

文章编号:1671-6833(2007)02-0015-04

贫混凝土基层疲劳特性研究

王崇涛^{1,2}, 王永红³, 王秉纲¹

(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. 中交第一公路勘察设计研究院, 陕西 西安 710065; 3. 湖北省咸宁市公路管理局, 湖北 咸宁 437100)

摘 要: 贫混凝土用于路面基层时, 由于受到荷载应力和温度应力的反复作用, 需研究其疲劳特性. 通过分析室内小梁弯拉疲劳试验结果, 得出贫混凝土的疲劳寿命服从双参数威布尔分布, 据此建立了不同应力水平和等效应力水平下两种形式的疲劳方程. 通过对比, 得出贫混凝土的疲劳性能优于其他常用半刚性基层材料. 利用得出的疲劳方程, 建立贫混凝土作为水泥混凝土路面下面层荷载应力计算的疲劳应力系数, 以及作为沥青路面基层时, 进行层底弯拉应力验算的弯拉强度结构系数.

关键词: 路面工程; 贫混凝土; 疲劳方程; 荷载疲劳应力系数; 弯拉强度结构系数

中图分类号: U416.217

文献标识码: A

0 引言

贫混凝土 (Lean Concrete, 简称 LC) 是由粗、细级配集料与一定水泥和水拌和而成的一种混凝土. 这种混凝土的水泥用量较普通混凝土低, 有时也称经济混凝土 (Econcrete), 与水泥稳定碎石、二灰碎石等常用半刚性材料相比, 具有较高的强度、刚度和整体性, 抗冲刷和抗冻性能良好.

作为路面基层的贫混凝土, 和面层一起受到车辆荷载和温度荷载的反复作用, 结构设计时需考虑其疲劳性能. 因此, 必须研究贫混凝土的疲劳特性, 给出其疲劳方程, 从而得出水泥混凝土路面结构设计的疲劳应力系数, 以及沥青路面结构设计的弯拉强度结构系数.

1 疲劳试验

目前, 国内外进行的疲劳试验主要有两种类型: 一是测试实际路面在真实汽车荷载作用下的疲劳性能, 二是室内小型试件材料的疲劳试验^[1]. 本研究采用后者, 得出贫混凝土的疲劳方程. 试验在 MTS850 机上进行, 采用应力控制模式, 加载波形统一采用正弦波, 当应力水平 $S < 0.85$ 时荷载作用频率为 5 Hz, $S \geq 0.85$ 时为 1 Hz, 加载时间间隔为零.

循环特征值为

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (1)$$

式中: R 为循环特征值, 即低高应力; σ_{\min} 为作用于试件上的最小荷载; σ_{\max} 为作用于试件上的最大荷载.

疲劳试验选用四种不同配比的贫混凝土, 其中包括 1 组掺加粉煤灰的贫混凝土. 掺加粉煤灰可以改善贫混凝土的工作性并有效利用资源, 其掺量的影响已体现于静载强度变化中, 此处对于疲劳特性的影响不作为分析重点. 疲劳试件为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 55 \text{ cm}$ 的小梁, 共测试了 87 根, 试验均采用三分点加载方式, 加荷点之间距离为 15 cm. 试验前先进行静载试验, 对每种配比的贫混凝土, 取标准养护 28 d 的小梁试件进行试验, 其中掺加粉煤灰的贫混凝土采用 90 d 龄期的试件. 为减小试件强度测定误差对疲劳试验的影响, 试验时加大了梁试件测试的数量, 如表 1 所示. 除去上述静载试验, 本次疲劳试验共测试 56 根贫混凝土小梁, 试验结果列入表 2.

2 疲劳方程

贫混凝土的疲劳寿命是一个随机量, 已有研究表明^[2], 普通混凝土疲劳寿命 N 和等效疲劳寿命 $\bar{N} = N^{1-R}$ 均服从双参数威布尔分布, 后者即

收稿日期: 2007-01-10; 修订日期: 2007-03-23

基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目 (2005E₂07); 交通部西部交通建设科技项目 (200631800005)

作者简介: 王崇涛 (1975-), 男, 山东青岛人, 长安大学博士研究生, 主要从事道路结构与材料研究.

