

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2019.03.007

# 混凝土拱坝的多轴强度与安全指标

钱向东,李旭展

(河海大学力学与材料学院,江苏 南京 210098)

**摘要:** 为便于推算混凝土多轴强度,开展混凝土结构的多轴强度设计,本文针对任意的多参数强度准则,给出了用等比超载系数  $K_{OL}$  计算多轴强度的通用方法。以某已建成的拱坝为例,分别计算坝体的等比超载系数  $K_{OL}$  和失效距离系数  $K_{FD}$ ,并与单轴强度安全系数进行比较,指出混凝土拱坝按多轴强度设计的必要性。基于  $K_{FD}$  的定义和算例分析,建议将  $K_{FD}$  作为拱坝多轴强度安全设计和校核的指标。

**关键词:** 混凝土;拱坝;多轴强度;等比超载系数;失效距离系数;安全指标

中图分类号:TV642.4      文献标志码:A      文章编号:1000-1980(2019)03-0230-08

## Multi-axial strength and safety index of concrete arch dams

QIAN Xiangdong, LI Xuzhan

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to calculate the multi-axial strength of concrete and design a concrete structure considering the multi-axial strength of concrete, a general method for calculating the multi-axial strength under an arbitrary multi-parameter strength criteria is presented in this paper by using the overload factor of equivalent ratio,  $K_{OL}$ . Taking a completed arch dam as an example, the equal proportional overload factor,  $K_{OL}$ , and the failure distance factor,  $K_{FD}$ , are calculated, respectively, and compared with the safety factor of uniaxial strength. Then, the necessity of designing a concrete arch dam according to the multi-axial strength is pointed out. Based on the definition of  $K_{FD}$  and the analysis of an example, it is suggested that  $K_{FD}$  should be considered as an index for the safety design and the checking of multi-axial strength of arch dams.

**Key words:** concrete; arch dam; multi-axial strength; overload factor of equivalent ratio; failure distance factor; safety index

试验表明,在复杂应力状态下,混凝土具有显著的多轴强度效应<sup>[1-3]</sup>。具体表现为,在多轴受压状态下,混凝土的强度明显提高;在多轴拉压状态下,混凝土的强度明显降低。显然,对多轴受压状态下的混凝土结构,设计时若考虑强度的提高,则有利于发挥材料的抗压潜力;而对二轴或三轴拉压状态下的混凝土结构,若不考虑多轴强度效应,将会过高地估计结构的实际安全储备。

混凝土拱坝是典型的多向受力结构,基本荷载组合下大部分坝体混凝土处于多轴应力状态,强度设计中应该考虑多轴强度效应。美国于 1947 年和 1968 年,利用混凝土多轴抗压强度大于单轴抗压强度,两次增大了拱坝的允许设计高度<sup>[4]</sup>。1964 年,日本在拱坝设计规范中要求考虑混凝土双轴应力状态下的强度,1978 年修订时明确提出了双轴应力状态下的强度修正系数<sup>[5]</sup>。1979 年,前苏联颁布的《混凝土和钢筋混凝土坝》规范中,规定设计拱坝和重力拱坝时要考虑三向应力状态,萨扬诺舒申斯克拱坝(高 237m)和英古里拱坝(高 272 m)都是按此规定设计的<sup>[6]</sup>。1990 年,欧洲-国际混凝土委员会也将混凝土多轴强度的内容列入了

基金项目: 国家自然科学基金(11132003)  
作者简介: 钱向东(1963—),男,教授,博士,主要从事工程力学、水工结构工程研究。E-mail:xdqian@hhu.edu.cn  
引用本文: 钱向东,李旭展.混凝土拱坝的多轴强度与安全指标[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):230-237.

QIAN Xiangdong, LI Xuzhan. Multi-axial strength and safety index of concrete arch dams[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2019, 47(3): 230-237.

1990CEB FIP 模式规范<sup>[7]</sup>。

我国从 20 世纪 70 年代后期开始关注混凝土的多轴强度效应,80 年代起开展了一系列的多轴强度试验<sup>[8-13]</sup>,结合东江、二滩、溪洛渡等拱坝,讨论了混凝土多轴强度在拱坝设计中的应用<sup>[14-17]</sup>。2002 年正式将混凝土多轴强度的有关内容列入混凝土结构设计规范<sup>[18]</sup>,2009 年颁布的 DLT 5057—2009《水工混凝土结构设计规范》<sup>[19]</sup>中也列入了相关内容。然而在现行的混凝土重力坝和混凝土拱坝的设计规范<sup>[20-21]</sup>中均没有提及混凝土的多轴强度及其安全指标。

目前我国混凝土大坝强度设计采用的容许应力法及其安全系数是基于单轴强度准则(最大拉应力准则或最大压应力准则)提出的。针对多轴强度准则,钱向东等<sup>[22-24]</sup>讨论了传统安全系数、等比超载系数和强度折减系数的定义和适用范围;定义了一种基于失效距离的多轴强度安全系数,适用于任意形式的强度准则;将等比超载系数和失效距离系数作为多轴强度安全系数应用于混凝土重力坝的二轴强度分析,发现无论在二轴拉压区还是二轴压压区,混凝土重力坝的多轴强度安全系数与单轴强度安全系数具有显著的差异,在强度设计与安全评价中应采用多轴强度安全系数。本文在文献[25]中给出的混凝土多轴强度计算方法的基础上,提出了用多轴强度准则结合等比超载系数计算多轴强度的通用方法;进一步根据等比超载系数和失效距离系数的定义,结合混凝土拱坝算例的多轴强度分析,探讨并建议混凝土拱坝的多轴强度设计指标。

