文章编号:1672-3031(2017)02-0096-07

全级配混凝土轴拉应力-变形全曲线试验研究

张艳红,胡 晓,杨 陈
(中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048)

摘要:全级配混凝土拉应力-变形全曲线是大坝非线性反应计算与极限抗震能力分析中的一个重要指标。本文利用先进的全数字化闭环控制大型材料试验机,采用位移控制的加载方式,对最大骨料粒径为150 mm的Φ450 mm×1 300 mm的圆柱体试件进行轴向拉伸试验,研究应变率约为$10^{-7}s^{-1}$时混凝土试件测距内的受拉变形随拉应力变化的全过程曲线。达到峰值荷载后,在不同的应力水平下对试件进行往复多次加、卸载,研究全级配混凝土软化段加、卸载曲线的特点。拟合全级配混凝土轴拉应力-变形全曲线及加、卸载曲线的计算式,为数值分析中大坝混凝土模型的建立提供可参考的试验依据。

关键词:水工结构工程;全级配混凝土;轴向拉伸试验;应力-变形全曲线;应变率
中图分类号:TV32 **文献标识码**:A **doi**:10.13244/j.cnki.iwhr.2017.02.003

1 研究背景

大坝混凝土一般为三级配或四级配混凝土,最大骨料粒径可达80 mm或150 mm,是一种典型的非均匀准脆性材料。全级配混凝土的抗拉强度远低于其抗压强度,地震时,坝体的损伤主要表现为混凝土受拉后裂缝的形成与扩展。对大坝进行抗震安全性评价时,需要给定全级配混凝土的基本材料参数,如强度指标、弹性模量等;进一步研究大坝的极限抗震能力时,还需要给出包括峰值荷载后全级配混凝土软化段的应力-变形全曲线。目前,全级配混凝土强度、弹性模量的测试方法已在现行水工混凝土试验规程[1-2]中明确规定,而受试验条件的限制,有关峰值荷载后全级配混凝土软化段应力-变形曲线的试验成果则不多。峰值荷载后混凝土的软化段曲线可通过轴向拉伸试验获得,轴向拉伸试验是确定混凝土拉伸断裂特性最直接的方法。早在20世纪60年代,有的学者采用提高材料试验机刚度的方法获得了轴拉应力-应变/变形全曲线[3],如Evans等[4]在拉伸试验加载头之间设置一组与试件平行的辅助钢杆承担试件在软化段不能承受的多余荷载,开展了混凝土应力-应变曲线软化段的试验研究。过镇海等[5]在普通液压式材料试验机上附加一个由横梁和拉杆组成的刚性框架,测试了试件的受拉应力-变形全曲线。20世纪80年代,试验技术取得了较大的进展,采用闭环试验技术可以更为有效地测试峰值荷载后裂缝不稳定扩展时混凝土的软化段曲线[6]。我国现行的混凝土结构设计规范[7]也给出了混凝土单轴受拉应力-应变全曲线公式。对该曲线进行归一化处理,以$x=\varepsilon/\varepsilon_{t,r}$表示归一化应变/变形,$y=\sigma/f_{t,r}$表示归一化应力(其中,$f_{t,r}$为混凝土的单轴抗拉强度,$\varepsilon_{t,r}$为相对应$f_{t,r}$的混凝土峰值拉应变,$\alpha_t$为全曲线软化段参数,规范建议取值列于表1),可以得到归一化应力-归一化应变/变形关系为:

$$y=x\left(1.2-0.2x^5\right)\quad x\leqslant 1;\quad y=\frac{x}{\alpha_t\left(x-1\right)^{1.7}+x}\quad x>1 \tag{1}$$

收稿日期:2016-07-21
作者简介:张艳红(1970-),女,湖北公安人,博士,教授级高级工程师,主要从事水工结构抗震研究。
E-mail:zhangyh@iwhr.com

表1　混凝土单轴受拉应力-应变曲线的参数取值[7]

$f_{t,r}$/MPa	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$\varepsilon_{t,r}\times10^{-6}$	65	81	95	107	118	128	137
α_t	0.31	0.70	1.25	1.95	2.81	3.82	5.00

