文章编号:1000-8608(2010)03-0393-06

定侧压下大坝原级配混凝土强度和变形试验研究

王怀亮*1,2, 宋玉普2

(1.大连大学 建筑工程学院,辽宁 大连 116622;

2. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:利用大连理工大学自行研制改造的液压伺服静动态三轴试验系统进行了不同骨料级 配和尺寸的混凝土试件定侧压下的双轴压强度和变形性能试验.试验所用试件有3种:采用 大坝原级配最大骨料粒径为80mm的立方体试件以及相应的湿筛混凝土试件,尺寸分别为 250mm×250mm×250mm、150mm×150mm×150mm、100mm×100mm×100mm、试验 过程中,测得了所有试件两个加载方向的应力和应变,并根据试验结果,系统地探讨了不同级 配混凝土在定侧压下的极限强度和变形、应力-应变曲线以及破坏形态的变化规律,发现大骨 料混凝土在定侧压下的极限强度和变形能力要比相应的湿筛小骨料混凝土提高更多;最后分 别在主应力空间、主应变空间和八面体应力空间建立了不同级配混凝土的破坏准则,为水工 大体积混凝土按多轴强度理论进行设计提供了试验依据.

关键词:大骨料混凝土;定侧压;强度;变形;破坏准则 中**图分类号:**TU375 **文献标志码:**A

0 引 言

在实际工程中,大多数混凝土建筑物,特别是 水工大体积混凝土结构,如各种类型的重力坝和 拱坝等,混凝土的大部分都处于明显的二轴或三 轴应力状态,对这种复杂的应力状态,世界上的许 多国家,如美国、日本、法国、意大利和前苏联等都 在一些设计规范中考虑了多轴强度[1,2],我国在 2002年出版的《混凝土结构设计规范》[3]中也正 式编入了混凝土在多轴应力下的强度值,这不但 反映了我国技术上的进步,而且给工程建设带来 了巨大的经济效益,这些研究成果只是针对普通 混凝土材料的多轴强度和变形性能,而大坝混凝 土与普通混凝土由于胶凝材料和粗骨料所占比重 有较大的差异,两者力学和变形性能也有着很大 的差别,比如根据美国垦务局的实验资料[4].全级 配大坝混凝土试件的抗压强度普遍低于湿筛小试 件,平均降幅可达20%左右,而抗拉强度的平均 降幅更达 30% 左右. 这些试验结果说明, 大骨料 混凝土试件单轴强度和变形存在明显的尺寸效应 和骨料湿筛效应.那么在多轴应力状态下,混凝土 试件是否也存在上述效应呢?混凝土大小试件及 大小骨料之间多轴强度和变形有什么关系?由于 大体积混凝土结构的受力均是处于复杂应力状态,以上这些问题正是将多轴混凝土强度准则应 用于混凝土拱坝、重力坝等大体积混凝土结构的 设计和非线性分析所必须解决的问题.

现有的混凝土多轴强度试验数据,绝大部分 是在各向应力比例加载情况下获得的,而实际结 构中比如大坝内部,由于混凝土材料的非线性变 形和受拉裂缝的形成和逐渐扩展,即使外荷载按 比例增加,结构内混凝土的各应力分量也不可能 按比例增加,因此,研究混凝土在非比例加载下的 强度和变形试验也是非常重要的.目前,非比例加 载的混凝土多轴试验资料还比较少,并且对混凝 土在不同应力途径下其强度和变形是否有差别, 以及差别究竟有多大的问题,学术界还存在着较 大的争议,如文献[5]通过试验研究指出,混凝土 在双轴压应力状态下,只要应力途径的变化发生

收稿日期: 2007-11-27; 修回日期: 2010-02-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50908026);中国博士后基金资助项目(20080441117,200902541).

作者简介: 王怀亮*(1979-),男,博士,大连理工大学 2007 届博士,E-mail:whl2003_2002@tom.com;宋玉普(1944-),男,教授,博士 生导师.

在微裂缝的稳定发展阶段,即使在初应力水平指 标不太高的情况下,混凝土的最终破坏形态和多 轴抗压强度值与此前的应力途径无关.文献[6]则 根据双轴反复加载试验结果认为反复加载的应力 历史会导致强度值的提高.本文以大坝原级配混 凝土及其湿筛混凝土为研究对象,进行3种不同 骨料级配混凝土定侧压下的双轴压强度和变形性 能试验,分析极限抗压强度和变形性能随侧压应 力水平的变化规律,建立不同骨料级配混凝土的 双轴强度准则,以期为水工大体积混凝土按多轴 强度理论进行设计提供试验和理论依据.

