

梅山连拱坝的变形性态研究

顾冲时¹, 李雪红¹, 吴中如¹, 宋一明²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏南京 210098; 2. 广东省南水水电厂, 广东韶关 512700)

摘要 梅山连拱坝由于结构单薄,对周围环境变化比较敏感.结合梅山连拱坝的实测资料,采用多种模型和分析方法,对其变形性态进行了分析和研究,得出梅山大坝变形、稳定、强度和裂缝等的不利荷载工况.

关键词 梅山水库 连拱坝 变形性态 不利荷载

中图分类号 TV642.5⁺2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2000)02-0059-05

梅山水库位于淮河支流史河上游的安徽省金寨县境内,流域面积 1 970 km²,占史河流域面积 5 120 km² 的 39%,是一个以防洪为主,结合灌溉、发电、水产养殖等的综合利用工程.总库容为 23.37 亿 m³,兴利库容为 7.96 亿 m³,死库容为 4.02 亿 m³.汛期限制水位为 125.27 m,水库正常蓄水位为 128.00 m,设计洪水位为 136.67 m,校核洪水位为 139.93 m.工程于 1954 年 3 月动工,1955 年 1 月开始浇筑大坝,1956 年 4 月竣工.枢纽主要有拦河坝、溢洪道、泄水底孔、泄洪隧洞、发电厂、坝后桥等.拦河坝由连拱坝、接拱重力坝和空心重力坝组成.连拱坝轴线长 311.5 m,由 15 个垛和 16 个拱组成,拱、垛上游面坡度 1:0.9,下游面坡度 1:0.35,拱筒内径为 13.5 m,中心角 180°.坝顶栏杆高程 141.27 m,基岩最低高程 53.03 m,最大坝高 88.24 m,坝身底部上游面至下游面最大距离 114.5 m.垛墙外侧是由两片近乎平行的三角形垛墙、中间以直立的隔墙连接而成.垛墙自基础向上,由上游向下游逐渐减薄,隔墙厚度自上而下从 0.55 m 增大到 2.55 m,下游面板厚 0.6 m.拱建在垛的上游面,拱筒顶部厚 0.6 m,底部最大厚度 2.3 m.水库于 1958 年初正式蓄水.梅山连拱坝在运行期间发生了几次大的变故,其中 1962 年出现了右岸坝肩岩基错动的严重事故^[1].1963 年~1965 年大坝放空水库加固以后,又经历了 1969 年的高水位及 1991 年 7 月的历史最高水位.因此,有必要对该坝的工作性态进行评估分析.

1 评估分析方法

为了分析梅山大坝的变形性态,采用下列分析方法.

1.1 定性分析

有关文献^①对梅山大坝变形和裂缝的变化规律作了详细分析,并对主要影响因素(水压、温度及时效)对大坝的影响作了评估,定性分析了各主要影响量对大坝性态的影响效应,得到该大坝的变形、稳定和应力、强度(即裂缝)的最不利荷载工况.即:在高温高水位作用下,出现向下游位移较大的不利荷载工况.在高水位、高水温和高气温作用时,抗滑面上的剪力(即滑动力)最大,对稳定不利.同时,在校核两岸坝垛侧向稳定时,应考虑横向地震与温度荷载的不利组合.应力、强度的不利荷载工况出现在低温季节(如低水温、低气温).因此温降时拱圈收缩,拉动支墩向上游位移,而支墩则向下游位移.此外,附加低温时,纵缝局部张开,其间出现拉应力.若再遇高水位,则会加大支墩向下游的位移量,从而增加拱圈和支墩的拉应力.因此,低温和高水位是应力、强度(或裂缝)的最不利工况.此外,低温和低水位对应力也不利.由于低水位时,拱圈温度主要受气温控制,从而加大拱圈拉动支墩向上游的位移量,因而其拉应力加大,在基础高程较高的下游面坝趾附近容易出现较大拉应力,并使薄弱部位出现裂缝.例如 3 号垛和 15 号垛等支墩的尾部出现的垛尾缝,就是在低水位低温下形成的.

收稿日期:1999-07-20

作者简介 顾冲时(1962—),男,江苏启东人,教授,博士生导师,主要从事水工结构和岩土工程的安全监控理论及其应用研究.

