

文章编号:1673-2049(2012)02-0067-07

# 湿筛二级配大坝混凝土双轴应力下的强度特性

马超<sup>1</sup>, 李光伟<sup>2</sup>, 周军<sup>1</sup>, 吴智敏<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024;

2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:**采用大连理工大学自行研制的电液伺服三轴试验系统,结合溪洛渡大坝实际工程,对大坝湿筛二级配混凝土进行了单轴拉、单轴压、双轴拉压、双轴压压及双轴拉拉应力状态下的强度特性试验研究。在进行双轴拉压试验时,提出了一种新的加载方式,即双钢板-塑料毛刷组合连接方式。试验结果表明:该加载方式能使试件端部拉应力传递更加均匀,有效消除了拉端粘贴钢板对试件受压变形的约束作用,提高了试验精度,同时能大大提高试验效率;根据试验结果建立的双轴应力状态下的主应力空间破坏准则可以为大体积水工混凝土结构设计及非线性分析提供参考。

**关键词:**混凝土;双轴应力;湿筛二级配;破坏准则;强度特性;非线性分析

**中图分类号:**TU528.1

**文献标志码:**A

## Strength Properties of Wet-screened Two-graded Aggregate Concrete for High Arch Dam Under Biaxial Stress

MA Chao<sup>1</sup>, LI Guang-wei<sup>2</sup>, ZHOU Jun<sup>1</sup>, WU Zhi-min<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;

2. Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, Sichuan, China)

**Abstract:** Combined with the Xiluodu High Arch Dam project, authors presented an test study on the strength property of wet-screened two-graded aggregate concrete for high arch dam under uniaxial tension, uniaxial compression, biaxial tension-compression, biaxial compression and biaxial tension stress by using the electro-hydraulic servo-controlled triaxial test machine of Dalian University of Technology. A new test loading method was developed for evaluating the concrete strength under tension-compression stress, in which a glued double-plated manner combined with plastic brushes was adopted. The test results show that this new method can make the transformed stress more uniform, and can effectively eliminate the compression deformation restraint of the bonded steel to the concrete specimen at the tension end. Meanwhile, it can improve the test precision and can increase the test efficiency. The appropriate failure criterion developed in the principal stress space for biaxial stress states based on the test results can provide the references for mass hydraulic concrete structural design and nonlinear analysis.

**Key words:** concrete; biaxial stress; wet-screened two-graded; failure criterion; strength property; nonlinear analysis

## 0 引言

近年来,随着有限元及高速计算机的迅猛发展,

人们对混凝土结构的设计思想已从传统的弹性设计发展到非线性极限设计。作为结构非线性分析技术的核心问题,混凝土在多轴应力状态下的强度和变

收稿日期:2011-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(50878036)

作者简介:马超(1987-),男,湖北襄阳人,工学硕士研究生,E-mail:mathew2009@126.com。

形研究也日益受到重视<sup>[1-7]</sup>。大体积水工混凝土的多轴强度准则及本构关系的研究从 20 世纪 80 年代起在中国逐步开展,并取得了大量的成果<sup>[8-13]</sup>。但由于混凝土内部结构的多相性以及试验设备、试验手段的限制,混凝土多轴强度理论体系尚未建立。另外,大体积水工混凝土结构某些部位处于双轴拉压及三轴拉压压应力状态。在这些应力状态下,混凝土抗拉强度低于其单轴抗拉强度,抗压强度也低于其单轴抗压强度。因此,如果以单轴抗拉强度作为混凝土的强度指标设计拱坝,会使设计结果偏于不安全,而对处于双轴受压或三轴受压的部位,采用单轴抗压强度指标进行设计,又会使结果偏于保守,不能充分利用混凝土材料的强度。

本文中笔者采用与溪洛渡大坝混凝土相同的配合比,按照《水工混凝土试验规程》<sup>[14]</sup>中的建议,制作湿筛二级配混凝土小试件(100 mm×100 mm×100 mm),并利用一种新的双轴拉压加载方法,进行了单轴及双轴应力状态下混凝土强度试验研究,并基于试验结果在主应力空间内建立了双轴应力状态下的破坏准则,为大体积水工混凝土结构设计及非线性分析提供了参考。