1 试验材料及试验设备

水工上常用的大骨料混凝土有最大骨料粒径

为80 mm的三级配混凝土和最大骨料粒径为150 mm的四级配混凝土,根据试件的横向尺寸须大于最大骨料粒径3倍的要求,对于三级配混凝土和全级配混凝土受压试件尺寸至少为250 mm×250 mm×250 mm×450 mm×450 mm×450 mm×450 mm×450 mm×250 mm×450 mm×250 mm×250 mm的三级配混凝土立方体试件(最大骨料粒径80 mm),然后是筛除掉大于40 mm 骨料的湿筛二级配混凝土150 mm×150 mm×150 mm标准试件,以及筛除掉大于20 mm 粗骨料的湿筛一级配混凝土100 mm×100 mm立方体试件.试验使用混凝土配合比与某大坝水电站混凝土配合比相同^[7],其配合比见表1.

表1 混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportions of the concrete kg									
水	水泥	粉煤灰	中砂	木钙	佰	n			
				减水剂	$5 \sim 20$	$20\!\sim\!40$	40~80		
129	179.2	35.8	699	0.43	407.1	407.1	542.8		

所用水泥为大连水泥厂生产的 R32.5 硅酸 盐水泥;粉煤灰采用大连华能热电厂生产的国家 二级粉煤灰;砂子为天然河砂(粒径为 1.25~ 5.00 mm),细度模数 2.6~2.8,属于中砂;粗骨 料为三级配石灰岩碎石,其中小石(5~20 mm)、 中石(20~40 mm)、大石(40~80 mm)的比例是 3:3:4.所有试件的制作和养护按水工混凝土试 验规程^[8]的规定进行,所有大试件用跌落式搅拌 机搅拌混凝土,插入式振捣棒振捣,然后使用木制 胶合板模成型;湿筛试件则用平板振捣器振捣密 实,然后用标准钢模成型.所有试件均为 48 h 后 脱模,放置到上覆石棉瓦的养护棚中露天盖草浇 水养护至 90 d 龄期,其后在自然条件下养护.

试验设备采用大连理工大学海岸和近海工程 国家重点实验室的大型静、动三轴电液伺服试验 系统.为了使该系统能进行混凝土各种尺寸试件 的双轴压试验,对试验装置进行了特别改造,在两 个方向上分别设计加工了3套不同型号的加载 头,其尺寸分别为95 mm×95 mm×40 mm、 145 mm×145 mm×45 mm、245 mm×245 mm× 55 mm.试验时,将试件安装在试验机的加载板 间,试件加载面与加载板之间采取减摩措施,减摩 材料采用3层塑料薄膜夹3层甘油.具体加载顺 序:先竖向对中反复预压后,在水平向预压并加载 至预设的侧应力值,并保持恒定,再以设定的加载 速率施加竖向荷载直至试件破坏.侧应力加载量 级分别为 0、0.25 f。0.50 f。0.75 f。和0.90 f。试 验中,每一应力比或者每个侧压比下至少试验 3 个试件,当发现离散性较大时,适当增加试件数 目.试件的变形用 LVDT 线性位移计测量,每一 个方向设置两支取它们读数的平均值作为试件在 该方向的位移和应变值,试件承受的侧应力和正 应力均由计算机动态采集.图 1 为双轴压试验加 载原理图.



1 混凝土试件; 2 带球铰的压头; 3 荷载传感器;
 4 LVDT; 5 压杆; 6 螺旋千斤顶; 7 油缸及伺服系统; 8 放大器; 9 控制面板; 10 采集系统

图1 试验系统原理图

Fig. 1 Schematic chart of the testing equipment

. . _

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

非比例双轴压作用下,不同骨料级配和尺寸 的混凝土试件的破坏形态比较接近,但由于三级 配混凝土试件内部的界面裂缝、孔隙等缺陷存在 的机率大,同时,粗骨料本身的裂隙缺陷也相对要 大,大试件破坏时的爆裂声非常响亮,试验后观 察发现大石有较多的断裂出现,并且有破碎的混 凝土小块崩出,这种现象在小试块中是没有的;另 外在试验过程中,大试件表面的斜裂缝数量和宽 度也明显地大于小试件.所有混凝土试件在单轴 压和侧应力比 (σ_2/f_c) 小于 0.25 的双轴压状态 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,使得裂缝沿平行 于自由面方向和平行于σ₃方向都较发育,破坏形 状呈柱状,见图 2(a);在侧应力比为 0.5~0.9 的 双轴压状态下,由于 σ₂、σ₂ 方向的压应力都较大, 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(b).