① 河海大学,梅山水电站.梅山水电站大坝观测资料及结构正反分析报告.1999,2~6,19~81,151~163.

1.2 三维薄层单元非线性有限元分析和数值模型分析

1.2.1 三维薄层单元非线性有限元分析

为了建立测点的确定性模型以及反演物理力学参数、反馈大坝变形性状,需对梅山大坝进行有限元分析.分析时,采用三维薄层单元非线性有限元方法.该方法包含了三种类型的单元:六面体八结点单元、五面体六结点单元以及六面体薄层单元.六面体、五面体单元形式已为大家熟知,这里不再赘述.下面简单讨论薄层单元.该单元主要特点是能模拟界面的张开和剪切滑动两种特性,因此,用于模拟坝体中的已知裂缝.

图1(a)为薄层单元,图1(b)为薄层单元局部坐标,图1(c)为平面四结点等参单元.由于薄层单元厚度比单元平面特征尺寸 e 小得多($t \ll e$),可忽略部分应变变量.即令 $\epsilon'_{xx} = \epsilon'_{yy} = \gamma'_{yz} = 0$ 并取 $\epsilon'_{xx} \approx \frac{1}{t} \Delta w'$, $\gamma'_{yz} \approx \frac{1}{t} \Delta v'$, $\gamma'_{xz} \approx \frac{1}{t} \Delta u'$. $\Delta u'$, $\Delta v'$, $\Delta w'$ 为单元上下面上任一点的相对位移.弹性应力与相对位移之间的关系按下式给出.

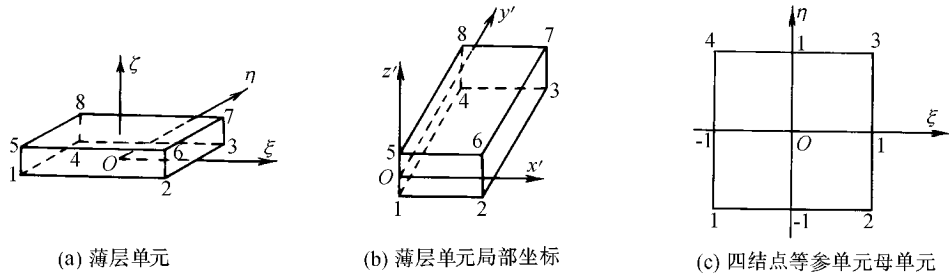


图1 薄层单元及等参单元

Fig.1 Thin element & isoparameter element

$$\sigma' = \begin{Bmatrix} \tau'_{xz} \\ \tau'_{yz} \\ \sigma'_z \end{Bmatrix} = \lambda' \begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta v' \\ \Delta w' \end{Bmatrix} + \sigma^{0r} \quad (1)$$

其中 $\sigma^{0r} = [\tau_{xz}^{0r} \quad \tau_{yz}^{0r} \quad \sigma_z^{0r}]^T$ 为初应力; λ' 由式(2)得到.

$$t \neq 0 \text{ 时}, \quad \lambda' = \begin{bmatrix} G/t & 0 & 0 \\ 0 & G/t & 0 \\ 0 & 0 & E/t \end{bmatrix} \quad t = 0 \text{ 时}, \quad \lambda' = \begin{bmatrix} \lambda_s & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_s & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 E, G ——薄层的弹性模量和剪切弹性模量; λ_s, λ_n ——界面切向和法向刚度系数.

弹性应力的结点位移量表达式为

$$\sigma' = \lambda' T_0 \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{Bmatrix} = \lambda' T_0 M \delta^e$$

式中

$$T_0 = \begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}$$

式中 $l_i, m_i, n_i (i=1,2,3)$ 为局部坐标 x', y', z' 在整体坐标系中的方向余弦.整体坐标系 x, y, z 的位移变化量由 $\Delta u, \Delta v, \Delta w$ 利用平面四结点等参单元插值公式得到.利用虚功原理,可建立有限元方程

$$K^e \delta^e = R^e + R^{0e} \quad (3)$$

式中 R^{0e} ——单元初应力等效结点荷载,其表达式为

$$R^{0e} = - \iint_{S_e} M^T T_0^T \sigma^{0r} dx' dy'$$

K^e ——单元刚度矩阵,其表达式为

$$K^e = \iint_{S_e} M^T T_0^T \lambda' T_0 M dx' dy' = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 M^T T_0^T \lambda' T_0 M |J| d\xi d\eta$$