1 混凝土多轴强度与拱坝容许应力

在最新修订的 SL 282—2018《混凝土拱坝设计规范》<sup>[20]</sup>中,拱坝的强度设计继续采用容许应力法,即要求坝体的主应力不超过混凝土的容许应力。其中容许压应力为混凝土抗压强度除以安全系数,而容许拉应力则根据应力分析方法给出具体的数值(事实上也可表示为抗拉强度除以安全系数)。显然,采用的混凝土抗拉或抗压强度均没有考虑坝体的应力状态和多轴强度效应。

如果参照文献[18-19,25],容许应力设计准则可以表示为

$$|\sigma_i| \leq [\sigma_i] \quad (i = 1, 2, 3) \tag{1}$$

式中: $\sigma_i$ ——任一点的第  $i$  个主应力; $[\sigma_i]$ —— $\sigma_i$  的容许值(容许应力),由与  $\sigma_i$  对应的混凝土多轴强度  $f_i$  除以设计安全系数确定。

$f_i$  可基于 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》<sup>[26]</sup>提供的图表,根据各点的应力状态(二轴受压 C-C、二轴拉压 T-C、三轴受压 C-C-C、三轴拉压 T-C-C 或 T-T-C 等)以及应力比值,进行近似推算得到。一般以单轴抗拉强度  $f_t$  或单轴抗压强度  $f_c$ (可根据混凝土标号等级取值)的倍数给出。 $f_i$  也可以按照混凝土的多轴强度准则进行计算确定。过镇海<sup>[25]</sup>针对建议的五参数幂函数型强度准则,给出了相应的迭代计算方法。目前,关于混凝土的强度准则,提出的三参数、四参数、五参数等系列强度准则已有几十种。不失一般性,强度准则可表示为

$$F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0 \tag{2}$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——3 个主应力( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ),以拉为正、压为负。

已知一点的主应力为( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ),则相应的多轴强度( $f_1, f_2, f_3$ ) 为

$$f_1 = xR_1f_c \quad f_2 = xR_2f_c \quad f_3 = xf_c \tag{3}$$

其中

$$R_1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \quad R_2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_3}$$

式中: $R_1, R_2$ ——应力比; $x$ ——待求量,可由式(3)代入式(2)解出。

2 拱坝多轴强度等比超载系数

在第 1 节的混凝土多轴强度计算中,如果令  $K_{OL} = \frac{f_3}{\sigma_3} = \frac{xf_c}{\sigma_3}$ ,则强度准则可改写为

$$F(K_{OL}\sigma_1, K_{OL}\sigma_2, K_{OL}\sigma_3) = 0 \tag{4}$$

$K_{OL}$ 实际上为文献[22]定义的多轴强度等比超载系数,其几何意义为:将 3 个主应力保持各比例不变,同时扩大  $K_{OL}$  倍后正好满足强度准则(强度极限方程),即应力组合( $K_{OL}\sigma_1, K_{OL}\sigma_2, K_{OL}\sigma_3$ )正好落在强度极限面上。因此,对于选定的混凝土多轴强度准则,根据坝体各点的应力状态,计算出相应的等比超载系数  $K_{OL}$ ,

就可以方便地计算多轴强度:

$$f_1 = K_{OL}\sigma_1 \quad f_2 = K_{OL}\sigma_2 \quad f_3 = K_{OL}\sigma_3 \tag{5}$$

现以某混凝土拱坝为例,计算多轴等比超载安全系数。大坝为混凝土双曲拱坝,坝底高程 332 m,坝顶高程 610 m,最大坝高 278 m,拱冠顶厚 14 m,拱冠底厚 69 m,拱端最大厚度 75.7 m,有限元分析的网格如图 1 所示。坝体混凝土等级为 C35,单轴抗压强度  $f_c=35$  MPa。采用均匀地基模型,混凝土和基岩的物理参数见表 1。

表 1 混凝土和基岩的物理参数

Table 1 Parameters of concrete and bed rock

| 材料    | 弹性模量/<br>10 <sup>4</sup> MPa | 泊松比   | 密度/<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) | 热膨胀系数/<br>℃ <sup>-1</sup> |
|-------|------------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|
| 坝体混凝土 | 2.10                         | 0.167 | 2400                           | 10 <sup>-5</sup>          |
| 基岩    | 2.85                         | 0.2   | 2300                           |                           |

荷载工况:自重+上游坝面水压力+上游坝面泥沙压力+下游坝面水压力+温降。上游正常蓄水位 600 m,下游最低尾水位 379 m,水库淤泥高程 490 m,淤泥浮密度 0.5 t/m<sup>3</sup>,淤泥内摩擦角 0°。