以上是针对最大骨料粒径小于40 mm的混凝土试件进行的轴拉应力-应变/变形全曲线的试验研究情况。由于全级配混凝土骨料粒径大，轴拉试件的尺寸相应增大，全级配混凝土轴拉试验对设备及试验方法也提出了更高的要求。随着高烈度区大坝的建设及人们对大坝极限抗震能力的关注，一些学者也开展了全级配混凝土轴拉试件的全曲线试验研究[8-11]，如文献[9-10]在自行组装的轴向拉伸装置上测试了尺寸为250 mm× 250 mm× 1 400 mm和450 mm× 450 mm× 1 350 mm、两端预埋螺杆的棱柱体试件的静态拉应力-变形全曲线；文献[11]在INSTRON 8506材料试验机上，以应变率约为$3.3\times10^{-8}s^{-1}$的速率加载，测试了尺寸为450 mm× 450 mm× 900 mm、两端用建筑胶粘结的棱柱体试件的静态拉应力-变形全曲线。由于每个试验者采用的设备不同，试件的形状、尺寸、夹持方式不同，测量标距、控制变量的选择等也存在较大差异[12]，全曲线数据离散性大，试验的成功率往往也很低，因此，目前尚无统一的全级配混凝土拉应力-变形全曲线模型。

本文结合实际大坝工程，在中国水利水电科学研究院15MN MTS材料试验机上对全级配混凝土、湿筛混凝土进行了一系列静力、动力试验[13-14]。本文重点介绍全级配混凝土轴向拉伸试验中有关拉应力-变形全曲线及软化段加、卸载曲线的试验成果。

2　试验简介

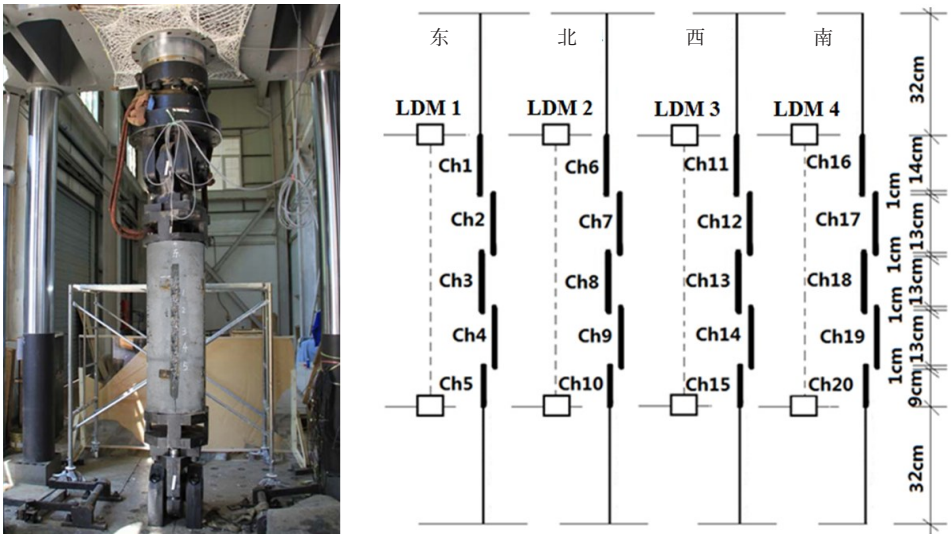
采用中国水利水电科学研究院全数字化闭环控制材料试验机进行试验，该设备在国内动态试验机中加载能力最大。试验机的载荷测量采用2.5MN载荷传感器和15MN压差传感器，系统位移测量采用Temposonic数字位移传感器，传感器与做动器整合在一起。试验机的铰接座组件旋转角度为+90°或-30°、倾斜角度为±8°。试验机采用MTS FlexTest数字控制系统，支持32测量通道返回信号控制。该试验机可用于大坝全级配混凝土的静力、动力试验研究。