该单元刚度矩阵可以方便地与六面体八结点单元刚度矩阵组装到一起。

在有限元分析时,裂缝部位用薄层单元模拟,其余部位用六面体八结点单元或五面体六结点单元模拟。结点布置时,尽可能将变形测点和温度测点等安排在结点上。地基部位尽可能根据断层走向及地质的变化剖分。根据上述剖分原则,梅山大坝全坝共剖分了 22 617 个单元,29 822 个结点。在分析时,梅山大坝共分析了 123 种荷载工况,其中包括对大坝稳定和强度影响较大的高温高水位、低温高水位及低温低水位等最不利荷载工况。

1.2.2 数值模型分析

为了定量分析梅山大坝的变形性态,建立了观测效应量的统计模型、确定性模型和混合模型^[2],即

$$M_I : \delta_I = \delta_H + \delta_T + \delta_\theta \tag{4}$$

$$M_{II} : \delta_{II} = X\delta_H + Y\delta_T + \delta_\theta \tag{5}$$

$$M_{III} : \delta_{III} = X\delta_H + \delta_T + \delta_\theta \tag{6}$$

式中 M_I, M_{II}, M_{III} 分别为效应量的统计模型、确定性模型和混合模型的表达式。

1.3 参数的反分析

由于梅山大坝已运行 40 多年,因而其大坝的综合弹性模量、温度线膨胀系数等力学参数与原设计参数值相差较大。为此,有必要对其主要物理力学参数进行反演分析,为进一步的结构计算、强度和稳定复核提供较为符合实际的参数奠定基础。在反演分析时,采用常规反演分析法和确定性模型反演分析法^[2],由此可反演得到坝体的综合弹性模量 E_c 和混凝土温度线膨胀系数 α_c 。

2 梅山连拱坝的变形性态分析

利用上述的正反分析模型和方法,对梅山大坝的结构性态进行了综合分析和评价。下面详细介绍分析所得的成果。

2.1 水平位移变化规律综合分析和评价

2.1.1 上下游向位移的综合分析和评价

2.1.1.1 温度对上下游向位移影响的综合分析

由于梅山大坝的结构比较单薄,其变形主要受温度控制,温度对支墩和拱圈产生不同的影响效应,如图 2 所示。对拱圈,在温升时膨胀,对支墩产生向下游的推力,使支墩向下游位移,见图 2(a);反之,温降时,拱圈拉动支墩向上游位移,见图 2(b)。而支墩在温升时,其靠近上游面的测点向上游位移,见图 2(c);温降时则相反,坝体向下游位移,见图 2(d)。由于温度变化对拱圈和支墩的影响不同,处于高程较高的测点(如坝顶)的位移变化,主要受拱圈温度变化的影响,而位于高程较低的测点的位移变化,主要受支墩温度变化的影响。因而出现在温升时坝顶向下游位移增大,而高程较低的处于上游面的测点,则向下游位移减小。温降时,则出现与温升情况相反的现象。

2.1.1.2 水压对上下游向位移影响的综合分析

水压作用对坝体产生不同的影响效应,在库水位较高时(图 3(a)),坝体由于水压作用引起的向下游方向的位移大于库区及坝基转动使大坝向上游方向的位移,使坝体向下游位移,位移量随库水位的降低而减小。当库水位降低到一定程度时(图 3(b)),坝体向上游方向位移,且位移量随库水位的升高而增大。图 3(c)为坝顶上下游向位移 δ 与库水位 H 的关系曲线,该曲线直观地表示了 δ 随 H 的变化规律。

