

基于渗流与应力耦合的防渗墙与坝体相互作用的数值模拟

高江林, 陈云翔

(江西省水利科学研究院, 江西省水工安全工程技术研究中心, 江西 南昌 330029)

摘要: 封闭式坝体防渗墙在土石坝除险加固工程中得到广泛应用. 然而, 目前针对土石坝加固工程中增建的封闭式坝体防渗墙的研究相对较少, 特别是关于墙-坝体相互作用的研究中很少考虑渗流与应力的耦合作用. 为探讨土石坝加固工程中墙-坝体相互作用的数值模拟方法及作用机理, 在分析实际工程条件的基础上, 利用 ABAQUS 有限元软件建立渗流与应力耦合数值模型, 实现了同时考虑墙-土接触、渗流-应力耦合共同作用的模拟. 分析结果表明, 所采用的耦合数值模型能较好模拟防渗墙与坝体的相互作用; 土石坝加固工程中的封闭式坝体防渗墙墙体的应力主要由水平荷载引起, 简单忽略渗流与应力的耦合作用会导致墙体应力的计算结果偏于不安全.

关 键 词: 防渗墙; 土石坝; 相互作用; 数值模拟; 流固耦合; 有限元法; 除险加固

中图分类号: TV543+.82; TV641 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2013)02-0058-06

由于具有承受水头大、防渗性能可靠、适用各种地层条件等优点, 混凝土防渗墙广泛应用于国内外水利水电工程. 尤其是在近几年国内大规模的病险水库除险加固工程建设中, 混凝土防渗墙是土石坝坝体防渗处理的最主要措施. 对于直接建在基岩上或覆盖层厚度不大的土石坝, 一般采用心墙式混凝土防渗墙进行坝体防渗处理, 形成直接嵌入基岩的封闭式防渗墙.

目前, 关于混凝土防渗墙的研究较多, 主要集中在有深厚覆盖层的坝基和新建土石围堰中的防渗墙^[1-2], 针对土石坝加固工程中增建封闭式坝体防渗墙的研究相对较少. 由于加固工程中的封闭式坝体防渗墙一般嵌入相对较新鲜的基岩或对坝基进行灌浆防渗处理, 因而可近似认为是相对不透水地基上的土石坝坝体防渗墙. 另一方面, 加固工程中的土石坝大多运行了几十年, 土体固结对墙体应力影响基本可以忽略^[3]. 可见, 土石坝加固工程中增建的封闭式坝体防渗墙的渗流和承载性状与一般深厚覆盖层中的坝基防渗墙或新建土石围堰中的防渗墙都有明显区别. 因此, 针对土石坝加固工程中增建封闭式坝体防渗墙的情况, 有必要研究防渗墙与坝体的相互作用问题.

此外, 在研究方法方面, 目前考虑渗流与应力耦合的土石坝渗流和边坡稳定的研究较多^[4-6], 但在关于防渗墙与坝体相互作用的研究方法中很少考虑流固耦合作用. 土石坝存在典型的渗流与应力耦合作用, 为反映渗流对防渗墙应力的影响, 往往通过水压力和湿重度(或浮重度)来实现^[7], 或将渗流计算出的渗透力作为荷载加到墙体上再进行应力计算^[8]. 这些间接方法需事先假设或计算渗流场, 且无法从本质上反映坝体渗流与墙体应力的直接作用关系及相互影响. 因此, 考虑渗流与应力耦合是防渗墙与坝体相互作用研究方法进一步发展的一个重要方向.

为探讨土石坝加固工程中混凝土防渗墙与坝体相互作用的数值模拟方法和相互作用机理, 本文在分析实际工程条件的基础上, 利用 ABAQUS 有限元软件建立二维有限元耦合数值模型, 实现同时考虑渗流-应力

收稿日期: 2012-08-16

基金项目: 江西省水利厅科技项目(KT201104)

作者简介: 高江林(1981-), 男, 江西星子人, 博士, 主要从事岩土工程试验与研究工作. E-mail: gaojianglin@163.com

耦合、墙-土相互接触的共同作用.通过实例计算和理论对比,探讨土石坝加固工程中防渗墙与坝体的相互作用机理,同时对比分析了是否考虑耦合对计算结果的影响.

1 防渗墙与坝体相互作用的数值模拟方法

实现土石坝加固工程中增建防渗墙与坝体土相互作用的模拟,关键处理好3个方面的计算,即应力状态计算、渗流应力耦合计算和墙体坝体接触与渗流计算.

