

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.011

张玘璐, 杨赛利, 王立成. 三级配大骨料混凝土双轴抗压性能试验分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 78-84. (ZHANG Qi-lu, YANG Sai-li, WANG Li-cheng. Experimental analysis of compressive properties of three-graded large aggregate concrete under biaxial compression[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 78-84.)

三级配大骨料混凝土双轴抗压性能试验分析

张玘璐, 杨赛利, 王立成

(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: 利用自行研制的大型混凝土静、动三轴试验系统, 完成了5种应力比、4种应变率、3种含水状态(干燥、自然、饱和)的三级配大骨料混凝土双轴动态抗压试验。试验研究了含水率对三级配大骨料混凝土动态极限抗压强度的影响, 并在此基础上提出考虑含水率影响的大骨料混凝土动态破坏准则。研究表明, 饱和混凝土试件在高应变率下的强度明显提高, 而在低应变率下强度则有所降低。在相同应变率下, 极限抗压强度在应力比为1:0.5时达到最大值。影响三级配大骨料混凝土试件破坏形态的主要因素为应力比, 其动态极限抗压强度随含水率的增大而增大, 而静态极限抗压强度随含水率的增大而减小; 单轴受压状态下的变形明显小于双轴受压, 试件的峰值应变随应变率的增大而减小。

关键词: 三级配大骨料混凝土; 动态双轴抗压强度; 含水率; 应力应变曲线

中图分类号: TV43

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2016)05-0078-07

长期处于水环境中的混凝土结构, 如桥墩、大坝、海洋平台等, 常处于饱和状态。另外, 在一些地震多发区, 混凝土结构常处于复杂的多轴动应力状态下。目前已有学者开展了大骨料混凝土静、动态多轴的强度试验研究^[1-6], 研究发现, 大骨料混凝土在双轴动态压荷载作用下的破坏形态主要取决于应力比, 而受应变率影响较小; 极限抗压强度随应变率的提高而增大, 随应力比的提高呈先增后减的趋势; 双轴受压相比于单轴受压提高了大骨料混凝土的变形能力。然而, 考虑含水率对混凝土极限抗压强度影响的多轴动态试验资料还相对较少。本文对三级配大骨料混凝土试件开展了干燥、自然和饱和状态下的双轴动态抗压强度试验, 以试验为基础, 探讨含水率对于大骨料混凝土多轴动态力学性能的影响规律。

1 试验设备及方法

试验采用大连理工大学自行研制的大型静、动态三轴电液伺服试验机, 系统由控制软件、电液伺服油源控制系统、三轴试验机组成。三轴试验机由加力架、加载板、作动器、荷载传感器和位移传感器(LVDT)组成。为了能进行大骨料混凝土试件的双轴抗压试验, 设计加工了4块尺寸为245 mm×245 mm×55 mm的加载板。加载板采用弹簧固定在加载头上, 加载头则由球铰装置通过弹簧固定在作动器上, 使加载头具有一定的转动能力, 保证试件受力均匀。

试验采用三级配大骨料混凝土试件(250 mm×250 mm×250 mm), 混凝土设计强度为20 MPa, 其配合比如表1所示。水泥采用大连水泥厂生产的P·O 42.5级水泥, 粗骨料最大粒径为80 mm, 细骨料为中砂, 细度

收稿日期: 2015-07-14

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项基金(DUT14LK23); 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放研究基金(IWHR-SKL-201309)

作者简介: 张玘璐(1988—), 男, 辽宁抚顺人, 硕士研究生, 主要从事混凝土动态强度破坏准则研究。

E-mail: zql_910y@sina.cn 通信作者: 王立成(E-mail: wanglicheng2000@163.com)

模数为 2.66,粉煤灰采用大连华能热电厂生产的国家二级粉煤灰。

表 1 混凝土配合比

Tab. 1 Mixture proportions of concrete

水/kg	水泥/kg	粉煤灰/kg	砂子/kg	石子/kg			DK-6 减水剂/g
				5~20 mm	20~40 mm	40~80 mm	
120	214	53	549	442.5	442.5	590	214

