

文章编号:1671-8879(2012)03-0006-05

半刚性基层材料疲劳试验

周 浩,沙爱民,胡力群

(长安大学 公路学院,陕西 西安 710064)

摘 要:为研究半刚性基层材料的组成与疲劳性能间的关系,对几种代表性半刚性基层材料进行疲劳试验研究。通过对骨架密实水泥稳定碎石、悬浮密实水泥稳定碎石、骨架密实水泥粉煤灰稳定碎石和悬浮密实水泥粉煤灰稳定碎石梁试件进行三分点加载疲劳试验,得到室内疲劳预估模型,并进一步分析了材料组成对疲劳性能的影响。研究表明:骨架密实结构水泥稳定碎石疲劳性能普遍优于悬浮密实结构水泥稳定碎石;水泥粉煤灰稳定碎石的疲劳性能优于水泥稳定碎石;增加结合料剂量使得材料疲劳敏感性增加,但实际承载能力提高;级配稍细的骨架密实结构半刚性基层材料疲劳性能较好。

关键词:道路工程;半刚性基层;疲劳性能;材料组成;级配;结合料

中图分类号:U414

文献标志码:A

Test on fatigue property of semi-rigid base material

ZHOU Hao, SHA Ai-min, HU Li-qun

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to research the relationship between composition and the fatigue performance of the semi-rigid base material, several typical semi-rigid base materials, including the skeleton-density cement stabilized aggregate, the suspend-density frame cement stabilized aggregate, the skeleton-density cement fly-ash stabilized aggregate, and the suspend-density cement fly-ash stabilized aggregate mixture, were studied by the beam specimen tensile fatigue experiment. The prediction models of different materials were obtained, and the influence of material composition on the material fatigue performance was analyzed. The results show that the skeleton-density structure mixture has better fatigue property than the suspend-density structure mixture. The cement fly-ash stabilized material has better fatigue property than the cement stabilized aggregate. The material with more cement has higher fatigue sensitivity but can bear more traffic load, the finer grade skeleton-density cement stabilized aggregate has better fatigue property. 10 tabs, 5 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; semi-rigid base; fatigue property; material composition; gradation; binder

0 引 言

半刚性基层沥青路面是中国当前最主要的路面

结构,中国已建成和在建高速公路中 85%以上采用半刚性基层,半刚性基层是主要承重层^[1]。路面结构在使用期间要经受车轮荷载的反复作用,导致半

收稿日期:2011-11-28

基金项目:交通运输部西部交通建设科技项目(2006 318 812 18)

作者简介:周 浩(1983-),男,山东济南人,工学博士研究生,E-mail:zhouhao1983@126.com。

刚性基层材料产生微裂纹,当荷载重复作用超过一定次数以后,荷载产生的应力就会超过路面结构抗力,产生疲劳断裂破坏^[2]。疲劳性能是半刚性基层材料的重要性能,国内外对此展开了大量的试验研究。中国相关科研人员研究了水泥砂砾、二灰砂砾、水泥碎石、水泥土和石灰土等几种典型的半刚性基层材料,确定了相应的疲劳方程。交通运输部重庆公路研究所应用室内大型环道试验,探索路面结构的疲劳特性。在国外,壳牌的路面设计方法中包括了弯拉应力疲劳标准,并给出了无机结合料稳定类材料的典型疲劳方程。澳大利亚的路面设计方法采用拉应变为标准,并确定了无机结合料疲劳特性的试验方法。通过这些研究,建立了不同类型半刚性基层材料的疲劳预估方程,但针对半刚性基层材料组成与疲劳性能之间关系的系统性研究还较少。为此,本文对不同组成的半刚性基层材料进行疲劳试验,并分析材料组成对疲劳性能的影响。

1 试验安排

1.1 原材料试验

1.1.1 水泥

采用陕西耀县水泥厂生产的秦岭普通硅酸盐水泥,强度等级为 32.5,各项指标见表 1。

表 1 水泥性质试验

指标	细度筛余量 (80 μm 方孔筛)/%	初凝时 间/min	终凝时 间/min	3 d 强度/MPa	
				抗压	抗折
水泥	7.1	178	227	20.1	4.9

