

水利水运工程学报

HYDRO-SCIENCE AND ENGINEERING

考虑非饱和渗流的谷幅变形对高拱坝影响分析

辛长虹，赵引

Analysis of the influence of valley width deformation on high arch dam considering unsaturated seepage

XIN Changhong, ZHAO Yin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210114003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

特高拱坝运行初期变形监测预报模型及构建方法

Deformation forecasting model and its modeling method of super high arch dams during initial operation periods

水利水运工程学报. 2020(5): 63 <https://doi.org/10.12170/20190908001>

特高拱坝动态安全风险分析系统研发及应用

Development and application of dynamic safety risk analysis system for super-high concrete arch dam

水利水运工程学报. 2020(1): 112 <https://doi.org/10.12170/20181201002>

高拱坝枢纽工程泄洪调度方式对雾化的影响分析

Analysis of influences of flood discharge dispatching modes on atomization by high arch dams

水利水运工程学报. 2019(4): 74 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.011>

基于改进小波阈值-EMD算法的高拱坝结构振动响应分析

Flow-induced vibration response analysis of high arch dam discharge structure based on improved wavelet threshold-EMD algorithm

水利水运工程学报. 2019(4): 83 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.04.012>

颗粒级配对非饱和红土土-水特征曲线的影响

Influences of different grain size contents on soil-water characteristic curve of unsaturated laterite based on fractal theory

水利水运工程学报. 2018(5): 103 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.015>

河谷宽高比对高心墙坝黏土垫层剪切强度的影响

Effects of width-height ratio of river valley on shear strength of clay layer in high core rockfill dams

水利水运工程学报. 2018(3): 103 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.014>



扫码进入官网，阅读更多精彩文章



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20210114003

辛长虹,赵引.考虑非饱和渗流的谷幅变形对高拱坝影响分析[J].水利水运工程学报,2021(4): 36-45. (XIN Changhong, ZHAO Yin. Analysis of the influence of valley width deformation on high arch dam considering unsaturated seepage[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 36-45. (in Chinese))

考虑非饱和渗流的谷幅变形对高拱坝影响分析

辛长虹,赵引

(河海大学 力学与材料学院, 江苏南京 210098)

摘要:蓄水初期谷幅变形对拱坝当前工作性态和长期安全状况的影响是坝工界和学术界面临的新课题。针对我国锦屏一级拱坝蓄水期间出现的谷幅收缩问题,基于非饱和渗流分析理论,采用非线性有限元数值分析方法,通过对裂隙岩体吸湿曲线进行敏感性分析,研究了非饱和渗流过程中的谷幅变形规律,并分析了谷幅变形对大坝位移和应力的影响。结果表明:在非饱和渗流场作用下,两岸边坡向河谷中心变形,且上游比下游的谷幅变形值大。随着水位的升高,谷幅变形值不断增大,当渗流场达到饱和时谷幅收缩值最大。在非饱和渗流过程中坝体位移和应力的分布规律基本保持不变,但随水位的升高坝体最大顺河向位移和最大主压应力略有减小,最大主拉应力略有增加。谷幅收缩对坝体产生挤压作用,导致坝体最大顺河向位移减小,最大主拉应力由坝踵向坝肩上游侧转移,下游面高压应力区向拱冠梁中部扩展,且饱和渗流场对拱坝位移和应力的影响比非饱和渗流场明显,但渗流场作用的谷幅变形对坝体位移和应力的改变有限,不会影响坝体的整体稳定性。

关键词:非饱和渗流;吸湿曲线;谷幅变形;特高拱坝

中图分类号: TV311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2021)04-0036-10

近年来,小湾、溪洛渡、锦屏一级、乌东德等一批300 m级特高拱坝在我国西南地区建成并先后进入蓄水、运行阶段。我国西南地区地形地质条件复杂,水库蓄水后大多出现谷幅异常变形现象,即蓄水后两岸边坡向河谷中心收缩。相关文献资料^[1-3]显示,在蓄水初期或蓄水完成后,溪洛渡拱坝谷幅收缩高达87 mm,锦屏一级拱坝约为30 mm,李家峡拱坝为15~30 mm,二滩拱坝约为3.5 mm。加拿大Oldman拱坝、意大利Vajont拱坝、日本黑部拱坝等在蓄水后也出现了不同程度的谷幅收缩现象。

拱坝是高次超静定结构,对地基变形尤其是不均匀变形极为敏感^[4]。在谷幅收缩作用下,坝体可能产生局部开裂,形成渗漏通道,影响拱坝正常运行,甚至威胁大坝安全^[5]。如瑞士Zeuzier拱坝上游坝面开裂、意大利Beauregard拱坝下游坝面开裂、我国溪洛渡拱坝下游水垫塘开裂、二滩拱坝下游坝面开裂等都是蓄水期谷幅收缩引起坝体破坏的典型案例。因此,有必要对高拱坝蓄水期产生的谷幅变形及影响进行深入研究。