1 试验概况

1.1 试件制备

试验采用的混凝土配合比与溪洛渡大坝混凝土相同。水泥为华新水泥股份有限公司生产的 42.5 级中热硅酸盐水泥,粉煤灰采用华珞 I 级粉煤灰,砂为灰岩砂(粒径小于 5 mm),粗骨料为四级配玄武岩碎石,其中小石(粒径 5~20 mm)、中石(粒径 20~40 mm)、大石(粒径 40~80 mm)、特大石(粒径 80~150 mm)的比例为 20:20:25:35。减水剂为 ZB-1A 缓凝高效减水剂,引气剂为 ZB-1G 混凝土引气剂,具体的混凝土配合比见表 1。

表 1 溪洛渡大坝混凝土配合比

Tab. 1 Mixture Proportions of Concrete for Xiluodu High Arch Dam

| 混凝土强度等级             | 水胶比  | 各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> ) |     |     |     |       | 坍落度/cm | 含气量/% |
|---------------------|------|-----------------------------|-----|-----|-----|-------|--------|-------|
|                     |      | 水                           | 水泥  | 粉煤灰 | 砂   | 石     |        |       |
| C <sub>180</sub> 40 | 0.41 | 82                          | 130 | 70  | 511 | 1 843 | 4~6    | 4~5   |

注:复掺 JM-II (C) 高效减水剂与 MicroAIR202 混凝土引气剂。

湿筛试件用自制的钢模统一浇筑成 200 mm×200 mm×200 mm 的立方体。采用人工拌合混凝土,筛出粒径大于 40 mm 的碎石,用平板振捣器振捣密实。所有试件均在 48 h 后脱模,放在室内浇水

养护至 28 d,然后在自然条件下养护。因受三轴试验机量程的限制,当试件养护至 90 d 龄期,用岩石切片机将试件切成 100 mm×100 mm×100 mm 的立方体。试件切割完毕后,用大理石磨面机将试件表面磨平。

1.2 试验方法

试验在大连理工大学结构实验室三轴试验机<sup>[15]</sup>上进行。在试件单轴拉伸及双轴拉压试验中,主拉应力方向试件与试验机的连接方式均采用双钢板-塑料毛刷组合连接,如图 1 所示,其中,半径  $r=30$  mm。与传统的拉伸方法,如内置钢筋式<sup>[16]</sup>、端部摩擦夹持式<sup>[17]</sup>、单钢板粘贴式<sup>[18]</sup>和双钢板粘贴式<sup>[19]</sup>相比,双钢板-塑料毛刷组合连接方式能使试件端部拉应力传递更加均匀;在多轴拉压组合加载试验中,可以消除受拉钢板对试件受压变形的约束作用,试件加载完毕后可直接切除粘贴钢板上的塑料毛刷,回收粘贴钢板,方便快捷。

为了保证塑料毛刷与混凝土试件表面的粘贴质量,在粘贴之前将粘贴面用大理石磨面机磨出骨料并用无水乙醇清理干净。将塑料毛刷的刷齿用砂纸打磨后,将胶粘剂均匀涂抹在试件的粘贴面。接着将塑料毛刷放在粘贴面上并压实固定,再将粘贴钢板与塑料毛刷基座粘贴好,放置在 25℃~60℃的环境中养护直至胶结面完全固化。

在进行单轴拉伸加载时,将养护好的试件取出,用螺栓将传力钢板与粘贴钢板连接,通过扭力扳手对螺母施加扭矩直至拧紧,传力钢板另一端与液压伺服试验机的拉力球面铰连接。为了满足试件轴心受拉,可通过调整螺母的旋入深度完成试件的几何对中。按恒应变速率控制进行加载,加载速率为  $2\times10^{-6}$  s<sup>-1</sup>。在进行单轴压、双轴压压以及双轴拉压试验时,为了消除垂直于压应力方向环箍效应,采取的减摩措施为 3 层聚氯乙烯塑料片夹 2 层黄油,减摩后立方体的单轴抗压强度大致相当于棱柱体强度,试验结果稳定。

试件变形量测采用外接 LVDT 传感器,非线性度小于 0.05%,每个加载方向设置 2 个,布置在试件对角方向,最终变形值取 2 个 LVDT 传感器读数的平均值。

