

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2010.03.007

掺粉煤灰再生混凝土疲劳性能试验研究

季天剑^{1,2}, 肖 鹏³, 高玉峰²

(1. 南京航空航天大学土木工程系, 江苏 南京 210016; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225009)

摘要:在室内进行了粉煤灰再生混凝土小梁的弯曲疲劳试验, 采用威布尔模型, 得到了粉煤灰再生混凝土的疲劳方程, 并与普通水泥混凝土以及粉煤灰贫混凝土的疲劳方程做了比较. 结果表明, 粉煤灰再生混凝土的疲劳性能与普通水泥混凝土相似, 特别是在应力水平较低部分基本一致, 粉煤灰再生混凝土能够承受行车荷载的重复作用.

关键词:再生混凝土 粉煤灰 疲劳强度

中图分类号: TU502+.6; TU528.0 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2010)03-0274-04

再生混凝土的使用不仅解决了废旧混凝土材料的处置问题, 而且节约天然沙石, 降低了建设成本, 更重要的是能够节约土地资源和保护环境, 社会效益显著, 是实现环境资源可持续利用的重要策略之一. 因此, 世界上很多国家都进行了再生混凝土的研究, 并取得了很多成果.

在道路建设中再生混凝土的使用已经有很长时间了, 但再生混凝土主要用于路面基层, 而用于新建水泥混凝土面层较少. Nataatmadja 等^[1]对 4 种不同再生骨料的路用性能进行了研究, 结果表明如果再生骨料的生产质量能够得到保证, 那么完全可以用于道路的基层或者底基层. Kuo 等^[2]对在沥青路面的石灰碎石基层中使用再生骨料进行了调查, 认为通过质量控制能够得到性能良好的道路基层. Molenaar 等^[3]研究了再生骨料的级配、组成以及压实对其力学性能的影响, 认为再生骨料能够建造良好性能的道路基层. 张立明^[4]的研究表明水泥稳定再生骨料基层和添加碎石再生骨料基层的力学指标均满足规范要求. 石义海^[5]检测了再生骨料二灰碎石的主要力学性能指标, 结果表明用再生骨料替代天然骨料用于道路二灰碎石基层是可行的.

对再生骨料用于水泥混凝土面层的研究, 主要集中在再生混凝土室内试验方面, 目前还没有大规模的应用到工程实践中. 肖益民等^[6]对再生混凝土的路用性能进行了较为系统的研究, 认为利用再生骨料修筑水泥混凝土路面, 能够满足相关的技术要求, 并且在合宁高速公路的路面维修中使用了再生混凝土. 美国密歇根州利用再生混凝土重建了几条州际高速公路^[7], 因再生骨料中含有新旧砂浆, 收缩系数比较大, 发现路面抗冻融循环能力较差, 存在 D 形开裂现象.

水泥混凝土路面的使用年限长, 对材料的耐久性要求高. 现有的研究表明再生混凝土的抗冻性较差^[8], Gokce 等^[9]的研究指出再生混凝土的抗冻能力主要取决于再生集料表面附着的水泥砂浆的抗冻性, Mandal 等^[10]认为再生混凝土的耐久性比普通混凝土的差, 但可以通过掺入粉煤灰来提高, 粉煤灰改善了再生混凝土的微观组成并能填补再生骨料的部分裂缝^[11]. 本文对掺入粉煤灰的再生混凝土疲劳性能进行了试验研究.

1 试验原材料

水泥:普通硅酸盐水泥(标号 42.5), 密度、安定性和强度等各项指标符合国家标准, 用量为 300 kg/m³.

粉煤灰:干排粉煤灰, 达到 II 级灰的技术要求, 用量为 90 kg/m³.

粗集料:再生骨料用量为 850 kg/m³, 碎石用量为 360 kg/m³.

细集料:中砂, 细度模数为 2.6, 用量为 560 kg/m³.

水:自来水, 用量为 150 kg/m³.

外加剂:FDN 高效减水剂, 水泥用量(质量分数)的 1%.

其中再生骨料利用废弃的旧水泥混凝土路面经过颚式破碎机轧制,筛分后选用了 20 ~ 40 mm 粒径的粗骨料.

再生混凝土采用强制式拌和机搅拌,其中干拌为 1 min,湿拌为 2 min,搅拌均匀后成型小梁试件,尺寸为 150 mm × 150 mm × 550 mm,并在振动台上振动 2 min. 试件成型后 24 h 脱模,先在标准养护室内养护 28 d,然后自然养生 90 d.