针对蓄水诱发的谷幅变形规律及其相关机制,许多学者已开展了相关研究。杨学超等^[3, 6-7]依据边坡监测数据对谷幅长期变形进行预测。杨杰等^[1, 8-9]针对谷幅收缩现象进行了分析。张国新等^[10]基于溪洛渡拱坝边坡监测数据的回归分析,指出谷幅变形主要是由近坝区水文地质条件改变所触发的岸坡蠕变变形形成。汤雪娟等^[11]采用增量荷载法研究了稳定渗流场对溪洛渡拱坝地基变形的影响,表明渗流场是引起谷幅收缩等现象的重要影响因素之一。杨强等^[12]提出了非饱和裂隙岩体的有效应力原理,并以Drucker-Prage准则的形式应用于锦屏一级拱坝中,发现库盆变形的计算结果与实际监测值基本一致。任青文等^[13]推导了

收稿日期: 2021-01-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51739006)

作者简介: 辛长虹(1996—),女,山东青岛人,硕士研究生,主要从事复杂环境下高拱坝的安全评估研究。

E-mail: xinchanghong1996@163.com

岩体在非饱和渗流-应力耦合作用下的控制方程, 并应用于圆柱试件和边坡入渗过程的变形分析, 认为饱和度的改变是引起岩体变形的重要因素之一。但目前的研究对谷幅变形的产生机制还没有定论, 也缺乏定量的分析; 谷幅变形对特高拱坝的应力变形影响也研究得较少。

相较于饱和渗流分析, 非饱和渗流更适合裂隙岩体入渗过程, 更能反映蓄水期坝体及山体异常变形现象。本文结合锦屏一级拱坝谷幅变形的监测资料, 利用有限元分析方法, 进行非饱和渗流过程中谷幅变形情况及对高拱坝位移和应力状态影响的研究。

1 非饱和渗流基本理论

1.1 非饱和渗流定律

在非饱和渗流场分析过程中, 孔隙介质的渗透系数与饱和度相关, 而饱和度通常被定义成基质吸力的函数。基质吸力即为孔隙介质的毛细管力, 可由负孔压来表示, 其与饱和度的函数关系称为吸湿曲线, 表达式^[13]如下:

$$s = \left[1 + \left(\frac{p_c}{a} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right]^{-m} \quad (1)$$

饱和度对渗透系数的影响可通过折减系数 k_s 来表示, 折减系数和饱和度的关系^[13]可表示为:

$$k_s = \sqrt{s} \left[1 - \left(1 - s^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (2)$$

式中: s 为饱和度; p_c 为基质吸力; a 、 m 为曲线参数, 对裂隙岩体而言, 可取 $a=1.0$ MPa, $0 < m < 1$ 。不同 m 取值时, 折减系数和饱和度的关系曲线如图 1 所示, 吸湿曲线如图 2 所示。

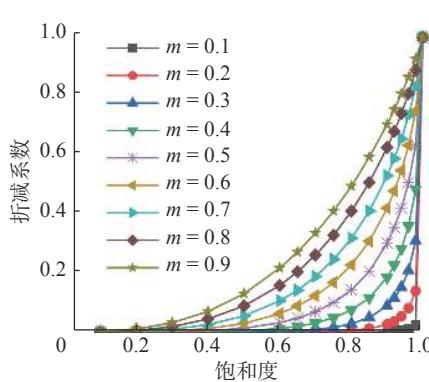


图 1 折减系数与饱和度的关系

Fig. 1 Relationship between reduction coefficient and saturation

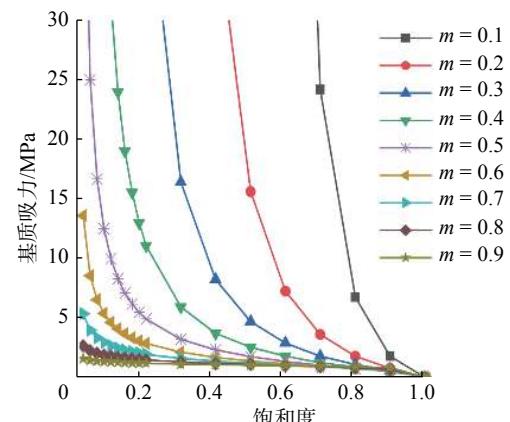


图 2 饱和度与基质吸力的关系

Fig. 2 Relationship between saturation and matric suction

因此, 孔隙介质非饱和状态下的渗透系数和达西定律可表述为:

$$\bar{k} = k_s k \quad (3)$$

$$\vec{v} = \bar{k} J = -\bar{k} \nabla H \quad (4)$$

式中: k 、 \bar{k} 分别为饱和、非饱和状态下的渗透系数; \vec{v} 为矢量渗流速度; J 为水力梯度; H 为孔隙介质水头; ∇ 为拉普拉斯算子。

1.2 非饱和渗流数学模型

孔隙介质中流体运动的微分方程可根据达西定律和质量守恒定律进行推导。根据质量守恒定律, 非饱和孔隙介质的连续性方程^[14]可表示为:

$$\frac{\partial(\rho n s)}{\partial t} + \left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] = 0 \quad (5)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的渗流速度; ρ 为水的密度; n 为孔隙比。

当不考虑孔隙介质中水的压缩性时, 体积变化量可表示为:

$$\frac{\partial(\rho n s)}{\partial t} = -\rho \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (6)$$

联合达西定律, 并忽略位置水头的影响, 可得到非饱和渗流微分方程:

$$\rho g \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \bar{k} \left[\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial u_w}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial u_w}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{\partial u_w}{\partial z} \right] = 0 \quad (7)$$

