

文章编号:1671-8879(2006)03-0026-04

水泥混凝土路面加铺层的疲劳性能

张 擎¹, 蔡友清², 冯 勇³

(1. 长安大学 特殊地区公路工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710064;

2. 广西交通科学研究所, 广西 南宁 530001; 3. 陕西省机械施工公司, 陕西 西安 710038)

摘 要:水泥混凝土路面加铺层受到车辆荷载和温度的反复作用,结构设计时需考虑其疲劳性能。采用老混凝土表面凿毛并涂刷粘结剂的方法增强界面粘结,进行新老混凝土复合结构的疲劳试验,分析了影响加铺层疲劳性能的主要因素。结果表明:复合试件整体强度越高,上层钢纤维混凝土加铺层厚度越大,其疲劳寿命越长。最后,运用双参数 Weibull 分布,回归出不同失效概率下新老混凝土粘结复合结构的疲劳方程,从而为加铺层结构设计提供参数。

关键词:道路工程; 水泥混凝土; 路面; 加铺层; 疲劳性能; Weibull 分布

中图分类号:U416.216

文献标识码:A

Fatigue performance of overlay on concrete pavement

ZHANG Qing¹, CAI You-qing², FENG Yong³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Guangxi Research Institute of Communications, Nanning 530001, Guangxi, China; 3. Shaanxi Mechanization Construction Company, Xi'an 710038, Shaanxi, China)

Abstract: Cement concrete pavement with overlay withstands the repeated actions of traffic and temperature, so the fatigue property must be considered in structure design. After roughening the surface of old cement concrete pavement and smearing the binding agent to strengthen the bond between the interfaces of old pavement and overlay, the fatigue tests of compound structure of new and old concrete are carried out to analyze the main factors that influencing the fatigue performance of overlay. The results show that the fatigue life becomes longer with the increase of whole strength of compound structure and the increase of overlay depth of steel fiber concrete. The fatigue formulas of different invalidation probabilities of compound structure are regressed with Weibull distribution of two parameters, which can provide the reference parameters for overlay structure design. 5 tabs, 2 figs, 7 refs.

Key words: road engineering; cement concrete; pavement; overlay; fatigue performance; Weibull distribution

0 引 言

水泥混凝土路面强度高、模量大、耐久性强,在

公路建设中得到广泛应用。但是,水泥混凝土抗折强度低、韧性小,对基层变形敏感,在使用中经常产生裂缝、错台等病害。随着中国水泥路面通车里程

收稿日期:2005-05-25

基金项目:国家西部交通建设科技项目(200131878877)

作者简介:张 擎(1971-),男,河南长垣人,副教授,博士研究生。

的快速增长,水泥路面养护维修任务也越来越重。水泥混凝土加铺层能够增强路面结构强度,改善路面使用功能,因此得到越来越广泛的应用。然而,水泥路面加铺层在使用过程中也会出现一些新的问题,如新老混凝土层间产生脱皮、起层,进而引发加铺层修补路面的破坏,并且上层加铺路面板的厚度越薄,破坏情况越严重。其主要原因在于加铺层中上下层新老混凝土界面粘结强度不足,在车辆荷载疲劳应力和路面板温度疲劳应力共同作用下,新老混凝土粘结界面发生剪切破坏。因此,研究加铺层中新老混凝土粘结复合结构的疲劳性能非常重要。

中国已经开展了有关混凝土加铺层粘结复合结构疲劳性能的研究,文献[1]研究了钢纤维混凝土与普通混凝土复合结构的疲劳方程,但研究中所用的混凝土均为新制混凝土。中国其他学者开展类似研究时大多也是采用两种新制的混凝土,因而加铺层中两种混凝土的界面粘结状况较好,界面粘结状况对疲劳性能影响不大^[2-6]。然而,水泥路面加铺层修补是在老混凝土路面上加铺新制混凝土,新老混凝土之间存在着收缩应变差,极易引发剪切破坏,因此加铺层中新老混凝土界面粘结状况对加铺层修补的使用寿命影响很大。为此,本文针对老混凝土路面上加铺层新制混凝土的结构,研究了水泥路面加铺层的疲劳性能。

1 疲劳试验

试验目的是研究水泥路面加铺层结构的疲劳性能,评价加铺层中的新老混凝土界面处理方法,推荐界面处理方案,提出新老混凝土界面粘结结构的疲劳方程,为水泥路面加铺层修补设计提供参考。

