

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.02.012

引用格式:陈明,肖杰,王宝辉,等.装配式基层沥青路面填缝料的疲劳试验研究[J].公路与汽运,2025,41(2):57-60+65.

Citation:CHEN Ming,XIAO Jie,WANG Baohui,et al.Study on fatigue test of joint filler for prefabricated base asphalt pavement[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(2):57-60+65.

装配式基层沥青路面填缝料的疲劳试验研究*

陈明¹,肖杰²,王宝辉¹,管星宇¹

(1.上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海 200125;2.长沙理工大学 交通学院,湖南 长沙 410114)

摘要:为研究以早高强水泥砂浆作为装配式基层路面结构基层填缝料的疲劳性能,分别制作 3 种水泥掺量的混凝土预制块并采用早高强水泥砂浆黏结组合成中梁,开展模拟接缝的四点弯曲疲劳试验,基于疲劳损伤理论及威布尔分布模型拟合试验数据并进行分析,发现用早高强水泥砂浆作为填缝料时,混凝土的强度是决定黏结组合体疲劳性能的关键因素。

关键词:公路;装配式基层;接缝;早高强水泥砂浆;填缝料黏结混凝土组合体;疲劳试验

中图分类号:U418.6

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)02-0057-04

装配式基层道路是一种新型道路基层结构^[1],其基层由预制混凝土板拼装而成,利用填缝材料灌浆填充板间接缝,将预制混凝土板连成一个整体,然后加铺沥青混凝土面层,是一种既经济又环保的路面结构形式。

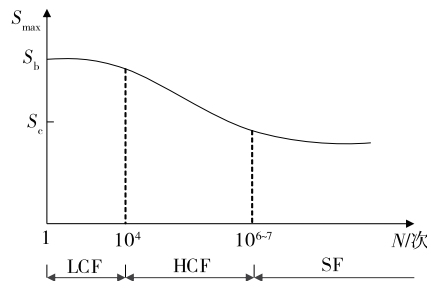
传统的“白加黑”路面结构中旧混凝土板间的接缝是个隐患源^[2],在拉伸与剪切作用下易产生反射裂缝^[3]。因此,该处的力学响应及疲劳性能尤为重要。尚云龙通过实测裂缝和接缝水平变形,验证了填缝材料必须具有一定的弹性恢复能力^[4]。马健生等开发一种用于填缝的自流式水泥砂浆材料,并对其力学性能、耐久性和疲劳性能进行了试验研究^[5]。田志伟等研究了装配式道路基层结构接缝的传荷性能及影响参数^[6]。郭高等对不同接缝形式的装配式结构进行了传力性能分析^[7]。以上研究均是在传统填缝料的基础上进行计算分析,对早高强修补型水泥砂浆用作填缝料鲜有研究。本文利用微膨胀早高强水泥砂浆填缝料黏结不同水泥掺量的混凝土预制块来模拟接缝,通过四点弯曲疲劳试验,对比分析不同水泥掺量下装配式混凝土基层接缝的疲劳性能。

1 疲劳试验方案

1.1 疲劳分析方法

基于疲劳性能曲线和疲劳寿命分布函数建立疲劳方程,分析填缝料黏结混凝土组合体的疲劳性能。

一般材料的疲劳性能曲线由 S-N 曲线表示(见图 1),该曲线呈 S 形,可分为 LCF(低周疲劳段)、HCF(高周疲劳段)和 SF(亚临界疲劳段)三部分。HCF 段的曲线近似一条直线,可较好地表征试件疲劳应力水平与疲劳寿命之间的相关关系。因此,选取合适的应力比,利用 HCF 段的疲劳曲线对试验数据进行拟合。



N 为应力循环次数(次);S 为应力强度(MPa),表示材料所承受的最大应力

图 1 S-N 曲线

由于不同材料黏结体的疲劳寿命往往具有很大的离散性和不确定性,为更好地拟合试验数据,利用统计函数模型,结合可靠性分析研究材料的疲劳性能差异。一般认为材料疲劳寿命服从正态分布和威布尔分布^[8],其中后者在分析材料疲劳寿命时具有很好的适应性^[9-10]。因此,采用两参数威布尔分布分析填缝料黏结混凝土组合体疲劳寿命的概率分

* 基金项目:上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司科技项目(2024)