表 1 试件强度与配合比
Tab. 1 Strength of test pieces and mix ratio

编号	试件根数	平均弯拉强度/MPa	配合比/(kg·m ⁻³)					
			水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂
Z-1	8	3.20	148	—	656	1 460	136	1.18
N-2	7	3.95	150	—	663	1 477	110	1.20
N-3	8	4.46	170	—	656	1 460	114	1.36
N3-30%	6	4.23	119	102	595	1 460	114	0.95

表 2 贫混凝土弯曲疲劳试验数据
Tab. 2 Results of fatigue test

低高应 力比 R	应力 水平 S	疲劳 寿命 N	低高应 力比 R	应力 水平 S	疲劳 寿命 N	低高应 力比 R	应力 水平 S	疲劳 寿命 N
0.08	0.65	12 851	0.08	0.75	4 051	0.20	0.65	363 902
0.08	0.65	42 873	0.08	0.75	4 473	0.20	0.65	378 209
0.08	0.65	69 278	0.08	0.75	4 995	0.20	0.65	753 282
0.08	0.65	131 293	0.08	0.75	6 479	0.20	0.70	101 250
0.08	0.65	164 242	0.08	0.75	13 019	0.20	0.70	145 488
0.08	0.65	300 000*	0.08	0.80	20	0.20	0.75	522
0.08	0.65	300 000*	0.08	0.80	24	0.20	0.75	1 109
0.08	0.70	1 931	0.08	0.80	48	0.20	0.75	3 593
0.08	0.70	2 155	0.08	0.80	106	0.20	0.75	4 266
0.08	0.70	5 114	0.08	0.80	942	0.20	0.75	7 607
0.08	0.70	3 1716	0.08	0.80	45 007	0.20	0.75	29 394*
0.08	0.70	35 044	0.08	0.80	165 280	0.20	0.75	241 987
0.08	0.70	57 691	0.08	0.80	293 531	0.20	0.80	1 360
0.08	0.70	69 589	0.08	0.85	91	0.20	0.80	36 464
0.08	0.70	182 840	0.08	0.85	95	0.20	0.80	50 076
0.08	0.70	323 205	0.08	0.85	110	0.20	0.85	83
0.08	0.70	327 679	0.08	0.85	126	0.20	0.85	2 920
0.08	0.75	1 475	0.08	0.85	760	0.50	0.70	596 189
0.08	0.75	1 826	0.08	0.85	3 726			

说明:带#号的试件由于试验时仪器出现故障,被迫停止;带*号的梁未断,静载测试得出这些试件的抗弯拉强度与平均值相差较大。

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

(2)

或
$$\lg \frac{S(1-R)}{1-SR} = \lg a - b \lg N$$

(5)

或变形为

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

(3)

式中: m 和 t_0 分别为形状参数和尺度参数。

对表 2 中数据进行的 Weibull 分布检验如表 3 所示。

试验结果表明,贫混凝土的疲劳寿命和等效疲劳寿命 $\bar{N} (= N^{1-R})$ 也服从双参数 Weibull 分布。

本次贫混凝土的疲劳试验结果经过分析,建立了两种形式的疲劳方程,即

$$\lg S = \lg \left(\frac{\sigma_{\max}}{f_r} \right) = \lg a - b(1-R) \lg N$$

(4)

式中: f_r 为贫混凝土的弯拉强度; a 、 b 为疲劳方程待定系数。

表 3 Weibull 检验的回归系数及相关系数
Tab. 3 Regression coefficient and correlation coefficient of WEIBULL check

应力水平 S	回归系 m	回归系数 $\ln t_0$	相关系数 r
0.85	0.611 4	3.480 9	0.896 66
0.80	0.298 3	2.538 1	0.956 24
0.75	0.810 8	6.461 7	0.971 19
0.70	0.581 0	5.926 9	0.970 36
0.65	1.346 4	14.262 0	0.958 70

将回归所得的系数 m 和 $\ln t_0$ 代入式(4),计算得到各应力水平上相应于不同失效概率 ρ 的等效疲劳寿命 \bar{N} ,进而可以建立不同失效概率下的

