

# 大骨料混凝土在双轴压应力状态下的变形和强度试验研究

王怀亮, 陈雄, 关萍

(大连大学 建筑工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:**利用大连理工大学自行研制改造的液压伺服静、动态三轴试验系统对不同骨料级配和尺寸的混凝土试件在双向压荷载作用下的变形和强度特性进行了试验研究。试验所用试件有3种:采用大坝原级配最大骨料粒径为80 mm的立方体试件以及相应的湿筛混凝土试件,尺寸分别为250 mm×250 mm×250 mm, 150 mm×150 mm×150 mm和100 mm×100 mm×100 mm。试验过程中,测得了所有试件两个加载方向的应力和应变,以及未加载方向上的侧向变形,并根据试验结果,系统地探讨了不同级配混凝土的双轴抗压强度、极限变形、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双轴压作用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的更多,最后分别在主应力空间和主应变空间建立了不同级配混凝土的破坏准则,这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;双轴压;强度;变形;破坏准则

**中图分类号:**TU375

**文献标识码:**A

**文章编号:**1008-2395(2007)06-0081-07

**收稿日期:**2007-08-31

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(50479059)

**作者简介:**王怀亮(1979-),男,博士,主要从事混凝土结构基本理论研究。

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<sup>[1]</sup>,我国在2002年出版的《混凝土结构设计规范》<sup>[2]</sup>,也已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,而且将会对工程建设带来巨大的经济效益。但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<sup>[3]</sup>,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。正是由于以上原因,我们有必要进行大骨料混凝土大试件的多轴强度及变形的试验,以得到在复杂应力状态下大骨料混凝土的强度准则和本构关系,并在结构设计中,对大体积混凝土的受力性能做出更准确的模拟。本文将在对大骨料三级配混凝土进行双轴受压试验的基础上,探讨复杂应力作用下大骨料混凝土的强度、变形和破坏准则。

## 1 试验设备及试验技术

### 1.1 试验装置

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。该系统由电液伺服阀、电子控制线路和三向分别独立的加力架、加载板、液压缸和加载泵、荷载传感器和位移传感器(LVDT)组成,系统可以实现各种应力比下的三向拉、三向压和三向拉压的静动态试验,试验时可以进行荷载控制又可以进行位移控制。为了使该系统能进行混凝土各种尺寸试件的多轴试验,对试验装置进行了特别改造,在3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 和 245 mm × 245 mm × 55 mm. 由于大尺寸试件的加载板自重大, 很易偏心, 故在每个加载板的4个边上分别安装了弹簧, 与荷载传感器后面的加力架相连, 通过调整弹簧的松紧以保证加载板与试件相对中. 本文进行的是双轴压试验, 试验中的主轴方向(X轴)和从轴方向(Y轴)均采用最大压力为  $2.5 \times 10^3$  kN 的作动器, 并且所采用的荷载传感器量程均标定到了 250 t, 标定时每 5 t 标定 1 次, 以保证试验中所采集到荷载值的精度.

### 1.2 试件制作

本文试验采用最大试件为 250 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 立方体标准试件, 以及筛除掉大于 20 mm 粗骨料的湿筛一级配混凝土试件, 试件形式为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体(所谓湿筛法是指对刚拌制好的混凝土拌和物, 按试验所规定的最大骨料粒径选用对应的孔径筛进行湿筛, 筛除超过该粒径的骨料, 再用人工筛下的混凝土拌和物翻拌均匀的方法). 本次试验使用混凝土配合比如表 1.

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 mm), 细度模数 2.6 ~ 2.8, 属于中砂, 粗骨料为三级配石灰岩碎

表 1 混凝土配合比

水	水泥	粉煤灰	中砂	木钙 减水剂	碎石/mm		
					5~20	20~40	40~80
129	179.2	35.8	699	0.43	407.1	407.1	542.8

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<sup>[4]</sup>规定的进行, 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.

