

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.01.007

疲劳荷载作用下的混凝土变形规律

张培,雷冬

(河海大学力学与材料学院,江苏南京 210098)

摘要:通过混凝土疲劳试验,总结并验证了疲劳荷载下混凝土变形的一般规律:三阶段演变规律和第2阶段临界应变的不变性。讨论了上述规律的使用条件,其中三阶段演变规律属于普遍规律,与混凝土强度以及荷载形式无关;第2阶段临界应变的不变性只适用于强度等级相同的混凝土材料,但与加载历史无关。基于上述变形规律提出计算混凝土疲劳寿命的公式,该公式可用于预测现役混凝土结构的剩余疲劳寿命。

关键词:混凝土变形规律;疲劳荷载;疲劳寿命

中图分类号:TU528 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2015)01-0034-05

Deformation laws of concrete under fatigue loading

ZHANG Pei, LEI Dong

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on experiments on concrete specimens subjected to fatigue loading, the applicability of the three-stage deformation law and the invariance of the critical strain in the second stage are inspected. It is demonstrated that the three-stage law is universally applicable and has nothing to do with concrete strength and load form, and that the invariance of the critical strain in the second stage is only suitable for concrete materials with the same strength grade and has nothing to do with the loading history. A formula for calculating the fatigue life is put forward based on the above deformation laws, and the formula can be used to predict the residual fatigue life of existing concrete structures.

Key words: concrete deformation law; fatigue loading; fatigue life

许多混凝土结构如吊车梁、公路和桥梁等在工作期间都会受到疲劳荷载的作用,在疲劳荷载作用下,结构会发生低于静载强度的脆性破坏,即疲劳破坏。目前,混凝土疲劳问题的研究以宏观的损伤力学方法为主,即首先选择一个损伤变量,通过试验和理论分析得到损伤演变方程或本构模型,然后在此基础上观察疲劳损伤的累积规律,同时预测剩余疲劳寿命。描述混凝土损伤的物理力学量有很多,如变形、空隙面积^[1]、弹性模量^[2-3]等。由于疲劳荷载下混凝土的变形在观察和测量上相对容易,因此常被用来定义材料损伤^[4-8]。潘华等^[4]利用疲劳荷载下混凝土的变形规律得到了损伤演变方程;林燕清等^[5]、王瑞敏等^[6]、朱劲松等^[7]基于混凝土变形规律,建立了损伤累积准则以及剩余寿命的预测公式。因此,各种混凝土疲劳变形规律的合理性和适用性非常重要,然而目前关于这一方面的专门研究并不多。

本文根据混凝土疲劳试验结果及相关文献,总结和验证了疲劳荷载下混凝土变形的基本规律,并讨论它们各自的适用条件,推导了基于变形规律的混凝土疲劳寿命计算公式。

收稿日期:2014-01-05

基金项目:国家自然科学基金(11002048,11132003);“十二五”国家科技支撑计划(2013BAB06B01)

作者简介:张培(1991—),男,安徽宣城人,硕士研究生,主要从事混凝土疲劳研究。E-mail:jfmzp1991@163.com

通信作者:雷冬,副教授。E-mail:leidong@hhu.edu.cn

1 混凝土疲劳试验

1.1 试件的制备

试验使用的试件为 100 mm×100 mm×100 mm 混凝土立方体试件,混凝土强度设计等级为 C25。混凝土所用水泥为普通硅酸盐水泥,细骨料为河沙,粗骨料为碎石,拌和水为自来水,每立方米混凝土中, $m(\text{水泥}):m(\text{水}):m(\text{砂}):m(\text{碎石})=367:180:649:1204$ 。

1.2 试验加载与测量

疲劳加载:试验采用多级变幅轴向加载,荷载逐级递增,每级加载 1 000 次,直至破坏。加载波形为正弦波,加载频率为 5 Hz。数据采集的时间间隔设为 1 s,即每循环 5 次采集一个完整的周期。

变形测量:试验过程中,控制系统每秒采集一次数据,每次采集的数据为一系列荷载、位移数值,通过这些数据和相应的材料参数可以得到一个循环周期的应力应变曲线。试验中试件的变形通过测量夹头位移得到,测得的变形为试件轴向整体变形,相比应变片测得的局部变形,更能反映混凝土试件整体的疲劳性能。每一个循环加载周期内都有 2 个特殊的应变值(荷载上限对应的最大疲劳应变与荷载下限对应的最小疲劳应变)。试验中的荷载下限为 0 kN,因此最小疲劳应变即为残余应变。