2 试验结果及分析

2.1 破坏形态

湿筛二级配混凝土在单轴及双轴应力状态下,根据应力比的不同,破坏形态可分为拉断、柱状破

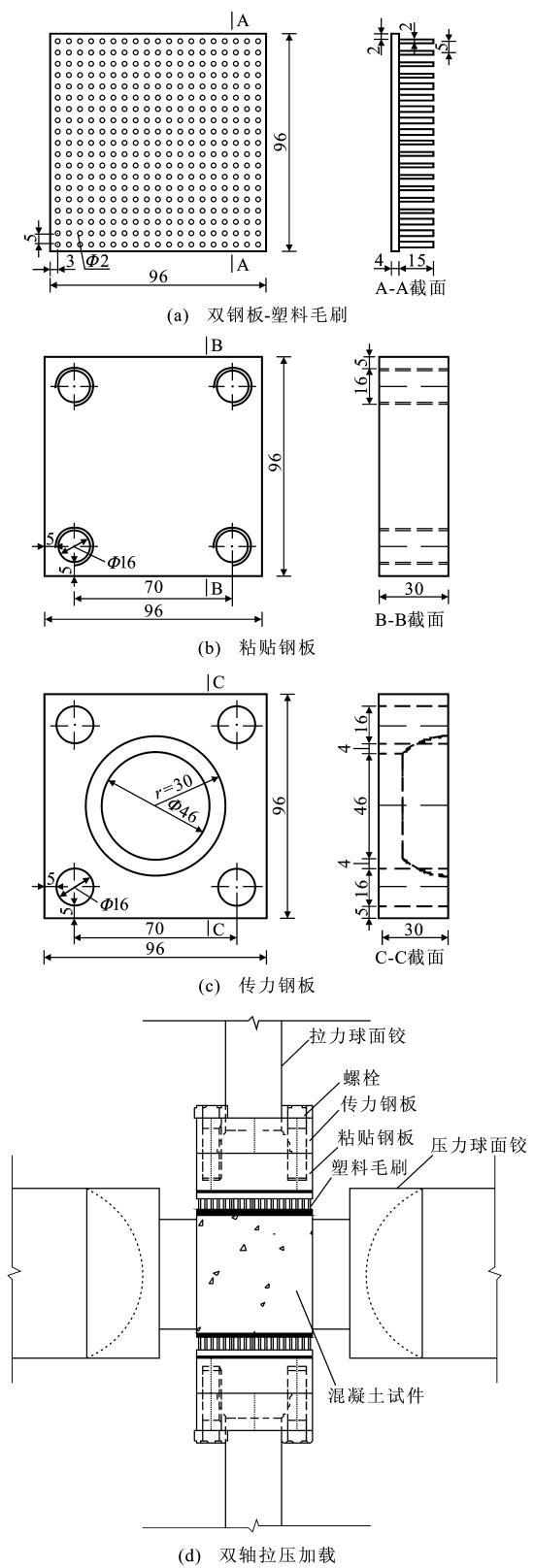


图 1 双轴拉压试验加载方法(单位:mm)

Fig. 1 Loading Methods for Biaxial Tension-compression Tests (Unit:mm)

坏、片状劈裂 3 种形态。在单轴拉及双轴拉压区,试件均发生拉断破坏。图 2 为双轴应力下试件的破坏

形态。从图 2(a)可以看出,多数试件的拉断破坏截面靠近试件的中部,大骨料沿截面脱离粘连,少数小粒径骨料被拉断,端口较为平整。在单压区,由于采用了聚氯乙烯减摩板,消除了加载板对试件的侧向约束作用,试件破坏时呈现典型的柱状破坏[图 2(c)]。试件在主压应力  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  作用下,侧向拉应变超过混凝土极限拉应变后,形成平行于侧表面的裂缝,并逐渐扩展,直至内部混凝土普遍损伤破坏。双轴压压区,当应力比  $\sigma_2/\sigma_3$  较大时,能够阻止试件发生垂直  $\sigma_2$  方向的劈拉裂缝,进而阻止发生柱状破坏,试件沿  $\sigma_2-\sigma_3$  作用面形成近似平行的裂缝发生片状劈裂破坏。因为混凝土的非匀质性,宏观的平行劈裂面有不规则的倾斜角和曲度[图 2(d)]。

