

文章编号:1671-8879(2014)04-0001-06

垂直振动成型水泥稳定碎石疲劳特性及应用

蒋应军¹, 曹帆¹, 陈浙江², 方剑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. 金华市公路管理局, 浙江 金华 321000; 3. 金华市交通工程质量监督站, 浙江 金华 321000)

摘要:为深入研究水泥稳定碎石疲劳特性,对比了垂直振动法和静压法成型的试件与路面芯样的相关性,采用更符合水泥稳定碎石实际力学性能的垂直振动法成型圆柱体试件,研究其劈裂疲劳特性,分析材料组成对疲劳特性的影响,应用 Weibull 分布建立水泥稳定碎石疲劳方程,构建抗拉强度结构系数,并与规范推荐系数进行了对比。研究表明:水泥剂量较低时骨架密实级配水泥稳定碎石疲劳性能优于悬浮密实级配,水泥剂量增大,级配对疲劳性能的影响变小;水泥剂量对疲劳性能的影响较显著,一定范围内水泥剂量越高抗疲劳性能越好;水泥稳定碎石在 50% 失效概率下疲劳方程回归系数 a 的取值范围为 1.103 5~1.134 5, b 的取值范围为 0.041 3~0.045 4;构建的抗拉强度结构系数能够较好地指导路面设计。

关键词:道路工程;水泥稳定碎石;疲劳特性;垂直振动试验方法;劈裂疲劳试验;抗拉强度结构系数
中图分类号:U414 **文献标志码:**A

Fatigue performance and application of cement stabilized macadam shaped with vertical vibration test method

JIANG Ying-jun¹, CAO Fan¹, CHEN Zhe-jiang², FANG Jian³

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of the Ministry of the Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Highway Administration Bureau of Jinhua, Jinhua 321000, Zhejiang, China; 3. Quality Supervision Station of Jinhua Communications Department, Jinhua 321000, Zhejiang, China)

Abstract: In order to study the fatigue performance of cement stabilized macadam thoroughly, the correlation of pavement samples and specimens shaped with vertical vibration test method and static pressure method was studied. Cylinder specimens shaped with vertical vibrating test method which is more in line with the actual mechanical properties of cement stabilized macadam were used to study the splitting fatigue performance. The influence of materials composition on fatigue performance was analyzed. The fatigue equations were established by the Weibull distribution and the tensile strength structure coefficient was studied. The comparison of the tensile strength structure coefficient given in this article and the coefficient given in specification was carried out. The results show that when the cement dosage is low, the fatigue performance of skeleton dense gradation cement stabilized macadam is better than that of suspension dense gradation. With the cement dosage increasing, the effect of gradation on fatigue performance becomes smaller. Cement

收稿日期:2013-09-10

基金项目:新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0749);交通行业联合科技攻关项目(2008 353 313 010, 2008 353 333 200)

作者简介:蒋应军(1975-),男,浙江兰溪人,教授,工学博士,E-mail:jyj@chd.edu.cn。

dosage has much effect on fatigue performance. In certain range, fatigue performance gets better with the cement dosage increasing. Under 50% failure probability, the range of regression coefficient a of fatigue equation is 1.103 5-1.134 5 and the range of regression coefficient b is 0.041 3-0.045 4. The tensile strength structure coefficient built by this article can guide the pavement design better. 8 tabs, 2 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; cement stabilized macadam; fatigue performance; vertical vibration test method; splitting fatigue test; tensile strength structure coefficient

