

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.058

共振碎石化路面有限元分析及优化设计研究

洪莹

(华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘要: 基于农村公路水泥混凝土路面大修大改浪潮兴起, 现从资源可利用化、发展可持续化角度出发, 采用有限元 ABAQUS 建立各路面结构类型模型进行力学分析, 探讨共振碎石化路面结构的优势。通过有限元分析验证了共振碎石化路面结构在未来更多农村公路改造中应用的可能性及合理性。另外, 采用试验研究的方式, 探索了调整水泥掺量、旧料掺量对破碎混凝土板再生的水泥稳定碎石基层强度的影响, 确定最佳掺量, 优化设计参数。结论表明可广泛用于重、中、轻型交通的农村公路工程。

关键词: 共振碎石化路面; 有限元分析; 再生; 优化设计

中图分类号: U416.214

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)07-0244-04

0 引言

我国近年来对农村基建投入不断加大, 农村公路作为拉动经济增长的载体成为推进乡村振兴、农村现代化的保障, 农村路网提升工程正有条不紊地推进^[1]。水泥路面在近几十年农村公路巨大的增量中发挥着关键作用。然而, 长年累月增长的交通荷载、老化的材料, 以及环境风化作用之下, 水泥混凝土路面的服役期限不断达到临界, 产生了各种类型的病害, 若不加以修复改造, 其相应的承载能力与路用性能将大幅削弱^[2]。

在时代背景要求下, 如何绿色集约、资源化修复和改造水泥路面显得尤为重要。现基于江苏省农村公路可持续发展路面的某项体系研究项目, 调研了江苏省公路的现状。在此基础上, 利用有限元模型对几种路面及共振碎石化路面结构建模并受力分析, 确定了碎石化路面结构形式的合理性与优越性; 此外通过试验, 研究了水稳再生基层的最佳水泥掺量与旧料掺量。经研究, 为水泥混凝土路面大修工程提供广泛参考建议。

1 共振碎石化技术及原理

共振碎石化路面即“白改黑”技术的一种^[3], 以碎石化为基础, 利用专业破碎机械设备, 用共振方式将水泥面板破碎。该方式将水泥板破碎成各种粒径大小的碎石^[4], 作为碎石层, 其强度更优于级配碎石,

且既有路基并不会产生破坏。共振碎石化工作原理是当破碎机锤头接触水泥面板时, 锤头持续激振, 水泥板受迫振动, 调整激励频率直至与水泥面板固有频率一致从而发生共振现象, 致其迅速破碎。机械动能传到路面板内后集聚能量, 当达到材料的受载极限时, 面板便形成了纵横交错的裂缝^[5], 裂缝逐步扩展贯通, 下部渐成相互嵌锁的碎石块, 裂纹角度成 30~60°。此结构的形成, 使共振结构层承载能力较好, 又因接触时间短, 路基层并不会受影响而破坏。

2 有限元模型

2.1 拟定典型路面结构形式

根据共振碎石化原理, 可视共振碎石化路面为半刚性基层和柔性基层的结合。现选用几种典型路面结构形式与共振碎石化路面形成对比, 分析在移动荷载下不同路面结构的力学响应。

2.1.1 半刚性基层路面结构

结构形式和力学参数^[6]如表 1 所列。

表 1 半刚性基层路面结构表

结构类型	厚度 /cm	弹性模量 /MPa	泊松比
细粒沥青混凝土	4	1 400	0.3
中粒沥青混凝土	6	1 200	0.3
水泥稳定碎石	24	1 500	0.25
二灰稳定碎石	20	1 500	0.25
土基	-	40	0.35

2.1.2 柔性基层路面结构

结构形式和力学参数^[6]如表 2 所列。

收稿日期: 2022-09-13

作者简介: 洪莹(1991—), 女, 硕士, 工程师, 从事道路设计工作。

表 2 柔性基层路面结构表

结构类型	厚度 /cm	弹性模量 /MPa	泊松比
细粒沥青混凝土	4	1 400	0.3
中粒沥青混凝土	6	1 200	0.3
沥青稳定碎石	24	1 000	0.3
级配碎石	20	350	0.35
土基	-	40	0.35

2.1.3 级配碎石倒装结构

结构形式和力学参数^[6]如表 3 所列。

表 3 级配碎石倒装结构表

结构类型	厚度 /cm	弹性模量 /MPa	泊松比
细粒沥青混凝土	4	1 400	0.3
中粒沥青混凝土	6	1 200	0.3
沥青稳定碎石	8	1 000	0.3
级配碎石	10	350	0.35
水泥稳定碎石	24	1 500	0.25
土基	-	40	0.35