1.1.2 粉煤灰

采用陕西灞桥火电站生产的粉煤灰,其物理性质、化学成分分析见表 2、表 3。

表 2 粉煤灰物理性质

指标	颜色	密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含水量/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
粉煤灰	灰色	2.11	35.7	1.010

表 3 粉煤灰化学成分

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
含量(质量分数)/%	51.36	26.31	9.00	3.90	1.12

1.1.3 石料

采用陕西料厂的石料。用排水法测定粗细集料密度,结果见表 4、表 5。

表 4 粗细集料密度试验结果

筛孔尺寸/mm	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75
密度/(g·cm ⁻³)	2.818	2.816	2.809	2.803	2.796	2.788

表 5 细集料密度试验结果

筛孔尺寸/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	<0.075
密度/(g·cm ⁻³)	2.754	2.712	2.671	2.615	2.433	2.686	2.747

1.2 级配选择

1.2.1 骨架密实水泥稳定碎石级配

对骨架密实结构水泥稳定碎石来说,能否形成骨架嵌挤状态是级配设计的关键,良好的级配要求粗骨料嵌挤形成骨架,细集料充分填充骨架间的空隙,所以,粗集料骨架空隙率是骨架嵌挤状态的最重要影响因素。不同压实状态下,骨料有不同的空隙率。为了确定合理的压实状态,分别在松装、紧装 2 种状态下测定其空隙率;另外,通过敲击容量筒外壁使骨料密实,作为对比状态,并根据不同状态下的空隙率确定细料用量。粗、细集料的级配见表 6 和表 7^[3];骨架空隙率试验结果见表 8。

表 6 粗集料级配

筛孔尺寸/mm	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75
通过率/%	100	86.5	63.0	53.0	42.0	26.0	0

表 7 细集料级配

筛孔尺寸/mm	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
通过率/%	100	93.4	60.3	24.1	8.6	1.1	0

表 8 骨料在不同状态下的空隙率

性能指标	紧装	松装	敲击
密度/(g·cm ⁻³)	1.960	1.836	1.692
空隙率/%	30.1	34.5	39.7
细集料比例/%	21	25	30

细集料比例分别为 21%、25%、30%,从而确定敲击密实状态、松装状态和紧装状态下的骨架密实水泥稳定碎石级配。

1.2.2 对比试验级配

本文安排了 3 组对比试验,分别为悬浮密实水泥稳定碎石,结合料为 5%水泥;悬浮密实水泥粉煤灰稳定碎石,结合料为 5%水泥+11%粉煤灰;骨架密实水泥粉煤灰稳定碎石,结合料为 5%水泥+11%粉煤灰。水泥粉煤灰稳定碎石选用设计规范中级配范围中线,结合料剂量开始计划为 5%水泥+10%粉煤灰,但试验发现此配合比的骨架密实水泥粉煤灰稳定碎石密实度不好,故采用 5%水泥+11%粉煤灰。材料级配如下页图 1 所示。

1.3 试样成型方法

根据不同半刚性基层材料的特点,采用相应的试验方法确定其压实标准。对于悬浮密实结构的水泥稳定碎石和水泥粉煤灰稳定碎石,采用重型击实法确定最大干密度和最佳含水量;对于骨架密实结

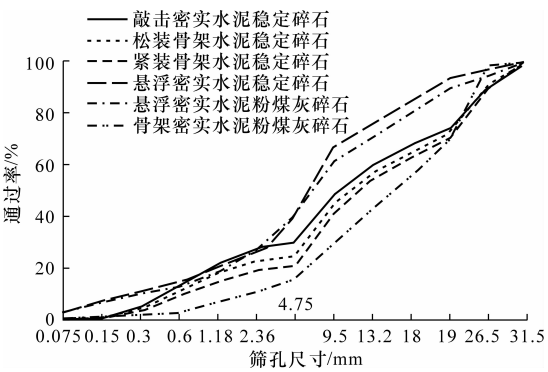


图1 试验级配

构的水泥稳定碎石和水泥粉煤灰稳定碎石,采用振动击实法确定最大干密度和最佳含水量。振动法采用的参数为:静压力 140 kPa,振动频率 28 Hz,活动偏心块与固定偏心块的夹角为 60°,试验中以回弹跳起控制停机。