大坝混凝土的设计强度等级为$C_{180}40$，水胶比0.41，35 %粉煤灰掺量，特大石∶大石∶中石∶小石=30∶25∶20∶25。全级配混凝土轴拉试件的龄期在360 d以上。以位移控制的方式分别施加静荷载和动荷载(考虑大坝基频为f，动荷载速率的确定是使混凝土试件在0.25/f的时间内达到峰值荷载)，直至试件断裂，部分试验在峰值荷载后对试件进行往复多次加、卸载，以研究混凝土在峰值荷载后的承载能力和变形特点。材料试验机采用350Ω应变接入，激励电压为±2.5V，应变噪声约±0.2microstrain。试验中还采用了LK-081激光位移计(Laser Displacement Meter，以下简称LDM，分辨率为0.003 mm)同步观测。试验时，利用激光位移计的位移信号进行控制，可以得到全级配混凝土峰值荷载及其后的软化段曲线。

峰值荷载后，试件中混凝土开裂，应变已无确切定义，因此，本文采用指定测距内量测的位移来表示混凝土的变形。实际的混凝土裂缝宽度可由测距内的总位移(激光位移计的读数)减去未开裂部分的位移(由应变片的读数确定)得到。

3　轴向拉伸试验

全级配混凝土轴拉试件是ϕ450×1300 mm的圆柱体[13]。试件中间900 mm采用四级配混凝土浇筑，两端锚固段采用二级配同标号混凝土浇筑。试件通过两端预埋的螺纹钢筋及专门的装置与材料试验机连接，见图1(a)。应变片布置在试件外表面圆周的四侧，共4组，沿轴向粘贴，每组测距约为660 mm。4个激光位移计分别布置在每组应变片的附近，测距约为660 mm，如图1(b)所示。为了减少加载时偏心的影响，试验采取对试件进行预拉、试验机上设置球铰等措施。



（a）轴向拉伸试验设备　　（b）试件上布置的应变片与激光位移计

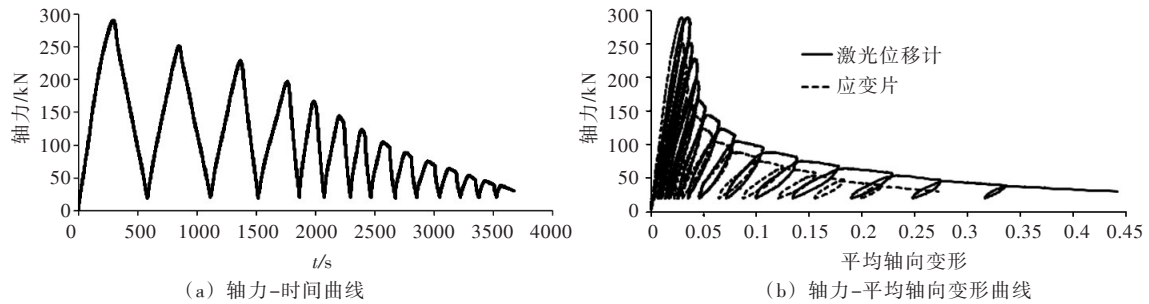
图1　全级配大试件轴拉试验及试件上传感器的布置情况

动荷载作用时，峰值荷载后材料试验机迅速卸载，试件被拉断，没有取得可靠的应力–变形软化段曲线。在静荷载作用下（应变率约为$10^{-7}s^{-1}$），取得了4个全级配大试件的稳定软化段曲线，这些试件的主要试验结果列于表2。关于全级配混凝土轴拉试验中抗拉强度、弹性模量等试验结果的深入分析，可参见文献[13–14]，本文主要研究轴拉试验中获得的应力–变形全曲线的变化规律。

表2　全级配轴拉试件的主要试验结果

试件编号	峰值荷载/kN	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	实际加载率/（kN/s）	实际应变率/（$10^{-6}s^{-1}$）
F101018A16	292.49	1.84	53.60	1.06	0.12
F101018A14	309.98	1.95	48.07		0.14
F110504A03	289.31	1.82	44.89		0.15
F110803A13	313.16	1.97	49.11		0.14

