

南京长江第四大桥钢桥面铺装疲劳性能试验研究

詹 俞,李国芬,王宏畅

(南京林业大学土木工程学院,南京 210037)

[摘要] 结合南京长江第四大桥钢桥面铺装实体工程,开展铺装层混合料20℃疲劳性能试验。为了使试验结果能够更真实地反映主桥铺装的实际情况,直接采用主桥铺装使用的混合料成型试件,其中,带钢板复合梁试件为施工现场摊铺、碾压成型。室内试验对铺装结构单层采用劈裂疲劳试验,选择0.2、0.3、0.4、0.5、0.6这5个等级的应力水平,对组合结构采用带钢板复合梁疲劳试验,荷载水平为6 kN、7 kN、8 kN,并通过回归分析得到疲劳方程。

[关键词] 道路工程;钢桥面铺装;疲劳性能;劈裂疲劳;疲劳方程

[中图分类号] U448.25 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)08-0075-04

1 前言

南京长江第四大桥钢桥面铺装采用“下面层40 mm的浇筑式沥青混凝土+上面层改性密级配沥青混凝土”的双层复合结构。由于浇筑式沥青混凝土较高的胶泥含量,其混合料的疲劳性能优良,上面层高弹改性沥青在国内使用较少,对其性能参数了解不够。本文从铺装各层混合料入手,再进行整体结构的疲劳性能试验,全面验证钢桥面铺层的疲劳性能。

2 试验材料

1) 沥青和集料。浇筑式沥青混合料采用20#~40#低标号的直馏沥青为基质沥青,掺入一定比例的特立尼达天然湖沥青(TLA),上面层高弹改性沥青为日本本四联络桥使用改性I型沥青,两层混合料层间撒布一定量的热塑性弹性体(SBS)乳化沥青。集料主要使用南京盘晶矿业有限公司生产的玄武岩1#~4#料,并按铺装设计要求掺入天然砂,矿粉采用镇江市丹徒石马永兴建材厂生产的石灰岩矿粉。

2) 铺装配合比设计^[1]。为了真实地模拟铺装层的实际情况,试验使用实际铺装施工中拌合站生产

的沥青混合料。浇筑式沥青混合料取用的是在库卡车中搅拌升温到规定指标的混合料。

3 疲劳性能试验

对单层混合料采用目前国内外使用较多的圆柱体劈裂疲劳试验,对组合结构整体疲劳性能采用带钢板复合梁疲劳试验^[2]。

1) 试件成型。劈裂疲劳试件均从车辙板试件上钻芯、切割得到直径为 100 ± 2 mm、高为 40 ± 5 mm的圆柱体试件^[3],浇筑式沥青车辙板自动流淌成型,辅助人工振捣抹平,上面层改性沥青混合料在室内碾压成型。带钢板复合梁试件是预埋钢板在混凝土试验段桥面上,现场施工成型,切割得到带钢板复合梁试件(见图1)。



图1 成型带钢板复合梁试件
Fig.1 Molding composite beam with steel

[收稿日期] 2013-05-20

[基金项目] 住房和城乡建设部科技项目(2012-K4-21)

[作者简介] 李国芬(1965—),女,江苏张家港市人,教授,主要研究方向为大跨径钢桥面铺装设计与施工研究;E-mail:lgf@njfu.com

2) 试验参数。本文疲劳试验采用更能模拟实际情况的应力控制方式^[4], 试验温度为 20 °C, 荷载频率为 10 Hz, 不设间歇时间, 加载波形选择正弦波, 为防止试验中加载脱空, 设置最小接触力为 20 N, 终止条件为试件开裂破坏。劈裂疲劳试验根据试件劈裂强度选择应力水平以 0.1 分级, 分为 0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 这 5 个等级, 带钢板复合梁疲劳试验选择荷载为 6 kN、7 kN 和 8 kN。

4 疲劳试验结果分析

4.1 单层圆柱体劈裂疲劳试验

按照国内规范^[3]沥青混合料劈裂试验测定混合料劈裂破坏强度(见表 1)。由于浇筑式沥青中掺入了天然硬质沥青, 所以其混合料的强度和模量都比高弹改性沥青混合料要高很多。表 2 为沥青混合料在 20 °C 下劈裂疲劳试验结果的统计。上下面层混合料的疲劳性能相近, 应力比越大浇筑式沥青混合料的疲劳性能越好, 因为浇筑式沥青混合料中加入了天然硬质沥青, 相同温度下其混合料的模量要大于上面层改性沥青混凝土, 再者浇筑式沥青混凝土较高的沥青含量也有助于提高其混合料的疲劳性能。

表 1 沥青混合料的劈裂强度试验结果

混合料类型	劈裂抗拉强度/MPa	破坏拉伸应变/ $\times 10^{-3}$	破坏劲度模量/MPa
浇筑式沥青混合料	3.150	6.84	937.37
改性沥青混合料	1.130	16.99	134.79

