

连拱坝的工作性态研究

顾冲时, 李雪红

(河海大学水电学院, 南京 210098)

[摘要] 连拱坝由于结构单薄, 对周围环境变化影响比较敏感。文章结合梅山、佛子岭两座连拱坝的实测资料, 采用多种模型和分析方法, 对其工作性态进行了对比分析, 由此引出连拱坝变形、稳定、强度和裂缝等的不利荷载工况。

[关键词] 连拱坝; 工作性态; 不利荷载; 对比分析

1 序言

梅山大坝和佛子岭大坝为姐妹坝, 其坝型均为连拱坝。梅山水库位于淮河支流史河上游的安徽省金寨县境内, 1956年4月竣工, 流域面积1970 km², 是一个以防洪为主、结合灌溉、发电、航运、水产养殖等综合利用工程。总库容为23.37 × 10⁸ m³, 校核水位139.93 m, 正常水位128.0 m。拦河坝由连拱坝、接拱重力坝和空心重力坝组成, 其中连拱坝由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, 坝顶栏杆高程141.27 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于平行的三角形垛墙, 中间以直立的隔墙连接组成, 垛墙自基础向上, 由上游向下游逐渐减薄。坝址岩石大部分为细粒花岗岩, 组织紧密坚硬, 组成矿物以正长石、斜长石和石英为主。其中: 7[#]垛上游段破碎较烈; 9[#]垛、10[#]垛、11[#]垛岩石较为完整; 13[#]垛以西, 东西向节理较发育; 13[#]垛以东, 南北向节理较为发育, 6[#]垛和7[#]垛、14[#]垛和15[#]拱以及13[#]垛到15[#]垛下游有裂缝穿越; 12[#]拱到14[#]拱有断层穿过, 大部分裂缝或断层为高岭土等风化物充填, 部分为黄铁矿或氟、硫充填。

佛子岭水库位于淮河以南六安地区霍山县境内, 控制流域面积1840 km², 该库具有防洪、灌溉、发电、航运等综合利用效益。水库总库容5.2 × 10⁸ m³, 校核水位129.96 m, 正常蓄水位125.56 m。拦河坝为连拱坝, 由20个垛和21个拱组成, 竣工于1954年11月。佛坝坝顶高程为131.06 m, 最大坝高75.9 m, 其中包括防浪墙高1.5 m。垛是由两片三角形直立的垛墙及隔墙相连而成, 垛墙上薄下厚, 垛上游面坡度为1:0.9, 下游面坡度为1:0.36。大坝坝址两岸露出变质岩系, 即上层为灰白色石英岩夹片岩层, 下层为黑色石英岩层。在坝趾左岸片岩内有三条近东西向的小断层, 右岸有一条宽约1.0 m的断层破碎带。在运行中又发现在12[#]至14[#]垛的下游坝基内有缓倾角断层破碎带, 对这些断层进行了处理。

虽然梅山和佛子岭两座大坝同为连拱坝, 但由于所处的地理位置、地质条件以及水库库容及坝的自身结构等有一定的差别, 因而工作性态不完全一致, 局部相差较远。文章重点以两座大坝的变形规律及坝身裂缝分布规律及其产生的成因为例, 利用多种模型和分析方法, 分析对比两座大坝的运行特点。由此进一步了解连拱坝的工作性态, 弄清连拱坝的工作特点, 并引出连拱坝变形、稳定、强度和

裂缝等的不利荷载工况。

2 分析方法

2.1 时空分析

对两座大坝的原型观测资料进行了详细分析，重点对主要影响因素（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。

