

基岩断层错动对心墙堆石坝的影响研究

陈五一¹, 施维成²

(1. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 用三维有限元法模拟木格措水电站心墙堆石坝坝址处基岩中的断层错动, 分析断层错动对坝体尤其是坝体的防渗系统(包括土质心墙和混凝土防渗墙)的影响。计算模拟中, 假定断层错动 50 cm, 错动方向可以是竖直方向, 也可以是水平方向。同时, 将断层错动情况下的坝体应力变形性状与断层没有错动的情况进行对比分析。计算结果表明: 坝基 70 m 厚的覆盖层有明显的缓冲作用, 可减轻断层错动变形向坝体的传递。断层错动后, 土质心墙的应力水平略有提高, 但大多提高 0.4~0.6 MPa。断层错动 50 cm 对坝体包括坝壳和土质心墙本身不构成威胁, 但将导致断层附近的混凝土防渗墙局部破坏。因此, 防渗系统是否失效还需进行相关的渗流及渗透变形研究。

关键词: 水利工程; 心墙; 堆石坝; 错动; 断层; 有限元法

中图分类号: TV 641.4

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)03 - 0578 - 06

STUDY ON INFLUENCE OF FAULT DISLOCATION ON A CORE ROCKFILL DAM

CHEN Wu-yi¹, SHI Wei-cheng²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Three-dimensional finite element method is used to simulate the dislocation of a fault beneath the core wall of a rockfill dam; and the influence of the dislocation upon the core rockfill dam, especially upon the seepage prevention system(including clay core wall and concrete cut-off wall) is investigated. It is supposed that the maximum dislocation is 50 cm, and the dislocation direction is vertical or horizontal. Furthermore, the stress-deformation behavior of dam with fault dislocation is compared with that of the dam without fault dislocation. The simulated results indicate that the overburden consisted of granular soils which is about 70 m in thickness plays an important role in reducing the dislocation to transfer to the dam including the core. In the case that fault dislocation is 50 cm, the stress level of the clay core increases with a magnitude of 0.4 - 0.6 MPa, and there is no abrupt deformation in the core. If the dislocation is limited with 50 cm, it will not induce the failure of the dam itself, but will result in the local damage of the concrete cut-off wall nearby the fault. Further study on seepage is necessary due to the damage of the concrete cut-off wall.

Key words: hydraulic engineering; core wall; rockfill dam; dislocation; fault; finite element method

1 引言

土石坝因其对地质条件要求相对较低而得到设计人员的青睐, 尤其是在地质条件较差的情况下,

有时甚至是惟一的选择。在数量上, 土石坝也远远超过混凝土坝^[1]。土石坝的发展有着悠久的历史, 尤其是 20 世纪 60 年代以来土石坝设计进展迅速^[2], 针对中小型坝的设计理论和设计方法相对成熟^[1~4]。现在的筑坝技术问题主要集中在两方面, 一是高坝

收稿日期: 2004 - 10 - 18; **修回日期:** 2005 - 02 - 21

作者简介: 陈五一(1963 -), 男, 1984 年毕业于河海大学水利水电建筑工程专业, 现为博士研究生, 主要从事土石坝工程方面的研究工作。E-mail: chwuyi@chidi.com.cn.

中的有关问题如水力劈裂、湿化等。随着坝高往 200 m 甚至 300 m 级发展，原有的设计理论和方 法是否适用仍待进一步研究，目前虽有一些这方面的 研究^[4, 5]，但不够深入；二是强震问题。目前， 在 8 度甚至 9 度地震区建坝已不少见，如何保证强 震情况下大坝的安全值得深入研究。因此，高坝、 强震中的问题引起越来越多研究人员的兴趣^[4~8]。

我国西部正掀起大规模水电开发的热潮，若干 土石坝等待建设。西部地区多位于强地震带上，不 少土石坝位于强震区。地震引起的地层错动尤其是 在有断层存在的情况下断层错动对坝体的影响已经 引起设计人员的关注^[9]。毫无疑问，断层尤其是活 动性断层靠近坝址或位于坝址下面时对大坝的安全 构成一定的威胁，正因为此，有关规范^[10]规定，应 尽量避免活动性断层。但如果在有些特殊情况下，

