

文章编号:0559-9350(2009)05-0569-07

混凝土动态弯拉试验技术与数据处理方法

吴胜兴¹,周继凯¹,沈德建¹,陈厚群^{1,2}

(1. 河海大学 土木工程学院,江苏 南京 210098; 2. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心,北京 100044)

摘要:对混凝土动态弯拉试验技术与数据处理方法进行了研究。参照水工混凝土试验规程(DL T 5150-2001)中的静载弯拉试验。采用简支梁三分点加荷法,自行设计出适应往复拉压加载的系列装置(湿筛、三级配和四级配混凝土试件),能够实现多种类型荷载(如冲击、三角波、正弦波以及任意波形)的施加。通过反复试验得出了合理的试件安装、荷载施加、数据采集和处理方法,形成了规范的动态弯拉试验操作步骤。研究成果为后续的混凝土动态弯拉系列试验研究打下了基础。最后给出了试验实例。

关键词:全级配混凝土;湿筛混凝土;动态试验技术;弯拉试验;数据处理

中图分类号:TV32

文献标识码:A

1 研究背景

1917年Abrams^[1]发现混凝土的抗压强度存在率敏感性,标志着混凝土类材料动态力学特性研究的开始。国内外学者在此领域开展了大量的研究,取得了丰硕的研究成果,涵盖了普通混凝土动态强度(压、拉、单轴、多轴)、变形特性、影响因素、实验技术、形成机理等诸多方面,但仍然还有不少问题没有解决^[2-3]。

为实现西部大开发战略,我国西部正在建设大批高拱坝。然而这些地区地震的频度和设防烈度都很高,大坝一旦遭受强震失事,其造成的灾害是极端严重的。因此高拱坝抗震安全需要高度关注^[4-6]。

作为空间整体结构的混凝土拱坝,可认为处于偏心受力状态,拱坝的地震拉应力值常起控制作用。因此,对拱坝抗震强度安全而言,全级配混凝土的动弯拉强度指标就十分重要^[7-9]。

全级配混凝土静态弯拉试验可以依照《水工混凝土试验规程》(DL T 5150-2001)^[10],混凝土动态弯拉试验还没有试验标准。有学者参照上述规程进行大坝混凝土冲击弯拉试验,试件在一次冲击后立即破坏^[7]。这与混凝土在地震作用下表现为拉—压交变往复作用且持荷数秒存在差距。能够模拟地震作用时全级配混凝土承受往复弯拉的试验装置需要自行设计。大量试验数据如何处理也存在不规范、不统一的问题。

作者在进行三级配混凝土静动态弯拉试验时,通过摸索研制了适用动态弯拉加载的试验装置,形成了初步的试验步骤,后期又分别进行了四级配和湿筛混凝土静动态弯拉试验,积累了较多经验,包括动态加载设备和量测仪器的选择、夹具的设计、试件安装、加载速率、试验数据采集以及处理方法等。

2 装置与方法

2.1 试验设备 混凝土结构在不同动力作用下,其应变速率变化范围大,并表现出不同的动态力学特

收稿日期:2008-09-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(90510017);水利部公益性项目(200701004)

作者简介:吴胜兴(1963—),男,江苏靖江人,教授,博士,主要从事混凝土结构基本理论及其工程应用研究。

E-mail: sxwu@hhu.edu.cn

性。各种不同动力作用条件下应变速率见表 1。

表 1 应变速率代表值

作用种类	蠕变	静载	交通	飞机撞击	地震	打桩	硬物撞击	爆炸
$\dot{\epsilon} \text{ s}^{-1}$	(1~7) $\times 10^{-8}$	(4~50) $\times 10^{-6}$	(1~100) $\times 10^{-6}$	(25~400) $\times 10^{-6}$	(1~10) $\times 10^{-3}$	(5~500) $\times 10^{-3}$	1~50 $\times 10^0$	(1~10) $\times 10^2$

