

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.06.014

肖杰, 彭刚, 邓媛, 等. 循环加卸载下混凝土滞回环特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2016(6): 97-102. (XIAO Jie, PENG Gang, DENG Yuan, et al. Hysteresis loop characteristics of concrete under cyclic loading and unloading[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(6): 97-102.)

## 循环加卸载下混凝土滞回环特性研究

肖杰<sup>1,2</sup>, 彭刚<sup>1,2</sup>, 邓媛<sup>1,2</sup>, 王孝政<sup>1,2</sup>, 罗曦<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 通过开展不同侧压下的混凝土循环加卸载试验, 分析了侧压、应变速率对应力应变全曲线中滞回环面积的影响, 提出了一种基于应力应变全曲线的简便滞回环面积统计法, 建立了滞回环面积与循环次数之间的关系。结果发现, 混凝土单位体积耗散能随着循环次数的增加先增后减, 单位体积耗散能最大值与峰值应变有密切联系; 在循环加卸载过程中混凝土的单位体积耗散能具有明显的侧压敏感性。利用 Weibull 统计分布模型对混凝土在循环加卸载过程中单位体积耗散能随循环次数的变化关系进行了拟合分析。计算结果表明: 不同侧压下循环加卸载曲线滞回环面积与循环次数服从双参数 Weibull 模型分布。

**关键词:** 混凝土; 循环加卸载; 侧压; 滞回环; 耗散能

**中图分类号:** TU502

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2016)06-0097-06

在自然环境中, 混凝土结构不可避免地遭受动态荷载以及反复荷载的作用, 如高层建筑受到的风荷载、飞机起降造成的冲击等, 这些动荷载相当于对混凝土材料施加了循环加卸载的作用。研究混凝土材料在循环加卸载下应力应变曲线的滞回环特征曲线, 同时分析滞回环与耗散能的关系, 便于分析在工程应用中动态荷载的混凝土结构的安全性能。在混凝土率效应领域国内学者研究发现, 不同应变速率下的混凝土试件经历动态荷载后, 混凝土应力应变全曲线变化明显; 随着应变率的增加, 动态单轴抗压强度显著增加<sup>[1-5]</sup>。对循环加卸载应力应变全曲线中出现的滞回环现象, 国内诸多学者进行了研究。王文达等<sup>[6]</sup>通过试验研究了钢管混凝土的柱轴比和环板宽度对节点的耗能能力的影响, 随着轴压比的增大, 位移延性和耗能能力降低, 不同环板宽度节点的滞回曲线均为饱满的梭形。沈宇等<sup>[7]</sup>研究了荷载和环境对 RC 柱滞回性能的研究。孙广俊等<sup>[8]</sup>对循环荷载下的钢筋混凝土单柱非线性滞回反应进行了数值分析, 建立了两种数值模型, 模拟效果较好。肖福坤等<sup>[9]</sup>对煤层进行单轴循环加卸载试验, 分析了循环次数与滞回环面积的关系, 研究认为滞回环面积与循环次数呈正相关关系。许江等<sup>[10]</sup>研究了应力水平对滞回环面积的影响, 认为应力水平等外在因素会使岩石的滞回环曲线发生变化, 在较低应力水平下滞回环面积随循环次数增加趋于稳定, 在高应力水平下滞回环面积随循环次数增加呈减少-稳定-增加的演化趋势。查小琴等<sup>[11]</sup>介绍了一种统计滞回环面积的方法。现有的文献中大多是关于岩石类的试验, 而关于混凝土滞回环特性的文献较少, 且受力状态多为静态单轴受压, 动态双轴状态下的滞回环特性也需要研究。

鉴此, 本文进行了不同侧压下的混凝土循环加卸载动态试验, 研究了滞回性能与侧压、加载速率、荷载循环次数之间的关系。

收稿日期: 2015-10-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51279092)

作者简介: 肖杰(1990—), 男, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事混凝土材料动态力学特性研究。

E-mail: xcxy1023@163.com 通信作者: 彭刚(E-mail: gpeng158@126.com)

## 1 试验设备及过程

### 1.1 试验设备

试验所用力学设备为三峡大学和长春市朝阳试验仪器有限公司联合研制生产的 10 MN 大型多功能液压伺服静动力三轴仪,该试验机型号为 TAZW-10000。利用该设备可对试件进行竖向轴力循环加载卸载试验。