1.1 应力状态计算

1.1.1 防渗墙完工蓄水前的初始应力计算 土石坝加固工程中的坝体防渗墙建设时,坝体土已基本固结完成,土体固结对防渗墙墙体应力的影响基本可以忽略.另一方面,墙体施工时一般为空库状态,即大坝上游无水压力作用.因此,进行防渗墙与坝体相互作用分析的初始状态应该是完工蓄水前的状态,仅受重力作用,坝体存在初始应力但初始位移为零.

初始状态计算需进行初始应力平衡,在ABAQUS中的实现步骤为:(1)将重力荷载施加于计算模型,并施加符合工程实际情况的边界条件,计算出重力荷载下的应力场;(2)根据计算的应力场,将单元中心点的应力作为初始应力读入,重新计算重力荷载作用下的坝体应力,即可得出初始状态的应力,同时实现初始位移接近于零^[9].需要注意的是,由于混凝土防渗墙施工多为水下浇筑混凝土,且施工时一般为空库状态,初始应力状态计算时不考虑墙体与坝体的接触(在该分析步中将墙-土接触对关闭),避免导致墙体初始应力偏大.

1.1.2 正常蓄水土况下的应力计算 正常蓄水土况下的应力计算在ABAQUS中的实现步骤为:(1)获得初始状态后,为计算正常蓄水时的防渗墙与坝体相互作用,重新激活在初始分析步中关闭的墙-土接触对;(2)施加迎水面水压力荷载,同时设置孔压边界条件和排水边界条件;(3)选择soils类型分析步,进行耦合计算.

1.2 渗流与应力耦合计算

ABAQUS有限元软件与一般岩土工程中的做法一样,将孔隙体视为多孔材料,孔隙中的流体可包含压缩性相对很低的液体和可压缩的气体.土体的体积包括土颗粒的体积和孔隙的体积,孔隙的体积等于孔隙中液体和气体的体积之和.计算中有限元的网格固定在土骨架上,液体或气体可流过网格,并满足流体的连续性方程.本文分析的土坝渗流问题,同时存在非饱和与饱和渗流.

在非饱和土渗流中,渗透系数受土体孔隙比和饱和度的影响最为明显,而饱和度一般表述为基质吸力的函数.ABAQUS计算非饱和土渗流时分别对这两部分进行定义,本文算例中非饱和土渗流参数按文献[9]中的经验公式选取.

$$\text{渗透系数与基质吸力关系: } K_w = a_w K_{ws} / [a_w + (b_w \times (u_a - u_w))^{c_w}] \quad (1)$$

式中: K_{ws} 为土体饱和时的渗透系数,本文为 1×10^{-5} cm/s; u_a 和 u_w 分别为土体中的气压和水压力,本文算例中简单取为零; a_w , b_w 及 c_w 为土体材料系数,本文取为1 000,0.01和1.7.

$$\text{饱和度与基质吸力的关系: } S_r = S_i + (S_n - S_i) a_s / [a_s + (b_s \times (u_a - u_w))^{c_s}] \quad (2)$$

式中: S_r 为饱和度; S_i 为残余饱和度,本文取为0.08; S_n 为最大饱和度,取为1; a_s , b_s 和 c_s 为土体材料系数,本文取为1.0,5E-5和3.5.

ABAQUS通过折减系数来考虑饱和度对渗透系数的影响,本文根据式(1)和(2)确定渗透系数与饱和度的关系,同时根据式(2)确定非饱和土孔压与饱和度的关系.

因此,非饱和渗流与饱和渗流可以用统一的方程形式,此时可将非饱和区域和饱和区域作为统一区域进行渗流计算.渗流场与应力场的耦合计算需同时满足应力平衡方程和渗流连续方程.

某体积域内的平衡方程可用某一时刻的虚功原理表述:

$$\int_V \sigma \cdot \delta \epsilon dV = \int_S f_s \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV + \int_V s n \rho_w g \cdot \delta v dV \quad (3)$$

式中: σ 为柯西应力; δ_e 为虚应变; δ_v 为虚位移; f_s 为单位面积上的面力; f 为单位体积上流体重力之外的体积力; s 为土体饱和度; n 为土体孔隙率; ρ_w 为流体的密度; g 为重力加速度. 采用位移有限元法, 利用拉格朗日插值函数对虚功方程进行空间离散, 得出计算域的有限元网格.