 (a) 桂状破坏
 (b) 片状破坏
 图 2 不同侧压下的混凝土试件破坏形态
 Fig. 2 Failure shapes of concrete specimens under different lateral stresses

2.2 极限抗压强度

试验测得的混凝土大小试件在不同侧压下的 抗压强度见表 2. 由表可见,尽管混凝土配合比不 变,但由于骨料粒径和尺寸不同,混凝土大试件的 单轴极限抗压强度明显低于小试件,三级配混凝土 的单轴强度分别为一、二级配的 70.0%和75.3%. 混凝土在一向定侧压的双轴压作用下,其极限抗压 强度 σ_{3p} 较单轴受压有所提高,图 3 给出了极限强 度 σ_{3p} 较单轴壳压有所提高,图 3 给出了极限强 度 σ_{3p} 较单轴抗压强度 f_c 的提高比例,从图中可 以看出,对同一种级配混凝土,侧应力比越大,混 凝土极限抗压强度 σ_{3p} 的提高幅度越大,直至 $\sigma_2/f_c=0.75$ 以后,强度提高幅度开始下降;还可 以看出在大致同一侧应力比水平下,大骨料混凝土 强度提高幅度略大于小骨料混凝土,如在侧压应力 水平为 0.75 *f*。时,一级配到三级配混凝土极限抗 压强度提高值分别为 33.1%、41.0%和 49.8%.

表 2 定侧压下不同级配混凝土双轴抗压强度

Tab. 2 Biaxial compressive strength for different aggregate-graded concrete with constant lateral stress

混凝土	伯曰	侧压应力/MPa						
骨料级配	細亏	0(单压)	0.25 $f_{\rm c}$	$0.50 f_{\rm c}$	$0.75 f_{\rm c}$	0.90 <i>f</i> c		
	1	25.08	29.47	31.87	34.44	32.46		
	2	24.63	30.81	32.54	33.52	30.89		
<u> </u>	3	25.48	30.66	33.50	32.82	32.29		
	4	25.58	31.98	34.05	33.38	31.44		
	均值	25.19	30.73	32.99	33.54	31.77		
	1	25.63	29.42	33.78	31.08	30.15		
	2	21.64	29.68	32.03	33.07	25.68*		
<u> </u>	3	23.97	31.39	30.07	34.15	32.22		
	4	22.01	30.06	31.08	33.14	33.09		
	均值	23.31	30.14	31.74	32.86	31.82		
	1	18.62	23.50	26.04	26.75	24.75		
	2	17.74	23.89	25.41	26.46	24.73		
Ξ	3	16.97	23.28	24.81	25.63	24.81		
	4	16.80	23.85					
	均值	17.53	23.63	25.42	26.28	24.76		



图 3 不同侧应力下极限抗压强度包络线 Fig. 3 The envelope curves of ultimate compressive strength under different lateral stresses

2.3 极限变形

图 4、5 分别为不同骨料级配的混凝土主压向 峰值应变和侧压向峰值应变随侧压应力的变化规 律,可见,某一侧压应力水平下,随骨料尺寸和试件 尺寸的增加,主压向和侧压向的峰值应变(绝对值) 均逐渐减小;对同一骨料级配的混凝土,主压向峰 值应变 ϵ_{3p} 一直为受压,并且随着侧应力比 σ_2/f_c 的 增大而增大,当 $\sigma_2/f_c=0.75$ 以后,受压应变提高 幅度开始下降.这个规律与峰值应力的变化规律 相同,大骨料混凝土主压向峰值应变提高程度要 略高于小骨料混凝土.侧压应变 ϵ_{2p} 取决于侧应力 比 σ_2/f_c 的大小,由受拉变为受压,即 σ_2/f_c 在 $0 \sim 0.25, \epsilon_{2p}$ 为受拉; σ_2 / f_c 在 0.25~0.90, ϵ_{2p} 为受 压, ϵ_{2p} 与 σ_2 / f_c 的关系大致呈直线规律.



