

防止高拱坝坝踵开裂和屈服的工程措施研究

杜成斌, 尚 岩, 邱 颖

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 对防止高拱坝坝踵开裂和屈服的两种常用工程措施周边缝和底缝进行研究. 研究中坝体混凝土、缝和坝基材料采用不同的非线性材料模型. 结合 292 m 高的小湾拱坝对设缝前后的坝体位移场、应力场、开裂区和屈服区进行分析研究, 重点讨论设缝对坝体屈服和开裂的影响. 对小湾拱坝的研究结果表明 (a) 未设缝时, 在坝基附近的垫座内出现较大范围的开裂和屈服; 设置周边缝时, 垫座内的开裂和屈服明显减少; 设置底缝时, 坝踵附近的开裂和屈服明显减少, 但在设缝两侧, 尤其是两侧缝端附近, 垫座内的屈服现象比无缝情况时更严重. (b) 小湾拱坝设周边缝的效果要优于设底缝, 设缝范围可限制在缝面开裂的范围内.

关键词 高拱坝; 周边缝; 底缝; 坝踵; 屈服; 开裂

中图分类号 :TV642.4 ;TV131

文献标识码 :A

文章编号 :1000-1980(2003)04-0395-04

针对在高拱坝的坝踵附近存在较大的拉应力区^[1,2], 人们提出了释放周边约束以减小拉应力的方法, 即在坝基交界面和坝踵附近设置周边缝和底缝的工程措施. 缝中设置有效的止水措施, 一旦缝处受拉或受地基约束有受拉趋势即允许其张开. 迄今为止, 已有多座带缝拱坝建成并投入使用. 除个别拱坝因缝面处理不当而发生问题外, 大多都在正常运行, 少见有因设缝而产生破坏或影响使用的报道. 相对于工程实践, 对设缝拱坝的研究工作做得相对较少. 1985 年南非学者 O'Connor^[3]曾对伦敦土木工程师协会设计的第 5 型拱坝用预留开裂单元方法研究了坝基周边开裂对拱坝位移和应力的影响. 研究表明, 最大开裂发生在坝踵附近, 裂缝值达 12 mm. 如果再考虑缝中静水压力的作用, 开裂值大约还会增加 6 mm. 我国学者汝乃华^[4]曾结合梅花周边缝试验拱坝对拱坝的上滑稳定进行过研究, 得出梅花周边缝试验拱坝的失事是由于周边缝面的抗剪强度不足引起的结论. 奥地利学者 Rescher^[5]运用二维线弹性有限元法对宽河谷拱坝坝踵附近的应力状态进行了研究, 研究中考虑了上游设底缝及排水廊道的影响. 结果表明由于底缝存在使得缝面抗剪强度不足、剪应力传递不安全, 由于材料的剪切变形使得坝基附近的应力场发生重分布, 会导致岩基材料出现松动、岩基中裂缝的形成和扩展等. 实际上拱坝是三维空间结构, 将其简化为二维计算与其实际受力状态相差较大. 1994 年俄罗斯专家针对小湾拱坝采用非线性有限元方法对设周边缝情况进行了研究, 但他们的研究仅考虑了缝的非线性, 未考虑坝体、坝基材料的非线性. 本文针对高拱坝应力水平较高, 如坝体内多处主拉应力超过混凝土材料的抗拉强度, 坝基中有多条断层、结构面的特点, 综合考虑了坝体材料、坝基材料和缝的非线性影响, 采用非线性有限元方法对防止高拱坝坝踵开裂的常用工程措施周边缝和底缝进行研究. 坝体混凝土、缝和坝基材料采用了不同的非线性材料模型, 结合 292 m 高的小湾拱坝对设缝前后的坝体位移场、应力场和屈服区进行分析研究, 重点讨论了设缝对坝体屈服和开裂的影响.