无法避开时，就必须研究将来断层错动对大坝的影 响。T. M. 累普斯^[9]作过这方面的探讨，其他类似研 究并不多见。本文针对木格措水电站心墙堆石坝进 行了这方面的探讨。

木格措水电站心墙堆石坝位于四川省甘孜藏族 自治州康定县境内，最大坝高为 62 m，坝顶全长 272 m，坝基覆盖层深约 70 m，坝基及两岸坝肩覆 盖层防渗采用混凝土防渗墙全封闭式，基岩采用 帷幕灌浆进行防渗。防渗墙厚度为 1 m，墙底嵌入 基岩内 1 m，防渗墙最大深度为 71 m。防渗墙顶部 与碎石土心墙底部连接处设置一灌浆检查廊道，沿 两岸基底通至坝顶。为了改善廊道周边心墙的应力 状况，廊道外侧采用宽度为 11 m，高为 9.5 m 的高 塑性黏土区进行外包。大坝横剖面 and 纵剖面分别如 图 1 和 2(a)所示。

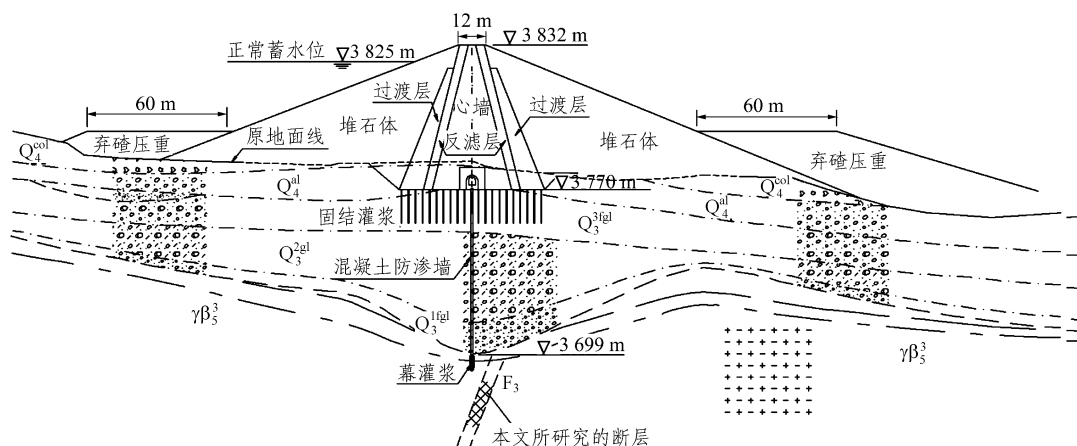
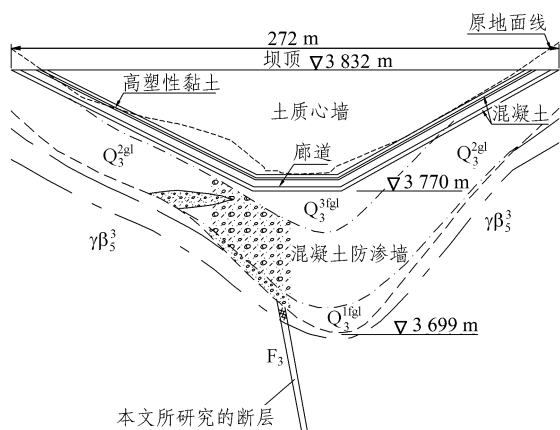
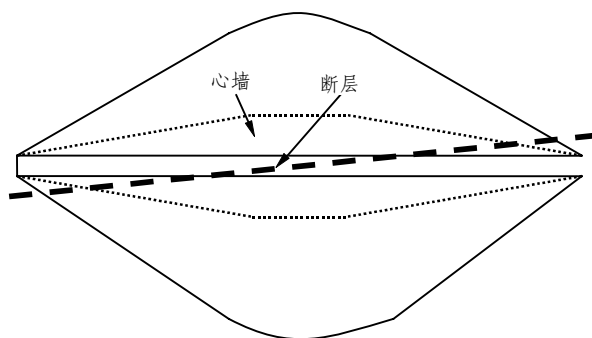


