

软岩遇水软化膨胀特性及其对拱坝的影响

刘光廷, 胡 昱, 李鹏辉

(清华大学 水利水电工程系, 北京 100084)

摘要: 泥钙质胶结砾岩遇水后软化, 力学性质会发生较大变化, 其强度及刚度均大幅度降低; 同时, 软岩吸水后会膨胀。首先, 通过试验研究泥钙质胶结砾岩在自由状态、受压状态下由于浸水而产生膨胀变形; 然后, 通过数值计算, 分析几种拱坝运行期间可能出现的工况; 最后, 结合原型观测得出结论, 在砾岩上修建结构物如拱坝时, 除了要考虑岩体由于自重等因素产生的初始应力场外, 还需根据实际情况, 考虑浸水对砾岩力学性质的影响。

关键词: 岩石力学; 膨胀软岩; 拱坝; 数值分析

中图分类号: TU 45; TV 223.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)09 - 1729 - 06

BEHAVIOR OF SOAKING ROCK AND ITS EFFECTS ON DESIGN OF ARCH DAM

LIU Guangting, HU Yu, LI Penghui

(*Department of Hydraulic and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Abstract: Tasi River Hydraulic Project is located in the “Shimen” gorge section in the middle stream of Tasi River in Manasi County, Xinjiang Uygur Autonomous Region of China. The U-shaped gorge is approximately 350 m long and 70 - 80 m width at bottom. The RCC arch dam is 109 m in height with a crest length of 176.5 m. The thickest part at the intrados is 31 m. The bank and riverbed are comprised of caesious and red rudite. The result of uniaxial tests shows that the behavior of soft rock changes when immersed. While soaked, the red rudite's deformation modulus drops to 3 GPa from 15 GPa at drying regime. Besides the large decrease of deformation modulus, swelling follows because of water absorbing. The dilatancies of soft rock are measured in liberty or compression condition. Even in compression the soft rock still swells while soaked; and the swelling deformation is comparable in magnitude to the deformation caused by the compression stress. Therefore, the swelling deformation cannot be ignored. Its effect on the deformation distribution of the arch ring will also be presented in the paper. Different processes will lead to different results. In the first scenario where the rock is soaked before the arch dam is built, only the low deformation moduli at different stress status will be considered. In the second scenario where the rock is soaked after the arch dam is built, the effect on dilatancies of soft rock will also be included. In the second scenario, the stress distribution may be inverted and thus pose a great danger to the arch dam. It is also shown that the Tasi River Hydraulic Project is close to the first scenario by analyzing its in-situ observation data. The arch dam safety will be improved by building curtain walls to maintain the water content in the rock. The effect of water should be taken into account in addition to the initial stress field in the practical situation during the design of arch dam on soft rock.

Key words: rock mechanics; swelling soft rock; arch dam; numerical analysis

收稿日期: 2005 - 05 - 20; **修回日期:** 2005 - 09 - 03

基金项目: 清华大学“985”科研基金项目

作者简介: 刘光廷(1930 -), 男, 1952年毕业于北京大学工学院土木工程系, 现任教授, 主要从事水工结构仿真计算和试验等方面的教学与研究工。E-mail: huyu93@tsinghua.org.cn

1 引言

室内试验结果表明，泥钙质胶结砾岩遇水后软化，力学性质会发生较大变化，其强度及刚度均大幅度降低^[1, 2]；同时，在不同应力状态下，砾岩吸水后会膨胀，并产生较大的变形量。砾岩的这种遇水软化膨胀特性，会给水利工程尤其是对坝肩依赖较大的拱坝安全带来一定影响。目前，在隧洞、巷道和地下洞室等工程方面，岩石遇水膨胀的试验和理论研究已有了一定程度的进展^[3-7]。但在拱坝设计中，软岩遇水软化及膨胀会对拱坝结构带来什么影响，这正是拱坝设计者迫切想知道的。