2 基本性能试验

在成型疲劳试件的同时,成型了粉煤灰再生混凝土的抗压试件(150 mm × 150 mm × 150 mm),并用小梁进行了抗折静力(三分点加载)测试,试验参照标准^[12]进行,7 d,28 d,90 d 的抗压强度分别为 25.3 MPa,35.8 MPa 和 53.1 MPa,抗折强度分别为 4.3 MPa,5.5 MPa 和 6.2 MPa.

3 疲劳试验

由于混凝土材料的离散性对疲劳性能的影响极为敏感,只要抗折强度偏高或者偏低,在相同应力比条件下将引起疲劳次数的明显波动,造成试验结果的误差,为了准确判断试件的抗折强度,必须在试件的配料、拌和、成型、养护以及测试等各个环节严格控制.

小梁疲劳试验采用三分点加载,支座距端头的距离为 50 mm,2 个加载点间距为 150 mm. 疲劳试验之前,为了消除因接触不良而产生的误差,对试件反复预加 5 kN 的荷载. 疲劳试验的加载模式有控制应力和控制应变 2 种,其中控制应力比控制应变容易实现,再现能力较好,试验时间较短,而且控制应力试验所需试件数量较少,疲劳数据点分散程度较小,精度高. 因此本试验采用应力控制的加载模式.

加载的波形对材料的疲劳寿命是有影响的,通常认为正弦波形与实际路面受到的荷载波形比较接近,因此疲劳试验荷载波形采用正弦波(图 1). 在试验中为了加快速度,相邻波形间没有插入间隙时间. 为了避免长时间试验可能出现零点漂移而引起的脱空现象,从而对试件产生冲击作用,试验设置正弦波荷载的最小荷载 $p_{\min}$ 为最大荷载 $p_{\max}$ 的 10%,即荷载的循环特征值 $\rho = p_{\min}/p_{\max} = 0.1$. 荷载循环特征值 ρ 对疲劳试验的结果影响很大,一般而言, ρ 越大,振幅越小,疲劳寿命越高,为了研究的可比性,本文采用了与普通水泥混凝土相同的数值. 加载频率选用 10 Hz,相当于车辆的行驶速度为 60 km/h.

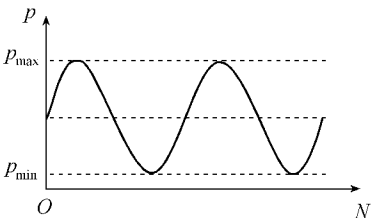


图 1 疲劳试验加载示意图
Fig. 1 Loading of fatigue tests

疲劳试验的应力水平分别为 0.80,0.75,0.70,0.65,0.60 和 0.55,试验结果如表 1 所示.

表 1 疲劳试验结果
Table 1 Results of fatigue tests

应力水平 S	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
疲劳寿命 N	816,835,908	6 004,6 521,9 607	10 503,18 124,22 038	193 284,215 835, 238 727,250 589	809 637,986 687, 1 489 341,1 702 397,2 000 000 *

注: * 表示未断.

4 试验结果分析

4.1 疲劳寿命的概率分布

由表 1 的试验结果可知,疲劳寿命 N 是一个随机量,离散性很大,只有详细研究其概率分布,才能较为准确全面地了解其疲劳规律. 现有研究表明水泥混凝土的疲劳寿命符合两参数的威布尔分布,因此假设粉煤灰再生水泥混凝土的疲劳寿命服从两参数的威布尔分布,并进行检验.

如果疲劳寿命 N 服从两参数的威布尔分布,那么失效概率 P 应满足:

$$P = F(N) = 1 - \exp\left(-\frac{N^m}{t_0}\right) \quad (N \geqslant 1, m > 0, t_0 > 0)$$

(1)

式中: m —— 形状参数, t_0 —— 尺度参数.

用式(1)来检验试验结果是否服从威布尔分布比较复杂,将其转化为对数形式:

$$\ln \frac{1}{1-P} = m \ln N - \ln t_0$$

(2)

如果试验数据的回归分析表明 $\ln \frac{1}{1-P}$ 和 $\ln N$ 之间呈现很好的线性关系(即相关系数 r 比较高),则假设成立,反之不成立. 根据表 1 的数据进行回归分析,回归系数和相关系数如表 2 所示.

