

文章编号: 1000-8608(2015)03-0292-06

大骨料混凝土动态双轴拉压强度试验研究

陈仁进, 沈璐, 宋玉普*

(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:为了研究不同应变速率下混凝土双轴动态受力状态的力学性能,在大型静、动态三轴试验机上,对大骨料混凝土和湿筛混凝土试件进行了不同应变速率和应力比下的双轴动态拉压试验,系统研究了应变速率和应力比对混凝土双轴拉压强度的影响。试验结果表明:两种混凝土双轴拉压强度均低于单轴拉伸或单轴压缩强度,其变化规律不但与应力比有着密切的联系,还随应变速率的增大而增大。在主应力空间建立了考虑应变速率和应力比的混凝土双轴拉压破坏准则,为水工结构物的非线性分析提供了试验依据。

关键词:大骨料混凝土;湿筛混凝土;双轴拉压;动态强度;破坏准则

中图分类号:TU528.36 **文献标识码:**A **doi:**10.7511/dlgxb201503010

0 引言

大坝、港口建筑等一些混凝土水工结构,大多数采用的是全级配混凝土,这不但可以减少较大的费用成本,而且更重要的是可以改善混凝土结构的性能。

目前已有大量混凝土静态多轴试验结果^[1-3],但由于缺少试验设备,以及操作比较复杂等,动态双轴拉压方面的研究比较少^[4-7]。过去的一些试验研究大多数采用的是普通混凝土试件,其性能指标与大坝所使用的全级配混凝土有比较大的区别,并不能反映大坝混凝土的真实性能指标^[8-10]。因此,开展大骨料混凝土动态双轴拉压强度试验研究有重要的理论意义和实用价值。

本文进行大骨料、湿筛混凝土在地震条件下的双轴拉压试验,建立破坏准则,以期对大骨料混凝土结构的抗震设计提供试验参考。

1 试验设计

1.1 试验设备

本文试验所使用的大型液压伺服静、动三轴试验机系统是由大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室研制的。其结构主要有3部分:控制

软件、电液伺服油源控制系统、三轴试验机。三轴试验机的加载、卸载等测量控制任务主要由控制软件负责,通过发送指令到电液伺服油源控制系统来调节三轴试验机作动器的位移、荷载。

三轴试验机是本次试验的加载装置,由加力架、加载板、作动器、荷载传感器和位移传感器组成。6个不同方向的作动器是相互独立的,其位移量程为200 mm,误差可以精确到0.08 mm,最大加载速率 5×10^3 kN/s。每个方向配置一个精度0.000 1 mm的位移传感器,量程为12 mm。

本次试验设计了两种尺寸的加载板,其目的是实现两种不同尺寸的混凝土试件的加载。同时为了保证试件的对中,通过球铰装置将加载头固定在作动器上。

1.2 试件设计

本次试验所采用的试件为三级配大骨料混凝土和二级配湿筛混凝土。

试验为混凝土双轴拉压试验,拉力的传递是试验成败的关键因素。目前解决的方案有放大试件端部、试件两端嵌入预埋件、胶粘和用摩擦锚夹等^[11]几种。根据《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2001)^[12]的要求,保证试件有效尺寸为立

收稿日期: 2014-08-12; 修回日期: 2015-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51079019)。

作者简介: 陈仁进(1989-),男,硕士生,E-mail:chenrenjin1989@126.com;宋玉普*(1944-),男,教授,博士生导师,E-mail:syupu@dlut.edu.cn。

方体块,采取增加拉伸端尺寸的方法,最终确定本试验试件为棱柱体块,其中大骨料混凝土试件尺寸为 $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 400\text{ mm}$,湿筛混凝土试件尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 300\text{ mm}$.若采用放大试件端部方案,必将不利于试验操作;而采用胶粘,则无法保证粘贴质量.因此,本试验采用了预埋件的方式,最终试件形式如图1所示^[13].

1.3 试件制作

本试验所使用的水泥为大连水泥厂生产的42.5R普通硅酸盐水泥,一级粉煤灰,中砂为细骨料,粗骨料为表面粗糙的石灰石,减水剂选用大连建筑科学研究院研制的混凝土高效减水剂,大骨料混凝土配合比如表1所示^[13],剔除直径大于40mm骨料,制成湿筛混凝土试件.