0 引言

水泥稳定碎石在中国被广泛应用于高等级公路路面基层,然而工程实践表明,这类材料容易在荷载和环境等因素的反复作用下产生疲劳开裂^[1]。中国公路部门及科研院校在 20 世纪 90 年代采用静压法试件对半刚性基层材料进行了疲劳试验研究,成果纳入《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2006)(简称《规范》)^[2];王艳等采用静压法成型圆柱体试件,并通过劈裂疲劳试验研究了水泥稳定碎石混合料的疲劳性能^[3];沙爱民等采用振动法成型小梁试件,通过弯拉疲劳试验研究了水泥稳定碎石的疲劳特性^[4]。Judycki 利用圆柱体试件研究预估了水泥稳定材料的疲劳性能^[5];Geoff 等采用梁型试件弯曲等方法,系统研究了水泥稳定材料的疲劳特性与路用性能^[6-7]。上述研究中所采用试件有 2 类:一类是以重型击实法和静压法成型的试件;另一类是振动法成型试件。已有研究表明,前者成型试件与现场基层实际结构不符,结果不具有代表性和真实性,而后者成型试件能否代表现场基层实际结构也未作深入研究^[8]。为此,本文采用与路面实际力学性能更吻合的垂直振动法成型试件,研究水泥稳定碎石劈裂疲劳特性,建立了疲劳方程和抗拉强度结构系数,研究成果可供路面设计时参考。

1 原材料及试验方案

1.1 原材料及配合比

水泥:陕西尧柏牌 P. 032. 5 缓凝水泥,技术指标略。

集料:柞水县下梁镇赤水沟石料厂石灰岩,技术指标略。

矿料级配:分别采用悬浮密实级配^[2]和骨架密实级配^[9],见表 1。

水泥剂量:分别采用 3. 0%和 4. 0%。

本文 4 种类型水泥稳定碎石分别为:3%水泥剂量的骨架密实型水泥稳定碎石(GM 3%)、4%水泥

剂量的骨架密实型水泥稳定碎石(GM 4%)、3%水泥剂量的悬浮密实型水泥稳定碎石(XM 3%)和 4%水泥剂量的悬浮密实型水泥稳定碎石(XM 4%)。

表 1 水泥稳定碎石级配
Tab. 1 Gradation of cement stabilized macadam

级配类型	通过下列筛孔(mm)的质量分数/%						
	31. 5	19. 0	9. 5	4. 75	2. 36	0. 6	0. 075
悬浮密实	100	93. 5	67. 0	39. 0	26. 0	15. 0	3. 5
骨架密实	100	74. 0	47. 0	33. 0	23. 0	14. 0	3. 0

1.2 试件制备方法

为了提高试件与实际路面工程的相关性,采用垂直振动成型方法成型试件^[10-12]:振动压实仪要求垂直方向有激振力、水平方向激振力为 0,其基本参数为激振力 7. 6 kN、名义振幅 1. 2 mm、工作重力 3 kN、击振频率 30 Hz,振动击实时间 100 s,振动成型试件时间 75 s。

为了验证振动成型试件具有较强代表性,下页表 2 列出了不同龄期下水泥稳定碎石现场芯样劈裂强度和振动法(VTM)、静压法(SPM)成型试件劈裂强度的对比情况^[13]。表 2 中 R_{ix} 、 R_{iv} 、 R_{is} 分别表示芯样、振动成型试件、静压成型试件劈裂强度,现场芯样取自西商高速公路(西安—商洛)4 个不同标段。由表 2 可得,振动法成型试件强度与路面芯样强度之比平均为 0. 93;而静压法成型试件强度与路面芯样强度之比平均为 0. 49。因此,振动法成型试件更能真实反映路面基层碾压效果,采用振动法成型试件研究水泥稳定碎石性更具有代表性和真实性。

1.3 疲劳试验方法

本文采用圆柱体试件劈裂疲劳试验方法。相比梁式试件弯曲疲劳试验方法,劈裂疲劳试验力学模型更接近半刚性基层在行车荷载作用下的受力状态,更易与路面圆柱体芯样形成对比,且操作方便、结果稳定。

试验采用美国 MTS485. 10 型材料试验机。为模拟路面在行车荷载作用下的实际波形,采用正弦波荷

载以应力控制模式加载。当应力水平 $S<0.85$ 时,施加荷载的频率为 15 Hz,当 $S\geq 0.85$ 时为 1 Hz,加载时间间隔为 0。循环特征值(高低应力比) R 取 0.1,选取的应力水平 S 分别为 0.65、0.70、0.75、0.80、0.85。