式中: ε_v 为孔隙介质的体积应变率; u_w 为孔隙水压。

利用非饱和渗流微分方程, 结合给定的初始条件和边界条件, 即可确定非饱和渗流场的分布。

1.3 Drucker-Prage 准则

在进行弹塑性计算时, 脆性材料的屈服准则采用 Drucker-Prage 系列准则中的 DP1 准则(M-C 外角点外接圆), 表达式^[15]如下:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad (9)$$

$$K = \frac{6c\cos\varphi}{\sqrt{3}(3-\sin\varphi)} \quad (10)$$

式中: α 、 K 为关于黏聚力 c 和内摩擦角 φ 的参数; I_1 为应力张量的第一不变量; J_2 为应力偏张量的第二不变量。

2 锦屏一级高拱坝有限元模型

2.1 三维有限元网格

锦屏一级拱坝有限元模型的坐标系为: x 轴正向指向左岸, y 轴正向指向上游, z 轴正向竖直向上, 顶拱上游面与拱冠梁的交点为坐标原点 O , 如图 3 所示。模型的横河向范围: 自拱坝中心线向左右两岸各延伸 2 倍坝高, 共宽 1 220 m; 顺河向范围: 自坝轴线向上游延伸 1 倍坝高, 向下游延伸 2 倍坝高, 共长 915 m; 铅直向范围: $\nabla 1 450$ m~ $\nabla 2 100$ m, 其中, 坝底 $\nabla 1 580$ m, 坝顶 $\nabla 1 885$ m。坝体沿厚度剖分 8 层, 沿高度剖分 26 层。有限元网格全部采用等参八节点六面体和六节点五面体单元, 节点总数 66 689, 单元总数 61 620, 其中坝体单元数 6 005。基本模拟了大坝的结构特征、地形地貌、岩体构造(包括左岸断层 F5、F8、F42-9、煌斑岩脉 FX 和右岸断层 F13、F14)、坝肩垫座及防渗帷幕。断层及岩脉的分布位置如图 4 所示, 防渗帷幕布置情况如图 5 所示。

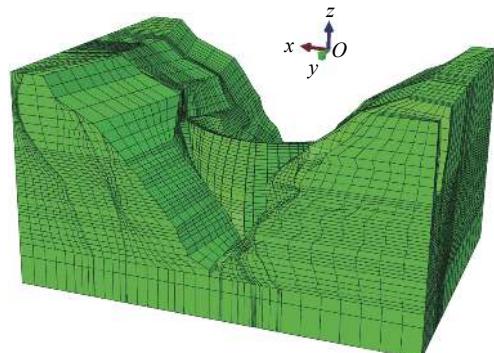


图 3 锦屏一级拱坝有限元网格

Fig. 3 Finite element mesh of Jinping I arch dam

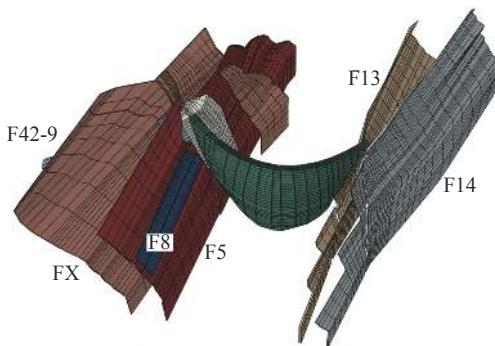


图4 锦屏一级拱坝断层及岩脉分布示意

Fig. 4 Distribution of faults and dikes of dam

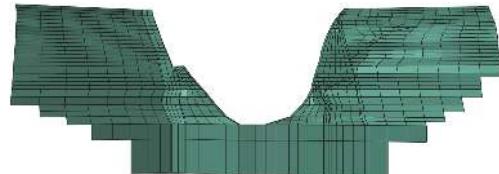


图5 锦屏一级拱坝防渗帷幕布置

Fig. 5 Distribution of anti-seepage curtain of dam

2.2 材料参数

锦屏一级拱坝弹塑性计算使用的各类材料参数如表1所示。在进行渗流场分析时,不考虑坝体、垫座、建基面和防渗帷幕等混凝土材料的渗透性。

表1 材料的物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of the material

材料类型	变形模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)	黏聚力/MPa	摩擦系数	渗透系数/(m·s ⁻¹)
坝体、垫座、防渗帷幕	24.00	0.17	2 400	1.64	1.00	0
Ⅱ类岩体	26.00	0.20	2 700	2.00	1.35	2.78×10^{-10}
Ⅲ1类岩体	11.50	0.25	2 700	1.50	1.07	1.68×10^{-10}
Ⅲ2类岩体	6.50	0.28	2 700	0.90	1.02	5.79×10^{-9}
F5、F8、F42-9	0.40	0.38	1 900	0.02	0.30	2.27×10^{-6}
F13、F14	0.40	0.38	1 900	0.02	0.30	4.83×10^{-7}
FX	6.50	0.28	2 700	0.90	1.02	2.27×10^{-6}

2.3 计算工况

考虑到谷幅变形的时效特点,按不考虑渗流场(工况1)、考虑非饱和渗流场(工况2)及考虑饱和渗流场(工况3)共3种工况进行研究。同时考虑到蓄水期水位的变化,结合锦屏的4个蓄水阶段,工况2又分为2-H1、2-H2、2-H3和2-H4共4种情况。具体计算工况及荷载组合见表2。