1.4 强度的确定

测试材料的 7 d 无侧限抗压强度和 90 d 抗折强度,悬浮密实结构和骨架密实结构,分别采用静压法和振动法成型 150 mm×150 mm 的圆柱体试件,养生 7 d 后测定其 7 d 无侧限抗压强度;成型 10 cm×10 cm×40 cm 的梁形试件,在标准养护条件下养生 90 d 后,测试抗折强度。试验结果见表 9。

表 9 各半刚性基层材料击实试验与力学试验结果

半刚性基层 材料类型	最佳 含水量/ %	水泥 剂量/ %	粉煤 灰剂 量/%	最大干 密度/ (g·cm ⁻³)	7 d 无侧 限抗压强 度/MPa	90 d 抗 折强度/ MPa
悬浮密实水泥稳定 碎石	5.51	5.0	0	2.44	5.7	1.779
悬浮密实水泥粉煤 灰稳定碎石	6.85	5.0	11	2.32	6.1	2.264
骨架密实水泥粉煤 灰稳定碎石	6.58	5.0	11	2.35	7.3	2.426
紧装骨架水泥稳定 碎石	5.28	5.0	0	2.43	5.3	2.221
敲击密实水泥稳定 碎石	5.31	5.0	0	2.49	5.9	1.960
松装骨架水泥稳定 碎石 I	5.40	5.0	0	2.51	6.0	1.845
松装骨架水泥稳定 碎石 II	5.19	3.5	0	2.43	4.0	1.332

1.5 疲劳试验

采用梁的三分点加载弯曲疲劳试验,养生龄期 90 d,养生温度 20 ℃,湿度 90%^[4-6]。采用应力控制方式,加载频率为 10 Hz,应力循环特征值 $\lambda = P_{\min}/P_{\max} = 0.1$,初选应力比为 0.6、0.7、0.8,实际试验中

发现部分材料在 0.8 应力比下疲劳寿命过短,为取得有效数据,适当降低了应力比。用威布尔理论对疲劳试验结果进行处理,并确定各材料在 50%可靠度时的疲劳预估模型,其方程为 $\lg(N) = a + bS$ 。式中: N 为疲劳作用次数; S 为应力比; a 和 b 为回归系数; P_{\max} 、 P_{\min} 分别为最大、最小荷载。

采用 10^6 荷载作用次数对应的应力比作为疲劳性能评价指标。实际道路结构中,荷载作用有间隔时间,裂缝扩展需要时间,且存在轮载横向分布,即使按照保守的修正,路面实际疲劳寿命也相当于室内试验的 20~50 倍。室内试验疲劳次数 10^6 相当于实际的 2 000 万~5 000 万次荷载作用次数,达到了高速公路的设计标准。本文为表述简洁, 10^6 荷载作用次数对应的应力比和实际应力值分别称为疲劳强度和绝对疲劳强度。不同材料的疲劳强度和绝对疲劳强度见表 10。

表 10 疲劳试验结果

半刚性基层材料类型	<i>a</i>	<i>b</i>	疲劳 强度	绝对疲劳 强度/MPa
悬浮密实水泥稳定碎石	13.251 9	-13.694 6	0.529 5	0.914
悬浮密实水泥粉煤灰稳定碎石	14.255 1	-14.736 5	0.560 2	1.128
骨架密实水泥粉煤灰稳定碎石	14.926 1	-15.324 6	0.582 5	1.413
紧装骨架水泥稳定碎石	14.688 1	-15.666 4	0.554 6	1.232
敲击密实水泥稳定碎石	13.797 4	-13.880 7	0.561 7	1.100
松装骨架水泥稳定碎石 I	13.485 2	-13.656 9	0.548 1	1.011
松装骨架水泥稳定碎石 II	13.977 7	-14.322 9	0.557 0	0.741

