

文章编号:1671-8879(2013)01-0023-05

水泥碎石疲劳特性及影响因素

周卫峰^{1,2}, 李彦伟^{1,3}, 张秀丽², 苗 乾²

(1. 天津大学 管理与经济学部, 天津 300073; 2. 天津市市政工程研究院,
天津 300074; 3. 石家庄市交通运输局, 河北 石家庄 050051)

摘 要:为了分析成型方式、级配及胶结料剂量对水泥碎石疲劳特性的影响规律,采用正交试验方法,对不同工况条件下水泥碎石进行了疲劳性能试验;利用威布尔(Weibull)分布函数对疲劳试验结果进行了统计分析,并采用极差分析法确定了水泥碎石疲劳性能影响因素的敏感性排序,根据材料科学微观组成理论分析了影响因素排序与疲劳性能之间的相关性。结果表明:各因素对疲劳寿命影响的敏感性从大到小排序为:成型方法、水泥结合料剂量、级配骨架;采用振动成型设计法,适当提高水泥结合料用量,选用悬浮密实结构的级配形式,可以提高水泥碎石基层材料抗疲劳性能。

关键词:道路工程;水泥碎石;威布尔函数;极差分析;影响因素

中图分类号:U416.21

文献标志码:A

Fatigue performance and influencing factors of cement stabilized macadam

ZHOU Wei-feng^{1,2}, LI Yan-wei^{1,3}, ZHANG Xiu-li², MIAO Qian²

(1. School of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300073, China;

2. Tianjin Municipal & Highway Engineering Research Institute, Tianjin 300074, China;

3. Department of Transportation, Government of Shijiazhuang, Shijiazhuang 050051, Hebei, China)

Abstract: In order to analyze the impact rules of molding way, gradation and binder dose on fatigue properties of cement stabilized macadam, the orthogonal test method was used to test the fatigue performance of cement stabilized macadam under different conditions. Weibull distribution function was used to analyze the fatigue test results and the sensitivity sequence of fatigue performance influencing factors of cement stabilized macadam were determined by the range analysis method. The correlation between the sequence of influencing factors and the fatigue performance was analyzed by the theory of material microscopic composition. The results shows that the sensitivity sequence of various factors on the fatigue life is molding way, amount of cement and gradation. The anti-fatigue performance of cement stabilized macadam can be improved by using vibration molding design method, increasing the amount of cement binder appropriately and selecting suspension dense gradation. 10 tabs, 3 figs, 10 refs.

Key words: road engineering; cement stabilized macadam; Weibull function; range analysis; influencing factor

收稿日期:2011-01-10

基金项目:天津市交通科技项目(2010-33)

作者简介:周卫峰(1971-),男,陕西韩城人,天津市市政工程研究所教授级高级工程师,天津大学在站博士后,E-mail:zhouweifeng0000@126.com。

0 引言

基层材料的疲劳破坏强度是半刚性基层沥青路面结构设计的关键控制因素^[1-3]。由于半刚性基层材料结构组成的复杂性,不同成型方式、不同胶结料剂量、不同结构类型都会引起半刚性材料疲劳性能的巨大差异^[4-5]。中国现行沥青路面设计规范对半刚性基层疲劳寿命的预估采用统一预估模型和设计参数,难以反映不同结构类型及成型方式对材料疲劳寿命的影响,导致半刚性基层材料的预估疲劳寿命与实际工程的使用年限存在较大差异。因此,国内外学者对半刚性基层材料的疲劳特性开展了大量研究,李燕等基于半刚性层模量衰变研究了路面疲劳寿命^[6];孙荣山等探讨了级配变化对水泥稳定碎石材料疲劳性能的影响^[7]。但是,目前对于半刚性基层材料抗疲劳性能的研究多采用单因素法,对半刚性基层疲劳寿命的预估存在一定的局限性^[8-10]。为此,本文综合考虑多种影响因素,采用 MTS 材料试验系统,系统研究了不同成型工艺、不同组成结构和不同水泥剂量水泥碎石的疲劳性能,利用 Weibull 理论对疲劳试验结果进行分析,并采用极差分析法研究了多因素共同作用下对疲劳方程特征参数的影响作用,确定了重载条件下半刚性基层材料疲劳寿命影响规律。

1 疲劳试验

1.1 试验方案及试件制备

为了系统研究各种因素对半刚性基层材料疲劳性能的影响作用,制定了不同成型方式(静压成型和振动成型法)、不同水泥剂量(水泥剂量 3%和 5%)、不同级配类型(骨架密实型和悬浮密实型)水泥碎石疲劳试验方案,设计了正交试验表(表 1、表 2),水泥碎石级配见表 3。疲劳试验试件尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm。水泥碎石养生龄期为 180 d。试件平均弯拉强度及其他力学指标见表 4。