2 工程背景

塔西河石门子水利枢纽工程位于新疆维吾尔自治区昌吉州玛纳斯县西南塔西河中游“石门”峡谷段，峡谷长约 350 m，河谷呈“U”型，谷底宽 70~80 m，布置 109 m 高的碾压混凝土拱坝。河床中部狭长山脊布置 6.4 MW 电厂引水洞并结合布置导流隧洞。左岸有古河槽，该古河槽为透水沙卵石层，故布置有基础混凝土防渗墙的上部斜心墙土坝。

主坝为碾压混凝土拱坝，坝底高程 1 285 m，坝顶高程 1 394 m，正常蓄水位高程 1 390 m。石门子拱坝枢纽平面布置如图 1 所示。拱下部最大厚度 30 m，厚高比为 0.284，坝顶宽度 5 m。坝顶最大弧线长为 169.3 m，坝体剖面不倒坡以便碾压施工，体形采用多圆心^[8]。在主坝设计中，采用在坝肩设人工短缝、拱冠设中缝、下游面设人工短缝等措施，以降低坝体的刚度，达到改善坝体应力的目的^[9, 10]。

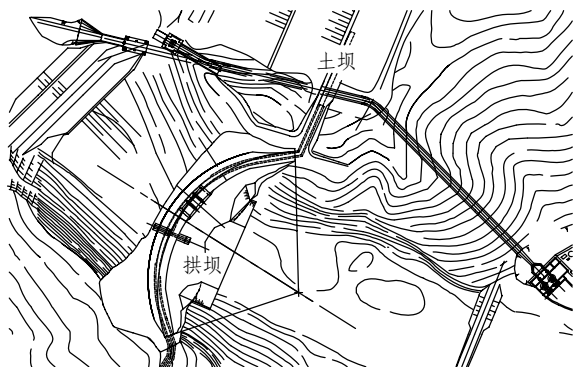


图 1 石门子拱坝枢纽平面布置
Fig.1 Plan of RCC Arch Dam on Tasi River

坝址区出露侏罗系中上统及白垩系下统地层，为一套连续沉积的河湖相碎屑岩，产出状态以中厚层状~块状为主，层理发育，具有明显的沉积韵律。其中对拱坝结构影响最大的是侏罗系上统客拉扎组，它分为上下两段：下段岩石为泥、铁及钙质混合胶结，呈棕红色，强度较低，厚度 58 m；上段为钙质胶结，呈青灰色，强度较高，厚度 50.5 m。室内试验结果表明，坝区岩体尤其是泥、铁及钙质混合胶结的红色砾岩遇水软化、膨胀现象突出。

3 试验及成果

3.1 泥钙质胶结砾岩岩样化学分析

泥钙质胶结砾岩结构构造为角砾~砂状结构。主要由碎屑及胶结物组成。碎屑主要由石英、石英碎屑、黏土质岩屑、长石、方解石组成。主要碎屑物组分为石英，粒径 0.250~0.435 mm；其次为由绿泥石、长石中砂构成底砾屑，粒径大于 2 mm；再次为少量未结晶底黏土质岩屑、硅质岩屑，粒径大于 2 mm。岩样化学分析结果如表 1 所示，胶结物多为黏土质、铁质及钙质，在碎屑岩中呈基底式胶结，胶结物含量约为 30%，是砾岩遇水膨胀的主要因素。

表 1 岩样化学分析结果

Table 1		Chemical analysis results of rock sample					%
岩样	烧失量	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	
砾岩	3.92	65.50	4.36	12.90	2.39	2.28	

3.2 浸水、自然干燥条件下砾岩应力 - 应变关系

不同状态下典型岩石单轴应力 - 应变关系如图 2 所示，单轴压缩试验中砾岩变形模量如表 2 所示。

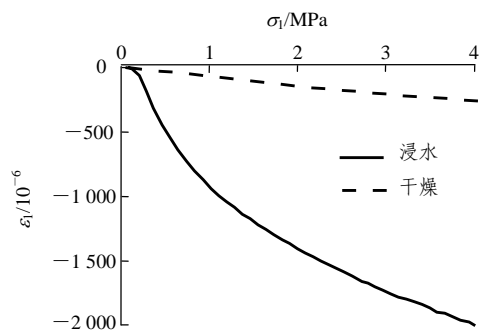


图 2 不同状态下典型岩石单轴应力 - 应变关系
Fig.2 Uniaxial rock behaviours under different conditions