混凝土结构承受往复动态作用的典型代表是地震作用,其应变速率约为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$,属于中低应变速率,试验机适用于中低应变速率的有电液伺服试验机和落锤试验机。

落锤试验机施加的是冲击载荷,不适合采用。电液伺服试验机可采用,而且此类设备较多,如国产的新三思,国外的 MTS、INSTRON 等。

由于大坝混凝土试件的尺寸和承载力差异较大,要求根据要求选择合适的加载设备。例如,河海大学结构工程试验室适用的设备有 2 套:(1)结合“211”工程建设研制的拟动力液压伺服加载系统^[3];(2)MTS322 动静万能试验机。前者适合结构或大试件的动态加载试验,可用于进行四级配混凝土大试件的动态弯拉试验。后者适合小尺寸高精度的动态加载试验,可用于三级配和湿筛混凝土小试件的动态弯拉试验。

2.2 加载方法 参照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001),混凝土动态弯拉试验宜采用简支梁三分点加荷法。静载简支梁三分点加荷法,加荷压头通过对梁的向下加压直至试件破坏,此法的缺点是只能进行单向冲击加载,不能进行双向往复加载,如图 1。

适合进行往复拉压加载装置是混凝土动态弯拉试验能否成功的关键。对加载装置要求能传递往复拉压作动力,还要求能保证试件破坏在纯弯区内。课题组比较了预埋锚筋法和体外夹具法。体外夹具法如图 2 所示。

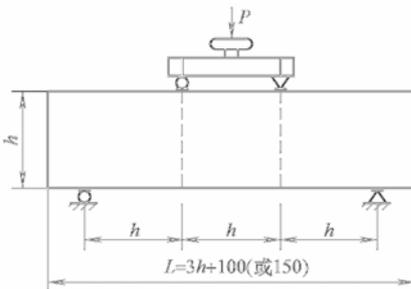


图 1 静态弯拉试验简支梁三分点加荷法

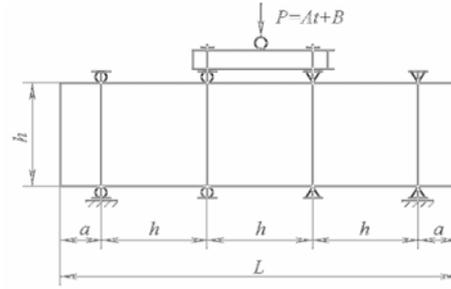


图 2 动态弯拉试验简支梁三分点加荷法

研究发现预埋锚筋法存在对试件截面削弱、精度要求高、实施难度大、试验成功率低等缺点;而体外夹具法能较好地克服上述缺点,取得满意的结果。根据需要分别设计了湿筛混凝土、三级配混凝土和四级配混凝土动态弯拉加载装置,如图 3 所示。装置尺寸见表 2 所示。



(a) 三级配混凝土试件

(b) 湿筛混凝土试件

图 3 混凝土动态弯拉加载装置

表 2 试件尺寸取值

(单位: mm)

规格	湿筛混凝土	全级配混凝土	
		三级配	四级配
h	150	300	450
L	550	1 100	1 700
a	50	100	175

试件夹具主要由三部分组成,分别是支座、夹片和锚杆。支座的形式分为两种,固定铰支座和滚动铰支座,分别由圆钢和钢垫块组成。

试验过程中,荷载由作动头传递到分配梁,再由分配梁传递到夹片上,然后通过锚杆和支座对试件进行加载。当作动头向下时,通过锚杆和支座把荷载施加在试件顶面,当作动头向上时,通过锚杆和支座把荷载施加在试件底面,这样就可以实现对三分点梁进行循环加载。

2.3 试验安装方法 试验要求保证试件破坏在纯弯区,若安装方法不当,仍然会发生纯弯区外和弯扭等无效破坏。作动头加载时,通过分配梁将荷载传递到三分点,当分配梁和三分点的位置有偏差,试件受力不均匀,使得最大弯矩不在跨中或存在扭矩,这是导致这类无效破坏的实质原因。