表 2 沥青混合料 20 °C 劈裂疲劳试验结果统计

混合料类型	应力水平	施加劈裂强度/MPa	疲劳寿命均值/次	变异系数
浇筑式沥青混合料	0.2	0.630	70 090	5.60
	0.3	0.945	27 045	7.66
	0.4	1.260	7 930	9.41
	0.5	1.575	3 226	2.93
	0.6	1.890	2 176	3.02
改性沥青混合料	0.2	0.372	75 337	3.89
	0.3	0.559	22 798	6.41
	0.4	0.745	5 282	5.20
	0.5	0.931	2 330	7.74
	0.6	1.117	1 342	5.11

国内外广泛采用式(1)作为应力控制方式疲劳试验的疲劳方程^[5], 在进行数据分析时相关系数都能达到 95 % 以上, 因此说明采用间接拉升劈裂疲劳试验这种方法在进行应力控制模式的疲劳试验取得数据较为合理。

$$N_f = K \left(\frac{1}{\sigma} \right)^n \quad (1)$$

对式(1)两边取对数得

$$\lg N_f = \lg K - n \lg \sigma \quad (2)$$

式(1)和(2)中, N_f 为试件破坏时的重复荷载作用次数, 次; σ 为实际施加应力最大幅值, MPa; n 和 $\lg K$ 为线性回归常数。

对劈裂疲劳试验结果进行数据处理, 对其进行双对数回归分析, 得到应力水平与疲劳寿命双对数关系图(见图 2)。对劈裂疲劳数据回归得两类混合料的劈裂疲劳方程。

浇筑式沥青混凝土

$$N_f = 5.741 2 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{0.296 3}, R^2 = 0.986 2 \quad (3)$$

改性沥青混凝土

$$N_f = 3.841 5 \left(\frac{1}{\sigma} \right)^{0.260 4}, R^2 = 0.991 2 \quad (4)$$

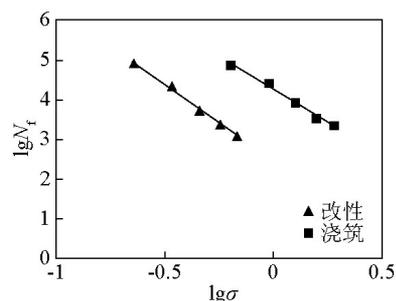


图 2 应力水平与疲劳寿命双对数图

Fig.2 Double logarithmic chart between stress levels and fatigue life

由此可以看出, 浇筑式沥青混合料的劈裂疲劳性能要优于改性沥青混合料。两者相同应力水平下的疲劳寿命相差并不是太大, 而且回归得到的疲劳方程的斜率相近, 即两种混合料疲劳寿命随应力水平的变化规律相近。由此可以认为在疲劳性能方面, 两种混合料适合组成复合铺装结构。

4.2 带钢板复合梁疲劳试验

钢箱梁桥面上, 桥面铺装的最大应力和拉应变均出现在 U 形加劲肋的顶部^[6], 因此根据钢箱梁

具体参数设计出带钢板的复合件疲劳试验来评价钢桥面铺装组合结构整体的疲劳性能,试件由钢板(钢板厚 14 mm)+4 cm 浇筑式沥青混凝土+3.5 cm 改性沥青混合料组成。为了进一步验证生产配合比,在混凝土南引桥段开展了试验段试铺工作,并借此机会预先埋设现场成型带钢板复合梁试件,试验段分南北两段设计了不同沥青含量的混合料,北

侧试件为“下面层 8.2 %的浇筑式沥青混凝土+上面层 6.0 %的改性沥青混凝土”,南侧试件为“下面层 8.3 %的浇筑式沥青混凝土+上面层 5.8 %的改性沥青混凝土”。带钢板复合梁疲劳试验结果见表 3。试件劲度模量变化规律相同,取其中一个具有代表性的试件南侧 1#,其劲度模量随加载次数变化如图 3 所示。

表 3 复合梁疲劳试验结果
Table 3 The result of composite beam fatigue test

试件编号	荷载/kN	作用次数/万次	试件尺寸/mm		破坏劲度模量/MPa	破坏类型
			宽	高		
北侧 2#	6	49.3	102	87	742.55	跨中开裂
北侧 3#	7	26.4	106	91	588.58	跨中开裂
北侧 4#	8	10.4	103	90	692.47	跨中开裂
南侧 1#	6	46.0	104	81	1 189.19	跨中开裂
南侧 7#	7	17.2	103	88	678.89	跨中开裂
南侧 4#	8	7.3	102	86	1 041.03	跨中开裂