由图 2~4 可见,上游面的大部分区域处于三向受压状态,有利于混凝土抗压能力的发挥,但在建基面附近的区域存在三向拉压压状态;下游面的大部分区域处于二向拉压状态(第二主应力的精确值为 0),且在建基面附近的区域存在三向拉拉压状态,处于不利的应力状态。

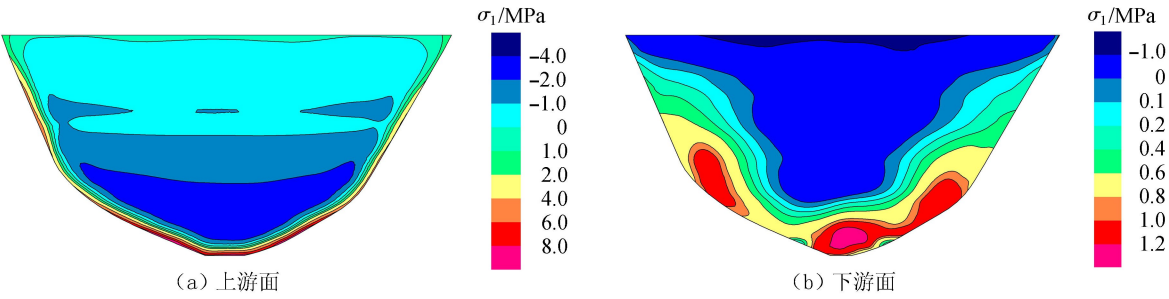


图 2 拱坝第一主应力  $\sigma_1$   
Fig. 2  $\sigma_1$  of the arch dam

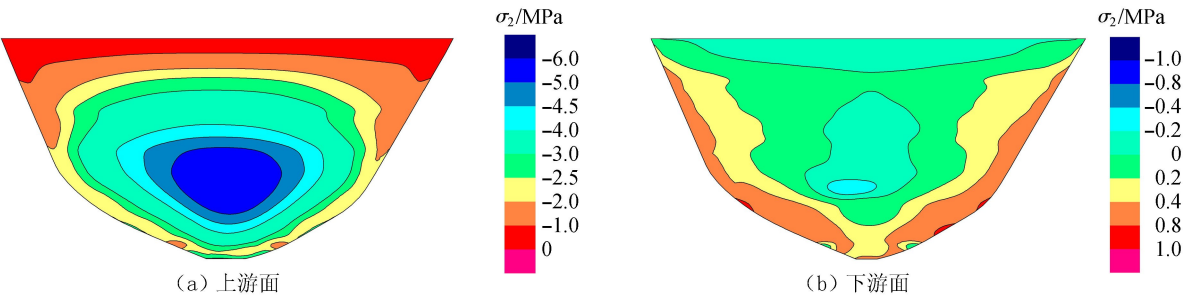


图 3 拱坝第二主应力  $\sigma_2$   
Fig. 3  $\sigma_2$  of the arch dam

多轴强度计算时,选用由江见鲸等<sup>[27]</sup>改进的 Ottosen 混凝土四参数强度准则:

$$F = a \frac{J_2}{f_c^2} + (b + c \cos \theta) \frac{\sqrt{J_2}}{f_c} + d \frac{I_1}{f_c} - 1 = 0 \tag{6}$$

式中: $I_1$ ——应力张量第一不变量; $J_2$ ——应力偏量第二不变量; $\theta$ ——Lode 角; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ ——参数。

参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  由  $f_t$ 、 $f_c$ 、等压二轴抗压强度  $f_{bc}$  ( $f_{bc} = 1.2f_c$ ) 和一组三轴拉压强度 (如  $\theta = 60^\circ$ ,  $\xi/f_c = -5.0$ ,  $\rho/f_c = 4.0$ , 其中  $\xi = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$ ,  $\rho = \sqrt{2J_2}$ ) 来确定。当  $f_t/f_c = 0.1$  时,  $a = 1.2856$ 、 $b = 1.4268$ 、 $c = 10.2551$ 、 $d = 3.2128$ 。

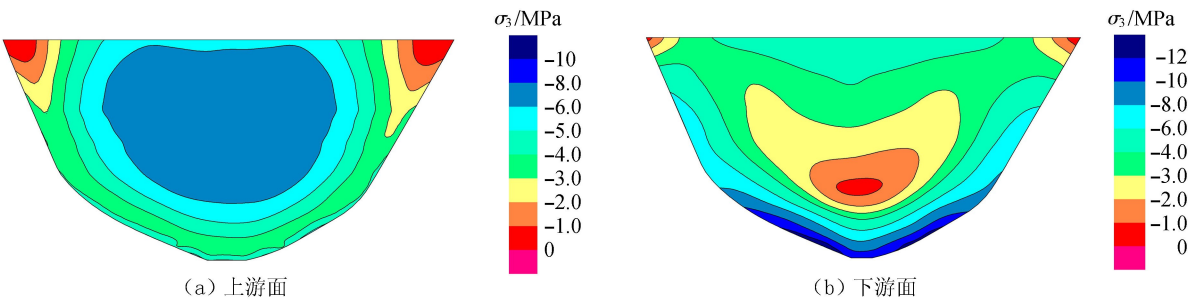


图 4 拱坝第三主应力  $\sigma_3$   
Fig. 4  $\sigma_3$  of the arch dam

等比超载系数  $K_{OL}$  的计算公式为

$$AK_{OL}^2 + BK_{OL} - 1 = 0 \tag{7}$$

其中

$$A = a \frac{J_2}{f_c^2} \quad B = (b + c \cos \theta) \frac{\sqrt{J_2}}{f_c} + d \frac{I_1}{f_c}$$

