DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2012.03.005

不同破坏准则下防渗墙安全度比较分析

朱俊高1 李 飞1 胡永胜2 吴桂芬3

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京 210098;

2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院,四川成都 610072;3. 中国华电工程(集团) 有限公司,北京 100035)

摘要:为分析和评估土石坝覆盖层中混凝土防渗墙安全度,将混凝土的三维破坏准则引入有限元程 序中,对某砾石土心墙堆石坝进行了有限元分析,定义了防渗墙安全度,并将三维破坏准则的安全 度与单轴破坏准则结果进行了比较,研究不同破坏准则适用于混凝土防渗墙安全度分析的合理性。 结果表明:单轴破坏准则和三维破坏准则得到的防渗墙安全度有较大差异,采用混凝土三维破坏准 则更符合防渗墙所处的应力状态,可更充分发挥混凝土的强度;在工程中可考虑采用三维破坏准则 评价混凝土防渗墙安全度。

关键词 防渗墙 破坏准则 安全度 有限元法 土石坝

中图分类号:TV640.31;TV223.4+2 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2012)03-0019-05

Analysis of safety factor of diaphragm wall with different failure criteria//ZHU Jun-gao¹, LI Fei¹, HU Yong-sheng², WU Gui-fen³(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geo-Mechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrochina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China; 3. China Huadian Engineering Co. Ltd., Beijing 100035, China)

Abstract : In order to accurately estimate the safety of the concrete diaphragm wall of earth rockfill dams, two types of threedimensional (3D) failure criteria for concrete were coded into a finite element program and were used to analyze the safety factor of the diaphragm wall of an earth rockfill dam. In this study, the influence of the different failure criteria on the safety of diaphragm wall were investigated by comparing the values of the safety factors estimated with the 3D failure criteria and the one-dimensional (1D) failure criteria. The results indicate that the value of the safety factor estimated with the 3D failure criteria is quite different from that estimated with the 1D criteria. The 3D criteria were also found to be more suitable for the stress state of the diaphragm wall and could give full play to the strength of concrete. The 3D criteria of concrete were recommended to estimate the safety factor of a concrete diaphragm wall in the engineering applications.

Key words : diaphragm wall ; failure criteria ; safety factor ; finite element method ; earth rockfill dam

混凝土防渗墙具有施工工艺简单、工期短、防渗 效果好等优点,常作为深厚覆盖层上土石坝地基的 垂直防渗体。土石坝填筑、蓄水过程中,混凝土防渗 墙的受力非常复杂,目前一般采用有限元法对其应 力变形进行分析,相关研究也较多^[1-4]。为保证设计 安全,一方面需要对防渗墙应力及破坏与否作出准 确的计算、判断,另一方面,不少学者则从防渗墙材 料选择入手^[5-7],两条路径同等重要。但是,如何依 据有限元分析得到的防渗墙应力对其安全性进行评 价,相关研究较少,按现有设计方法,多直接用防渗 墙大主应力与混凝土抗压强度进行比较或采用所谓 的单轴强度准则进行判定^[8]。卢廷浩等^[1]利用计算 的防渗墙受拉区的拉应力与单轴抗拉强度进行比较 判定防渗墙的安全;邱祖林等^{3]}对某深厚覆盖层上 混凝土防渗墙的应力变形特性进行了三维有限元分 析,并用最大压应力和最大拉应力分别与抗压强度 与抗拉强度进行比较判定防渗墙的安全性。

实际上,混凝土防渗墙处于三维受力状态。防 渗墙上下游方向应力一般较小,可不考虑土体应力 的约束,但另外两个方向的应力是应考虑的,因此, 应考虑双向或三向应力强度。根据已有研究,破坏 时的单向应力的大小与其他方向的应力密切相关, 如混凝土在双向及三向受压时的强度,与其单向抗 压强度相比有显著提高,需考虑充分利用材料的这

基金项目:国家杰出青年科学基金(50825901)水利部公益性行业科研专项(200801133)