图 1 大坝横剖面图

Fig.1 Cross section of dam



(a) 大坝纵剖面图



(b) 大坝俯视图示意图

图 2 大坝纵剖面图及俯视图示意图

Fig.2 Longitudinal section and overlook sketch of the dam

该坝的坝线选择位置有限，大坝下部有一断层 F_3 穿过，设计无法避开这条断层。断层刚好位于心墙下部，并且基本与坝轴线平行，但右岸部分略向下游、左岸部分略向上游倾斜，断层的位置如图 2(b) 所示。尽管该坝位于 9 度地震的强震区，但该断层为非活动性断层，加之库容较小，溢洪道等泄洪能力较强，较短时间内即可放空水库，同时，该水电站为年调节抽水蓄能电站，枯水期对下游补偿作用较大，效益显著，因此，仍计划修建该水库。

虽然土石坝适应地基变形的能力很强，但断层的错动很可能导致混凝土防渗墙等防渗系统的破坏，并且可能对坝体心墙产生较大影响。因此，有必要进行断层错动对坝体影响的研究。依据相关部门预测，地震情况下断层即使发生错动，但错动量大于 50 cm 的可能性不大。所以，本文对断层沿其两边不同方向错动 50 cm 的情况，利用三维有限元法进行了计算模拟，研究断层错动对坝体尤其是心墙、防渗墙的影响。

2 有限元模型建立

参与有限元离散的区域包括坝基覆盖层及坝体全部。将覆盖层与基岩接触的边界假定为位移边界。在坝体填筑和蓄水过程中，位移边界的位移为 0 m。在模拟断层错动时，假定以断层为界(见图 2(b) 中的粗虚线)，断层的一边(下游部分)基岩不动，边界位移为 0 m，而另一半(上游部分，即图 2(b) 中的虚线所示断层以下部分)基岩移动一给定的位移(0.5 m)。共进行了 3 种方案的计算，其中方案 1 模拟断层没有错动，方案 2 和 3 分别模拟断层(上游部分基岩)右移和上移 0.5 m 的情况。

计算使用河海大学岩土工程研究所研制的 TDAD 三维有限元静力计算程序。本构模型采用邓肯-张 $E-v$ 模型^[11]，考虑了上游坝壳、过渡料、反滤料由于水库蓄水而产生的湿化变形^[11]，湿化参数为对应材料的摩擦角降低 2° ， K 值减小 10%，具体参数如表 1 所示。单元为八节点等参单元，混凝土防渗墙与地基覆盖层之间、廊道四周的高塑性黏土与混凝土廊道之间以及防渗墙底残渣设置为 Goodman 接触面单元，参数如表 2 所示。混凝土作为线弹性材料考虑，其弹性模量为 30 GPa，泊松比为 0.17。取防渗墙抗压强度为 30 MPa，抗拉强度为 -2.5 MPa，当防渗墙破坏后，相应单元取一较小弹性模量 1 GPa。计算用逐级加荷对施工及蓄水过

表 1 三维有限元计算采用的邓肯-张模型参数
Table 1 Parameters of Duncan-Chang model for 3D finite element computation

材料	容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c (kPa)	φ ($^\circ$)	$\Delta\varphi$ ($^\circ$)	R_f	K	n	G	F	D	K_{ur}
覆盖层	20.8	81	36.2	0	0.87	430	0.430	0.230	-0.020	8.4	645
堆石体	19.5	0	55.0	11	0.80	1 000	0.274	0.327	-0.103	2.6	1 500
过渡层	20.0	0	55.0	11	0.85	750	0.300	0.330	0.010	2.6	1 125
反滤料	20.0	0	38.0	0	0.85	650	0.300	0.340	0.010	2.6	975
高塑性黏土	18.0	200	15.0	0	0.85	150	0.500	0.450	0.020	3.0	225
心墙	21.3	51	32.5	0	0.80	360	0.070	0.360	-0.030	8.0	540
上下游堆石压坡	22.0	0	39.0	0	0.80	700	0.420	0.300	0.060	5.0	1 050