1.3 试验结果

图 1 为试件在疲劳加载下的荷载~位移曲线,该试件经历了 100 kN、110 kN、120 kN、130 kN 共 4 级加载后破坏,其中前 3 级荷载各加载 1 000 次,第 4 级荷载加载至 195 次后试件破坏,整个过程共加载 3 195 次。从图 1 中的循环曲线可以看出,虽然 130 kN 的疲劳荷载仅作用不到 200 次,但是该加载阶段的位移却变化很快,尤其在最后的几次循环加载中,位移急剧增加并且循环曲线明显地凸向位移轴,这表明试件的刚度在不断降低;而在前 3 000 次的加载过程中,各级荷载下的循环曲线形状基本相同,表明试件的刚度变化很小。上述现象说明疲劳荷载下试件刚度的衰减主要发生在加载的最后阶段,而在这之前刚度变化都不明显,因此刚度的大小不适合作为混凝土疲劳破坏的判据。

图 2 为上述 4 级加载过程中最大疲劳应变 $\varepsilon_{\max}$ 和残余应变 ε_r 的演变曲线。通过对比可以看出,二者变化趋势基本相同,都可以用来表征疲劳荷载下材料的损伤过程^[7],唯一区别在于荷载变化时残余变形值的变化不明显,这说明残余应变对荷载变化的敏感性不如最大疲劳应变。

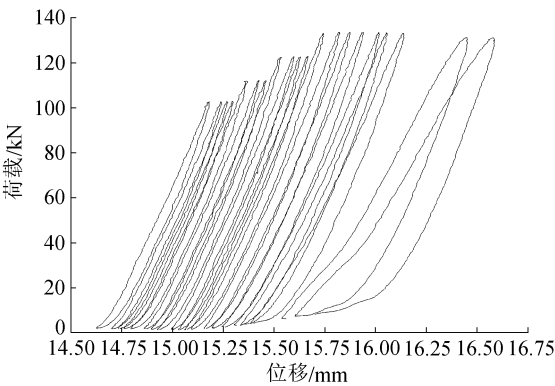


图 1 荷载~位移曲线

Fig. 1 Load-displacement curve

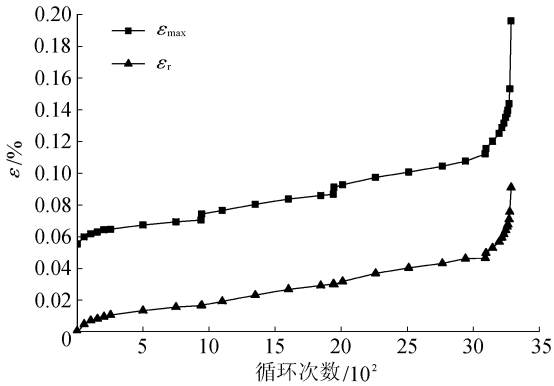


图 2 最大疲劳应变与残余应变的演变曲线

Fig. 2 Evolution of maximum fatigue strain and residual strain

2 疲劳荷载下混凝土基本变形规律

2.1 三阶段演变规律

混凝土疲劳损伤与变形的发展呈三阶段演变规律,这是国内外学者普遍认同的一个结果,并在大量试验中得到验证^[9-13]。所谓三阶段演变规律,是指在疲劳荷载下,结构或材料的变形需经过初始发生、稳定发展以及失稳破坏这 3 个阶段,并且其中初始阶段和破坏阶段约各占总寿命的 10%,而稳定发展阶段约占总寿命的 80%。本文中的试验虽然是变幅加载,但也表现出疲劳荷载下的三阶段演变规律。从图 2 可以看出,该曲线两端呈非线性变化,中间为线性变化,也表现为 3 个阶段。虽然在第 2 阶段荷载变化时会出现变形值

的跳跃,但其线性增长规律始终保持不变,这充分说明了变形作为一种材料性能的表征,它的基本发展规律与荷载无关。由于变形发展第2阶段呈现良好的线性规律,并且占据整个疲劳寿命的近80%,因此这一阶段的应变变化规律常被用来作为研究混凝土疲劳寿命预测^[5]和损伤累积规律^[7]的基础。

2.2 应变稳定增长速率的影响因素

根据三阶段演变规律,应变在第2阶段的增长速率为一定值,从中可以进一步推出结论:在疲劳变形发展的稳定阶段,应变增长速率仅与应力水平有关,而与当前的损伤程度无关。这一结论在等幅疲劳过程中非常明显,可以作如下简单的证明:将等幅疲劳荷载下应变发展的第2阶段看成一个不连续的加载过程,即将整个加载过程假想成若干段,每段施加的荷载相同,且各段之间存在很小的时间间隔,在这种情况下,每段加载起始时的应变和材料损伤都不相同,但各段的应变增长速率却保持不变。