作者简介 朱俊高(1964—)男 江苏兴化人 教授 博士 主要从事土体基本特性及本构关系等研究。E-mail :zhujungao@hhu.edu.cn

部分潜在承载能力;而在一些同时存在拉、压应力分量的区域对材料的强度又往往估计过高。三维应力条件下混凝土的破坏准则研究较多^[9-12],但其在水工 混凝土防渗墙上的应用研究并不多。因此,进行混凝 土合理破坏准则的利用研究具有重要的工程意义。

本文采用三维有限元法分析某建造在深厚覆盖 层上的砾石土心墙堆石坝,研究其地基中防渗墙应 力,引入3种不同的混凝土破坏准则,定义了防渗墙 安全度,对混凝土防渗墙的安全度进行了比较和评 价,可为类似工程设计提供参考。

1 混凝土破坏准则及防渗墙安全度

混凝土是工程中广泛使用的一种建筑材料,以 往的混凝土材料力学特性研究多局限于单轴受力状态,其相应的设计方法多依据材料单轴强度准则^{8]}, 某种程度上不能很好地满足在非线性复杂应力状态 下工作的混凝土结构。

混凝土防渗墙单轴强度准则即防渗墙内主应力 大小不能超过混凝土单轴抗压和抗拉强度。本文引 入防渗墙安全度,用来作为混凝土防渗墙破坏与否 的依据。定义安全度 F_s为

$$F_{\rm s} = \frac{|f^*|}{|\sigma|} \tag{1}$$

式中 : σ 为主应力 ; f^* 为单轴抗压或抗拉强度。式 (1)表示当 $F_s \ge 1.0$ 时 ,混凝土单元处于未破坏状 态 ;当 $F_s < 1.0$ 时 ,处于破坏状态。式(1)中 ,主应力 可以是大主应力(压),也可以是小主应力(可能为 拉),因此 ,计算时 ,如果小主应力为拉 ,则同时计算 抗压强度与大主应力比值和抗拉强度与小主应力比 值 ,并取小值作为安全度。

随着混凝土多轴试验研究工作的开展和试验数 据的累积,一些更为复杂和精确的混凝土破坏准则 应运而生且不断有所改善¹¹⁻¹²]。本文在河海大学岩 土工程研究所研制的三维有限元程序(TDAD)基础 上加入规范⁸¹以及大连理工大学¹²¹的两个混凝土 三维破坏准则,并与单轴破坏准则进行比较分析。

GB 50010—2002《混凝土设计规范》建议采用以 八面体应力无量纲表达的幂函数形破坏准则,这里 简称规范准则。该准则可适用于各种试验条件和全 部多轴应力范围,总体计算精度较高,其最终方程为

$$\frac{\tau_{\text{octf}}}{f_{c}^{*}} = 6.9638 \left(\frac{0.09 - \frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_{c}^{*}}}{c - \frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_{c}^{*}}} \right)^{0.9297}$$
(2)

其中
$$c = 12.2445(\cos 1.5\theta)^{1.5} + 7.3319(\sin 1.5\theta)^{2.5}$$

$$\sigma_{\text{oct}} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \qquad (4)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{3\sqrt{2}\tau_{oct}}\right)$$
(5)

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$
(6)

式中 : f_e^* 为单轴抗压强度 ; σ_{oct} 为八面体正应力 ; τ_{oct} 为八面体剪应力 ; τ_{oct} 为对应 σ_{oct} 时 ,该点所能承受 的最大八面体剪应力 ; θ 为偏平面夹角 ; σ_1 , σ_2 , σ_3 分 别为大、中、小主应力。

大连理工大学提出的五参数破坏准则不仅完全 符合混凝土破坏曲面的一般特性,而且能很好地满 足边界条件,考虑了中主应力,适用于多种应力状态,其得出的混凝土在八面体应力空间破坏准则的 数学表达式为

拉子午线

$$\frac{\tau_{\rm off}}{f_{\rm c}^*} = 0.05073 - 0.8816 \frac{\sigma_{\rm oct}}{f_{\rm c}^*} - 0.06426 \left(\frac{\sigma_{\rm oct}}{f_{\rm c}^*}\right)^2$$
(7)