表 2 单轴压缩试验中砾岩变形模量

Table 2 Deformation moduli of rock in uniaxial tests

试验组号	变形模量/MPa	
	浸水	自然干燥
1	4 445.9	15 004.9
2	2 663.5	14 500.7
3	2 011.9	16 749.6
4	3 117.5	15 359.1

图 2 和表 2 显示, 砾岩浸水后, 变形模量显著下降, 其值相当于自然干燥条件下的 1/4~1/8。浸水后砾岩变形模量平均值只有 3 000 MPa, 自然干燥状态平均值约 15 000 MPa。

自然干燥条件下, 砾岩应力 - 应变曲线近似一条直线, 而浸水条件下的应力 - 应变则表现出明显的非线性特性, 其切线模量与应力状态有一定关系, 图 2 中浸水试验切线模量, 由初始时的 640 MPa($\sigma_1 = 0$ MPa)上升到 4 680 MPa($\sigma_1 = 4$ MPa)。

3.3 砾岩遇水膨胀试验

砾岩自然干燥状态与浸水状态变形模量相差甚多, 存在遇水软化现象, 但这并不意味着承受一定荷载条件下的自然干燥状态砾岩, 遇水之后会塌陷。密度为 2 500 kg/m³ 的砾岩与湿陷性黄土物理性质并不相同, 其遇水之后, 虽然强度和刚度都有所降低, 但还具有遇水膨胀的性质, 有必要综合考虑砾岩的受力状态和含水状态对岩体物理力学性质的影响。

图 3 为砾岩自由膨胀率试验中, 体积变化率与含水率关系。随着含水率的增加, 试样的体积也在逐渐变化。岩石吸收的水量, 除了填充试样的孔隙外, 还使整个试样的体积发生膨胀。这意味着岩石初始含水率影响着岩石后期浸水的能够产生的最大膨胀量。

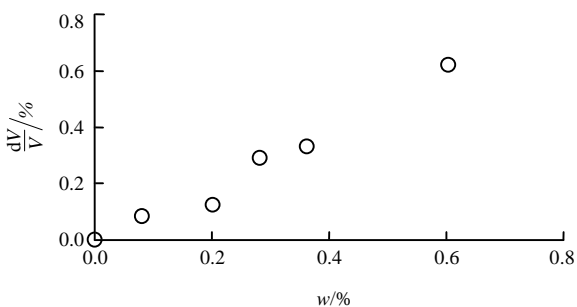
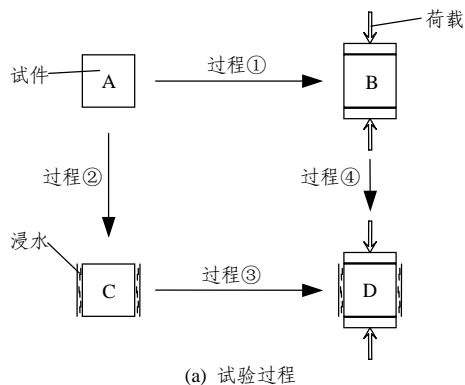


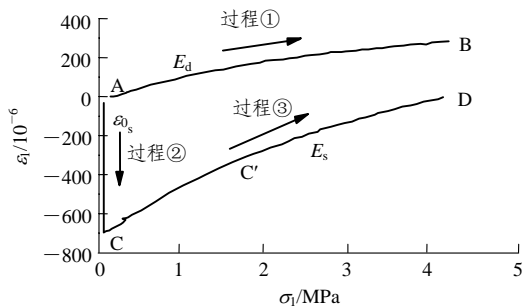
图 3 体积变化率与含水率关系

Fig.3 Relation between volume change and water content

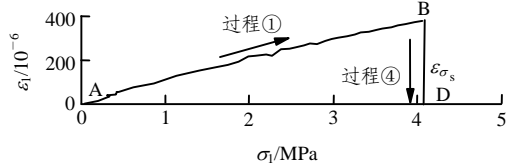
图 4 为砾岩在不同受力状态下遇水膨胀试验。如图 4(a)所示, 砾岩遇水膨胀试验包括以下几个试验过程: (1) 自然干燥状态, 岩石单轴加载(过程①); (2) 无荷载状态, 砾岩遇水膨胀(过程②); (3) 浸水状态, 岩石单轴加载(过程③); (4) 定荷载条件下, 砾岩遇水膨胀(过程④)。