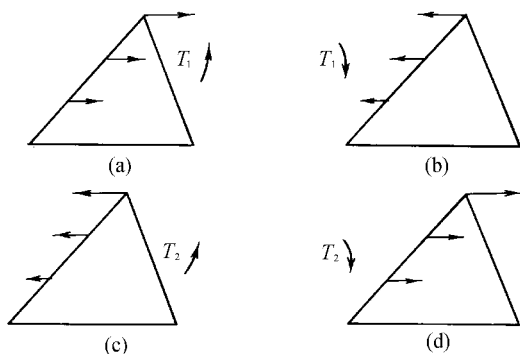


图 2 温度变化对拱圈和支墩上下游向位移影响效应

Fig.2 Effect of temperature change on upstream-downstream direction displacement of the arch & counterfort

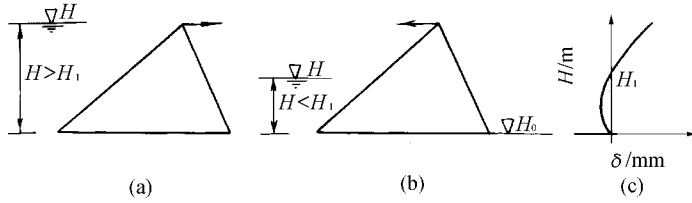


图 3 水压作用对坝顶水平位移影响效应

Fig.3 Effect of water pressure on the horizontal displacement of dam top

2.1.1.3 时效对上下游向位移影响的综合分析

在右岸发生事故以前,时效变形较大.右岸坝垛加固以后,由于 1982 年,垂线进行更新改造,位移变化出现不连续现象.1982 年后若扣除仪器维修等因素影响,时效影响较小.这主要与基础地质条件较好有关.

2.1.2 侧向位移的综合分析和评价

梅山大坝的侧向位移主要受温度变化的影响,而水压和时效对其影响较小.岸坡坝垛侧向位移较大,河床坝垛侧向位移较小.侧向位移以河床中间坝垛 10 号、11 号垛为对称轴,两岸坝垛温升时向两岸变形,温降时向河中变形,如图 4 所示.侧向位移的变化规律受坝体结构特点及坝址地形的影响较大.由于两岸岸坡较陡,靠近岸坡的支墩在温度等荷载作用下,两侧拱筒的推力或拉力为不平衡力,因此,靠近岸坡的坝垛,其侧向位移较大.如 12 号垛侧向位移最大,其次为 3 号垛,9 号~11 号垛较小.另外,对实测资料的分析发现,12 号垛和 3 号垛的侧向位移的年变幅也较大,这主要与其结构特点有关.(a)12 号垛主要与其两侧的支撑墙所处的位置、周边约束不同等造成的拱筒效应转移及损失有关.12 号垛左侧的支撑墙为自由结构,而右侧支撑墙高程较高,当温度变化时,12 号垛两侧的拱筒变形产生的力为不平衡力.当温升时,该垛的左侧拱推动 12 号垛的力要比右侧的拱推力大,从而引起 12 号垛向右岸产生较大的位移;当温降时,则向河床产生较大的位移,从而引起 12 号垛的侧向位移变幅较大.(b)3 号垛两侧 3 号拱和 4 号拱的形状及底高程相差较大.当温升时,两侧拱筒作用引起 3 号垛向左岸产生较大位移;在温降时,拱筒收缩使 3 号垛向河床产生较大位移.由此,引起 3 号垛侧向位移变幅较大.由上分析可知,梅山大坝侧向位移主要受温度影响,而水压和时效对其影响较小;另外,其侧向位移变化受地形及坝体结构特点的影响也较大.