计算域用有限元网格离散后, 单元网格中流体的运动满足连续性, 即单位时间内流入土体的流体体积等于流体体积的增加速率, 其连续方程可表示为:

$$\frac{d}{dt} \left(\int_V \frac{\rho_w}{\rho_w^o} s n dV \right) = - \int_S \frac{\rho_w}{\rho_w^o} s n \mathbf{n} \cdot \mathbf{V}_w dS \quad (4)$$

式中: $\mathbf{n}$ 为渗流面 S 的法线方向; $\mathbf{V}_w$ 为流体的平均流速; ρ_w^o 为流体参照密度.

在上述应力平衡方程和渗流连续方程的基础上, ABAQUS 采用 Galerkin 有限元格式, 将节点位移和孔隙水压力作为节点自由度进行空间离散, 形成应力平衡方程和渗流连续方程的矩阵形式. 在同时满足位移边界和渗流边界的条件下, 直接对耦合控制方程进行求解.

1.3 墙体坝体接触与渗流计算

1.3.1 接触模拟 防渗墙与坝体土之间的接触采用 ABAQUS 提供的接触单元进行模拟, 包含接触面的法向作用和切向作用. 接触面的法向模拟采用硬接触^[10], 即两物体只有在压紧状态时才能传递法向压力 p , 若两物体之间有间隙时则不能传递法向应力. 接触面的切向作用采用库仑摩擦模型, 用摩擦系数 μ 来模拟两个表面之间的摩擦. 当接触面处于闭合状态 (即有法向接触压力) 时, 接触面可以传递切向应力 (摩擦力). 设定极限剪应力 $\tau_{crit} = \mu p$. 若摩擦力小于某一极限值 τ_{crit} 时, 认为接触面处于粘结状态; 若摩擦力大于 τ_{crit} 后, 接触面开始出现相对滑移变形, 称为滑移状态.

1.3.2 渗流模拟 为实现整个计算域的渗流场与应力场耦合计算, 必须采用能够考虑渗流与应力耦合作用的接触单元. 接触面单元渗流模式如图 1 所示. 本文采用的接触单元, 除满足上述传力机理外, 还满足以下渗流条件: (1) 孔压在接触对应的实体上完全连续, 用公式表示为 $p_A - p_B = 0$, 其中 p_A , p_B 为接触面两侧节点上的孔隙水压力. (2) 接触面的切线方向无流体流动. (3) 接触面压力为有效压力, 不包含孔隙水压力的作用.

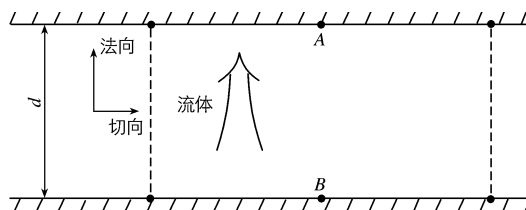


图 1 接触面单元渗流模式

Fig. 1 Flow patterns in the interface contact element

2 算例及分析

2.1 计算模型

针对土石坝除险加固工程中增建封闭式坝体混凝土防渗墙的情况, 为简化计算和方便理论对比, 本文以不透水岩基上的均质土坝中作为分析对象. 土坝坝高 30.0 m, 上、下游坝坡坡比均为 1:3, 防渗墙自坝顶嵌入至基岩, 墙厚 0.6 m, 正常蓄水位为 25.0 m. 正常蓄水工况下, 考虑水荷载作用, 上游坝坡设置水压荷载, 并设置相应的孔压边界条件; 下游坝坡设置为排水边界; 坝基为不透水边界. 求解所用的单元采用平面 4 节点孔压单元, 有限元计算网格如图 2 所示.

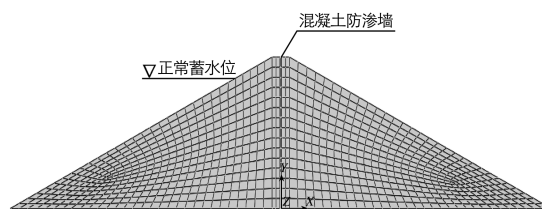


图 2 有限元网格

Fig. 2 Finite element mesh

土体采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 墙体材料为刚性混凝土, 采用线弹性模型. 主要计算参数如下: 土体干密度为 1 600 kg/m³, 刚性混凝土为 2 400 kg/m³; 土体弹性模量为 150 MPa, 混凝土为 2.55×10⁴ MPa; 土体泊松比为 0.3, 混凝土为 0.2; 土体黏聚力为 15.0 kPa, 内摩擦角为 30.0°, 渗透系数为 1×10⁻⁵ cm/s, 混凝土渗透系数为 1×10⁻⁷ cm/s.