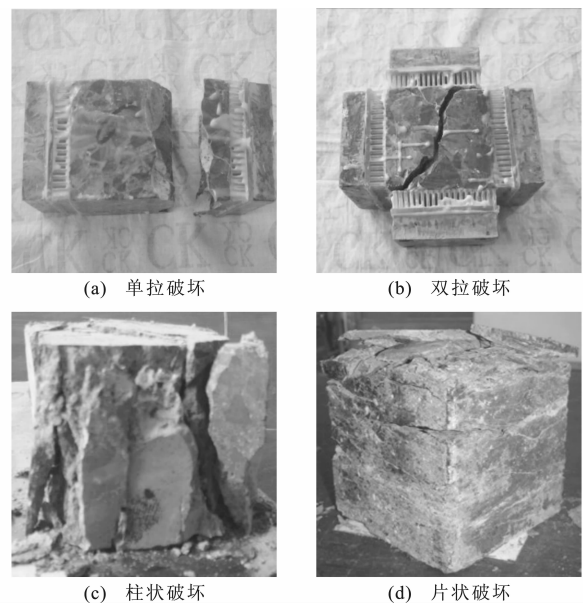


图 2 双轴应力下试件的破坏形态

Fig. 2 Failure Modes of Specimens Under Biaxial Stress

2.2 试验结果

为了得到混凝土在双轴应力状态下的强度,试验时每组平均 4 个试件,剔除离散较大的试验值,直到该组中的试验值都比较均匀而且相差不大。试验结果平均值见表 2,规定拉应力为正,压应力为负。

2.3 强度特性与破坏准则

从表 2 可见,湿筛二级配混凝土在双轴受压时强度高于单轴抗压强度,双轴拉压时强度低于相应的单轴拉、单轴压强度,这与普通混凝土双轴强度的规律是一致的。为了更加直观地分析强度特性,下面将分别讨论双轴压压、双轴拉压、双轴拉拉的极限强度随应力比变化规律,并通过回归分析建立主应力空间的破坏准则。

表 2 双轴应力下湿筛二级配混凝土极限强度平均值  
Tab.2 Ultimate Strength Average Values of Wet-sieved  
Two-graded Concrete Under Biaxial Stress

| 应力状态 | $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ | 试件数 | 极限强度平均值/MPa      |                  |                  |
|------|----------------------------------|-----|------------------|------------------|------------------|
|      |                                  |     | $\bar{\sigma}_1$ | $\bar{\sigma}_2$ | $\bar{\sigma}_3$ |
| 单压   | 0 : 0 : -1                       | 5   | 0.00             | 0.00             | -32.43           |
| 双轴压压 | 0 : -0.2 : -1                    | 4   | 0.00             | -9.83            | -49.63           |
|      | 0 : -0.5 : -1                    | 5   | 0.00             | -29.99           | -60.31           |
|      | 0 : -1 : -1                      | 4   | 0.00             | -51.48           | -51.48           |
| 单拉   | 1 : 0 : 0                        | 5   | 2.60             | 0.00             | 0.00             |
| 双轴拉压 | 0.02 : 0 : -1                    | 3   | 0.35             | 0.00             | -17.58           |
|      | 0.05 : 0 : -1                    | 4   | 0.71             | 0.00             | -13.72           |
|      | 0.1 : 0 : -1                     | 5   | 0.80             | 0.00             | -7.07            |
|      | 0.15 : 0 : -1                    | 4   | 0.97             | 0.00             | -5.91            |
|      | 0.2 : 0 : -1                     | 4   | 1.13             | 0.00             | -5.39            |
|      | 0.3 : 0 : -1                     | 4   | 1.11             | 0.00             | -3.70            |
|      | 0.5 : 0 : -1                     | 4   | 1.32             | 0.00             | -2.49            |
|      | 0.7 : 0 : -1                     | 4   | 1.48             | 0.00             | -2.25            |
| 双轴拉拉 | 1 : 1 : 0                        | 5   | 2.17             | 2.15             | 0.00             |
|      | 1 : 0.5 : 0                      | 5   | 2.24             | 1.06             | 0.00             |

