

原创技术策源地

应力-渗流耦合效应下煤矿地下 水库坝体稳定性研究

Study on the Stability of Coal Mine Underground Reservoir Dam Under the
Coupling Action of Stress and Seepage

白丽伟¹, 吴迪², 唐志新³, 王洋³, 赵润康⁴

(1. 中色紫金地质勘查(北京)有限责任公司, 北京 100012; 2. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 哈密红石矿业有限公司, 新疆 哈密 839000; 4. 北京航空航天大学交通科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:通过耦合水力学方程和弹性力学基本方程,建立了煤矿地下水库坝体应力-渗流数学模型,将其导入 COMSOL Multiphysics 软件中分析煤矿地下水库坝体的渗透高度和安全系数随储水深度的演变规律。通过 COMSOL Multiphysics 研究不同储水深度对煤矿地下水库坝体稳定性的影响。结果表明:提高储水深度会导致煤矿地下水库坝体渗透高度升高,安全系数降低,不利于坝体维持稳定。

关键词:应力; 渗流; 煤矿地下水库坝体; 数值模拟

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2021)05-0001-06

Abstract: A mathematical model is established for the stress and seepage of a coal mine underground reservoir dam based on coupled hydraulic equations and basic equations of elasticity. The model is imported into COMSOL Multiphysics to analyze the evolution rules of water seepage height and safety factor of the dam as the change of water depth in the reservoir, and study the effect of different water depth on the stability of the dam. The results show that as the increase of water depth, the water seepage height is raised and the safety factor is decreased, which is unfavorable for the stability of the dam.

Key words: stress; seepage; coal mine underground reservoir dam; numerical modeling

1 前言

煤矿地下水库由采空区改造形成,主要包括储水(采空)区、取水设施和坝体(分为煤柱坝体和人工坝体)等部分,其具有蒸发量小、水质自净化(采空区岩体可以净化矿井水)和建设运行成本低的优点,它的运行可以很好解决矿井水外排至地面造成水资源大量浪费和破坏当地地表生态的问题^[1],从而有利于煤炭的可持续开发。与地面水库类似,坝体安全稳定是煤矿地下水库安全的核心,这主要是因为煤矿地下水库坝体受多种力(包括矿压和水压等)组合作用,一旦受到外界扰动(如矿震),

容易发生坝体垮塌,出现水库涌水事故,从而严重威胁到井下生产安全。因此,展开煤矿地下水库坝体稳定性研究变得尤为重要。而煤矿地下水库坝体的稳定性主要受应力场、渗流场以及两者的耦合影响,如受外部载荷(矿压和水压等)影响的应力场控制坝体变形,受动态水压(由储水量改变引起)影响的渗流场发生变化时,渗透力和孔隙压力发生改变,从而改变坝体应力状态。应力场和渗流场耦合作用体现在孔隙水压改变有效应力,应力的作用改变坝体渗透系数。

在应力和渗流对煤矿地下水库坝体稳定性影响研究方面,顾大钊等^[2]通过相似试验和数值模拟研究了煤矿地下水库煤柱坝体对外界动力扰动的响应行为。白东尧等^[3]通过数值模拟研究了储水区水压对煤柱坝体塑性区宽度、垂直应力峰值和渗流速度的影响。张国恩^[4]根据强度准则校核了煤矿地下水库人工坝体强度,确定了人工坝体的临界安全

[作者简介] 白丽伟(1982-),女,工程师,从事矿山工作。

[基金项目] 北京科技大学中央高校基本科研业务费项目;新疆维吾尔自治区高层次人才引进工程。

[引用格式] 白丽伟,吴迪,唐志新,等. 应力-渗流耦合效应下煤矿地下水库坝体稳定性研究[J]. 中国矿山工程,2021,50(5):1-6.