混凝土浇筑结束后 24 h 脱模,放置到养护室养护 90 d 后取出,并将其分为 3 组,每组 60 个试件。第 1 组,自然条件下养护;第 2 组,放入水槽中浸泡,6 个月后试件质量基本不变,试件破坏截面如图 1(a) 所示,由图可见此时试件完全饱和,并测得饱和状态下试件的含水率为 3.9%;第 3 组,放入烘干箱,为避免高温情况下水快速蒸发导致混凝土强度损失,先用 50 ℃ 烘烤 1 d,然后逐渐升至 65 ℃ 烘烤 3 d,75 ℃ 烘烤 3 d,85 ℃ 烘烤至混凝土质量基本不发生改变为止^[5],试件破坏截面如图 1(b) 所示,由图可见试件完全干燥,并测得自然状态下试件的含水率为 1.9%。



(a) 饱和试件 (b) 干燥试件

图 1 试件破坏截面

Fig. 1 Cross section of specimen

试验前先对试件表面进行打磨,消除加载面不平整对试验结果的影响。试件加载面与各自加载板之间均做减磨处理。具体做法是:在 3 层塑料布之间涂抹 2 层甘油,在塑料布与试件加载面之间再涂 1 层甘油^[8]。加载前,先摆正试件,然后通过荷载控制,进行 3 次预压(预压力分别为 30, 60 和 90 kN)。预压结束后,安装位移传感器,每个加载方向的相对两侧各安装 1 个,取两个位移传感器测量值的平均值,作为试件变形值。每组试验包含 3 个试件,当发现某一试件的强度值大于该组平均值的 15% 时,舍弃该数据并补充试件重新试验,以保证数据可靠性。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

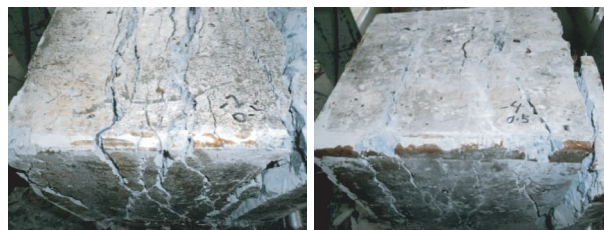
试验研究表明,应力比对三级配大骨料混凝土的破坏形态起决定性作用。在单轴压力作用下,由于试件与加载头之间的减磨处理,各应变率下的试件均表现为典型的柱状破坏,如图 2(a) 所示;在双轴压力作用下,试件表现为片状破坏,如图 2(b) 所示。含水率对三级配大骨料混凝土的破坏形态影响不大,当应变率为 $10^{-3}/s$,应力比为 1:0.25 时,干燥和饱和混凝土试件均表现为片状破坏。双轴受压时,试件侧向受力面上,出现大量与主压应力方向呈 $0^\circ \sim 40^\circ$ 的斜裂纹,随着应变率增大,主裂纹尺寸增大,破坏时伴有响亮、短暂的爆裂声,破坏形态如图 3 所示。



(a) 应力比为 1:0 (b) 应力比为 1:1

图 2 饱和混凝土破坏形态 ($10^{-2}/s$)

Fig. 2 Failure patterns of saturated concrete ($10^{-2}/s$)



(a) 应变率为 $10^{-3}/s$ (b) 应变率为 $10^{-4}/s$

图 3 干燥混凝土破坏形态 (1:0.50)

Fig. 3 Failure pattern of dry concrete (1:0.50)

2.2 极限抗压强度

试验测得不同含水状态下,三级配大骨料混凝土在不同应变率和应力比组合下的极限抗压强度如表 2 所示。

表 2 3 种状态下混凝土动态双轴极限抗压强度
Tab. 2 Biaxial dynamic compressive strength of saturated, natural and dry concrete