2.3.1 双轴压压

Kupfer 等<sup>[20]</sup>、王传志等<sup>[21]</sup>、Liu 等<sup>[22]</sup>的试验结果与湿筛二级配混凝土试验结果对比如图 3 所示,图 3 中,  $f_c$  为单轴抗压强度平均值。

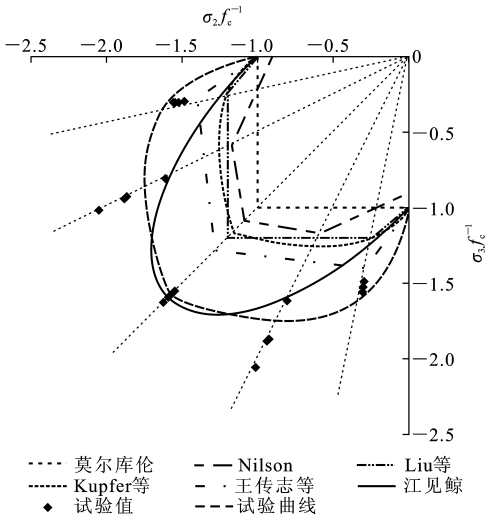


图 3 本文试验结果与 Kupfer 等的双轴受压强度包络线对比

Fig.3 Comparisons of Test Results Obtained in the Paper and Strength Envelopes by Kupfer, et al Under Biaxial Compression

从图 3 可以看出,双轴压压时,湿筛二级配混凝土与普通混凝土存在相似的规律,即混凝土一个方向的强度随着另一个方向压应力的增大而增大,最大压力发生在应力比  $\sigma_2/\sigma_3$  为 0.5 左右时。不同的

是,在相同应力比条件下,湿筛二级配混凝土的强度都比普通混凝土要高,如当  $\sigma_2/\sigma_3=0.5$  时,Kupfer 等的试验结果为  $\sigma_3/f_c=1.256$ ,王传志等的结果为  $\sigma_3/f_c=1.352$ ,而湿筛二级配试件的试验结果为  $\sigma_3/f_c=1.86$ ,比 Kupfer 等的试验结果高 48.1%,比王传志等的高 37.6%。

通过对比发现,Kupfer 等准则得到的曲线形状与本文试验结果包络线最为接近。因此,本文中采用 Kupfer 等的双轴受压强度公式形式,建立主应力空间下湿筛二级配混凝土双轴受压强度准则,即

$$\frac{\sigma_{3f}}{f_c} = -\frac{1+m\alpha}{(1+n\alpha)^2}$$
 (1)

式中: $\sigma_{3f}$  为双轴受压强度; $m,n$  均为待定的回归系数; $\alpha$  为双轴应力比。

根据表 2 中的试验结果,经回归可以得到  $m=8.0506,n=1.3933$ ,判定系数  $R^2=0.9445$ 。在回归曲线中, $\sigma_{3f}$  在  $\alpha=0.48$  处达到最大值,双轴受压强度拟合曲线与试验值比较吻合。

2.3.2 双轴拉压

混凝土在双轴拉压应力状态下,其抗拉强度和抗压强度都比单轴抗拉和抗压的极限强度低,且抗压强度随拉应力的增加而降低,抗拉强度随压应力的增加而降低<sup>[23-32]</sup>。图 4 为双轴拉压试验结果及破坏准则。

由图 4(a)可知,本文中的双轴拉压强度更小一些,如应力比  $\sigma_1/\sigma_3=-0.05$  时,双轴拉压强度分别为单轴拉压强度的 27%和 42%,文献[33]中的试验结果为单轴拉压强度的 27%和 75%,文献[1]中的试验结果为单轴拉压强度的 21%和 52%。可见,采用双钢板-塑料毛刷组合连接方式,减小了受拉粘贴钢板对受压变形的约束作用,更加真实地反映拉压 2 个方向的实际应力水平。根据试验数据在直角坐标系中的分布规律,可近似按椭圆曲线来确定双轴拉压破坏准则

$$A(\frac{\sigma_{1f}}{f_t})^2+B(\frac{\sigma_{3f}}{f_c})^2+C\frac{\sigma_{1f}}{f_t}+D\frac{\sigma_{3f}}{f_c}+E=0$$
 (2)