表 2 不同方式成型的试件与芯样劈裂强度对比

Tab.2 Comparison of splitting strengths of specimens shaped with different methods

道路 标段	龄期/d	芯样强度 R_{ix}/MPa	VTM		SPM	
			强度 R_{iv}/MPa	R_{iv}/R_{ix}	强度 R_{is}/MPa	R_{is}/R_{ix}
1	7	0.32	0.30	0.938	0.17	0.531
	28	0.45	0.42	0.933	0.24	0.542
	60	0.53	0.50	0.943	0.25	0.475
2	7	0.72	0.69	0.958	0.35	0.487
	28	1.29	1.18	0.915	0.57	0.442
	60	1.64	1.52	0.927	0.85	0.526
3	7	0.65	0.62	0.954	0.25	0.494
	28	0.98	0.94	0.959	0.42	0.436
	60	1.17	1.09	0.932	0.59	0.503
4	7	0.75	0.67	0.893	0.36	0.486
	28	1.09	1.05	0.963	0.52	0.487
	60	1.32	1.19	0.902	0.69	0.522

2 疲劳试验结果及分析

2.1 疲劳试验结果

2.1.1 劈裂强度

试件标准养生至不同龄期后测试得到 95% 保证率的水泥稳定碎石劈裂强度增长曲线见图 1^[14]。如图 1 所示,水泥稳定碎石早期(0~28 d)劈裂强度增长较快,近似线性增长;当龄期超过 28 d 后,劈裂强度增长逐渐趋缓;180 d 之后,劈裂强度几乎不再增长。因此,试验选取 180 d 龄期的试件进行疲劳试验。180 d 劈裂强度见表 3。

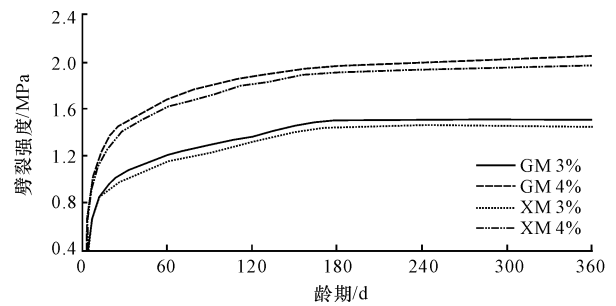


图 1 劈裂强度增长曲线

Fig.1 Increasing curve of splitting strength

2.1.2 疲劳试验结果

表 4 列出 4 种类型水泥稳定碎石的疲劳试验结果。表 4 中“*”号表示试件在循环荷载作用至一定

次数后未发生破坏。基于统计学原理,对疲劳寿命 N 较短的高应力水平,数据分散性较小,疲劳试验试件个数也相对较少;随着应力水平的降低数据分散性增大,试件个数相对较多^[15]。

表 3 180 d 劈裂强度

Tab.3 Splitting strength of 180 d

混合料类型	XM 3%	XM 4%	GM 3%	GM 4%
180 d 劈裂强度/MPa	1.45	1.50	1.91	1.96

表 4 劈裂疲劳试验结果

Tab.4 Results of splitting fatigue test

应力水平 S	4 种混合料的疲劳寿命 N /次			
	XM 3%	XM 4%	GM 3%	GM 4%
0.85	327	259	529	444
	503	364	656	912
	1 111	785	833	948
			1100	
0.80	451	2 447	833	1 093
	1 938	2 781	1 314	1 786
	2 315	3 046	1 702	3 041
	2 962	4 140	3 500	
0.75			5 787	
	1 468	2 616	1 778	2 233
	4 646	4 340	5 752	4 030
	5 862	8 133	5 880	8 950
	14 676	11 087	13 298	9 610
	25 634	12 677	15 757	13 557
	30 166	13 689	35 679	30 412
	42 297	25 676	125 171	31 159
	300 002*	32 188		66 482
			5 787	
0.70	4 951	26 335	14 541	30 063
	8 305	37 738	29 811	31 704
	21 541	83 147	34 997	48 882
	38 986	88 142	56 965	139 142
	49 510	125 436	89 234	186 788
	131 858		259 100	215 667
0.65	106 483	133 110	143 564	185 667
	174 155	323 639	203 567	340 724
	263 902	335 935	330 076	534 953
	339 061	493 537	387 630	
			492 483	