图 5 给出了坝体上、下游面的等比超载系数。为了便于比较,图 6 给出了单轴强度安全系数  $K_u$  的分布,  $K_u$  由式(8)计算得到。

$$K_u = \begin{cases} \left| \frac{f_c}{\sigma_3} \right| & \sigma_1 < 0 \\ \left| \frac{f_t}{\sigma_1} \right| & \sigma_3 > 0 \\ \min \left( \left| \frac{f_t}{\sigma_1} \right|, \left| \frac{f_c}{\sigma_3} \right| \right) & \sigma_1 > 0 > \sigma_3 \end{cases} \tag{8}$$

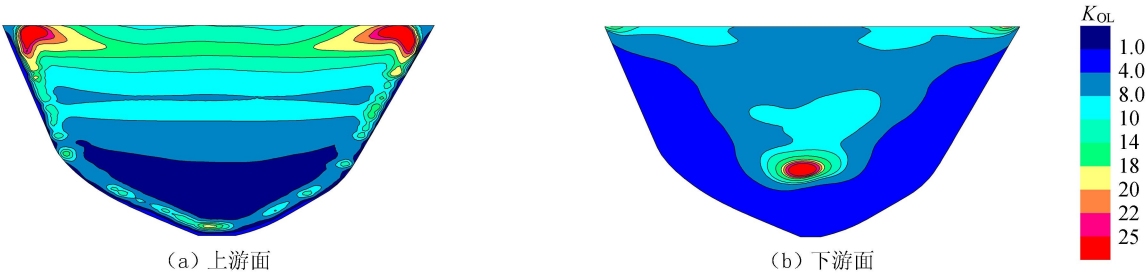


图 5 拱坝多轴强度等比超载系数  $K_{OL}$   
Fig. 5  $K_{OL}$  of the arch dam

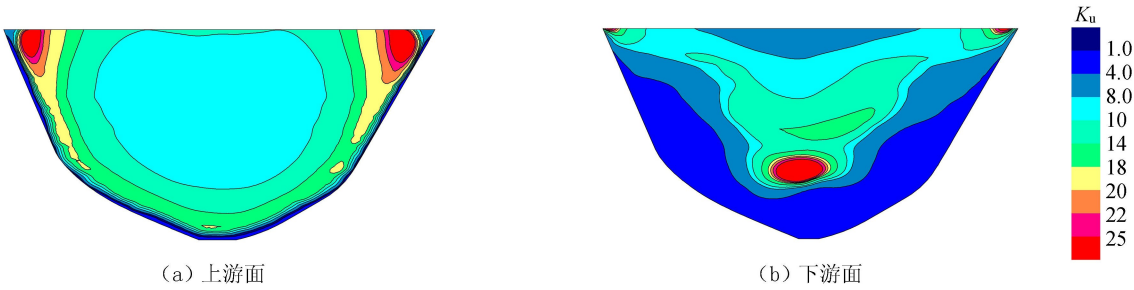


图 6 拱坝单轴强度安全系数  $K_u$   
Fig. 6  $K_u$  of the arch dam

上游面绝大部分区域的单轴强度安全系数  $K_u$  的数值在 4.0 ~ 15.0, 大部分区域  $K_{OL}$  的数值在 1.0 ~ 8.0, 而中上部三向受压区域的  $K_{OL}$  普遍大于  $K_u$ ; 无论是  $K_{OL}$  还是  $K_u$ , 上游面在建基面附近均存在局部的小于 1.0 的区域, 表明拱坝上游建基面可能会发生局部破坏; 下游面二向拉压区的  $K_{OL}$  普遍小于  $K_u$ , 建基面以上一定范围的三向拉拉压区域  $K_{OL}$  和  $K_u$  分布基本一致, 数值为 1.0 ~ 4.0。从安全系数的分布来看, 如果不考



考虑多轴强度效应,则可能低估上游面的安全度,同时也可能高估了下游面的安全度。比较图7所示建基面上强度安全系数的分布,如果不考虑多轴强度效应,也可能高估了强度安全度。