1 计算模型

1.1 接缝模型

本文采用的三维非线性接触单元, 用实际缝中的填充材料参数 E 和 μ 按常规有限元的方法形成劲度矩阵, 避免了 Goodman 单元等只考虑缝面变形及参数 k_n 取值的任意性. 本构关系上, 同时考虑了法向和切向的非线性特性, 考虑了缝面应力与变位的非线性重调整, 模拟了接触面粘结、滑移、张开等变形模式, 从而使计

算更符合实际情况,具体的模型见文献[6]。模型主要特点为接触面法向应力变形关系借鉴了 Bandis 岩石节理法向变形的双曲线模型,接触面切向应力应变关系采用应变硬化的双曲线模型。

1.2 坝体混凝土材料的破坏准则

采用 Chen 1982 年提出的能较全面反映混凝土破坏曲面特征的四参数弹塑性-断裂模型。破坏形式有开裂破坏、压毁破坏和混合破坏 3 种。

1.3 坝基材料的破坏准则

小湾高拱坝坝基材料比较复杂,包括岩石和断层、节理等。岩石材料的破坏准则采用最大拉应力准则和 Drucker-prager 准则,断层和节理的破坏准则采用最大拉应力准则和 Mohr-Coulomb 准则。

2 周边缝、底缝设计和拱坝地基系统离散

小湾拱坝为混凝土双曲拱坝,坝顶高程为 1245.0 m,坝基面高程为 953.0 m,最大坝高 292 m。设缝原则为周边缝的圆心均位于拱坝的中心面上,半径接近为常值。这样设置的缝可以保证曲率平顺,同时应保持缝面光滑,使坝体保持对称形状。本文研究的周边缝沿整个坝体与建基面设置,底缝对称于拱冠断面,总的水平投影长度为 167 m。

拱冠处缝面至坝基底距离与缝处坝厚之比为 0.153,该处缝面高程为 964 m。坝体沿厚度方向分 4 层,沿高度方向分 14 层,基础深度为坝高的 1 倍左右,单元总数为 9423,结点总数为 11490。本文研究的周边缝拱坝设缝范围左右边高程均为 1245 m,全截面设缝,设置底缝的拱坝缝长水平投影为 167 m,全截面设缝。整体坐标的原点位于通过上游拱冠中心的竖向直线与零高程面的交点, x 正向指向右岸, y 正向指向下游, z 正向铅直向上。拱坝地基系统网格剖分图及计算中所采用的有关参数参见文献[1]。拱坝所受荷载及加载顺序为:坝体自重,正常水荷载,温度荷载(温降),泥沙压力。

3 结果分析

3.1 设缝拱坝的位移场和应力场

小湾拱坝未设缝线弹性分析时,拱冠处顺河向位移为 167.90 mm,设周边缝和底缝后位移分别为 172.26 mm 和 172.78 mm。设底缝时的位移值略大于周边缝,是由于未设缝部位出现较多的不规则裂缝、屈服引起的。总体说来,设周边缝和底缝均使拱冠处的位移呈明显增加的趋势,表明设缝后拱坝的整体性有所降低。两种设缝拱坝的缝面上坝体位移均呈刚体位移特征^[1]。由于坝体不完全对称,左边的弦长大于右边的弦长,使得坝体左半部分顺河向位移要大于右半部分。拱冠附近有上抬位移趋势,设底缝的拱坝与设周边缝的拱坝相比,在左右坝肩处的竖向位移有所减小。

为便于比较,图 1 给出了未设缝(线弹性)、设周边缝和设底缝时拱坝上游面 σ_1 的分布。由图 1 可看出,设缝后,拱坝上游面在坝踵附近 σ_1 有较大降低。未设缝时,小湾拱坝在上游坝踵最大主拉应力达 5.45 MPa,梁向拉应力达 3.75 MPa;设缝之后,最大主拉应力有较大下降,只有 1.5 MPa 左右。设缝后由梁向承担的一部分荷载转由拱向承担,使得上游面最大拱向压应力增大,由 -1.5 MPa 左右增大至 -6.63 MPa 左右。两种设缝拱坝的应力状态比较接近,正如后述是由于底缝拱坝未设缝的周边部分也开裂、屈服成周边缝的样式引起的。

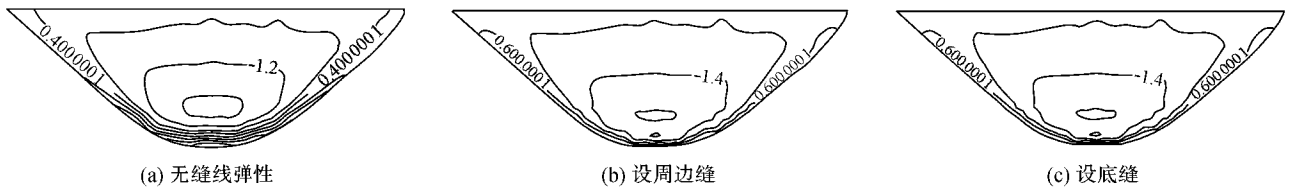


图 1 拱坝上游面第一主应力分布(单位:MPa)
Fig.1 First principal stress in upstream face(unit:MPa)

