

# 混凝土多轴强度与变形特性的试验方法

王旭虹<sup>1</sup>, 汪基伟<sup>2</sup>

(1. 上海市嘉定区住宅发展局, 上海 201800; 2. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 综述研究混凝土多轴强度与变形特性试验设备的组成, 对试验中试件居中、消减试件表面摩擦、应力与应变的量测以及拉力的施加等技术难点提出了相应的技术措施, 并给出了混凝土多轴强度与变形特性试验的基本操作过程。

**关键词:** 混凝土; 多轴性能; 试验方法; 技术措施

**中图分类号:** TU502; TU528

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7647(2003)05-0016-02

混凝土作为一种应用最为广泛的建筑材料, 在整个结构工程领域起着重要的作用。我国现行的混凝土结构设计规范中给出的混凝土强度和变形设计指标, 都是基于单轴受压或受拉的试验结果。然而, 在实际结构中, 混凝土一般都处于复杂的多轴应力状态。因此, 研究混凝土在多轴应力状态下的强度和变形特性对结构的合理设计是极为重要的。

由于混凝土材料的复杂性, 多轴受力试验工作显得尤为重要。尽管国内外关于混凝土多轴性能的试验研究已取得不少成果, 但各研究单位在设备原理、加载方法、量测技术以及减摩措施等方面都有很大差别, 所得试验结果的离散度也较大<sup>[1]</sup>, 因而试验方法对试验结果有非常重要的影响。

## 1 试验设备

试验设备是混凝土多轴性能试验成败的关键因素。国外从 20 世纪 60 年代就开始研制混凝土多轴试验设备, 国内自 80 年代初起也有少数几家科研院所相继研制出了混凝土多轴试验设备, 并取得了较好的试验成果<sup>[2]</sup>。此类设备主要由四部分组成: 三向加载装置、荷载量测装置、应变变量测装置和数据采集处理装置。

**a. 三向加载装置:** 包括正交水平两向加载装置( $x, y$  轴)和竖向加载装置( $z$  轴)。三个方向要求相互独立且正交, 其主要部分基本相同, 均由液压加载系统、承力框架和加载板等组成。

**b. 荷载量测装置:** 大多数试验设备在液压加载系统中设置液压传感器, 由测定的油压计算荷载值, 也可以通过拉压荷载传感器, 由静态电阻应变变量测。

**c. 应变变量测装置:** 可以采用电阻应变片直接量测, 也可以在加载装置上安装变形传感器量测相对位移来获得试件的变形信息。

**d. 数据采集处理装置:** 试验过程中获得的荷载和变形信息可以利用计算机实现自动采集处理, 提高精度和效率。

## 2 技术措施

在进行混凝土多轴试验时, 有一些试验技术难点需要解决, 否则, 不可能达到预期的试验要求, 获得合理、准确的数据。

### 2.1 试件居中

试件在安装和加载过程中, 可能因为制作误差、材质不均匀、变形和破坏的不完全对称性等原因引起位置偏斜和受力偏心, 影响试验结果的准确性, 应在加载系统中采取措施, 予以调整。

将正交水平向( $x, y$  轴)的承力框架通过底部滚轮安装在底座固定的支撑架上, 每一方向的承力框架都可以自由移动, 既便于试件调位, 又可以使试件两面同时受力。水平方向液压缸成对设置, 加载后, 同方向的 2 个液压缸活塞同步运动, 可避免单个活塞加载使试件向一边变形的不对称情况。

对于竖向( $z$  轴), 试件的压缩或膨胀变形都可能造成水平方向荷载的偏心, 故在  $z$  轴上方只设一个液压缸, 试件向上移动时施加压力, 向下移动时施加拉力; 在下方设置弹簧机构, 将水平承力框架悬吊起来, 能上下随动。加载板和试件之间用球铰连接, 以适应试件表面的偏转。

## 2.2 消减试件表面摩擦

在进行混凝土单轴抗压试验时,试件在试验机上受压,纵向缩短,横向扩张.由于试验机钢承压板对试件表面的横向摩擦约束,提高了混凝土的抗压强度.在多轴抗压试验时,如果不采取措施消除或减小此摩擦约束,试件各受力面上的约束作用相互影响,可使混凝土的试验强度提高.为了获得真实的混凝土多轴强度,必须采取减摩措施以消除加载边界条件的影响.

在已有的混凝土多轴试验中,常见的减摩措施主要有2种:采用刷形加载板;各种材料和构造的减摩垫层.

刷形加载板为德国慕尼黑大学首创,大连理工大学对此做过专门研究<sup>[3]</sup>,可以起到较好的减摩效果.但采用刷形加载板太复杂,费时又费钱.