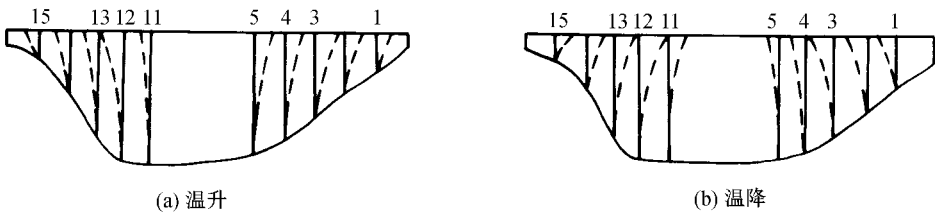


图 4 温度变化对坝体侧向位移的影响

Fig.4 Effect of temperature change on dam body lateral displacement

2.2 梅山大坝裂缝变化规律及成因分析

由于梅山大坝坝体的裂缝观测点的布置仅考虑施工和施测的方便,布置的 10 个观测点不能完全反映大坝裂缝的变化情况,因而在分析时补充了一些重要裂缝的成因分析.现有 10 个观测点的资料表明,坝体裂缝开度的变化主要受温度的影响,温升时开度变小,温降时开度增大,而受水压和时效的影响较小.观测资料及结构分析结果表明,河床部位 5 号~12 号垛上游面板 73 m 高程左右的水平裂缝主要由拱和垛面板的结构特点差异及温度变化的影响所致.温降引起拱身和垛面板的收缩,又由于拱身分块浇筑,在块与块之间留有伸缩缝,而垛面板没有伸缩缝,因而两者伸缩不同步,从而在伸缩缝附近与垛面板交界处产生附加拉应力,面板被拉裂,面板裂开后,其附加拉应力作用到两边支墩垛墙上,由此进一步发展形成垛头缝.位于左右岸的 3 号、15 号垛支墩上的垛尾缝,主要是两岸坝垛基础较高,在低水位下水压作用引起坝趾附近较大范围内出现的拉应力引起的.与此同时,低温季节,拱筒和支墩收缩,在坝垛下游尤其是较低高程部位(特别是坝趾附近较大范围内)出现较大的拉应力区,在上述综合效应作用下,两岸坝垛在下游面较低高程薄弱部位易产生垛尾缝.两岸拱筒裂缝主要在第一个伸缩缝以下,裂缝较多,裂缝走向大致与混凝土坝体和基岩接触面垂直.这

些裂缝主要是由于底拱受基础的约束,拱身混凝土不均匀收缩引起的.此外,拱面上靠近山坡侧裂缝多.由于两岸山坡上拱身不对称,越靠近河床一边的垛拱高度越高,混凝土收缩时,拱向河床方向拉垛,山坡上一边拱的截面小,且垛较矮,相对刚度较大,由此拱受到的约束较大,从而这些部位容易产生裂缝.总而言之,梅山大坝的裂缝变化主要受温度变化的影响,温度升高,裂缝开度减小;反之,温度降低,裂缝开度增大.此外,水压和时效对裂缝的开度变化有一定的影响.总体而言,裂缝开度时效分量年变化量较小,大部分裂缝的时效已基本趋于稳定.

3 结 论

- a. 连拱坝的变形主要受温度的影响,水压和时效对其影响要比温度变化影响小.但由于连拱坝结构比较单薄、复杂,因此在变温、水压等荷载作用下易使裂缝扩展和再生,从而引起局部的时效变形收敛较慢或出现显著的时效变形.
- b. 高水位和高水温、高气温时,由于抗滑面上的剪应力最大,因而对坝体的抗滑稳定不利.冬季高水位或低水位对强度和应力及裂缝不利.
- c. 连拱坝的坝体裂缝,主要是由于温降造成局部区域拉应力过大造成的.在冬季高水位时坝踵易形成双向受拉状态,在附近薄弱部位易出现裂缝的再生和扩展.冬季低水位情况下,在两岸坝基高程较高的坝垛坝趾部位附近形成较大的拉应力区,易在该区较薄弱部位产生垛尾缝.

参考文献：

[1] 顾冲时,李雪红,吴中如等.梅山连拱坝 1962 年事故部位性态跟踪分析[J].水电能源科学,1999,(3) 5~8.
[2] 吴中如,沈长松,阮焕祥.水工建筑物安全监控理论及其应用[M].南京:河海大学出版社,1990.36~59,238~264,278~284.

Research on Deformation behavior of Multiple Arch Dam

GU Chong-shi¹, LI Xue-hong¹, WU Zhong-ru¹, SONG Yi-ming²

- (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China ;
- 2. Nanshui Water Plant, Guangdong Province, Shaoguan 512700, China)

Abstract: Meishan multiple arch dam is sensitive to its environment because of its thin structure. Based on the observation data, the deformation behavior of this multiple arch dam is analyzed and studied with many kinds of models and analysis methods. Some unfavorable loading conditions affecting deformation, stability, strength, cracking, and so on are obtained.

Key words Meishan Reservoir ; multiple arch dam ; deformation behavior ; unfavorable loading condition