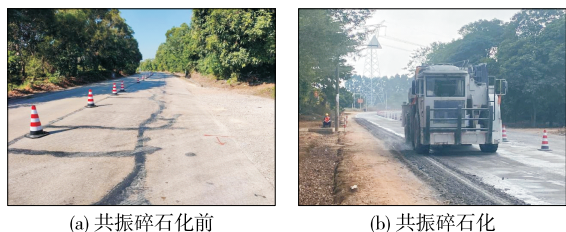


图 2 共振碎石化

2 试验方案

2.1 试验条件

在进行碎石化施工前进行试破碎,了解破碎后的粒径分布情况及均匀性,并获得相应施工参数、设备控制参数。根据设计要求及试破碎效果确定施工参数、设备控制参数如下:多锤头破碎机单锤质量为 700 kg,每次落锤高度为 1.2 m;共振碎石机的功率为 447.42 kW,工作频率为 55 Hz,振幅为 15 mm;多锤头碎石化后通过 16 t 及以上 Z 形单钢轮压路机碾压 3 遍,钢轮压路机碾压 2 遍,压路机行进速度不超过 5 km/h。

2.2 测试方案

通过挖掘机开挖试坑,开挖尺寸为 80 cm × 80 cm,开挖深度不小于旧路面板厚度的 2/3,并将其分为上、中、下 3 层,分别用直尺量取上、中、下层路面碎石化后水泥混凝土块粒径,得到粒径小于设计粒径的数量,并据此计算粒径保证率。

弯沉是公路设计和公路工程质量评价的重要技术指标之一。在测试路段每隔 20 m 选取测试点,共选取 5 个测试点,与测试路段起点的距离分别为 10 m、30 m、50 m、70 m、90 m,采用贝克曼梁法测试旧水泥路面破碎前后及开放交通 3 d 后的弯沉。车辆荷载为标准轴载 BZZ-100,车辆行进速度为 5 km/h。测试时,当表针转动到最大值时,迅速读取初读数 L_1 ,待汽车驶出弯沉影响半径(3 m 以上)且表针回转稳定后读取终读数 L_2 ,通过 L_1 、 L_2 计算回弹弯沉值。

路面设计中采用回弹模量作为抗压强度指标。采用刚性承载板法测试旧水泥路面破碎前后及开放交通 3 d 后的回弹模量,测点位置与弯沉测点位置相同。测试前,对不平整处用细砂填平,参考土基回弹模量测试方法,第一级荷载取 0.02 MPa,后续每级荷载增加 0.05 MPa。此外,由于碎石化面层回弹变形不能达到 1 mm,根据现场实测,第 9 级荷载后

变形无明显变化,采用 9 级荷载进行测试。测试过程中,车辆荷载为标准轴载 BZZ-100,通过逐级加载、卸载测得每级荷载下路面回弹变形,并据此计算路面回弹模量。

3 测试结果分析

3.1 碎石化效果评价

3.1.1 正常路段碎石化效果评价

在路基地质情况较好的路段,多锤头碎石化、共振碎石化后旧路面每层水泥混凝土块的粒径分别见表 1、表 2。采用直尺检查,检查频率为 20 m 一处。从表 1、表 2 可以看出:两种碎石化技术的碎石化效果均符合规范要求,机械参数设置合理;在上、中层,两种路面碎石化技术的破碎效果基本相同,但在下层共振碎石化效果好于多锤头碎石化效果。总体来看,共振碎石化的破碎效果更好,碎石化后粒径较小,裂缝破裂角度与水平方向呈 $37^\circ \sim 42^\circ$,碎石直接以斜角相互接触,整体性及承载能力更强(见图 3)。

表 1 正常路段路面多锤头碎石化效果评价

层位	粒径要求/ cm	实测粒径 保证率/%	要求粒径 保证率/%
上	≤ 7.5	94	
中	≤ 22.2	87	75
下	≤ 37.5	77	

表 2 正常路段路面共振碎石化效果评价

层位	粒径要求/ cm	实测粒径 保证率/%	要求粒径 保证率/%
上	≤ 5	96	
中	≤ 10	85	75
下	≤ 18	83	



图 3 碎石化后路面评价

3.1.2 路基软弱路段碎石化效果评价

路基较软弱路段多锤头碎石化、共振碎石化后

旧路面每层水泥混凝土块的粒径分别见表 3、表 4,检查方法和频率与路基较好路段相同。

表 3 路基软弱路段路面多锤头碎石化效果评价

层位	粒径要求/ cm	实测粒径 保证率/%	要求粒径 保证率/%
上	≤ 7.5	76	
中	≤ 22.2	53	75
下	≤ 37.5	21	

表 4 路基软弱路段路面共振碎石化效果评价

层位	粒径要求/ cm	实测粒径 保证率/%	要求粒径 保证率/%
上	≤ 5	91	
中	≤ 10	83	75
下	≤ 18	75	

从表 3、表 4 可以看出:与路基较好路段的路面碎石化效果相比,路基软弱路段的路面碎石化效果下降,其中多锤头碎石化效果急剧下降,中、下层的粒径保证率均不能达到要求,其中下层的粒径保证率只有 21%。这是因为路基软弱路段路基承载力不足,在锤头作用下路面结构容易被整体锤入路基一定深度。共振碎石化效果虽然有所降低,但粒径保证率能达到要求,共振碎石化技术能适应地质情况较复杂的路段,使用范围更广。