表2 计算工况及荷载组合

Tab. 2 Calculation cases and load combinations

计算工况	地应力	静水压力	自重	温降荷载	渗流状态	渗流水位/m
1	√	√	√	√	无渗流	＼
2-H1	√	√	√	√	非饱和	▽1 710
2-H2	√	√	√	√	非饱和	▽1 800
2-H3	√	√	√	√	非饱和	▽1 840
2-H4	√	√	√	√	非饱和	▽1 880
3	√	√	√	√	饱和	▽1 880

3 非饱和渗流场作用的谷幅变形分析

3.1 吸湿曲线对谷幅变形的影响

为能较好反映非饱和渗流场引起的谷幅变形情况,采用最高渗流水位1 880 m,借助图6中的3个剖面(y轴坐标依次为50、-150、-300 m),取各剖面位置河谷面上从右岸到左岸的34个节点,来分析谷幅变形对吸湿曲线的敏感性。河谷面节点分布如图7所示。

图8为采用不同吸湿曲线时非饱和渗流场引起的各剖面谷幅变形。由图8可知,在横河向-90~30 m的范围内,参数m的取值对谷幅变形的影响很小,可忽略不计;但该范围以外,同一位置的谷幅变形随参数

m 的增大明显减小。不同曲线参数下, 谷幅变形基本呈收缩状态, 但当参数 m 超过 0.6 时, 在坡顶出现一定程度的谷幅扩张变形, 且参数 m 越大扩张现象越明显。由此可见, 吸湿曲线的参数对谷幅变形影响较大, 应该慎重选择。

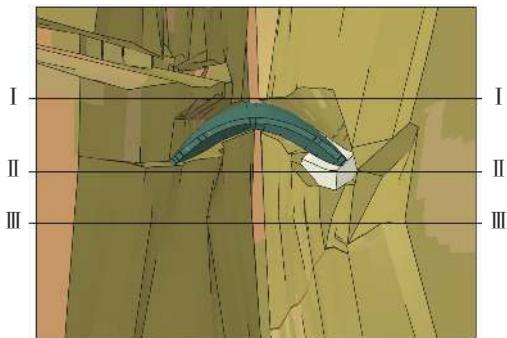


图 6 锦屏一级拱坝边坡剖面位置分布

Fig. 6 Distribution of slope profile of dam

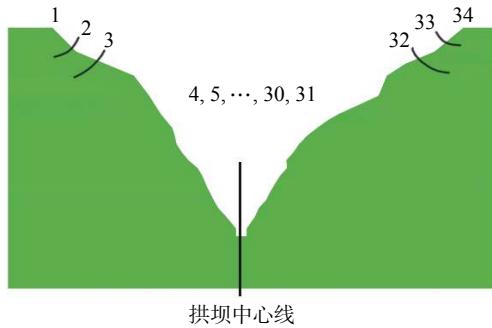


图 7 河谷面节点分布

Fig. 7 Distribution of nodes on valley surface

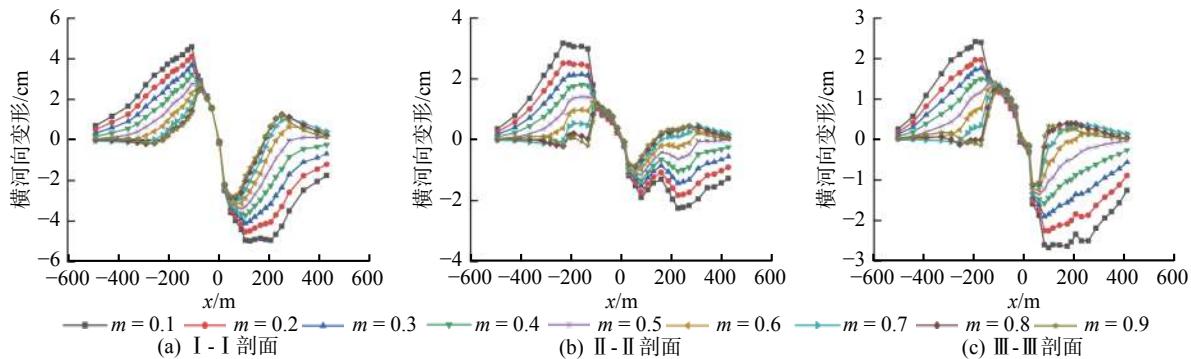


图 8 吸湿曲线对谷幅变形的影响

Fig. 8 Influence of absorption curve on valley width deformation

3.2 蓄水期谷幅变形规律

根据锦屏一级拱坝坝址区的边坡地质条件与温度场变化情况, 渗流场是影响其谷幅变形的主要因素^[12]。在 3.1 节谷幅变形对吸湿曲线敏感性分析的基础上, 将锦屏一级拱坝典型谷幅测线的横河向位移计算值与蓄水期监测数据^[16]进行对比, 如表 3 所示。可见, $m=0.5$ 的吸湿曲线更适合锦屏一级拱坝边坡岩体的非饱和渗流场分析。

表 3 典型谷幅测线位移监测值与计算值对比

Tab. 3 Monitoring and calculated transverse displacement of valley width measuring lines