疲劳方程,其回归系数及相关系数如表 4 所示. 其中失效概率为 50% 的疲劳方程为

$$\lg S = \lg 1.111\,2 - 0.050\,0(1 - R)\lg N \quad (6)$$

表 4 疲劳方程回归系数
Tab. 4 Regression coefficient of fatigue equation

失效概率 ρ	回归系数 a	回归系数 b	相关系数 r
0.50	1.111 2	0.050 0	0.972 88
0.45	1.090 9	0.049 2	0.985 24
0.40	1.067 1	0.048 1	0.993 58
0.35	1.040 2	0.046 5	0.997 85
0.30	1.010 2	0.044 4	0.997 95
0.25	0.977 7	0.041 9	0.993 53
0.20	0.942 8	0.038 9	0.983 92
0.15	0.904 9	0.035 3	0.967 99
0.10	0.863 0	0.030 9	0.942 97
0.05	0.833 5	0.029 5	0.946 31

此外,为便于由疲劳方程推导出荷载疲劳应力系数,将 $\frac{S(1-R)}{1-SR}$ 看作等效应力水平 \bar{S} ,再次应用双参数威布尔分布模型建立如式(5)所示的疲劳方程. 不同失效概率下疲劳方程的回归系数及相关系数如表 5 所示. 其中失效概率 50% 的疲劳方程为

$$\lg \bar{S} = \lg 1.149\,7 - 0.052\,11\lg N \quad (7)$$

表 5 考虑等效应力水平疲劳方程的回归系数
Tab. 5 Regression coefficient of fatigue equation considering equivalent stress level

失效概率 ρ	回归系数 a	回归系数 b	相关系数 r
0.50	1.149 7	0.052 1	0.978 62
0.45	1.117 6	0.050 6	0.985 80
0.40	1.083 7	0.048 1	0.989 65
0.35	1.047 6	0.046 5	0.990 35
0.30	1.010 2	0.044 0	0.987 88
0.25	0.971 4	0.041 2	0.982 14
0.20	0.931 1	0.038 1	0.972 73
0.15	0.888 8	0.034 5	0.958 85
0.10	0.843 0	0.030 3	0.938 51
0.05	0.806 1	0.027 7	0.932 68

3 疲劳方程的应用

3.1 与半刚性和刚性材料疲劳特性的比较

常用半刚性基层材料的疲劳方程如式(8)~(10)所示^[3],此外为便于比较,普通水泥混凝土的疲劳方程式(11)在此一并列出.

石灰粉煤灰稳定类:
$$\lg S = 0.110\,3 - 0.063\,3\lg N \quad (8)$$

水泥稳定粒料类:
$$\lg S = 0.133\,9 - 0.069\,7\lg N \quad (9)$$

稳定土类:
$$\lg S = 0.122\,6 - 0.079\,3\lg N \quad (10)$$

水泥混凝土:
$$\lg \bar{S} = \lg 1.084 - 0.042\,3\lg N \quad (11)$$

将上述 4 种材料的疲劳方程与本文的贫混凝土疲劳方程重新回归整理,得到图 1. 对比发现,上述几种材料中,混凝土疲劳方程的斜率最小,这说明其疲劳性能最优;贫混凝土其次,其疲劳性能优于其它常用的半刚性基层材料.

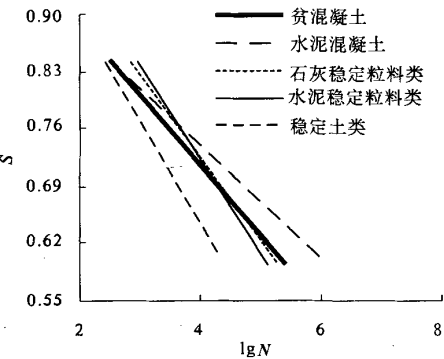


图 1 疲劳性能比较
Fig. 1 Fatigue performance comparison

3.2 荷载疲劳应力系数

贫混凝土作为水泥混凝土路面基层时,可采用弹性地基上的双层板理论求解. 当计算贫混凝土基层的荷载应力时,需知道贫混凝土的荷载疲劳应力系数值.