试件依据《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2001)进行拌合,大骨料混凝土试件使用木制胶合板合成模成型,振捣棒振捣密实,48 h后拆模,露天盖草浇水养护90 d后,自然养护;湿筛混凝土试件则采用钢模成型,振动台振捣密实,24

h后拆钢模,放养护棚盖草浇水养护28 d后,自然养护.

本试验需要完成24种不同应变速率、应力比的大骨料及湿筛混凝土强度试验,每一加载工况至少试验5个试件,对离散性超过15%的数据予以剔除,保证至少3个有效数据.

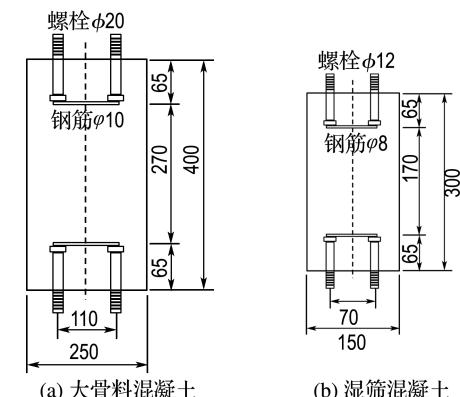


图1 试件示意图(单位:mm)

Fig. 1 Schematic diagram of specimens (unit: mm)

表1 每 m^3 大骨料混凝土的配合比

Tab. 1 Mix proportion of per cubic metre of large aggregate concrete

水质量/kg	水泥质量/kg	粉煤灰质量/kg	砂子质量/kg	石子质量/kg			DK-6 减水剂质量/kg
				5~20 mm	20~40 mm	40~80 mm	
120	214	53	549	442.5	442.5	590	0.214

1.4 试验方法

由于混凝土试件制作、养护等一些无法预测的因素,混凝土试件离散性比较大,在进行试验时,为使试验结果尽可能精确,采取了一些必要的措施.

在加载过程中,如果侧向加载板直接作用于混凝土试件表面会产生较大的摩擦力,对试验结果不利.本试验采用3层塑料薄膜3层甘油组成的减摩片进行减摩处理,其中的一层甘油与试件侧表面接触.

为了保证不出现较大偏心拉压,试验过程中要随时注意试件的对中.首先,将混凝土试件安装到加载板上,降低上部加载板至刚好与螺栓接触,进行初步对中;随后东西方向预压,进一步对中;接下来确保试件上端的4个螺栓能够穿过加载板的圆孔后降低上部加载板进行多次预加载;最后将试件上的8个螺栓拧紧.试件安装完成后,在每

个加载方向上安装1个位移传感器,测量加载方向的变形,试验数据在剔除两侧2个位移传感器读数相差较大的数据后取平均值.

2 试验结果及分析

2.1 试件破坏形态

本文完成了大骨料和湿筛混凝土试件在4种应变速率和4种应力比下的双轴拉压强度试验.

从断裂面形态来看,如图2所示,大骨料混凝土的断裂面大部分在试件的中部,并且不少为锯齿状,随着应变速率的提高,断裂面更为平整,而且试验过程中观察发现其破坏更为突然,脆性破坏更加明显.

和大骨料混凝土相比较,大部分的湿筛混凝土试件断裂面在试件中部,但其整体平整度较好,且被拉断的骨料比例较大.



(a) 大骨料混凝土



(b) 湿筛混凝土

图 2 不同应变速率下大骨料混凝土和湿筛混凝土试件双轴拉压试验的破坏形态

Fig. 2 Failure patterns of large aggregate concrete and wet-screened concrete specimens in biaxial tension-compression tests under different strain rates

2.2 动态拉压强度

对于不同应变速率下的大骨料和湿筛混凝土在双轴拉压荷载作用下拉压强度的试验结果如表 2 所示。

从表 2 的试验结果可以看出: 双轴拉压状态下的大骨料、湿筛混凝土的抗拉、抗压强度均分别

低于相应应变速率下的单拉、单压强度, 所有混凝土试件的 σ_3 随 σ_1 的增加而降低, σ_1 也随着 σ_3 的增加而降低。对应于同一应变速率, 不同应力比时混凝土的强度有着明显的不同。抗压强度随着拉应力比例的增大而降低, 其降低程度随应力比的不同而有一定的差异; 对应于同一应力比, 抗压强度和抗拉强度都随着应变速率的增大而增大。