2.1.3 建立疲劳方程

从表 4 可以看出,即使同一类型、同一应力水平的水泥稳定碎石试件疲劳寿命也会相差数倍甚至数 10 倍,试验结果存在很大的分散性。为了探究材料疲劳寿命的规律,本文应用统计分析和可靠性理论对试验数据进行整理分析。

假定水泥稳定碎石材料等效疲劳寿命 $\bar{N} = N^{1-R}$ 服从两参数 Weibull 分布,则失效概率 ρ 应满足下式

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

$$\ln\left[\ln\left(\frac{1}{1-\rho}\right)\right] = m\ln(\bar{N}) - \ln(t_0) \quad (2)$$

式中: m, t_0 分别为形状参数和尺度参数。

根据式(2)对表 4 中数据整理,结果见表 5。

表 5 试验数据 Weibull 分布检验结果

Tab. 5 Results of test data examined by Weibull distribution				
应力水平 S	级配类型	m	$\ln(t_0)$	R
0.85	XM 3.0%	1.371 9	8.258 1	0.971 95
	XM 4.0%	1.478 2	8.464 1	0.958 92
	GM 3.0%	2.946 4	18.003 7	0.988 63
	GM 4.0%	1.879 9	11.575 9	0.917 12
0.80	XM 3.0%	1.027 3	7.246 6	0.927 57
	XM 4.0%	3.542 7	26.057 7	0.927 89
	GM 3.0%	1.236 1	8.951 5	0.973 49
	GM 4.0%	1.703 9	11.932 2	0.995 82
0.75	XM 3.0%	0.854 9	7.635 2	0.987 39
	XM 4.0%	1.264 8	11.022 9	0.989 16
	GM 3.0%	0.733 0	6.716 0	0.963 73
	GM 4.0%	0.940 7	8.481 6	0.984 73
0.70	XM 3.0%	0.833 2	8.053 0	0.985 29
	XM 4.0%	1.476 6	15.122 8	0.973 44
	GM 3.0%	0.983 7	10.084 1	0.960 55
	GM 4.0%	1.060 8	11.247 0	0.937 02
0.65	XM 3.0%	1.845 4	20.733 7	0.997 29
	XM 4.0%	1.612 1	18.698 6	0.952 71
	GM 3.0%	1.953 0	22.528 7	0.990 88
	GM 4.0%	1.648 8	19.254 7	0.999 86

表 5 的 Weibull 分布检验结果表明, \bar{N} 服从两参数 Weibull 分布。将 Weibull 分布检验所得的回归系数代入式(2),得到不同失效概率下各应力水平的等效疲劳寿命,见表 6。限于篇幅,表 6 仅列出了 2 种失效概率下的等效疲劳寿命。此时,可应用 Weibull 分布建立水泥稳定碎石疲劳方程。

采用式(3)形式的疲劳方程对表 6 中数据进行回归分析,结果见表 7, r 为相关系数。

$$\lg(S) = \lg(a) - b' \lg(\bar{N}) = \lg(a) - b \lg(N) \quad (3)$$

式中: a, b' 为待定回归系数; $b = b'(1 - R)$; R 为循环特征值。

疲劳方程回归系数 a 表示方程曲线在纵坐标轴上的截距, b 表示方程曲线斜率。 a 值越大,表明高

表 6 各应力水平下等效疲劳寿命

Tab. 6 Equivalent fatigue lives of different stress levels

失效概率/%	混合料类型	不同应力水平 S 对应的等效疲劳寿命 \bar{N} /次				
		0.85	0.80	0.75	0.70	0.65
50	XM 3%	314.9	810.0	4 928.4	10 148.2	62 107.5
	XM 4%	239.3	1 410.6	4 562.5	21 881.5	86 791.0
	GM 3%	397.9	1 038.0	5 782.8	19 514.3	84 771.8
	GM 4%	388.7	886.9	5 580.2	28 477.6	94 447.2
5	XM 3%	47.2	64.2	234.4	446.0	15 149.6
	XM 4%	41.1	676.4	582.3	3 752.2	17 261.2
	GM 3%	164.4	126.3	165.7	1 383.0	22 349.4
	GM 4%	97.3	192.4	350.4	2 446.5	19 470.3