水头高度。白东尧等^[5]在忽略矿压和应力-渗流耦合作用的条件下,基于 Drucker-Prager 准则对煤矿地下水水库人工坝体所能承受的极限水头值以及易破坏位置进行了分析研究。在应力-渗流作用下煤矿地下水水库坝体稳定性研究方面,相关研究较少,且某些研究只考虑了煤矿地下水水库坝体受单场(如单一应力场或渗流场)作用时的响应行为,没有考虑双场耦合作用的影响。因此,本文通过耦合水力学方程和弹性力学基本方程,建立煤矿地下水水库坝体应力-渗流数学模型,并将其导入数值计算软件中,在此基础上分析应力和渗流对煤矿地下水水库坝体的耦合作用规律。

2 数学建模

现通过水力学方程和弹性力学基本方程,建立煤矿地下水水库坝体应力-渗流耦合数学模型,具体过程如下。

2.1 流体质量守恒方程

单位时间内流入单元体的流体质量等于单元体内储液量的增加,流体的质量守恒方程可表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(n\rho_w) = -\nabla(n\rho_w v_w) \quad (1)$$

式中: n ——介质孔隙率;

ρ_w ——流体密度;

v_w ——流体速度。

2.2 流体运动方程

根据达西定律,流体运动方程为

$$v_w = -\frac{k}{\mu_w}(\nabla P + \rho_w g) \quad (2)$$

$$H = \frac{P}{\rho_w g} + z \quad (3)$$

式中: k ——渗透系数;

μ_w ——流体黏滞系数;

P ——孔隙压力;

H ——总水头;

z ——位置高程。

2.3 有效应力

根据 Biot 有效应力的定义,有效应力可表示为^[6]

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} + \alpha \delta_{ij} P \quad (4)$$

式中: σ'_{ij} ——有效应力;

σ_{ij} ——总应力张量;

δ_{ij} ——Kronecker 符号;

α ——Biot 系数。

2.4 本构方程

在孔隙压力条件下,胡克定律表示为^[7]

$$\varepsilon_v = \frac{(1+\mu)\sigma'_{ij}}{E} - \frac{\mu\sigma_{kk}\delta_{ij}}{E} \quad (5)$$

式中: ε_v ——体积应变;

E μ ——介质的弹性模量、泊松比。

2.5 平衡方程

考虑孔隙压力的影响,平衡方程为^[8]

$$(\lambda + G)\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x_i} - G\nabla^2 u_i + \alpha \frac{\partial P}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (8)$$

$$\varepsilon_v = \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (9)$$

式中: λ 、 G ——拉梅常量;

u_i ——体积变形。

2.6 应力场对渗流场的影响

应力场对渗流场的影响主要体现在应力对渗透系数的影响,具体关系为^[9]

$$k = k_0 e^{-a(\sigma - \gamma H)} \quad (10)$$

式中: k_0 —— $\sigma = \gamma H$ 时的渗透系数;

a ——常数,由试验获得;

γ ——水的体积力。

3 数值计算及结果分析

3.1 数值计算

现运用数值模拟软件 COMSOL Multiphysics,通过强度折减法对处于不同工况(有无上覆岩层、不同储水深度)的煤矿地下水水库坝体稳定性进行计算分析。COMSOL Multiphysics 是一款以有限元法为基础,通过求解偏微分方程(单场)或偏微分方程组(多场)来实现真实物理现象仿真的数值模拟软件。多(单)物理场的本质就是偏微分方程(PDE),偏微分方程反映了最基本的科学规律,所以只要是可以用偏微分方程组描述的物理现象,COMSOL Multiphysics 都能够很好的计算、模拟和仿真^[10]。将建好的数学模型导入到 COMSOL Multiphysics 中,并对在建模过程中用到的达西定律模块和固体力学模块输入初始条件、材料属性和其他参数,具体数值见表 1,需要特别说明的是:为了提高计算效率和计算结果可视度,对有覆岩情况时的覆岩 1(表层岩体)和底板使用了半无限域条件。图 1 所示为已经