2.2 模型分析

为了定量分析两座大坝的性态，建立了观测效应量的统计模型、确定性模型和混合模型^[1]，即：

$$M_I : \delta_I = \delta_H + \delta_T + \delta_0 \quad (1)$$

$$M_{II} : \delta_{II} = X\delta_H + Y\delta_T + \delta_0 \quad (2)$$

$$M_{III} : \delta_{III} = X\delta_H + \delta_T + \delta_0 \quad (3)$$

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；

δ_H ——水压分量，其中确定性模型和混合模型中，用有限元的计算值；

X —— δ_H 的调整参数；

δ_T ——温度分量，其中确定性模型中，用有限元计算的表达式；

Y —— δ_T 的调整参数；

δ_0 ——时效分量；

δ_I 、 δ_{II} 、 δ_{III} ——分别为统计模型、确定性模

型和混合模型所得到的效应量计算值；

由式(1)~式(3)可分离出各主要影响量，由此定量分析其对总效应量的作用。

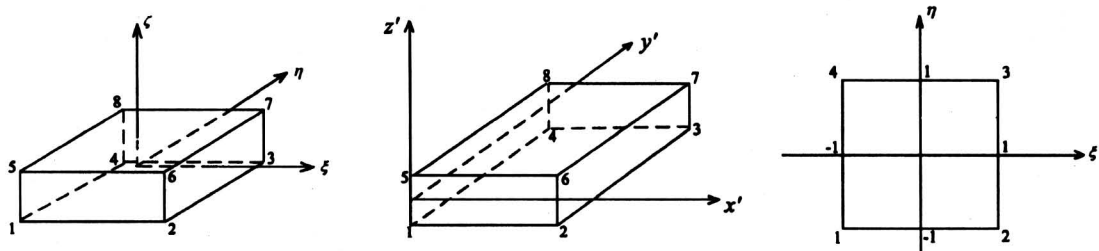
2.3 参数的反分析

由于佛子岭及梅山大坝已运行40多年，大坝的综合弹性模量等力学参数与原设计参考值不同，必须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，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 。

2.4 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参数反分析、大坝工作性态的反分析，需对佛子岭、梅山两座大坝进行有限元分析。在分析时，采用三维薄层单元非线性有限元进行，该方法包含了三种类型的单元。即六面体八结点单元、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母单元，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。



(a) 薄层单元
(a) Thin element

(b) 薄层单元局部坐标
(b) Local coordinate of thin element

(c) 四结点等参单元母单元
(c) Mother isoparametric element with four nodes

图1 薄层单元及等参单元

Fig.1 Thin element & isoparametric element

即令 $\epsilon'_{x'} = \epsilon'_{y'} = \gamma'_{xy} = 0$ ，并取 $\epsilon'_{z'} \approx \frac{1}{t} \Delta w'$ ， $\gamma_{yz} \approx$

$$\frac{1}{t} \Delta v'$$
， $\gamma_{xz} \approx \frac{1}{t} u'$ 。

$\Delta u'$ 、 $\Delta v'$ 、 $\Delta w'$ 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式(4)给

出：

$$\{\sigma'\} = \begin{Bmatrix} \tau'_{xz} \\ \tau'_{yz} \\ \sigma'_{z'} \end{Bmatrix} = [\lambda'] \begin{Bmatrix} \Delta u' \\ \Delta v' \\ \Delta w' \end{Bmatrix} + \{\sigma^0\}, \quad (4)$$

其中， $\{\sigma^0\} = [\tau_{xz}^0 \tau_{yz}^0 \sigma^0]^T$ 为初应力； $[\lambda']$ 由

式 (5) 得到。

$$t \neq 0 \text{ 时, } [\lambda'] = \begin{bmatrix} G/t & & 0 \\ & G/t & \\ 0 & & E/t \end{bmatrix};$$

$$t = 0 \text{ 时 } [\lambda'] = \begin{bmatrix} \lambda_s & & 0 \\ & \lambda_s & \\ 0 & & \lambda_n \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中：E、G——薄层单元弹模和剪切弹模；
 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：

$$\{\sigma'\} = [\lambda'] [T_0] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta v \\ \Delta w \end{Bmatrix} = [\lambda'] [T_0] [M] \{\epsilon\}^e.$$

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) ($i=1, 2, 3$)——局部坐标 x' 、 y' 、 z' 在整体坐标中的方向余弦。整体坐标系 x 、 y 、 z 的位移变化量由 Δu 、 Δv 、 Δw 利用平面四结点等参单元插值公式得到。

利用虚功原理，可建立有限元方程如下：

$$[K]^e \{\delta\}^e = \{R\}^e + \{R^0\}^e \quad (6)$$

式中： $\{R^0\}^e$ ——单元初应力等效结点荷载，其表达式为：

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

式中： S_e ——单元面积

$[K]^e$ ——单元刚度矩阵，其表达式为：

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

该单元刚度矩阵与六面体八结点单元刚度矩阵可以方便地组装到一起。

在有限元分析时，单元划分：裂缝部位采用薄层单元模拟，其余部位采用六面体八结点单元或五面体六结点单元。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。佛子岭大坝共剖分了 4 285 个单元，6 026 个结点。