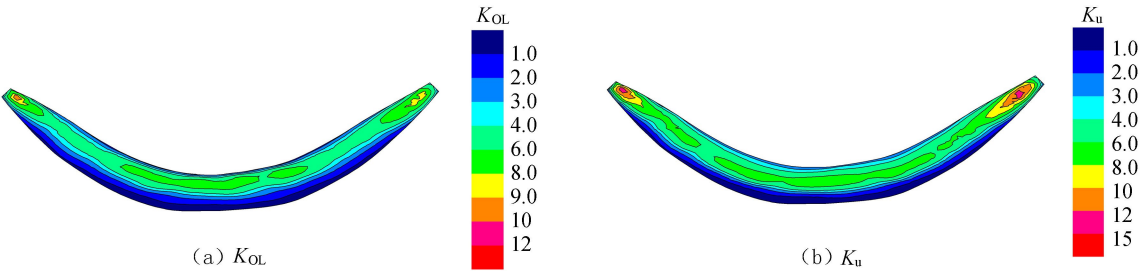


图7 建基面的强度安全系数

Fig.7 Strength safety factor of the foundation surface

3 拱坝多轴强度失效距离系数

文献[23]定义了一种适合于任何多参数强度准则和应力状态的失效距离系数:

$$K_{FD} = \frac{\|\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_m\| - \text{sign}(F) \|\boldsymbol{\sigma}^* - \boldsymbol{\sigma}\|}{\|\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_m\|}$$

(9)

其中

$$\|\boldsymbol{\sigma}^* - \boldsymbol{\sigma}\| = \sqrt{(\sigma_1^* - \sigma_1)^2 + (\sigma_2^* - \sigma_2)^2 + (\sigma_3^* - \sigma_3)^2}$$
$$\|\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma}_m\| = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_m)^2 + (\sigma_2 - \sigma_m)^2 + (\sigma_3 - \sigma_m)^2}$$
$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

式中: $\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)^T$ ——计算点的主应力矢量; $\boldsymbol{\sigma}_m=(\sigma_m,\sigma_m,\sigma_m)^T$ ——平均应力矢量; $\text{sign}(F)$ ——强度破坏函数 $F(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)$ 的正负号; $\boldsymbol{\sigma}^*=(\sigma_1^*,\sigma_2^*,\sigma_3^*)^T$ ——强度破坏面上与 $\boldsymbol{\sigma}=(\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3)^T$ 距离最短的点,可按文献[23]确定。

计算得到的拱坝上下游面的失效距离系数如图8所示。上游面绝大部分区域的失效距离系数 $K_{FD}$ 在1.0~6.0之间,在建基面附近均存在局部的小于1.0的区域,是可能会发生局部破坏的区域;下游面二向拉压区的 $K_{FD}$ 在2.0~3.0之间,建基面以上三向拉拉压区域的 $K_{FD}$ 与 $K_u$ 的分布基本一样,数值在1.0~2.0之间。

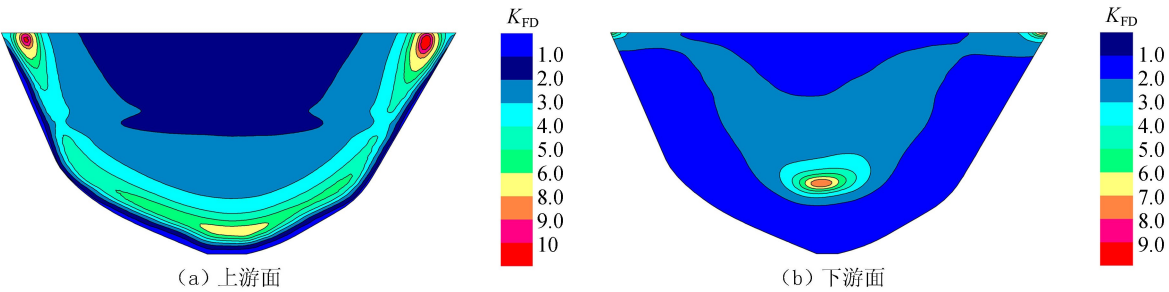


图8 拱坝多轴强度失效距离系数 $K_{FD}$

Fig.8  $K_{FD}$  of the arch dam

4 拱坝多轴强度安全指标的选择

根据定义, $K_{OL}$ 和 $K_{FD}$ 都是能够反映材料多轴强度效应的强度安全指标。 $K_{FD}$ 采用设计应力状态至强度极限面的最短距离来反映安全度,而 $K_{OL}$ 要求各应力分量保持同一比例,即采用设计应力状态沿设计应力矢量方向至强度极限面的距离来反映安全度,显然, $K_{FD}$ 作为强度安全指标是偏于安全的。另外,为了保证结构具有足够的安全储备以应对包括荷载、材料性能、分析模型等方面的不确定性,安全系数的计算应尽可能反映最不利的情况。事实上,条件变化时,结构的应力状态也不可能保持设计状态时的比例变化。因此, $K_{FD}$ 更适合作为多轴强度安全指标。从算例的安全系数分布来看(比较图5和图8), $K_{FD}$ 的分布相对比较均衡、

平稳,除建基面附近和坝体顶部拱端附近外,没有大的高梯度区,便于制定设计标准。

为了进一步分析  $K_{FD}$  作为多轴强度安全指标的可行性,本文给出了拱冠梁和建基面上  $K_{FD}$  的分布,如图 9 所示。建基面上  $K_{FD}$  小于 1.0 的区域不超过坝厚的 1/5,拱冠梁只有坝踵局部存在  $K_{FD}$  小于 1.0,都属于正常。表 2 和表 3 列出了各高程上下游拱端点的主应力和安全系数。各拱端上游点  $K_{FD}$ 、 $K_{OL}$  和  $K_u$  的数值非常接近;各拱端下游点  $K_{FD}$  均小于相同部位的  $K_{OL}$  和  $K_u$ ,  $K_{FD}$  最大、最小值的位置与  $K_{OL}$  和  $K_u$  略有不同,但也比较靠近。因此,将  $K_{FD}$  作为拱坝多轴强度安全设计和校核的指标是可行的。