### 1.2 试件制作及试验过程

(1)试件制备。试验用水泥由宜昌三峡水泥有限公司生产,粗骨料为 5~40 mm 连续级配的碎石;细骨料为细度模数为 2.3 连续级配的天然河砂;搅拌用水为自来水。

试件尺寸为 150 mm×150 mm×150 mm,试件设计强度等级 C30,参照《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ 55—2011)确定,混凝土试件的配合比为:水泥:水:砂:石子=1.00:0.50:2.04:3.96。将搅拌后的混凝土浇入模具中 48 h 后脱模,在标准条件下养护 28 d。

(2)试验过程。将进行过表面平整处理后的试件装好后,推入预定轨道,检查上方传力柱并调整至对中,最后安装竖向变形计。试验时先加载至 10 kN,以使试件与竖向传感器充分接触;待压力稳定后,再进行不同应变速率( $10^{-5}$ /s,  $10^{-4}$ /s,  $10^{-3}$ /s)下的动态加载。水平方向加载时同样先进行预加载使水平向传感器与试件充分接触,按照不同侧压比( $\alpha=0, 10%, 30%$ 和  $50%$ )控制侧压力。水平变形清零,安装水平向变形计。最后按规定程序开始水平向加载,直到加载到预定的水平侧压。在水平侧压保持不变情况下,按事先设置好的等应变步长循环加载程序对试件进行循环加载卸载试验。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 滞回环分析及其面积统计方法

从图 1 可见,每一个滞回环都是由卸载曲线和再加载曲线交叉所围成,且滞回环都落在产生塑性变形的加载过程中。加载轨迹下的面积代表外力所做的功,而卸载轨迹线下的面积则是混凝土释放的弹性能,二者路径的不一致表明外力作用下一部分引起混凝土弹性应变能的增加,而另一部分则被耗散了。滞回环可以反映试件的损伤情况,其面积大小可以定义为耗散能。

滞回环面积通过以下方法求得:①将试验得到的荷载-变形数据以 excel 形式导出。②对 excel 数据进行初步整理后,通过 matlab 数学分析软件将试验数据转化

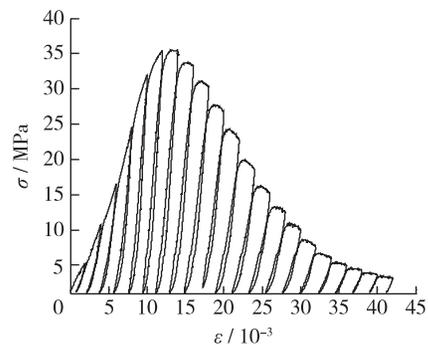


图 1 混凝土单轴循环加载卸载曲线

Fig. 1 Uniaxial cyclic loading and unloading curves of concrete

为应力应变数据。③在 excel 表格中将处理后的数据以应力与应变的坐标形式表示。④全部选中表格中的坐标,复制;打开 CAD 工程制图软件,选择多段线命令,将表格中复制的数据粘贴到下部选项框中。⑤在数据加载完毕后,会得到一条完整的循环加载卸载应力应变曲线。再通过其他基本操作可将滞回环单独隔离出来,选择所隔离出来的滞回环,这样通过属性对话框即可获得相应的滞回面积。

上述方法能够精确统计每一个滞回环的面积,精度可达 0.001,能够确保数据的有效性,操作简便。

### 2.2 耗散能数据分析

通过上述方法计算出了各种工况下滞回环的面积(单位耗散能),滞回环面积  $\varphi$  与循环加载卸载次数  $N$  的关系如图 2。从图 2 可见,将得到的滞回环面积用直线依次连接便形成一条轨迹线,其轨迹线与混凝土单轴压缩时的应力应变曲线类似。滞回环的面积随循环次数的增加不断变化,总体上表现出先增后减的趋势;受加载速率和侧压比的影响,滞回环面积到达峰值时的循环次数也不一样。