布,公式如下:

$$\ln \ln(1/P) = m \ln N - m \ln \eta \quad (1)$$

式中: P 为保证率; m 、 η 为常数。

根据式(1), $\ln N$ 与 $\ln \ln(1/P)$ 呈线性关系。如果填缝料黏结混凝土组合体的疲劳试验数据能以较大相关系数证明式(1)所示线性关系成立,则其疲劳寿命服从两参数威布尔分布。

1.2 模拟接缝疲劳试验方案

采用同种水泥砂浆填缝料黏结 3 种不同水泥掺量(20%、12%、10%)混凝土预制块制作中梁试件,先测定试件的弯拉强度,依据弯拉强度确定 3 种应力比(0.75、0.80、0.85)下的试验荷载,开展四点弯曲疲劳试验,研究填缝料黏结混凝土组合体模拟接缝的疲劳性能。水泥砂浆混凝土组合梁见图 2。为方便表述,将填缝料黏结 20%、12%、10%水泥掺量的混凝土组合梁分别记为 L-1、L-2、L-3。



图 2 水泥砂浆混凝土组合梁

水泥混凝土与填缝料组合体为 2 种黏结的均质材料,试件发生疲劳破坏时破裂面的位置可能为材料黏结界面处。参考文献[9],宜采用重复弯曲疲劳试验。采用四点弯曲荷载模式,使试件的受荷部位集中于中间 1/3 位置,确保试件集中受力于该区域,而不是在材料黏结界面,更符合实际中路面偏载的情况。图 3 为加载示意图。

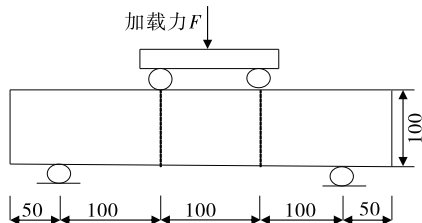


图 3 试验加载示意图(单位:mm)

2 试件制备和试验设计

2.1 原材料

粗集料选用石灰岩,并选择连续粒径 5~20 mm,经过筛分,将粒径分为 4.75 mm 以下、4.75~

9.50 mm、9.50~19.00 mm 3 档,压碎值为 20.1%。细集料采用湘江河砂,属于中砂,其细度模数满足常用混凝土使用要求(2.3~3.0)。水泥采用湖南云中科技再生有限公司的 PC32.5 复合硅酸盐水泥。

鉴于混凝土配合比设计方案中存在水泥掺量较低的情况,而过少的水泥浆会导致标准振动成型极为困难,为使不同水泥掺量混凝土保持相同的水灰比,便于试件成型,添加减水剂(1601s 聚羧酸粉末)。

2.2 填缝料

填缝料选用湖南腾达岩土工程技术有限公司的早高强快速修补型水泥砂浆,4 h 即可达到较高强度。其力学性能见表 1。

表 1 水泥砂浆的力学性能

凝结时间/h	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	黏结强度/MPa
4	4.93	31.3	1.35
8	5.68	35.2	1.90
12	6.65	37.8	2.05
24	6.77	39.4	2.42

由表 1 可知:水泥砂浆凝结时间超过 24 h 后,其强度可超过 C30 混凝土的经验值水平。

2.3 混凝土配合比设计及强度指标

依据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》及《混凝土配合比速查手册(第二版)》进行混凝土配合比设计。初步设计混凝土强度等级为 C30,坍落度为 35~50 mm,配置强度为 38.2 MPa。计算得:水泥掺量为 19.96%,水灰比为 0.41,砂率为 0.31,用水量为 195 kg/m³。另外,分别采用 11.99%、10.02% 水泥掺量进行混凝土配合比设计,其余条件不变。3 种不同水泥掺量混凝土的配合比见表 2。

采用配合比 C1 进行混凝土试拌,观察其和易性,发现虽然黏聚性及保水性良好,但流动性极差。配合比 C2 和 C3 由于水泥掺量较低,无法满足和易性要求。规范推荐增加水泥浆用量来增强混凝土的流动性,但采用该方法只能使 C1 配合比混凝土符合要求。为使 3 种方案保持统一,在混凝土中添加减水剂。经试拌,11.99%、10.02% 较低水泥掺量混凝土分别在添加 0.3%、0.5% 减水剂的情况下能较方便成型试件。

对 3 种不同水泥掺量混凝土进行强度试验,测试其轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和弹性模量,结果见表 3。