### 1.3 试验过程

试件在受压过程中, 由于泊松效应, 混凝土在受压方向(面内)发生压缩变形的同时将在面外产生横向膨胀, 由于混凝土和传力钢板两者的变形有差异, 传力板将会阻碍混凝土的横向膨胀, 从而在混凝土试件与传力板的接触面上产生约束剪应力(即摩擦力), 使双轴受压混凝土试件的应力状态在接触面附近变为三轴应力. 因此为了获得真实的混凝土多轴抗压强度, 也必须解决试件表面的摩擦约束问题. 由于本次试验试件尺寸形式有 3 种, 如果都采用同样的减摩措施, 有可能对试验结果产生影响, 根据文献<sup>[5]</sup>, 合理的减摩垫层的简化标准为: 使有减摩垫层的混凝土立方体抗压试验强度与无摩擦约束的抗压强度、或近似取为棱柱体抗压强度相等. 根据这一标准, 我们在试验前进行了一系列伴随试件的常规试验, 如表 2 所示.

从表 2 中可以看出, 各种试件减摩后的立方体抗压强度都基本与其棱柱体强度相当, 这说明采用相同的减摩措施对试验结果基本无影响, 本文对 3 种试件统一采用的减摩措施为: 在 3 层聚乙烯塑料薄膜间夹 2 层甘油, 在塑料布与试件受压面之间再涂 1 层黄甘油, 总共 3 层塑料布 3 层甘油.

表 2 不同骨料级配混凝土的基本力学性能

混凝土骨 料级配	MPa				
	立方体抗 压强度 (28 d)	立方体抗 压强度 (110 d)	立方体劈裂 抗拉强度 (110 d)	棱柱体抗 压强度 (110 d)	减摩后立方体 抗压强度 (110 d)
一	23.4	34.0	2.1	26.3	25.8
二	19.2	31.8	1.7	22.9	23.7
三	15.8	24.2	1.3	17.9	17.3

正式试验过程分 3 个步骤来完成: ①试验时将试件安装在三轴实验机的加载板之间, 调整做动头, 使压头靠近试件但不施力. ②通过计算机控制, 作动头以设定的位移速率施加到设定的预加荷载值(本次试验为 10 kN). 预加完毕后安放位移传感器(LVDT), 每个加载方向的相对两侧上安放两支, 来量测试件在加载方向上的变形, 测量值取两个 LVDT 读数的平均值; 另外在未加载方向上使用磁性支座固定两只 LVDT, 分别顶在试件两面的正中心, 用来测量未加载方向上的变形, 测量值取两个 LVDT 读数之

和,试验中 LVDT 的布置如图 2 和图 3 所示.并且注意要保证所有 LVDT 的测量标距不小于骨料最大粒径的 3 倍的要求.③正式加载.按照试验要求,在计算机程序中设定作动头的作动速度以及各轴出力之间的关系,在程序控制下进行加载.对大试件以  $0.025 \text{ mm/s}$  的位移速率正式加载;而小试件的加载速率则为  $0.01 \text{ mm/s}$ ,这样大小试件名义轴向应变率大致相同.同时采集各个轴向的位移和荷载值.试验完毕,拆下位移传感器,取出试件.