在分析时，梅山大坝共分析了 123 种荷载工

况，佛子岭大坝共计算了 121 种荷载工况，其结果详见佛子岭连拱坝原型观测资料分析报告* 和梅山水电站大坝观测资料及结构正反分析报告**。

3 两座大坝的水平位移变化特点对比分析

3.1 上下游向位移的综合分析和评价

两座大坝的上下游向位移主要受温度影响，其次是水压和时效影响。

3.1.1 温度、水压对水平位移影响的综合分析

由于两座大坝的结构均比较单薄，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。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；反之，温降时，拱圈拉动支墩向上游位移。然而，对支墩靠近上游面部位，在温升时向上游位移，温降时向下游位移。因而，温度对坝垛的上下游向位移有两个方向相反的效应：其中，在坝顶附近部位，温度对拱圈的影响要大于对支墩的影响；而在较低高程部位（如梅山 10# 垛 (2) 垂线基准点处及其以下部位），温度对支墩的影响常大于对拱圈的影响。由于温度对支墩和拱圈产生的影响效应不同，所以出现坝顶附近测点，温升时向下游位移而温降时向上游位移；而位于较低高程靠上游面的测点，则其变形规律与坝顶相反，温升时，向上游位移，温降时向下游位移。

由于佛子岭水库库容较小，库水位受汛期暴雨的影响较大且水温较高（一般汛期温度较高），若再遇上寒流冲击，则对变形不利。例如，1993 年 11 月下旬佛子岭大坝出现水平上下游向位移最大值，经深入分析，主要是由于高水位、高水温和低气温的影响。下面以佛子岭大坝 13# 垛为例来分析这种不利荷载的影响，由于库水位高（125.16 m），9 月 21 日的暴雨使库水温也较高（14.72℃），拱圈混凝土温度较高（13.9℃），从而使拱圈膨胀，推动支墩向下游约 3.57 mm，而由于寒流冲击，气温很低（1.6℃），垛内气温也低（7.36℃），从而使支墩向下游位移约 0.26 mm；再加上高水位引起的向下游位移 1.93 mm；三者均向下游，其组合使坝顶水平位移产生历史上最大值（5.81

* 河海大学，佛子岭水电站，佛子岭连拱坝原型观测资料分析报告，1995，5

** 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，1999，4

mm)。因此,高水位、高水温加突然温降(如寒流冲击),是佛子岭大坝水平位移的最不利荷载工况。而梅山水库库容较大,汛期库水位逐渐上升,库水温变化较小,因此,很难出现库水温较高而气温很低的情况,即高水位、高水温附加低气温的工况出现的概率小,梅山大坝40多年的运行情况也说明了这一点,梅山大坝坝顶水平位移每年向下游的最大值,常出现在库水位较高坝体温度较高的7月~10月份。由此可见,连拱坝由于其结构的特殊性,周围环境对坝体的变形性态的影响也不同。对于库容较小的坝(如佛子岭连拱坝),易受温度变化的影响,尤其是水温和气温不同步变化的影响。

3.1.2 上下游向位移的时效变化规律

(1) 佛子岭大坝坝顶上下游向位移的时效变化规律*

a 二次补强加固(即1965年底~1967年初、1982年10月~1983年5月)后,水平位移的时效分量显著减小,说明补强加固的效应显著。但是,在加固后,仍产生较显著的时效分量,说明裂缝仍有扩展的趋势。

b 在1965年前,由于坝体裂缝的扩展,坝垛出现显著的时效位移。在1969年7月洪水漫顶,水平位移的时效出现突变(0.57 mm~0.95 mm),今后应避免此类事件的发生。

c 1988年高水位运行后,水平位移的时效分量有一定的增加趋势,但不十分显著。1988年至1993年底,如13#垛的时效分量增加0.53 mm,说明1993年11月下旬出现的上下游向位移较大主要不是时效位移引起。