清华大学曾设计制作了约20种不同材料和构造的减摩垫层,进行了对比试验<sup>[1,2]</sup>,试验结果表明由2种材料构造的减摩垫层减摩效果良好,已被大多数科研单位效仿:①2层聚四氟乙烯(各厚2mm)中间加少许二硫化钼油膏,主要用于二轴试验.必须注意的是在进行高强度混凝土试验时,聚四氟乙烯会发生很大的塑性变形,标定起来困难,对变形量测不利,且价格昂贵<sup>[4]</sup>;②3层铝箔(各厚0.2mm)中间加少许二硫化钼油膏<sup>[5]</sup>,主要用于三轴试验.

在试件的受拉方向,由于混凝土的多轴抗拉强度很低,拉应变很小,且试件和加载板之间的粘结胶的弹性模量不大,对试件端面的约束作用有限,故一般在试件的受拉面可以不采取减摩措施<sup>[2]</sup>.

## 2.3 荷载(应力)的量测

3个方向的荷载值或主应力值是混凝土多轴试验中最主要的量测项目.虽然在油路系统中设置液压传感器,可以由测定的油压值直接计算荷载值,但由于整个油路系统中有油压损失,最终测得的油压值并不等于施加于试件的有效荷载值,因此量测液压并非理想方案<sup>[2]</sup>.

较多的是在试验设备中的承力框架上安装拉压荷载传感器实现直接量测.在每一方向的荷载传感器上安装荷载放大器以及测读万用表,加载时,可根据表上的读数控制三向应力比,实现自动采集荷载值.

## 2.4 应变的量测

混凝土多轴试验的变形量测比较困难,现实可行的量测方法主要有3类:

a. 在试件侧面埋置应变片直接量测<sup>[5]</sup>.这种方法虽然简单方便,但是会影响试件的性能,试件开裂和膨胀过程中,应变片可能破坏,且受到电阻片线性量程的限制.

b. 变形传感器量测加载板的位移<sup>[6]</sup>.这种方法虽然不受量程的限制,但对变形传感器的灵敏度要求很高,且受到减摩垫层变形的影响.如果减摩垫层变形不稳定就会影响量测精度.

c. 直接量测试件的变形值<sup>[2]</sup>.在加载板和减摩垫层的中心钻1个圆孔,将变形传感器的触头直接抵到试件表面,量测位移值就可以计算试件的应变,不会受到减摩垫层变形的影响.但是此量测方法复杂,且当试件加载到很高应力时,圆孔处的混凝土往外挤出,影响传感器的读数,引起误差.

上述方法各有缺点,试验时综合考虑,兼而用之,可以相互印证和补充.

## 2.5 施加拉力

用于三轴加载的试件要求6面保持平整且正交,因此在试验前应对试件进行机械磨面,满足试件受力均匀的要求.当需要对试件施加拉力时,加载板和试件之间粘结胶的粘结强度必须大于混凝土的抗拉强度.必须注意的是,试件在浇筑和振捣过程中,少量空气沿模板侧面上升,使凝固后的试件形成含有较多气泡的水泥砂浆表层,厚度约2~4mm.这一薄弱层的抗拉强度显然偏低,受拉试件总是在这一层内被拉断,不反映混凝土的真实抗拉强度.所以,用作受拉试验的试件必须制作较大尺寸的混凝土块体,切割其表面层后进行加工.

## 3 试验操作过程

混凝土多轴强度和变形试验基本按下列步骤进行:

a. 试件的减摩处理及安装:对于受压试件包括涂贴减摩材料,安装试件等;对于受拉试件,必须提前将受拉面与加载板粘结好,粘结质量的好坏直接取决于试件表面的清洁度,粘结胶必须全面覆盖,以防试件受拉后在粘结缺陷处产生应力集中而出现拉断面.试件安装后,调整试件和加载板的位置.

b. 施加初始压力(或拉力):施加值一般很小,以使试件受力严合,并检查各部分运行是否正常.

c. 记录初始读数:将初始荷载卸为零,重新对位移与荷载值调零,记录初值.

d. 正常加载:初始准备工作齐全后,开始分级等速平稳加载,记录荷载和应变值.

e. 卸载:加载到试件破坏或达到试验设备最大吨位时(此时试件可能仍未破坏)卸载.先卸大比例向荷载,小比例向荷载视情况后卸,以防止小比例向荷载卸得过快造成试件产生卸载裂缝,甚至破坏.

f. 检查清理:卸下试件,清理设备以便进行下次试验.