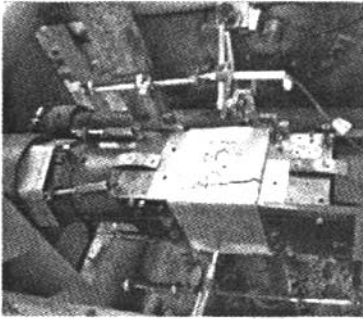


图1 单轴试验中的变形测量

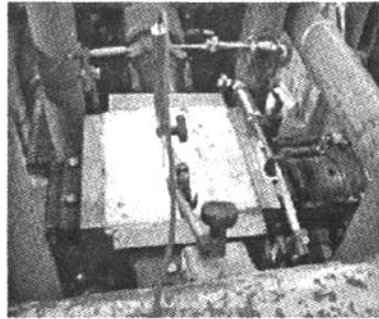


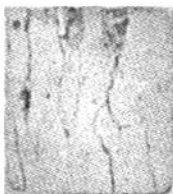
图2 双轴试验中的变形测量

本文完成了 3 种级配的混凝土试块在  $\alpha = \sigma_2/\sigma_3 = 0.25:1, 0.5:1, 0.75:1$  和  $1:1$  等 5 种应力比例下的双轴压缩试验,记录了在加载过程中荷载和位移的变化过程.试验中每一应力比至少试验 5 个试件,当发现离散性较大时,适当增加试件数目.

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试件破坏形态

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,试验后观察发现大石有较多的出现断裂和破碎现象,并且在试验时,随着裂缝和剥落的出现,伴随着较大的崩裂声,这在小试块中是没有的现象,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的多于小试件.3 种试件的典型破坏模式如图 3 ~ 图 5 所示,在单轴情况下,由于采取了减磨措施,削减了加载板对试件加载端面的约束作用,所有尺寸试件均表现为典型的柱状破坏(图 3).当应力比分别为  $0.25, 0.5$  和  $0.75$  时,从与侧压力垂直的面上看,破坏时试件沿与主压力方向分别成  $5^\circ \sim 10^\circ, 15^\circ \sim 20^\circ$  和  $40^\circ \sim 45^\circ$  倾角的裂缝带分成若干部分,而在与主压力垂直的方向上表现为与侧压力方向平行的裂缝(图 4).而当应力比为  $1:1$  时,由于试件受到两向相等的压力作用而引起自由面方向的拉伸应变,试件的上下两个自由面呈片状剥落,破坏面平行于自由面,表现为片状破坏(图 5).



(a) 一级配混凝土



(b) 二级配混凝土



(c) 三级配混凝土

图3 单轴压试件破坏形态

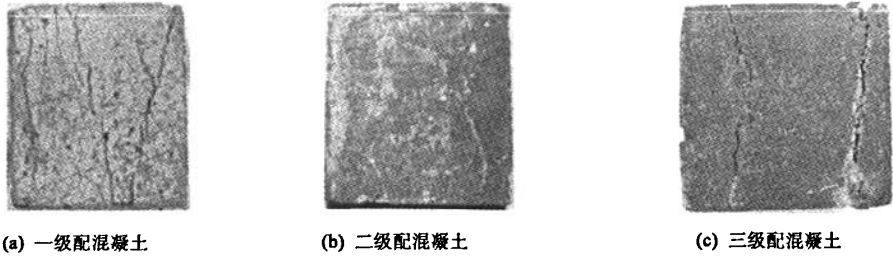


图4 双轴压试件破坏形态 ( $\sigma_2/\sigma_1 = 0.25$ )

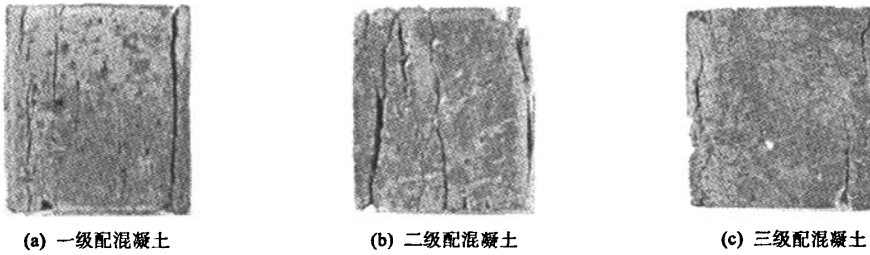


图5 双轴压试件破坏形态 ( $\sigma_2/\sigma_3 = 1.0$ )

2.2 强度及峰值应力点的应变

按照前述试验方法,测得的不同骨料级配混凝土在不同加载比例下的极限抗压强度及相应峰值应力点的应变分别见表3、表4.