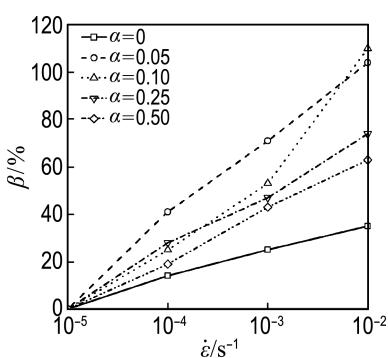
图 3 为混凝土抗压强度随应变速率增大百分比, 图 4 为混凝土抗拉强度随应变速率增大百分比。从图中可以看出: 对应于某一应力比 α , 随着应变速率的增大, 大骨料、湿筛混凝土试件的拉压强度都逐渐提高。显然, 应变速率越大, σ_1 、 σ_3 的增加幅度越大。如在 $\alpha=0.05$ 双轴拉压荷载下, 应变速率为 10^{-2} s^{-1} 时, 大骨料、湿筛混凝土的 σ_3 分别增加 104%、96%; 但对于不同的应力比, 抗压强度提高的幅度不一样, 如对于大骨料混凝土, 当 $\alpha=0.05$ 时, 整体提高幅度较大; 而对于湿筛混凝土, $\alpha=0.10$ 时, 整体提高幅度较大。

表 2 不同应变速率下混凝土双轴拉压强度

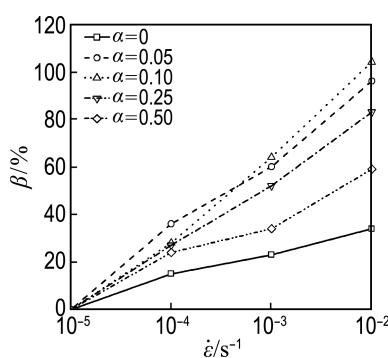
Tab. 2 Biaxial tension-compression strength of concrete under different strain rates

试件	应变速率/ s^{-1}	σ_3/MPa					σ_1/MPa				
		$\alpha=0$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.50$	$\alpha=0.05$	$\alpha=0.10$	$\alpha=0.25$	$\alpha=0.50$	$\alpha=\infty$
大骨料 混凝土	10^{-5}	19.29	9.80	6.80	4.28	2.60	0.49	0.68	1.07	1.31	1.71
	10^{-4}	21.99	13.80	8.50	5.48	3.10	0.69	0.85	1.37	1.55	2.02
湿筛 混凝土	10^{-3}	24.17	16.80	10.40	6.28	3.72	0.84	1.04	1.57	1.86	2.38
	10^{-2}	26.00	20.00	14.30	7.44	4.24	1.00	1.43	1.86	2.12	2.72
湿筛 混凝土	10^{-5}	24.51	13.40	9.20	5.80	3.62	0.67	0.92	1.45	1.81	2.32
	10^{-4}	28.12	18.20	11.80	7.36	4.48	0.91	1.18	1.84	2.24	2.82
	10^{-3}	30.10	21.40	15.10	8.80	4.84	1.07	1.51	2.20	2.42	3.04
	10^{-2}	32.73	26.20	18.80	10.60	5.74	1.31	1.88	2.65	2.87	3.65

注: σ_3 为混凝土抗压强度, σ_1 为混凝土抗拉强度, α 为应力比



(a) 大骨料混凝土



(b) 湿筛混凝土

图 3 混凝土抗压强度随应变速率增大百分比

Fig. 3 The increasing percentage of compressive strength of concrete with strain rates