2.1.4 共振碎石化路面结构

水泥稳定碎石作为共振碎石化路面的底基层,其结构形式和力学参数^[6]如表 4 所列。

表 4 共振碎石化路面结构表

结构类型	厚度 /cm	弹性模量 /MPa	泊松比
细粒沥青混凝土	4	1 400	0.3
中粒沥青混凝土	6	1 200	0.3
水泥稳定碎石	24	700	0.3
二灰稳定碎石	20	1 550	0.25
土基	-	40	0.35

2.2 路面结构三维有限元模型

考虑到尺寸效应,选取三维有限元模型:5 m×6 m×6 m,分别对应道路横断面方向(x轴)、路表深度方向(y轴)和车辆行驶方向(z轴),为节省计算时间、便于取点,选用模型的 1/2 作为计算对象,路面结构层均设为线弹性。

各结构层层间接触设为完全连续,荷载作用形式为移动荷载,ABAQUS 施加移动荷载需借用子程序,现在隐式求解器下调用竖向荷载子程序 DLOAD 模拟行车载荷(见图 1),在 FORTRAN 语言的编译下选用两种子程序的代码。

考虑到移动荷载势必与行车速度有直接联系,正常行驶车速取 80 km/h,只考虑垂直均布荷载,在 4.5 m 长度的路面上荷载作用时间 0.202 5 s,去掉零时刻和应力应变单调递减的计算结果,以及从计算

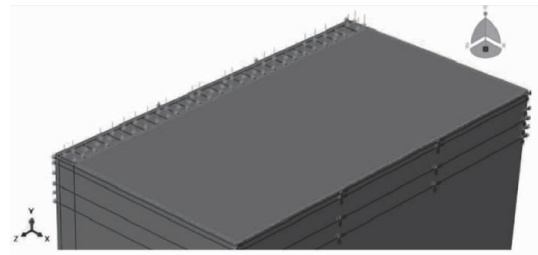


图 1 DLOAD 移动荷载带

数值来看与整体模型计算的值稍有偏差,但对不同结构路面形式受力响应规律不存在影响的数值。边缘取值点应包括轮隙中心处的位移指标,轮距中心的正应力指标和轮迹边缘的剪应力指标,以下以结构 1 表示半刚性基层,结构 2 表示柔性基层,结构 3 表示级配碎石倒装路面,结构 4 表示共振碎石化路面。

2.3 有限元模型受力分析

得到竖向弯沉和纵向位移如图 2、图 3 所示。

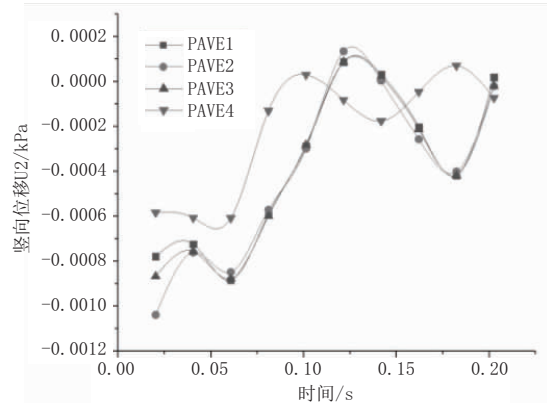


图 2 路表竖向位移图

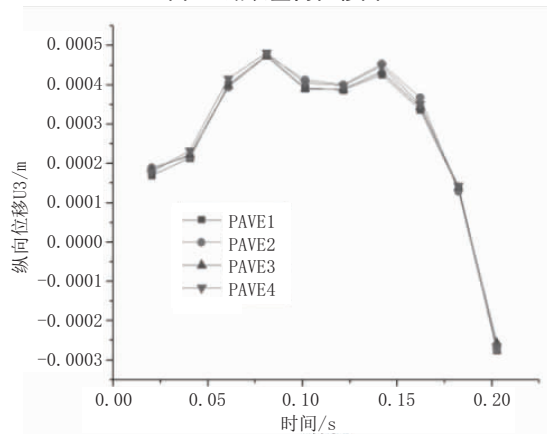


图 3 路表行车方向位移图

在荷载作用初期,结构 2 的轮隙中心处弯沉最大,最小的为结构 4,结构 1 和 3 的弯沉比较接近于中间;随着车辆荷载的驶离,结构 1~结构 3 在该点处弯沉基本相同,但结构 4 在荷载移动过程中相对较小;从行车方向的位移变化来看,荷载从初始作用到结束,四种结构纵向位移几乎相等,更细致而言,结构 4 相对纵向位移最小(见图 4~图 6)。