表 1 正交方案设计

Tab. 1 Design of orthogonal test

混合料编号	成型方式	水泥结合料剂量/%	级配骨架
ZG3	振动成型	3	骨架密实
ZG5	振动成型	5	骨架密实
ZX3	振动成型	3	悬浮密实
ZX5	振动成型	5	悬浮密实
JG3	静压成型	3	骨架密实
JG5	静压成型	5	骨架密实
JX3	静压成型	3	悬浮密实
JX5	静压成型	5	悬浮密实

表 2 疲劳试验方案

Tab. 2 Scheme of fatigue test

混和料编号	成型方式	结构形式	水泥结合料剂量/%	试件数量/个
ZG3	振动成型	骨架密实	3	12
ZG5			5	12
ZX3		悬浮密实	3	12
ZX5			5	12
ZG3	静压成型	骨架密实	3	12
ZG5			5	12
ZX3		悬浮密实	3	12
ZX5			5	12

表 3 水泥碎石级配

Tab. 3 Gradation of cement stabilized macadam

筛孔尺寸/mm	31.5	26.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.075
通过	100	95	75	42	28		14	5	
率/%	100	80	56	30	22		10	4	

表 4 水泥碎石半刚性基层材料物理力学性质

Tab. 4 Physical and mechanical properties of semi-rigid base materials of cement stabilized macadam

混合料编号	干密度/(g·cm ⁻³)	7 d 抗压强度/MPa	平均弯拉强度/MPa	劈裂强度/MPa
ZG3	2.48	5.4	1.54	1.8
ZG5	2.49	6.3	2.29	2.3
ZX3	2.50	5.8	1.74	2.0
ZX5	2.51	6.8	3.08	2.5
JG3	2.40	3.2	0.96	0.7
JG5	2.41	3.7	1.75	1.0
JX3	2.40	3.4	1.13	0.8
JX5	2.41	4.1	1.89	0.9

1.2 试验装置

疲劳试验仪器采用美国产 MTS810 材料试验机,为减小数据误差,试验过程中增加了试件数量,每组抗弯拉强度试验进行 9 次平行试验;试验前试件底面与仪器接触良好,上表面保持水平,以使压头两滚杆均与试件保持接触,使之均匀受力;断裂面在两加荷点之间出现。试验速率采用 50 mm/min,试验装置如图 1 所示。

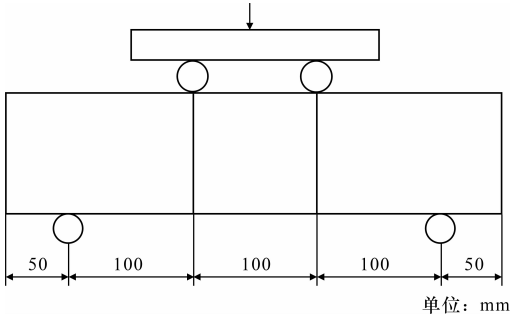


图 1 弯拉强度试验

Fig. 1 Flexural strength test

1.3 疲劳试验条件

采用简支梁三分点弯曲试验方法,荷载作用频率为 10 Hz,循环特征值取 0.1,荷载波形为半正弦波;每级应力水平间隔 0.1,采用 0.5、0.6、0.7、0.8 共 4 个等级的应力水平;疲劳试验温度为 20 ℃。试验前对试件顶面用钢刷打磨并用标准砂校平,然后用一较小应力对中梁进行预压,使压头与试件充分接触,尽量消除由于接触不良而导致的试验误差;最后采用半正弦波进行加载,试件破坏后,电脑自动记录作用次数。疲劳试验过程如图 2 所示。



图 2 疲劳试验过程
Fig.2 Process of fatigue test

2 疲劳方程

对不同成型工艺、不同组成结构、不同水泥剂量的水泥稳定碎石材料进行疲劳性能试验,每组试验成型 3 个试件,试验结果见表 5。

采用威布尔(Weibull)分布理论分析半刚性基层材料的疲劳寿命。对各组的疲劳寿命进行威布尔检验,结果表明,其回归曲线相关系数都接近于 1,表明各组疲劳试验的作用次数均服从威布尔分布。对数据进行处理后,建立疲劳方程为