2.2 计算结果

为探讨防渗墙与坝体相互作用的数值模拟方法和相互作用机理,在分析坝体应力、渗流及墙体应力分布情况的基础上,利用渗流理论公式对耦合计算的渗流场进行验证,同时对比分析是否考虑耦合时的计算结果.本文不考虑渗流与应力耦合时的计算条件为:仅考虑坝体迎水面水压力和重力荷载作用,不考虑坝体和墙体的渗流.ABAQUS中的应力计算以拉应力为正.

2.2.1 坝体应力 考虑耦合作用时,基于渗流与应力耦合计算的坝体竖向应力分布如图3(a)所示.可见,考虑耦合作用时的最大竖向有效应力为0.39 MPa,集中出现在防渗墙下游侧底部附近.防渗墙底部上、下游土体有效应力相差明显,且整体上坝体下游坡的土体有效应力大于上游坡.

不考虑渗流与应力耦合作用时的坝体应力分布如图3(b)所示.可见,不考虑耦合作用时的最大坝体竖向有效应力为0.41 MPa,与考虑耦合时的计算结果接近,但整体分布规律区别较大,此时的防渗墙底部上、下游土体应力基本相当.

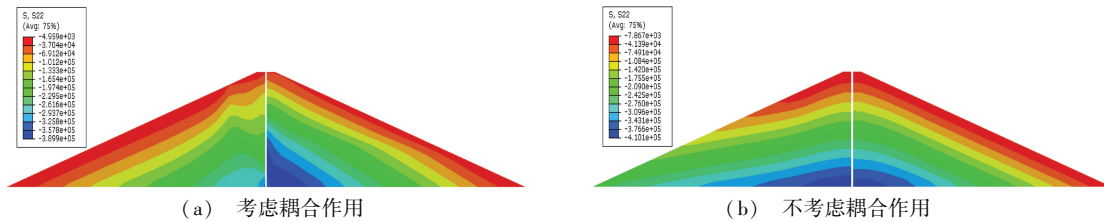


图3 坝体竖向有效应力分布

Fig.3 Vertical effective stress distribution of the dam

2.2.2 坝体孔压分布 渗流与应力耦合计算的坝体孔压分布如图4所示.图4中灰色区域为非饱和土,分界线为坝体浸润线位置.由于防渗墙的截渗作用,墙前后水头有明显突变,水头差约12.5 m.

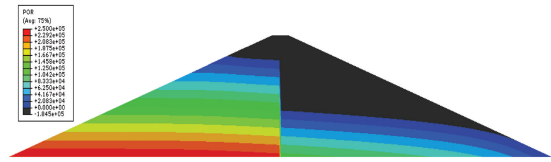


图4 坝体孔压分布

Fig.4 Pore pressure distribution of the dam

为验证耦合计算结果的合理性,利用渗流理论公式计算墙体前后浸润线高度.不透水地基上封闭式坝体防渗墙的渗流计算条件如图5所示.

根据图5中的计算条件,假设坝基为完全不透水,同时忽略防渗墙上游坝体的水头损失,并假定下游坝坡浸润线逸出点为下游坝面与下游水位交点(本文假定距坝脚水平方向1.0 m).根据水力学公式^[5],通过防渗墙的渗流量 Q_1 可以表示为:

$$Q_1 = \frac{K_c(H_1^2 - H^2)}{2T} \quad (5)$$

式中: K_c 为墙体混凝土渗透系数; H_1 为上游库水位,取25.0 m; H 为墙后水位(m),为待解未知量; T 为墙体厚度(0.6 m).同理,可以得出通过下游坝体的流量 Q_2 可表示为:

$$Q_2 = \frac{K_s(H^2 - H_2^2)}{2L} \quad (6)$$

式中: K_s 为下游坝体土渗透系数; H_2 为下游库水位,本文取为0 m; L 为下游坝坡渗流路径长度,本文近似取为89.0 m.