2 结果分析

2.1 结构类型影响

无论水泥稳定碎石还是水泥粉煤灰稳定碎石,骨架密实结构材料的疲劳性能均较好,其疲劳强度和绝对疲劳强度较悬浮密实结构分别提高了约 5% 和 10%~25%。

材料的疲劳性能与其内部结构有关。悬浮密实结构类型材料中细料的压实体积大于粗料间的空隙体积,粗集料几乎悬浮在细集料中;而骨架密实结构混合料中粗集料嵌挤形成骨架结构,细集料填充骨架的空隙。集料的强度一般较高,能够阻挡材料内部的微裂缝发展。在悬浮密实类材料中,细集料含量大,并联结成为一个整体,使得裂缝容易扩展。而骨架密实水泥稳定碎石中,骨料含量较大,且相互嵌挤构成主体,裂隙的发展受到骨架的约束较大,表现出好的疲劳性能。此外,试验中还发现,悬浮密实水泥稳定碎石静压成型时,骨料压碎现象相对严重,在骨料破裂面上几乎没有粘结料,成为一个新的薄弱

面;而骨架密实类试件成形时采用振动成型,骨料破碎现象很少。这种骨料破碎引起的破裂面,也是悬浮材料疲劳性能差的原因。

2.2 结合料影响

无论悬浮密实结构还是骨架密实结构,水泥粉煤灰稳定碎石的性能均优于水泥稳定碎石,其疲劳强度和绝对疲劳强度分别提高了 6% 和 23%~39%。其原因在于粘结料不同,粉煤灰被加入后,混合料内部发生了一系列复杂的物理-化学反应,产生了 3 方面作用:①润滑作用,粉煤灰颗粒很小,且形状接近球形,起到润滑作用,使得混合料容易压实和密实;②填充作用,粉煤灰在水泥粉煤灰混合料中具有填充空隙的作用,改善了碎石的级配,提高了密实度^[7];③化学作用,粉煤灰对水泥的水化有影响,水泥的水化产物对粉煤灰的火山灰反应有影响,从而形成一个复杂的系统^[8]。大体认为,短期内粉煤灰一般会延缓水泥水化,而长期后粉煤灰一般起到促进作用,能产生更多的胶结物,更好的连接和固定集料。

2.3 结合料剂量影响

结合料对材料的疲劳性能有重大影响,应选择适宜的水泥剂量,在满足强度的基础上,提高水泥稳定碎石基层的抗疲劳性能^[9]。通过不同水泥剂量的松装骨架水泥稳定碎石对比可发现,高水泥剂量水泥稳定碎石疲劳强度略低。水泥剂量的增加会导致水泥稳定材料对疲劳作用敏感,从而使疲劳性能劣化。但 5% 水泥剂量的松装骨架水泥稳定碎石的绝对疲劳强度约为 3.5% 水泥剂量水泥稳定碎石的 1.4 倍,说明高水泥剂量其实际承载能力有明显的上升。结合料剂量对半刚性基层材料疲劳性能的影响,如图 2、图 3 所示^[10]。图中, x 为水泥剂量, y_1 为疲劳强度, y_2 为绝对疲劳强度, R^2 为判定系数。