以试件F101018A16为例，对其加载至峰值荷载，然后往复多次加、卸载。图2(a)给出了荷载随时间的变化情况，图2(b)对比了在测距内激光位移计量测的平均轴向位移随荷载变化的曲线和由应变片量测的应变转换的平均轴向位移随荷载变化的曲线。



（a）轴力–时间曲线　　（b）轴力–平均轴向变形曲线

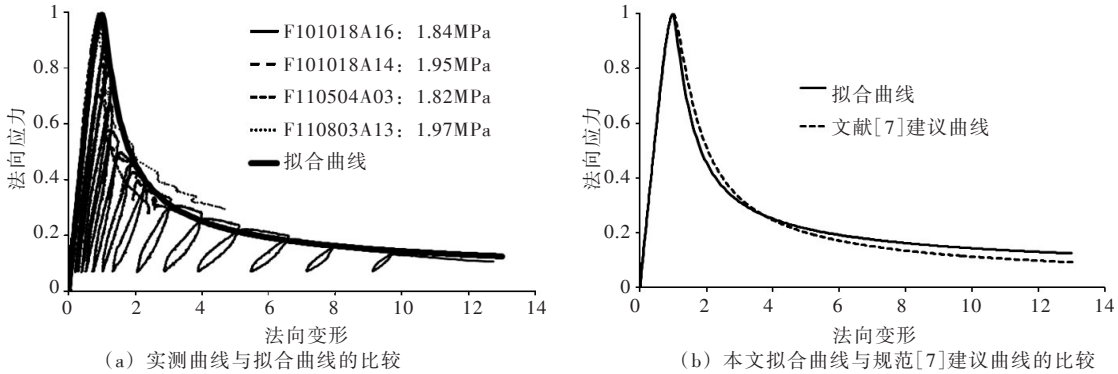
图2　轴向拉伸试验中的荷载及测距内的平均轴向位移

由图2(b)可见，在初始拉伸阶段，位移随外荷载成比例增加；当外荷载超过约80 %～90 %的峰值荷载后，轴向位移增长速度逐渐加快，曲线呈凸形；达到峰值荷载后，曲线的切线呈水平；当荷载降至约峰值荷载的85 %后开始软化段的第一次卸载；之后，在不同的应力水平下对试件进行往复多次加、卸载，混凝土的承载力逐渐降低，轴向位移逐渐增加。本文试验采用了位移控制的方式，当试件完全破坏时，由于骨料的咬合作用以及开裂面上存在局部未开裂的面积，残余承载力仍可达到

峰值荷载的10%。观察破坏后的试件可以发现，破裂面基本上位于试件的中部位置，主要为骨料与砂浆黏结界面的破坏，有局部大、中骨料被拉裂。

由图2(b)还可以看出，在峰值荷载前，两种测试方式给出的混凝土轴向位移结果基本一致；达到峰值荷载后，由应变转换得到的位移值小于激光位移计的测试值，这是由于相邻应变片之间存在一定的搭接长度、峰值荷载后部分应变片可能超过量程或出现损伤，采用应变转换得到的结果存在一定的误差。因此，以下仍采用激光位移计量测的位移结果进行分析。

图3(a)给出了表2中各全级配混凝土试件的归一化应力-归一化变形全曲线。可见，循环加载得到的全曲线骨架曲线与单调加载得到的全曲线形状接近。



(a) 实测曲线与拟合曲线的比较　　(b) 本文拟合曲线与规范[7]建议曲线的比较

图3　归一化轴拉应力-归一化变形曲线(测距660 mm)

(1)归一化应力-归一化变形全曲线。令归一化轴拉应力$\sigma/f_{t,r}$为y，归一化变形$u/u_{t,r}$为x，其中，$f_{t,r}$表示抗拉强度，σ表示由试件开裂前横截面面积计算得到的轴拉应力，$u_{t,r}$、u分别表示相应于$f_{t,r}$、σ的轴向变形，拟合归一化试验曲线，可得下式：

$$y=x\left(1.2-0.2x^{5}\right)\quad x\leqslant 1;\ y=\frac{x}{2.38(x-1)^{1.47}+x}\quad x>1 \tag{2}$$