应力水平作用下材料抗疲劳性能越好; b 值越小,材料抗疲劳性能越好。

2.2 材料组成对疲劳性能的影响

2.2.1 级配对疲劳性能的影响

表 7 中数据表明,级配类型对疲劳性能影响不大。如失效概率 50%,水泥剂量 4% 的骨架密实型混合料系数 b 值与悬浮密实型混合料相同, a 值相差不大;水泥剂量 3% 的骨架密实型混合料系数 b 略小于悬浮密实型混合料,而 a 值刚好相反。表明低水泥剂量下骨架密实型水泥稳定碎石抗疲劳性能略优于悬浮密实型。

表 7 疲劳方程回归系数

Tab. 7 Regression coefficients of fatigue equation

混合料类型	失效概率/%	a	b	r
XM 3%	50	1.131 5	0.045 4	0.992 9
	5	0.959 9	0.038 7	0.936 4
XM 4%	50	1.103 5	0.041 3	0.996 8
	5	1.019 7	0.040 6	0.961 8
XM 3%	50	1.134 5	0.044 0	0.997 7
	5	0.984 7	0.038 6	0.892 7
XM 4%	50	1.108 6	0.041 3	0.994 5
	5	1.027 7	0.043 1	0.973 2

2.2.2 水泥剂量对疲劳性能的影响

由表 7 可知,水泥剂量显著影响水泥稳定碎石的疲劳性能。如失效概率为 50%,不论是骨架密实型还是悬浮密实型水泥稳定碎石,水泥剂量越大, b 值越小,这说明随着水泥剂量的提高水泥稳定碎石抗疲劳性能显著增强。

上述分析表明,较低水泥剂量的情况下,骨架密实级配水泥稳定碎石疲劳性能较悬浮密实级配略优,而随着水泥剂量增加,级配对疲劳性能的影响逐渐减小;水泥剂量对疲劳性能的影响较为显著,水泥剂量的增加,水泥稳定碎石内部粘结能力增强,抗疲劳性能好。而在实际应用中,还应考虑干缩和温缩

应力对水泥稳定碎石性能的影响,从而综合确定水泥剂量。

2.3 疲劳方程对比

为了便于与本文研究成果比较,图 2 给出了贫混凝土、普通水泥混凝土和水泥稳定碎石等疲劳方程曲线^[16-17]。

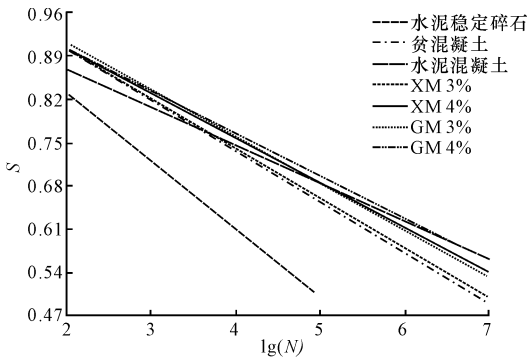


图 2 不同疲劳方程对比

Fig. 2 Comparison of different fatigue equations

由图 2 中几种材料疲劳方程曲线对比发现,本文研究所得的水泥稳定碎石疲劳方程曲线介于水泥混凝土与贫混凝土疲劳方程曲线之间,表明水泥稳定碎石疲劳性能并不亚于贫混凝土材料。另外,《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JIG E51—2009)(以下简称《规程》)中疲劳方程曲线位于其他材料疲劳方程曲线下方,且斜率最大^[13]。由于该疲劳方程是建立在重型击实法和静压法成型的试件基础上的,试件难以反映基层真实组成结构,因此该疲劳方程并不能反映材料的真实疲劳性能,用于路面结构设计显然有盲目性。这进一步证明了振动成型法相对于重型击实法和静压法具有更高的可靠性。