参数输入完毕后的几何模型网格剖分图,最终将对 COMSOL Multiphysics 计算结果进行分析。

表1 软件中输入的参数和初始条件

参数或初始条件	无覆岩	有覆岩
参数扫描初始安全系数	1	1
参数扫描安全系数步长	0.02	0.02
参数扫描最终安全系数	7	2
覆岩(或底板)左右端面	对称	对称
覆岩1(或底板)	半无限域	半无限域
储水深度 H/m	8、7、6、5、4、3、0	8、7、6、5、4、3、0
水力传导率 $/m \cdot s^{-1}$	变量	变量
流体密度 $/kg \cdot m^{-3}$	1000	1000
整体几何域	重力	重力
初始压力/Pa	0	0
覆岩1—覆岩3、坝体和底板密度 $/kg \cdot m^{-3}$	无、无、无、1320、2450	1700、2450、2410、1320、2450
覆岩1—覆岩3、坝体和底板内聚力/MPa	无、无、无、13.5、41.83	0.02、7.07、6.46、1、7.07
覆岩1—覆岩3、坝体和底板内摩擦角 $/^\circ$	无、无、无、30、38	20、38、38、30、38
覆岩1—覆岩3、坝体和底板弹性模量/GPa	无、无、无、13、13.2	12、13.2、13.16、13、13.2
覆岩1—覆岩3、坝体和底板泊松比	无、无、无、0.26、0.18	0.3、0.18、0.2、0.26、0.18
覆岩2—覆岩3和坝体厚度/m	无、无、9	12、18、9
储水边界	边界载荷(水压 P)	边界载荷(水压 P)
底板底面	固定约束	固定约束
整体几何域	承受重力和外部孔隙压力 P	承受重力和外部孔隙压力 P
其他边界	自由	自由

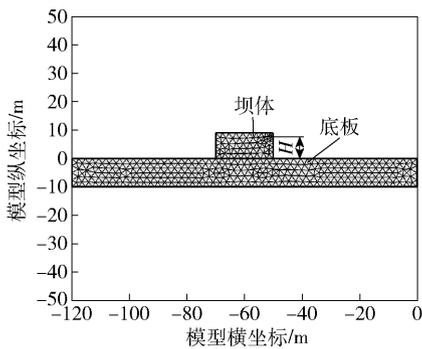


图1 COMSOL Multiphysics 中没有上覆岩层条件下的坝体网格剖分图

3.2 结果分析

图2和图3所示分别反映了储水深度与渗透高度、安全系数的关系。从图中可以看出:随着储水深度的增加,坝体的渗透高度增大,安全系数降低。这主要是因为储水深度的增加导致渗透压力增大,后者的增大一方面有利于坝体的微孔隙扩张,使得渗流范围扩大,渗透高度升高,另一方面使得坝体受力增加,更容易发生失稳破坏,从而安全系数减小。从图2和图3也可以看出:同样储水深度下,与有覆岩条件下的坝体相比,无覆岩条件下的坝体渗透高度值和安全系数值更大。这是因为:上覆岩层的存在

一方面使得坝体所受应力增大,坝体微孔隙闭合,渗透系数减小(式(10)),渗透高度降低;另一方面,坝体在上覆岩层的作用下更容易发生失稳破坏,从而与无上覆岩层条件相比,其安全系数较小。从图2和图3还可以看出:坝体的渗透高度、安全系数与储水深度成三次型函数关系,且上覆岩层存在与否,对三次型函数相应的系数值有一定影响。