表 2 计算采用的接触面模型参数

Table 2 Interface parameters for finite element simulation

接触面位置	φ_i ($^\circ$)	c_i (kPa)	R_f	K_I	n	K_n ($\text{kPa}\cdot\text{m}^{-1}$)
防渗墙与覆盖层	11	0	0.86	1 400	0.66	9 999 900
高塑性土与廊道	15	0	0.80	2 500	0.60	9 999 900
防渗墙底残渣	25	0	0.85	4 500	0.86	50 000

程进行模拟，最后在正常蓄水位时，给相关边界施加位移以模拟由于地震引起的断层错动。

3 有限元成果及分析

3.1 断层错动对坝体变形的影响

分别整理了方案 2 和 3 计算的由于断层错动引起的坝体最大横剖面沿坝轴向和竖向的位移增量等值线，分别如图 3 和 4 所示。由于断层几乎刚好位于坝轴线附近，因此，坝轴线附近的心墙、覆盖层由断层错动引起的位移梯度比坝壳料大，因此心墙、防渗墙附近的覆盖层中可能会产生比较大的剪切变形，这对坝体防渗系统是不利的。由于心墙适应变形的能力相对较强，后面的结果显示，心墙并不会产生剪切破坏，而覆盖层由于有防渗墙作防渗体，即使有较大的剪切变形，也不致影响防渗系统。至于防渗墙的应力及变形，是否会因为断层错动而破坏从而导致防渗失效将在后文讨论。

由图 3 和 4 可以看出，靠近断层处的位移等值线很密，往上逐渐稀疏，表明断层错动在坝体上部逐渐扩散。在下部靠近断层处，位移在很小范围内由 0 cm 变化至 50 cm，而在上部(心墙中)，到 50 cm 位移则是在较大范围内由 0 cm 慢慢过渡。越往上

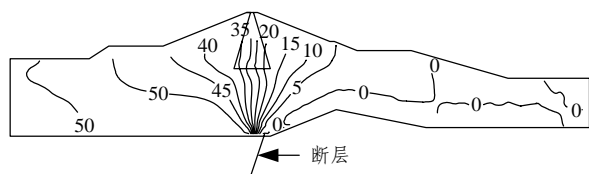


图 3 方案 2 计算的最大横剖面沿坝轴向位移增量等值线 (单位: cm)

Fig.3 Contours of displacement increment of deepest section in dam axial direction in the case 2(unit: cm)

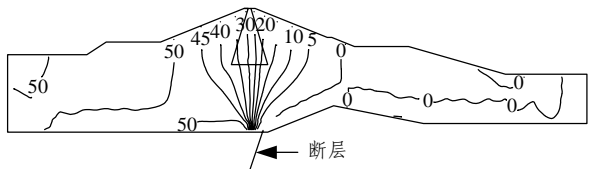


图 4 方案 3 得到的最大横剖面沿垂直向位移增量等值线 (单位: cm)

Fig.4 Contours of displacement increment of deepest section in vertical direction in the case 3(unit: cm)

游或下游, 这种错动的影响越小, 说明 50 cm 的断层错动已经在很大程度上被覆盖层缓冲。

3.2 断层错动对心墙及防渗墙变形的影响

图 5 和 6 分别给出了方案 2 和 3 计算得到的由断层错动引起的坝体纵剖面沿坝轴向和垂直向的位移增量等值线。从图中可以看出, 由断层错动引起的防渗墙的位移梯度较大, 而心墙中产生的拉伸和

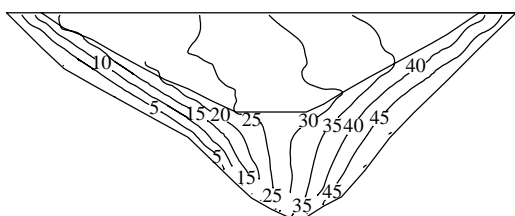


图 5 方案 2 得到的纵剖面沿坝轴向位移增量等值线 (单位: cm)