解决这种问题,关键是安装的精度要高。作动头加载的方向与试件平面垂直、且通过其平面的中心;与作动头相连的锚杆轴线与三分点位置一致;两端的支座与作动头加载的合力投影点距离相等;梁面各受力线荷载与梁长轴线垂直等。

标准的安装步骤可细分为:(1)试件上台座前,用铅笔将支座、三分点等特征线放样到梁各表面,根据放样线封闭性校核试件的尺寸准确性;(2)将作动头作用方向用铅锤投影于试验台面(纵横两个方向校核);(3)两端支座应在同一台面,采用水准尺确保两端支座水平,且高度一致,位置由作动头投影点确定;(4)如试件面不平,需对各支座的垫块进行调整,保证梁面与作动头作用方向垂直;(5)可先固定端支座与工作台面,再连接作动头,也可先安装中间夹具与作动头连接,启动加载设备手动控制至恰当位置固定端支座;(6)在作动头与加载夹具连接时,应先用位移控制作动头至准确的位置,并做好保护,避免出现意外;(7)试件安装后,随即连接各测量仪器,并进行调试;(8)全部调试好后进行预加载,查看数据保证符合要求后进行正式试验。

安装要求各锚杆与梁两侧面距离相等,各位置精度应 $\leq \pm 1\text{mm}$ 。

安装时锚杆的预拉紧状态对试验有较大影响。如预拉应力小,在往复加载情况下,支座有可能会变形松脱,因此应控制锚杆的预拉紧状态。

实践证明试验安装只要予以重视,精心操作,并不难以达到要求,试件正常均在纯弯区段断裂,属于有效破坏。

2.4 动态加载方法 混凝土试件动态弯拉试验,加载方法与静载试验不同。如《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)^[10]中全级配及湿筛混凝土试件静态弯拉试验均要求加载速率为 250N/s 进行连续均匀加荷。动态试验关心混凝土动态弯拉强度是在什么应变率条件下获得的,显然动态加载不能像静载试验一样确定具体的加载速率。

动态加载的具体方法是,先确定加载所对应的应变率条件,如 $1 \times 10^{-5}\text{s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-3}\text{s}^{-1}$ 、 $1 \times 10^{-2}\text{s}^{-1}$ 等,然后预估破坏荷载和破坏应变值,计算加载至破坏时间,估算加载速率,再进行预备性试验,进行调整、验证,最终确定加载速率。

其它动态加载方法可以根据设计要求进行加载程序编制,如冲击波、变幅三角波、正弦波、任意波加载等。加载方式可以分别采用力加载方式、位移加载方式以及应变率加载方式等。

3 动态试验数据采集及处理

3.1 试验数据采集内容 混凝土动态弯拉试验常规试验数据采集主要包括荷载、变形、应变等。

荷载是指加载的作动头施加到试件上的作用力,由高精度动态拉压荷载传感器回传的信号确定。

变形是指试件顶、底面中点竖向位移,由于变形很小,需要采用高精度位移计量测。

应变是指试件纯弯区外表面处的应变,如顶面、底面和侧面。试件表面的应变可粘贴应变片,采用动态应变仪采集。应变可用于确定弹性模量、泊松比、应力应变关系曲线以及损伤演化规律等重要内容,因此可根据需要布置应变片来测量。

以三级配混凝土为例,在混凝土试件顶面、底面分别粘贴三组纵向应变片和三组横向应变片^[3]。在正面粘贴三组纵向应变片。纵向应变片分别由三条长 100mm 应变片连续粘贴,有效量测范围为 250mm,满足测距大于三倍粗骨料粒径的要求(最大粗骨料粒径为 80mm);横向应变片分别由两条长 50mm 应变片连续粘贴。应变片位置及编号见图 4,总共 39 个应变片。

