文章编号：1000-8608(2010)01-0099-04

大骨料混凝土在不连续点处应力和变形研究

李维红*[1]， 曲晓东[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 土木水利学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 通过试验研究大骨料三级配混凝土与其湿筛二级配混凝土在双轴受力状态下的特性，比较了二者于双轴拉压受力情况下在不连续点处的强度和变形特性，并给出了破坏准则. 三级配混凝土的最大骨料尺寸为 80 mm，试件最小横向尺寸为 250 mm；湿筛混凝土的最大骨料尺寸为 40 mm，试件最小横向尺寸为 150 mm. 描述了试件设计、材料配比、加载设备、减摩措施. 通过对试验结果的分析看出，不论混凝土试件的骨料和尺寸大小如何，其不连续点处的两轴应力包络线都是相似的，并都可近似于一直线. 混凝土在不连续点处的拉应变值与其平均应力具有较高的相关性.

关键词： 大骨料混凝土；湿筛混凝土；双轴拉压强度；不连续点；破坏准则；应力-应变关系

中图分类号： TU528.1 **文献标志码：** A

0 引 言

多年来人们对普通混凝土的强度和变形特性进行了深入的研究，但是所进行的试验大多采用小骨料混凝土，在传统的大骨料混凝土材料试验研究中，一般也采用湿筛混凝土标准试件来进行[1,2]. 除大连理工大学进行过少量全级配混凝土双轴拉压试验外[3,4]，其他相关研究未见报道. 由于湿筛法使混凝土中各项材料的组成比例，特别是水泥砂浆含量与骨料含量的比例产生了相当大的变化，使得试验测试的各类性能指标不能真正代表和反映大体积混凝土的实际性能指标[5,6]，且用湿筛法的试验结果来推算大骨料混凝土也需要有合理的转换关系. 因此亟需研究大骨料混凝土在多轴应力状态下的特性，建立大、小试件多轴强度间的关系和破坏准则. 本文采用对实际工程很有价值的不连续点概念作为研究基础.

1 试验概况

1.1 材料配比

本次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，具体见表 1.

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Concrete composition kg/m^3

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

水泥采用大连水泥厂生产的 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；砂子采用天然河砂；骨料采用三级配石灰岩碎石，其中小石（5～20 mm）、中石（20～40 mm）、大石（40～80 mm）的比例是 3∶3∶4.

1.2 试件设计

本文试件为 250 mm×250 mm×400 mm 的三级配混凝土棱柱体（最大骨料粒径 80 mm），150 mm×150 mm×300 mm 的湿筛二级配混凝土棱柱体. 棱柱体试件采用螺栓作为预埋件连接试件和试验机，试件的制作和养护按《水工混凝土试验规程》（DL/T 5150—2001）的规定进行. 复杂应力试验下试件的减摩措施为在 3 层聚乙烯塑料

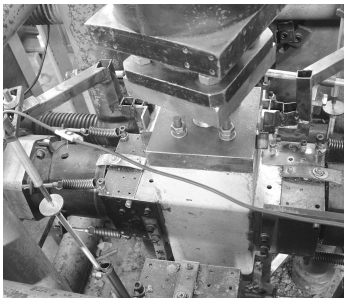
收稿日期： 2007-10-12； **修回日期：** 2009-11-15.
基金项目： 辽宁省科技厅博士启动基金资助项目（20071073）；辽宁省高等学校重点实验室科研资助项目（2008S011）.
作者简介： 李维红*（1971-），女，大连理工大学 2005 届博士，副教授，E-mail：liweihong714@163.com.

薄膜间夹 3 层甘油，并在加载试验前对混凝土试件的表面进行机械磨面，以去掉表面强度偏低的水泥砂浆薄弱层，保证受压表面与加载板紧密接触. 经过与棱柱体轴心抗压强度比较，减摩后的立方体试件无摩擦效应，效果很好.

双轴试验取压应力为正值，加载比例分别为 −0.05∶1、−0.1∶1、−0.25∶1、−0.4∶1.

1.3 加载设备

本次试验的试件养护 90 d 后，在大连理工大学结构实验室的大型液压伺服静、动三轴试验系统上进行试验，见图 1.



(a) 150 mm×150 mm×300 mm

(b) 250 mm×250 mm×400 mm

图 1 双轴拉压装置

Fig. 1 Biaxial tensile-compressive device

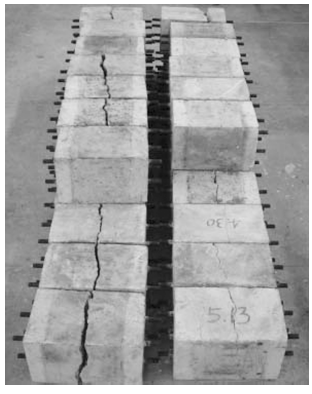
2 试验结果分析

2.1 试件破坏形态

大骨料混凝土大试件及湿筛混凝土小试件在双轴拉压受力情况下其破坏形态及裂缝形态都是相似的，如图 2 所示，试件大多断裂在均匀受力范围内，只有极个别的试件在埋件端部处断裂. 断裂在埋件端部的试件不参与后面的统计.