压子午线

$$\frac{\tau_{\text{ocf}}}{f_{c}^{*}} = 0.0688 - 1.072 \frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_{c}^{*}} - 0.0699 \left(\frac{\sigma_{\text{oct}}}{f_{c}^{*}}\right)^{2} (8)$$

强度准则

 $\tau_{\text{octf}} = \tau_{\text{otf}} - (\tau_{\text{otf}} - \tau_{\text{ocf}}) \sin 1.5\theta$ (9) 式中: τ_{otf} 和 τ_{ocf} 分别为拉、压子午线的极限抗剪 强度。

类似单轴破坏准则 ,定义防渗墙三维破坏准则 下的安全度为

$$F_{\rm s} = \frac{\tau_{\rm octf}}{\tau_{\rm oct}} \tag{10}$$

当 $F_s \ge 1.0$ 时,混凝土单元处于未破坏状态;当 $F_s < 1.0$ 时,处于破坏状态。实际应用时,只需根据 某点应力状态,由式(4)和式(5)计算得八面体正应 力 σ_{oet} 及八面体剪应力 τ_{oet} ,然后将 σ_{oet} 代入式(2)或 式(9)计算对应的 σ_{oet} 所能承受的破坏剪应力 τ_{oet} , 从而用实际剪应力与该破坏剪应力由式(10)来判定 该点状态。

2 有限元模型

某砾石土心墙堆石坝最大坝高 123.0 m,坝轴线 长 439.8 m,坝顶宽 10.0 m,最大底宽 448.8 m。坝址 河床覆盖层厚 57~65 m,最大厚度 72.4 m。深厚覆 盖层采用一道厚 1.2 m 的混凝土防渗墙防渗,防渗 墙底嵌入基岩内 1.0 m,防渗墙最大深度 68.0 m,墙 顶与心墙底部灌浆廊道直接相连。廊道周围及心墙

• 20 · 水利水电科技进展 2012 32(3) Tel 1025-83786335 E-mail ;jz@hhu.edu.cn http://kkb.hhu.edu.cn

(3)

底部布置了一层高塑性黏土。

大坝典型横剖面如图 1 所示。三维有限元模型 建立时,沿坝轴线划分了 40 个横剖面,共 11 026 个 结点、11 235 个单元。计算分 14 级荷载对逐级加荷 的施工填筑及蓄水过程进行模拟。



图1 大坝横剖面

坝壳堆石和过渡料、反滤料、心墙以及地基覆盖 层等材料用邓肯-张 *E*-ν 模型^[13]模拟,参数由试验 确定,如表 1 所示。防渗墙、心墙下部的混凝土底板 等混凝土及基岩作为线弹性材料,混凝土弹性模量 *E* = 30 GPa,泊松比 ν = 0.17;基岩 *E* = 1.0 GPa, ν = 0.33。防渗墙混凝土强度等级取 C30,其单轴抗压 强度取 30 MPa,单轴抗拉强度取 – 3 MPa。在混凝土 与覆盖层等土的接触面设置了 Goodman 单元^[13]模 拟接触面,其计算参数见表 2。计算中石料的强度 假定满足非线性的强度公式 $\varphi = \varphi_0 - \Delta \varphi \lg (\sigma_3/p_a)$, 其中 p_a 为大气压力, φ_0 为 $\sigma_3 = p_a$ 时的 φ 值 $\Delta \varphi$ 为 反映 φ 随 σ_3 而降低的一个参数。

表 2 三维有限元计算采用的接触面模型参数

材 料	δ/(°)	c∕kPa	$R_{ m f}$	K_1	n K	"∕(MPa•m ³)
防渗墙与泥皮	10	50	0.86	1400	0.66	9 999
防渗墙、廊道与黏土	16	80	0.76	2 500	0.66	9 999
防渗墙底与残渣	42	0	0.75	3 000	0.38	500