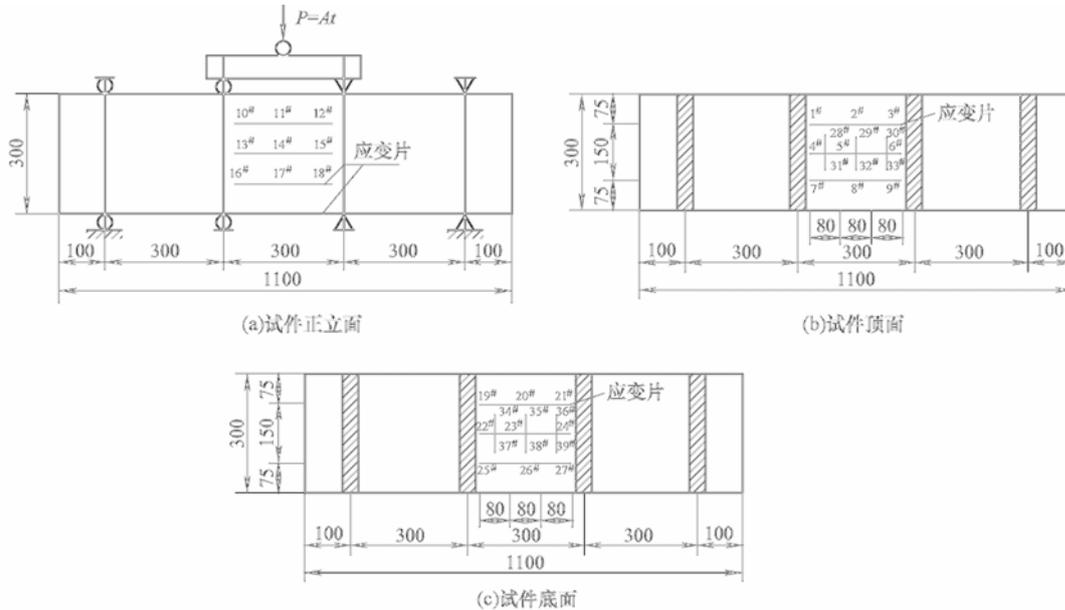


图 4 应变片粘贴位置

此外,还尝试采用声发射技术^[3]研究混凝土动静荷载作用下破坏和损伤机理,采集加载过程中的声发射信号。建议在动态试验中,尽可能引进先进的测试仪器,提高试验研究的精度和深度。

3.2 试验数据采集频率 试验数据利用计算机高速自动采集,动态加载采集频率不宜低于 200Hz。动态加载采集频率应根据预估破坏时间判断采集的数据量是否满足要求来确定。数据采集频率在设备容许的条件下尽可能高,但不宜太高,容易失真。合适的办法是先做预备性试验,如条件允许,对同一个试验可采用两种采样频率采集数据。

3.3 试验数据处理方法 常规的试验结果如混凝土抗弯强度、抗弯极限拉伸值、抗弯弹性模量和泊松比可以参照《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150-2001)的数据处理方法进行分析。与常规要求不同,动态试验数据处理还要注意下列一些问题。

(1)数据对齐。由于数据采集频率提高后,数据量很大,通常荷载和变形由加载系统量测,外接的测量数据,如应变等,由其它设备量测,常常因数据采集频率及时间不同步,造成数据处理困难。解决的方法,在条件允许的情况下,数据在同一个系统中采集,但也会因设备的系统(软件、硬件)限制出现偏差,应特别注意:如数据采集系统不同,应根据加载采集的数据时间和频率,采用专业软件(如 Origin 等)将数据离散成一致的格式,再进行关键点(如转折点)对齐处理;此外,虽设备不同,可在两套采集系统间加装同步措施,使加载和采集同步进行,当然这里也存在系统匹配问题。数据对齐需要科学、认真对待,不得随意处理。

(2)动态加载过程分析。动态加载过程分析很重要,例如变形、弹性模量、泊松比、应变率等随加载过程的变化,量测结果对结构的动力分析至关重要。数据处理可采用专业软件(如 Origin 等)。