从以上正应力和剪应力图中看出,各结构层同

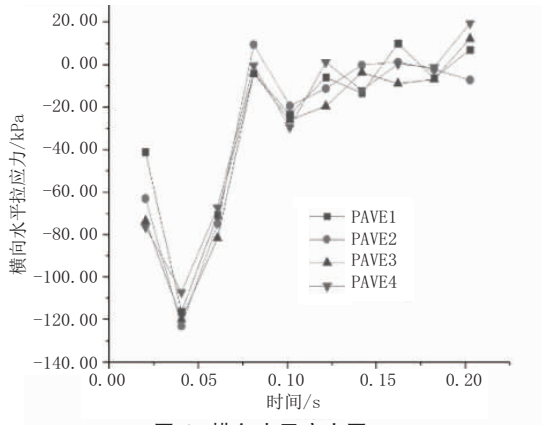


图4 横向水平应力图

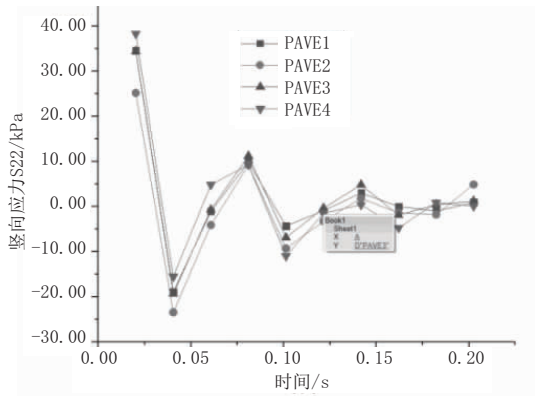


图5 竖向应力图

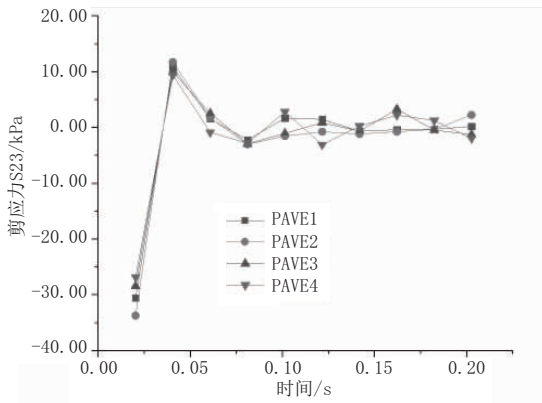


图6 剪应力图

一位置取值点,在荷载移动过程中应力变化具有相同规律,从同种变化趋势下,对每个路面结构来说稍有差异。取单轮荷载中心点,根据时程图,在荷载初始作用下,该点受横向水平拉应力负值,结构1受力最大,结构4受力最小,随荷载移动,该点继续受压,结构2逐渐受压应力最大,结构4受压应力最小,当荷载继续行驶时,该点处的应力值从压应力变成拉应力,并在零点处上下波动。类比于图6,从其他应力时程图中,可以发现结构4的受拉受压的应力值最小,因此可以表明共振碎石化路面结构的合理性。

3 共振碎石化再生性能研究

采用破碎后的水泥混凝土板再生成为水泥稳定

碎石混合料,用作改造后路面的基层。据现场实际情况,将废旧回收料分为10~25 mm、5~15 mm、0~3 mm三档。分别用掺量为100%、95%和75%废旧料配制再生基层混合料,三种混合料掺配比例与矿料级配如表5所列。

表5 旧料掺配比例表

旧料 /%	掺配比例类别 /%					
	破碎 0~3 mm	破碎 5~15 mm	破碎 10~25 mm	新料 0~5 mm	新料 5~15 mm	新料 10~25 mm
100	30	35	35	0	0	0
95	35	31	29	5	0	0
75	25	26	24	10	7	8

3.1 水泥掺量对抗压强度的影响

将旧料掺量为100%、95%和75%的试件养生,养生时间分为6 d标准养生和1 d浸水养生,然后参照规范的要求检测7 d无侧限饱水抗压强度^[7],可根据结果得到相应强度值。为进一步研究影响因子,在比例为10~25 mm碎石:5~15 mm碎石:石粉=35:35:30的矿料中分别添加2%、3%、3.5%、4%、和5%五种不同水泥剂量,每种水泥剂量下的7 d、28 d、90 d龄期的抗压强度试件各6个,标准条件养生,获得试件的无侧限抗压强度。旧料掺量为100%、95%、75%用GS1、GS2、GS3表示。试验结果如图7所示。