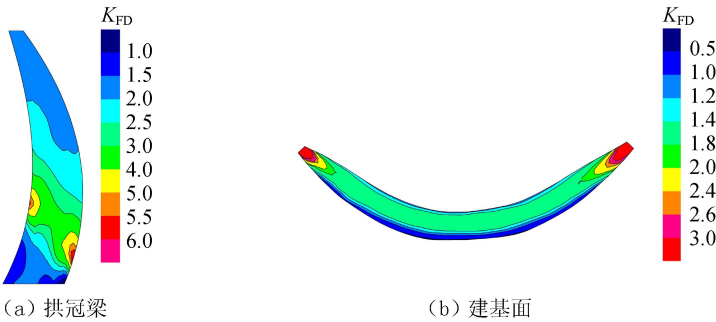


图 9 拱冠梁和建基面上  $K_{FD}$  的分布

Fig. 9 Distribution of  $K_{FD}$  on the crown beam and the foundation surface

表 2 拱坝上游面强度安全系数

Table 2 Strength safety factor of the upstream surface

| 高程/<br>m | 左拱端主应力/MPa |            |            | 左拱端安全系数  |       |          | 右拱端主应力/MPa |            |            | 右拱端安全系数  |       |          |
|----------|------------|------------|------------|----------|-------|----------|------------|------------|------------|----------|-------|----------|
|          | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $K_{FD}$ | $K_u$ | $K_{OL}$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $K_{FD}$ | $K_u$ | $K_{OL}$ |
| 610      | 2.38       | -0.12      | -0.31      | 1.51     | 1.57  | 1.46     | 1.73       | 0.05       | -0.24      | 2.17     | 2.20  | 2.02     |
| 590      | 1.76       | -0.30      | -1.07      | 1.82     | 1.99  | 1.95     | 1.35       | -0.33      | -0.88      | 2.29     | 2.59  | 2.53     |
| 560      | 2.91       | -1.06      | -2.47      | 1.12     | 1.20  | 1.17     | 1.48       | -1.09      | -1.93      | 1.78     | 2.36  | 2.25     |
| 520      | 4.44       | -1.91      | -3.77      | 0.83     | 0.79  | 0.76     | 3.12       | -1.92      | -3.36      | 1.05     | 1.12  | 1.08     |
| 480      | 5.82       | -2.20      | -4.38      | 0.67     | 0.60  | 0.59     | 4.53       | -2.09      | -3.92      | 0.82     | 0.77  | 0.75     |
| 440      | 3.93       | -2.52      | -4.31      | 0.90     | 0.89  | 0.85     | 5.58       | -2.67      | -4.72      | 0.71     | 0.63  | 0.61     |
| 400      | 5.33       | -2.64      | -4.77      | 0.73     | 0.66  | 0.64     | 5.30       | -2.66      | -4.64      | 0.73     | 0.66  | 0.64     |
| 370      | 8.09       | -2.84      | -5.13      | 0.52     | 0.43  | 0.42     | 8.49       | -2.83      | -5.32      | 0.50     | 0.41  | 0.40     |
| 350      | 11.11      | -1.14      | -3.68      | 0.31     | 0.32  | 0.31     | 10.36      | -1.37      | -3.70      | 0.34     | 0.34  | 0.33     |
| 332      | 7.56       | -2.97      | -4.63      | 0.55     | 0.46  | 0.45     | 9.40       | -3.19      | -4.88      | 0.45     | 0.37  | 0.37     |

表 3 拱坝下游面强度安全系数

Table 3 Strength safety factor of the downstream surface

| 高程/<br>m | 左拱端主应力/MPa |            |            | 左拱端安全系数  |       |          | 右拱端主应力/MPa |            |            | 右拱端安全系数  |       |          |
|----------|------------|------------|------------|----------|-------|----------|------------|------------|------------|----------|-------|----------|
|          | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $K_{FD}$ | $K_u$ | $K_{OL}$ | $\sigma_1$ | $\sigma_2$ | $\sigma_3$ | $K_{FD}$ | $K_u$ | $K_{OL}$ |
| 610      | 0.60       | 0.08       | -0.50      | 4.71     | 5.83  | 5.63     | 0.93       | 0.17       | -0.30      | 3.92     | 3.76  | 3.72     |
| 590      | 0.53       | 0.29       | -2.70      | 2.12     | 6.60  | 4.75     | 0.51       | 0.31       | -1.97      | 2.49     | 6.86  | 5.32     |
| 560      | 0.95       | 0.59       | -4.88      | 1.49     | 3.68  | 2.63     | 0.87       | 0.63       | -3.79      | 1.65     | 4.02  | 3.00     |
| 520      | 1.06       | 0.61       | -6.52      | 1.34     | 3.30  | 2.22     | 0.90       | 0.64       | -6.10      | 1.40     | 3.89  | 2.51     |
| 480      | 1.43       | 0.72       | -6.91      | 1.25     | 2.45  | 1.79     | 1.15       | 0.76       | -6.98      | 1.29     | 3.04  | 2.05     |
| 440      | 1.32       | 0.73       | -6.90      | 1.27     | 2.65  | 1.89     | 1.26       | 0.78       | -8.06      | 1.23     | 2.78  | 1.84     |
| 400      | 1.66       | 0.99       | -9.61      | 1.13     | 2.11  | 1.45     | 1.64       | 0.99       | -9.07      | 1.14     | 2.13  | 1.49     |
| 370      | 1.42       | 0.80       | -11.94     | 1.11     | 2.46  | 1.46     | 1.66       | 0.93       | -12.15     | 1.08     | 2.11  | 1.33     |
| 350      | 0.53       | -0.19      | -13.88     | 1.17     | 2.52  | 1.98     | 0.74       | -0.17      | -12.87     | 1.17     | 2.72  | 1.90     |
| 332      | 1.32       | 0.27       | -10.79     | 1.15     | 2.65  | 1.62     | 1.28       | 0.52       | -11.43     | 1.14     | 2.73  | 1.59     |