(3)起裂应变和起裂应力确定。研究发现在进行全级配混凝土静动态弯拉试验数据处理时,可以通

过合适的布置和处理获得全级配混凝土静态起裂应变和起裂应力。量测混凝土静态开裂时应变对于研究混凝土动态强度机理具有重要的意义。

为了捕捉到裂缝,在顶、底面交错布置同向应变片。裂缝出现的判断准则是:当三个相联的应变片中某一个应变片应变值突然增加,而其它应变片应变值却快速下降,取此时二者应变的平均值,称之为起裂应变,如图 5 所示。并称此时的弯拉应力为起裂应力。

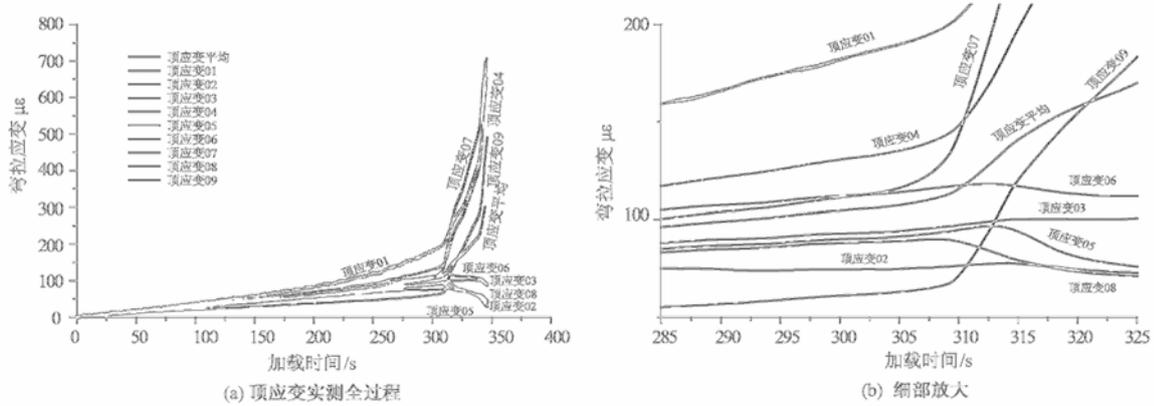


图 5 起裂应变判断示意

4 三级配混凝土动态弯拉试验实例

小湾拱坝工程要求进行三级配和湿筛混凝土动态弯拉试验。为了实现该目标,课题组对混凝土动态弯拉试验技术研究历时近一年,在 $450\text{mm}\times 450\text{mm}\times 1\,700\text{mm}$ 、 $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 1\,100\text{mm}$ 和 $150\text{mm}\times 150\text{mm}\times 550\text{mm}$ 混凝土梁以及钢梁上进行测试试验,结果表明,数据采集完备性好,精度与速度满足动态试验要求,混凝土试件断裂在纯弯区,得到理想的试验结果。试验方法不仅适用于冲击加载,还特别适用于往复动态加载,下面以纯三角波加载实例来说明。

试件 11151 是三级配混凝土梁,尺寸为 $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 1\,100\text{mm}$ 。试验龄期约为 60d。加载设备是河海大学结构工程实验室自行研制的拟动力液压伺服加载系统。数据采集系统有 56 个实时数据采集通道,动态加载时数据采集频率为 400Hz。

小湾拱坝满库在地震波作用下基频约为 1Hz,设计加载变幅三角波频率取 1Hz。为了保证试件在加载时必须破坏,编制加载波形时控制了荷载峰值为 160kN。加载幅值为 40kN、80kN、120kN、160kN。每个幅值加载 3 个周期。加载波形和实测加载曲线分别如图 6 和图 7。