图4 不同骨料级配混凝土主压向峰值应 变随侧压应力的变化规律

Fig. 4 Relationship between principal strain at peak stress and lateral stress for different aggregate-graded concretes



图 5 不同骨料级配混凝土侧压向峰值应 变随侧压应力的变化规律

Fig. 5 Relationship between lateral strain at peak stress and lateral stress for different aggregate-graded concretes

2.4 应力-应变关系曲线

图 6 为不同骨料级配混凝土在定侧压加载情 形下的应力-应变关系曲线.由各图可见,恒定侧 压二轴应力状态下,一方面,混凝土应力-应变曲线 的线性段比单轴受压时提高,线性段提高的幅度与 侧应力比的大小直接相关,侧应力比越大,线性段 提高的幅度越大;另一方面,混凝土受压两个方向 上的刚度分别较单向受压时其初期刚度提高幅度 小,而中后期刚度提高幅度大.从侧压方向来看,先 施加的侧压应力 σ_2 ,明显地降低了主压应力 σ_3 在 侧向产生的应变值 $|\Delta \epsilon|$,在 $\sigma_2 = 0.90 f_c$ 时, $\Delta \epsilon \approx$ 0.对图 6 中各图比较可知,同一恒定侧压应力水平 下,三级配混凝土初始弹性模量和泊松比要略高于 湿筛混凝土的初始弹性模量和泊松比,表现为应 力-应变曲线初始线性段的斜率相应增大,整个曲 线显得比较陡.这与大骨料混凝土中骨料含量高、 灰浆含量少使混凝土刚度增大有关.



图 6 定侧压加载下不同骨料级配混凝土双轴应 力-应变曲线



3 破坏准则

3.1 主应力空间破坏准则

根据前面对极限强度变化规律的分析,借鉴 Kupfer等提出的双轴压强度公式^[9],得出抗压强 度与侧应力之间的关系为

$$\sigma_{\rm 3p}/f_{\rm c} = -\frac{1+c\sigma_{\rm 2p}/f_{\rm c}}{(1+\sigma_{\rm 2p}/f_{\rm c})^2} \tag{1}$$

式中:σ₂p为破坏时的侧压应力,c为回归系数.通

过对本文试验数据的拟合得出:对于一级配、二级 配、三级配混凝土,c分别为 3.939 8、4.283 2 和 4.596 9,相关系数 r 分别为 0.966、0.974 和 0.968.图 7 为主应力空间表示的强度准则计算值 与本文的试验结果的对比图,可见由式(1)计算的 结果与试验值符合较好.



- 图 7 定侧压下不同骨料级配混凝土抗压强度 与侧应力的关系
- Fig. 7 Relationship between compressive strength and lateral stress for different aggregate-graded concretes with constant lateral stress

3.2 主应变空间破坏准则

根据前面对极限变形变化规律的分析可知, 无论混凝土骨料级配如何,主加载方向和侧应力 方向的峰值应变受侧向应力水平的影响显著,经 过回归分析得出以下用峰值应力点对应的侧压应 变 ε_{2p} 和主压向应变 ε_{3p} 描述的破坏准则.

对于一级配混凝土有

$$\varepsilon_{3p} = 128.17(\sigma_2/f_c)^2 - 323.58(\sigma_2/f_c) - 2248.9; r = 0.94$$
 $\varepsilon_{2p} = -2912.9(\sigma_2/f_c) + 969.21; r = 0.99 (2)$
对于二级配混凝土有

$$\varepsilon_{3p} = 224.91(\sigma_2/f_c)^2 - 410.87(\sigma_2/f_c) - 2.025.4; r = 0.91$$

- $\varepsilon_{2p} = -2599.8(\sigma_2/f_c) + 852.55; r = 0.99(3)$ 对于三级配混凝土有
- $\varepsilon_{3p} = 260.32(\sigma_2/f_c)^2 714.14(\sigma_2/f_c) 1599.7; r = 0.95$

 $\varepsilon_{2p} = -1564.1(\sigma_2/f_c) + 505.35; r = 0.99$ (4)

3.3 八面体应力空间破坏准则

文献[10]中进行了等比例加载路径下3种骨 料级配混凝土的双轴压试验,通过与本文定侧压 路径下双轴压强度试验数据进行比较(见图 8,图 中σ_{2p}、σ_{3p}为两个方向的峰值应力),可以发现两 种加载路径下,同一级配混凝土的双轴压强度相差 不大,因此,可以得出结论,应力路径对双轴压强度 基本无影响,建立应力强度准则时可以不考虑应力 路径,这里将本文表2和文献[10]中的双轴压强度 试验数据转化为八面体应力空间中的应力,其中八 面体正应力和剪应力由式(5)和(6)计算:

$$\sigma_{\rm oct} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 \tag{5}$$

剪应力

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}$$
(6)

最终回归分析得出对于一级配混凝土有 $\tau_{ot}/f_{c} = 0.245 9 - 0.928 6\sigma_{ot}/f_{c} -$

$$0.743 \ 5(\sigma_{\rm out}/f_{\rm s})^2; \ r = 0.92 \quad (7)$$

对于二级配混凝土有

$$\tau_{\rm oct}/f_{\rm c} = 0.222\ 9 - 0.998\ 7\sigma_{\rm oct}/f_{\rm c} -$$

0.708
$$6(\sigma_{\rm oct}/f_{\rm c})^2$$
; $r = 0.94$ (8)