3.2 设缝对拱坝开裂和屈服的影响

图 2 表示 3 种坝型拱坝上游面的开裂、屈服状况,图 3 表示相应的 3 种情况拱坝垫座的开裂、屈服状况(这里垫座指的是设缝拱坝缝面与建基面之间的坝体)。

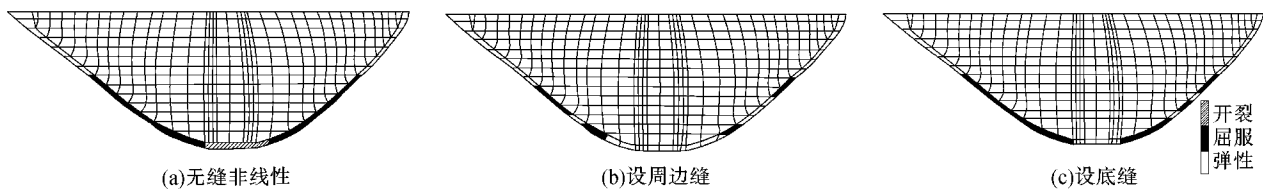


图 2 拱坝上游面的开裂和屈服状况
Fig.2 Cracking and yielding of upstream face

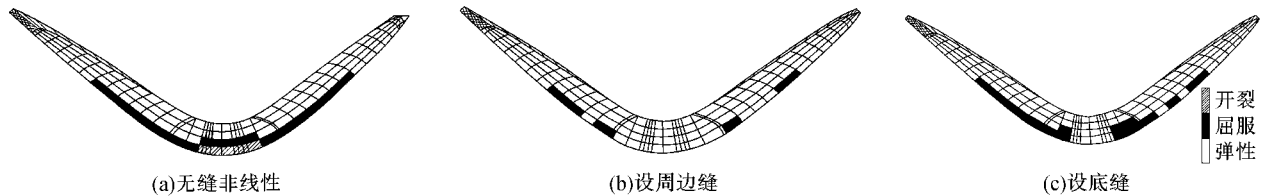


图 3 拱坝垫座的开裂和屈服状况
Fig.3 Cracking and yielding in the base

研究结果表明,拱坝均在垫座的上游侧出现开裂和屈服,垫座以上坝体未出现开裂和屈服.由于本文在建基面处未设置薄层单元,使得开裂和屈服均集中在垫座内,而且开裂的范围与设薄层单元相比,无缝拱坝的非线性计算结果的量值明显变小,但屈服范围变大,这与垫座单元采用的单元破坏模式为四参数准则而不是薄层单元的简单开裂、屈服破坏准则有关,二者计算结果的规律应是一致的.同时,在屈服、开裂单元与弹性状态单元之间的过渡单元实际只有 $1/2 \sim 1/3$ 开裂和屈服(按高斯点数目统计).不设周边缝时,坝踵附近的垫座内出现较大的开裂、屈服区,最大范围左、右边均至高程 1110 m,除坝踵附近,屈服深度基本为靠上游面的第 1 排单元,坝踵处第 2 排单元屈服.开裂部位基本位于坝踵靠右侧,水平投影长度为 112 m,左边至高程 964.2 m,右边至高程 973.2 m(见图 3(a)、图 3(a)).设周边缝时,坝踵附近无开裂单元,且垫座内的屈服部位也大大减少(见图 3(b)、图 3(b)),但周边缝面开裂单元较多.设置底缝时,在设缝的近 $2/3$ 长度范围的垫座内无开裂和屈服,但两侧缝端近 $1/6$ 缝长范围内,垫座屈服深度要比无缝的情况大,达到第 2 排单元(见图 3(c)、图 3(c)).第 2 排单元屈服范围比无缝时要大,左边 x 至 -73.45 m,右边 x 至 120.8 m,无缝时第 2 排屈服单元左边 x 至 -40.89 m,右边 x 至 70.97 m.这一点表明设置底缝后,由于缝面开裂引起的应力重调整,未设缝处受到的剪切应力增大(方向向下游),而引起在这附近屈服现象增多,缝端影响最大.这与文献[5]得出的“由于缝面开裂使得坝基(垫座)附近的应力场发生重分布,会导致岩基(垫座)材料出现松动、岩基(垫座)中裂缝的形成和扩展”的结论是一致的.