表 2 混凝土配合比设计

配合比 编号	水泥掺量/%	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	粗集料/ (kg·m ⁻³)	水灰比	砂率
C1	19.96	195	476	531	1 183	0.41	0.31
C2	11.99	117	286	614	1 368	0.41	0.31
C3	10.02	98	239	634	1 414	0.41	0.31

表 3 不同水泥掺量混凝土的强度指标

配合比编号	水泥掺量/ %	减水剂掺量/ %	水灰比	轴心抗压 强度/MPa	劈裂抗拉 强度/MPa	28 d 弹性模量/ (10 ⁴ MPa)
C1	19.96	0.1	0.41	38.4	3.40	2.70
C2	11.99	0.3	0.41	47.2	3.62	2.75
C3	10.02	0.5	0.41	58.9	4.51	2.78

由表 3 可知:在添加适量减水剂的情况下,混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量随着水泥掺量的减小而增大,说明控制水灰比和减少用水量是配制高强混凝土的关键之一^[11],使采用低掺量水泥配制高强度混凝土成为可能。

2.4 室内标准振动台成型试件

利用振动器成型混凝土试件。试模内部尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,预留 5 cm 接缝宽度,中间设置 5 cm 轻质金属隔板,四周用螺丝固定。混凝土抗弯拉强度试件与疲劳试验试件均取同龄期,各取 3 根同条件制作和养护的试件。

试件成型前擦净模具,并在内壁涂一薄层机油便于脱模,然后分别搅拌 3 种配合比混凝土。将搅拌好的混凝土按规范要求装入试模,脱模后放入标准养护室养护。

在标准养护室养护 28 d 后,利用常规试模灌注水泥砂浆,待早强水泥砂浆达到强度要求后,脱模取出试件,得到组合体中梁 L-1、L-2、L-3。养护一段时间后进行弯拉强度和弯曲疲劳试验。

2.5 弯拉强度与弯曲疲劳试验

利用 M810 型 MTS 试验机,将试件安放在支座上,试件成型时的侧面朝上,进行弯拉强度试验。取 3 个试件的强度均值作为该组组合梁的代表强度,3 种组合体中梁的弯拉强度试验结果见表 4。由表 4 可知:组合体中梁的抗弯拉强度与混凝土的强度呈正相关关系,且均为黏结面发生断裂破坏,弯拉强度破坏值大于水泥砂浆凝结 24 h 后黏结强度、小于凝结 24 h 后抗折强度。

表 4 组合体中梁弯拉强度试验结果

组合梁 编号	水泥掺 量/%	减水剂 掺量/%	水灰比	缝宽/ cm	抗弯拉强 度/MPa
L-1	19.96	0.1	0.41	5	2.90
L-2	11.99	0.3	0.41	5	4.11
L-3	10.02	0.5	0.41	5	4.37

弯曲疲劳试验分别采用 75%抗弯拉强度、80%抗弯拉强度和 85%抗弯拉强度的疲劳荷载,每种应力比制作 3 根组合体中梁试件。疲劳试验前,预压 2 min 以减少偏差,并以裂缝宽度达到 1.50 mm 作为组合体中梁破坏标志(试验时间较长的试件用湿毛巾覆盖保持湿润)。3 种组合体中梁的疲劳试验结果见表 5,均在黏结面发生疲劳断裂。

表 5 组合体中梁弯曲疲劳试验结果

组合梁 编号	应力比	3 根试件的疲劳寿命 N_i /次		
		1	2	3
L-1	0.85	661	3 877	27 745
	0.80	7 538	33 274	138 392
	0.75	67 827	124 900	149 640
L-2	0.85	752	2 138	14 785
	0.80	7781	80 050	124 733
	0.75	53 304	199 653	249 654
L-3	0.85	682	4 208	24 214
	0.80	7 745	62 873	129 838
	0.75	45 009	124 761	386 374

3 试验结果分析

3.1 数据拟合

计算每种应力比下疲劳寿命 N_i 的对数疲劳寿命 $\lg N_i$ 和保证率 P , 并以 $-\ln \ln(1/P)$ 为横坐标、 $\lg N_i$ 为纵坐标绘制散点图, 回归拟合后, 判断该应力比下疲劳寿命是否符合威布尔分布。不同应力比下 3 种组合体中梁疲劳寿命的威布尔分布见图 4。