5 结 语

基本荷载(温降)组合下,拱坝坝体上游面的大部分区域处于三向受压状态,而在建基面附近的区域存在三向拉压压状态;下游面的大部分区域处于二向拉压状态,且在建基面附近的区域存在三向拉拉压状态。因此,在拱坝的强度设计时应该考虑混凝土的多轴强度效应,否则,可能低估上游面的大部分区域的强度安

全储备,同时也可能高估坝体下游面的强度安全储备,不利于大坝的整体强度安全评价。

混凝土的多轴强度可以根据多参数强度准则,求解等比超载系数  $K_{OL}$  来计算,但在实际的设计计算中,由于各点的应力状态各不相同,难于也无需计算多轴强度值。当采用容许应力法设计时,可直接将各点的等比超载系数  $K_{OL}$  作为强度安全系数进行设计和校核。

根据等比超载系数  $K_{OL}$  和失效距离系数  $K_{FD}$  的定义,以及本文算例的分析,将  $K_{FD}$  作为拱坝多轴强度安全设计和校核的指标是偏于安全且可行的。

建议针对已建拱坝,选择具有代表性的坝体,开展进一步的分析研究,结合我国现行混凝土拱坝设计规范,提出科学合理的强度设计控制标准。

## 参考文献:

- [1] MOHAMMADI M, WU Yufei. Triaxial test for concrete under non-uniform passive confinement[J]. Construction and Building Materials, 2017, 138:455-468.
- [2] RONG Chong, SHI Qingxuan, ZHANG Ting, et al. New failure criterion models for concrete under multiaxial stress in compression [J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 432-441.
- [3] WANG Huailing, SONG Yupu. Behavior of mass concrete under biaxial compression-tension and triaxial compression-compression-tension[J]. Materials and Structures, 2009,42:241-249.
- [4] 俞茂宏,赵坚,关令苇. 岩石、混凝土强度理论:历史、现况、发展[J]. 自然科学进展,1997,7(6):653-660. (YU Maohong, ZHAO Jian, GUAN Lingwei. Strength theory of rock and concrete: history, present situation, development[J]. Advances in Natural Science, 1997,7(6):653-660. (in Chinese))
- [5] 日本大坝委员会. 坝工设计规范(第二次修订版)[M]. 钱志春,译. 北京:水利出版社,1981.
- [6] 索科洛夫 И В,罗崇贤. 设计混凝土和钢筋混凝土坝的新规范[J]. 人民长江,1978,9(2):74-75. (SOCOLOVE И В, LUO Chongxian. New code for design of concrete and reinforced concrete dams[J]. Yangtze River, 1978,9(2):74-75. (in Chinese))
- [7] 过镇海. 1990CEB-FIP 模式规范(砼结构)有关内容介绍(一):砼的多轴强度和本构关系(I)[J]. 建筑结构,1995(8):49-56. (GUO Zhenhai. Introduction of 1990CEF-FIP mode code:multiaxial strength and constitutive relation of concrete[J]. Building Structure, 1995(8):49-56. (in Chinese))
- [8] 金学龙,陈新华. 混凝土在三轴压力下的强度、变形和破坏准则[J]. 水利学报,1982,13(6):51-56. (JIN Xuelong, CHEN Xinhua. Strength, deformation and failure criteria of concrete under triaxial compression [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1982,13(6):51-56. (in Chinese))
- [9] 于晓中,居襄. 混凝土的强度和破坏[J]. 水利学报,1983,14(2):22-36. (YU Yaozhong, JU Xiang. The strength and failure of concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983,14(2):22-36. (in Chinese))
- [10] 王传志,过镇海,张秀琴. 二轴和三轴高压混凝土的强度试验[J]. 土木工程学报,1987,20(1):15-27. (WANG Chuangzhi, GUO Zhenhai, ZHANG Xiuqin. Experimental investigation of concrete strength under biaxial and triaxial compressive stresses [J]. China Civil Engineering Journal, 1987,20(1):15-27. (in Chinese))
- [11] 李建林,金学龙,赵佩钰. 双轴拉压应力作用下混凝土强度的试验研究[J]. 水力发电学报,1989,25(2):36-50. (LI Jianlin, JIN Xuelong, ZHAO Peiyu. An experimental study on concrete hollow cylinder under biaxial compressive and tensile stresses[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,1989,25(2):36-50. (in Chinese))
- [12] 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,1990,21(3):59-65. (JANG Linhua, XIE Nianxiang, LIN Yumei. Experiment research on the characteristic of concrete under tension-compression biaxial loading [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990,21(3):59-65. (in Chinese))
- [13] 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,1991,22(8):51-56. (LI Weizheng, GUO Zhenhai. Experiment research on strength and deformation of concrete under biaxial tension-compression stress [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991,22(8):51-56. (in Chinese))
- [14] 于晓中,曹建国,郭桂兰. 混凝土的二轴强度及其在拱坝设计中的应用[C]//水利水电科学研究院. 水利水电科学研究院科学论文文集(第19集). 北京:水利电力出版社,1984:17-23.
- [15] 李嘉进,陈志勋. 多轴受力下混凝土强度和变形的试验研究[J]. 水电站设计,1991(4):45-52. (LI Jiajing, CHEN Zhixun. Exeprimental research of concrete strength and deformation under polyaxial force-bearing[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1991(4):45-52. (in Chinese))