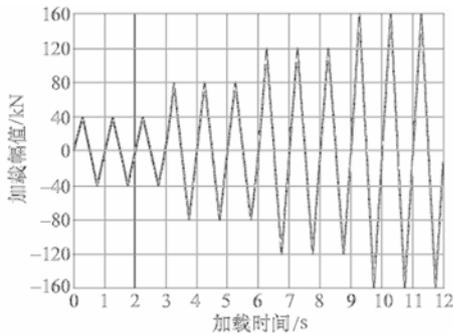


图 6 三角波加载波形

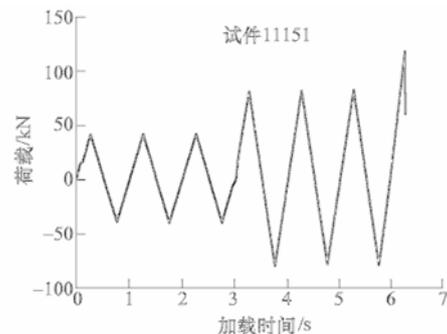


图 7 实测加载曲线

实测的应变经处理后,其顶面平均应变和应变率分别如图 8 和图 9。

按弹性材料计算出简支梁顶、底面应力,根据实测的相应应变绘制全级配混凝土动态弯拉应力应变关系如图 10 所示。观察这个图,就可以发现往复动态加载与静态加载不同,动态加载过程分析很重要。

由图可见,试件在低应力范围处于线弹性状态,滞环很小,在较低应力范围,混凝土存在损伤,可见第1~3加载周期和第4~6加载周期试件的弹性模量逐渐变小,滞环越来越大,随着应力增加达到动态弯拉强度后很快破坏。分别计算出往往复荷载作用下,加载阶段弯拉与弯压状态弹性模量,均取初始弹性模量,结果见表3和图11。

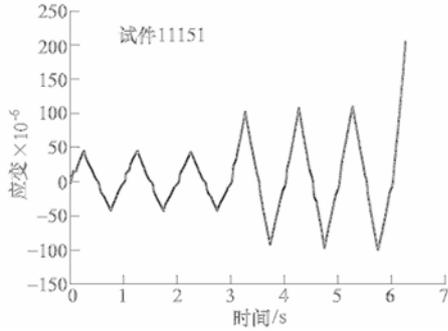


图8 顶面平均应变

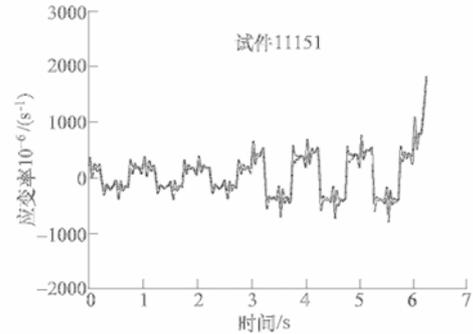


图9 顶面应变率

表3 全级配混凝土试件 11151 弹性模量随加载过程变化

	加载周次						
	1	2	3	4	5	6	7
弯拉弹性模量 GPa	32.28	32.83	31.58	31.95	29.37	25.36	25.77
弯压弹性模量 GPa	30.94	31.08	30.76	27.53	25.41	24.48	

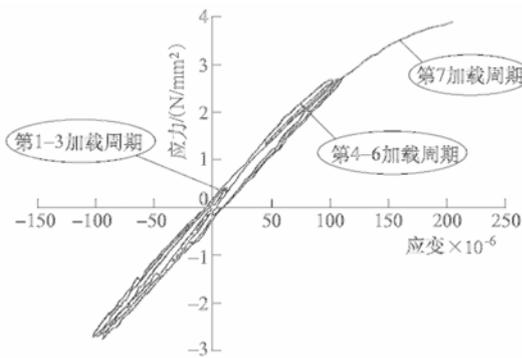


图10 试件动态应力应变关系(试件 11151)