表3 不同级配混凝土双轴抗压强度

MPa

混凝土 骨料级配	编号	荷载比例 $\sigma_2/\sigma_3$					混凝土 骨料级配	编号	荷载比例 $\sigma_2/\sigma_3$				
		0(单压)	0.25	0.50	0.75	1.00			0(单压)	0.25	0.50	0.75	1.00
一	1	25.08	29.56	31.63	30.74	29.28	三	1	18.62	22.37	24.14	23.21	24.15
	2	24.63	30.83	30.93	31.12	26.81		2	17.74	26.06	25.67	21.90	23.58
	3	25.48	33.36	34.81	28.32	28.87		3	16.97	25.95	28.01	25.68	24.69
	4	25.58			31.70			4	16.80	20.38*	30.79*	28.47	24.90
	均值	25.19	31.25	32.46	30.47	28.32		均值	17.54	24.79	25.94	24.82	24.33
二	1	25.63	33.14	31.75	30.02	27.31							
	2	21.64	28.93	30.93	31.44	30.87							
	3	23.97	30.64	35.90	30.38	28.39							
	4	22.01	32.64	31.56	29.77	35.05*							
	均值	23.31	31.34	32.54	30.41	28.85							

\*与中间值之差超过了中间值的15%,不参加统计.

由表3可见,尽管混凝土配合比不变,但由于骨料粒径和尺寸的不同,大试件的单轴极限抗压强度明显的低于混凝土小试件,三级配混凝土的单轴强度分别为一、二级配的70%和75.3%.所有骨料级配混凝土在双轴压荷载作用下的极限强度较单轴压极限强度都有所提高,提高程度取决于应力比 $\alpha$ 值.图6给出了3种混凝土基于单轴平均抗压强度的提高值,从图中可以看出,大致在 $\alpha = 0.5$ 附近,极限抗压强度提高值最大,并且,对于大骨料大试件,应力比 $\alpha$ 对抗压强度的提高作用比小试件要大.如对于一级配混凝土, $\alpha = 0.5$ 时的极限抗压强度提高值为28.86%,而对于三级配混凝土, $\alpha = 0.5$ 时的极限抗压强度提高值为47.89%,两者的区别是显而易见的.

由表4可见,混凝土小试件单轴受压时峰值应力点的应变要明显的高于混凝土大试件,在不同的加载比例下,对应于峰值应力点的主压向应变平均值也不同.在应力比 $\alpha$ 相同的情况下,主压向应变平均

值  $\epsilon_{3p}$ , 一般是小试件要高于大试件. 对同一种混凝土级配, 主压向应变平均值的提高程度, 取决于应力比  $\alpha$ . 表中数据说明, 在  $\alpha = 0.25$  时, 各个骨料级配混凝土主压向应变  $\epsilon_{3p}$  提高值最大, 对于一级配小试件,  $\alpha = 0.25$  时, 主压向应变  $\epsilon_{3p}$  提高值为 36.85%, 而对于二、三级配混凝土, 这一提高值分别为 47.72% 和 65.87%.

表4 不同级配混凝土双轴压峰值应变平均值  $10^{-4}$

混凝土 骨料级配	荷载比例 $\sigma_2/\sigma_3$					
	0(单压)	0.25	0.50	0.75	1.00	
一	$\epsilon_{3p}$	-2 263	-3 097	-2 683	-2 368	2 496
	$\epsilon_{2p}$	1 002	386	-673	-1 430	-2 496
二	$\epsilon_{3p}$	-2 041	-3 015	-2 492	-2 103	-2 297
	$\epsilon_{2p}$	876	253	-511	-1 220	-2 297
三	$\epsilon_{3p}$	-1 626	-2 697	-2 172	-1 799	-1 993
	$\epsilon_{2p}$	486	-208	-498	-1 010	-1 993