(1)进行新老混凝土粘结结构疲劳试验,对界面粘结处理方法进行分析评价,确定加铺层修补设计中新老混凝土界面处理方法。

(2)研究加铺层的不同分层厚度对其疲劳寿命的影响。

(3)推导加铺层复合结构疲劳方程。

试验时首先进行新老混凝土粘结试验,确定新老混凝土界面处理方法。经过大量前期界面粘结试验,在界面处理时决定采用老混凝土表面凿毛并涂刷界面粘结剂的形式,经实测,新老混凝土界面粘结强度可达到 3.0 MPa 以上。

疲劳试验采用抗折疲劳试验,试件尺寸为 15 cm×15 cm×55 cm。试件下层采用老混凝土,上层采用新拌钢纤维混凝土。试件分两大类:Ⅰ型和Ⅱ

型。Ⅰ型试件中的下层混凝土设计抗折强度为 5.0 MPa,Ⅱ型试件中的下层混凝土设计抗折强度为 4.5 MPa。所有试件上层钢纤维混凝土均采用Ⅰ型混凝土,但其厚度分为 6 种,分别为 14、18、23、28、32 和 40 mm。试件制作方法:首先制作特制的试模,浇注下层老混凝土,养护 90 d。将其表面凿毛,涂刷界面粘结剂,再放入特制试模中,最后浇注钢纤维混凝土,养护 28 d 制作出抗折复合疲劳试件。钢纤维为上海产哈瑞克斯牌 Ami04-32-600 型铣削钢纤维,长径比为 35~40,抗拉强度≥700 MPa,体积掺量为 0.75%。疲劳试验共采用了 7 个应力比,分别为 0.6、0.65、0.7、0.75、0.8、0.85 和 0.90,用于分析不同厚度对粘结疲劳性能的影响。疲劳试验制作了 12 组疲劳试件,共计 180 块。其中 36 块用于确定疲劳试件抗折强度。疲劳试验结果见表 1。

表 1 复合试件实测抗折强度 MPa			
上层混凝土 厚度/mm	14	18	23
Ⅰ型复合试件	6.122 296	6.151 435	6.228 256
Ⅱ型复合试件	6.152 980	5.893 157	6.106 402
上层混凝土 厚度/mm	28	32	40
Ⅰ型复合试件	6.656 954	6.376 6	6.015 894
Ⅱ型复合试件	6.612 362	6.165 121	5.813 245

疲劳试验采用美国 MTS 疲劳试验机,加载频率为 10 Hz。疲劳试验结果见表 2。

2 试验结果分析

(1)如图 1,试验结果表明,所有疲劳试件的破坏模式均为疲劳断裂,试验中未出现新老混凝土粘结面剪切破坏现象。进一步观察试件中新老混凝土的粘结界面(图 2),也未发现粘结界面有裂缝或剥离现象。这表明在整个疲劳加载试验中新老混凝土界面粘结状况良好,界面粘结强度较高。由此可知,采用的界面处理方法(老混凝土表面凿毛并涂刷粘结剂)可用于水泥混凝土加铺层的修补。

(2)从表 2 可以看到:当应力比和试件上下层厚度相同时,Ⅰ型试件的疲劳寿命明显高于Ⅱ型试件(排除变异性较大试件的影响);Ⅰ型试件下层老混凝土抗折强度高于Ⅱ型试件的;实测的Ⅰ型试件整体抗折强度高于Ⅱ型试件。由此可知,当新老混凝土界面粘结较好时,复合试件整体抗折强度越高,疲劳寿命越长,试件的疲劳寿命由其整体的抗折强度所决定。