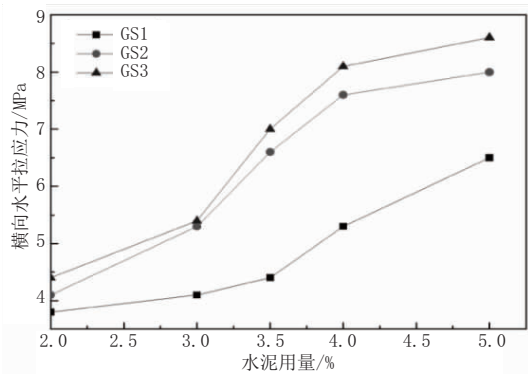


图7 7 d强度与水泥用量的关系图

由图发现,强度随水泥用量的不断增加而升高,同时这种趋势不受旧料用量的影响。若水泥用量不高,则强度所表现的增幅较为显著,相同水泥用量下,随旧料掺量越大,强度越低,可能因为旧料表面粗糙度较大,难以击实。因此,若水泥用量已超过预先拟定的某特定阈值,则继续提高用量将无法使得强度有效增长。另外,当对经济性以及收缩开裂等诸多因素进行综合考量后可知,水泥用量需要选择恰当,而由实验得知,水泥用量需要控制在3.5%~4%

的范围内。

3.2 旧料掺量对强度的影响

选用对比试验,即将再生的某特定旧路面材料,和刚刚拌和所得的水泥稳定碎石间,展开深入比对,由此获得旧路面材料相对再生而产生的实际影响。控制其他变量,再生材料仅添加适量新集料,但刚刚拌和的骨料全部选用新集料。最后所得试验结果如表 6 所列。

表 6 旧料掺量对水泥冷再生材料强度的影响一览表

材料类别	抗压强度 /MPa	劈裂强度 /MPa
100%旧料	4.1	0.63
95%旧料 +5%新料	6.6	0.72
75%旧料 +25%新料	7.2	0.75
100%新料	7.6	0.79

研究发现:随着旧料掺入量加大,再生基层混合料抗压强度表现为降低趋势,与不掺旧料混合料相比,掺 75%旧料 7 d 强度降低 4.3%,掺 95%旧料强度降低 13%,如果全部选用旧料,则强度将会减少 33%;在完全一致的条件下,材料自身的劈裂强度也会逐步降低。这意味着,旧料的存在降低了再生材料的抗压强度和抗拉强度,原因可能是旧料内部砂浆与石料界面存在较多微裂纹,在压力下裂纹迅速扩张,导致材料破坏。

4 结 论

在江苏省公路调研基础上,利用有限元模型和

试验,采用典型路面结构与共振碎石化路面结构对比进行了力学分析、对共振碎石化路面结构层材料参数影响做了探索,得出以下主要结论:

(1)半刚性和柔性基层结合的共振碎石化路面,经对比发现,其路面弯沉、受载均小于其他结构,表明碎石化路面结构的合理性、适用性。因而对未来农村公路水泥路面大修工程可作借鉴,有效利用资源、节约造价、绿色环保。

(2)将水泥混凝土板破碎后形成水稳基层原料,采用 3.5%的水泥剂量,试件的抗压强度既满足设计标准,又能使水泥用量达到最少。

(3)当采用破碎后的水泥混凝土面板做再生水泥稳定碎石基层,如果旧料掺量达到 75%,则水泥稳定碎石混合料 7 d 饱水无侧限抗压强度最高,但旧料利用率较低。当旧料掺入 100%时,其 7 d 饱水无侧限抗压强度达到 4.4 MPa,完全满足设计要求,且实现废旧破碎料最大化利用。

参考文献:

[1] 张生.农村公路改建工程设计要点分析[J].科学技术创新,2021.
 [2] 邓学钧.路基路面工程(第三版)[M].北京:人民交通出版社,2013.
 [3] 丁新慧,刘振.浅谈“白改黑”路面设计[J].城市道桥与防洪,2021(8).
 [4] 宁坚.旧水泥混凝土路面共振碎石化设计理论和方法探讨[J].工程建设与设计,2018.
 [5] 胡伟锋,李国梁,张蕾,等.旧水泥混凝土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).
 [6] JTG D50—2017,公路沥青路面设计规范[S].
 [7] JTG/T F30—2014,公路水泥混凝土路面施工技术细则[S].

(上接第 240 页)

州:华南理工大学,2019.
 [5] JTG/T 5521—2019,公路沥青路面再生技术规范[S].
 [6] 许萌.热再生沥青混合料矿料迁移规律与级配优化设计研究[D].济

南:山东交通学院,2016.
 [7] 陈勤.温-湿耦合作用下混凝土类建筑垃圾再生骨料沥青混合料疲劳性能研究[D].北京:北京建筑大学,2022.