(a) 试验过程



(b) 试样 1



(c) 试样 2

图 4 不同状态下软岩遇水膨胀试验

Fig.4 Soaking experiment of soft rock under different conditions

图 4 中: A 代表自然干燥、无荷载状态; B 代表自然干燥、有荷载状态; C 代表浸水、无荷载状态; D 代表浸水、有荷载状态。

图 4(b), (c)分别为试样 1, 2 在不同试验路径条件下典型砾岩试验曲线。图 4(b)中, 试样 1 沿 2 条不同试验路径进行试验: 路径 1, 自然干燥状态下加载(过程①); 路径 2, 先浸水, 后加载(过程②+③)。图 4(c)为试样 2 先在自然干燥条件下加载, 再浸水(过程①+④)。

分析图 4 中的试验成果, 可以得到以下结论:

(1) 在拱坝基岩可能出现的应力条件范围内, 无论是自由浸水试验, 还是侧向约束浸水试验, 岩石浸水后, 虽然弹性模量降低, 但不会产生更大的压缩应变, 应变向反方向发展, 也就是膨胀应变, 并且其大小与压缩应变大致相当, 处于同一量级。

(2) 不同应力条件下, 自然干燥岩石浸水产生的膨胀应变也不相同。侧向约束力小时的膨胀应变要大于侧向约束力大时的膨胀应变。

4 理论模型

根据以上试验成果, 砾岩浸水软化膨胀效应下的本构关系为

$$\{\dot{\varepsilon}\} = \{\dot{\varepsilon}_e\} + \{\dot{\varepsilon}_s\} = [D]^{-1}\{\dot{\sigma}\} + \{\dot{\varepsilon}_s\} \quad (1)$$

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & \frac{1}{E} & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $\{\dot{\varepsilon}\}$ 为总应变率, $\{\dot{\varepsilon}_e\}$ 为弹性应变率, $\{\dot{\varepsilon}_s\}$ 为膨胀应变率, E 为切线模量, ν 为泊松比, G 为剪切弹性模量。

其中, 切线模量 E 为应力状态 σ_{ij} 以及含水率 w 的函数可写为

$$E = E(\sigma_{ij}, w) \quad (3)$$

膨胀应变率 $\dot{\varepsilon}_{si}$ 不仅与含水率变化率 \dot{w} 有关, 还与此时的应力状态 σ_{ij} 以及含水率 w 有关, 可写为

$$\dot{\varepsilon}_{si} = S(\sigma_{ij}, w, \dot{w}) \quad (4)$$

这样, 应力 σ 、应变 ε 和含水率 w 三者关系可以用 $F(\sigma, \varepsilon, w) = 0$ 表示, 其中任意 2 个变量构成二维平面上的投影均是一组曲线族。

5 数值计算

拱坝基岩受力与基岩浸水的关系有以下几种情况:

工况 1, 初始时, 山体岩石处于自然干燥状态;

拱坝浇筑后, 拱圈承受一定水压作用, 两岸帷幕效果良好, 拱端后面的岩石基本处于原来的干燥状态 (A→B);

工况 2, 初始时, 基岩处在自然干燥状态; 蓄水后, 承受拱圈传递过来的水压荷载, 但帷幕没起作用, 水在山体内逐渐由上游渗透到下游, 岩石由自然状态转变为浸水状态 (A→B→D);

工况 3, 拱坝施工前, 两岸山体内部的地下水位较高, 岩石处于浸水状态下受压 (C→D);