应变 速率/ s^{-1}	编号	极限抗压强度														
		应力比 1:0			应力比 1:0.25			应力比 1:0.50			应力比 1:0.75			应力比 1:1.00		
		饱和	自然	干燥	饱和	自然	干燥	饱和	自然	干燥	饱和	自然	干燥	饱和	自然	干燥
10^{-5}	1	15.63	17.79	20.27	24.35	26.34	25.79	29.15	27.01	28.78	23.12	25.41	26.78	23.36	23.36	22.44
	2	15.58	19.13	19.43	25.82	24.66	26.61	26.65	25.67	26.50	23.91	25.71	27.17	23.44	23.44	26.08
	3	15.62	20.96	21.32	24.11	25.69	27.13	24.07	27.82	26.71	22.45	22.31	26.31	21.91	21.91	25.55
	均值	15.61	19.29	20.34	24.76	25.56	26.51	26.62	26.87	27.33	23.16	24.48	26.75	22.90	22.90	24.69
10^{-4}	1	23.52	21.51	21.13	29.65	28.53	27.07	32.59	29.37	29.50	29.41	30.71	27.20	29.41	26.05	26.71
	2	22.79	23.81	23.02	27.15	27.77	27.98	29.11	32.50	30.06	28.99	26.56	26.86	25.25	27.07	25.91
	3	20.17	20.64	20.56	26.87	29.94	25.89	25.93	27.74	28.19	25.58	27.87	33.87	28.70	28.08	32.12
	均值	22.16	21.99	21.57	27.89	28.75	26.98	29.37	29.87	29.25	27.99	28.38	27.03	27.79	27.10	26.31
10^{-3}	1	24.91	25.73	25.10	33.62	27.16	29.70	34.80	33.78	31.88	31.02	31.87	30.39	32.11	29.88	31.42
	2	25.63	22.96	23.63	30.79	30.63	26.54	32.47	31.49	31.04	32.28	29.94	31.11	28.01	30.27	29.25
	3	23.95	23.82	20.27	33.12	33.47	27.91	34.16	32.84	29.78	31.39	28.93	27.98	28.98	26.86	29.87
	均值	24.83	24.17	23.00	32.51	30.42	28.05	33.81	32.70	30.90	31.56	30.25	29.82	29.70	29.00	30.18
10^{-2}	1	29.08	25.51	26.15	34.26	34.5	33.88	34.54	35.80	36.85	33.35	34.53	32.65	36.13	31.98	30.94
	2	27.55	27.39	22.84	38.3	35.18	29.77	37.88	35.29	33.38	36.92	33.20	34.19	32.82	32.20	30.41
	3	26.83	25.10	25.50	32.35	32.36	32.35	36.92	33.66	30.06	34.88	32.77	31.77	33.98	30.95	32.10
	均值	27.82	25.60	24.83	34.97	33.35	32.00	36.45	34.92	33.43	35.05	33.50	32.87	34.31	31.71	31.15

由表 2 可见,当应变率一定时,混凝土极限抗压强度随应力比的增大先增后减。当应力比为 1:0.50 时,三级配大骨料混凝土的极限抗压强度最大。这之前正常状态下大骨料混凝土的研究结论^[2]基本相同,说明含水率的影响规律并不明显。应变率对三级配大骨料混凝土动态抗压强度的影响规律如图 4 所示。

由图 4 可见,在动态加载条件下,大骨料混凝土的极限抗压强度随含水率的增大而增大;而在准静态加载条件下($10^{-5}/s$),极限抗压强度随含水率的增大而减小,这可能是由孔隙水的“楔入”作用引起的。静态加载时,裂纹开展速度较慢,裂纹中孔隙水较易到达裂纹尖端,对裂纹开展起促进作用;而在动态加载时,裂纹开展速度较快,裂纹中孔隙水来不及到达裂纹尖端,混凝土试件就已破坏,在表面力作用下,尖端自由水会形成一个弯月面,根据表面物理学相关原理,弯月面会对裂纹尖端作用一种有益力,阻碍裂纹扩展^[9-10]。由于 $10^{-4}/s$ 是准静态加载与动态加载的临界应变率,所以应变率的影响规律并不明显。