(下转第57页)

式(5)中的第二部分代表了当前工况下,泵站存在的节电潜力,从负面讲也是泵站浪费的吨水电耗,记为 $\Delta W$ 。

$$\Delta W = \frac{H_0(Q, t)}{367 \times \eta_{\max}(Q, H)} \frac{\Delta \eta(Q, H)}{\eta(Q, H)} + \frac{\Delta H(Q, t)}{367 \times \eta(Q, H)} \quad (7)$$

效率偏差 $\Delta \eta(Q, H)$ 为零时,式(7)中的第一部分等于零。富裕扬程 $\Delta H(Q, t)$ 为零时,第二部分等于零。富裕扬程及效率偏差是泵站电能浪费的主要原因,富裕扬程造成的电能浪费可以采用调速方法予以解决,当前急需解决的问题是泵站整体效率偏差。

## 2 泵站电耗五项法则

a. 泵站吨水电耗 $W$ 同泵站供水总扬程 $H$ 成正比,与整体效率 $\eta$ 成反比。

b. 泵站吨水电耗 $W$ 等于目标电耗 $W_{\min}$ 与节电潜力 $\Delta W$ 之和: $W = W_{\min} + \Delta W$

c. 富裕扬程 $\Delta H$ 和效率偏差 $\Delta \eta$ 两项都为零,吨水电耗 $W$ 达到最小等于目标电耗 $W_{\min}$ 。

d. 富裕扬程 $\Delta H$ 或者效率偏差 $\Delta \eta$ 有一项大于零,则节电潜力 $\Delta W$ 大于零。

e. 使节电潜力 $\Delta W = 0$ 的必要性由经济性决定,因为要使 $\Delta W = 0$ ,有时必须要添加调节设备,这样就要对经济性做出判别。

## 3 用目标电耗技术确定泵站的目标电耗

只要知道了泵站的目标电耗(最低吨水电耗) $W_{\min}$ ,也就知道了泵站存在的节电潜力 $\Delta W$ ;知道了使 $\Delta \eta(Q, H)$ 为零的手段,也就知道了如何实现目

标电耗的控制方法。国家重点科技成果推广项目“泵站目标电耗设计测算软件”Pump Save 1.0 能很好地解决这一问题。该软件使用泵站整体优化模型确定出泵站的最低吨水电耗,并给出整体优化运行控制方法,该软件可以对新建泵站进行目标电耗设计,可以对已有泵站进行节能测算及目标电耗控制运行。使用者只需将泵站所用设备和工艺要求输入该软件,软件自动给出泵站的目标电耗变化曲线,如图1所示。

图1中只要知道流量 $Q$ 就可以查出对应该点的目标电耗值 $W_{\min}$ , $Q_1$ 和 $Q_2$ 等流量点的目标电耗达到极限最小值 $W_m$ 。对于大型调水工程,因为有河道和湖泊的调蓄作用,可以把时间 $t$ 内的流量 $Q$ 分解为流量 $Q_1$ 和流量 $Q_2$ 的组合,即: $t = t_1 + t_2$ , $Qt = Q_1 t_1 + Q_2 t_2$ 。这样,大型调水工程就可以实现全年工作在目标电耗极限最小值 $W_m$ ,由于大型调水工程全年的耗电量巨大,确定 $W_m$ 意义重大。

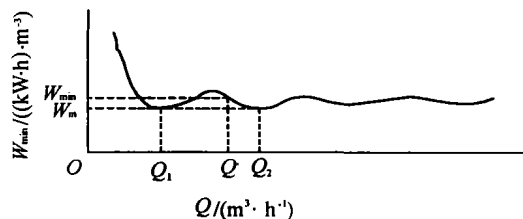


图1 泵站目标电耗变化曲线

## 参考文献:

- [1] 姚福来. 水泵变频调速的节电量计算及系统设计[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 50 ~ 69.
- [2] 姚福来. 用目标电耗技术定量确定泵站的节电潜力[J]. 变频器世界, 2002, 6(11): 56 ~ 59.

(收稿日期: 2002-08-30 编辑: 张志琴)

(上接第17页)

## 4 结 语

混凝土多轴强度和变形的试验与理论研究成果中,有些比较成熟的结论已得到认同,更多的还处于探索、深入阶段,有待更多、更准确的试验和理论研究。应在实践中不断改进试验方法和试验技术,以获得更加准确的试验结果,从而为理论研究和工程实践提供基础,取得更好的技术和经济效益。

## 参考文献:

- [1] 过镇海,王传志,张秀琴,等. 混凝土的多轴强度试验和破坏准则研究[A]. 见: 清华大学抗震抗爆工程研究室.

混凝土力学性能的试验研究[C]. 北京: 清华大学出版社, 1996. 1 ~ 51.

- [2] 过镇海. 混凝土的强度和变形试验基础和本构关系[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. 109 ~ 122.
- [3] 彭放. 复杂应力状态下多种混凝土的破坏准则及本构模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 1990.
- [4] 蔡澄清. 平面应变状态下混凝土本构模型的试验研究及非线性有限元分析[D]. 大连: 大连理工大学, 1988.
- [5] 李伟政,过镇海. 二轴拉压应力状态下混凝土的强度和变形试验研究[J]. 水利学报, 1991(8): 51 ~ 56.
- [6] 宋玉普,沈吉纳,靳国礼. 多功能三轴混凝土试验系统[J]. 大连理工大学学报, 1992, 32(4): 460 ~ 464.

(收稿日期: 2002-12-03 编辑: 傅伟群)