3.2 弯沉分析

多锤头碎石化路段、共振碎石化路段弯沉测试结果分别见图 4、图 5。

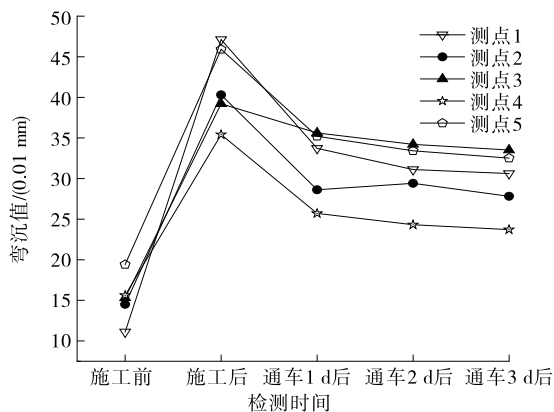


图 4 多锤头碎石化路段的弯沉变化

从图 4、图 5 可以看出:1) 多锤头碎石化和共振碎石化后路面弯沉的总体变化规律基本一致,碎石

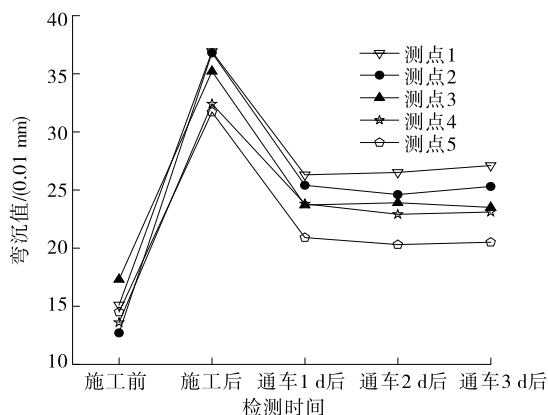


图 5 共振碎石化路段的弯沉变化

化施工后路面弯沉出现较大幅度增长,开放交通后弯沉下降。多锤头碎石化施工后路面弯沉平均提高 26.4 (0.01 mm),提高率为 184.4%;共振碎石化施工后路面弯沉平均提高 19.96 (0.01 mm),提高率为 138.9%。与共振碎石化相比,多锤头碎石化更容易增大路面的弯沉,这可能是因为多锤头碎石化技术通过极大的竖向荷载来锤裂路面,而共振碎石化技术通过共振原理使旧水泥板与破碎机械产生共振来破碎旧路面,旧路面碎石化后,碎石仍能沿破裂面相互接触、嵌挤,其整体性比多锤头碎石化路面强,故共振碎石化后路面弯沉更小。2) 碎石化施工后开放交通能显著降低碎石化后路面弯沉,通车 1 d、2 d、3 d 后,多锤头碎石化路面的弯沉比刚施工完成时的弯沉分别降低 23.47%、26.47%、28.56%,共振碎石化路面的弯沉相比刚施工完成时的弯沉分别降低 30.59%、31.74%、31.01%。通车后路面弯沉的降低主要出现在施工完成通车 1 d 后,多锤头碎石化路面弯沉降低率随着通车时间的增长逐渐减小,而共振碎石化路面弯沉在通车 2 d、3 d 后弯沉降低率趋于零,弯沉值基本保持不变。说明经过 1 d 的交通荷载作用,采用两种碎石化技术的路面结构均基本趋于稳定,共振碎石化路面由于其碎石间接触更紧密,通车 1 d、2 d、3 d 后弯沉基本无变化。

3.3 回弹模量分析

多锤头碎石化路段、共振碎石化路段的回弹模量测试结果分别见图 6、图 7。从图 6、图 7 可以看出:多锤头碎石化、共振碎石化后路面回弹模量的总体变化规律基本一致,均较大幅度减小,多锤头碎石化后路面回弹模量为 240~290 MPa,共振碎石化后路面回弹模量为 400~450 MPa。开放交通后,两种碎石化路面的回弹模量均有所提高,但未超过破碎