同时, 由表4可见, 对应于峰值应力点的侧压向应变平均值对应于不同的骨料级配和不同加载比例下也有所不同. 对于小试块, 在单轴压和应力比  $\alpha = 0.25$  时, 侧压向应变  $\epsilon_{2p}$  为受拉, 但对于大试件在应力比为 0.25 时, 侧向应变值却为压缩, 在应力比  $\alpha = 0.5 \sim 1.0$  时, 所有试件的侧压向应变  $\epsilon_{2p}$  为受压, 且随应力比的增加, 侧压向应变  $\epsilon_{2p}$  呈线性增加, 至双轴等压时达到最大压应变  $\epsilon_{2p} = \epsilon_{3p}$ .

2.3 应力-应变关系曲线

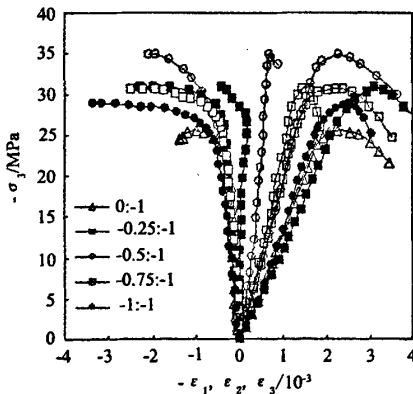


图7 一级配混凝土双轴压应力-应变曲线

图7至图9为不同骨料级配混凝土在不同加载比例下的混凝土双轴压应力-应变关系曲线. 从图中可以看出, 所有试件在同一应力比下, 曲线形状基本上相同,  $\alpha = 0.5$  时的混凝土极限抗压强度值最大,  $\alpha = 0.25$  时, 峰值应力点对应的主压向应变值  $\epsilon_{3p}$  最大, 双轴压应力状态下, 混凝土应力-应变关系曲线的线性段比单轴受压时提高, 线性段提高的幅度与应力比  $\alpha$  的大小直接相关, 应力比  $\alpha$  越大, 线性段提高的幅度越大. 并且随应力比  $\alpha$  的增大, 弹性模量提高, 同时, 峰值应力点对应的主向应变和侧向应变的数值与应力比  $\alpha$  有关,  $\epsilon_{3p}$  的变化规律基本与双轴抗压强度的规律相同, 而侧向应变  $\epsilon_{2p}$  则呈直线变化. 不同骨料级配混凝土的不同之处在于, 在同一应

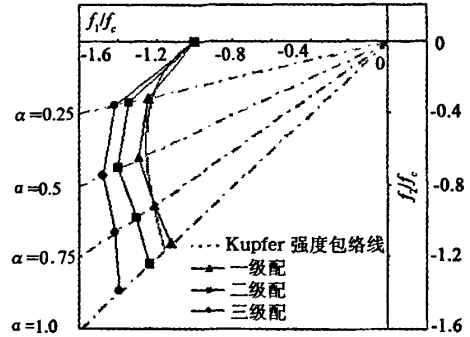


图6 不同级配混凝土的双轴压强度包络线

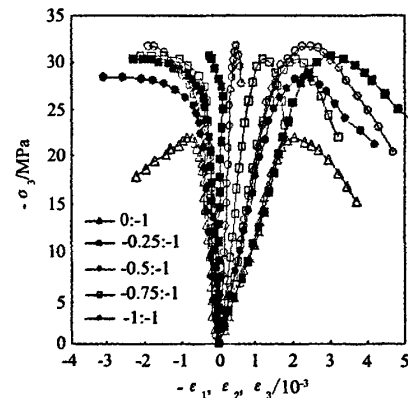


图8 二级配混凝土双轴压应力-应变曲线

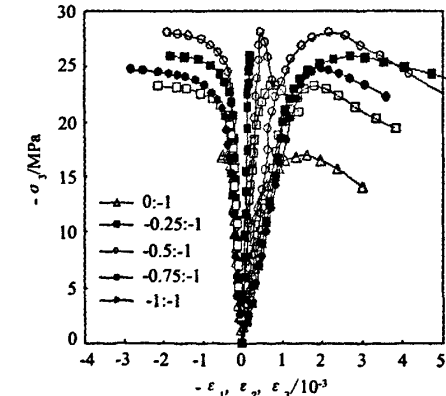


图9 三级配混凝土双轴压应力-应变曲线

力比下,三级配混凝土弹性模量和泊松比要略高于湿筛混凝土的弹性模量和泊松比,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。