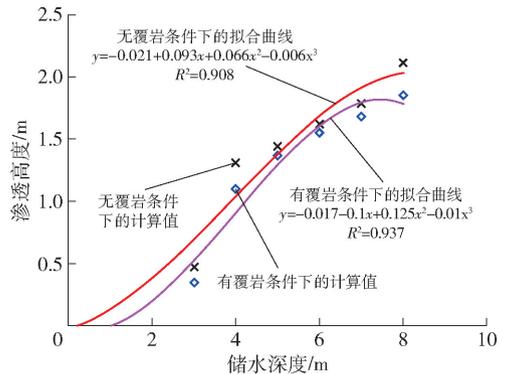


图2 储水深度和渗透系数关系

由以上分析可知:煤矿地下水库坝体稳定性受应力和渗流影响,且在分析坝体稳定性时,应力和渗流之间的耦合作用不可忽略;提高煤矿地下水库储水深度会导致坝体渗透高度升高,安全系数降低,这

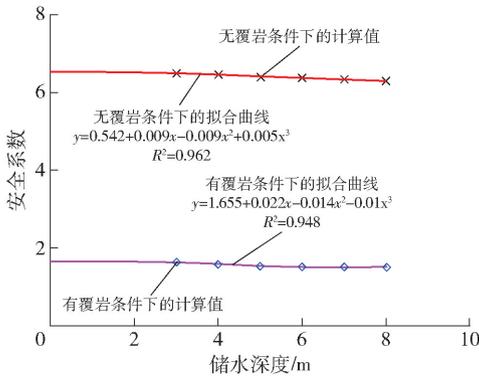


图3 储水深度和安全系数关系

都不利于坝体维持稳定。

为了进一步了解应力、渗流以及两者的耦合作用对煤矿地下水库坝体稳定性的影响,现选取有覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的煤矿地下水库坝体为研究对象,通过与无覆岩、8 m 储水深度,以及有覆岩、0 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体进行对比,来进行分析说明,具体如图4至图13所示。

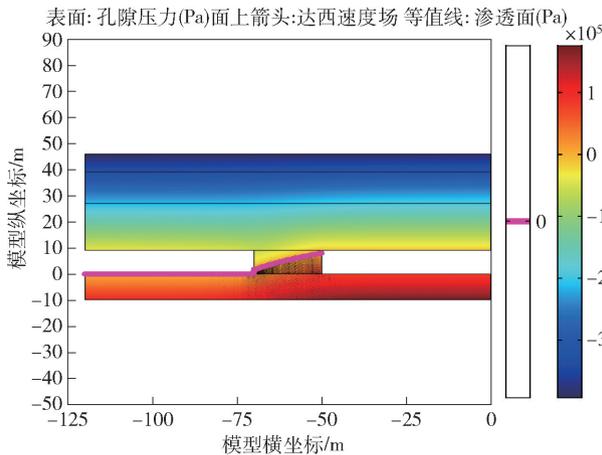


图4 有覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体孔隙压力、达西速度和渗流面分布

由图4和图8可知:坝体底板在储水一侧(右侧)承受上覆水压的作用,导致其孔隙压力明显高于不储水的另一侧(左侧);由于底板的孔隙率和渗透系数较小,其渗流量明显小于孔隙率和渗透系数更大的煤柱坝体的渗流量;与没有上覆岩情况相比,上覆岩层的存在使得坝体和底板所受应力增大,微孔隙闭合,渗透系数减小(式(10)所示),坝体和底板渗流量减小;水流在渗透压力的作用下,由压力和入渗面积较大的储水一侧,渗透到压力和出渗面积较小的不储水另一侧,根据流体质量守恒方程(与式(1)形式有差别),水流集中程度提高。