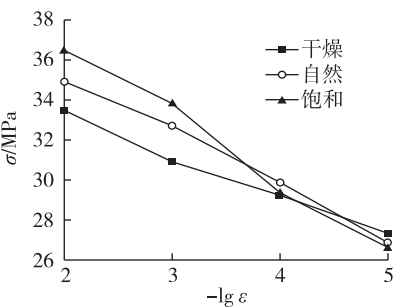


图 4 应变率对三级配大骨料混凝土极限抗压强度的影响(1:0.50)
Fig. 4 Effects of strain rates on compressive strength of three graded large aggregate concrete (1:0.50)

2.3 应力应变曲线

在饱和状态下,三级配大骨料混凝土在不同应力比和应变率状态下的应力应变曲线如图5所示。这里规定压应变为正,拉应变为负。

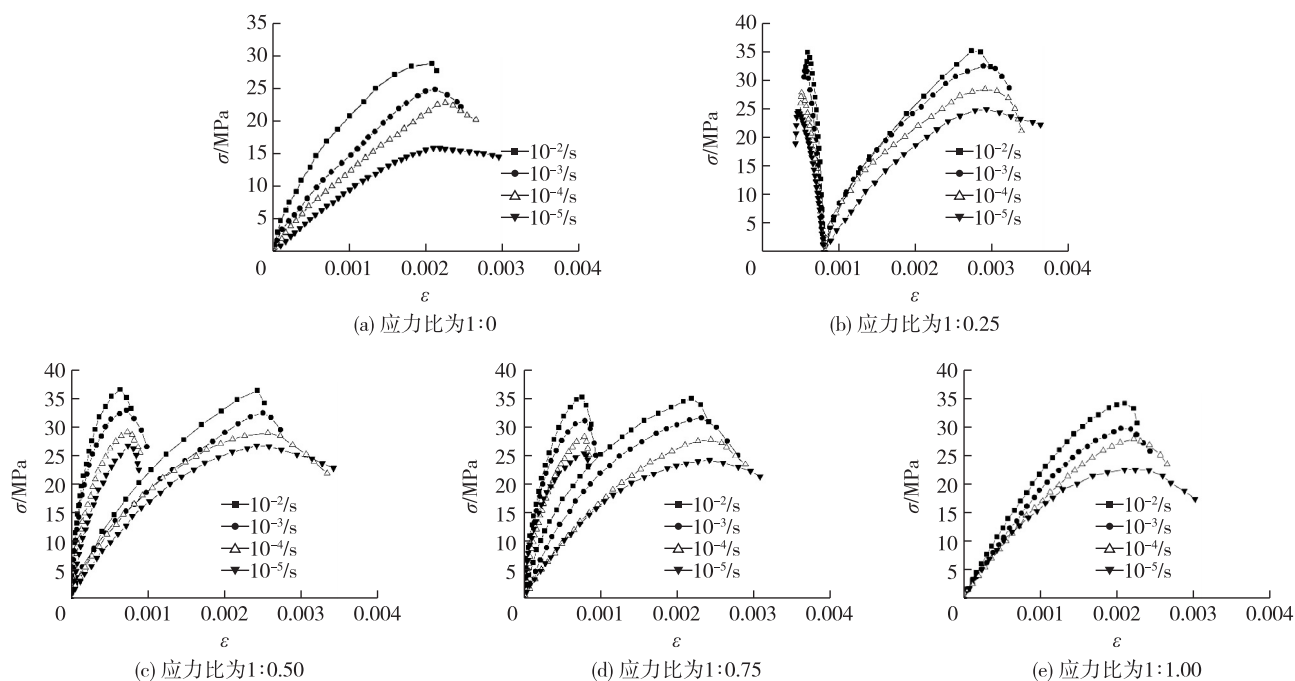


图5 饱和混凝土应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of saturated concrete

由图5可以看出,饱和混凝土试件在同一应力比下,应力应变曲线的形式基本一致,当应力比为1:1.00时,主应变和侧向应变相同。当应力比为1:0.25时,试件侧向应变为负值。干燥、自然状态下三级配大骨料混凝土的应力应变关系与饱和状态的规律相同。