图 4 表示设缝面的开裂状况.由图 4 可知,设置周边缝时,拱坝左、右坝肩处均已开裂,这与两处的应力集中状态有关,下部周边缝上游面开裂范围为左边至高程 1070 m,右边至高程 1110 m.设置底缝的拱坝在坝踵设缝范围内上游面均为开裂状况.这些提示人们:周边缝拱坝的缝面尽量不要设到坝肩,以加强坝体与地基之间的抗剪能力,防止出现像梅花周边缝拱坝那样因岸坡上滑引起坝体上抬,最后导致因周边缝面抗剪强度不足而引起的溃坝破坏^[7].从比较坝体的屈服和开裂来看,对于小湾拱坝,设周边缝工程措施比设底缝工程措施更有利于减少拱坝垫座的开裂和屈服,周边缝设缝范围最好在左、右边均至高程 1110 m 左右.

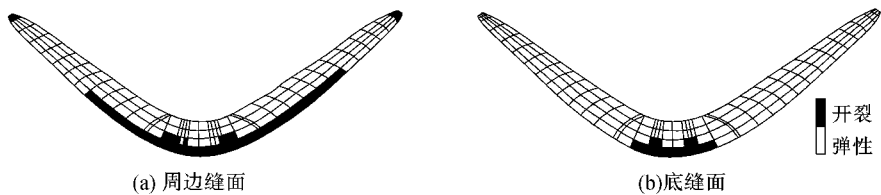


图 4 周边缝面、底缝面的开裂状况
Fig.4 Cracking of peripheral joint face and base joint face

4 结 论

设缝可以有效地降低拱坝坝踵附近的拉应力.小湾拱坝未设缝时,在坝基附近的垫座内出现较大范围的开裂和屈服.设置周边缝时,垫座内的开裂和屈服明显减少.设置底缝时,坝踵附近的开裂和屈服明显减少,但在设缝两侧,尤其是两侧缝端附近,屈服现象比无缝情况时更为严重.小湾拱坝设周边缝的效果要优于设底缝,设缝范围可限制在缝面开裂的范围内.

参考文献:

- [1] 杜成斌,任青文. 设周边缝对小湾拱坝工作性态的影响[J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 70—75.
- [2] 杜成斌,任青文. 底缝对高拱坝工作性态的影响[J]. 水利学报, 2001(5): 1—4.
- [3] O'CONNOR J P F. The modeling of cracks, potential crack surfaces and construction joints in arch dams by curved surface interface element[A]. In: International Commission on Large Dams, eds. Proceedings of 15th ICOLD[C]. Switzerland: International Commission on Large Dams, 1985. 389—406.
- [4] 汝乃华. 拱坝的上滑失稳和安全准则[J]. 水利学报, 1988(2): 40—48.
- [5] RESCHER O J. Arch dams with an upstream base joint[J]. Water Power and Dam Construction, 1993(3): 17—25.
- [6] 杜成斌,任青文. 一种新的模拟接缝的三维非线性接触单元[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(4): 92—96.
- [7] DU Cheng-bin, QIU Ying. Analysis of the failure of Meihua arch dam with perimetral joints[A]. In: WIELAND M, TAN J S Y, eds. Proceedings of the 3rd International Conference on Dam Engineering[C]. Singapore: CI-PREMIER PTE LTD, 2002. 89—96.

Engineering measures for prevention of cracking and yielding of high arch dams

DU Cheng-bin, SHANG Yan, QIU Ying

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: The feasibility of two usual engineering measures of setting peripheral joints and base joints to prevent cracking and yielding of high arch dams is studied for arch dam design. Different nonlinear material models of dam bodies, joints, and dam foundations are adopted in the calculation. With the Xiaowan arch dam, 292m in height, as an example, the displacement field, stress field, and cracked and yield region of the dam in the absence and presence of joints in the dam body are compared, with emphasis placed on the influences of joints on the cracking and yielding of the dam body. The results show that without joints, large areas of cracking and yielding occur in the cushions near the dam foundation, and that peripheral joints and base joints obviously reduce the cracking and yielding in cushions and near the dam heel, while on two sides of base joints, especially at the ends of the joints, the yielding in the cushion is more serious than that without joints. It is also concluded that the effect of peripheral joints is superior to that of base joints, and that joint setting should be limited to the regions where joint face cracking occurs.

Key words: high arch dam; peripheral joint; base joint; dam heel; yielding; cracking