式中: $\sigma_{1f}$  为主应力方向对应的强度值; $f_t$  为单轴抗拉强度平均值; $A,B,C,D,E$  均为回归系数。

根据表 2 中的试验结果,经回归可以得到  $A=3.2801,B=3.2102,C=6.5596,D=-6.4897,E=3.2795$ ,判定系数  $R^2=0.9274$ 。

2.3.3 双轴拉拉

双轴拉拉试验在各国研究得较少。一般认为,

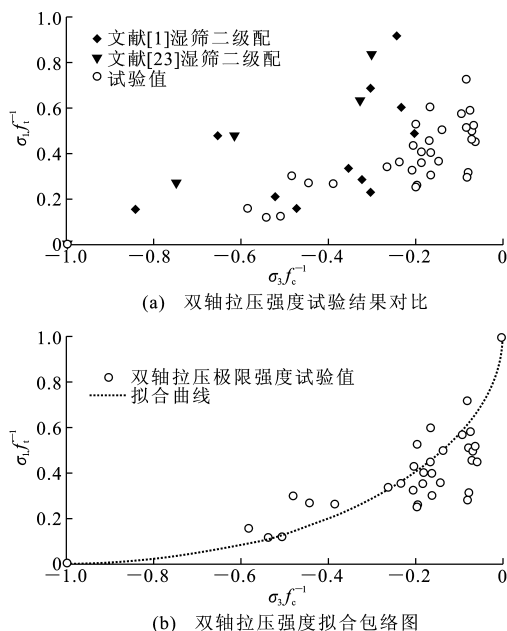


图4 双轴拉压试验结果及破坏准则

Fig. 4 Test Results and Failure Criteria Under Biaxial Tension-compression

在双轴拉应力状态下,其强度与单轴拉强度基本相同,且与应力比无关。根据本文中的试验结果,在双轴拉拉作用下,湿筛二级配混凝土抗拉强度有所降低,但与单轴拉伸强度相差不大。因此,建立如下直线形式的双轴受拉破坏准则

$$0 \leq \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{1f} &= -0.192 \cdot 4\alpha + 1 \\ \sigma_{2f} &= \alpha f_t \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\sigma_{2f}$ 为主应力方向对应的强度值。

由此可得,判定系数 $R^2 = 0.8615$ 。综上所述,双轴应力下试验数据及拟合曲线见图5。

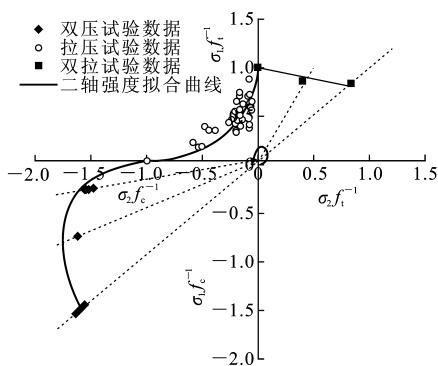


图5 双轴应力强度试验结果及包络图

Fig. 5 Test Results and Envelopes Under Biaxial Stress Strength

### 3 结 语

(1)通过对单轴拉伸及多轴拉压试验方法进行改进,提出了双钢板-塑料毛刷组合连接方式。该方法用于混凝土多轴拉压加载试验时,有效消除了拉压应力状态下粘贴钢板对试件受压变形的约束作用,提高了试验精度;同时新型连接方式更加便捷,缩短了粘结钢板的周转时间,大大地提高了试验效率。

(2)湿筛二级配混凝土在双轴压压作用下,当应力比 $\sigma_2/\sigma_3$ 分别为0.2,0.5,1.0时,均发生片状劈裂破坏,并且强度在 $\alpha$ 为0.5左右时达到最大值,其抗压强度比单轴抗压强度提高86%,相比Kupfer等、王传志等的普通混凝土试验结果,湿筛二级配混凝土在双轴压状态下强度提高得更多。