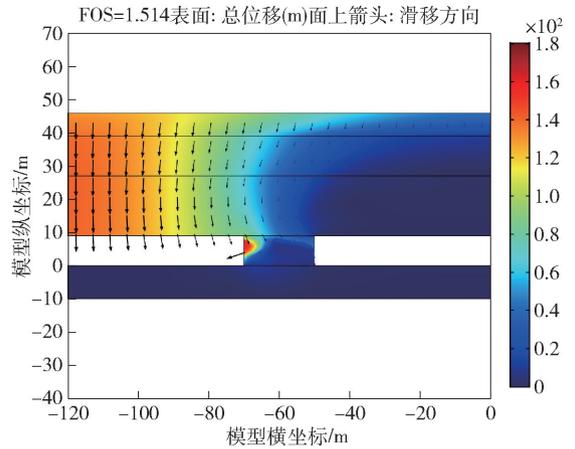


图5 有覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体总位移以及滑移方向分布

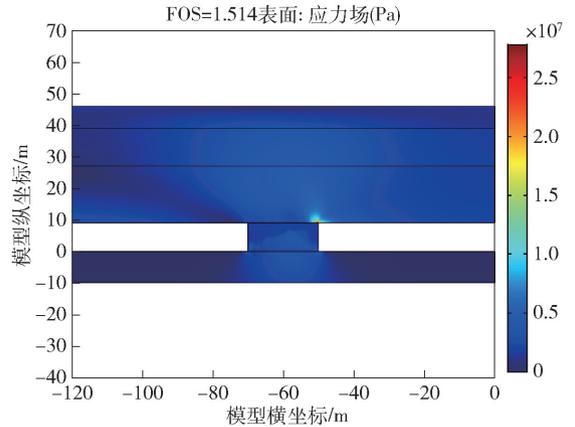


图6 有覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体应力分布

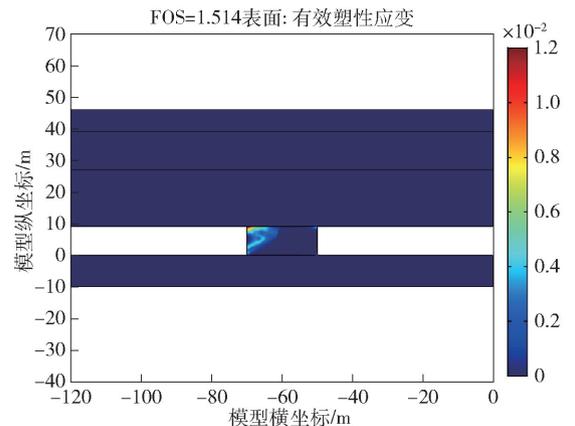


图7 有覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体有效塑性应变分布

如图6和图7所示,煤矿地下水库坝体在应力和渗流耦合作用下,坝顶右上角出现了应力集中,但却最终在坝体左侧破坏。这是因为在单纯应力(来源于上覆岩层)作用下,坝体会在四个角处发生应力集中,且靠近煤柱坝体底部的底板应力较高(图

11 所示),坝体最终形成“X 型”破坏(图 12 和图 13 所示),底板没有在应力较高的中间部分发生破坏,是因为中间部分处于三向受力状态,与存在自由面的煤柱坝体两侧相比,更加稳定),此时若有渗流作用,水体在流经煤柱坝体时,会承受部分应力,使得煤柱坝体相应区域的应力集中程度降低,同时,水体流经区域坝体的内摩擦角和抗剪强度增大,因此煤柱坝体更可能在没有水流经过的左侧(靠上)和右上角发生应力集中并破坏,且左侧由于非出渗面较大首先出现了塑性区并破坏失稳,坝体左侧相应区域的应力集中程度随之降低,因此,图 6 最终只显示煤柱坝体右上角发生应力集中。伴随着左侧坝体发生失稳破坏,左侧的上覆岩层由于失去了部分支撑,在重力和之上岩层的共同作用下,发生相应的弯曲下沉,具体如图 5 所示。