[16] 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 Muqiu. Biaxial compression and biaxial tension-compression strength of concrete and its application in arch dam design[J]. Yangtze River, 1992,23 (6):35-39. (in Chinese)).

[17] 钟贻辉,冉璟,秦勇. 溪洛渡大坝混凝土二维应力状态下破坏准则与本构关系试验研究[J]. 水电站设计, 2015 (2):64-68. (ZHONG Yihui, RAN Jing, QIN Yong. Experimental study on failure criterion and constitutive relationship of concrete under Biaxial stress state for Xiluodu dam[J]. Design of Hydroelectric Power Station , 2015 (2):64-68. ( in Chinese))

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2002 [S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2002.

[19] 中华人民共和国国家能源局. 水工混凝土结构设计规范:DL/T 5057—2009[S]. 北京:中国电力出版社, 2009.

[20] 中华人民共和国水利部. 混凝土拱坝设计规范:SL 282—2018[S]. 北京:中国水利水电出版社, 2018.

[21] 电力行业水电规划设计标准化技术委员会. 混凝土拱坝设计规范:DLT 5346—2006[S]. 北京:中国电力出版社, 2006.

[22] 钱向东,焦彩虹. 基于多参数强度准则的安全系数定义问题[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):34-37. (QIAN Xiangdong, JIAO Caihong. On the definitions of factor of safety based on multi-parameter strength criterion[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007,27(4):34-37. (in Chinese))

[23] 钱向东,姜弘道. 多轴强度安全系数的定义及应用[J]. 建筑科学与工程学报,2008,25(1):38-42. (QIAN Xiangdong, JIANG Hongdao. Definition and application of safety factor for multi-axial strength[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008,25(1):38-42. (in Chinese))

[24] 钱向东,何晓萍,焦彩虹,等. 混凝土的多轴强度安全系数及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2015, 43(02): 121-126. (QIAN Xiangdong, HE Xiaoping, JIAO Caihong, ZHOU Jing. Safety factor for multi-axial strength of concrete and its application[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(2):121-126. (in Chinese))

[25] 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.

[26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.

[27] 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, 2005.

(收稿日期:2019-05-08 编辑:刘晓艳)

· 简讯 ·

## 河海大学举办 2019 年泛在电力物联网论坛 暨常州市第十一届学术活动月开幕式

2019 年 5 月 17 日,2019 年泛在电力物联网论坛暨常州市第十一届学术活动月开幕式在河海大学举行。河海大学党委副书记郭继超、原副校长鞠平,常州市科学技术协会党组书记、主席宋平,国网常州供电公司总经理张强等出席活动。河海大学常州校区党委书记、管委会主任范新南主持开幕式。

郭继超副书记在致辞中表示,河海大学正大力推进“双一流”建设,积极服务国家战略需求,本届论坛的举办为河海大学在人工智能、物联网技术等领域全方位服务地方提供崭新的平台,希望通过常州校区和国网常州供电公司战略合作协议的签署,全面推进常州校区与国网常州供电公司等单位的产学研合作,并能早日结出丰硕成果。国网常州供电公司总经理、河海大学杰出校友张强,常州市科学技术协会党组书记、主席宋平分别致辞。

论坛上,河海大学能源与电气学院院长吴峰教授、河海大学物联网工程学院副院长李庆武教授、江苏久创电气科技有限公司董事长兼总经理钱荣分别作“高渗透率新负荷的配电网动态等值”、“智能视觉物联网在电网中的应用研究”、“面向泛在电力物联网的输变配智能监测”等主旨报告,从学术和产业角度共同探讨泛在电力物联网的建设发展,展现河海大学在该领域的前沿学术成果,强化产学研融合,推动技术成果转化。期间还进行了泛在电力物联网技术成果展示、交流与校企对接活动。

(本刊编辑部供稿)