表 2 复合试件疲劳试验结果

试件 编号	抗折强 度/kN	应力 水平	循环 次数/次	试件 编号	抗折强 度/kN	应力 水平	循环 次数/次
1.4-I	50.87	0.65	120 207	1.4-II	51.74	0.75	33
			127 732				1 330
		0.75	243 232			0.80	704
			2 807				942
		0.80	3 421			0.85	568
			1 483				309
1.8-I	37.5	0.80	200×10 ⁴ 未断	1.8-II	37.5	0.60	2 481
			1 655 794				419
		0.85	123 730			0.65	2 705
			11 240				4 246
		0.90	596			0.70	952
			4 816				1 017
2.3-I	47.02	0.75	11 210	2.3-II	46.1	0.75	11 920
			46 516				1 330
		0.80	21 239			0.80	17 337
			23 690				24 264
		0.85	6 360			0.85	551
			293				1 629
2.8-I	50.05	0.65	110 274	2.8-II	47.45	0.75	1 299
			817 015				750 759
		0.75	37 880			0.80	411
			45 670				78 911
		0.80	1 158			0.85	223
			2 189				859
3.2-I	46.08	0.65	200×10 ⁴ 未断	3.2-II	46.54	0.75	28 301
			1 849 941				1 479
		0.75	131 275			0.80	41 054
			86 975				52 908
		0.80	20 876			0.85	503 732
			3 767				87 022
4.0-I	37.5	0.80	1 857 750	4.0-II	43.89	0.75	888 479
			200×10 ⁴ 未断				1 285 410
		0.85	1 658 871			0.80	9 020
			1 518 943				5 050
		0.90	278 765			0.85	4 661
			53 443				5 718

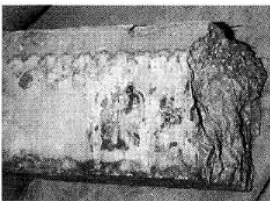


图 1 疲劳断裂试件

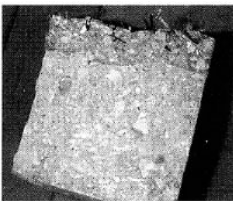


图 2 新老混凝土粘结界面

(3)从表 2 还可看到,由于混凝土试件存在离散性,个别试件的疲劳次数达到 200 万次后仍未破坏,随后又对这些试件进行了抗折强度试验,结果是这些试件的抗折强度远远大于该类型试件抗折强度的平均值,这进一步说明新老混凝土复合疲劳试件的疲劳寿命主要由试件的整体抗折强度所决定。

(4)由试验结果还可得出,试件厚度对其疲劳寿命有影响。上层钢纤维混凝土厚度越大,试件的疲劳寿命相应也提高,其原因主要是试件上层混凝土由于采用了钢纤维混凝土,其抗折强度高于下层普通混凝土。因此,上层钢纤维混凝土厚度越大,试件整体抗折强度就越大,相应的疲劳寿命就越长。

3 复合试件疲劳性能分析

大量混凝土疲劳试验表明,疲劳寿命 N 和等效疲劳寿命 $\bar{N} = N^{1-R}$ 均服从两参数的 Weibull 分布。失效概率 ρ 满足式(1)

$$\rho = F(\bar{N}) = 1 - \exp\left(-\frac{\bar{N}^m}{t_0}\right), \bar{N} \geq 1, m, t_0 > 0 \tag{1}$$

或变形为

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(\bar{N})} = m \ln \bar{N} - \ln t_0 \tag{2}$$

式中: m, t_0 分别为 Weibull 形状参数和尺度参数。

对试验结果进行分析处理,去掉特异值后,按照 Weibull 分布理论进行整理,回归分析后得出, $\ln \bar{N}$ 和 $\ln \ln(1/(1-\rho))$ 存在较好的线形关系,相关系数也较高(表 3)。这说明等效疲劳寿命 \bar{N} 服从两参数的 Weibull 分布检验,失效概率 ρ 满足式(1)。

表 3 各应力水平下回归系数 m 和 $\ln t_0$ 计算结果

应力水平 S	回归系数 m	回归系数 $\ln t_0$	相关系数 r
0.65	0.652 731	8.068 592	0.897 208
0.75	1.476 665	13.976 110	0.941 947
0.80	0.965 311	8.170 019	0.965 672
0.85	2.247 415	12.382 270	0.943 557

将回归系数 m 和 $\ln t_0$ 代入式(2),得各应力水平的不同失效概率 ρ 的等效疲劳寿命 \bar{N} (表 4)。

中国现行设计规范^[7]采用双对数疲劳寿命方程

$$\lg \frac{\sigma_p}{f_{cm} - \sigma_t} = \lg a - b \lg N_t \tag{3}$$

式中: σ_p 为荷载疲劳应力; σ_t 为温度疲劳应力; f_{cm} 为混凝土弯拉强度; a, b 为回归系数,规范中 $a = 1.0, b = 0.051 6$ 。