单位: cm

谷幅测线	位移监测值	位移计算值								
		$m=0.1$	$m=0.2$	$m=0.3$	$m=0.4$	$m=0.5$	$m=0.6$	$m=0.7$	$m=0.8$	$m=0.9$
PDJ1-2-TPL19	-1.62	-8.01	-6.57	-5.10	-3.63	-2.15	-0.76	0.40	1.03	1.06
TP11~TPL5	-0.96	-7.36	-5.79	-4.32	-2.85	-1.42	-0.12	0.88	1.33	1.28
PD21-3-PD42-2	-0.76	-5.45	-4.23	-3.17	-2.13	-1.12	-0.20	0.49	0.74	0.57

在 $m=0.5$ 的基础上, 分别计算工况 2-H1、工况 2-H2、工况 2-H3、工况 2-H4 的渗流场, 研究非饱和渗流过程中谷幅变形规律。图 9 为非饱和渗流过程中不同水位下各剖面的谷幅变形。由图 9 可知, 在非饱和渗流场作用下, 两岸边坡向河谷变形, 且上游谷幅变形相对下游偏大, 坝基处谷幅变形介于上下游变形之间。在各剖面, 各谷幅变形曲线的变化趋势基本一致, 极值点大致相同; 在同一位置, 谷幅变形值随渗流水位的升高而增大; 在极值点处, 不同水位间的谷幅变形差值最大, 向两岸延伸差值逐渐减小。最大谷幅变形发生在 I - I 剖面的 $\nabla 1700$ m 高程, 两岸相对收缩值为 6.79 cm。此外, II - II 剖面穿过左岸坝肩混凝土垫座, 垫座对谷幅变形起到一定的抑制作用, 且水位越高影响效果越明显。

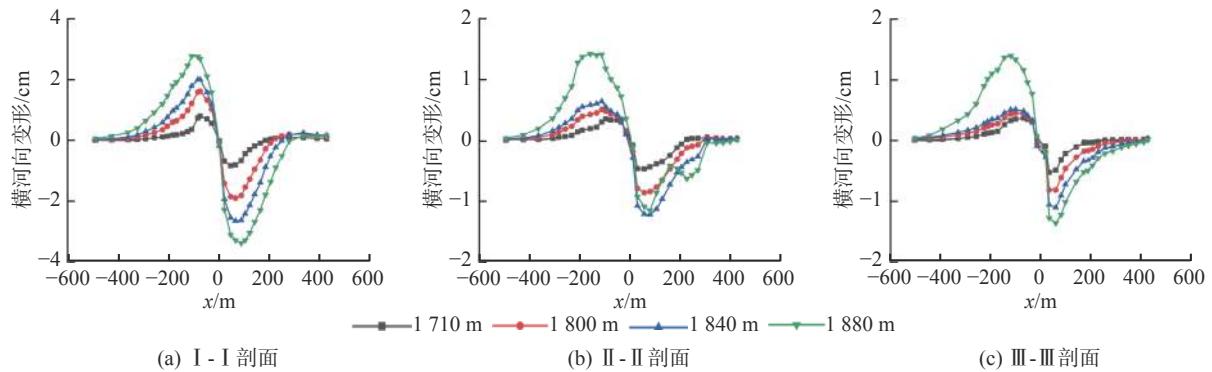


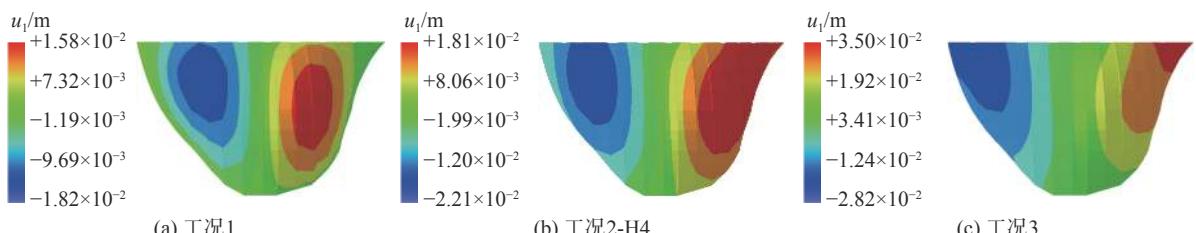
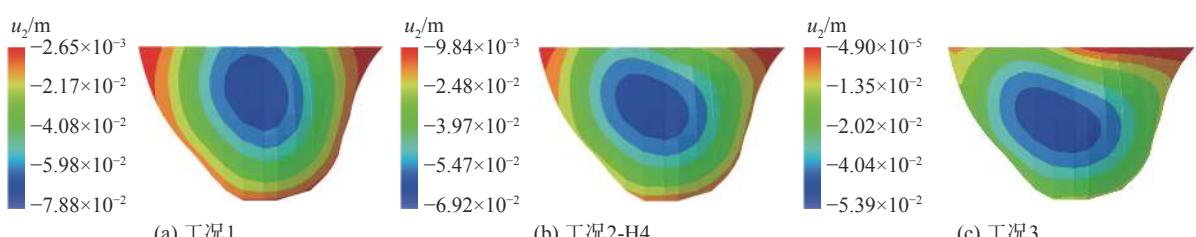
图9 渗流水位对谷幅变形的影响