从图 2 可见,当  $\alpha=0$ ,应变速率为  $10^{-5}$ /s 时,滞回环面积在前 3 次循环过程中缓慢增加,此过程中加载所

达到的最大应力为峰值应力的 27.81%。循环次数在第 3~6 次时滞回环面积迅速增加, 在第 7~8 次缓慢增加至最大值, 此时混凝土试件内部单位耗散能达到最大值, 在第 8~15 次循环过程中滞回环面积快速减小, 第 15 次循环后减小幅度趋于缓慢。

当  $\alpha=0$ , 应变速率为  $10^{-4}/s$  时, 前两次的滞回环面积增加缓慢, 第 2 次循环过程最大应力为峰值应力的 41.34%。滞回环面积在第 3~6 次迅速增加且在第 6 次到达最大值, 第 6~15 次迅速减小, 第 16 次循环以后减小幅度变缓。对比相应的应力-应变曲线可见, 试件在  $10^{-5}/s$  和  $10^{-4}/s$  应变速率下的单轴循环加卸载过程中峰值应变分别为  $13.95 \times 10^{-3}$  和  $9.93 \times 10^{-3}$ , 峰值应变分别出现在第 7 和 8 次循环过程中, 通过对比其他工况下滞回环面积最大时相应的卸载应变值与峰值应变均可发现, 峰值应力卸载点处的滞回环面积并非最大, 这表明混凝土循环加卸载过程中最大耗散能并非产生于峰值应变处, 而是紧随峰值后的 1~2 次循环过程中。王四巍<sup>[12]</sup>得出: 滞回环面积与混凝土在循环加卸载过程中的最大应力密切相关, 与循环次数关系不大, 应力越大滞回环面积也越大。通过试验数据统计可知, 该结论并不成立, 当应力最大时, 滞回环面积并未达到最大值, 而是在峰值应力出现后的若干个循环过程中增加到最大值, 这表明滞回环面积与循环加卸载次数联系密切, 即与循环加卸载过程中塑性应变的发展相关。

当循环次数相同时, 在侧应力作用下混凝土单位耗散能随侧应力的增加而明显增加, 具有显著的侧应力敏感性。当侧应力比为 0, 10%, 30% 和 50% 时滞回环的面积分别在第 7, 13, 14, 20 次循环时达到最大值, 这表明随着侧应力的增加, 滞回环面积达到最大值所需的循环次数也增多。由于侧压的存在, 混凝土强度增加, 吸能能力也相应随着增大, 滞回环面积达到最大时所需的变形增大, 最大值的出现产生了延后现象。

### 2.3 耗散能与应变速率关系分析

图 3 为尺寸 150 mm 立方体的 C30 试件在侧应力比为 0, 10%, 30% 和 50% 时不同应变速率下混凝土耗散能 (即滞回环面积) 与循环次数间的关系。

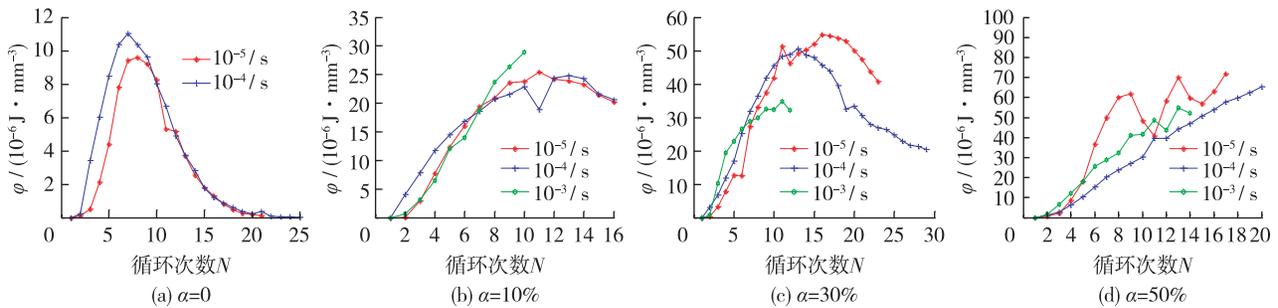


图 3 不同侧应力时耗散能与加卸载次数关系

Fig. 3 Relationships between number of cycles and dissipation-energy under different lateral stresses