从表 2 可见,二者的线性关系较好,相关系数亦较高. 这说明掺粉煤灰再生混凝土的疲劳寿命服从两参数的威布尔分布. 此外,在应力水平为 0.80 时相关系数为 0.829 9,0.75 时相关系数为 0.908 1,和应力水平较小时的相关系数相比较小,说明在高应力水平下,疲劳寿命的离散性较大,这与以往水泥混凝土的疲劳试验结果相同.

4.2 考虑失效概率的疲劳方程

由于疲劳强度的离散性,研究混凝土的疲劳强度必须考虑其失效概率. 前面已经检验了疲劳寿命服从两参数的威布尔分布,由式(2)可得:

$$N = [-t_0 \ln(1-P)]^{\frac{1}{m}}$$

(3)

将表 2 中的回归系数代入式(3),就得到不同应力水平下,相应于不同失效概率 P 的疲劳寿命 N ,如表 3 所示.

水泥混凝土的疲劳方程通常有单对数疲劳方程和双对数疲劳方程 2 种表达形式,然而在实际应用中,往往需要解决低应力水平下的疲劳寿命,即将疲劳曲线沿 $S \rightarrow 0$ 方向外延. 双对数方程能够满足其外延的边界条件,因此本文主要研究双对数疲劳方程:

$$\lg S = \lg a - b \lg N$$

(4)

对于表 3 中的数据,按式(4)回归,结果如表 4 所示.

分析表 4 中回归系数 a 和 b 的变化规律,发现 P 和 a 的相关性较大,而 b 几乎不变,因此可用 b 的平均值 0.039 7 代入到式(4)中. 研究 P 和 a 的关系,用幂函数表示为

$$a = 1.053 6 P^{0.0103} \quad (r = 0.996 2)$$

(5)

则考虑失效概率的疲劳方程为

$$\lg S = \lg(1.053 6 P^{0.0103}) - 0.039 7 \lg N$$

(6)

4.3 不同疲劳方程的比较

文献[13]对普通水泥混凝土弯曲疲劳性能进行了研究,并得出

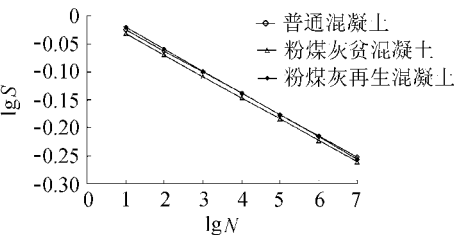


图 2 不同材料的疲劳方程对比

Fig. 2 Comparison of fatigue equations for different materials

了双对数的疲劳方程,赵炜诚等[14]得出了粉

煤灰贫混凝土的疲劳方程. 为了与本文得出的疲劳方程进行对比分析,分别取失效概率为 0.50 时的回归参数作图,如图 2 所示.

从图 2 可以看出,3 种不同材料的疲劳方程在斜率上很接近,疲劳曲线的轨迹基本一致,说明这 3 种材料具有相似的疲劳规律. 特别是粉煤灰再生混凝土与普通水泥混凝土的疲劳曲线几乎一致,尤其在应力水平较低部分近似重合,表明粉煤灰再生

表 2 威布尔分布回归分析

Table 2 Regression analysis of Weibull distribution

应力水平 S	m	$\ln t_0$	r
0.80	9.618 0	65.099 0	0.829 9
0.75	2.846 2	25.711 0	0.908 1
0.70	2.023 3	20.024 9	0.982 0
0.65	7.285 7	90.184 0	0.994 5
0.60	2.372 4	33.640 9	0.975 7

表 3 不同失效概率对应的疲劳寿命

Table 3 Probability of failure and corresponding fatigue life

失效概率 P	不同应力水平的疲劳寿命 N				
	$S = 0.80$	$S = 0.75$	$S = 0.70$	$S = 0.65$	$S = 0.60$
0.05	476	1 089	1 126	107 054	124 506
0.10	639	2 951	4 579	158 031	411 734
0.15	688	3 800	6 535	174 442	557 686
0.20	720	4 425	8 096	185 134	669 468
0.25	744	4 947	9 469	193 367	765 181
0.30	764	5 408	10 736	200 228	851 665
0.35	782	5 833	11 940	206 224	932 441
0.40	797	6 233	13 107	211 638	1 009 670
0.45	811	6 617	14 259	216 647	1 084 870
0.50	825	6 993	15 412	221 375	1 159 235

