

定侧压混凝土双轴压疲劳性能研究

吕培印¹, 宋玉普², 李庆斌¹

(1. 清华大学水利系, 北京 100084; 2. 大连理工大学土木系, 辽宁 大连 116024)

摘 要 : 利用大型混凝土静、动三轴试验机, 完成了 3 种定侧压混凝土的双轴压疲劳试验。观察了试件破坏形态。将单轴压疲劳试验结果与其他试验者的结果作了比较, 验证了结果的有效性。在试验基础上, 分析了双轴压混凝土的疲劳特性和变形规律; 建立了相应的 S-N 关系及考虑侧应力影响的统一疲劳方程。研究结果, 为受复杂重复荷载作用的混凝土结构设计和分析提供了试验依据。

关键词 : 混凝土; 疲劳; 双轴压; 强度

中图分类号 : TU375 **文献标识码 :** A

BEHAVIOR OF CONCRETE UNDER COMPRESSIVE FATIGUE LOADING WITH CONSTANT LATERAL STRESS

LU Pei-yin¹, SONG Yu-pu², LI Qing-bin¹

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China ;

2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The fatigue tests of concrete under biaxial compression with constant confined stress were performed using the static-dynamic triaxial test system. The failure modes of concrete specimens were acquired. The uniaxial test results of fatigue were compared with those obtained by other researchers for validity. The laws of compressive fatigue strength and deformation are analysed based on the results of experiment. The relationship of S-N under certain lateral stress is established and from which the unified fatigue equation accounting for different confined stresses is derived. The results of investigation in this paper offer the basis for design and analysis of concrete structures subjected to triaxial cyclic loading.

Key words: concrete; fatigue; biaxial compression; strength

1 引言

大量混凝土结构, 如桥梁、吊车梁、采油平台和核防御壳等, 长期经受循环荷载的作用, 疲劳破坏是其主要破坏形式之一。混凝土在单轴重复荷载作用下的疲劳性能, 国内外已有较多的研究^[1-5], 而实际结构中的混凝土常处于复杂应力状态, 这类混凝土疲劳试验资料还相当少^[6,7]。开展这方面研究,

对于经受重复荷载作用的重大结构之合理设计和安全使用, 具有重要意义。

2 试验概况

2.1 试验设备

试验设备采用大型静、动三轴电液伺服试验系统。该系统的全貌见图 1。系统由电液伺服阀、电

收稿日期: 2002-10-10; 修改日期: 2002-12-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50078010, 50225927 和 90210010)及中国博士后基金

作者简介: 吕培印(1964), 男, 山西人, 副教授, 博士后, 从事结构工程方面的研究(E-mail: peiyin-lu@163.com);

宋玉普(1944), 男, 辽宁人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事结构工程方面的研究;

李庆斌(1964), 男, 河南人, 教授, 博士, 博士生导师, 从事材料与水工结构方面的研究

子控制线路和三向分别独立的加力架，加载板，液压缸(每向出力为：最大压力 2500kN，最大拉力 500kN)、荷载传感器和位移传感器(LVDT)组成。系统可以实现各种应力比下的三向拉、三向压和三向拉压的静动态试验。



图 1 试验系统

Fig.1 Test system

2.2 试件制作

试件采用 100mm×100mm×100mm 的立方体试件。混凝土配合比为：水泥：砂子：石子：水=383：663：1154：200(kg/m³)，所用水泥为 425[#]硅酸盐水泥，砂子为中砂，石子最大粒径为 20mm。用钢模成型，振动台振捣密实，24h 后脱模。露天盖草浇水养护 28d。本次试验的混凝土龄期为 120d， $f_c=20.47\text{MPa}$ (减摩)。

2.3 试验方法

将试件安装在三轴试验机的加载板间。试件主加载面、侧加载面与各自加载板之间采取减摩措施。减摩材料选用塑料薄膜和甘油。具体做法是：在三层塑料薄膜间夹二层甘油，然后在加载板与塑料薄膜间以及试件与塑料薄膜间各夹一层甘油。