将这一性质应用在变幅疲劳加载上,可以进一步得到结论:在变幅加载过程中,第2阶段某一级应力水平下的应变增长速率与该应力水平作等幅疲劳加载时的应变增长速率相等。根据这一结论,就可以利用实验室变幅疲劳加载试验结果来预测现役混凝土结构的剩余疲劳寿命。

2.3 第2阶段临界应变的不变性

图3为等幅疲劳荷载下典型的应变发展曲线,其中第2阶段的初始应变为 ε_{II0} ,第2阶段的极限应变为 ε_{IIC} ,图中 N_f 为疲劳寿命, ε_{II0} 和 ε_{IIC} 统称为第2阶段的临界应变。试验^[14-15]表明,疲劳荷载下混凝土第2阶段的临界应变与疲劳荷载无关,仅取决于材料本身的属性。图4为多级疲劳荷载作用下的 $\varepsilon_{\max} \sim N$ (循环次数)曲线,荷载从50 kN 梯级增加至140 kN 破坏。该曲线的形状与图2相差很大,梯级荷载一目了然,由于前8级荷载的应力水平都很小,应变的增长速率几乎为零。但是,根据试验结果,图4中第2阶段的极限应变为0.119%,而图2中 $\varepsilon_{\max}$ 的极限应变为0.112%,二者仅相差5.88%。由此可见,无论材料经历了怎样的加载历史,它在第2阶段的极限应变总保持不变,因此可以通过应变大小判断材料是否即将破坏。

根据上述试验结果,可以得到如下规律:处于同一强度等级的混凝土试件,在不同荷载作用下应变发展第2阶段的初始应变 ε_{II0} 和极限应变 ε_{IIC} 均为常数。可将这一规律称为应变发展第2阶段临界应变的不变性。

2.4 疲劳荷载下混凝土变形规律的适用条件

疲劳荷载下混凝土变形的三阶段演变规律是一条普遍规律,它的普遍性表现在它不仅适用于纵向应变的演变规律,还适用于疲劳荷载下混凝土其他物理力学性能如孔隙面积、弹性模量等的变化情况。因为这种普遍的适用性,三阶段演变规律被看作是对疲劳荷载下混凝土整体损伤演变的一种表征,常被用来作为疲劳损伤规律研究的基础。

第2阶段临界应变的不变性仅适用于相同强度的混凝土材料,其中不变性是指临界应变的大小不受荷载的影响,只和材料的性质有关。

3 基于变形规律的疲劳寿命预测方法

3.1 等幅疲劳荷载下变形发展的经验公式

王瑞敏等^[14]根据 $\varepsilon \sim N$ 曲线的一般规律,结合试验结果进行回归分析,得到了计算混凝土纵向最大疲劳应变的经验公式:

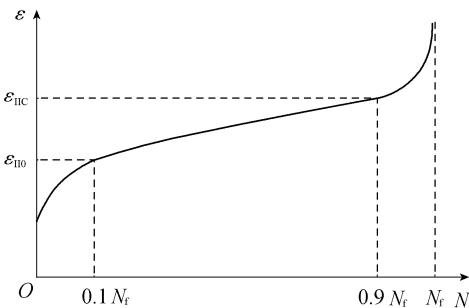


图3 典型的疲劳应变发展曲线
Fig. 3 Typical fatigue strain curve

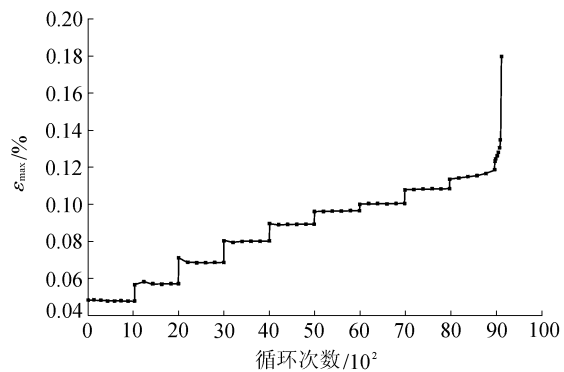


图4 多级疲劳荷载作用下的最大应变发展曲线
Fig. 4 Evolution of maximum strain during multiple-stage fatigue loading

$$\varepsilon_{\max}(N)=\begin{cases} \varepsilon_{0\max}+\frac{0.0016\varepsilon_{0\max}^{1.98}\left(1-\frac{\varepsilon_{0\min}}{\varepsilon_{0\max}}\right)^{5.27}}{\varepsilon_{\text{II C}}^{1.41}}N^{0.395} & 0<N\leqslant 0.1N_f \\ \varepsilon_{\max}(0.1N_f)+1.25\left[\varepsilon_{\text{II C}}-\varepsilon_{\max}(0.1N_f)\right]\left(\frac{N}{N_f}-0.1\right) & 0.1N_f<N\leqslant N_f \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_{\max}(N)$ ——荷载循环 N 次后的最大疲劳应变； $\varepsilon_{0\min}$ ——荷载下限作用下的初始应变； $\varepsilon_{0\max}$ ——荷载上限作用下的初始应变。