前的路面回弹模量,其变化规律与弯沉相反。路面多锤头碎石化后路面回弹模量平均降低 6 932.4 MPa,降低率为 96.4%,路面共振碎石化后路面回弹模量平均降低 6 718 MPa,降低率为 94.1%。与共振碎石化相比,多锤头碎石化更容易增大碎石化路面的回弹模量,其原因与路面碎石化后弯沉增大的原因相同。

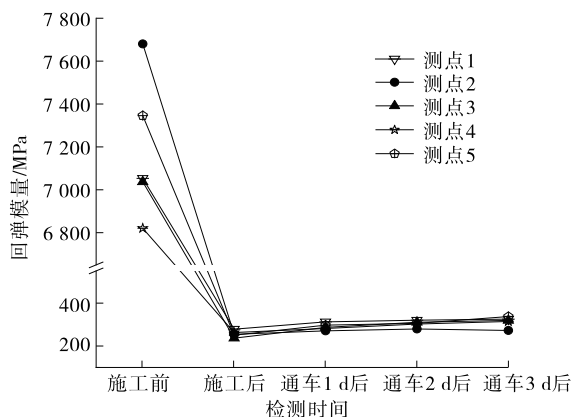


图 6 多锤头碎石化路面的回弹模量变化

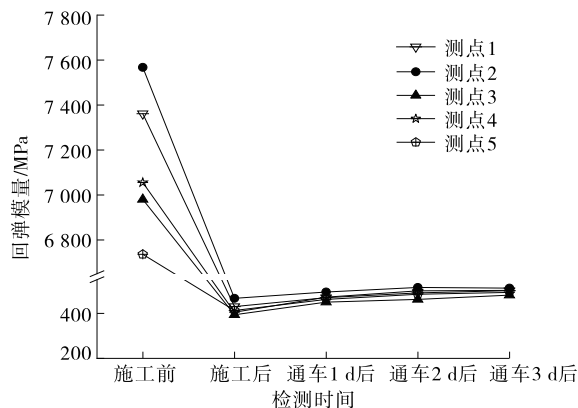


图 7 共振碎石化路面的回弹模量变化

4 结论

(1) 路面碎石化后,路面弯沉与回弹模量均朝着不利的趋势发展,路面弯沉大幅度增加,回弹模量则明显降低。

(2) 共振碎石化后路面的整体性强于多锤头碎石化后路面。相比共振碎石化路面,多锤头碎石化路面的弯沉值更高,回弹模量更小,这与两种技术所采用的破碎路面的原理有关。

(3) 碎石化后路面的力学性能有所降低,但碎

石化施工完成后采用开放交通的方式利用车轮荷载进一步压实路面,可提高路面的力学性能。

(4) 仅从力学性能角度来看,共振碎石化路面的力学性能、整体性优于多锤头碎石化路面,更适合于碎石化旧水泥路面。

参考文献:

- [1] 钱霞,陈吉.水泥路面病害分析及其结构设计探讨[J].公路交通科技(应用技术版),2015,11(11):9-11.
- [2] 李巍.国道干线公路水泥路面病害调查及影响因素分析[J].山东交通科技,2021(4):127-130+134.
- [3] 宋亚坤.水泥路面病害产生原因与解决措施[J].交通世界,2016(12):114-115.
- [4] 黄鹏.多锤头碎石化技术在水泥路面改建中的应用[J].西部交通科技,2022(10):105-107.
- [5] 罗克文,罗少辉.干线公路旧水泥路面碎石化效果评价与分析[J].公路与汽运,2021(3):98-101.
- [6] 王运武,张平.共振碎石化技术在水泥路面改建中的应用研究[J].公路与汽运,2016(5):123-125+128.
- [7] 李盛,许路凯,马永波,等.基于 FWD 动态弯沉盆的旧混凝土板共振碎石化基层沥青加铺结构模量反算[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(8):2277-2288.
- [8] 胡伟锋,李国梁,张蕾,等.旧水泥路面共振碎石化处理改造沥青路面施工技术探究[J].中国公路,2022(11):172-175.
- [9] 董元帅,朱洪洲.旧水泥混凝土路面碎石化改造技术[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2008,27(增刊):920-923.
- [10] 刘亚琳.碎石化混凝土路面沥青加铺层设计研究[D].长沙:湖南大学,2014.
- [11] 颜可珍,江毅,黄立葵,等.层间接触对沥青加铺层性能的影响[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(5):11-15.
- [12] 王令虎.共振碎石化在旧路病害处治中的应用探究[J].中国公路,2022(22):94-95.
- [13] 杨凯.路面底基层多锤头碎石化标准化施工[J].交通世界,2022(11):34-36.
- [14] 刘展瑞,罗少辉,袁朝圣.水泥路面碎石化层顶部抗裂夹层疲劳性能分析[J].公路与汽运,2021(2):47-51+55.

收稿日期:2023-05-15