试件的裂缝及断口位置与拉应力方向基本垂直，说明试件主要是在拉应变达到极限拉应变的情形下开裂的，属拉断型破坏，破坏时的拉应变值不是常数，随着侧压的增加而增加，表示混凝土在双轴拉压时，能承受比直接拉伸更大的拉应变.

(a) 小试件



(b) 大试件

图 2 部分试验后试件

Fig. 2 Partial specimens after experiment

2.2 极限强度应力关系

对于双轴拉压应力状态，σ_1/f_{cu} 与 σ_2/f_{cu} 大致呈线性关系，通过对双轴拉压数据结果[7]进行回归分析得出含义为极限强度的破坏准则.

对于湿筛二级配混凝土：

$$\frac{\sigma_1}{f_{cu}} = 0.100 - 0.097\frac{\sigma_2}{f_{cu}};\ r = 0.985$$

对于三级配混凝土：

$$\frac{\sigma_1}{f_{cu}} = 0.070 - 0.096\frac{\sigma_2}{f_{cu}};\ r = 0.980$$

2.3 不连续点处应力关系

根据本次试验结果，把全部大、小试件在双轴拉压下应力应变数据输入计算机进行处理，绘制各试件的应力应变关系曲线. 根据试验曲线的形状，从起始点处选定一部分试验点进行线性回归处理，然后把得到的直线再叠加到原曲线上，由此

可以很直观地找出偏离直线的试验点. 以刚开始偏离直线的点为不连续点，记下此点的应力和应变，作为不连续点的应力和应变. 利用这种分析方法可直观、方便、快速地得到在不连续点处的应力和应变值. 用此方法得到三级配大骨料混凝土试件(250 mm×250 mm×400 mm)和湿筛二级配混凝土试件(150 mm×150 mm×300 mm)在双轴拉压下的不连续点处的强度准则.

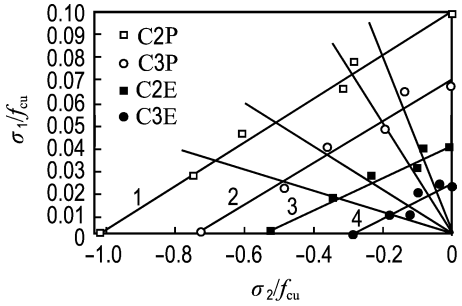
对于湿筛二级配混凝土：

$$\frac{\sigma_1}{f_{cu}} = 0.041 - 0.088\frac{\sigma_2}{f_{cu}};\ r = 0.987$$

对于三级配混凝土：

$$\frac{\sigma_1}{f_{cu}} = 0.024 - 0.079\frac{\sigma_2}{f_{cu}};\ r = 0.984$$

图 3 为双轴拉压下试件的不连续点和极限强度包络线. 从图中可以看出，这 4 条曲线基本上是平行的，即不论骨料和试件尺寸大小如何，其不连续点应力包络线是相似的，并都可近似用一直线来代替，这一点同 Tasuji 等[8] 的结论一致. 另外，从本次试验结果看出，在双轴拉压受力情况下大多数大、小试件在不连续点处的应力值为其极限应力的 0.3～0.4 倍，少数试件达到 0.5 倍左右，这主要出现在拉压应力 $|\alpha_1/\alpha_2|$ 比较小的情况下.



注：1、2 分别代表湿筛小试件、大骨料大试件的极限强度包络线；3、4 分别代表湿筛小试件、大骨料大试件的不连续点处应力包络线

图 3　双轴拉压受力状态下大小试件的极限强度和不连续点处包络线

Fig. 3　Ultimate strength and discontinuous points envelopes of big and small specimen under biaxial tension-compression stress states

2.4　不连续点处拉应变与平均应力的关系

从用前面所述确定不连续点的方法所得应变值 ε_{cri} 看出，在不同的拉压应力比下，主拉应变值随拉应力的增加而降低. 通过回归分析看出，该应变值 ε_{cri} 与平均应力 σ_m 之间具有很高的相关性，这与 Tasuji 等[8]、Rosenthal 等[9] 和徐积善等[10] 的结论一致. 图 4 为在双轴拉压下，大骨料混凝土试件与其湿筛二级配混凝土试件在不连续点处的拉应变 ε_{cri} 与平均应力 σ_m 的关系曲线. 回归曲线方程如下：

湿筛二级配混凝土：

$$\varepsilon_{cri} = 23.965\,8 - 29.326\,1\sigma_m;\ r = 0.993$$

三级配混凝土：

$$\varepsilon_{cri} = 11.892\,7 - 31.446\,3\sigma_m;\ r = 0.989$$

由图 4 中可见两条曲线近似平行，说明大骨料混凝土与湿筛二级配混凝土在不连续点处的应力应变关系相似，并且大骨料混凝土的平均应力约为湿筛二级配混凝土的 0.6 倍.