对表 4 中 \bar{N} 和 S 取对数,进行回归得不同失效

概率下的 a 、 b 和 r 值,如表 5。

表 4 等效疲劳寿命 \bar{N} 与失效概率 ρ 的关系

失效 概率 ρ	应力水平 S			
	0.65	0.75	0.80	0.85
0.05	2 467	1 725	218	66
0.10	7 433	2 809	461	91
0.20	23 467	4 670	1 002	127
0.30	48 141	6 416	1 629	156
0.50	133 225	10 061	3 242	210

表 5 不同失效概率下疲劳方程回归系数 b 和 $\lg a$

失效概率 ρ	b	$\lg a$	r
0.05	0.060 3	0.042 8	0.901
0.10	0.055 6	0.046 0	0.943
0.20	0.049 8	0.043 8	0.963
0.30	0.046 4	0.041 2	0.969
0.50	0.041 9	0.036 7	0.973

由表 5 计算结果可得不同 ρ 下复合试件的疲劳方程。当 ρ 为 50% 时,疲劳方程式为

$$\lg \frac{\sigma_p}{f_{cm} - \sigma_t} = 0.036\,7 - 0.041\,9 \lg N_r$$

($r = 0.973$)

(4)

由试件疲劳方程可以看出,新老混凝土复合试件的疲劳方程与普通混凝土 Weibull 双参数疲劳方程相近,二者具有相同的疲劳性能。

4 结 语

- (1)采用老混凝土表面凿毛并涂刷界面粘结剂的方法处理粘结界面效果较好,新老混凝土界面粘结强度较高,能够满足加铺层修补设计的要求,可推荐作为水泥混凝土路面加铺层修补的施工方法。
- (2)复合试件的疲劳寿命主要由其整体抗折强度决定,整体抗折强度越高,疲劳寿命越长,提高复合试件整体抗折强度可作为增加加铺层路面使用寿命的一种途径。
- (3)复合试件上层钢纤维混凝土加铺厚度越大,试件的疲劳寿命相应也越长。
- (4)依据试验结果,推导出不同失效概率下新老混凝土粘结复合结构疲劳方程,疲劳方程各系数见表 5。疲劳方程可为加铺层修补设计提供参数。

参考文献:

References:

[1] 赵国藩,彭少民,黄承逵. 钢纤维混凝土结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2000.
ZHAO Guo-fan, PENG Shao-min, HUANG Cheng-kui. Steel-fibra cement concrete construction[M]. Bei-jing: China Architecture and Building Press, 2000.

[2] 张 擎,王选仓,魏 进. 水泥混凝土路面薄层修补的收缩性能研究[J]. 公路交通科技, 2004, 21(10): 41-43.
ZHANG Qing, WANG Xuan-cang, WEI Jin. Study of shrinkage performance of lamina in repairing concrete pavement[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2004, 21(10): 41-43.

[3] 马 磊,胡长顺. 超薄水泥混凝土路面结构设计方法[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(4): 1-5.
MA Biao, HU Chang-shun. Structure design method for ultra-thin whitetopping pavement[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(4): 1-5.

[4] 郑木莲,王秉纲,胡长顺. 多孔混凝土疲劳性能的研究[J]. 中国公路学报, 2004, 17(1): 7-11.
ZHENG Mu-lian, WANG Bing-gang, HU Chang-shun. Study of fatigue property of porous concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 7-11.

[5] 陈先华,黄 卫,王健伟,等. 浇注式沥青混凝土铺装破坏原因[J]. 交通运输工程学报, 2004, 4(4): 5-9.
CHEN Xian-hua, HUANG Wei, WANG Jian-wei, et al. Damage causes of mastic asphalt pavement on or-thotropic steel deck plate[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2004, 4(4): 5-9.

[6] 武建民,伍石生. 用三维有限元方法评价带接缝的旧水泥混凝土路面罩面[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22(1): 10-13.
WU Jian-min, WU Shi-sheng. Evaluating of overlay on cement concrete slab with joints by 3D FEM[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edi-tion, 2002, 22(1): 10-13.

[7] JTG D40-2002. 公路水泥混凝土路面设计规范[S].
JTG D40-2002. Specification of cement pevement de-sign of highway [S].