$$\lg(N)=a+b(\frac{\sigma}{S}) \tag{1}$$

式中: N 为有效疲劳寿命; S 为弯拉强度; σ 为应力荷载; a 、 b 为常数。

在失效概率为 0.5 时,各种半刚性基层材料疲劳方程系数见表 6。

3 极差分析

3.1 极差分析及其分析步骤

极差分析又称直观分析,是正交试验设计结果分析中最直观、最常用的分析方法。极差分析简称 R 法,包括计算和判断 2 个步骤,如下页图 3 所示。

表 5 水泥稳定碎石疲劳试验结果

Tab.5 Results of fatigue tests of cement stabilized macadam					
材料	混和料编号	应力水平	疲劳寿命/次		
			试件 1	试件 2	试件 3
水泥 稳定 碎石	ZG3	0.5	81 907	240 127	785 319
		0.6	9 732	54 367	91 017
		0.7	5 877	10 062	34 389
		0.8	1 585	3 621	5 465
	ZG5	0.5	533 624	901 291	1 032 665
		0.6	167 935	262 219	345 785
		0.7	37 611	95 864	160 127
		0.8	4 143	9 872	28 396
	ZX3	0.5	216 387	561 109	866 318
		0.6	24 411	62 845	119 044
		0.7	7 380	14 548	32 482
		0.8	3 790	6 133	12 036
	ZX5	0.5	862 741	1 023 162	1 261 378
		0.6	192 364	656 785	864 523
		0.7	38 635	145 758	250 126
		0.8	9 565	34 090	63 227
	JG3	0.5	59 545	270 978	490 717
		0.6	3 613	7 279	31 604
		0.7	3 143	6 348	30 977
		0.8	125	158	788
	JG5	0.5	85 096	180 457	588 852
		0.6	9 638	35 473	76 264
		0.7	3 431	8 060	40 306
		0.8	162	332	991
	JX3	0.5	70 728	203 676	519 847
		0.6	14 488	29 268	42 156
		0.7	3 522	5 347	9 888
		0.8	532	812	1 587
	JX5	0.5	573 441	691 774	729 876
		0.6	31 393	58 448	88 481
		0.7	7 840	16 260	28 158
		0.8	1 482	2 049	3 168

表 6 疲劳方程

Tab.6 Equations of fatigue				
混和料 编号	疲劳方程	a	b	R^2
ZG3	$\lg(N)=8.763\ 2-6.537\ 1(\frac{\sigma}{S})$	8.763 2	-6.537 1	0.905 6
ZG5	$\lg(N)=8.832\ 9-5.716\ 4(\frac{\sigma}{S})$	8.832 9	-5.716 4	0.915 2
ZX3	$\lg(N)=8.705\ 8-6.201\ 5(\frac{\sigma}{S})$	8.705 8	-6.201 5	0.911 7
ZX5	$\lg(N)=8.624\ 5-5.003\ 0(\frac{\sigma}{S})$	8.624 5	-5.003 0	0.978 0
JG3	$\lg(N)=9.706\ 7-8.675\ 3(\frac{\sigma}{S})$	9.706 7	-8.675 3	0.984 5
JG5	$\lg(N)=9.870\ 6-8.649\ 6(\frac{\sigma}{S})$	9.870 6	-8.649 6	0.985 1
JX3	$\lg(N)=9.340\ 2-7.959\ 7(\frac{\sigma}{S})$	9.340 2	-7.959 7	0.940 3
JX5	$\lg(N)=9.717\ 4-7.954\ 9(\frac{\sigma}{S})$	9.717 4	-7.954 9	0.985 9

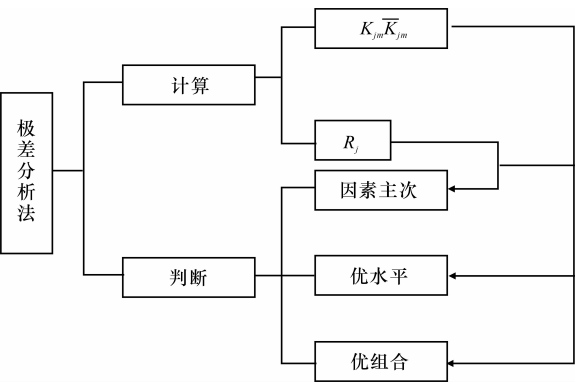


图 3 极差分析流程
Fig. 3 Flow of range analysis

图 3 中： K_{jm} 为第 j 列因素第 m 水平所对应的试验指标之和； \bar{K}_{jm} 为 K_{jm} 平均值，由 \bar{K}_{jm} 大小可以判断第 j 列因素优化水平； R_j 为第 j 列因素的极差，即第 j 列因素水平下的最大平均值与最小平均值的差值。

$$R_j = \max(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \bar{K}_{j3}, \dots, \bar{K}_{jm}) - \min(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \bar{K}_{j3}, \dots, \bar{K}_{jm}) \tag{2}$$