工况 4, 与工况 3 类似, 但考虑山体自重作用, 基岩部位岩石有初始地应力, 岩石的初始切线模量较高 (C'→D)。

数值计算取石门子工程高程 1 335 m 平面拱圈。计算以横河向(指向左岸为正)为 x 轴, 顺河向(逆水流方向为正)为 y 轴。共划分单元 280 个, 节点 344 个。

图 5 为不同工况下拱圈变位图(位移结果放大 200 倍), 从图中可得出以下几条结论:

(1) 工况 1 条件下, 拱端变形值最小。在右岸拱端下游处, 沿拱圈切线方向位移仅为 2.5 mm; 工况 3 中相应点为 21.0 mm; 工况 4 中相应点位移为 17.0 mm。浸水条件下, 考虑岩石自重作用和不考虑岩石自重作用, 两者之间结果有一定差别。

(2) 工况 2 的结果显示, 如果山体岩石在承受水压后才逐渐浸水, 由于膨胀作用, 拱端不但不会深陷两岸基岩中, 反而会被顶回。拱圈的变形与单纯水压作用结果正好相反。

(3) 拱圈的应力状况与位移情况相一致。工况 1, 3 和 4 中, 在拱冠梁处, 均是上游面切向受压, 下游面切向受拉; 工况 2 中, 变化趋势与其他工况正好相反, 下游处, 切向压应力最大, 从下游到上游, 压应力值越来越小, 虽然最后在上游面仍然是压应力, 但可以说结构应力分布有了实质性的变化。

数值计算中, 工况 2 的岩石遇水膨胀、反顶拱圈现象是以前拱坝设计中未考虑的。如果在实际工程中出现, 则会影响现有的结构设计和拱坝安全。如何考虑这些因素, 需要根据实际工程情况而定。