从图 3(a) 可见, 在第 9 次循环加卸载以前, 应变速率越高单位体积耗散能越大; 第 9 次循环加卸载以后, 两种应变速率下的单位体积耗散能随循环次数增加而趋于一致。从图 3(b)~(d) 中可以看出, 在侧应力一定的情况下混凝土单位体积耗散能随着应变速率的提高并不会明显增大, 表明在侧应力一定的情况下单位体积耗散能速率敏感性较弱。随着应变速率增加, 单位体积耗散能达到最大值所需的循环次数则越小, 单位体积耗散能最大值存在明显的率敏感性。

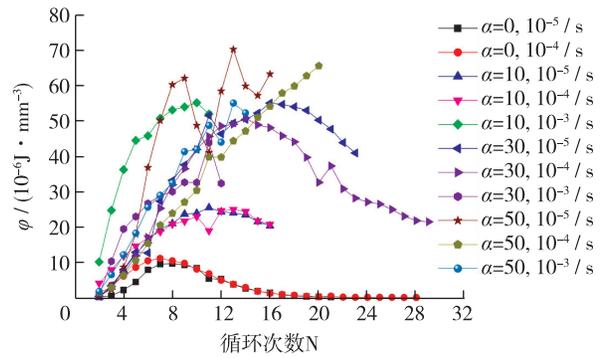


图 2 不同侧应力、应变速率下循环次数与单位耗散能关系

Fig. 2 Relationships between number of cycles and dissipation-energy under different lateral compression and strain rates

2.4 耗散能与循环次数关系模型

由试验数据可以得出,滞回环的面积随循环加卸载次数的增加呈先增后减的趋势,其轨迹线与混凝土应力应变曲线有着相似的规律。根据混凝土的应力应变全曲线特征,可以选择 Weibull 分布的密度函数拟合全应力应变曲线。又因为混凝土的强度服从 Weibull 统计分布,可以认为混凝土的耗散能也服从该统计分布。利用双参数 Weibull 分布的密度函数对不同侧应力下的循环加卸载曲线滞回环面积与循环次数的变化规律进行拟合分析,分布函数如式(1)。

$$\varphi = a(N - 1) \exp \left[ - \frac{1}{m} \left( \frac{N - 1}{N_{pk}} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $\varphi$  为滞回环面积(耗散单位耗散能);  $N$  为循环次数;  $N_{pk}$  为  $\varphi_{max}$  所对应的  $N$  值;  $a, m$  分别为尺度参数和形状控制参数。

通过式(1)对耗散能与循环次数的关系进行拟合,得到拟合参数见表1,拟合结果如图4所示。

从以上拟合数据可知,拟合系数较高,式(1)能较好地描述混凝土在循环加卸载过程中单位体积耗散能与循环次数之间的关系。

表 1 拟合参数  $a, m$  及回归系数  $R$  计算值

Tab. 1 Fitting parameters and regression coefficients

侧应力比 $\alpha$	应变速率/ $s^{-1}$	$a$	$m$	$R$
0	$10^{-5}$	1.818 3	3.524 9	0.938 5
	$10^{-4}$	3.591 5	2.158 1	0.993 8
10%	$10^{-5}$	3.578 2	2.915 5	0.985 1
	$10^{-4}$	3.810 8	1.640 2	0.981 3
30%	$10^{-5}$	5.292 8	3.334 7	0.978 1
	$10^{-4}$	6.962 2	1.996 5	0.958 9
	$10^{-3}$	5.894 9	1.893 6	0.987 0