3 抗拉强度结构系数及对比

3.1 抗拉强度结构系数

基层疲劳破坏是水泥稳定碎石基层沥青路面结构设计时重点考虑因素。为了考虑基层疲劳破坏,水泥稳定碎石基层层底拉应力验算时,引入抗拉强度结构系数 K_s 。 K_s 可表示为

$$K_s = \frac{1}{a} N^b \tag{4}$$

确定抗拉强度结构系数时,还应考虑间歇时间、裂缝传播速度、交通量折减和横向分布等各种室内外试验条件差异。本文在利用文献[15]成果的基础上,提出水泥稳定碎石材料抗拉强度结构系数 K_s 的修正方法,如下式所示

$$K_s = \frac{1}{a} (A_1 A_2 A_3 A_4 N_e)^b \tag{5}$$

式中: N_e 为累计当量轴次; A_1 、 A_2 、 A_3 、 A_4 分别为考虑间歇时间、交通量横向分布、实际受力状况、不利季节影响的修正系数,其取值分别为 0.2、0.5、2/3、60/365^[16]。

综合考虑本文得出的疲劳方程及其他影响因素,得出抗拉强度结构系数为

$$K_s = 0.70 N_e^{0.043} / A_c \tag{6}$$

式中: A_c 为公路等级系数,高速、一级公路取 1.0,二级公路取 1.1,三级和四级公路取 1.2。

3.2 与《规程》中抗拉强度结构系数对比

《规程》中提出的无机结合料稳定集料的抗拉强度结构系数为 $K_s = 0.35 N_e^{0.11} / A_c$ 。

不同交通等级下 2 种方法水泥稳定碎石基层的抗拉强度结构系数见表 8。 $K_{s(GF)}$ 为《规程》推荐的抗拉强度结构系数, $K_{s(VTM)}$ 为垂直振动法试件的抗拉强度结构系数, r_k 为两者的比值。

表 8 不同轴次下 2 种抗拉强度结构系数比值

Tab. 8 Ratio two tensile strength structure coefficients with different axle load action times

$N_e / (\text{次} \cdot \text{车道}^{-1})$	$K_{s(VTM)}$	$K_{s(GF)}$	r_k
3.0×10^6	1.56	2.12	1.36
1.2×10^7	1.66	2.47	1.49
2.5×10^7	1.71	2.68	1.57

从表 8 可知,在不同累计交通量作用下,《规程》推荐的抗拉强度结构系数公式计算值比本文抗拉强度结构系数计算值大,且 r_k 随交通量的增加而增加。这表明,利用《规程》中基于重型击实法和静压法得到抗拉强度结构系数指导路面结构设计过于保守,并易导致水泥稳定碎石设计强度、水泥剂量偏高,最终产生较多的收缩裂缝。而本文构建的抗拉强度结构系数在指导路面结构设计时,能够在充分满足水泥稳定碎石强度的基础上,适当降低水泥剂量,从而有效控制了收缩裂缝的产生。

4 结 语

(1) 水泥稳定碎石劈裂寿命服从双参数 Weibull 分布,建立的不同配合比水泥稳定碎石疲劳方程能够较为准确地反映水泥稳定碎石劈裂寿命。

(2) 级配类型对疲劳性能影响不大,低水泥剂量下骨架密实型水泥稳定碎石抗疲劳性能略优于悬浮密实型;水泥剂量对疲劳性能影响较为显著,水泥剂量高抗疲劳性能好。

(3) 与基于重型击实法和静压法建立的抗拉强度结构系数相比,本文基于垂直振动成型法建立的水泥稳定碎石抗拉强度结构系数相对较小,有利于

缓解水泥稳定碎石基层收缩裂缝问题。

(4)在下一步研究过程中,尚需深入研究岩性对水泥稳定碎石疲劳特性的影响。

参考文献:

References:

- [1] 郭朝阳,何兆益. 水泥稳定碎石温缩性能试验研究及工程应用[J]. 筑路机械与施工机械化,2007,24(10):22-24.
GUO Zhao-yang, HE Zhao-yi. Experiment research on temperature contraction performance of cement stabilized macadam and application[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(10): 22-24. (in Chinese)
- [2] JTG D50—2006,公路沥青路面设计规范[S].
JTG D50—2006, Specifications for design of highway asphalt pavement[S]. (in Chinese)
- [3] 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. (in Chinese)
- [4] 沙爱民,贾 侃,李小刚. 半刚性基层材料的疲劳特性[J]. 交通运输工程学报,2009,9(3):29-33.
SHA Ai-min, JIA Kan, LI Xiao-gang. Fatigue performances of semi-rigid base course materials [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(3): 29-33. (in Chinese)
- [5] Judycki J. Comparison of fatigue criteria for flexible and semi-rigid pavements[C]//MTRB. 8th International Conference on Asphalt Pavements. Lino Lakes; International Society for Asphalt Pavements, 1997: 38-57.
- [6] Geoff A. Priority issues for performance and durability [C]//International Society for Concrete Pavements. 8th International Conference on Concrete Pavements. Colorado; International Society for Concrete Pavement, 2005: 181-207.
- [7] Lim S, Zollinger D G. Estimation of the compressive strength and modulus of elasticity of cement treated aggregate base materials[C]//MTRB. TRB Annual Meeting 2003. Washington DC; TRB, 2003: 30-38.
- [8] 《中国公路学报》编辑部. 中国道路工程学术研究综述·2013[J]. 中国公路学报, 2013, 26(3): 1-36.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research; 2013 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(3): 1-36. (in Chinese)
- [9] 蒋应军,王富玉,刘 斌. 水泥稳定碎石强度特性的试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(15): 52-57.
JIANG Ying-jun, WANG Fu-yu, LIU Bin. Research on strength properties of cement stabilization of crushed aggregate[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(15): 52-57. (in Chinese)
- [10] DB 61/T 529—2011,垂直振动法水泥稳定碎石设计施工技术规范[S].
DB 61/T 529—2011, Specifications for design and construction of cement stabilized macadam base VVTM[S]. (in Chinese)
- [11] 李明杰,蒋应军,张俊杰,等. 半刚性基层材料振动试验方法[J]. 交通运输工程学报, 2010, 10(1): 6-12.
LI Ming-jie, JIANG Ying-jun, ZHANG Jun-jie, et al. Vibration test method of semi-rigid base course material[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2010, 10(1): 6-12. (in Chinese)
- [12] 蒋应军. 基于振动法设计的抗裂型水泥稳定碎石基层应用研究[J]. 公路, 2008(12): 36-41.
JIANG Ying-jun. Application research of cement stabilized crushed stone base course based on vibration design method [J]. Highway, 2008 (12): 36-41. (in Chinese)
- [13] JTG E51—2009,公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
JTG E51—2009, Test methods of materials stabilized with inorganic binders for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [14] 高镇同,熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.
GAO Zhen-tong, XIONG Jun-jiang. Fatigue reliability [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2000. (in Chinese)
- [15] JTJ 034—2000,公路路面基层施工技术规范[S].
JTJ 034—2000, Technical specifications for construction of highway road bases[S]. (in Chinese)
- [16] 郑木莲,孙家伟,王秉纲. 贫混凝土疲劳方程的建立及其应用研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2007, 39(1): 92-97.
ZHENG Mu-lian, SUN Jia-wei, WANG Bing-gang. Study on formulation and application of fatigue equation for lean concrete[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(1): 92-97. (in Chinese)
- [17] 水泥混凝土路面推广组. 水泥混凝土路面研究[M]. 北京:人民交通出版社,1995.
The Team of Concrete Pavement Promotion of Ministry of Communications. Concrete pavement research [M]. Beijing: China Communications Press, 1995. (in Chinese)