已知某一混凝土材料的 $\varepsilon_{0\min}$ 、 $\varepsilon_{0\max}$ 以及 $\varepsilon_{\text{II C}}$ 时,通过上述公式就可以计算出任意 N 次循环后的纵向应变 $\varepsilon_{\max}(N)$ 。该经验公式用一个多项式来表征疲劳荷载作用下第二阶段应变的演变规律,利用第 2 阶段极限应变以及应变增长速率的不变性计算应变值。

本文选取 4 级疲劳加载的试验结果,将相关的应变参数($\varepsilon_{0\min}=0$ 、 $\varepsilon_{0\max}=0.056\%$ 、 $\varepsilon_{\text{II C}}=0.112\%$)代入式(1),得到第 1 级荷载等幅加载时初始阶段的应变曲线(图 5)。从图 5 中可以看出,由式(1)中的第 1 个公式得到的初始阶段应变增长曲线的形状与实际结果比较相似。

3.2 利用变形规律预测混凝土疲劳寿命

试验结果^[11]表明,由于混凝土静载强度的离散性,很难利用某一个公式来准确地预测混凝土的疲劳寿命 N_f 。因此,如果利用式(1)中的第 2 个公式来预测一次疲劳试验过程中的变形量,将很难得到准确的结果,它的误差主要产生于寿命预测的误差。

将式(1)中的第 2 个公式作简单变换,可得到 N_f 的表达式:

$$N_f=\frac{\varepsilon_{\text{II C}}-\varepsilon_{\text{II 0}}}{0.8V_{\varepsilon_{\text{II}}}} \quad (2)$$

式中： $V_{\varepsilon_{\text{II}}}$ ——第二阶段应变增长速率。

由式(2)可知,只要知道疲劳加载第 2 阶段的应变临界值 $\varepsilon_{\text{II 0}}$ 、 $\varepsilon_{\text{II C}}$ 以及应变增长速率 $V_{\varepsilon_{\text{II}}}$,便可以计算得到试验荷载下的疲劳寿命。

4 结 论

- a. 疲劳荷载下的混凝土应变发展主要呈 3 个阶段:初始阶段、发展阶段和破坏阶段。其中第 1 阶段、第 3 阶段约各占疲劳寿命的 10%。第 2 阶段的应变增长速率为一定值,速率大小与荷载水平有关。
- b. 对于强度等级相同的试件,疲劳荷载下第 2 阶段的初始应变和极限应变均为定值,这一性质取决于材料本身的属性,与荷载大小以及加载历史无关。
- c. 在疲劳应变发展规律的基础上提出了计算混凝土疲劳寿命的公式,该公式中仅有第 2 阶段应变增长速率 $V_{\varepsilon_{\text{II}}}$ 与具体荷载有关,其余参数均为定值,可由试验测定。

参考文献:

[1] ALLICHE A. Damage model for fatigue loading of concrete [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(9): 915-921.

[2] XIAO Jianzhuang, LI Hong, YANG Zhenjun. Fatigue behavior of recycled aggregate concrete under compression and bending cyclic loadings [J]. Construction and Building Materials, 2013, 38: 681-688.

[3] CHEN J Y, ZHANG Z X, DONG H W, et al. Experimental study on dynamic damage evolution of concrete under multi-axial stresses [J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(7): 1784-1790.