静载试验：先使试件轴心物理对中，并反复预压；后以标准静态加载速率(20MPa/min)施加荷载，直至试件破坏。每种加载工况至少试验 3 个试件。当发现离散性较大时，增加试件数目，以求得数据的完整准确。试件变形用应变片测量。试件承受的荷载和变形均由计算机动态采集。

疲劳试验：先竖向物理对中，反复预压；后完成水平向物理对中和预压(一向)，且加载至预设的侧向荷载值，并保持恒定；接着在竖向以设定的最大、最小荷载，按正弦波方式等幅加载，直至试件破坏或达到预先设定的循环加载次数后停止。侧应

力加载等级分别为 $s_2 / f_c=0, 0.25, 0.5$ (f_c 为轴心抗压强度)。一般每种工况做 4~5 个试件。试件的变形用线性位移计(LVDT)和应变片测量，每一个方向各设置两支，以求它们读数的平均值，得到试件在该方向的位移和应变值。试件承受的反复荷载、侧向荷载和循环加载次数均由计算机动态采集。具体加载工况见表 1。

表 1 疲劳加载工况

Table 1 Fatigue loading parameters

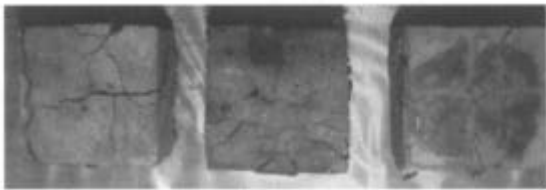
侧应力比量 s_2 / f_c	最大应力水平 $S_{\max}$	应力比 R	加载频率 Hz	试件数
0(单轴)	0.9~0.85	0.2	1	24
	0.8~0.65	0.2	5	
0.25	1.02~1	0.2	1	22
	0.95~0.75	0.2	5	
0.5	1.2~1.15	0.2	1	25
	1.1~0.9	0.2	5	

* 注： s_2 为侧向应力； $S_{\max}$ 为疲劳最大应力与轴心抗压强度之比； $R = s_{\min} / s_{\max}$ 。

3 试验结果及分析

3.1 试件破坏形态

单轴压疲劳破坏时，因试件在加载时采取了减摩措施，消减了加载板对试件加载端面的约束作用，破坏形态呈柱状；侧应力比 $s_2 / f_c=0.25$ 和 0.5 的双轴压疲劳破坏，由于受压两向的压应力作用，试件只能在垂直自由面方向产生拉应变，破坏形态呈片状，见图 2。



(a) 柱状



(b) 片状

图 2 试件破坏形态

Fig.2 Failure modes of specimens

3.2 S-N 关系

按照前节所述试验方法,测得混凝土在不同定侧应力等级和加载水平下的疲劳寿命见表 2。

表 2 疲劳试验结果

Table 2 Results of fatigue test

侧应力比 s_2 / f_c	最大应力水平 $S_{\max}$	疲劳寿命 N_f				
0	0.9	57	72	98	157	177
	0.85	248	283	390	617	624
	0.8	455	574	739	1489	2951
	0.75	12728	23795	47261	49386	
	0.7	63638	798362	826899		
	0.65	2.5×10^6 (未坏)		2.5×10^6 (未坏)		
0.25	1.05	42	69	86	129	282
	1.0	293	439	579	598	
	0.95	686	854	1361	1652	
	0.9	8973	9213	39728		
	0.8	100007	151356	269153		
	0.75	2.5×10^6 (未坏)		2.5×10^6 (未坏)		
0.5	1.2	134	178	189	226	453
	1.15	589	957	1046	1061	1446
	1.1	1259	1641	1977	2512	2738
	1.05	19409	21923	39810		
	0.95	251189	325836	571478		
	0.9	2.5×10^6 (未坏)		2.5×10^6 (未坏)		

