

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

曲晓东¹, 丁铸², 宋玉普^{*1}

(1. 大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024;
2. 深圳大学 深圳市土木工程耐久性重点实验室, 广东 深圳 518060)

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单轴、双轴及三轴应力条件下的强度差别. 研究发现, 单轴受压和受拉条件下三级配混凝土比其湿筛二级配混凝土的强度都有所下降, 分别为 27% 和 26%. 在双轴受压条件下, 三级配混凝土强度增加率高于其湿筛二级配混凝土, 在应力比为 0.5 时, 相差最大, 强度提高率相差 21.2%. 在双轴拉压和三轴拉压条件下, 三级配混凝土强度降低率也高于其湿筛二级配混凝土. 给出了它们在各种条件下具体的强度对比值和复杂应力下混凝土的破坏准则.

关键词: 大骨料混凝土; 三级配; 湿筛二级配; 强度; 破坏准则
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了小骨料混凝土, 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]. 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^[3,4], 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. 目前对二者的差异研究仅局限在单轴应力状态下, 除大连理工大学进行过少量全级配混凝土双轴拉压的试验外^[5,6], 其他研究未见报道, 所以亟需澄清单轴及复杂应力状态下大体积混凝土的真实性能与湿筛法测得的性能的差异.

本文针对工程实际, 对三级配大骨料混凝土及其湿筛试件进行单轴、多轴试验, 通过比较得出二者强度性能指标的差异.

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, 其配合比见表 1.

表 1 混凝土配合比
Tab. 1 Concrete composition

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$							
水	水泥	粉煤灰	中砂	木钙 减水剂	碎石		
					5~ 20 mm	20~ 40 mm	40~ 80 mm
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

本文试件形式为 250 mm × 250 mm × 400 mm 的三级配混凝土棱柱体试件(最大骨料粒径

收稿日期: 2007-10-20; 修回日期: 2009-07-28.
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50679007).
作者简介: 曲晓东(1979-), 男, 博士生; 宋玉普*(1944-), 男, 教授, 博士生导师.

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; 250 mm×250 mm×250 mm 的三级配混凝土立方体试件, 150 mm×150 mm×150 mm 的湿筛二级配混凝土立方体试件, 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三层聚乙烯塑料薄膜间夹三层甘油, 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.

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.

2 试验结果分析

2.1 单轴受压

由表 2 可见, 三级配混凝土比其湿筛二级配混凝土抗压强度和峰值应变都有所降低, 分别降低 27% 和 17%, 而受压弹性模量提高了 9%.

表 2 单轴受压试件试验结果汇总
Tab. 2 The experimental results collection of uniaxial compression

	f_{cu}/MPa		$\epsilon_p/10^{-6}$		E_c/GPa	
	采集值	平均值	采集值	平均值	采集值	平均值
湿筛 二级配	32.9		2 016		30.2	
	31.3	32.5	2 154	2 078.3	28.0	29.6
	33.3		2 065		30.6	
	23.0		1 789		30.8	
三级配	24.4	23.7	1 646	1 722.3	33.5	32.3
	23.7		1 732		32.5	

注: f_{cu} 为立方体抗压强度, ϵ_p 为单压峰值应变, E_c 为单压弹性模量

根据 ACI 318—05 给出的普通混凝土受压弹

性模量与立方体强度关系式 $E_c = 4\,789 \sqrt{f_{cu}}$ MPa^[7], 对表 2 中数据进行回归分析得出三级配混凝土的 $E_c = 6\,630 \sqrt{f_{cu}}$ MPa.

2.2 单轴受拉

由表 3 可见, 三级配混凝土比其湿筛二级配混凝土抗拉强度和峰值应变都有所降低, 分别降低 26% 和 34%, 而抗拉弹性模量提高了 10%.

根据文献[7]混凝土受拉弹性模量与抗拉强度呈线性关系, 对表 3 中数据进行回归分析得出三级配混凝土的 $E_t = (-12.3 + 28.88f_t)$ GPa.