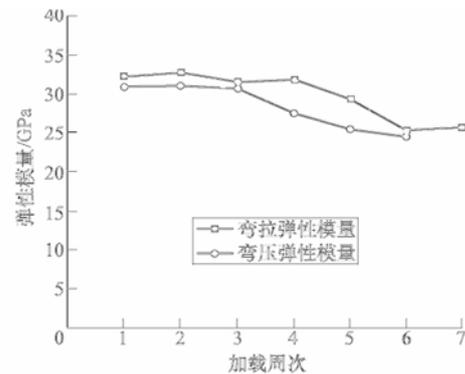


图11 动态弹性模量随加载过程变化

其它的重要结果,可以依据前述的数据处理原则对实测数据处理获得,如表4所示。

表4 全级配混凝土试件 11151 数据处理结果

破坏历时/s	应变率 × 10 ⁻⁶	抗弯强度 (N/mm ²)	弯拉弹性模量 GPa	弯压弹性模量 GPa	弯拉泊松比	弯压泊松比	起裂应变 × 10 ⁻⁶	起裂应力 (N/mm ²)	极限拉伸值 × 10 ⁻⁶
6.0±0.25	800	3.74	32.28	30.94	0.19	0.26	188	3.71	224

由于前期充分的准备、合理的设计、细致的预备性试验以及完善的总结,形成了较为系统的混凝土动态弯拉试验技术。在进行小湾拱坝大坝混凝土弯拉试验中,已经完成了66个湿筛、54个三级配和4个四级配混凝土试件的试验,试验成功率达98%以上。

5 结语

混凝土动态弯拉试验尚无规范,本文作者通过长时间的摸索和试验研究,取得如下成果:(1)自行设计出适合进行往复拉压加载试件系列夹具(普通混凝土,湿筛、三级配和四级配混凝土试件),可以实现多种类型荷载的施加,如冲击波、变幅三角波、正弦波、模拟地震波、随机波加载等;(2)提出了合理的试

件安装方法;(3)提出了动态加载的加载制度设计及实施方法;(4)探索了混凝土动态弯拉试验数据采集和处理方法。实践证明,该试验技术取得了良好的效果,为今后建立混凝土动态弯拉试验标准打下了基础。

参 考 文 献:

- [1] Abrams D A. Effect of rate of application of load on the compressive strength of concrete[C]. Proc., 20th Annu. Meeting. ASIM, West Conshohocken, Pa. 1917, (17), 366—374.
- [2] 吴胜兴,周继凯. 混凝土动态特性及其机理研究[J]. 徐州工程学院学报, 2005, 20(1): 15—28.
- [3] 周继凯. 高拱坝全级配混凝土动态弯拉力学特性试验与机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [4] 陈厚群. 混凝土大坝抗震中的力学问题[J]. 力学与实践, 2006, 28(2): 1—8.
- [5] 林皋, 陈健云. 混凝土大坝的抗震安全评价[J]. 水利学报, 2001(2): 8—15.
- [6] 张楚汉. 高坝—水电站工程建设中的关键科学技术问题[J]. 贵州水力发电, 2005, 19(2): 1—4.
- [7] 陈厚群, 侯顺载, 李金玉, 等. 高拱坝全级配混凝土动态试验研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.
- [8] SL203-97, 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [9] 陈厚群, 吴胜兴, 周继凯, 等. 全级配坝体混凝土动力性能试验研究报告[R]. 南京: 河海大学, 2004.
- [10] DL/T 5150-2001, 水工混凝土试验规程[S].

Test technique and data processing method for dynamic flexural-tensile test of concrete

WU Sheng-xing¹, ZHOU Ji-kai¹, SHEN De-jian¹, CHEN Hou-qun^{1,2}

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The study on test technique and data processing method for dynamic flexural-tensile test of concrete were carried out. A series of testing devices for generating the cyclic compressive-tensile load are designed according to the principle of the third middle point loading method for simply supported beam and refer to the *Test Code for Concrete of Hydraulic Engineering*. The testing devices are adaptive to the specimens of wet sieved concrete, third-graded concrete as well as fourth-graded concrete and enable to generate several kinds of loading such as impact wave, triangular wave, sine wave and random wave. Base on experiments, a series of procedures for carry out the dynamic flexural-tensile test of concrete such as specimen installation, application of load, data collection, data processing etc. A normalized procedure of test instruction is established accordingly. An example of application is given.

Key words: dynamic flexural-tensile test; fully-graded concrete; testing device; test technique; data processing

(责任编辑:王冰伟)