根据渗流平衡方程,有 $Q_1 = Q_2$,同时求解式(5)和(6)可得出墙后水头 $H = 12.0$ m,即墙体前后水头差为13.0 m.考虑到采用理论公式计算时墙前水头损失和下游逸出点位置等条件的假定,理论公式计算的墙体前后水头差与有限元耦合计算的结果(12.5 m)基本一致.综合坝体应力分析,说明本文所采用的孔压-位移耦

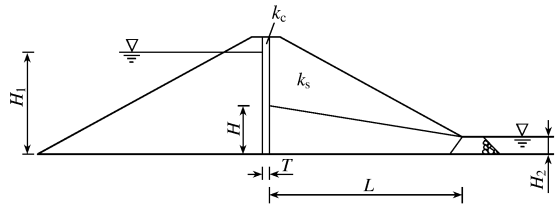


图5 防渗墙渗流计算

Fig.5 Seepage calculation of a cut-off wall

合接触单元能较好地实现防渗墙与坝体之间的渗流与应力传递。

2.2.3 墙体应力分布 考虑渗流与应力耦合时的墙体竖向应力沿墙身高度分布如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可见,刚性混凝土防渗墙的墙体最大应力出现在底部,迎水面受拉,背水面受压,最大拉应力和压应力分别为 2.92 和 1.32 MPa,说明墙体应力主要由弯矩引起,土体侧摩阻力对墙体应力贡献较小,墙体破坏由拉应力控制。防渗墙的中下部和底部弯矩较大,且其间弯矩方向发生改变,说明防渗墙主要承受中下部向下游方向的水平荷载作用。

结合图 3(a) 和图 4 的分析可知,该水平荷载主要由墙体上、下游水压力差引起的。可以进一步推断,对于不透水地基上的封闭式坝体防渗墙,在高坝或更高水位工况下刚性混凝土墙体会出现更不利的应力状态。

不考虑耦合时的防渗墙竖向应力分布如图 6(b) 所示。可见,不考虑耦合时墙体迎水面和背水面竖向应力均为受压状态,最大压应力(0.93 MPa)出现在背水面墙体底部,防渗墙底部承受一定的弯矩作用,但整体以土体侧摩阻力引起的竖向压应力为主。与图 6 相比,防渗墙应力的大小和分布规律均有明显差别,由于不能考虑墙体前后水压力差引起水平荷载的作用,计算出的墙体应力明显偏小,尤其是控制墙体破坏的拉应力。因此,忽略渗流作用,简单考虑迎水面水压力进行墙体应力计算是不安全的。

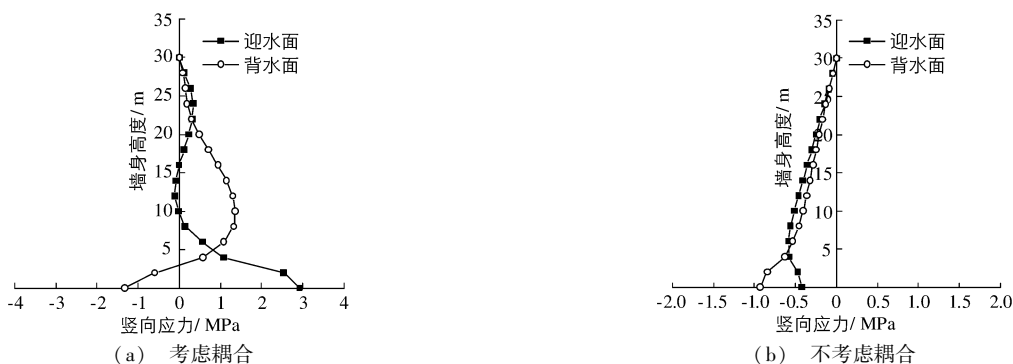


图 6 防渗墙竖向应力分布曲线

Fig. 6 Curves for vertical stress distribution of the wall

3 结 语

(1) 针对土石坝加固工程中增建的封闭式坝体防渗墙,本文在分析实际工程条件的基础上,建立了同时考虑墙-土接触和渗流-应力耦合共同作用的数值模型,实现了坝体渗流与墙体应力的直接耦合求解。分析结果表明,所采用的耦合数值模型能较好模拟防渗墙与坝体的相互作用,可为土石坝加固工程中的防渗墙应力及坝坡稳定计算提供参考。

(2) 不透水地基上封闭式坝体防渗墙的墙体应力主要由墙体前后水头差形成的水平荷载引起,最大压应力和拉应力均出现在墙体底部,通过土体传递的竖向侧摩阻力对刚性混凝土墙体应力的贡献相对较小。

(3) 是否考虑渗流与应力耦合,对计算结果影响较大,尤其是防渗墙应力,不考虑渗流作用的计算结果明显偏小。因此,针对不透水地基上封闭式坝体防渗墙的应力计算,应考虑墙体前后水头差对墙体应力的作用,否则计算结果偏于不安全。