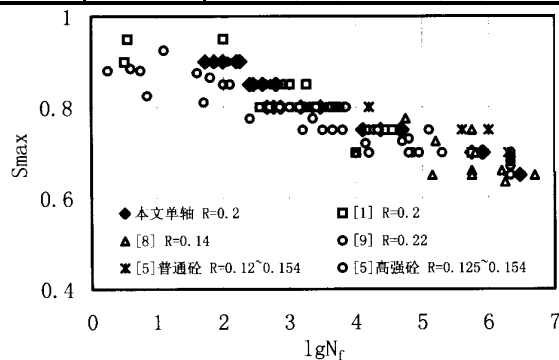


图 3 本文单轴试验结果与其它文献结果的比较

Fig.3 Comparison between the present results and other available data

为了验证本文试验结果的有效性,将表 2 中单轴压疲劳试验结果表示在 S - $\lg N_f$ 坐标中,并与其它文献^[1,8,9]试验结果作了比较,见图 3。其中,文[1]采用圆柱体试件($\Phi \times h=150\text{mm} \times 300\text{mm}$),试验时的静态抗压强度为 45.4MPa;文[5]采用普通和高强

混凝土棱柱体试件($100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 300\text{mm}$),静态抗压强度分别为 26.6MPa 和 64.8MPa;文[8]采用棱柱体试件($76\text{mm} \times 76\text{mm} \times 203\text{mm}$),静态抗压强度为 41MPa;文[9]中采用立方体试件($100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 50\text{mm}$),静态抗压强度为 44MPa。由图可以看出,本文结果与这些文献所给结果的规律是一致的。

如图 4 中所示,回归后得到不同定侧压下的 S-N 关系:

$$\frac{S_2}{f_c} = 0 (\text{单轴}), S_{\max} = -0.05 \lg N_f + 0.978 \quad (1)$$

$$\frac{S_2}{f_c} = 0.25, S_{\max} = -0.0633 \lg N_f + 1.169 \quad (2)$$

$$\frac{S_2}{f_c} = 0.5, S_{\max} = -0.073 \lg N_f + 1.362 \quad (3)$$

式中: $\frac{S_2}{f_c}$ 为侧应力系数; f_c 为棱柱体抗压强度; $S_{\max}$ 为最大应力水平; N_f 为疲劳寿命。

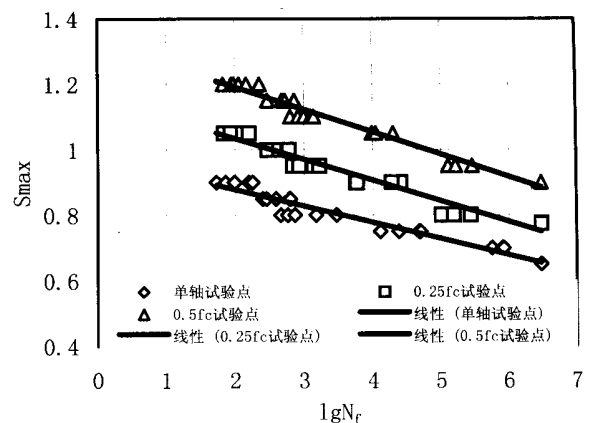


图 4 S-N 曲线

Fig.4 S-N curve

上述三式的相关系数分别为 0.941, 0.949, 0.971。由此得到循环次数 2.5×10^6 次时,侧应力系数 0, 0.25, 0.5 对应的疲劳强度折减系数分别为 0.67, 0.76, 0.89。

由图看出,随着侧应力的增大,定侧压混凝土的 S-N 曲线相对变陡,说明了侧应力对混凝土材料的特性有影响。另外,定侧压双轴压应力状态可有效地阻止微裂纹的扩展,有效提高混凝土的强度。在给应力水平下,定侧压双轴压比单轴压疲劳寿命延长许多;而在相同的加载循环次数下,其疲劳强度比单轴压疲劳强度高,如在疲劳寿命分别为 $N_f=1, 2 \times 10^6$ 次时,由公式(2)、(3)计算得:侧应

力系数 0.25 和 0.5 相应疲劳强度折减系数比单轴时提高 18.65%, 39.34% 和 16%, 36.2%。综合分析不同侧应力条件下的混凝土疲劳强度关系式(1), (2), (3)后, 本文提出如下考虑侧应力影响的 S-N 关系:

$$0 \leq \frac{s_2}{f_c} \leq 0.5, \quad \begin{cases} S_{\max} = a \lg N_f + b \\ a = -0.05 \left(\frac{s_2}{f_c} \right) - 0.05 \\ b = 0.77 \left(\frac{s_2}{f_c} \right) + 0.97 \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 、 b 分别为与 $\frac{s_2}{f_c}$ 相关的材料常数。