图3(b)比较了本文拟合曲线与规范[7]建议的曲线。由图3(b)可见，本文给出的全曲线在软化段初期略陡，之后较平缓，总体上二者较接近。

(2)加卸载曲线。由于本文轴向拉伸试验给出的卸载曲线和再加载曲线不多，数据整理时，假定卸载曲线与再加载曲线重合，且均为直线。在图3(a)中，连接卸载曲线与再加载曲线的交点、卸载曲线的应力最小点，并延长至与横轴相交，交点即为卸载后的残余变形。以u_{un}表示应力-变形曲线软化段上开始卸载点的轴向变形，u_z表示卸载后的残余变形(应力为0)。将图3(a)中所有试件加卸载曲线上的试验数据$\left(u_{un}/u_{t,r},\ u_z/u_{t,r}\right)$绘于图4中。拟合图4中数据点可以得到下式：

$$u_z/u_{t,r}=0.8008u_{un}/u_{t,r}-0.8005 \tag{3}$$

其中，$u_{un}/u_{t,r}>1$。

因而，在往复荷载作用下，受拉混凝土加卸载曲线可由下式确定：

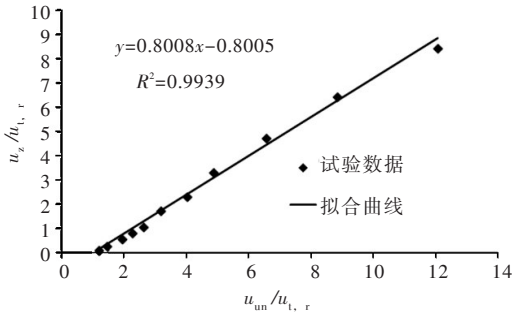


图4　轴拉试验中残余位移的试验数据及其拟合曲线

$$y' = \frac{y}{0.1992x + 0.8005}(x' - 0.8008x + 0.8005) \tag{4}$$

其中，y'、x'分别表示卸载和再加载曲线上混凝土的归一化轴拉应力$\sigma / f_{t,r}$、归一化变形$u/u_{t,r}$；y、x分别表示应力-变形曲线软化段上开始卸载点的归一化应力$\sigma_{un}/f_{t,r}$、归一化变形$u_{un}/u_{t,r}$。

x、y的关系可由式(2)确定。

4　结论

在全数字化闭环控制大型材料试验机上，结合实际大坝进行了全级配混凝土的轴拉应力-变形全曲线、软化段及往复加、卸载曲线的试验研究。试件在峰值荷载后，裂缝逐渐发展，测距内的变形量显著增加，试件的有效受力面积减小，混凝土承载能力也降低。本文分别用六阶抛物线拟合轴拉试验中归一化全曲线的上升段，用有理分式拟合归一化全曲线的软化段，用线性函数拟合轴拉试验中软化段的加卸载曲线。拟合曲线与试验数据吻合较好。

参　考　文　献：

[1] 中华人民共和国水利部. SL 352-2006. 水工混凝土试验规程[S]. 北京：中国水利水电出版社，2006.

[2] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 5150-2001. 水工混凝土试验规程[S]. 北京：中国电力出版社，2002.

[3] HUGHES B P, CHAPMAN G P. The Complete stress-strain curve for concrete in direct tension[J]. RILEM Bulletin, 1966(30): 95-97.

[4] EVANS R H, MARATHE M S. Microcracking and stress-strain curves for concrete in tension[J]. Materials and Structures, 1968, 1(1): 61-64.

[5] 过镇海，张秀琴. 混凝土受拉应力-变形全曲线的试验研究[J]. 建筑结构学报，1988，9(4)：45-53.

[6] ROKUGO K, OHNO S, KOYANAGI W. Automatical measuring system of load-displacement curves including post-failure region of concrete specimens[C]// Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete. Amsterdam: Elsevier. 1986.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50010-2010. 混凝土结构设计规范[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2010.