表 3 单轴受拉试件试验结果汇总
Tab. 3 The experimental results collection of uniaxial tension

	f_t/MPa		$\epsilon_{tp}/10^{-6}$		E_t/GPa	
	采集值	平均值	采集值	平均值	采集值	平均值
湿筛 二级配	2.29		97		33.9	
	2.39	2.30	112	97.7	30.6	33.4
	2.23		84		35.8	
	1.70		70		37.8	
三级配	1.61	1.70	55	64.0	33.7	36.8
	1.79		67		38.9	

注: f_t 为轴心抗拉强度, ϵ_{tp} 为拉伸峰值应变, E_t 为拉伸弹性模量

2.3 双轴受压

由表 4 可见, 三级配及其湿筛二级配混凝土在双轴压缩荷载作用下的极限强度较单轴压极限强度有所提高, 提高程度取决于应力比 α . 图 1 给出了两种混凝土试件在不同应力比下的平均抗压强度提高值, 由图可见, 约在 $\alpha = 0.5$ 附近, 极限抗压强度提高值最大, 并且对于大骨料试件, 应力比 α 对强度提高作用比小试件大, 如在 $\alpha = 0.5$ 时, 湿筛二级配混凝土强度提高 39.6%, 而三级配混凝土强度提高 48.0%, 差别较明显, 强度提高率相差 21.2%, 详见图 1. 在双轴受压条件下, 三级配混凝土强度增加率高于其湿筛二级配混凝土, 这是由于大骨料混凝土骨料含量高, 灰浆含量少, 混凝土刚度增大, 强度增加率随刚度增大而增大.

表 4 双轴受压试件极限强度 σ_2 试验结果汇总

Tab. 4 The experimental results collection of biaxial compressive ultimate strength

α	湿筛二级配							三级配						
	采集值/MPa				平均值	提高率	标准值	采集值/MPa				平均值	提高率	标准值
	1	2	3	4	MPa	%	MPa	1	2	3	4	MPa	%	MPa
0	22.01	23.97	21.64	25.63	23.31	—	20.67	16.80	16.97	17.74	18.62	17.53	—	16.35
0.25	32.64	30.64	28.93	33.14	31.34	34.5	28.58	25.95	26.06	22.37	—	24.79	41.4	21.97
0.50	31.56	35.90	30.93	31.75	32.54	39.6	29.30	28.01	25.67	24.14	—	25.94	48.0	23.32
0.75	29.77	30.38	31.44	30.02	30.40	30.4	29.35	28.47	25.68	21.90	23.21	24.82	41.6	20.69
1.00	28.39	30.87	27.31	—	28.85	23.8	26.41	24.90	24.69	23.58	24.15	24.33	38.8	23.48

注： $\alpha=\sigma_1/\sigma_2$ 为压压荷载比例，提高率为与单轴强度比较的提高率

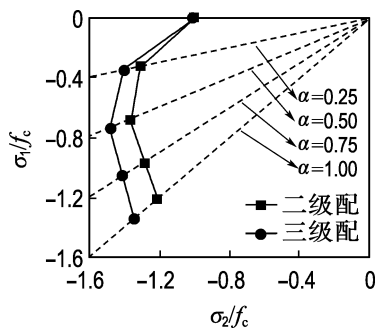


图 1 三级配及其湿筛二级配混凝土双轴
压破坏包络线

Fig. 1 Failure envelopes of three-graded and
wet-sieved two-graded concrete cubes
under biaxial compression

2.4 双轴拉压

由表 5 可见，三级配及其湿筛二级配混凝土在双轴拉压荷载作用下的极限强度低于相应的单拉、单压强度，抗拉强度和抗压强度都随另一方的增加而降低，且大骨料试件与小骨料试件相比降低得多一些，如在应力比 $\alpha=0.25$ 时，湿筛二级配混凝土拉压强度比单轴拉、压强度分别降低 37% 和 67%，而三级配混凝土分别降低 39% 和 69%，详见表 6。在双轴拉压条件下，三级配混凝土强度降低率高于其湿筛二级配混凝土，也是由于大骨料混凝土刚度增大，高于其湿筛二级配混凝土，强度降低率随刚度增大而减小。