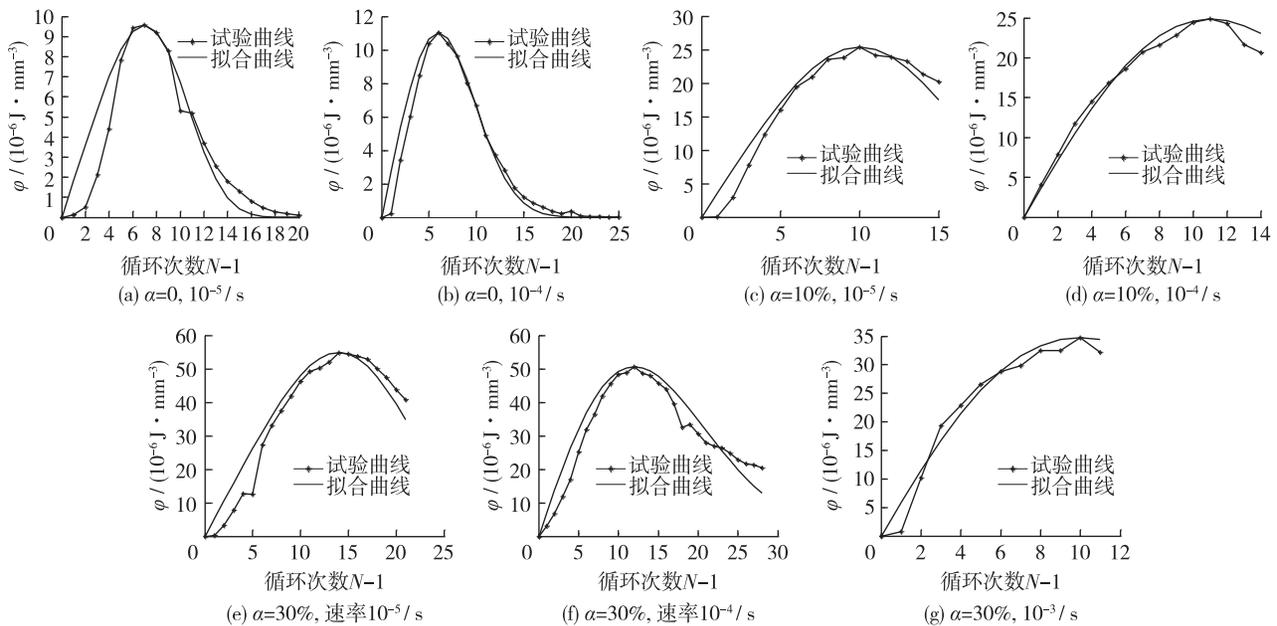


图 4 不同侧应力、应变速率下单位体积耗散能与循环次数关系

Fig. 4 Relationships between number of cycles and dissipation-energy under different lateral stresses and strain rates

3 结 语

根据循环加卸载过程中滞回环面积的变化规律研究了应变速率和侧应力对混凝土耗散能的影响,主要得出如下结论:

(1) 将试验数据导入 CAD 工程软件的方式,可以较精确地统计循环加卸载过程中滞回环的面积,该方法能够对研究混凝土在循环加卸载过程中能量演化提供便利。

(2) 混凝土单位体积耗散能随循环次数的增加先增后减,单位体积耗散能最大值与峰值应变有着密切

联系,在峰值应变出现后的第1~2次循环中,混凝土单位体积耗散能达到最大值。

(3)在循环加卸载过程中混凝土的单位体积耗散能具有明显的侧应力敏感性,主要表现为:侧应力的增加对耗散能起到明显的增加作用。混凝土的单位体积耗散能随应变速率的增加并未显著增加,速率敏感性较弱。

(4)通过 Weibull 统计分布模型对混凝土在循环加卸载过程中单位体积耗散能随循环次数的变化关系进行了拟合分析,结果表明,该模型能够较好地描述混凝土在循环加卸载过程中单位体积耗散能的演化过程。