表 4 双对数疲劳方程回归分析

Table 4 Regression analysis of double logarithmic fatigue equation

失效概率 P	a	b	r
0.05	1.020 5	0.040 0	0.971 5
0.10	1.029 4	0.040 0	0.979 8
0.15	1.034 0	0.039 9	0.983 8
0.20	1.037 1	0.039 8	0.986 3
0.25	1.039 2	0.039 7	0.988 0
0.30	1.040 9	0.039 6	0.989 3
0.35	1.042 3	0.039 5	0.990 3
0.40	1.043 5	0.039 5	0.313 4
0.45	1.044 5	0.039 4	0.991 7
0.50	1.045 2	0.039 3	0.992 2

水泥混凝土路面完全可以与普通水泥混凝土一样承担行车交通荷载。粉煤灰贫混凝土因其水泥含量低,性能变异性大,适宜作为路面的基层材料,从图2也可以看出其疲劳曲线与普通水泥混凝土相差较大。

5 结 语

对粉煤灰再生水泥混凝土的疲劳性能进行了试验研究,通过疲劳数据的分析,得到了含有失效概率的疲劳方程,粉煤灰再生混凝土的疲劳性能与普通水泥混凝土相当,可用于水泥混凝土路面建设,但因粉煤灰再生混凝土的初期强度较低,在使用中应注意适当推迟交通开放时间。

参考文献:

- [1] NATAATMADJA A, TAN Y L. Resilient response of recycled concrete road aggregates [J]. Journal of Transportation Engineering, 2001, 127(5): 450-453.
- [2] KUO S S, MAHGOUB H S, NAZEF A. Investigation of recycled concrete made with limestone aggregate for a base course in flexible pavement [J]. Transportation Research Record, 2002, 1787(11): 99-108.
- [3] MOLENARR A A A, VAN NIEKERK A A. Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials [J]. Transportation Research Record, 2002, 1787(8): 73-82.
- [4] 张立明. 水泥稳定再生水泥混凝土骨料基层性能研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] 石义海. 废弃混凝土再生骨料道路基层试验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [6] 肖益民, 黄晓明. 再生粗集料混凝土路用性能研究 [J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2007(3): 103-105. (XIAO Yi-min, HUANG Xiao-ming. Study on road-purposed performance of recycle concrete coarse aggregate [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development: Application Technology, 2007(3): 103-105. (in Chinese))
- [7] EMBACHER R A. Mitigation of recurrent d-cracking in Portland cement concrete comprising recycled concrete aggregate [C]// Proceedings of the International RILEM Workshop. Minneapolis, USA: RILEM Publications, 2002: 251-264.
- [8] SALEM R M, BURDETTE E G, JACKSON N M. Resistance to freezing and thawing of recycled aggregate concrete [J]. ACI Materials Journal, 2003, 100(3): 216-221.
- [9] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate: the role of air content in demolished concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(5): 799-806.
- [10] MANDAL S, CHAKARBORTY S, GUPTA A. Some studies on durability of recycled aggregate concrete [J]. Indian Concrete Journal, 2002, 76(6): 385-388.
- [11] 吴红利, 宋少民. 再生骨料混凝土耐久性试验研究 [J]. 商品混凝土, 2006(4): 25-30. (WU Hong-li, SONG Shao-min. Study on recycled aggregate concrete durability [J]. Ready-Mixed Concrete, 2006(4): 25-30. (in Chinese))
- [12] JTGE03—2005 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程 [S].
- [13] 交通部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: 69-72.
- [14] 赵炜诚, 许志鸿. 粉煤灰贫混凝土的疲劳性能研究 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(4): 475-479. (ZHAO Wei-cheng, XU Zhi-hong. Fatigue performance of lean concrete with fly ash [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(4): 475-479. (in Chinese))

Fatigue performance of recycling concrete with fly ash

JI Tian-jian^{1,2}, XIAO-peng³, GAO Yu-feng²

(1. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Flexural fatigue tests on beams of recycling concrete with fly ash were performed in the laboratory. A fatigue equation for the probability of failure of the recycling concrete with fly ash was derived according to the Weibull probability distribution. The fatigue equation was compared with one for Portland cement concrete and one for lean concrete with fly ash. The results show that the flexural fatigue performance of the recycling concrete with fly ash is similar to that of Portland cement concrete, especially at low stress. Recycling concrete with fly ash can satisfy the needs of repeated vehicle loads.

Key words: recycling concrete; fly ash; fatigue strength