(3)湿筛二级配混凝土在双轴拉压作用下,当应力比 $\sigma_1/\sigma_3$ 在-0.05~-0.7时,均发生拉断破坏。与已有的双轴拉压试验结果相比,本文试验测得双轴极限拉压强度相比单轴抗拉、抗压强度降低得更多。这说明大坝混凝土在双轴拉压作用下是偏于不安全的,而且不能简单套用普通混凝土拉压极限强度准则。通过对拉压试验数据的拟合,采用近似椭圆曲线的强度准则表达式,与试验数据比较吻合。双轴拉拉作用下,极限抗拉强度有所降低,但与单轴拉伸强度相差不大,可采用线性表达式。

### 参考文献:

### References:

- [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.  
SONG Yu-pu. Constitutive Relationship and Failure Criteria of the Concrete Materials[M]. Beijing:China Water Power Press,2002.
- [2] 李杰. 混凝土随机损伤力学的初步研究[J]. 同济大学学报:自然科学版,2004,32(10):1270-1277.  
LI Jie. Research on the Stochastic Damage Mechanics for Concrete Materials and Structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2004, 32(10): 1270-1277.
- [3] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2006.  
JIANG Jian-jing, LU Xin-zheng, YE Lie-ping. Finite Element Analysis of Concrete Structures[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006.
- [4] 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.

- GUO Zhen-hai. Strength and Deformation of Concrete: Experimental Foundation and Constitutive Relationship[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [5] LEE S K, SONG Y C, HAN S H. Biaxial Behavior of Plain Concrete of Nuclear Containment Building[J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 227(2): 143-153.
- [6] TASUJI M E, SLATE F O, NILSON A H. Stress-strain Response and Fracture of Concrete in Biaxial Loading[J]. ACI Journal, 1978, 75(7): 306-312.
- [7] NELISSEN L J M. Biaxial Testing of Normal Concrete[J]. Heron, 1972, 18(1): 603-611.
- [8] 李伟政, 过镇海. 二轴拉压应力状态下混凝土的强度和变形试验研究[J]. 水利学报, 1991(8): 51-56, 71.  
LI Wei-zheng, GUO Zhen-hai. Experiment Research on Strength and Deformation of Concrete Under Biaxial Tension-compression Stress[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(8): 51-56, 71.
- [9] 蒋林华, 谢年祥, 林毓梅. 拉压二轴受力下混凝土特性的试验研究[J]. 水利学报, 1990(3): 59-65.  
JIANG Lin-hua, XIE Nian-xiang, LIN Yu-mei. Experiment Research on the Characteristic of Concrete Under Tension-compression Biaxial Loading [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990(3): 59-65.
- [10] 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.
- [11] 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 Multiaxial Stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 1996, 29(1): 25-32.
- [12] 王怀亮, 宋玉普, 曲晓东, 等. 大坝原级配混凝土在双轴拉压及三轴拉压压受力状态下的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7): 104-110.  
WANG Huai-liang, SONG Yu-pu, QU Xiao-dong, et al. Experimental Study of Mass Concrete Under Biaxial Compression-tension and Triaxial Compression-compression-tension Stresses[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7): 104-110.
- [13] 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.
- [14] DL/T 5150—2001, 水工混凝土试验规程[S].  
DL/T 5150—2001, Test Code for Hydraulic Concrete [S].
- [15] 宋玉普, 沈吉纳, 靳国礼. 多功能三轴混凝土试验系统[J]. 大连理工大学学报, 1992, 32(4): 460-464.  
SONG Yu-pu, SHEN Ji-na, JIN Guo-li. Multifunction Triaxial Experimental Apparatus System for Concrete[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1992, 32(4): 460-464.
- [16] 霍洪媛, 车黎明, 梁正平. 混凝土轴向拉伸全曲线试验及装置[J]. 河海大学学报, 1995, 23(5): 26-31.  
HUO Hong-yuan, CHE Li-ming, LIANG Zheng-ping. Test and Equipment of Concrete Axial Tension Complete Stress-strain Curve [J]. Journal of Hohai University, 1995, 23(5): 26-31.
- [17] GOPALARATNAM V S, SHAH S P. Softening Response of Plain Concrete in Direct Tension[J]. ACI Journal, 1985, 82(3): 310-323.
- [18] 尚仁杰, 赵国藩, 黄承逵. 低周循环荷载作用下混凝土轴向拉伸试验全曲线的试验研究[J]. 大连理工大学学报, 1996, 36(7): 82-87.  
SHANG Ren-jie, ZHAO Guo-fan, HUANG Cheng-kui. Experimental Investigation of Complete Stress-deformation Curves for Concrete Under Low Frequency Cyclic Load [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 36(7): 82-87.
- [19] 彭勃, 郑伟. 混凝土单轴直接拉伸强度试验方法的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(2): 79-83.  
PENG Bo, ZHENG Wei. Study on the Test Method of Concrete Strength in Uniaxial Direct Tension [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2004, 31(2): 79-83.
- [20] KUPFER H, HILDORF H K, RUSH H. Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses [J]. ACI Journal, 1969, 66(8): 656-666.
- [21] 王传志, 过镇海, 张秀琴. 二轴和三轴受压混凝土的强度试验[J]. 土木工程学报, 1987, 20(1): 15-27.  
WANG Chuan-zhi, GUO Zhen-hai, ZHANG Xiu-qin. Experimental Investigation of Concrete Strength Under Biaxial and Triaxial Compressive Stresses [J].