[8] 陈士纯，王文安. 混凝土拉伸应力与应变全曲线的试验研究[J]. 长江科学院院报，2001，18(6)：26-28.

[9] 陈萍，梁正平，黄书秦，等. 三峡三级配混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线[J]. 河海大学学报，2001，29(5)：38-42.

[10] 陈玉泉，杜成斌，周围，等. 全级配混凝土轴向拉伸应力-变形全曲线试验研究[J]. 水力发电学报，2010，29(5)：76-81.

[11] 邓宗才，李庆斌，傅华. 人工骨料全级配大坝混凝土的拉压力学性能[J]. 水利学报，2005，36(2)：214-224.

[12] 顾惠琳，彭勃. 混凝土单轴直接拉伸应力-应变全曲线试验方法[J]. 建筑材料学报，2003，6(1)：66-71.

[13] 张艳红，胡晓，杨陈，等. 全级配混凝土动态轴拉试验[J]. 水利学报，2014，45(6)：720-727.

[14] 张艳红，胡晓，杨陈，等. 大坝混凝土强度参数的统计分析[J]. 水力发电学报，2015，34(6)：169-175.

（下转第106页）

40-44.
[8] 倪浩清，沈永明，周力行.明渠弯道中三维浮力湍流流动的数值模拟[J].自然科学进展，1994(3)：300-217.
[9] 华祖林，褚克坚，邢领航.强弯条件下分层流运动特性试验研究[J].水科学进展，2005，16(2)：203-209.
[10] 赵懿珺，贺益英，谭水位，等.大范围、高帧频PLIF浓度场测量系统的开发及应用[J].水利学报，2015，46(1)：67-73.
[11] 李俊雄，陈小莉，纪平，等.内陆核电液态流出物排放口型式优化研究[J].中国水利水电科学研究院学报，2015，13(5)：391-396.

Physical model study on diffuser parameter optimization for thermal buoyant discharge into bend flow

CHEN Xiaoli, KANG Zhanshan, ZHAO Yijun, JI Ping
(*Department of Hydraulics China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: The outfall of waste discharge into bend flow area is usually located at the cut bank to take full advantage of the spiral flow for fast mixing. While the near field mixing characteristic in bend flow is different from that in straight channel and the related research is rare. In this paper, the near field mixing process of a thermal buoyant discharge by a diffuser into bend flow is simulated using a large scaled physical model. The Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) technology is used to measure the concentration at certain sections. The impact of bend secondary flow on the buoyant jet mixing is analyzed. Then the discharge vertical angle, horizontal direction angle and distance from bank are optimized. At last the diffuser discharge nearly horizontal offshore at different height level is proposed as the most suitable pattern for the thermal buoyant discharge into the bend flow. The research result has reference meaning for diffuser optimization study of similar thermal buoyant discharge into bend river area.
Keywords: PLIF; bend flow; low radio-active effluent; buoyant jet; physical model; diffuser

（责任编辑：李福田）

（上接第100页）

Test study on the tensile stress-deformation curve of fully-graded concrete

ZHANG Yanhong, HU Xiao, YANG Chen
(*State Key Laboratory of Simulation Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100048, *China*)

Abstract: Tensile stress-deformation curve of fully-graded concrete is very important for the nonlinear response calculation and the critical seismic capability analysis of dams. In this paper, the advanced closed-loop servo testing machine is used to perform the axial tension test on Φ450 mm×1 300 mm cylindrical specimens (max aggregate size of 150 mm) under the control of displacement mode, from which the complete curves of tensile stress versus tensile deformation in given range are obtained. After the maximum load, cyclic loads under different stress levels are applied to study the unloading and reloading curves. Simple equations are suggested to fit the complete stress-deformation curves and the unloading/reloading curves of the fully-graded concrete. This paper provides a reference basis for the dam concrete model building in numerical analysis.
Keywords: hydraulic structure engineering; fully-graded concrete; axial tension test; stress-deformation curve; strain rate

（责任编辑：王冰伟）