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，通过对表 5 的双轴拉压数据进行回归分析得出破坏准则。

表 5 双轴拉压试件强度平均值试验结果汇总

Tab. 5 The experimental results collection of
biaxial tensile-compressive strength

混凝土	α	σ_3/MPa	$-\sigma_2/\text{MPa}$	σ_3/f_{cu}	$-\sigma_2/f_{cu}$
湿筛	0	0	23.31	0	1
	1	2.26	0	0.097	0
二级配	-0.05	0.61	17.36	0.026	0.745
	-0.10	1.08	14.26	0.046	0.612
	-0.25	1.42	7.52	0.061	0.323
	-0.40	1.87	6.89	0.080	0.296
三级配	0	0	17.54	0	0.752
	1	1.64	0	0.070	0
	-0.05	0.37	11.31	0.016	0.485
	-0.10	0.72	10.55	0.031	0.453
	-0.25	1.01	5.36	0.043	0.230
	-0.40	1.34	4.38	0.057	0.188

注： $\alpha=\sigma_3/\sigma_2$ 为拉压荷载比例

表 6 双轴拉压试件平均强度降低率

Tab. 6 The decrease ratio of average strength
under biaxial tension-compression %

α	湿筛二级配		三级配	
	σ_3	σ_2	σ_3	σ_2
0.05	72.80	25.53	78.13	35.50
0.10	52.18	38.82	55.70	39.87
0.25	37.13	67.77	38.77	69.53
0.40	17.17	70.43	18.57	75.07

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：

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

图 2 为按上式计算值与试验结果的对比,可见计算值与试验结果比较吻合.

2.5 三轴拉压压

对于二压一拉受力情况,由于拉应力的存在,混凝土破坏强度显著降低.由表 7 可见,在任一应力比下,试件在二压一拉状态所能承受的最大压、拉应力都小于试件的单轴抗压、抗拉强度,极限压应力 σ_2 随应力比中拉应力的增大而下降,极限拉应力 σ_3 随应力比中拉应力的增大而上升.且大骨料试件与小骨料试件相比强度降低得多一些,如在应力比为 0.1 : -1 : -1 时,湿筛二级配混凝土拉压强度比单轴拉、压强度分别降低 64% 和 54%,而三级配混凝土分别降低 68% 和 65%,详见表 8.

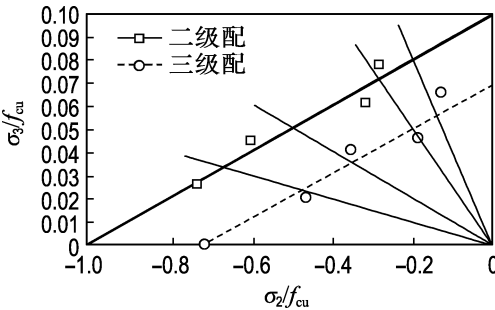


图 2 三级配及其湿筛二级配混凝土双轴拉压破坏包络线

Fig. 2 Failure envelopes of three-graded and wet-screened two-graded concrete under biaxial tension-compression

表 7 三轴拉压压试件强度平均值试验结果汇总

Tab. 7 The experimental results collection of triaxial tensive-compressive-compressive strength