极差 R_j 反映了第 j 列因素水平波动时，试验指标的变动幅度。 R_j 越大，说明该因素水平变化时对试

验指标的影响越大。根据 R_j 大小，可以判断试验因素对试验指标影响的主次顺序。

3.2 疲劳性能影响因素分析

影响水泥稳定碎石疲劳特性的原因较多，单从某一方面或单因素的影响来评价是片面的，因此，针对疲劳方程参数(半对数方程)和重载条件下(应力比 0.7)的水泥稳定碎石基层疲劳寿命分别进行灰色关联分析，得出各因素对水泥稳定碎石疲劳性能影响的规律。

分别选取水泥稳定碎石混合料疲劳失效概率 0.5 的疲劳方程参数 a 和 b 以及重载条件下($\frac{\sigma}{S} = 0.7$)的疲劳寿命作为参考序列，以矿料级配、成型方式和水泥结合料含量作为比较序列。其中采用粗集料比 $C_A = \frac{P_{13.2} - P_{4.75}}{100 - P_{4.75}}$ 表征矿料级配情况；当级配为骨架密实结构时， $C_A = 3.47$ ；当级配为悬浮密实结构时， $C_A = 2.37$ ；以定量指标击实功作为成型方式的指标反映成型方式的差别，经过试验，静压成型压实功为 2.67 J，振动成型压实功为 5.881 J。疲劳参数及相关材料指标见表 7。

表 7 疲劳参数及相关材料指标

Tab. 7 Parameters of fatigue and related materials indicators

项目	ZG3	ZG5	ZX3	ZX5	JG3	JG5	JX3	JX5
$a(0.5 \text{ 失效概率})$	8.763 2	8.832 9	8.705 8	8.624 5	9.706 7	9.870 6	9.340 2	9.717 4
$b(0.5 \text{ 失效概率})$	-6.537 1	-5.716 4	-6.201 5	-5.003 0	-8.675 3	-8.649 6	-7.959 7	-7.954 9
$\frac{\sigma}{S}=0.7$ 时疲劳寿命	34 389	15 390	67 829	23 161	132 556	4 306	6 545	5 867
C_A	3.47	3.47	3.47	2.37	2.37	3.47	3.47	2.37
压实功/J	5.881	5.881	5.881	5.881	5.881	2.670	2.670	2.670
水泥结合料剂量/%	3	3	5	3	5	3	5	3

由于试验过程产生数据量较大，故本文直接给出极差分析计算结果，见表 8~表 9 和下页表 10。

表 8 疲劳参数 a 的极差分析结果

Tab. 8 Range analysis results for fatigue parameter of a

影响因素	成型方式	水泥结合料剂量	级配骨架
K_{1m}	34.926 4	36.515 9	37.173 4
K_{2m}	38.634 9	37.045 4	36.387 9
\bar{K}_{1m}	8.731 60	9.128 98	9.293 35
\bar{K}_{2m}	9.658 725	9.261 350	9.096 980
R_j (极差)	0.927 125	0.132 380	0.196 380
排序	1	3	2

通过分析以上数据可以得出，采用极差多指标综合分析法对疲劳方程特征参数的分析和高应力比(重载)条件下疲劳寿命影响因素分析得出的排序并非完全一致，对于疲劳方程参数 a ，各因素的影响从

表 9 疲劳参数 b 的极差分析结果

Tab. 9 Range analysis results for fatigue parameter of b

影响因素	成型方式	水泥结合料剂量	级配骨架
K_{1m}	-23.458	-29.374	-29.578
K_{2m}	-33.239 5	-27.324 0	-27.119 0
\bar{K}_{1m}	-5.864 5	-7.343 4	-7.394 6
\bar{K}_{2m}	-8.309 88	-6.831 00	-6.779 80
R_j (极差)	2.445 375	0.512 420	0.614 820
排序	1	3	2

大到小排序为：成型方式、级配骨架、水泥结合料剂量；对于疲劳方程参数 b ，排序为：成型方式、级配骨架、水泥结合料剂量；对于高应力比(重载)条件下疲劳寿命，从大到小排序为：成型方式、水泥结合料剂量、级配骨架。综合对比后的最优组合为：振动成型方式，水泥结合料剂量 5%，悬浮密实型级配。

表 10 疲劳寿命(应力比 0.7)的极差分析结果

Tab. 10 Range analysis results of fatigue life(stress ratio of 0.7)