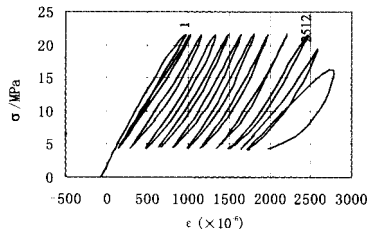
上式中 a 、 b 的相关系数分别为 0.937 和 0.950。式(4)的复相关系数为 0.947。

3.3 变形性能

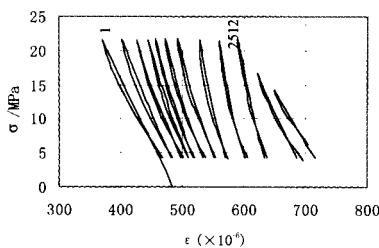
试验过程中, 测量了试件在疲劳向和侧压向的总应变(压应变为“+”;拉应变为“-”)。根据实测结果, 得到不同侧压混凝土疲劳应力、应变关系和总应变与循环加载次数的关系。

3.3.1 应力 - 应变试验曲线

图 5 是 $s_2 = 0.5 f_c$ 、 $s_{\max} / f_c = 1.1$ 时的试验应力 - 应变曲线。由图看出, 在主压向, 加卸载应力 - 应变试验曲线除在初期几次循环凸向主应力轴外, 绝大部分应力 - 应变曲线凹向主应力轴。在侧压向, 侧向应变与主压向应力的循环曲线凸向主应



a) 主向应力 - 主向应变试验曲线



b) 主向应力 - 侧向应变试验曲线

图 5 混凝土双轴压疲劳应力 - 应变试验曲线

Fig.5 Stress-strain curve of concrete under biaxial compression fatigue loading

力轴, 且同一循环最小应力相应卸载应变大于其加载时的应变, 使得侧向压应变随循环次数的增加而增大, 这一变形特点不同于比例双轴压疲劳^[6]的应力 - 应变。

3.3.2 最大应变与循环次数的关系

图 6 是单轴情况下的混凝土疲劳总应变及循环加载次数间的关系。试验结果表明, 除了最大应力水平 $S_{\max} = 0.9$ 时的个别试件总应变发展没有明显的三阶段规律外, 其它较低应力水平情况下的应变经历三个阶段, 即第一阶段: 应变增长很快, 且很快达到稳定状态。第二阶段: 应变稳定增长, 应变率恒定。第三阶段: 应变急剧增长, 且试件很快破坏。上述三阶段分别约占疲劳总寿命的 10%, 75%, 15%。

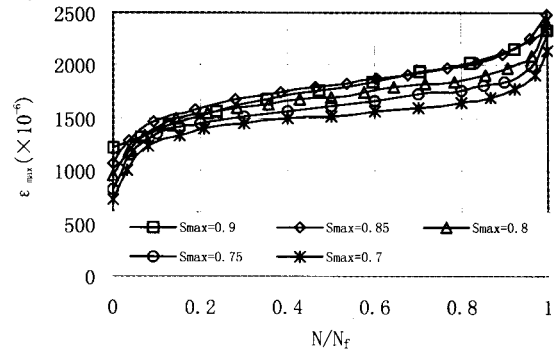


图 6 单轴压疲劳最大应变与循环次数的关系

Fig.6 Variation of the maximum strain with numbers of cycles under uniaxial compression

图 7 是侧应力等级为 $0.5 f_c$ 、 $S_{\max} = 1.1$ 情况下的混凝土疲劳向和侧压向总应变及循环次数间的关系。疲劳向的总应变发展规律符合三阶段规律, 且各阶段所占疲劳总寿命的比例也同单轴疲劳一样。不过, 侧压向总应变随循环次数的变化没有明显的三个阶段。