Fig.5 Contours of displacement increment of longitudinal section in dam axial direction in the case 2(unit: cm)

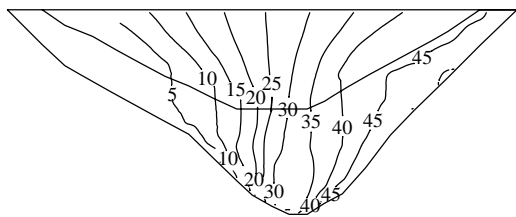


图 6 方案 3 得到的纵剖面沿垂直向位移增量等值线 (单位: cm)

Fig.6 Contours of displacement increment of longitudinal section in vertical direction in the case 3(unit: cm)

剪切变形反而较小, 这主要是由于覆盖层较厚, 其缓冲作用较大, 断层错动传至心墙时, 影响已经较弱。由此看来, 断层错动对大坝的影响主要在于防渗墙, 如果防渗墙在断层错动后没有完全失效, 则可以认为断层错动不会危及大坝安全。

3.3 断层错动对心墙应力的影响

图 7 显示了方案 1 得到的断层没有错动情况下, 心墙纵剖面应力水平等值线。应力水平定义为 $(\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_{1f} - \sigma_{3f})$, 其中 σ_1, σ_3 分别为大、小主应力, σ_{1f}, σ_{3f} 分别为破坏时的大、小主应力。图 8(a) 给出了方案 2 计算得到的断层错动后坝体心墙纵剖面上应力水平等值线。和图 7 相比, 断层错动前后, 心墙的应力水平有所增加, 但并没有破坏, 大部分心墙单元应力水平为 0.4~0.6。这是由于尽管断层 F_3 错动达 50 cm, 但在断层与坝体之间有很厚的覆盖层, 断层错动效应经过厚厚的覆盖层传到心墙时已被大大削弱, 因此断层错动对坝体心墙的影响不是很大。当断层上下错动 50 cm 时, 心墙应力水平比方案 2 弱, 如图 8(b)所示。

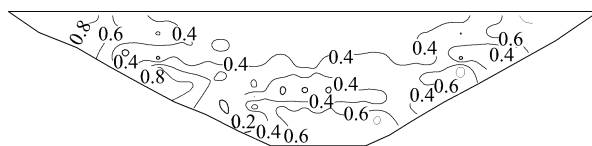
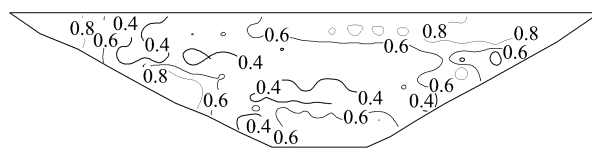
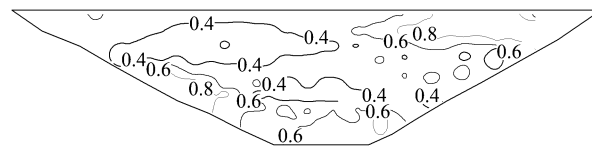


图 7 方案 1 得到的断层未错动时心墙纵剖面应力水平等值线图

Fig.7 Contours of stress level of longitudinal section without fault dislocation in the case 1



(a) 方案 2



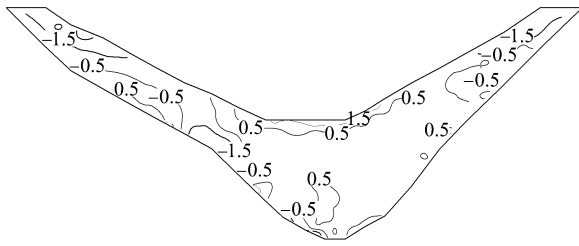
(b) 方案 3

图 8 断层错动后心墙纵剖面应力水平等值线图

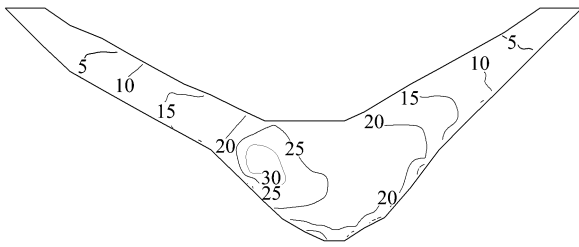
Fig.8 Contours of stress level of longitudinal section after fault dislocating

