

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.05.020

水泥冷再生混合料基层疲劳特性分析与预测

易华森

(湖南省高速公路集团有限公司 益阳分公司, 湖南 益阳 413000)

摘要: 通过测试不同水泥掺量冷再生混合料基层的抗压强度、弯拉强度评价其基本力学性能, 通过疲劳试验分析不同水泥掺量冷再生混合料基层的疲劳寿命, 并采用 ARIMA(自回归积分滑动平均)模型预测其损坏状况指数, 分析疲劳特性衰变趋势。结果表明, 随着水泥掺量的增加, 冷再生混合料的力学强度增强, 水泥掺量为 4%~6% 时混合料强度增长速率大于掺量为 7% 时的增长速率; 混合料的疲劳寿命先增大后减小, 水泥掺量为 6% 时疲劳特性最好; ARIMA 模型的水泥冷再生混合料基层损坏状况指数预测值与实测值接近, 可将 ARIMA 模型用于水泥冷再生混合料性能衰变评价。

关键词: 公路; 冷再生混合料; 基层; 力学性能; 疲劳特性; 损坏状况指数; ARIMA 模型

中图分类号: U418.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)05-0093-04

再生集料是经过一段时间使用的路面材料, 尽管能满足基层材料的性能要求, 但经过荷载的反复作用会出现与水泥稳定碎石基层不同的疲劳特性, 对水泥冷再生混合料基层的疲劳特性进行分析是道路养护维修的关键环节^[1-3]。目前对水泥冷再生混合料基层疲劳特性的试验研究及现场跟踪检测研究较少。魏翻等进行冷再生混合料基层配合比设计, 确定旧路面材料与新集料掺配比例为 7:3^[4]。陈发东研究水泥冷再生混合料的承载力, 发现加载循环作用 120 万次后冷再生基层材料未发生疲劳开裂, 再生混合料具有良好的耐久性^[5]。易勇等分析冷再生混合料的力学性能, 得出了现场冷再生混合料强度影响因素、施工工艺参数及施工注意事项^[6]。本文研究不同水泥掺量冷再生混合料基层的力学性能和疲劳特性, 并采用 ARIMA(自回归积分滑动平均)模型预测其损坏状况指数, 分析其疲劳特性衰变趋势, 为施工技术选择、配合比设计、参数选取、路用性能预测提供指导。

1 原材料及配合比设计

1.1 原材料

(1) 水泥。根据试验路段实际情况, 选择 32.5 普通硅酸盐水泥, 其技术指标检测结果见表 1, 均满足规范要求。

(2) 旧集料。采用由旧沥青路面铣刨处理后回收的集料, 其表面附着沥青, 将集料风干后得到干燥

表 1 水泥的技术指标检测结果

检测项目	检测结果	
细度/%	2.35	
初凝时间/min	145	
终凝时间/min	245	
体积安定性/%	0.7	
抗压强度/MPa	3 d	27.8
	28 d	41.85
抗折强度/MPa	3 d	4.26
	28 d	7.42

集料并进行筛分试验, 结果见表 2。

表 2 旧集料筛分试验结果

筛孔尺寸/mm	通过率/%	筛孔尺寸/mm	通过率/%
31.5.00	100.0	4.750	45.5
26.500	92.1	2.360	28.5
19.000	86.2	0.600	4.3
9.500	64.3	0.075	4.2

(3) 新集料。根据旧集料筛分结果, 旧集料中中间粒径颗粒居多, 细集料和粗集料颗粒较少。在旧集料中加入 0~5 mm 天然砂、10~30 mm 碎石, 其物理、力学指标符合要求。

1.2 配合比设计

力学性能是评价冷再生基层材料基本性能的重要指标^[7]。根据再生混合料级配要求, 旧集料与新

集料占混合料的比例分别为30%、70%，再生混合料合成级配见表3。按照4%、5%、6%、7%的掺量将水泥加入再生混合料中，不同水泥掺量冷再生

混合料的最佳含水率分别为7.1%、7.4%、7.9%、8.0%，最大干密度分别为1.97 g/cm³、2.02 g/cm³、2.03 g/cm³、2.04 g/cm³。

表3 再生混合料的合成级配

级配类型	下例筛孔(mm)的通过率/%							
	31.500	26.500	19.000	9.500	4.750	2.360	0.600	0.075
合成级配	100.0	96.7	75.1	56.2	39.2	27.3	11.7	5.2
级配上限	100.0	90.0	72.0	47.0	59.0	17.0	8.0	0.0
级配下限	100.0	100.0	89.0	67.0	49.0	35.0	22.0	7.0