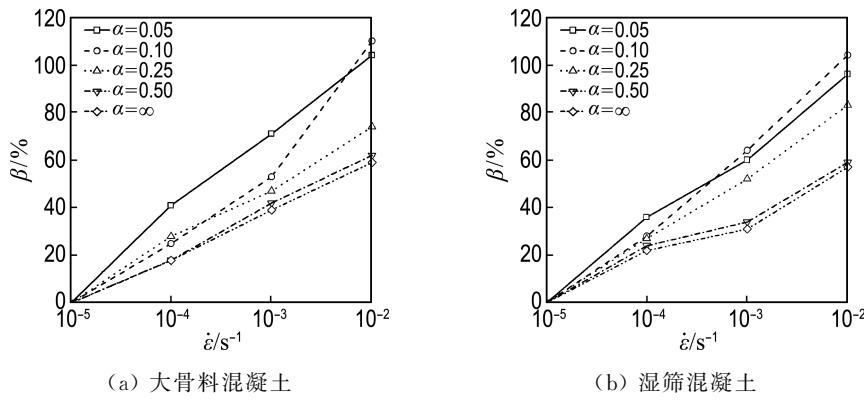
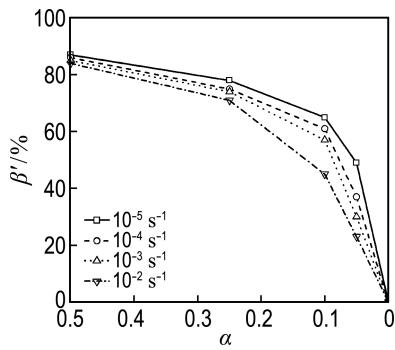
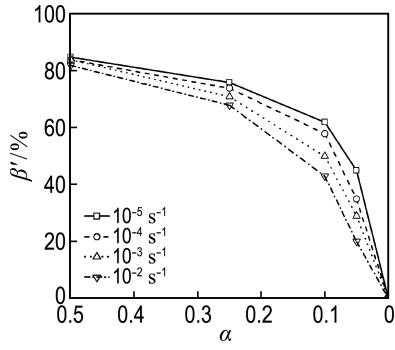


Fig. 4 The increasing percentage of tensile strength of concrete with strain rates

图5为大骨料、湿筛混凝土抗压强度随应力比减小百分比,从图中可以看出,在同一应变速率下,大骨料、湿筛混凝土抗压强度的降低幅度均在应力比 $\alpha < 0.10$ 时相对较大,而在 $\alpha > 0.10$ 时降低幅度较小。对应于不同的应变速率,抗压强度降低幅度也有差异,应力比 $\alpha = 0$ 到 $\alpha = 0.50$ 期间,这种差异由小到大,然后又逐渐缩小,当应力比达到0.50以后,这种差异几乎为零。



(a) 大骨料混凝土



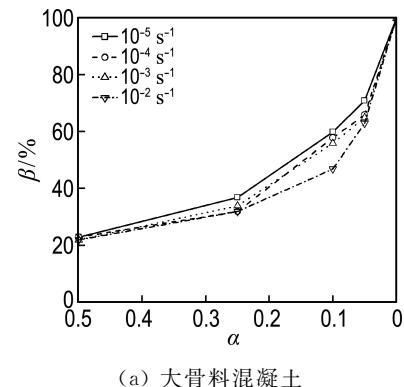
(b) 湿筛混凝土

图5 混凝土抗压强度随应力比减小百分比

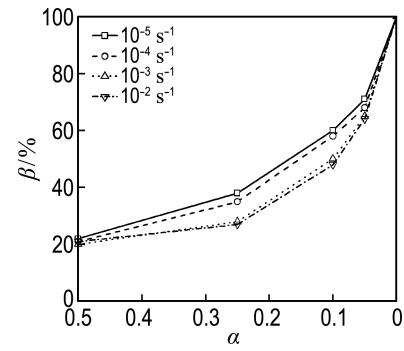
Fig. 5 The decreasing percentage of compressive strength of concrete with stress ratio

图6为大骨料、湿筛混凝土抗拉强度随应力

比增大百分比,从图中可以看出,随着应力比的增大,抗拉强度的增大幅度逐渐降低。在不同的应变速率,其增大幅度有所不同,例如应力比 $\alpha < 0.50$,应变速率为 10^{-2} s^{-1} 时,抗拉强度增大幅度最小,但当 α 接近0.50时,各应变速率下的抗拉强度增大幅度相差不大。



(a) 大骨料混凝土



(b) 湿筛混凝土

图6 混凝土抗拉强度随应力比增大百分比

Fig. 6 The increasing percentage of tensile strength of concrete with stress ratio