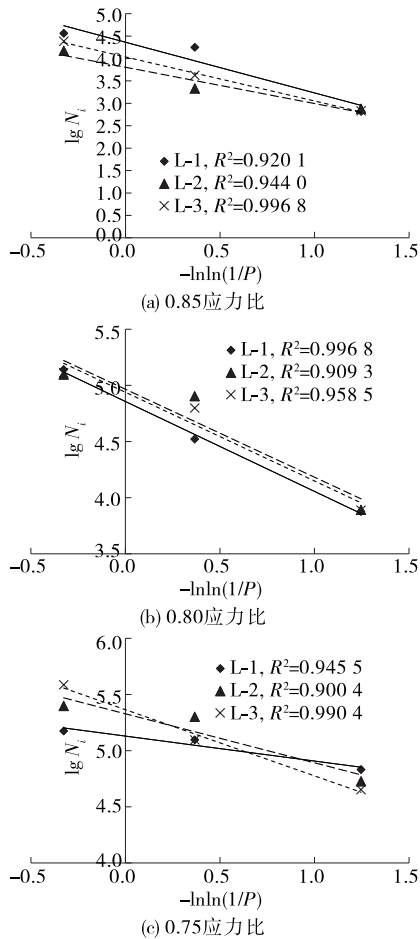


图 4 试件疲劳寿命的威布尔分布

由图 4 可知: 不同应力比下, 3 种组合体中梁 $\lg N_i$ 与 $-\ln \ln(1/P)$ 的相关性系数均在 0.9 以上, 相关性较高, 符合威布尔分布。

3.2 疲劳方程及疲劳性能分析

根据式(1)分别计算 95% 和 50% 保证率、不同应力比 σ/s 下组合体中梁的疲劳寿命, 同时进行线性回归, 得到不同保证率下组合体中梁的疲劳方程(见表 6)和疲劳曲线(见图 5)。

由图 5 可知: 应力比为 0.75、0.80、0.85 时, 配合比 C1 混凝土与水泥砂浆填缝料黏结组合体的疲劳寿命低于 C2、C3 较低水泥掺量混凝土组合体, 且混

表 6 不同保证率下组合体中梁的疲劳方程

组合梁 编号	不同保证率下疲劳方程	
	95%	50%
L-1	$\lg N_i = 30.315 - 34.577\sigma/s$	$\lg N_i = 15.368 - 13.672\sigma/s$
L-2	$\lg N_i = 23.731 - 26.300\sigma/s$	$\lg N_i = 17.729 - 16.596\sigma/s$
L-3	$\lg N_i = 22.401 - 24.949\sigma/s$	$\lg N_i = 16.281 - 14.737\sigma/s$

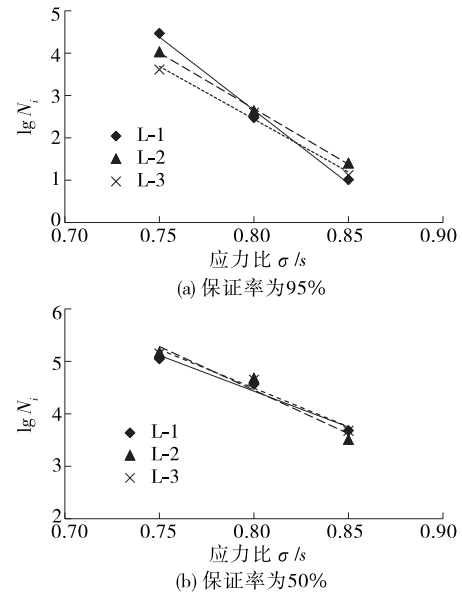


图 5 不同保证率下组合体中梁的疲劳曲线

凝土疲劳寿命随着水泥掺量的减小而增大。表明填缝料的黏结能力极强, 即使是 2 种不同材料组合体, 也具有极强的疲劳性能。运用同种填缝料并保证相同的黏结强度时, 在同等水灰比且添加适量减水剂的情况下, 减小水泥掺量能增强混凝土强度, 并提高填缝料黏结混凝土组合体的抗弯拉性能和疲劳性能。高应力比下试件普遍破坏较快, 低应力比下疲劳寿命较长, 但试件疲劳性能差异较大, 具有一定的不稳定性。水泥掺量减少至 11.99%、10.02% 时, 疲劳寿命增大但增长幅度较小, 并随着应力比的降低而减弱, 混凝土强度是决定组合体疲劳性能的关键因素之一。

4 结论

本文开展 3 种不同水泥掺量混凝土强度试验及水泥砂浆填缝料黏结混凝土组合体模拟接缝的疲劳试验, 得出以下结论:

(下转第 65 页)