2 试验方法

分别按4%、5%、6%、7%水泥掺量配制冷再生混合料试件进行力学性能试验，得到最佳水泥掺量，同时分析不同养护龄期下再生混合料的强度变化。

水泥冷再生混合料基层力学性能试验：按照标准养护方式对不同水泥掺量冷再生混合料试件进行养护，采用电液伺服万能压力试验机测试试件的无侧限抗压强度和弯拉强度。

水泥冷再生混合料基层疲劳试验：采用应力控制模式进行疲劳试验，加载波形为无间隔的正弦，加载频率为10 Hz。

3 水泥冷再生混合料基层疲劳性能分析

通过抗压强度试验和疲劳试验分析4%、5%、6%、7%水泥掺量冷再生混合料基层的无侧限抗压强度、弯拉强度、疲劳作用次数，评价其力学强度和疲劳性能。

3.1 无侧限抗压强度

分别成型不同水泥掺量冷再生混合料试件，试件尺寸为 $\phi 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ ，养护7 d、28 d、60 d后进行抗压强度试验，试验结果见图1。

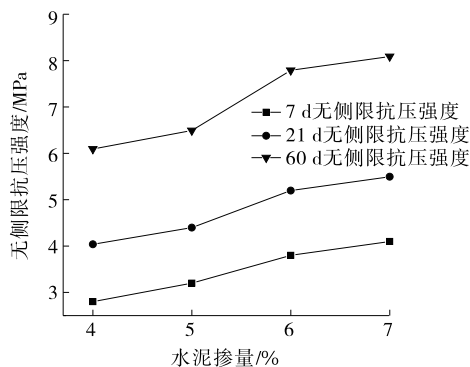


图1 不同水泥掺量冷再生混合料基层的无侧限抗压强度

由图1可知：随着养护龄期和水泥掺量的增加，冷再生混合料基层的无侧限抗压强度增大。不同水泥掺量时，7 d养护龄期的强度值大于规范要求；养护龄期为7~21 d时无侧限抗压强度增长速率较快，抗压强度发育处于形成期；21~60 d时无侧限抗压强度增长较缓慢；养护龄期60 d后强度逐渐趋于稳定。水泥掺量增加，冷再生混合料基层的抗压强度增大，水泥掺量是冷再生混合料基层抗压强度形成的重要影响因素。相同养护龄期下，水泥掺量4%~6%冷再生混合料基层强度增长速率大于水泥掺量7%冷再生混合料基层强度增长速率。添加水泥的冷再生混合料基层的强度变化与水泥稳定碎石基层的强度发展规律相符。

3.2 弯拉强度

弯拉强度反映基层底部抗拉特性，若混合料基层结构弯拉性能较低，结构内部将产生自下而上的裂缝破坏。成型100 mm×100 mm×400 mm不同养护龄期下不同水泥掺量冷再生混合料试件，通过三点加压方式测试试件破坏时弯拉强度，分析不同养护龄期下不同水泥掺量冷再生混合料基层的弯拉强度，试验结果见图2。

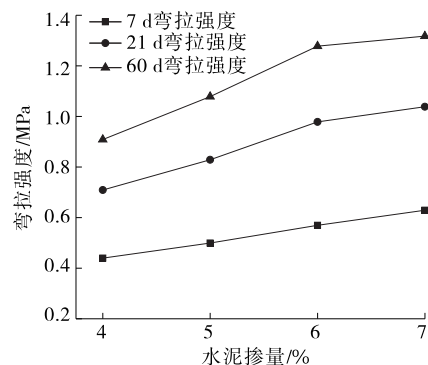


图2 不同水泥掺量冷再生混合料基层的弯拉强度

由图2可知：随着水泥掺量的增加，相同养护龄

期下冷再生混合料基层的弯拉强度增大,这是因为水泥掺量增加,混合料中水泥浆填充再生集料的空隙,水泥水化产生碳酸钙及氢氧化钙等具有黏结性的物质,集料表面黏结强度提高,将再生集料和新集料黏结形成整体结构,且随养护时间增长,水化反应更完全,混合料的弯拉强度增大。相比于养护龄期7 d时弯拉强度,养护龄期21 d时4%、5%、6%、7%水泥掺量冷再生混合料的弯拉强度分别提高38%、39%、42%、40%。相同养护龄期时,水泥掺量增加到7%时,再生混合料基层的强度增长较慢,且小于水泥掺量为6%时的增长速率,主要是由于水泥掺量增加引起混合料基层干缩变化,混合料产生干缩