3.4 断层错动对防渗墙应力的影响

图 9~11 显示了断层错动前(即方案 1)和错动后



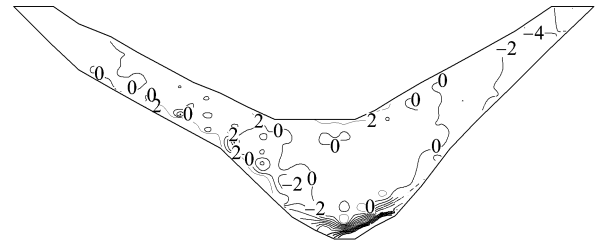
(a) 小主应力



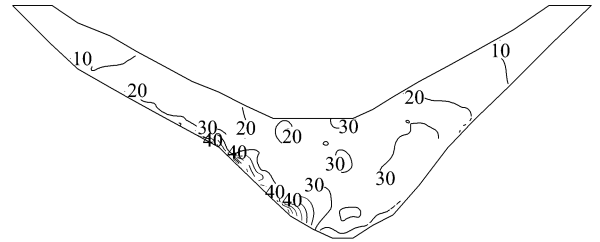
(b) 大主应力

图9 方案1得到的纵剖面防渗墙主应力等值线(单位:MPa)

Fig.9 Contours of principal stresses of cut-off wall in longitudinal section in the case 1(unit: MPa)



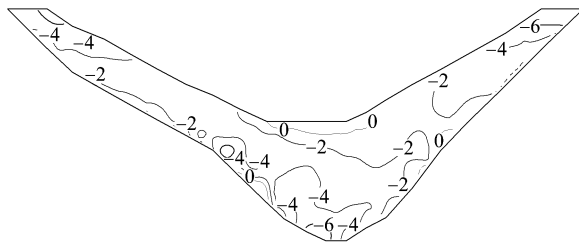
(a) 小主应力



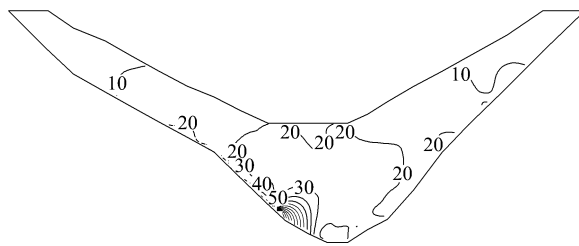
(b) 大主应力

图11 方案3得到的纵剖面防渗墙主应力等值线(单位:MPa)

Fig.11 Contours of principal stresses of cut-off wall in longitudinal section in the case 3(unit: MPa)



(a) 小主应力



(b) 大主应力

图10 方案2得到的纵剖面防渗墙主应力等值线(单位:MPa)

Fig.10 Contours of principal stresses of cut-off wall in longitudinal section in the case 2(unit: MPa)

(即方案2和3)防渗墙的大、小主应力等值线。比较图9中方案1和图10,11中方案2,3的大、小主应力等值线图可以看出,断层两盘错动50cm后(即方案2和3)防渗墙的大小主应力变化明显。无论断层是左右错动(方案2)还是上下错动(方案3),防

渗墙应力均表现为小主应力减小,大主应力增大,尤其是在断层附近,存在比较大的应力集中,拉、压应力数值较大。对于方案2,断层附近防渗墙局部拉应力达到了-9.4MPa,其他局部区域如左、右岸坝肩、河谷底部等防渗墙拉应力也超过了-3.0MPa,可能导致防渗墙拉裂;对于方案3,断层附近的防渗墙底部应力集中明显,尤其是在河谷防渗墙底,极少数单元甚至超过了-30MPa,但区域相对较小。断层无错动情况下,防渗墙大主应力基本都小于30MPa;断层错动后,方案2的断层附近的防渗墙个别单元大主应力(压应力)达到了172MPa,方案3也达到116MPa,表明这些部位的防渗墙会破坏。和可能的拉裂破坏区相比,范围较小,而且压坏后防渗墙的抗渗性能应比拉坏后的稍好,但究竟其抗渗性能如何,在此还无法论断。因此,断层错动导致的防渗墙拉裂应值得注意,并进行相应的渗透变形和渗透破坏评估。