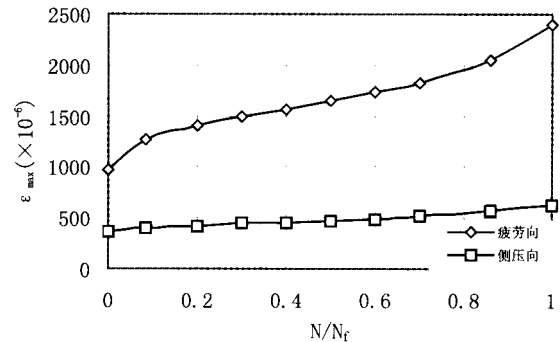


图 7 疲劳向、侧压向最大应变与循环次数的关系

Fig.7 Variation of the principal and lateral maximum strain with numbers of cycles

4 结论

(1) 混凝土(减摩)单轴和定侧压双轴压疲劳加载破坏形态同静态破坏相同,即单轴加载疲劳破坏形态呈柱状;一向定侧压双轴压疲劳破坏形态呈片状。

(2) 给定循环加载次数时,定侧压双轴压混凝土疲劳强度折减系数比单轴时高。由本文提出的S-N关系式推得: 2×10^6 次循环所对应的单轴和定侧压系数为0.25、0.5的疲劳强度折减系数分别为0.67, 0.76, 0.89。

(3) 混凝土在定侧压双轴压等幅疲劳荷载作用下,疲劳加载向最大总应变发展符合三阶段规律,且各阶段占疲劳寿命比例与单轴比例相同;而侧压向最大总应变不符合三阶段规律。

参考文献:

- [1] Tepfers R and Kutti T. Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete[J]. ACI Journal, 1979, 76(5): 635-652.
- [2] Hsu T T C. Fatigue of plain concrete[J]. ACI Journal, 1981, 78(4): 292-304.
- [3] Zhang J and Stang H. Fatigue performance in flexure of fiber-reinforced concrete[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(1):58-67.
- [4] 王瑞敏. 混凝土结构的疲劳性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1989.
Wang Reimin. Fatigue behavior of concrete structure[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1989. (in Chinese)
- [5] 吴佩刚, 赵光仪, 白利明. 高强混凝土抗压疲劳性能研究[J]. 土木工程学报, 1994, 27(3): 33-40.
Wu Peigang, Zhao Guangyi, Bai liming. Fatigue behavior of high strength concrete in compression[J]. Journal of Civil Engineering, 1994, 27(3):33-40.(in Chinese)
- [6] Su E C M and Hsu T T C. Biaxial compression fatigue and discontinuity of concrete[J]. ACI Materials Journal, 1988, 85(3): 178-188.
- [7] 俞茂宏, 赵均海, 郑树俊, 等. 复杂应力下混凝土疲劳强度的试验研究[J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(3): 89-92.
Yu Maohong, Zhao Junhai, Zhen Shujun et al. Experimental studies of fatigue strength of concrete under complex stress state[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(3): 89-92.(in Chinese)
- [8] Gaede K. Strength and deformation characteristics of concrete when subjected to repeated compressives[M]. Bulletin, 1962, (144): 1-48.
- [9] Bennett E W and Muir S E S J. Some fatigue tests of high-strength concrete in axial compression[J]. Magazine of concrete research, 1967, 19(59): 113-117.
- [10] Sparks P R and Menzies J B. The effect of rate of loading upon the static and fatigue strength of plain concrete in compression[J]. Magazine of Concrete Research, 1973, 25(83): 73-80.
- [11] Cornelissen H A W. Fatigue failure of concrete in tension[J]. Heron, 1984, 29(4): 1-68.

郑重声明

自 2004 年第 1 期本刊封面做如下更新:

- 根据国家规范汉字的有关规定,刊名改为现在的简化字《工程力学》
- 刊徽改为现在的图案,寓意为:逆时针转 90° 可视为《工程力学》的缩写“工力”;顺时针转 90° 可视为英文字母 E, 转 180° 可视为英文字母 M, EM 是 Engineering Mechanics 的缩写;正面一眼看去一个“工”字横卧在山颠亦可想象为工程实践相对于力学理论总是第一位的。寓意不过是隐含的表达意向而已,且多有牵强附会之嫌,仁者见仁,智者见智,取其简洁明快罢了。