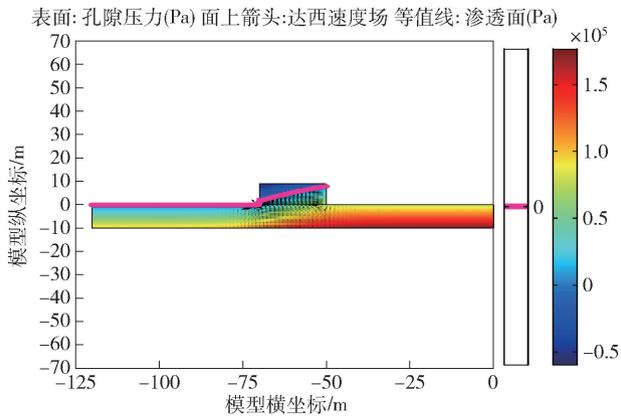


图 8 无覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体孔隙压力、达西速度和渗流面分布

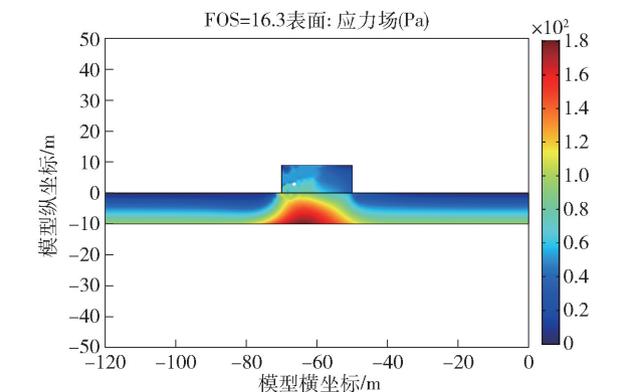


图 9 无覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体应力分布

与图 6 和图 11 类似,没有上覆岩层时,在坝体重力作用下,底板出现了近似对称的高应力区域,但由于储水一侧水体的作用,底板左侧应力有所降低,使其并非完全与坝体右侧的应力成对称分布(图 9

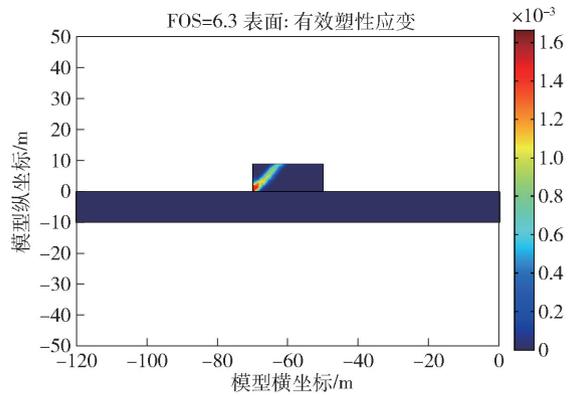


图 10 无覆岩、8 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体有效塑性应变分布

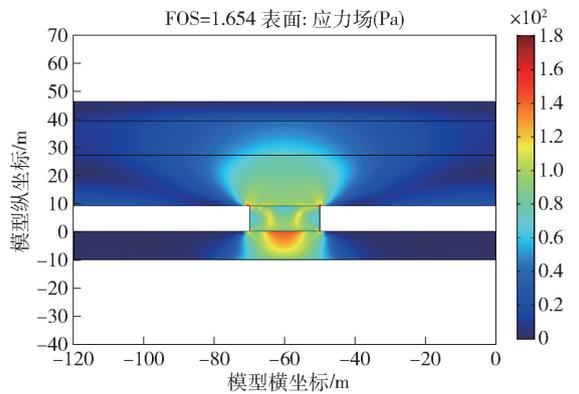


图 11 有覆岩、0 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体应力分布

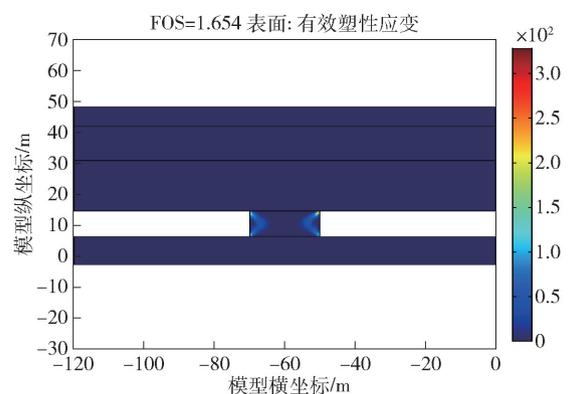


图 12 有覆岩、0 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体有效塑性应变分布

所示),底板没有在应力较高的中间部分发生破坏,是因为中间部分处于三向受力状态,与存在自由面的煤柱坝体左侧相比,更加稳定。坝体在自身重力和水体作用下(水体承受部分应力,水流经过区域应力集中程度降低,坝体的内摩擦角和抗剪强度增大),左侧形成类似地面水库坝体破坏时的塑性区(图 10 所示)。