裂缝,混合料弯拉强度增长不明显。冷再生混合料基层的水泥掺量不宜超过6%。

3.3 疲劳性能

基层承受由面层传递的荷载,在荷载反复作用下基层产生疲劳破坏。为研究水泥冷再生混合料基层的耐久性能,分析养护龄期60 d时4%、5%、6%水泥掺量冷再生混合料基层的疲劳性能。采用威布尔两参数法分析0.3、0.4、0.5、0.6应力比下水泥冷再生混合料基层的疲劳寿命,得到失效概率为0.05时应力-疲劳寿命双对数疲劳方程(见表4)和疲劳曲线见图3。

由表4和图3可知:相同应力比下,水泥掺量为

表4 不同应力比下水泥冷再生混合料基层的疲劳试验结果及疲劳方程

水泥掺量/%	不同应力比S下疲劳作用次数N/次				双对数疲劳方程	相关系数
	0.3	0.4	0.5	0.6		
4	88 642	48 542	16 712	9 842	$\lg S = 3.27 - 1.431 \ln N$	0.961 2
5	112 511	60 124	22 418	14 230	$\lg S = 3.46 - 1.347 \ln N$	0.969 9
6	119 847	62 134	23 042	14 354	$\lg S = 3.45 - 1.379 \ln N$	0.973 3
7	97 124	55 423	18 724	10 213	$\lg S = 3.29 - 1.459 \ln N$	0.952 4

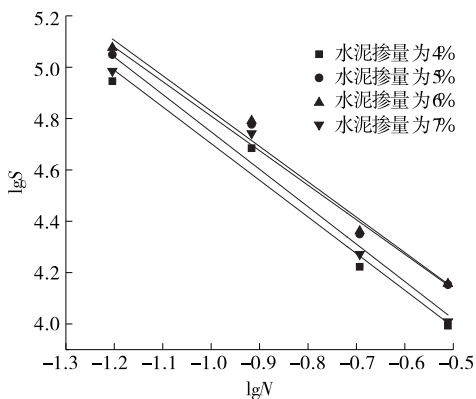


图3 失效概率为0.05时不同水泥掺量冷再生混合料基层的疲劳曲线

4%~6%时,随着水泥掺量的增加,冷再生混合料基层的疲劳寿命增大;水泥掺量大于7%时,冷再生混合料基层的疲劳寿命降低,尽管增加水泥掺量能改善混合料的抗压强度和弯拉强度,但冷再生混合料基层的使用寿命略有下降。相同水泥掺量下,应力比越大,冷再生混合料基层的疲劳寿命越小。不同水泥掺量冷再生混合料基层的应力-疲劳寿命双对数疲劳方程的相关系数大于0.95。疲劳方程中斜率越大,再生混合料的敏感性越强,即随着应力比的增大,水泥冷再生混合料基层疲劳寿命的衰减速率越

快;截距越大,水泥冷再生混合料基层的抗疲劳性能越好。水泥掺量为6%时,疲劳方程的相关系数最大,水泥冷再生混合料基层的疲劳性能最好,耐久性最稳定。

4 冷再生混合料基层疲劳特性衰减预测

采用时间序列法预测水泥掺量为6%时冷再生混合料基层疲劳特性发展趋势^[8-9]。

(1) 在SPSS 21.0软件中建立时间序列对水泥冷再生混合料基层的疲劳寿命进行处理,输出预测混合料基层损坏状况指数的时间序列、自相关及偏自相关系数(见图4、图5)。