3 破坏准则

在混凝土双轴拉压范围内,所能运用的破坏

准则有库伦摩尔准则、八面体应力关系准则、主拉应变准则、格里菲斯准则等。八面体应力关系准则是建立在剪切屈服的基础上;库伦摩尔准则所假定的破坏面与实际破坏面相矛盾。这两准则的理论假设均与试验结果相矛盾,在双轴拉压区域内作为混凝土的破坏准则是不合适的^[14]。

在不考虑应变速率的情况下,双轴拉压强度曲线近似成直线,国内外不少研究者推荐采用下式表示^[15]:

$$\sigma_3/f_c + \sigma_1/f_t = 1 \quad (1)$$

式中: f_c 为标准立方体抗压强度, f_t 为标准立方体抗拉强度。

混凝土动态抗拉抗压强度系数与应变速率的对数近似成直线关系^[16],双轴拉压强度采用下式表示:

$$k_1\sigma_3/f_c + k_2\sigma_1/f_t = 1 \quad (2)$$

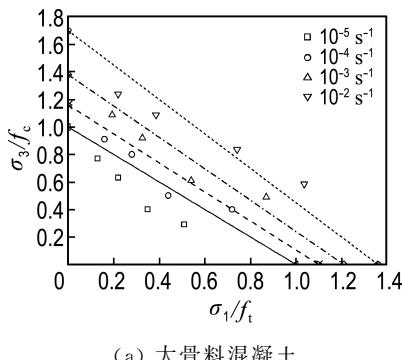
式中: $k_1 = 1 + \text{alg}(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$; $k_2 = 1 + \text{blg}(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$; $\dot{\epsilon}$ 为动态应变速率; $\dot{\epsilon}_s$ 为静态应变速率; σ_3 为动态抗压强度; σ_1 为动态抗拉强度。

最终回归分析得出:

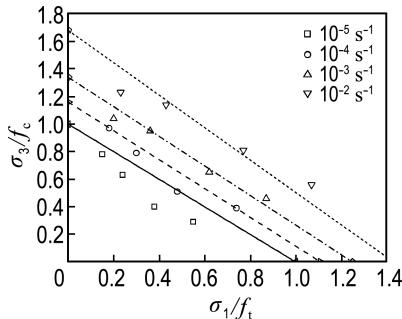
对于大骨料混凝土有 $k_1 = 1 - 0.088\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$, $k_2 = 1 - 0.137\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$

对于湿筛混凝土有 $k_1 = 1 - 0.101\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$, $k_2 = 1 - 0.135\lg(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_s)$

上述破坏准则的试验结果和计算结果可以由图 7 表示,由图可见,二者符合较好。



(a) 大骨料混凝土



(b) 湿筛混凝土

图 7 混凝土不同应变速率的破坏准则

Fig. 7 Failure criterion of concrete under different strain rates

4 结 论

(1) 大骨料和湿筛混凝土在动态双轴拉压状态下的破坏形态和骨料破坏比例与应力比和应变速率有关,应变速率越大,破坏面越平整,骨料破坏比例越大。在相同的条件下,大骨料混凝土的骨料破坏比例要小于湿筛混凝土。

(2) 应力比和应变速率对混凝土双轴拉压强度有着较大的影响。混凝土双轴拉压强度低于单轴强度,其变化规律与应力比有关,随应变速率的增大而增大,提高幅度与应变速率成正比。

(3) 在主应力空间中分别建立了大骨料混凝土和湿筛混凝土在动态拉压状态下的破坏准则,为水工结构物的非线性分析提供了试验依据。

参 考 文 献 :