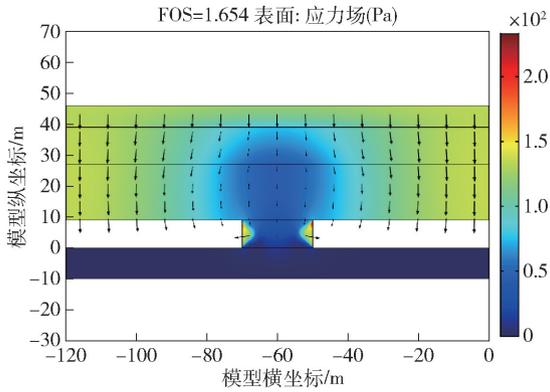


图 13 有覆岩、0 m 储水深度条件下、处于失稳时的坝体总位移以及滑移方向分布

4 结论

(1) 煤矿地下水库坝体稳定性受应力和渗流影响,且在分析坝体稳定性时,应力和渗流之间的耦合作用不可忽略,如应力改变坝体的渗透系数,水压(或水体)改变坝体的应力状态(或提高坝体内摩擦角和抗剪强度)等。

(2) 提高煤矿地下水库储水深度会导致坝体渗透高度升高,安全系数降低,这都不利于坝体维持稳定。因此,在煤矿地下水库实际运行过程中,必要时需采取相应的措施来提高其防渗性能和维稳性能,如加筑防渗墙、对易破坏区进行监测和加固等。

(3) 在应力和渗流耦合作用下,煤矿地下水库坝体更可能在右上角出现应力集中,并最终在左侧形成类似地面水库坝体破坏时的塑性区(或破坏区),这明显不同于无上覆岩层有渗流条件下坝体的应力分布,以及不同于有上覆岩层无渗流条件下坝体形成的“X型”破坏。

(4) 本文的研究结果有助于煤矿地下水库在满足稳定性和防渗性要求下,更好的发挥其储水功能。

同时可以为从理论方面进一步研究煤矿地下水库坝体应力-渗流耦合机制提供有益的借鉴,但由于实践中,煤矿地下水库坝体受多种其他动态因素作用(如矿震和储水量改变引起的动态水压等),所以后续仍需结合试验和现场实际情况对此进行更深入的探索和研究。

[参考文献]

- [1] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239-246.
- [2] 顾大钊, 颜永国, 张勇, 等. 煤矿地下水库煤柱动力响应与稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1589-1597.
- [3] 白东尧, 鞠金峰, 许家林. 煤矿地下水库煤柱坝体极限水头值研究[J]. 煤炭技术, 2017, 36(8): 184-186.
- [4] 张国恩. 煤矿地下水库人工挡水坝安全性分析[J]. 中国煤炭, 2014(S1): 78-81.
- [5] 白东尧, 鞠金峰, 许家林, 等. 李家壕煤矿地下水库人工坝体稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(7): 1839-1845.
- [6] Noorishad J, Tsang C F, Witherspoon P A. Coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in saturated fractured porous rocks: Numerical approach[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1984, 89(B12): 10365-10373.
- [7] 孙纳正. 地下水流的数学模型和数值方法[M]. 北京:地质出版社, 1981.
- [8] 贾善坡, 冉小丰, 王越之, 等. 变形多孔介质温度-渗流-应力完全耦合模型及有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(s2): 3547-3556.
- [9] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论[M]. 成都:西南交通大学出版社, 1995.