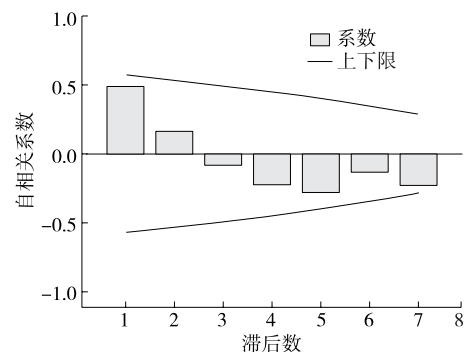


图4 水泥冷再生混合料基层的自相关系数

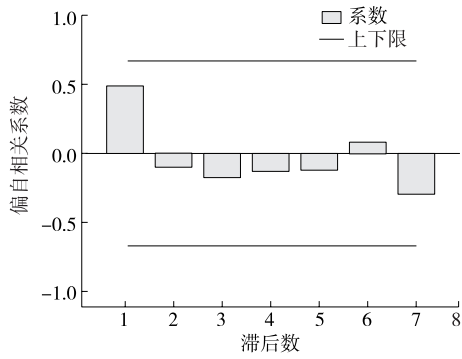


图5 水泥冷再生混合料基层的偏自相关系数

(2) 进行模型识别,通过对表5所示数据的分析,确定采用ARIMA(p, q)模型形式。对模型ARIMA(1, 1)、ARIMA(1, 2)、ARIMA(2, 1)、ARIMA(2, 2)进行模型拟合度检验,选取可决系数 R^2 最佳的模型作为预测模型。

表5 自相关和偏相关系数

滞后数	自相关系数		偏自相关系数	
	自相关	标准误差	偏自相关	标准误差
1	0.488	0.284	0.488	0.333
2	0.165	0.266	-0.096	0.333
3	-0.087	0.246	-0.170	0.333
4	-0.222	0.225	-0.127	0.333
5	-0.275	0.201	-0.119	0.333
6	-0.132	0.174	0.080	0.333
7	-0.228	0.142	-0.292	0.333

(3) 对 p, q 取不同的值,得到表6所示不同模型的相关参数。对相关参数进行分析,得到水泥冷再生混合料基层疲劳特性衰变趋势ARIMA预测模型,模型表达式见式(1)。

表6 预测模型参数

模型类型	预测变量数	R^2
ARIMA(1,1)模型	1	0.420
ARIMA(1,2)模型	1	0.485
ARIMA(2,1)模型	1	0.507
ARIMA(2,2)模型	1	0.494

$$y_t = 90.416 + 1.708y_{t-1} - 0.849y_{t-2} + \epsilon_t + 0.998\epsilon_{t-1} \quad (1)$$

(4) 运用ARIMA模型对水泥冷再生混合料基层损坏状况指数进行预测,分析疲劳特性衰变趋

势^[10],预测值与实测值的比较见图6。

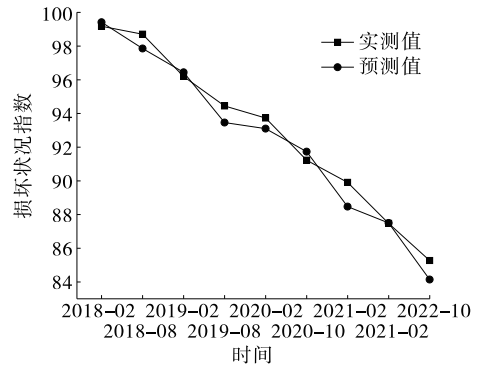


图6 水泥冷再生混合料基层损坏状况指数预测值与实测值对比

由图6可知:水泥冷再生混合料基层损坏状况指数预测值与实测值吻合较好,采用ARIMA预测模型对水泥冷再生混合料基层疲劳特性衰变趋势进行预测,误差可控制在5%左右。

5 结论

(1) 水泥冷再生混合料配合比设计中,水泥掺量不宜过大,否则将影响水泥冷再生混合料基层的耐久性;为保证混合料的力学性能,再生集料掺量以20%为宜。

(2) 水泥掺量增加能改善再生集料表面黏结强度,冷再生混合料的力学强度增大;水泥掺量超过7%时,冷再生混合料基层的弯拉强度增长较慢,干缩变化大,基层易开裂。推荐水泥掺量为6%。

(3) 对水泥冷再生混合料基层的疲劳寿命进行分析,得到失效概率为0.05时应力-疲劳寿命双对数疲劳方程,相关系数大于0.95。水泥掺量为6%时,疲劳方程的相关系数最大,基层的疲劳性能最好,耐久性最稳定。

(4) 采用ARIMA模型对水泥冷再生混合料基层损坏状况指数进行预测,预测值与实测值接近,可将ARIMA模型作为水泥冷再生混合料基层疲劳特性衰变评价方法。

参考文献:

[1] 石新慧,杨万红.全深式就地冷再生底基层技术在G312线鸡清段的应用[J].公路交通科技(应用技术版),2019(8):8-9+50.
 [2] 陈峰,童生豪.水泥稳定再生骨料路面基层抗拉性能试验研究[J].长江科学院院报,2020,37(2):159-163.