Fig. 9 Influence of seepage water level on valley width deformation

4 谷幅变形对拱坝的影响

4.1 对坝体位移的影响

根据谷幅变形计算结果, 饱和渗流场引起的谷幅变形大于非饱和渗流场的变形。而在非饱和渗流过程中, 坝体位移和应力的分布规律基本保持不变, 但量值略有差别。随着渗流水位的升高, 坝体最大顺河向位移和最大主压应力逐渐减小, 最大主拉应力逐渐增大。因此, 以工况1、2-H4和3为例, 对比分析渗流场引起的谷幅变形对拱坝位移和应力的影响。如图10~11所示, 考虑谷幅变形后, 拱坝的位移分布规律与正常工况(工况1)基本一致, 但横河向位移值略有增加, 顺河向位移值略有减小。随谷幅变形的增加, 坝体最大横河向位移逐渐增大, 且位置逐渐向两岸坝肩移动; 最大顺河向位移仍然出现在拱冠梁下游面, 但量值从正常工况的7.88 cm减小到考虑非饱和渗流场的6.96 cm和考虑饱和渗流场的5.39 cm。由此可见, 谷幅变形对坝体产生挤压作用, 导致坝体向上游变形, 且谷幅变形越大, 坝体向上游变形的趋势越明显。

图10 坝体横河向位移 u_1 Fig. 10 Comparison of displacement of dam in x direction图11 坝体顺河向位移 u_2 Fig. 11 Comparison of displacement of dam in y direction

此外, 谷幅变形对坝基位移的影响也比较明显。现以下游坝面为例, 统计坝基位移变化规律。由图12可知, 考虑谷幅变形后, 坝基横河向变形依旧成反对称分布, 但变形方向与正常工况相反, 且位移峰值从坝

中移到了坝顶; 坝基顺河向位移均有所增加, 且左岸变化更为明显, 这可能与左岸不良地质条件有关。相比于非饱和渗流场, 饱和渗流场引起的坝基横河向位移偏大, 且顺河向变形偏小。

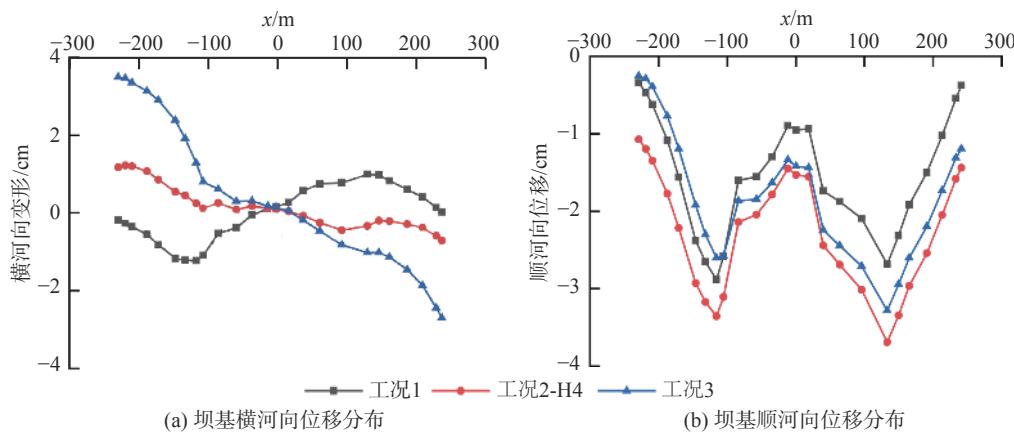


图 12 基础位移分布

Fig. 12 Comparison of displacements of dam foundation

4.2 对坝体应力的影响

图 13 给出了工况 1、工况 2-H4 和工况 3 的坝体最大主拉应力分布。由图 13 可知, 考虑谷幅变形后, 拱坝最大主拉应力仍然出现在上游面, 但位置由坝踵转移到左岸坝肩, 且量值也从正常工况的 2.15 MPa 减小到考虑非饱和渗流场的 1.50 MPa 和考虑饱和渗流场的 1.54 MPa。可见饱和渗流场产生的最大主拉应力略大于非饱和渗流场的。

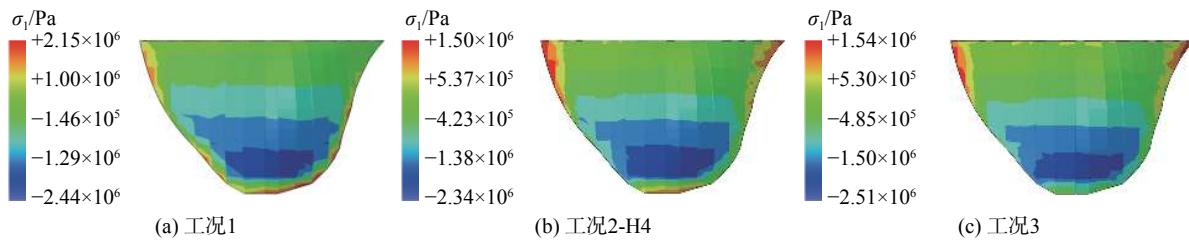


图 13 坝体最大主拉应力 σ_1

Fig. 13 Comparison of major principal stress of dam

图 14 对比了不考虑和考虑谷幅变形时, 坝体最大主压应力分布情况。由图 14 可知, 考虑渗流场引起的谷幅变形后, 坝体最大主压应力的位置基本固定在左岸坝肩的下游面, 但量值从正常工况的 18.10 MPa 减小到考虑非饱和渗流场的 17.64 MPa 和考虑饱和渗流场的 17.02 MPa; 下游坝面的高压应力区开始向拱冠梁中部转移, 且谷幅变形越大, 主压应力减小和转移的效果越明显。表 4 为各工况的坝体应力计算结果, 扣除建基面应力集中, 其大小基本满足规范要求。