综上所述,佛子岭大坝水平位移的时效位移产生上述变化规律的主要原因是:坝地质条件复杂,如13#垛基础由四种性能不同的岩基组成,从坝踵至坝趾地基模量从 2.0×10^4 MPa变化到 0.06×10^4 MPa,因而在水压等长期荷载作用下容易变形,并使坝踵附近在冬季高水位下易产生较大的拉应力,从而使裂缝再生和扩展,出现新的时效变形。

(2) 梅山大坝坝顶上下游向位移的时效变化规律**

a 在右岸发生事故以前(即1962年11月以前)由实测资料表明,右岸坝垛如13#垛坝顶上下游向位移以每年0.82 mm~1.53 mm的速度增长,

时效变形较大。

b 右岸坝垛加固以后,1982年4月前后,垂线由于进行设备更新改造,观测资料明显出现分段现象。1982年后若扣除仪器维修等因素影响,上下游向位移,除两岸的2#、14#垛有向上游位移的趋势外,其余坝垛均产生稍向下游位移的趋势,总体而言时效影响较小。

c 梅山大坝的上下游向位移的时效变形较小的原因,主要与基础地质条件较好有关。

3.2 侧向位移的综合分析和评价

两座大坝的侧向位移主要受温度变化影响,水压和时效影响较小。侧向位移以河床中间几个坝垛为对称轴,如佛子岭大坝以7#~6#垛为对称轴,梅山大坝以10#~11#垛为对称轴。在温升时,两岸坝垛向两岸变形;温降时向河中变形。其中,佛子岭大坝2#、3#和21#垛的侧向位移最大,7#~16#垛较小。梅山大坝12#垛侧向位移最大,其次为3#垛,9#~11#垛较小。由上述变形规律,在复核两岸坝垛侧向位移稳定时,应考虑温度荷载的作用。与此同时,由于在两岸拱筒与地基、拱筒与两岸重力坝接头处周期性的拉伸和压缩变形,拱筒与地基以及拱筒与重力坝的刚度又相差悬殊,因此,在接头处两侧拱筒易引起疲劳破坏,产生裂缝,如佛子岭大坝在这方面表现得较为明显。

4 两座大坝裂缝变化规律及成因对比分析

4.1 佛子岭大坝裂缝变化规律及成因分析

佛子岭大坝的裂缝开度总体上呈周期性变化,主要受温度变化的影响,其次是水压和时效的影响。其中,在温升时,裂缝开度减小,温降时开度增大。气温约15℃时开度为零;大于15℃时,随气温升高,开度减小;反之增大。此外,佛子岭大坝的裂缝开度的水压分量与水位呈“S”形关系,大约水位在105.0 m时,开度最大;在约120.0 m时开度最小,在大于此水位时,开度显著增加。因此,在低温时,遇高水位(大于120.0 m)或低水位(105.0 m),裂缝将扩展和再生。佛子岭大坝经二次加固措施裂缝开度的时效分量显著减小,说

* 河海大学,佛子岭水电站.佛子岭连拱坝原型观测资料分析报告.1995,5

** 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.1994,4

明加固效应显著。然而，在加固后，开度仍有扩展趋势，但总的来说，开度的时效在逐年减小，趋于收敛和稳定。观测资料及结构分析结果表明：大坝施工期和运行初期出现的如“垛头缝”、“铅直缝”和“垛尾缝”等缝（简称第一类裂缝）以及支墩纵缝和拱筒施工缝被拉开而形成的裂缝（简称第二类裂缝）主要是由于大坝施工期和运行初期混凝土水化热的散发和气温变化等引起的；在运行期，发生在混凝土连续浇筑的部位，且大致垂直于主拉应力方向的裂缝，如坝踵处的垛头缝，起始于纵缝顶端并向拱筒与上游挡水面板方向发展的裂缝，起始于纵缝齿槽跟部向下游倾斜的裂缝等（简称第三类裂缝）对坝体结构性态有显著的影响。由裂缝方向可知，第三类裂缝主要是由于冬季高水位造成坝体局部拉应力较大，尤其坝踵附近区域处于双向受拉的不利应力状况，纵缝的大部分区域呈张开状态，因而在较大拉应力作用下，坝垛的薄弱部位易产生垛头缝，并向拱筒发展。