6 原型观测

石门子拱坝下闸蓄水以来, 原型观测中并未出现拱圈反顶现象。分析原因, 这是由两岸地下水状况决定的。

6.1 基岩及两岸地下水状况

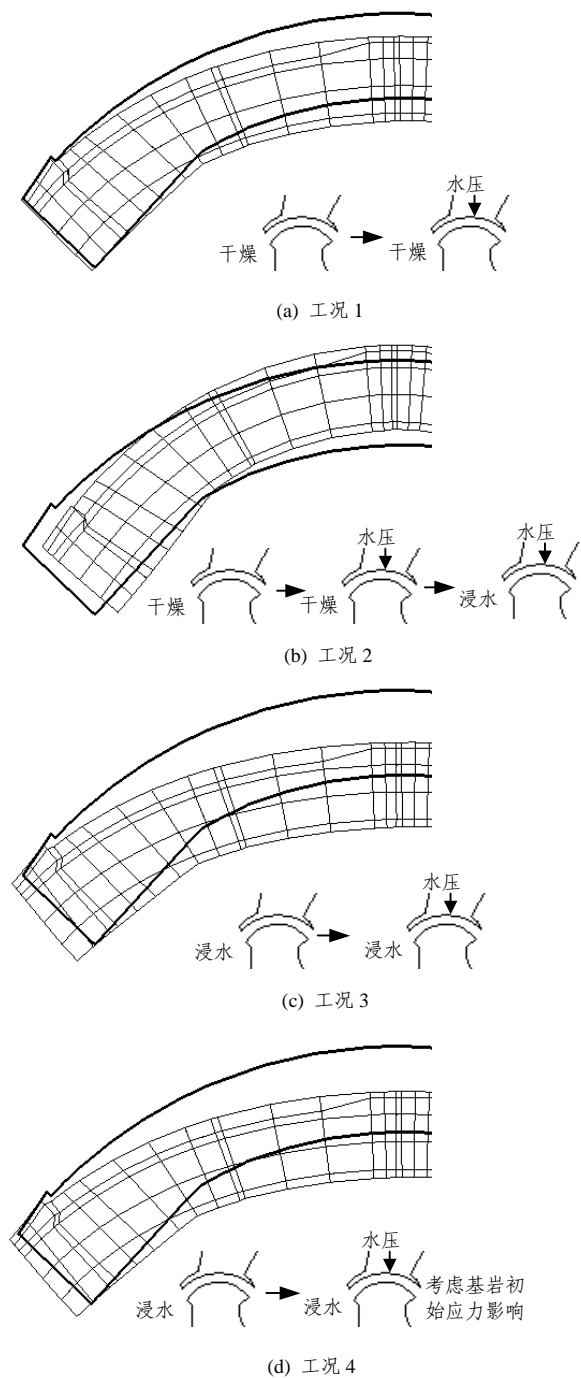


图 5 不同工况下拱圈变位图

Fig.5 Deflection of arch ring under different conditions

水库开工前, 枯水期河水面高程 1 322 m, 水面宽 20 m, 水深 0.0~0.5 m。拱坝基坑开挖及后来坝体浇筑过程中, 基坑内一直有水。自 1999 年 7 月 8 日开始观测以来, 随着基坑水位抬升, 坝基地下水位也逐渐上升。库区两岸地下水具如下动力特征:

(1) 右岸, 在塔西河与呼图壁河之间相距约 10 km, 无深切冲沟, 属丘陵平台地形, 降水入渗转入地下, 地下水沿层面以近于垂直的方向排向河床,

在河床附近出现渗入点, 属补给型水动力特征, 分水岭距岸较远且高于正常蓄水位。

(2) 左岸, 单薄山脊下方无分水岭存在, 主要接受其左侧古河槽基岩侧向渗水补给。古河槽左岸大部分地下水被古河槽谷截流, 部分沿岩层走向渗入现代河床, 出现沿岩层走向河岸渗水点。由于左岸地下水补给来源相对丰富, 所以古河槽中涌水量较大, 且常年不断。

两岸山体地下水位观测采用钻孔式地表观测孔, 右岸山体布设 4 个钻孔, 左坝肩山体布设 2 个钻孔。所有地表观测孔都配有孔口装置和保护盖。

地下水位观测结果表明: 右坝肩的地下水位普遍较高, 均高于库水位, 说明山体中地下水位大多是来自较高山体地下水的补给, 并且降雨和融雪过程也会使观测孔内的地下水位上升, 可以认为地下水对坝肩的影响在蓄水前后是一样的; 左坝肩地下水位呈现出季节性变化, 水位变幅在 30 m 左右, 靠近坝肩的观测孔地下水位保持在高程 1 348 m 以上, 主要受地表集水和施工用水的影响, 左侧副坝古河槽砂砾石层的地下水位对其也有影响。

综上所述, 蓄水前后, 拱坝坝基和拱座处岩石主要部分可认为是处于浸水状态。

6.2 坝体应变观测成果及分析

图 6 为水位变化过程线及高程 1 335 m 应变计埋设位置图。2004 年 5 月中旬~6 月上旬, 库水位由 1 367 m 上升到 1 376 m, 取这个时段进行分析。分析时段内, 点 E 的 x 向应变差为 6.1 个微应变, 点 F 的 x 向应变差很小, 几乎没有变化。

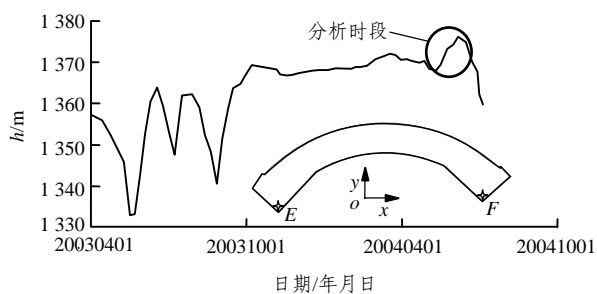


图 6 水位变化过程线及高程 1 335 m 应变计埋设位置

Fig.6 Water level hydrograph and the positions of strain meters at elevation of 1 335 m

通过对比数值计算和原型观测结果, 可以得出以下结论:

(1) 三维有限元分析结果比二维拱圈分析更合理。二维拱圈分析中, 点 E 与点 F 的应变差相当, 与实测值不符。三维有限元分析中虽然在高程

1 335 m, 约束条件与二维一致, 但是由于计算模型模拟了左岸上部高程处的单薄山脊, 计算结果中点 F 的 x 向应变差很小, 与实测情况相符。

(2) 采用工况 1 的计算参数进行三维有限元分析, 点 E 的 x 向应变差为 3.4 个微应变; 而采用工况 4 中的参数计算, 应变差为 7.5 个微应变。实测情况介于两者之间, 与工况 4 更加接近一些, 有可能是砾岩初始地应力值比计算所取值大, 它不仅由岩石自重产生, 还可能由其他因素作用。

7 结 论

泥钙质胶结砾岩遇水后软化、膨胀, 膨胀量不仅与砾岩含水率变化值有关, 还与应力和初始含水率有关。对几种可能出现的工况进行数值试验, 结果显示如果在运行阶段砾岩遇水膨胀, 那么其对结构的影响不能忽视。结合原型观测得出结论: 在砾岩上修建结构物如拱坝时, 除了要考虑岩体初始应力场的影响外, 还需要根据实际工程情况, 考虑浸水对砾岩力学性质的影响。

参考文献(References):

- [1] 刘光廷, 胡 昱, 陈凤岐, 等. 软岩多轴流变特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1 237 - 1 241.(Liu Guangting, Hu Yu, Chen Fengqi, et al. Rheological change of soft rock under multiaxial compression and its effects to the design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(8): 1 237 - 1 241.(in Chinese))
- [2] 胡 昱, 刘光廷. 软岩的多轴力学特性及其对拱坝的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2 494 - 2 498.(Hu Yu, Liu Guangting. Behavior of soft rock under multiaxial compression and its effects to the design of arch dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2 494 - 2 498.(in Chinese))
- [3] 孙 钧, 张德兴, 李成江. 渗水膨胀黏弹塑性围岩应力隧洞的耦合蠕变效应[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1984, 12(2): 1 - 13.(Sun Jun, Zhang Dexing, Li Chengjiang. Coupled-creep effect of pressure tunnels interacted with its water-osmotic swelling viscous elastoplastic surrounding rocks[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 1984, 12(2): 1 - 13.(in Chinese))
- [4] 卢爱红, 茅献彪. 湿度应力场的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(增 2): 2 470 - 2 473.(Lu Aihong, Mao Xianbiao. Numerical simulation on theory of humidity stress field[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(Supp.2): 2 470 - 2 473.(in Chinese))
- [5] Gattermann J, Wittke W, Erichsen C. Modelling water uptake in highly compacted bentonite in environmental sealing barriers[J]. Clay Minerals, 2001, 36(3): 435 - 446.
- [6] Chijimatsu M, Masakazu A, Fujita C, et al. Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2000, 24(4): 403 - 424.
- [7] 温春莲, 陈新万. 初始含水率、容重及荷载对膨胀岩特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(3): 304 - 311.(Wen Chunlian, Chen Xinwan. Effects of initial water content, dry unit weight and load on the swelling of clayey weak rock: an exeperimental study[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(3): 304 - 311.(in Chinese))
- [8] 刘光廷, 徐增辉, 李鹏辉. 柔性拱和软弱地基上的碾压混凝土拱坝[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10): 1 365 - 1 368.(Liu Guangting, Xu Zenghui, Li Penghui. Flexible RCC arch dam on a weak foundation[J]. Journal of Tsinghua University(Sci. and Tech.), 2002, 42(10): 1 365 - 1 368.(in Chinese))
- [9] 刘光廷, 徐增辉, 胡 昱. 侧约束对拱坝坝体应力位移的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(11): 1 537 - 1 540.(Liu Guangting, Xu Zenghui, Hu Yu. Stresses and displacements in RCC arch dams with side restrictions[J]. Journal of Tsinghua University (Sci. and Tech.), 2002, 42(11): 1 537 - 1 540.(in Chinese))
- [10] Liu G T, Li P H, Hu Yu, et al. RCC arch dam structure on Taxi River and water storage measure during construction[J]. Tsinghua Science and Technology, 2002, 7(3): 243 - 250.