2.4 竖向峰值应变

不同含水率混凝土竖向峰值应变见表3。通过对表3中的数据分析可得,饱和、干燥状态下混凝土双轴受压竖向峰值应变明显大于单轴受压。混凝土应力比与竖向峰值应变的关系,如图6所示。

表3 不同含水率混凝土竖向峰值应变

Tab. 3 Vertical peak strain under different water contents

试件状态	应力比	竖向峰值应变/ 10^{-6}			
		应变率 $10^{-5}/s$	应变率 $10^{-4}/s$	应变率 $10^{-3}/s$	应变率 $10^{-2}/s$
干燥	1:0	2 090	1 990	1 830	1 720
	1:0.25	2 590	2 460	2 320	2 190
	1:0.50	2 380	2 310	2 250	2 120
	1:0.75	2 290	2 190	2 110	2 070
	1:1.00	2 210	2 150	2 100	1 930
饱和	1:0	2 180	2 150	2 110	2 080
	1:0.25	2 650	2 620	2 600	2 480
	1:0.50	2 570	2 560	2 490	2 420
	1:0.75	2 460	2 430	2 310	2 190
	1:1.00	2 230	2 210	2 100	2 040

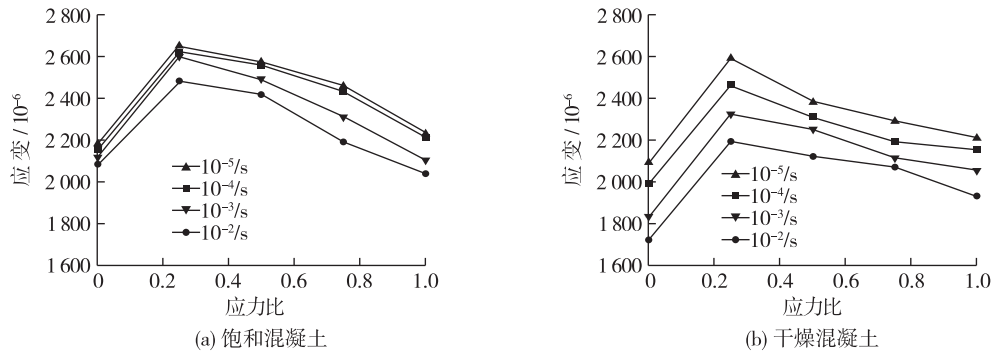


图 6 应力比与竖向峰值应变关系

Fig. 6 Relationships between stress ratios and vertical peak strain

由图 6 可见,混凝土竖向峰值应变,随应力比的增加先增后减,同一应力比下,混凝土竖向峰值应变随应变率的增加而减小。当应力比和应变率一定时,饱和混凝土的竖向峰值应变比干燥混凝土的大。

2.5 大骨料混凝土的动态双轴抗压破坏准则

(1) 宋玉普^[11]给出了大骨料混凝土动态极限抗压强度和应变率之间的关系:

$$f_d/f_c = a + b \lg(\dot{\epsilon}_d/\dot{\epsilon}_s) \quad (1)$$

式中: f_d 为混凝土动态抗压强度; f_c 为混凝土准静态单轴极限抗压强度 ($10^{-5}/s$); $\dot{\epsilon}_d$ 为动态应变率; $\dot{\epsilon}_s$ 为准静态应变率 ($10^{-5}/s$); a, b 为材料参数,由试验数据回归分析得到。

(2) 赵国藩^[12]给出了混凝土极限抗压强度与应力比之间的关系:

$$f_d/f_c = (\beta + \gamma\theta)/(1 + \theta)^2 \quad (2)$$

式中: $\theta = \sigma_2/\sigma_1$ 为应力比; β, γ 为材料参数,由试验数据回归得到。

综合式(1)和(2),建立考虑含水率影响的混凝土动态双轴破坏准则如下:

$$f_d/f_c = \left(1 + \alpha(\eta) \lg\left(\frac{\dot{\epsilon}_d}{\dot{\epsilon}_s}\right) \right) \frac{\beta(\eta) + \gamma(\eta)\theta}{(1 + \theta)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \theta f_d \quad (4)$$