另外,笔者也调整了防渗墙单元破坏后的弹性模量,取0.1GPa进行了计算。这种情况下,防渗墙的拉应力数值明显减小,而且,超过-2.5MPa的拉应力区域也仅局限在断层附近防渗墙的很小区域内,这意味着防渗墙可能的破坏区很小。防渗墙拉应力的范围与破坏后的弹性模量取值关系较大,单元破坏后,弹性模量的合理取值问题值得研

究。

4 结 语

本文用邓肯-张 $E-v$ 模型模拟了土石坝坝址基岩处的断层错动, 分析了断层错动对土石坝心墙和防渗墙的应力及变形的影响。

通过对计算结果的分析可知, 土石坝坝址基岩中断层错动对该坝体本身危害并不大, 主要原因是覆盖层深厚, 对断层错动的缓冲作用显著; 但是对混凝土防渗墙的影响应引起重视, 应进行渗透变形和渗透破坏的评估。另外, 建议设计中预留廊道, 便于在防渗墙开裂的情况下, 对一定区域进行灌浆处理等, 以防止防渗墙拉裂引起坝基失稳。

参考文献(References):

- [1] 林 昭. 碾压式土石坝设计[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.(Lin Zhao. Design of Rolling Earth Rockfill Dam[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2003.(in Chinese))
- [2] 陈明致. 土石坝设计的进展[J]. 东北水利水电, 1998, 16(2): 1 - 7.(Chen Mingzhi. Advances in design of earth rockfill dam[J]. Water Resources and Hydropower of Northeast China, 1998, 16(2): 1 - 7.(in Chinese))
- [3] 陈明致, 金来鑫. 堆石坝设计[M]. 北京: 水利出版社, 1982.(Chen Mingzhi, Jin Laiyun. Design of Earth Rockfill Dam[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1982.(in Chinese))
- [4] Escuder I, Andreu J, Rechea M. An analysis of stress-strain behaviour and wetting effects on quarried rock shells[J]. Can. Geotech. J., 2005, 42(1): 51 - 60.
- [5] Ng A K L, Small J C. A case study on hydraulic fracturing using finite element methods[J]. Can. Geotech. J., 1999, 36(5): 861 - 875.
- [6] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京: 河海大学出版社, 1989.(Gu Ganchen. Earthquake Engineering of Earth Rockfill Dam[M]. Nanjing: Hohai University Press, 1989.(in Chinese))
- [7] Zhu J G, Wang J J. Investigation on arching action and hydraulic fracturing of core rockfill dam[A]. In: Proceedings of the 4th International Conference on Dam Engineering[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 2004. 1 171 - 1 180.
- [8] 吕擎峰, 殷宗泽. 非线性强度参数对高土石坝坝坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2 708 - 2 711.(Lu Qingfeng, Yin Zongze. Effect of strength nonlinearity on slope stability of high rockfill dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2 708 - 2 711.(in Chinese))
- [9] 累普斯 T M. 能动的断层错动对大坝设计的影响[J]. 水利水电工程设计, 1994, 13(3): 52 - 57.(Leps T M. The influence of dislocation of fault on the design of dam[J]. Design of Water Resources and Hydroelectric Engineering, 1994, 13(3): 52 - 57.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 碾压式土石坝设计规范(SL274 - 2001)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Design Code for Rolled Earth-rock Dams(SL274 - 2001)[S]. Beijing: China Water Power Press, 2002.(in Chinese))
- [11] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.(Qian Jiahuan, Yin Zongze. Principles and Calculation Methods in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 1996.(in Chinese))