对于三级配混凝土有

$$\tau_{\rm oct}/f_{\rm c} = 0.280\ 8 - 0.747\ 3\sigma_{\rm oct}/f_{\rm c} - 0.405\ 2(\sigma_{\rm oct}/f_{\rm c})^2;\ r = 0.92 \quad (9)$$



图 8 不同应力路径下的双轴压平均强度对比 Fig. 8 The contrast of average biaxial compression strength under different loading paths

4 结 论

(1)混凝土在定侧压非比例加载方式下的破 坏形态与比例加载下破坏形态基本相似,随着侧 压应力的增大,破坏形态逐步从柱状破坏向片状 破坏过渡.在破坏时,大骨料混凝土试件表面的斜 裂缝数目和宽度要明显高于小试件.

(2)不同骨料级配混凝土在一向定侧压的双 轴压作用下,其极限抗压强度较单轴受压都有所 提高;在同一侧应力比水平下,大骨料混凝土强度 提高值略大于小骨料混凝土.

(3)承受定侧压的双轴压应力后,无论混凝土 骨料级配如何,主加载方向和侧压方向的峰值应 变受侧应力的影响显著,主压向应变 ϵ_{3p} 大于单轴 受压的峰值应变,且随着侧压力的提高而增加;侧 压向应变 ϵ_{2p} 则取决于侧应力比 σ_2/f_c 的大小,即 σ_2/f_c 在 0 ~ 0. 25, ϵ_{2p} 为受拉, σ_2/f_c 在 0. 25 ~ 0.90, ϵ_{2p} 为受压.

(4) 在双轴受压加载的不同应力途径中,等比 例加载和定侧压加载是两种极端情况,这两种应 力途径下大骨料混凝土的强度和变形规律对推断 其他应力途径下的力学特性有着重要的意义.若 利用本文的结果,再结合其他已有的大骨料混凝 土单调比例加载试验结果,便可推断其他多种应 力途径下大坝混凝土的强度和变形规律.

(5)根据本文所得试验数据,分别在主应力空间、主应变空间和八面体应力空间下建立了不同 骨料级配混凝土的破坏准则,这可供大体积混凝 土进行非线性有限元分析时选用,并且也为大体 积混凝土按多轴强度理论进行设计提供了试验和 理论依据.

参考文献:

- [1] 邓宗才.高性能大坝混凝土的强度与变形[M].北京:科学出版社,2006
- [2] ZHU B F. Stress level coefficient and safety level

coefficient for arch dams [J]. Dam Engineering, 2000, 11(3):133-142

- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50010-2002 混凝土结 构设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002
- [4] ACI Committee 207. Mass concrete [R] // Report ACI 207 IR-87. Detroit: American Concrete Institute, 1987
- [5] LAN S, GUO Z. Experimental investigation of multiaxial compressive strength under different stress paths [J]. ACI Materials Journal, 1997, 94 (5): 427-434
- [6] TORRENTI J M, DJEBRI B, BASCOUL A. Biaxial compression of concrete:Influence of the stress path on concrete strains [J]. Materials and Structures, 1993, 26(157):181-184
- [7] 王怀亮,宋玉普,曲晓东,等.大坝原级配混凝土在双 轴拉压及三轴拉压压受力状态下的试验研究[J].土 木工程学报,2007,40(7):104-110
- [8] 中国水利水电科学研究院. DL/T 5150-2001 水工混 凝土试验规程[S]. 北京:中国电力出版社, 2002
- [9] KUPFER H, HILSDORF H K, RUSCH H. Behavior of concrete under biaxial stresses [J]. ACI Journal, 1969, 66(8):656-666
- [10] 王怀亮. 复杂应力状态下大骨料混凝土力学特性的 试验研究和分析[D]. 大连:大连理工大学,2007

Research on strength and deformation properties of mass concrete under compressive loading with constant lateral stress

WANG Huai-liang*1,2, SONG Yu-pu2

(1. Civil and Architectural Engineering College, Dalian University, Dalian 116622, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Experimental study of the deformation and strength of various aggregate grading and sized concrete specimens under biaxial compression with constant lateral stress was carried out with the static-dynamic hydraulic servo triaxial test system designed and manufactured by Dalian University of Technology. Tests were conducted on cubes of $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ fabricated with dam concrete(maximum aggregate of 80 mm), $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 100 \text{ mm$

Key words: mass concrete; constant lateral stress; strength; deformation; failure criterion