### 3 破坏准则

#### 3.1 主应力空间的破坏准则

Kupfer 等人提出的双轴抗压强度准则为<sup>[6]</sup>:

$$f_3 = \frac{1 + 3.65\alpha}{(1 + \alpha)^2} f_c \quad (1)$$

将 Kupfer 双轴压包络线与本文试验双轴极限强度平均值得出的包络线相对比(如图6),发现曲线形状基本相似。因此采用这种回归形式,建立主应力空间下不同骨料级配混凝土的双轴强度准则,即

$$f_3/f_c = -\frac{1 + c\alpha}{(1 + d\alpha)^2} \quad (2)$$

其中,  $f_3$  为双轴抗压强度;  $f_c$  为不同骨料级配混凝土的单轴抗压强度;  $c, d$  为待定的回归系数;  $\alpha = \sigma_2/\sigma_3$  为双轴应力比。根据表3中的结果,经 Matlab 程序统计回归求得对于各个骨料级配的混凝土,式(2)中的回归系数及相关系数,分别列于表5。

图10为按式(2)计算值与试验结果的对比。可以看出:由式(2)的计算结果与试验值比较吻合;抗压强度在应力比  $\alpha$  为0.5左右时,达到极大值。

#### 3.2 主应变空间的破坏准则

根据前面的分析,两个受力方向的峰值应变随着应力比而变化,主应变的变化曲线  $\varepsilon_{3p}$  与二轴抗压强度  $f_3$  的相似,而  $\varepsilon_{2p}$  的变化则近似为直线。因此取以下回归式:

$$\varepsilon_{3p}/\varepsilon_{30} = \frac{1 + c\alpha}{(1 + d\alpha)^2}, \quad \varepsilon_{2p}/\varepsilon_{20} = m\alpha + n \quad (3)$$

经过对试验数据的回归得出下列各式以及各式的相关系数:

对于一级配混凝土:

$$\varepsilon_{3p}/\varepsilon_{30} = \frac{1 + 7.5157\alpha}{(1 + 1.9098\alpha)^2}, \quad r = 0.99 \quad (4)$$

$$\varepsilon_{2p}/\varepsilon_{20} = -3.3605\alpha + 1, \quad r = 0.99$$

对于二级配混凝土:

$$\varepsilon_{3p}/\varepsilon_{30} = \frac{1 + 10.785\alpha}{(1 + 2.4481\alpha)^2}, \quad r = 0.98 \quad (5)$$

$$\varepsilon_{2p}/\varepsilon_{20} = -3.4059\alpha + 1, \quad r = 0.99$$

对于三级配混凝土有:

$$\varepsilon_{3p}/\varepsilon_{30} = \frac{1 + 14.915\alpha}{(1 + 2.8757\alpha)^2}, \quad r = 0.96 \quad (6)$$

$$\varepsilon_{2p}/\varepsilon_{20} = -4.6816\alpha + 1, \quad r = 0.98$$

表5 各个级配混凝土的抗压强度与应力比的关系回归系数

骨料级配	回归系数 c	回归系数 d	相关系数 r	强度峰值对应的 $\alpha$
—	4.4887	1.2004	0.9967	0.40
二	5.428	1.2817	0.9852	0.42
三	5.3228	1.1493	0.9894	0.49