3 计算成果及分析

对所建立的有限元模型进行了三维有限元应力 变形计算,得到大坝及防渗墙的应力、变形。整理得 蓄水后防渗墙上、下游面的大、小主应力等值线如 图 2 和图 3 所示。

由图 2 和图 3 可以看出 防渗墙上游面大、小主 应力基本均为压应力。下游面大主应力分布与上游 面基本一致,但应力值有所减小;尤其小主应力,下 游面局部区域,防渗墙近岸坡段)出现拉应力。

单轴破坏准则下防渗墙安全度等值线如图 4 所 示。由图 4 可以看出,无论是上游面还是下游面,防 渗墙右下部出现了大范围的安全度小于 1 的破坏 区,这主要是由于大主应力较大引起的;另外,防渗 墙左上部靠近岸坡的部分也出现了小面积的破坏 区,这则是由于小主应力出现较大拉应力引起的。 采用单轴破坏准则时防渗墙安全度只与单个主应力 有关,而实际上防渗墙处于三维应力状态,根据计算

表1 三维有限元计算采用的邓肯-张模型参数

材料	$\rho \Lambda \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$R_{ m f}$	Κ	n	G	F	D	$K_{ m ur}$	φ (°)	$\Delta \varphi \land \circ$)	c∕kPa
碎石土心墙	1.97	0.78	400	0.45	0.38	0.08	2.00	600	17	0	30.0
高塑性黏土	1.60	0.86	150	0.20	0.45	0.10	2.00	300	14	0	40.0
反滤料	2.05	0.68	800	0.30	0.35	0.14	3.00	1 000	33	0	0.0
过渡层	2.10	0.70	1 000	0.32	0.36	0.02	3.00	1600	50	10	0.0
次堆石	2.15	0.72	900	0.42	0.32	0.02	4.00	1800	50	11	0.0
主堆石	2.25	0.70	1 200	0.38	0.30	0.03	3.00	2 200	54	11	0.0
覆盖层 ④-2	1.38	0.70	600	0.32	0.32	0.01	2.00	1 000	35	0	20.0
覆盖层 ④-1	1.40	0.75	860	0.28	0.30	0.02	5.00	1 700	38	0	20.0
覆盖层③	1.42	0.65	1 000	0.38	0.32	0.02	4.00	2 000	39	0	0.0
覆盖层②	1.30	0.62	750	0.44	0.34	0.02	4.00	1500	35	0	0.0
覆盖层 ①	1.33	0.60	1 0 5 0	0.40	0.33	0.03	5.00	1 900	38	0	0.0





(b) 下游面

图 2 蓄水后防渗墙大主应力等值线 单位 :MPa)



图 3 蓄水后防渗墙小主应力等值线 单位 :MPa)





图 4 防渗墙单轴破坏准则安全度等值线

得到的主应力可知大部分混凝土单元处于多轴压缩 状态 因此 ,混凝土实际强度较单轴抗压强度有所提 高 ,所以一般情况下采用单轴准则判断偏于安全 ,但 是对于拉压区 ,单轴破坏准则的判定结果可能偏于 危险 ,后面和三维破坏准则比较后更能说明这一点。 图 5 和图 6 分别给出了规范准则和大连理工大 学三维破坏准则判定的防渗墙安全度等值线。由图 5、图 6 可以看出,两个破坏准则得到的安全度等值 线分布规律有一定的相近或相似,两个破坏准则判 定的受压区未破坏范围基本一致,但总体上安全度大



图 6 大连理工大学三维破坏准则安全度等值线

小差异显著。尤其对拉压破坏区的判定,规范准则的 破坏区明显比大连理工大学准则判定的破坏区小。

和单轴破坏准则得到的安全度相比,两个三维 破坏准则的结果都与其差异较大。对防渗墙的右下 部位,单轴破坏准则判定的破坏区较大,而三维破坏 准则结果显示防渗墙上游侧几乎没有破坏区,仅在 下游面靠近右下岸坡的局部区域出现破坏。与此相 反,对处于拉-压区的防渗墙混凝土(右上部靠近岸 坡区域),单轴破坏准则判定的破坏区范围较小,因 而偏危险。