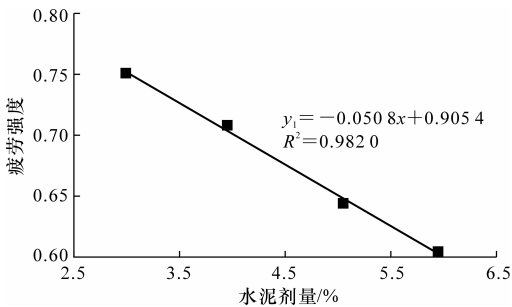


图 2 疲劳强度与水泥剂量的关系

由图 2、图 3 可知,水泥稳定碎石的疲劳强度和绝对疲劳强度均与水泥剂量有良好的线性关系。疲劳强度随水泥剂量的增加而降低,绝对疲劳强度则

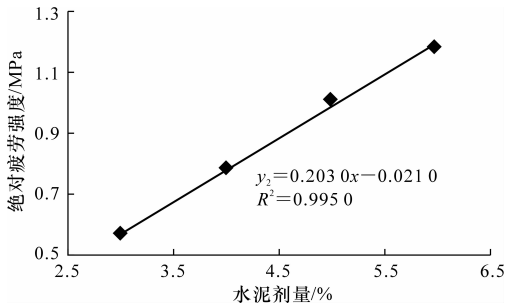


图 3 绝对疲劳强度与水泥剂量的关系

随水泥剂量的增加而提高。这说明,随着水泥剂量的增加,水泥稳定碎石的疲劳敏感性增大,但实际承受荷载的能力有显著提高。

2.4 级配粗细的影响

从疲劳的角度看,敲击密实级配水泥稳定碎石的疲劳性能较好,其疲劳强度和绝对疲劳强度比松装骨架密实结构提高了 2.5% 和 9%;与悬浮密实结构水泥稳定碎石相比,则分别提高了 6% 和 20%。这是因为此种材料有骨架密实结构的优点,又含有较多的细料,故可以形成更加均匀密实的微观结构,减少了材料内部的不均匀性。

从试验结果看,紧装骨架结构水泥稳定碎石的疲劳寿命高,但其衰减速度最快($b = -15.6664$),说明这种材料对荷载的敏感性很高。

2.5 竖向离析现象

如图 4 所示,紧装骨架结构水泥稳定碎石抗折强度异常升高,远高于另外 2 种结构的水泥稳定碎石,与材料抗压强度规律不符。观察发现,在试件的上半层,细料含量较少,有明显的空隙;下半部密实,胶浆含量很高,可能发生竖向离析。

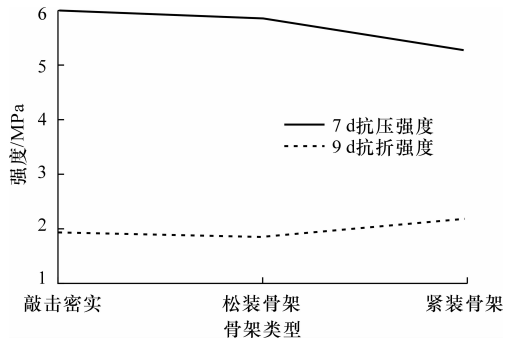


图 4 骨架密实水泥稳定碎石抗压强度与抗折强度

经过设计试验验证,这种材料确实发生了离析,细料、水泥和水分会从上向下运动。当含水量较大时,下层的细料含量为上层的 1.5 倍,含水量是上层的 1.7 倍。这种离析与级配和含水量都有关系,细料含量越大,含水量越大,离析现象也越严重。离析后的紧装骨架密实水泥稳定碎石抗折强度非常高,

绝对疲劳强度也较高,说明其实际承受荷载的能力很强,但对应力比非常敏感,对超载严重的交通状况不适应。

2.6 减小离散性试验

由于疲劳试验的离散性较大,故尝试研究减小离散性方法。选取 6 根试件,分别测定 0.3 倍、0.5 倍抗折极限荷载时的挠度,然后进行疲劳试验,试验结束后测定断块的抗压强度。试验时首先加载到 1 kN,恒载 30 s 后卸载到 100 N,再恒载 30 s,记录下疲劳机坐动器位移值,后加载到 0.3 倍、0.5 倍抗折极限荷载,恒载 30 s 并记录下坐动器位移值。分别用两者减去 100 N 时的下坐动器位移值,作为其挠度值。对于疲劳试验断块,测定两断块抗压强度,并计算其平均值,作为试件的抗压强度值。