4.2 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，共布置的 10 个观测点不能完全代表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。从现有 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，一般在每年的 12 月～次年的 2 月裂缝开度达到最大值，7 月～8 月裂缝开度常出现最小值。此外，水压对裂缝的开度影响较小。大部分测点的开度的时效分量的年变化量较小，而且时效分量已基本趋于稳定，但个别的两岸坝垛上的测点裂缝开度尚未完全稳定。此外，经分析表明，河床坝垛（5[#] 垛～12[#] 垛）上游面约 73.0 m 高程的裂缝，主要是在筑坝过程中，该高程及其以上施工速度较快，以及垛面板未留伸缩缝，而其相接的拱筒留伸缩缝等因素影响下，产生附加应力引起的裂缝，经日常巡视表明，该裂缝比较稳定。与此同时，出现在两岸坝垛 3[#] 垛、15[#] 垛的垛尾缝，主要是低水位加温降作用引起的下游坝面，尤其是坝趾附近出现较大范围拉应力造成的。

4.3 小结

由以上分析可知，两座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。经分析，对于连拱坝而言，冬季高水位和低水位对裂缝的发展和再生是不利的荷载工况，尤其是冬季高水位或超低水位对应力是最不利的荷载工况。

5 结论

以上对佛子岭、梅山两座连拱坝的变形性态和裂缝的变化规律及成因作了初步的对比分析，得到下列主要结论：

(1) 连拱坝的变形主要受温度的影响，水压和时效影响要比温度变化影响小。但由于连拱坝结构比较单薄而且比较复杂，在变温、水压等荷载作用下易使裂缝扩展和再生，因此，引起局部的时效变形收敛较慢或出现显著的时效变形。

(2) 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。

(3) 对于库容小的连拱坝，高水位、高水温及温度骤降，是坝体变形最不利的荷载工况，佛子岭连拱坝 1993 年 11 月下旬坝体位移普遍超过历史最大值就是在这种工况下产生的。因此，在运行中应尽量避免这一工况。对于库容较大的连拱坝，高水位、较高坝温时，坝体向下游的位移较大。

(4) 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形成的。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] 吴中如，沈长松，阮焕祥．水工建筑物安全监控理论及其应用．南京：河海大学出版社，1990.36～64，252～265

(下转第 109 页)

新的活力。可以预计，随着并行、串行源同步通信技术、光互连技术、高性能 I/O 标准（如，NGIO）、存储总线标准及 SSI 等技术的发展，cluster 技术将呈现更强的竞争力。

7 后记

人们把“并行计算机系统”定义为“并行算法”和“并行体系结构”的结合，它说明了并行计算机系统与应用领域的紧密相关性。算法设计人员与系统设计师之间广泛、深入的交互，在系统设计

阶段有利于指导强化系统设计能力和成本的重点投向，以提高系统的性价比。在系统定型后，可以帮助编制出结合系统特点的高效并行程序。用户与系统研制方紧密配合，应用软件开发与并行计算机系统研制同步进行的“并发工程（Concurrent Engineering）”模式已被实践证明是行之有效的模式。要进一步加强的是更多更宽地从应用问题算法入手，结合应用全过程分析模拟信息流的特点，设计出整体性能均衡、高效的 MPP 系统。体系结构的创新源于对算法的深入分析。

Issues on the Scalability in Designing a Massively Parallel Processor

Lu Xicheng

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

[Abstract] The massively parallel processor (MPP) has been designed to meet the requirements for the high performance computing in many application fields of both national defense and economy. The structural scalability and the friendly programming are the two important and conflicting goals in designing a MPP system. Based on practice, the issues on the scalable design of MPPs are discussed in this paper.

[Key words] architecture; MPP; SMP; CC- NUMA; cluster; hypernode

(Cont. from p.97)

Research on operation behavior of multiple arch dam

Gu Chongshi, Li Xuehong

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

[Abstract] The multiple arch dam is sensitively affected by its environment because of its thin structure. Based on the observation data, the operation behaviors of Meishan and Foziling multiple arch dams are comparatively analyzed with many kinds of models and analysis methods. Some unfavorable loading conditions are obtained for the deformation, stability, strength, crack, etc.

[Key words] multiple arch dam; operation behavior; unfavorable loading condition; comparative analysis

*

*

*

更正

《中国工程科学》2000 年第 7 期第 68 页，续表 2 第 1 栏的 Ru Rh Pd Ag 系 Os Ir Pt Au 之误。特此更正，并向作者、读者致歉。