综上所述,两种三维破坏准则总体上还是比较 接近,但和单轴准则相比,安全度差异较大。理论 上,三维准则更准确,对防渗墙破坏宜用三维破坏准 则进行判定。

本文建议的安全度(式(1),式(10)),可以比较 清晰地展示不同部位混凝土的安全程度,可方便地 用于工程设计。

当然,由于有限元方法计算土体中混凝土结构 时,会引起应力集中,加之土体及接触面的本构模 型、模型参数的确定等都不很完善,导致得到的混凝 土防渗墙的应力精度有限,甚至有时可能误差较大。 因此,混凝土破坏准则需要研究,同时,应力的计算 精度也更需要提高。

4 结 语

本文在对某砾石土心墙堆石坝及覆盖层防渗墙 进行三维有限元分析的基础上,引入混凝土单轴及 三维破坏准则,定义防渗墙安全度,对比分析了单轴 和三维破坏准则下混凝土防渗墙的安全度。结果表 明,以往防渗墙安全度判别常用的单轴破坏准则与 防渗墙所处的复杂应力状态不符,在某些情况下对 防渗墙破坏的可能性估计有较大偏差。混凝土三维 破坏准则更全面地考虑了防渗墙所处的受力状态, 对受力较复杂的混凝土防渗墙宜采用三维破坏准 则,从而可更合理评判混凝土防渗墙的安全度。

参考文献:

- [1]卢廷浩 汪荣大.瀑布沟土石坝防渗墙应力变形分析 [J].河海大学学报,1998 20(6):41-44.
- [2]王瑞骏,李炎隆,韩艳丽.均质土坝基础混凝土防渗墙 应力变形特性研究[J].西北农林科技大学学报:自然 科学版 2010 38(9) 222-228.
- [3]邱祖林 陈杰.深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形 特性[J].水文地质工程地质 2006(3).72-76.
- [4] 郦能惠,米占宽,孙大伟.深覆盖层上面板堆石坝防渗 墙应力变形性状影响因素的研究[J].岩土工程学报, 2007 29(1)26-31.

- [5]田景元,王平.毛尔盖心墙堆石坝防渗墙与坝体防渗体 连接形式J].水利水电科技进展 2010 30(4)41-45.
- [6] 燕乔,王立彬.混凝土防渗墙墙体材料发展探讨[J].水 利水电科技进展 2009 29(增刊1):174-177.
- [7]姚汝方.高土石坝防渗墙混凝土性能试验J].水利水电 科技进展 2009 29(4):44-46.
- [8]GB50010—2002 混凝土设计规范 S].
- [9] 王万祯. 轻骨料混凝土破坏准则[J]. 甘肃科学学报, 2008 20(1):119-121.
- [10]丁发兴,余志武.基于损伤泊松比的混凝土多轴强度准则[J].固体力学学报 2007 28(1):13-19.
- [11]过镇海.混凝土的强度和本构关系:原理与应用[M].北 京:中国建筑工业出版社 2004.
- [12] 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.
- [13] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2版.北京:中国 水利水电出版社,1996.

(收稿日期 2011-10-17 编辑:熊水斌)

(上接第13页)

- [3]黄本胜,陈秋月,邱静,等.有水葫芦的河道水力特性试验研究[C]//第20届全国水动力学研讨会文集.北京: 海洋出版社 2007 439-444.
- [4]徐红辉.水葫芦灾害引起的生态水力学问题及其研究 [D].南京:河海大学 2008.
- [5]朱红钧.凤眼莲生态型河道水流特性试验研究[D].南 京 河海大学 2007.
- [6]黄本胜,袁梦,邱秀云.有水葫芦河道水流数值模拟[J]. 广东水利水电 2008(8):1-3.
- [7] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用 [M].北京:清华大学出版社 2004 83-85.
- [8]陶文铨.数值传热学[M].2版.西安:西安交通大学出版 社 2001 347-348.
- [9] 赵振兴,何建京.水力学[M].2版.北京:清华大学出版 社 2010 87-88.

(收稿日期 2011-11-24 编辑:骆超)