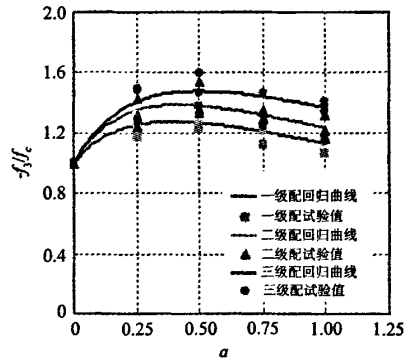


图10 不同骨料级配混凝土双轴抗压强度与应力比的关系

## 4 结 论

本文首次进行了大坝原级配大骨料混凝土的双轴压试验,并得出了以下结论:

(1)所有尺寸和骨料级配混凝土试件在双轴压作用下,破坏形态相类似:在单轴压时,破坏形状为柱状,在双轴压时,破坏形状呈片状.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的高于小试件.

(2)所有尺寸和骨料级配混凝土试件在双轴压荷载作用下的强度、应变和弹性模量随着主应力比 $\alpha$ 的不同而变化,其中强度在 $\alpha = 0.5$ 左右时取得最大值,主压应变在 $\alpha = 0.25$ 左右时取得最大值,弹性模量随着主应力比 $\alpha$ 值的增大而增大.对于大骨料大试件,应力比 $\alpha$ 对抗压强度和变形的提高作用要比小试件的大.如对于一级配混凝土, $\alpha = 0.5$ 时的极限抗压强度提高值为28.86%,而对于三级配混凝土, $\alpha = 0.5$ 时的极限抗压强度提高值为47.89%;对于一级配小试件, $\alpha = 0.25$ 时,主压向应变 $\varepsilon_{3p}$ 提高值为36.85%,而对于三级配混凝土,这一提高值为65.87%.这些说明在实际工程中,处于双轴压应力状态的大骨料混凝土结构具有更高的承载能力和变形性能.

(3)根据本文试验所得试验数据,分别建立了主应力空间和主应变空间下不同骨料级配混凝土的破坏准则,这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和理论依据.

### 参考文献:

- [1]宋玉普.多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [2]中华人民共和国建设部.混凝土结构设计规范(GB50010-2002)[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [3]ACI Committee 207. Mass Concrete, Report ACI 207 IR-87[M]. Detroit: American Concrete Institute, 1987.
- [4]中国水利水电科学研究院.水工混凝土试验规程(DL/T 5150-2001)[S].北京:中国电力出版社,2002.
- [5]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.
- [6]KUPFER H, HILSDORF HK, RUSCH H. Behavior of concrete under biaxial stresses[J]. ACI Journal, 1969, 66(8): 656-666.

## Experimental Study on Deformation and Strength of Mass Concrete under Biaxial Compression

WANG Huai-liang, CHEN Xiong, GUAN Ping

(Civil and Architectural Engineering College, Dalian University, Dalian 116622, China)

**Abstract:** Experimental study on the deformation and strength of various aggregate grading and sized concrete specimens under biaxial compression was carried out with the static-dynamic hydraulic servo tri-axial test system that was designed and manufactured at the Dalian University of Technology (DUT). Tests were conducted on cubes of 250 mm × 250 mm × 250 mm fabricated with dam concrete (maximum aggregate of 80 mm), 150 mm × 150 mm × 150 mm cubes and 100 mm × 100 mm × 100 mm cubes which were made with the wet-screened components of dam concrete. The stresses and strains at the biaxial loading direction and the lateral deformations at the free direction of all specimens are recorded during the tests. Based on the test data, the change rule of the biaxial compressive stress, ultimate deformation, stress-strain and the failure patterns were studied systematically. Test results indicate that the enhancement effect of the compressive strength and deformation of the mass concrete under biaxial compression become stronger than that of the wet-screened specimens. Failure criterion of different graded concrete under biaxial compression has been both established in normal stress space and in normal strain space. It provides effective references for the design and safety evaluation of the massive hydraulic structures in which the multi-axial strength of the concrete must be taken into consideration.

**Key words:** mass concrete; biaxial compression; strength of concrete; deformation of concrete; failure criterion