影响因素	成型方式	水泥结合料剂量	级配骨架
K_{1m}	238 936	48 724	94 070
K_{2m}	30 810	221 022	175 676
\bar{K}_{1m}	59 734.0	12 181.0	23 517.5
\bar{K}_{2m}	7 702.5	55 255.5	43 919.0
R_j (极差)	52 031.5	43 074.5	20 401.5
排序	1	2	3

疲劳方程的特征参数主要反映的是全应力比范围内的疲劳,是从应力比为 0 时的理论疲劳寿命到应力比为范围内极限疲劳的变化规律,主要是 3 个因素对整体疲劳性能变化趋势的反映,对于特定条件下的疲劳情况则无法准确表达。此外,在较低应力比条件下,特别是在应力比为 0.5 的条件下,材料的疲劳寿命通常接近无穷;而在低应力水平条件下,无机非金属材料试验结果离散性较大。因此,在低应力条件下得到的疲劳数据稳定性差,与高应力比(重载)条件下得到的数据相比,其可信度较低。疲劳性能影响因素敏感性从大到小排序为:成型方式、水泥结合料剂量、级配骨架。

振动成型工艺可以轻易实现颗粒间水分液化以及更大的压实功,使得在较少的拌合水以及较小水泥结合料用量条件下,达到最佳的压实效果,获得密实的结构,显著降低材料内部缺陷,降低微裂缝产生的机率;疲劳损伤微裂缝沿颗粒间隙扩展,由于结构颗粒间的空隙、间隙更加细密,因此裂缝扩展过程中消耗的能量增加,裂缝发展的速度大大降低。骨架密实结构可以改善混合料疏松介质内部微孔隙结构,降低干燥收缩,从而减少应力集中现象。增加水泥用量可以显著提高有效胶结面积,降低混合料内部有效应力水平。需要注意的是,增加水泥用量易导致收缩性增强,且模量也有较大程度增加,因此,通过增加水泥结合料含量改善半刚性基层材料疲劳性能应进行试验系统评价。级配骨架含有更多细料,水泥水化产物可与细颗粒内部活性成分发生二次火山灰反应,形成更加细密的晶体结构,从而从根本上改善疲劳性能。

在水泥碎石材料设计时,为了提高半刚性基层材料的抗疲劳性能,首先要考虑采用先进的振动成型工艺,提高内部组织密实程度,降低材料内部微观缺陷比例;其次,适当考虑提高水泥结合料含量,增加胶结面积,减小局部应力,但顾及到提高胶结料含量增加易引起干缩、温缩问题,在改变水泥用量时,需进行系统试验,综合考虑;最后,注重稳定材料矿质混合料的级配设计,形成悬浮密实的矿料结构。

4 结 语

(1)通过对不同级配组成、不同水泥结合料含量以及不同成型方式水泥稳定碎石材料进行疲劳性能试验,得出了不同工况条件下水泥稳定碎石疲劳寿命,威布尔检验结果表明,疲劳寿命回归曲线相关系数均接近于 1,疲劳方程具有较高的可靠性。

(2)利用正交试验方法,研究了成型方法、水泥剂量、组成结构类型等因素对水泥稳定碎石疲劳特性的影响作用,极差分析结果表明,各因素对疲劳寿命影响的敏感性从大到小排序为:成型方式、水泥结合料剂量、级配骨架。

(3)增加水泥用量可以提高有效胶结面积,降低混合料内部有效应力水平,但水泥用量增加易导致收缩性加大,且模量也有较大幅度提高;通过增加水泥结合料含量改善半刚性基层材料疲劳性能时,应进行试验系统评价。

(4)为提高水泥稳定碎石材料抗疲劳性能,特别是重载条件下的抗疲劳性能的有效途径是采用振动成型设计法,适当提高水泥结合料用量,优先采用悬浮密实结构的级配形式。

参考文献:

References:

[1] Valkering C P, Stapel F D. The shell pavement design method on a personal computer [C]//TRB. Proceedings of the 7th International Conference on Asphalt Pavements. Nottingham: TRB, 1992: 351-374.

[2] 周永仓. 基于疲劳方程的水泥乳化沥青稳定碎石基层试验研究[J]. 交通标准化, 2010(21): 22-25.
ZHOU Yong-cang. Emulsified asphalt cement stabilized gravel base test study on fatigue equation[J]. Transport Standardization, 2010(21): 22-25. (in Chinese)

[3] 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, 29(6): 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, 29(6): 29-33. (in Chinese)

[4] 陈华文. 公路半刚性基层材料动态特性[J]. 工程与建设, 2008, 22(4): 447-450.
CHEN Hua-wen. Dynamic characteristics of the semi-rigid road base material[J]. Engineering and Construction, 2008, 22(4): 447-450. (in Chinese)