- [1] 过镇海,王传志. 多轴应力下混凝土的强度和破坏准则研究[J]. 土木工程学报, 1991, 24(3):1-14.
GUO Zhen-hai, WANG Chuan-zhi. Investigation of strength and failure criterion of concrete under multi-axial stresses [J]. **China Civil Engineering Journal**, 1991, 24(3):1-14. (in Chinese)
- [2] 宋玉普,赵国藩. 应变空间混凝土的破坏准则[J]. 大连理工大学学报, 1991, 31(4):455-462.
SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan. Failure criteria of concrete in strain space [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1991, 31(4):455-462. (in Chinese)
- [3] 宋玉普,赵国藩. 拉压平面应变状态下砼的强度准则[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(Z1):104-109.
SONG Yu-pu, ZHAO Guo-fan. Strength criterion of concrete under plane strain state with tension-compression lateral stresses [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1997, 37 (Z1):104-109. (in Chinese)
- [4] Fujikake K, Mori K, Uebayashi K, et al. Dynamic properties of concrete materials with high rates of tri-axial compressive loads [J]. **Structures and Materials**, 2000, 8:511-522.
- [5] 吕培印. 混凝土单轴、双轴动态强度和变形试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2001.
LYU Pei-yin. Experimental study on dynamic strength and deformation of concrete under uniaxial and biaxial action [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [6] HE Zhen-jun, SONG Yu-pu. Multiaxial tensile-compressive strengths and failure criterion of plain high-performance concrete before and after high temperatures [J]. **Construction and Building**

- Materials**, 2010, 24(4):498-504.
- [7] SHANG Shi-ming, SONG Yu-pu. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete [J]. **Construction and Building Materials**, 2013, 40:322-329.
- [8] 马怀发, 陈厚群. 全级配大坝混凝土动态损伤破坏机理研究及其细观力学分析方法[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- MA Huai-fa, CHEN Hou-qun. **Study on the Dynamic Damage Mechanism of Fully Graded Aggregate Concrete and Its Meso Mechanical Analysis Method** [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008. (in Chinese)
- [9] 陈樟福生, 李庆斌. 混凝土动态双轴强度探讨[J]. 水力学报, 2008, 39(4):385-393.
- CHEN Zhang-fu-sheng, LI Qing-bin. Dynamic strength of concrete under biaxial stress [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2008, 39(4):385-393. (in Chinese)
- [10] Akcaoglu T, Tokyay M, Celik T. Effect of coarse aggregate size on interfacial cracking under uniaxial compression [J]. **Materials Letters**, 2002, 57(4): 828-833.
- [11] Ward M A. The testing of concrete materials by precisely controlled uni-axial tension [D]. London: University of London, 1964.
- [12] 中国水利水电科学研究所. DL/T 5150—2001 水工混凝土试验规程 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- China Institute of Water Resources & Hydropower Research. DL/T 5150-2001 Test Code for Hydraulic Concrete [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2002. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 李建林. 双轴应力作用下混凝土的破坏准则[J]. 葛洲坝水电工程学院学报, 1986(1):1-8.
- LI Jian-lin. Failure criterion of concrete under biaxial stress [J]. **Journal of Gezhouba Institute of Hydro Electric Engineering**, 1986(1):1-8. (in Chinese)
- [15] 杨木秋. 混凝土二轴受压与二轴拉压强度及其在拱坝设计中的应用[J]. 人民长江, 1992, 23(6):35-39.
- YANG Mu-qiu. Application of concrete biaxial compression and biaxial tension-compression strength to arch dam design [J]. **Yangtze River**, 1992, 23(6):35-39. (in Chinese)
- [16] 宋玉普. 混凝土的动力本构关系和破坏准则(下册) [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- SONG Yu-pu. **Dynamic Constitutive Relation and Failure Criterion of Concrete 2** [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)

Experimental study of dynamic strength of large aggregate concrete under biaxial tension-compression

CHEN Ren-jin, SHEN Lu, SONG Yu-pu*

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

Abstract: To investigate the mechanical properties of concrete under biaxial dynamic stress and different strain rates, the biaxial dynamic tension-compression tests under different stress ratios and strain rates on the specimens of large aggregate concrete and wet-screened concrete were carried out by using the large-scale triaxial static and dynamic test system. The effects of stress ratio and strain rate on the biaxial tension-compression strength of concrete were studied systematically. The experimental results show that the biaxial tension-compression strengths of the two kinds of concrete are lower than uniaxial tension or uniaxial compression strength. The dynamic strength not only varies with the different stress ratios, but also increases with the increase of the strain rates. Biaxial tension-compression failure criterion of concrete considering stress ratio and strain rate is established in normal stress space, which can provide experimental basis for the nonlinear analyses of hydraulic structures.

Key words: large aggregate concrete; wet-screened concrete; biaxial tension-compression; dynamic strength; failure criterion