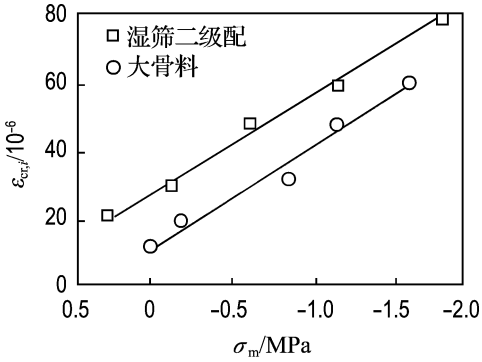


图 4　双轴拉压下混凝土试件在不连续点处的极限拉应变与平均应力的关系曲线

Fig. 4　Relation curves of ultimate tensile strain and average stress of concrete specimens at discontinuous points under biaxial tension-compression stress states

3　结　论

(1) 双轴拉压状态下，不论骨料和试件尺寸大小如何，其不连续点应力包络线是相似的，并都可近似用一直线来代替. 不连续点处的拉应变值 ε_{cri} 随拉应力的增加而降低，该应变值 ε_{cri} 与平均应力 σ_m 之间具有很高的相关性.

(2) 大、小试件在不连续点处的应力值为其极限应力的 0.3～0.4 倍，即较在极限状态的应力

值有一定幅度减小.

(3) 在双轴拉压状态下,不论是在极限应力处还是在不连续点处,三级配混凝土比其湿筛二级配混凝土的强度都有所下降,且在不连续点处大骨料混凝土的平均应力约为湿筛二级配混凝土的 0.6 倍.

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] 朱尔玉. 大骨料混凝土多轴强度理论及本构关系的试验研究[D]. 大连:大连理工大学,1996

[3] SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan. Failure criterion of the mass concrete under combined compression-tension stress states [C] // **Proceedings of 6th International Offshore and Polar Engineering Conference**. Los Angeles:IOPEC, 1996:229-303

[4] 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

[5] ZHU Bo-fang. Stress level coefficient and safety level coefficient for arch dams [J]. **Dam Engineering**, 2000, **11**(3):133-142

[6] 朱伯芳. 混凝土拱坝的应力水平系数与安全水平系数[J]. 水利水电技术,2000,**31**(8):1-3

[7] 曲晓东,丁 铸,宋玉普. 复杂应力下大骨料混凝土与二级配混凝土强度对比试验研究[J]. 大连理工大学学报,2009,**49**(6):902-906
(QU Xiao-dong, DING Zhu, SONG Yu-pu. Experimental study of strength comparison between big aggregate concrete and two-graded aggregate concrete under complex stress states [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2009, **49**(6): 902-906)

[8] TASUJI M E, SLATE F O, NILSON A H. 双轴荷载下的混凝土应力-应变特性和断裂[C] // 混凝土的强度和破坏译文集. 北京:水利出版社,1982

[9] ROSENTHAL I, CLUCKLICH J. Strength of plain concrete under biaxial stress [J]. **ACI Journal**, 1970, **11**:80-85

[10] 徐积善,何淅淅. 双轴拉压应力下混凝土的强度和变形[J]. 水利学报,1986(11):59-64

Research on stress and strain of big aggregate concrete at discontinuous points

LI Wei-hong*[1], QU Xiao-dong[2], SONG Yu-pu[2]

(1. Civil and Architecture Engineering College, Dalian University, Dalian 116622, China;
2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Characteristics of three-graded big aggregate concrete and the corresponding wet-screened two-graded concrete were experimentally studied. The strength and deformation feature at discontinuous point of the two parts in biaxial compressive-tensile stress state were compared and their failure criteria were developed. In the three-graded concrete, the maximum dimension of aggregate is 80 mm, and the minimum dimension of the specimen cross section is 250 mm, which is respectively 40 mm and 150 mm in wet-screened two-graded concrete. Specimen design, material composition, loading equipment and friction reducing action were also described. The results show that no matter how large the dimension of specimen or aggregate is, the envelope curves at the discontinuous points are in the same shape and approximate to straightline. There is a higher correlation between the tensile strain and the average stress at discontinuous points.

Key words: big aggregate concrete; wet-screened concrete; biaxial tensile-compressive strength; discontinuous point; failure criterion; stress-strain relationship