[4] 潘华, 邱洪兴. 基于损伤力学的混凝土疲劳损伤模型[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2006, 36(4): 605-608. (PAN Hua, QIU Hongxing. Fatigue model of concrete based on continuum damage mechanics [J]. Journal of Southeast University: Natural Sciences, 2006, 36(4): 605-608. (in Chinese))

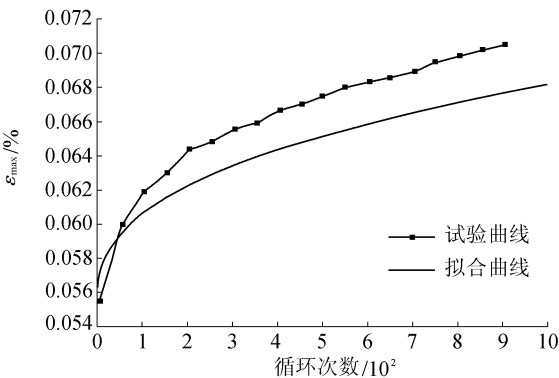


图 5 基于经验公式的应变曲线
Fig. 5 Strain curve based on empirical formula

[5] 林燕清, 欧进萍, 黄文虎. 混凝土疲劳损伤积累和剩余寿命预测研究[C]//柳春图. 疲劳与断裂2000——第十届全国疲劳与断裂学术会议论文集. 北京: 气象出版社, 2000: 464-468.

[6] 王瑞敏, 宋玉普, 赵国藩. 混凝土疲劳累积损伤准则[J]. 水利学报, 1992, 23(5): 72-76. (WANG Ruimin, SONG Yupu, ZHAO Guofan. Fatigue damage cumulative rule of concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, 23(5): 72-76. (in Chinese))

[7] 朱劲松, 肖汝诚, 宋玉普. 混凝土双轴抗压疲劳累积损伤规律试验研究[J]. 土木工程学报, 2005, 38(6): 104-109. (ZHU Jinsong, XIAO Rucheng, SONG Yupu. Experimental study on the cumulative fatigue damage of plain concrete under biaxial compression [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(6): 104-109. (in Chinese))

[8] CAO Wei, SONG Yupu, LIU Haicheng. Fatigue properties of plain concrete under triaxial compressive cyclic loading [J]. China Ocean Engineering, 2004, 18(3): 457-468.

[9] 张滨生, 吴科如. 水泥混凝土疲劳破坏的损伤力学分析[J]. 同济大学学报, 1989, 17(1): 59-69. (ZHANG Binsheng, WU Keru. Fatigue rupture of cement concrete analysed by damage mechanics [J]. Journal of Tongji University: Natural Sciences, 1989, 17(1): 59-69. (in Chinese))

[10] 赵造东, 张立翔, 李泽. 基于变形模量的水工混凝土疲劳损伤研究[J]. 水电能源科学, 2011, 29(4): 107-109. (ZHAO Zaodong, ZHANG Lixiang, LI Ze. Research on fatigue damage of concrete in hydraulic structure based on deformation modulus [J]. Water Resources and Power, 2011, 29(4): 107-109. (in Chinese))

[11] 宋玉普. 混凝土结构的疲劳性能及设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 73

[12] LIU Feng, ZHENG Wanhua, LI Lijuan, et al. Mechanical and fatigue performance of rubber concrete [J]. Construction and Building Materials, 2013, 47: 711-719.

[13] WANG Wei, WU Sigang, DAI Hongzhe. Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 434(2): 347-351.

[14] 王瑞敏, 赵国藩, 宋玉普. 混凝土的受压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(4): 38-47. (WANG Ruimin, ZHAO Guofan, SONG Yupu. Fatigue of plain concrete under compression [J]. China Civil Engineering Journal, 1991, 24(4): 38-47. (in Chinese))

[15] KIM J K, KIM Y Y. Experimental study of the fatigue behavior of high strength concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(10): 1513-1523.

· 简讯 ·

第八届全国环境学科建设研讨会在河海大学召开

2014 年 12 月 20—21 日, 由清华大学环境学院与河海大学环境学院共同主办的第八届全国环境学科建设研讨会在河海大学召开。河海大学校长徐辉出席开幕式并致欢迎词, 清华大学环境学院院长贺克斌主持研讨会。清华大学郝吉明院士、河海大学王超院士以及全国近 30 所高校的环境学院相关负责人参加了本届研讨会。

本届研讨会的主题是“科技体制改革与环境学科发展”。在为期 2 天的研讨会上, 与会代表结合目前全球严峻的环境形势及国内科技体制改革的重大机遇, 围绕环境学科发展的前景展开了热烈讨论。代表们交流了学科建设、年轻教师培养、团队建设中的经验, 并一致认为, 今后应进一步加强相互协同创新, 在保持各自学科特色的基础上, 各兄弟院校之间应建立密切联系, 互相学习交流、携手共进, 为打赢大气污染、水污染、土壤污染防治三大战役贡献力量。与会代表指出, 当前全球环境问题错综复杂, 我国环境问题日益尖锐, 这对大学环境院系既是挑战, 又是机遇。此次研讨会的召开将进一步促进国内环境院系的交流与合作, 为解决我国环境问题乃至全球环境问题建言献策。

(本刊编辑部供稿)