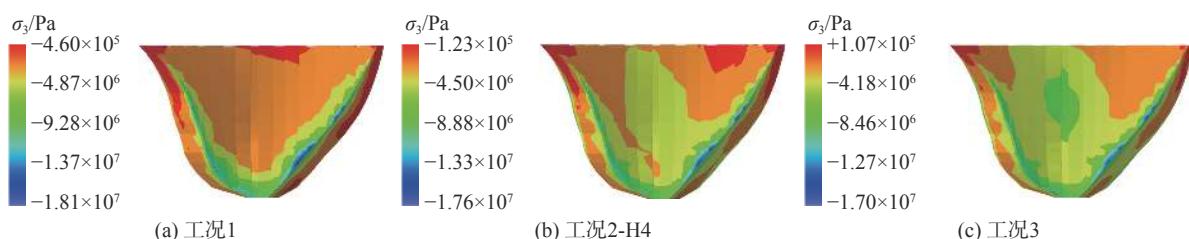


图 14 坝体最大主压应力 σ_3

Fig. 14 Comparison of minor principal stress of dam

表4 坝体应力计算结果
Tab. 4 Calculation results of stress of dam

工况	最大主拉应力/MPa	最大主拉应力位置	最大主压应力/MPa	最大主压应力位置
1	2.15	右拱端上游面、▽1 615 m	18.10	左拱端下游面、▽1 680 m
2-H4	1.50	左拱端上游面、▽1 830 m	17.64	左拱端下游面、▽1 740 m
3	1.54	左拱端上游面、▽1 820 m	17.02	左拱端下游面、▽1 740 m

5 结语

针对特高拱坝在蓄水初期出现的谷幅异常变形情况,以锦屏一级拱坝为例,通过对大坝进行精细化建模,从渗流场的角度研究了蓄水期谷幅变形规律,分析了渗流场产生的谷幅收缩对坝体位移和应力的影响,得到以下结论:

(1) 谷幅变形对吸湿曲线比较敏感,吸湿曲线关键参数 m 越大,谷幅变形值越小。当 $m=0.5$ 时,非饱和渗流场产生的谷幅变形更接近实际监测值。

(2) 在非饱和渗流场作用下,两岸边坡向河谷中心变形,且上游比下游的谷幅变形值大。随着水位升高,谷幅变形值不断增大,且饱和渗流场作用下的谷幅变形大于非饱和渗流场的。

(3) 在非饱和渗流过程中坝体位移和应力的分布规律基本保持一致,但随渗流水位的升高,坝体最大顺河向位移和最大主压应力逐渐减小,最大主拉应力逐渐增加。

(4) 渗流场引起的谷幅收缩对坝体产生挤压作用,导致坝体最大顺河向位移减小。谷幅变形越大,坝体向上游变形的量值越大。

(5) 渗流场引起的谷幅变形导致上游坝面高拉应力区向顶拱的左右拱端转移,下游坝面高压应力区向拱冠梁中部转移,但对应力大小影响有限,不会威胁拱坝安全。

参 考 文 献:

- [1] 杨杰, 胡德秀, 关文海. 李家峡拱坝左岸高边坡岩体变位与安全性态分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(19): 3551-3560. (YANG Jie, HU Dexiu, GUAN Wenhui. Analysis of high slope rock deformation and safety performance for left bank of Lijiaxia arch dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(19): 3551-3560. (in Chinese))
- [2] 杨强, 潘元炜, 程立, 等. 蓄水期边坡及地基变形对高拱坝的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(增刊2): 3979-3986. (YANG Qiang, PAN Yuanwei, CHENG Li, et al. Impounding influence of slope and foundation deformation on high arch dam[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(Suppl2): 3979-3986. (in Chinese))
- [3] 杨学超, 高克静, 赵文光, 等. 谷幅收缩变形对溪洛渡拱坝的安全影响分析[J]. *水利与建筑工程学报*, 2018, 16(1): 72-78. (YANG Xuechao, GAO Kejing, ZHAO Wenguang, et al. Influence of valley deformation on safety of Xiluodu arch dam[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2018, 16(1): 72-78. (in Chinese))
- [4] 钟大宁, 刘耀儒, 杨强, 等. 白鹤滩拱坝谷幅变形预测及不同计算方法变形机制研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(8): 1455-1463. (ZHONG Daning, LIU Yaoru, YANG Qiang, et al. Prediction of deformation of valley width of Baihetan arch dam and deformation mechanisms of several methods[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(8): 1455-1463. (in Chinese))
- [5] 胡江. 特高拱坝运行初期变形监测预报模型及构建方法[J]. *水利水运工程学报*, 2020(5): 63-71. (HU Jiang. Deformation forecasting model and its modeling method of super high arch dams during initial operation periods[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2020(5): 63-71. (in Chinese))
- [6] 周钟, 张敬, 薛利军. 锦屏一级水电站左岸边坡变形对拱坝安全的影响[J]. *人民长江*, 2017, 48(2): 49-54. (ZHOU Zhong,