对于考虑荷载应力和温度应力综合作用的疲劳方程式(5),将荷载应力和温度翘曲应力代入式中的 S 和 R,即取 $\sigma_{min} = \sigma_t, \sigma_{max} = \sigma_p + \sigma_t$,可得

$$\lg \frac{\sigma_p}{f_t - \sigma_t} = \lg a - b\lg N \quad (12)$$

由此

$$\frac{N^b}{a} \sigma_p + \sigma_t = f_t \quad (13)$$

因此,可定义贫混凝土疲劳应力系数为

$$k_f = \frac{1}{a} N_f^b \quad (14)$$

式中: k_f 为疲劳应力系数; N_f 为室内试验所得疲劳寿命; a, b 为疲劳方程中的系数.

a 和 b 的取值根据疲劳方程式(7),得到贫混凝土的疲劳应力系数为

$$K_f = \frac{1}{1.149\,7} N_f^{0.052\,1} \quad (15)$$

3.3 弯拉强度结构系数

贫混凝土作为沥青路面基层时,对于高速、一级及二级公路,需进行层底弯拉应力的验算.由弯拉强度结构系数的定义,得知其值相当于应力水平的倒数.再根据疲劳方程式(7),可得

$$K_s = \frac{1}{1.1497} N_f^{0.0521} \quad (16)$$

式中: K_s 为弯拉强度结构系数; N_f 为室内试验所得疲劳寿命.

考虑到室内疲劳试验试件的疲劳寿命 N_f 与实际行车轴载作用次数的差异,综合考虑加载间歇时间、轮迹横向分布、室内外受力情况差别及不利季节等因素的影响^[4-7],修正后得出室内试验所得疲劳寿命 N_f 与路面上实际累计当量轴次 N_e 之间的关系为

$$N_f = 0.2 \times 0.5 \times \frac{1}{3} \times \frac{60}{365} \cdot N_e = 5.48 \times 10^{-3} \cdot N_e \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)中,并考虑公路等级不同的影响,贫混凝土的弯拉强度结构系数为

$$K_s = \frac{0.66}{A_e} \cdot N_e^{0.052} \quad (18)$$

式中: A_e 为道路等级系数,对于高速、一级公路取为1.0,二级公路为1.1,三、四级公路为1.2.

4 结束语

(1)通过室内小梁弯拉疲劳试验,得出贫混

凝土疲劳寿命及等效疲劳寿命均服从双参数威布尔分布,并根据此数学模型建立了不同失效概率下两种形式的双对数疲劳方程.

(2)通过与常用半刚性基层材料已有疲劳研究成果的比较,表明贫混凝土具有优良的疲劳性能.

(3)利用得出的疲劳方程,建立了贫混凝土作为水泥混凝土路面下面层荷载应力计算的疲劳应力系数,以及作为沥青路面基层时,进行层底弯拉应力验算的弯拉强度结构系数.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 石小平.水泥混凝土的弯曲疲劳特性[J].土木工程学报,1990,23(3):11-22.
- [3] JTJ 014-97,公路沥青路面设计规范[S].
- [4] 郑木莲.多孔混凝土排水基层研究[D].西安:长安大学,2004.
- [5] 傅搏峰,周志刚,陈晓鸿,等.沥青路面水损害疲劳破坏过程的数值模拟分析[J].郑州大学学报(工学版),2006,27(1):54-61.
- [6] 凌天清.水泥稳定土抗弯拉强度结构系数的研究[J].中国公路学报,1992,5(3):7-13.
- [7] 张纯雨,李启令.粉煤灰混凝土强度的优化设计[J].郑州大学学报(理学版),2002,34(4):50-94.

Study on Fatigue Property of Lean Concrete Base

WANG Chong-tao^{1,2}, WANG Yong-hong³, WANG Bing-gang¹

(1. Key Laboratory for Special Area Highway Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. The First Highway Survey and Design Institute of China, Xi'an 710065, China; 3. Xianning Highway Administration Bureau of Hubei Province, Xianning 43710, China)

Abstract: Fatigue property of lean concrete should be studied when the material is set as base course since it withstands the repeated actions of load stress and temperature stress. By analyzing the indoor flexural fatigue tests of small beams, the paper Concludes that the fatigue life of lean concrete follows the two-parameter Weibull distribution, and establishes two types of fatigue equation under different stress level and equivalent stress level. The paper also Concludes that the fatigue property of lean concrete is better than the semi-rigid base materials. Lastly, with the fatigue equation, the paper establishes the fatigue stress coefficient which is used in the load stress calculation for lean concrete as undersurface of cement concrete pavement, and the structure coefficient of flexural tensile strength which is used in the flexural stress check for lean concrete as base of asphalt pavement.

Key words: pavement engineering; lean concrete; fatigue equation; load fatigue stress coefficient; tensile strength structure coefficient