混凝土	应力比	σ_3/MPa	$-\sigma_1/\text{MPa}$	$-\sigma_2/\text{MPa}$	σ_3/f_t	$-\sigma_2/f_c$
湿筛 二级配	0.05 : -1 : -1	0.54	14.61	14.61	0.239	0.627
	0.1 : -1 : -1	0.80	10.80	10.80	0.354	0.463
	0.25 : -0.25 : -1	1.27	1.86	6.83	0.562	0.293
	0.25 : -0.5 : -1	0.98	3.03	5.99	0.434	0.257
	0.25 : -0.75 : -1	0.82	3.80	5.31	0.363	0.228
	0.25 : -1 : -1	1.09	6.77	6.77	0.482	0.290
	0.4 : -1 : -1	1.39	4.65	4.65	0.615	0.199
三级配	0.05 : -1 : -1	0.22	8.65	8.76	0.134	0.499
	0.1 : -1 : -1	0.52	6.08	6.08	0.317	0.347
	0.25 : -0.25 : -1	0.86	1.18	4.78	0.524	0.273
	0.25 : -0.5 : -1	0.82	2.38	4.68	0.500	0.267
	0.25 : -0.75 : -1	0.82	3.58	4.69	0.500	0.267
	0.25 : -1 : -1	0.90	4.83	4.83	0.549	0.275
	0.4 : -1 : -1	0.97	3.46	3.46	0.591	0.197

表 8 三轴拉压压试件平均强度降低率

Tab. 8 The decrease ratio of average strength under triaxial tension-compression-compression %

应力比	湿筛二级配		三级配	
	σ_3	$-\sigma_2$	σ_3	$-\sigma_2$
0.05 : -1 : -1	76.1	37.3	86.6	50.1
0.1 : -1 : -1	64.6	53.7	68.3	65.3
0.25 : -0.25 : -1	43.8	70.7	47.6	72.7
0.25 : -0.5 : -1	56.6	74.3	50.0	73.3
0.25 : -0.75 : -1	63.7	77.2	50.0	73.3
0.25 : -1 : -1	57.2	71.0	45.1	72.5
0.4 : -1 : -1	38.5	80.1	40.9	80.3

对于三轴应力状态,应用八面体应力空间破坏准则,按照八面体正应力和剪应力公式,计算正应力:

$$\sigma_{\text{oct}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$$

剪应力:

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

将表 7 中的数据转化为八面体应力空间中的应力,并进行回归分析得三级配混凝土破坏准则:

$$\frac{\tau_{\text{oct}}}{f_c} = 0.065\,5 - 0.909\,7\,\frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_c} - 0.089\,4\left(\frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_c}\right)^2$$

3 结 论

- (1) 单轴和复杂应力条件下三级配混凝土比其湿筛二级配混凝土的强度都有所下降.
- (2) 在双轴受压条件下,三级配混凝土强度增加率高于其湿筛二级配混凝土.
- (3) 在双轴拉压和三轴拉压压条件下,三级配混凝土强度降低率高于其湿筛二级配混凝土.
- (4) 澄清了单轴及复杂应力状态下大体积混凝土与湿筛法测得的强度差异,并建立了复杂应力下三级配混凝土的破坏准则.

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

[4] 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

[5] 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

[6] 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

[7] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004

Experimental study of strength comparison between big aggregate concrete and two-graded aggregate concrete under complex stress states

QU Xiao-dong¹, DING Zhu², SONG Yu-pu^{*1}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. Shenzhen Durability Center for Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

Abstract: The strength distinctions between three-graded big aggregate concrete and its wet-screened two-graded aggregate concrete under uniaxial, biaxial and triaxial stress states were researched. Experimental results show that the strengths of three-graded concrete are lower than the strengths of the corresponding wet-screened two-graded concrete under uniaxial compression and tension stress state by 27% and 26% respectively; strength increment rates of three-graded concrete are higher than those of wet-screened two-graded concrete under biaxial compression, and at the stress ratio of 0.5, it reaches the highest of 21.2%; strength decrement rates of three-graded concrete are also higher than those of wet-screened two-graded concrete under biaxial tension-compression and triaxial tension-compression-compression stress state. Strength comparisons and failure criteria under various axial stress states are also developed.

Key words: big aggregate concrete; three-graded; wet-screened two-graded; strength; failure criterion