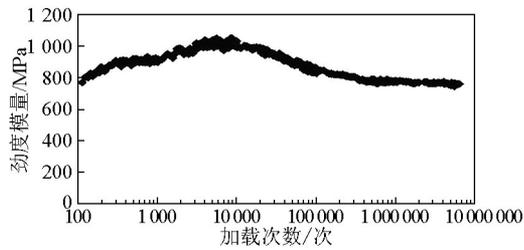


图 3 南侧 1#试件劲度模量变化图
Fig.3 The trend graph of stiffness modulus of south 1#

采用式(1)对带钢板复合梁疲劳试验数据回归得到疲劳方程,见式(5)和(6)。

南侧试件疲劳方程

$$N_f = 10e^{10.642} \left(\frac{1}{F}\right)^{6.3982}, R^2 = 1 \quad (5)$$

北侧试件疲劳方程

$$N_f = 10e^{9.9031} \left(\frac{1}{F}\right)^{5.3745}, R^2 = 0.9762 \quad (6)$$

式(5)和(6)中, F 为施加的实际荷载,复合梁疲劳方程使用的变量为施加的真实荷载,因为真实荷载与所产生的实际应力成一定的比例关系,所以其回归方程系数不会发生变化。复合梁试件由于附加了钢板,其破坏荷载比普通沥青混合料要大很多,在文中所选荷载条件下其疲劳寿命较长。图 4 为疲劳寿命相对于施加荷载的双对数图。

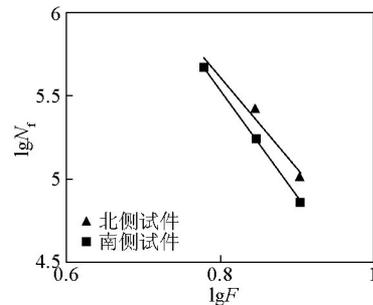


图 4 疲劳寿命相对于施加荷载的双对数图
Fig.4 Double logarithmic chart between load and fatigue life

南侧试件裂缝产生过程明显,裂缝从铺装面层发展到与钢板的粘结处。北侧试件的裂缝都是从铺装中间层产生,最终发展为整条裂缝。裂缝的发展情况和沥青含量有着很大的关系,南侧试件上面层改性沥青混合料的沥青含量为 5.8 %,比北侧的 6.0 %低 0.2 %,高弹改性沥青具有优良的延展性,其用量的增加会对混合料的疲劳特性产生较大的影响,因此南侧试件从上面层外表面产生裂缝继而向内发展。相对于浇筑式沥青混凝土本身较高的沥青含量来说,南侧比北侧只高 0.1 %的绝对值,相对值只高出 1.2 %,因此沥青含量为 8.2 %,这和 8.3 %的浇筑式沥青混凝土疲劳性能已经相差不大。试件的模量变化情况主要有 3 个阶段。第一阶段,复

合梁试件中的混合料硬化模量变大,曲线处于上升阶段;第二阶段,混合料受荷载反复作用强度衰减,开始产生微小裂缝并逐渐扩展增大,曲线下降,而且下降速度呈减缓的形势;第三阶段,复合梁试件裂缝完全形成,其抗弯强度已经主要靠钢板提供,试件模量渐渐趋于平稳。

5 结语

试验结果验证了桥面铺装设计的合理性,铺装上下面层疲劳性能相近,较适合组成复合结构。对于浇筑式沥青混合料来说,8.2%和8.3%的沥青含量对其疲劳性能影响不大,但对上面层改性沥青混合料,沥青含量的提高对其疲劳性能的提高作用很明显。参照国内外文献,选择式(1)对应力控制方式的疲劳试验数据进行回归分析得到疲劳方程,其线性疲劳方程的相关系数都在0.97以上,说明方程

拟合程度已经很高,能对今后桥面铺装使用提供一定的参考。另外,由带钢板复合梁疲劳试验时劲度模量的变化情况可以发现,在桥面铺装使用前期,U形加劲肋上方铺装层的抗弯拉能力是随行车荷载作用而提高的。

参考文献

- [1] 多田宏行. 桥面铺装的设计与施工[M]. 日本:鹿岛出版社, 1993.
- [2] 李洪涛. 大跨径悬索桥新型钢桥面铺装结构研究[D]. 南京:东南大学, 2006.
- [3] 中华人民共和国交通运输部. JTG E20—2011公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [4] 刘峰, 李宇峙, 黄云涌. 沥青混合料疲劳试验中两种控制模式的选择分析[J]. 中外公路, 2005(4):25-28.
- [5] 张登良. 沥青路面工程手册[M]. 北京:人民交通出版社, 2004.
- [6] 钱振东, 黄卫, 骆俊伟, 等. 正交异性钢桥面铺装层的力学特性分析[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(3):36-39.

Study on fatigue performance of steel deck pavement for the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge

Zhan Yu, Li Guofen, Wang Hongchang

(College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

[Abstract] Based on the steel deck pavement of the Fourth Nanjing Yangtze River Bridge, this paper carried out fatigue performance tests of the pavement at 20 °C. In order to make the results reflecting the actual situation of pavement more realistically, we used main bridge pavement's mixes for molding specimens; molding and rolling composite beam with steel was at the construction site. The splitting fatigue tests and five stress levels of 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 were used to study the fatigue property of each layer; in addition, the fatigue tests of composite beams with steel plates and three load levels of 6 kN, 7 kN, 8 kN were chosen to study the fatigue property of the composite structure. Finally, the fatigue equation by regression analysis was got.

[Key words] highway engineering; steel deck pavement; fatigue property; splitting fatigue; fatigue equation