式中: η 为混凝土含水率; α, β, γ 为与含水率有关的材料参数。通过对数据回归分析,得到不同含水率下的材料参数,材料参数与混凝土含水率近似成线性关系,如图 7 所示。

图 7 中材料参数与含水率的关系可由式(5)~(7)线性表示,相关系数分别为 0.974, 0.956 和 0.866。

$$\alpha = 0.075 + 0.019\eta \quad (5)$$

$$\beta = 0.973 + 0.056\eta \quad (6)$$

$$\gamma = 3.613 + 0.291\eta \quad (7)$$

由于 α, β 随含水率变化不明显,为简化计算,可近似取 $\alpha = 0.12, \beta = 1.0$ 。当含水率为 1.9%,应力比为 0.25,应变率为 10^{-3} 时,如采用该近似取值,可计算得到大骨料混凝土的动态极限抗压强度为 31.25 MPa,与试验值 30.42 MPa 的误差仅为 2.6%,符合较好。

3 结 语

利用自行研制的大型混凝土静、动三轴试验系统,共完成了 5 种应力比 (1:0, 1:0.25, 1:0.50, 1:0.75,

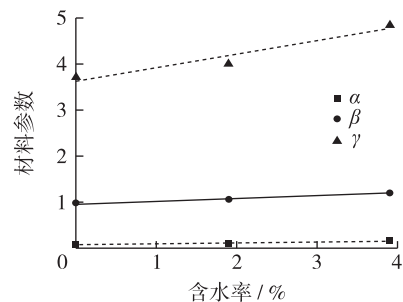


图 7 材料参数与含水率的关系

Fig. 7 Relationships between material parameter and water content

1:1.00)、4种应变率($10^{-5}/s$, $10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$, $10^{-2}/s$)、3种含水状态(干燥、自然、饱和)的三级配大骨料混凝土双轴动态抗压试验。研究结果表明:

(1) 三级配大骨料混凝土的破坏形态主要取决于应力比,而与应变率和含水率关系不大。单轴受压时,破坏模式为柱状破坏;双轴受压时,则为片状破坏。

(2) 由于孔隙水的“楔入”作用,三级配大骨料混凝土的动态极限抗压强度随含水率的增大而增大,而静态极限抗压强度随含水率的增大而减小。极限抗压强度随应力比的增加,呈先增后减的趋势,当应力比为1:0.50时,极限抗压强度最大。

(3) 当应力比为1:0.25时,三级配大骨料混凝土侧向应变为负值;当应力比为1:1.00时,侧向应变与主应变相等。三级配大骨料混凝土在单轴受压状态下的变形明显小于双轴受压,试件的峰值应变随应变率的增大而减小。

(4) 试验分析给出了综合考虑应变率、应力比和含水率影响的大骨料混凝土极限抗压强度的计算公式以及材料参数取值,参数近似符合线性关系。该公式可用于计算大骨料混凝土在不同应变率、应力比和含水率状态下的双轴动态极限抗压强度。

参 考 文 献:

- [1] 宋玉普,尹翠,沈璐.大骨料混凝土在动态双轴压应力下的试验研究[J].混凝土,2013(10):1-3,9.(SONG Yu-pu, YIN Cui, SHEN Lu. Experimental study of large aggregate concrete under dynamic biaxial compressive stress states[J]. Concrete, 2013(10):1-3,9.(in Chinese))
- [2] 王怀亮,陈雄,关萍.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[J].大连大学学报,2007,28(6):81-87.(WANG Huai-liang, CHEN Xiong, GUAN Ping. Experimental study on deformation and strength of mass concrete under biaxial compression[J]. Journal of Dalian University, 2007, 28(6):81-87.(in Chinese))
- [3] 宋玉普,赵国藩,彭放,等.多轴应力下多种混凝土材料的通用破坏准则[J].土木工程学报,1996,29(1):25-32.(SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan, PENG Fang, et al. General failure criterion for different concrete materials under multi-axial stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(1):25-32.(in Chinese))
- [4] DHIR R K, SANGHA C M. Study of relationships between time, strength, deformation and fracture of plain concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1972, 24(81):197-208.
- [5] 沈璐,施林林,宋玉普.三级配混凝土及湿筛混凝土单轴动态拉伸性能试验研究[J].大连理工大学学报,2014,54(4):452-460.(SHEN Lu, SHI Lin-lin, SONG Yu-pu. Experimental study of uniaxial dynamic tensile properties of three-graded concrete and wet-screened concrete[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(4):452-460.(in Chinese))
- [6] 陈仁进,沈璐,宋玉普.大骨料混凝土动态双轴抗压强度试验研究[J].大连理工大学学报,2015,55(3):292-297.(CHEN Ren-jin, SHEN Lu, SONG Yu-pu. Experimental study of dynamic strength of large aggregate concrete under biaxial tension-compression[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2015, 55(3):292-297.(in Chinese))
- [7] 王海龙,李庆斌.不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析[J].水力发电学报,2007,26(1):84-89.(WANG Hai-long, LI Qing-bin. Experiments of the compressive properties of dry and saturated concrete under different loading rates[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2007, 26(1):84-89.(in Chinese))
- [8] 尚世明.普通混凝土多轴动态性能试验研究[D].大连:大连理工大学,2013.(SHANG Shi-ming. Experimental study on the multi-axial dynamic behavior of plain concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.(in Chinese))
- [9] 王海龙,李庆斌.孔隙水对湿态混凝土抗压强度的影响[J].工程力学,2006,23(10):141-144,179.(WANG Hai-long, LI Qing-bin. Effect of pore water on the compressive strength of wet concrete[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(10):141-144,179.(in Chinese))
- [10] 王海龙,李庆斌.围压下裂纹中自由水影响混凝土力学性能的机理[J].清华大学学报(自然科学版),2007,47(9):1443-1446.(WANG Hai-long, LI Qing-bin. Meso-mechanism of effects of free water on mechanical properties of concrete under confined compression[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(9):1443-1446.(in Chinese))
- [11] 宋玉普.混凝土的动力本构关系和破坏准则[M].北京:科学出版社,2013.(SONG Yu-pu. Dynamic constitutive relations and failure criteria of concrete[M]. Beijing: Science Press, 2013.(in Chinese))

- [12] 赵国藩, 宋玉普. 钢筋混凝土结构分析中的有限单元法[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1994. (ZHAO Guo-fan, SONG Yu-pu. Finite element method of reinforced concrete structure[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1994. (in Chinese))

Experimental analysis of compressive properties of three-graded large aggregate concrete under biaxial compression

ZHANG Qi-lu, YANG Sai-li, WANG Li-cheng

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

Abstract: By using a large static and dynamic electro-hydraulic servo-controlled testing system, the dynamic compressive tests of three-graded large aggregate concrete with three kinds of water content (i.e. dry, natural and fully saturated) are carried out under different stress ratios (1:0, 1:0.25, 1:0.50, 1:0.75, 1:1.00) and strain rates ($10^{-5}/s$, $10^{-4}/s$, $10^{-3}/s$, $10^{-2}/s$). In the test analyses, the effects of water content on the biaxial dynamic compressive strength of the three-graded large aggregate concrete are studied. A dynamic compression failure criterion of the large aggregate concrete is proposed. The experimental analysis results show that the compressive strength of the saturated concrete increases at the high strain rate, and decreases at the low strain rate. Comparing with the uniaxial compression, the compressive strength reaches the maximum value at the stress ratio of 1:0.5. It is found from experimental studies that the major factor influencing the failure pattern of the three-graded large aggregate concrete is the stress ratio. The dynamic ultimate compressive strength increases with an increase in water content, while the static ultimate compressive strength decreases with an increase in water content. The specimen under the uniaxial compression has less deformation than that under the biaxial compression, and the peak strain of the specimen is found to increase with the decrease of the strain rate.

Key words: three-graded large aggregate concrete; dynamic biaxial compressive strength; water content; stress-strain curves