(4) 针对一般土石坝加固工程中的封闭式坝体防渗墙,本文所采用的材料本构模型及简化条件对计算结果存在一定影响,但这并不影响相互作用机理和规律性的分析。

参 考 文 献:

- [1] 王刚,张建民,濮家骝. 坝基混凝土防渗墙应力位移影响因素分析[J]. 土木工程学报, 2006, 39(4): 73-77. (WANG Gang, ZHANG Jian-min, PU Jia-liu. An evaluation of the factors influencing the stress and deformation of concrete diaphragm wall in dams [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 73-77. (in Chinese))

- [2] 熊欢,王清友,高希章,等.沙湾水电站一期围堰塑性混凝土防渗墙应力变形分析[J].水力发电学报,2010,29(2):197-203. (XIONG Huan, WANG Qing-you, GAO Xi-zhang, et al. Stress deformation analysis of plastic concrete cutoff wall for the first stage cofferdam of Shawan hydropower station[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 197-203. (in Chinese))
- [3] 王清友,孙万功,熊欢.塑性混凝土防渗墙[M].北京:中国水利水电出版社,2008. (WANG Qing-you, SUN Wan-gong, XIONG Huan. Plastic concrete cutoff wall[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2008. (in Chinese))
- [4] 柴军瑞,仵彦卿.均质土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型[J].陕西水力发电,1997,13(3):4-7. (CHAI Jun-rui, WU Yan-qing. Research on mathematical model for coupled stress and seepage field in single-zone embankment dam[J]. Journal of Shanxi Water Power, 1997, 13(3): 4-7. (in Chinese))
- [5] 柴军瑞,李守义.大柳树水利枢纽坝区渗流场与应力场耦合分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(增刊2):2322-2325. (CHAI Jun-rui, LI Shou-yi. Analysis of coupled seepage and stress fields in rock mass around the Daliushu dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Suppl2): 2322-2325. (in Chinese))
- [6] 李宗坤,王鹏飞,赵凤遥.基于流固耦合理论的土石坝稳定性分析[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(3):44-47. (LI Zong-kun, WANG Peng-fei, ZHAO Feng-yao. Stability analysis of earth-rock fill dam based on fluid-solid coupling[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2009, 30(3): 44-47. (in Chinese))
- [7] 沈珠江,左元明.三峡工程二期混凝土防渗墙围堰初步设计方案的应力应变计算[J].长江科学院院报,1987(3):31-37. (SHENG Zhu-jiang, ZUO Yuan-ming. Stress and strain of the the cutoff wall preliminary design of Three Gorges Project's phase-II cofferdam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1987(3): 31-37. (in Chinese))
- [8] 段伟,骆原,陈珂,等.黄壁庄水库副坝渗流及防渗墙应力分析[J].人民黄河,2011,33(5):124-127. (DUAN Wei, LUO Yuan, CHEN Ke, et al. Analysis of stress of cutoff wall and seepage of the Huangbizhuang auxiliary dam[J]. Yellow River, 2011, 33(5): 124-127. (in Chinese))
- [9] 费康,张建伟.ABAQUS在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010. (FEI Kang, ZHANG Jian-wei. ABAQUS application in geotechnical engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))
- [10] ABAQUS Documentation. ABAQUS Theory Manual (Version 6.10)[M]. 2010.

Numerical simulation of interaction between cut-off wall and earth-rock dam based on coupling of seepage and stress

GAO Jiang-lin, CHEN Yun-xiang

(Jiangxi Provincial Institute of Water Science, Jiangxi Provincial Research Center on Hydraulic Structures, Nanchang 330029, China)

Abstract: The closed cut-off wall is widely used in the reinforcement projects of earth-rock dams. However, there are few studies of the closed cut-off wall. Further more, there are few studies of the interaction between the cut-off wall and the earth-rock dam, which consider the coupling effect of seepage and stress. In order to discuss the numerical simulation method and the principle of the wall-dam interaction in the reinforcement project, on the basis of analyzing the actual engineering conditions, a seepage and stress coupled numerical model is established by using ABAQUS. The contact of wall-dam together with the coupling of seepage-stress are taken into account in the model. The research results show that the model is feasible to simulate the interaction between the cut-off wall and the earth-rock dam, that the stress of the closed cut-off wall which is built in the earth-rock dam is mainly caused by horizontal load, and that simply ignoring the coupling effect may lead to unsafe calculation.

Key words: cut-off wall; earth-rock dam; interaction; numerical simulation; fluid solid coupling; finite element method; reinforcement project