- China Civil Engineering Journal, 1987, 20(1): 15-27.
- [22] LIU T C Y, NILSON A H, SLATE F O. Stress-strain Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression[J]. ACI Journal, 1972, 69(5): 291-295.
- [23] 盛燕萍, 陈拴发, 郑木莲, 等. 免振捣多孔混凝土配合比设计方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(1): 44-49.
- SHENG Yan-ping, CHEN Shuan-fa, ZHENG Muli-an, et al. Mix Design Method of Porous Concrete with Non-vibration Molding[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(1): 44-49.
- [24] 闫磊, 吕颖钊, 贺拴海, 等. 在役混凝土桥梁构件可靠性实用评估方法[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 13-19.
- YAN Lei, LU Ying-zhao, HE Shuan-hai, et al. Practical Evaluation Method of Component Reliability for Existing Concrete Bridge[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5): 13-19.
- [25] 张峰, 叶见曙, 徐向锋. 预应力混凝土梁非线性分析单元模型[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(5): 68-72.
- ZHANG Feng, YE Jian-shu, XU Xiang-feng. Nonlinear Analysis Element Model of Prestressed Concrete Beam[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(5): 68-72.
- [26] 于峰, 牛荻涛, 贺拴海. 纤维复合材料约束混凝土柱的统一强度模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 70-74.
- YU Feng, NIU Di-tao, HE Shuan-hai. Unified Compressive Strength Model of FRP-confined Concrete Column[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 70-74.
- [27] 张岗, 贺拴海. 时变对流模式下混凝土厚壁结构内生热场分布[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 64-69.
- ZHANG Gang, HE Shuan-hai. Distribution of Hydration Heat Temperature Fields for Concrete Thick-wall Structure Exposed to Time-dependent Convection Model[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 64-69.
- [28] 王卫中, 冯忠绪, 张晓波. 混凝土二次搅拌的机理分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(1): 103-106.
- WANG Wei-zhong, FENG Zhong-xu, ZHANG Xiao-bo. Mechanism Study of Concrete Secondary Mixing[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(1): 103-106.
- [29] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4): 70-73.
- DING Fa-xing, YU Zhi-wu, OU Jin-ping. Damage Constitutive Model for Concrete Under Uniaxial Stress Conditions[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4): 70-73.
- [30] 李会艳. 矿物掺和料对高性能混凝土性能的影响[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(3): 63-67.
- LI Hui-yan. Effect of Mineral Admixture on Performance of High Performance Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(3): 63-67.
- [31] 唐小祝, 于卫国. 预应力混凝土上拱度分析及控制[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 267-269.
- TANG Xiao-zhu, YU Wei-guo. Analysis and Control of Deflection Upwards of Prestressed Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2011, 28(10): 267-269.
- [32] 袁孝文, 解培民. 路面混凝土的再生强度和弹性模量的研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 27(3): 57-58, 61.
- YUAN Xiao-wen, XIE Pei-min. Study on Intensity and Modulus of Elasticity of Recycled Pavement Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 27(3): 57-58, 61.
- [33] 王怀亮. 复杂应力状态下大骨料混凝土力学特性的试验研究和分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- WANG Huai-liang. Study on the Behavior of Mass Concrete Under Complex Stress State with Tests and Numerical Modeling[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.