ZHANG Jing, XUE Lijun. Effect of left abutment slope deformation on arch dam safety of Jinping I Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2017, 48(2): 49-54. (in Chinese)

- [7] 程立, 刘耀儒, 潘元炜, 等. 锦屏一级拱坝左岸边坡长期变形对坝体影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊2): 4040-4052. (CHENG Li, LIU Yaorou, PAN Yuanwei, et al. Research on influence of left bank slope's long-term deformation on dam body for Jinping I arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Suppl2): 4040-4052. (in Chinese))
- [8] 张冲, 王仁坤, 汤雪娟. 溪洛渡特高拱坝蓄水初期工作状态评价[J]. 水利学报, 2016, 47(1): 85-93. (ZHANG Chong, WANG Renkun, TANG Xuejuan. Safety evaluation of Xiluodu ultra-high arch dam during the initial impoundment period[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(1): 85-93. (in Chinese))
- [9] 梁国贺, 胡昱, 樊启祥, 等. 溪洛渡高拱坝蓄水期谷幅变形特性与影响因素分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(9): 101-110. (LIANG Guohe, HU Yu, FAN Qixiang, et al. Analysis on valley deformation of Xiluodu high arch dam during impoundment and its influencing factors[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(9): 101-110. (in Chinese))
- [10] 张国新, 程恒, 周秋景, 等. 高拱坝蓄水期谷幅时效变形机理分析[J]. 中国科技论文, 2019, 14(1): 77-84. (ZHANG Guoxin, CHENG Heng, ZHOU Qiujing, et al. Analysis of mechanism of valley creep deformation of high arch dam during impoundment[J]. China Sciencepaper, 2019, 14(1): 77-84. (in Chinese))
- [11] 汤雪娟, 张冲, 王仁坤. 渗流场作用的地基变形对高拱坝结构的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(增刊2): 645-650. (TANG Xuejuan, ZHANG Chong, WANG Renkun. Analysis on foundation deformation and its effect on of high-arch dam structure considering seepage filed[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Suppl2): 645-650. (in Chinese))
- [12] 杨强, 潘元炜, 程立, 等. 高拱坝谷幅变形机制及非饱和裂隙岩体有效应力原理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2258-2269. (YANG Qiang, PAN Yuanwei, CHENG Li, et al. Mechanism of valley deformation of high arch dam and effective stress principle for unsaturated fractured rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2258-2269. (in Chinese))
- [13] 任青文, 张林飞, 沈雷, 等. 考虑非饱和渗流过程的岩体变形规律分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(增刊2): 4100-4107. (REN Qingwen, ZHANG Linfei, SHEN Lei, et al. Analysis of deformation law of rock mass considering unsaturated seepage process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(Suppl2): 4100-4107. (in Chinese))
- [14] 王增欣. 土石坝饱和—非饱和渗流的有限元分析及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2010. (WANG Zengxin. The analysis and application of saturated-unsaturated seepage finite element about embankment dams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese))
- [15] 仇苏皖, 崔伟杰, 李振, 等. 边坡变形影响下锦屏一级拱坝安全性分析[J]. 水电能源科学, 2015, 33(7): 71-75. (QIU Suwan, CUI Weijie, LI Zhen, et al. Safety evaluation of Jinping I-level high arch dam under deformation of slope at left bank[J]. Water Resources and Power, 2015, 33(7): 71-75. (in Chinese))
- [16] 潘元炜. 蓄水期和运行期库盆变形机制及对高拱坝安全的影响[D]. 北京: 清华大学, 2015. (PAN Yuanwei. Reservoir deformation mechanism during impoundment and operationand its influence to safety of high arch dam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese))

Analysis of the influence of valley width deformation on high arch dam considering unsaturated seepage

XIN Changhong, ZHAO Yin

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The effect of valley width deformation during the initial impoundment stage on the subsequent working behavior and the long-term safety of an arch dam has become an increasingly important challenge faced by dam engineering and academia. This study aims to analyze the sensitivity of valley width deformation to the absorption curve of fractured rock mass to address the challenge of valley width reduction during impoundment of the Jinping I arch dam in China. The methods of unsaturated seepage analysis theory and nonlinear finite element numerical analysis were applied to study the law of valley width deformation during unsaturated seepage process. The influence of valley width deformation on the displacement and stress of the dam was analyzed. The results showed that the slope on both sides of the valley deformed towards the center under the action of the unsaturated seepage field. The deformation of valley width upstream exceeded that downstream. The valley width deformation increased with an increasing elevation of the water level, and maximum valley width reduction occurred in the saturated seepage field. The distribution of displacement and stress of the dam changed little during the unsaturated seepage process. However, the maximum longitudinal displacement and the minor principal stress of the dam decreased gradually with increasing elevation of the water level. There was a gradual increase in the major principal stress. The valley width reduction had a squeezing effect on the dam body, resulting in a decrease in the maximum longitudinal displacement, the transfer of the major principal tensile stress from the dam heel to the upstream side of the dam abutment, and the extension of the high-pressure stress zone on the downstream surface to the middle of the crown cantilever. The influence of the saturated seepage field on the displacement and stress of the dam was more obvious than that of the unsaturated seepage field. However, the valley width deformation resulting from the seepage field had a limited effect on the displacement and stress of the dam, which would not affect the overall stability of the dam.

Key words: unsaturated seepage; absorption curve; valley width deformation; high arch dam