疲劳寿命与 0.3 倍、0.5 倍抗折强度挠度无相关性,但与挠度差有较弱的相关性,如图 5 所示。疲劳寿命随挠度差的增大呈下降趋势,当试件的挠度差大于 0.15 mm 时,试件的疲劳寿命一般较小;断块抗压强度与试件的疲劳寿命基本无相关性。

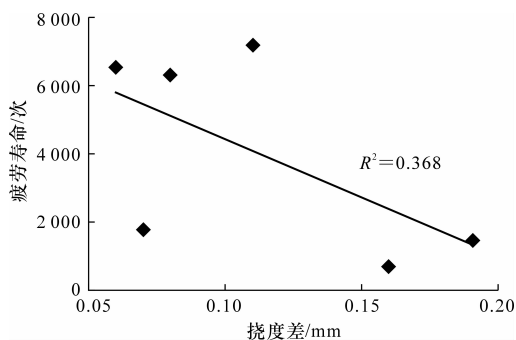


图 5 疲劳寿命与挠度差的关系

3 结 语

(1)对不同种类型的半刚性基层材料进行室内弯曲疲劳试验,并建立疲劳方程,尝试研究了减小疲劳试验离散性的方法。

(2)结构类型对半刚性材料基层的疲劳性能有影响,骨架密实结构半刚性基层材料的疲劳性能优于悬浮密实结构,抗折强度也有提高。

(3)结合料对半刚性基层材料的疲劳性能有影响,水泥粉煤灰稳定碎石的疲劳性能优于水泥稳定碎石,且水泥粉煤灰稳定碎石的长龄期疲劳性能有更大的优势。

(4)结合料剂量对半刚性基层材料的疲劳性能有影响,水泥剂量的提高使水泥稳定碎石的疲劳敏感性变大,但实际承载能力有明显升高。

(5)级配粗细影响半刚性基层材料的疲劳性能,稍细骨架密实水泥稳定碎石级配疲劳性能较好。

(6)紧装骨架密实水泥稳定碎石抗折强度异常升高;经检验发现,细料结合料和水分向下运动,离析后的水泥稳定碎石抗折强度很高,但对荷载的敏感性很高。

参考文献:

References:

- [1] 丛 林,郭忠印,暨育雄,等.半刚性基层材料性能参数的试验研究[J].建筑材料学报,2001,4(4):385-390.
CONG Lin, GUO Zhong-yin, JI Yu-xiong, et al. Experimental study on the performance of semi-rigid base coarse materials[J]. Journal of Building Materials, 2001, 4(4): 385-390.
- [2] 杨 群,黄晓明.沥青稳定基层与半刚性基层疲劳设计分析[J].公路交通科技,2001,18(6):5-9.
YANG Qun, HUANG Xiao-ming. An analysis of fatigue design of asphalt base and semi-rigid base[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(6): 5-9.
- [3] 胡力群.半刚性基层材料结构类型与组成设计研究[D].西安:长安大学,2004.
- [4] 杨国峰.基于重载的沥青混合料疲劳性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2011.
- [5] 李小刚.无机结合料稳定类基层疲劳损坏预估模型研究[D].西安:长安大学,2006.
- [6] 贾 侃.半刚性基层材料的疲劳特性研究[D].西安:长安大学,2008.
- [7] 胡力群,沙爱民.水泥稳定碎石基层整体成型方法的对比[J].筑路机械与施工机械化,2010,27(6):45-47.
HU Li-qun, SHA Ai-min. Comparison of full-depth shaping methods of cement stabilized macadam base course[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(6): 45-47.
- [8] 张嘎吱.水泥粉煤灰稳定碎石基层配合比设计与路用性能研究[D].西安:长安大学,2004.
- [9] 王 艳,倪富健,李再新.水泥稳定碎石混合料疲劳性能[J].交通运输工程学报,2009,9(4):10-14.
WANG Yan, NI Fu-jian, LI Zai-xin. Fatigue performance of cement-stabilized macadam mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(4): 10-14.
- [10] 张永红.高性能水泥稳定集料强度标准研究[D].西安:长安大学,2005.