## 参 考 文 献:

- [1] 林皋,闫东明,肖诗云,等. 应变速率对混凝土特性及工程结构地震响应的影响[J]. 土木工程学报, 2005, 38(11): 1-8, 63. (LIN Gao, YAN Dong-ming, XIAO Shi-yun, et al. Strain rate effects on the behavior of concrete and the seismic response of concrete structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(11): 1-8, 63. (in Chinese))
- [2] 肖诗云,张剑. 荷载历史对混凝土动态受压损伤特性影响试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 943-952. (XIAO Shi-yun, ZHANG Jian. Experiment study on effect of load histories on dynamic compressive damage behaviors of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(8): 943-952. (in Chinese))
- [3] 彭刚,王乾峰,梁春华. 有压孔隙水环境中的混凝土动态抗压性能研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(1): 11-18. (PENG Gang, WANG Qian-feng, LIANG Chun-hua. Study on dynamic compressive properties of concrete under pore water pressure environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(1): 11-18. (in Chinese))
- [4] 胡海蛟,彭刚,谢玖杨,等. 混凝土循环加卸载动态损伤特性研究[J]. 工程力学, 2015, 32(6): 141-145. (HU Hai-jiao, PENG Gang, XIE Jiu-yang, et al. Study on dynamic behaviour of concrete by cycle loading and unloading conditions[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(6): 141-145. (in Chinese))
- [5] 梁辉,彭刚,邹三兵,等. 循环荷载下混凝土应力应变全曲线研究[J]. 土木工程与管理学报, 2014, 31(4): 55-59. (LIANG Hui, PENG Gang, ZOU San-bin, et al. Research on the stress-strain curve of the concrete under cyclic loading and unloading[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2014, 31(4): 55-59. (in Chinese))
- [6] 王文达,韩林海,游经团. 方钢管混凝土柱-钢梁外加强环节点滞回性能的实验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 17-25. (WANG Wen-da, HAN Lin-hai, YOU Jing-tuan. Experimental studies on hysteretic behaviors of steel beam to concrete filled SHS column connections with stiffening ring[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(9): 17-25. (in Chinese))
- [7] 沈学,刁波,叶英华,等. 环境和荷载对 RC 柱滞回性能和氯质量分数的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(10): 87-93. (SHEN Bei, DIAO Bo, YE Ying-hua, et al. Impact of environment and load on the hysteretic behavior and chloride mass fraction of RC columns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(10): 87-93. (in Chinese))
- [8] 孙广俊,蒋雯,李鸿晶. 循环荷载下钢筋混凝土柱滞回性能数值模拟[J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33(2): 241-246. (SUN Guang-jun, JIANG Wen, LI Hong-jing. Numerical simulation of hysteretic behaviours of reinforced concrete column under cyclic loads[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(2): 241-246. (in Chinese))
- [9] 肖福坤,申志亮,刘刚,等. 循环加卸载中滞回环与弹塑性应变能关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1791-1797. (XIAO Fu-kun, SHEN Zhi-liang, LIU Gang, et al. Relationship between hysteresis loop and elastoplastic strain energy during cyclic loading and unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(9): 1791-1797. (in Chinese))
- [10] 许江,尹光志,王鸿,等. 不同应力水平时砂岩滞回曲线演化的实验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(2): 40-42. (XU Jiang, YIN Guang-zhi, WANG Hong, et al. Experimental research on the evolution of hysteresis curve of rock in different axial stress levels[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(2): 40-42. (in Chinese))
- [11] 查小琴,张欣耀,张亚军,等. 利用常用办公软件 Excel 和 Origin 快速求取滞回环面积的方法[J]. 理化检验(物理分册), 2009, 45(8): 486-488. (ZHA Xiao-qin, ZHANG Xin-yao, ZHANG Ya-jun, et al. Rapid calculation method of loop area by using usual office software excel and origin[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part A: Physical Testing), 2009, 45(8): 486-488. (in Chinese))
- [12] 王四巍. 单轴和三轴应力下塑性混凝土性能研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2010: 116-118. (WANG Si-wei. Properties of plastic concrete under uniaxial and triaxial compressive stress[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010: 116-118. (in Chinese))

## Hysteresis loop characteristics of concrete under cyclic loading and unloading

XIAO Jie<sup>1,2</sup>, PENG Gang<sup>1,2</sup>, DENG Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-zheng<sup>1,2</sup>, LUO Xi<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang 443002, China)

**Abstract:** By the cyclic loading and unloading tests on concrete under the conditions of different lateral pressures, making analysis of the influences of the lateral pressures and the strain rates on the hysteresis loop area in the stress-strain curve and presenting a simplified statistic method in analyzing the hysteresis loop area based on the stress-strain curves, the relationships between the hysteresis loop area and the cycle number were established in this study. It is found from the analysis results that the dissipation energy of an unit volume of the concrete increases firstly with the increase of the number of cycles and then decreases, and the maximum value of the dissipation energy of an unit volume is closely related with the peak strain. The dissipation energy of an unit volume has an obvious lateral stress sensitivity during the cyclic loading and unloading process. A fitting analysis of the relationships between the dissipation energy and the number of cycles in the process of the cyclic loading and unloading on the concrete specimens was carried out by use of the Weibull statistical model. The calculated results show that the hysteresis loop area and the number of cycles in the cyclic loading and unloading under the different lateral pressures obey the double-parameter Weibull model distribution.

**Key words:** concrete; cyclic loading and unloading; lateral pressure; hysteresis loop; dissipation energy