复中的概念,提出了恢复道路平面线形指标时无须人工判断线元属性的等距分组最小二乘拟合圆曲线法。针对某干线公路,分析三次样条插值法、最小二乘拟合法、纬地智能布线法用于公路平面线形指标恢复时的适用性和稳定性,主要结论如下:

(1) 当道路中线测量坐标为理想数据或逼近实际道路中线时,采用三次样条插值法、最小二乘拟合法、纬地平面智能布线法恢复得到的圆曲线半径均可靠,采用三次样条插值法、纬地平面智能布线法得到的缓和曲线长度较可靠。

(2) 基于实测道路中线平面坐标数据,采用三次样条插值法恢复道路线形指标的适用性差,且增大测量点密度不能提升恢复结果的可靠性和稳定性。

(3) 基于实测道路中线平面坐标数据,采用最小二乘拟合法、纬地平面智能布线法恢复得到的圆曲线半径相对可靠,且增大测量点密度可提升缓和曲线长度恢复的可靠性,但稳定性不强。

(4) 公路改扩建工程中,恢复道路线形建议采用纬地平面智能布线法;道路交通事故鉴定中,涉及事故路段圆曲线半径评估时,建议采用最小二乘拟合法。

道路线形恢复方法较多,本文仅对比分析了3种较常见的平面线形恢复方法,其他方法的适用场景及优劣对比有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 张航,韦金君,张肖磊.道路平面线形拟合方法比较研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2018,42(4):594-598+603.
- [2] 杨轸,方守恩,高国武.基于GPS的道路线形恢复技术的研究[J].同济大学学报(自然科学版),2003,31(5):567-571.

- [3] 杨轸,朱照宏.车载GPS用于恢复道路线形的研究[J].山东交通科技,2003(4):67-70.
- [4] 张航,黄云,龚良甫.基于三次样条函数拟合公路平面线形方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2007,31(5):925-927.
- [5] 邬镇伦,程效军,杨泽鑫,等.基于激光点云的路桥平面线形拟合方法[J].数码设计,2017,6(6):142-144.
- [6] 中交第一公路勘察设计研究院有限公司.公路路线设计规范:JTG D20-2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [7] 李方.公路立交匝道布线作图法[J].公路,1992,37(5):31-34.
- [8] 张志伟,刘志刚,黄晓明,等.基于LIDAR数据的道路平面线形拟合方法研究[J].公路交通科技,2009,26(12):17-22.
- [9] 张志伟,刘志刚.基于道路数据点云的公路平面线形恢复方法[J].测绘工程,2010,19(2):45-48.
- [10] EASA S M, DONG H, LI J. Use of satellite imagery for establishing road horizontal alignments[J]. Journal of Surveying Engineering, 2007, 133(1): 29-35.
- [11] LI Z X, CHITTURI M, BILL A. Automated identification and extraction of horizontal curve information from geographic information system roadway maps[J]. Transportation Research Record, 2012, 2291: 80-91.
- [12] AI C B, TSAI Y C. Automatic horizontal curve identification and measurement method using GPS data[J]. Journal of Transportation Engineering, 2015, 141(2): 1-9.
- [13] DING J J, WANG H. Existing highway horizontal alignment recovery technique based on MATLAB and CAD platform[C]//International Conference on Electric Technology and Civil Engineering, IEEE, 2011: 4977-4980.

收稿日期:2022-06-24

(上接第96页)

- [3] 盛三湘,李城.再生集料用于水泥稳定碎石基层中的抗疲劳性能研究[J].中外公路,2021,41(4):350-356.
- [4] 魏翻,王汛杰,刘刚.水泥稳定沥青路面冷再生基层材料设计[J].山东交通学院学报,2016,24(3):73-77.
- [5] 陈发东.沥青路面复合式水泥冷再生基层混合料性能研究[J].新型建筑材料,2019,46(4):150-155.
- [6] 易勇,蒋应军,谭云鹏,等.不同成型方式乳化沥青冷再生混合料力学特性研究[J].重庆大学学报,2021,44(5):50-58.

- [7] 鲁巍巍.旧沥青路面冷再生水稳基层力学性能试验研究[J].中外公路,2018,38(1):77-79.
- [8] 徐刚.基于时间序列的沥青路面使用性能预测模型[D].南京:东南大学,2010.
- [9] 梅诚.普通国道典型沥青路面结构使用性能评价及预测研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [10] 章华金,赵鸿铎.时间序列法预测沥青路面损坏状况指数研究[J].西部交通科技,2010(4):13-16.

收稿日期:2022-08-02