

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2014.03.011

# 重力坝纵缝梯形键槽的静动工作性态研究

汉金泽

(原保山市水利电力勘测设计院, 云南 保山 678000)

**摘要:** 基于约束函数法的热应力耦合接触模型对重力坝纵缝梯形键槽的非线性接触进行模拟。应用粘结单元实现键槽精细网格与坝体网格的衔接,从而细致地模拟了梯形键槽的实际布置方式和构造形式。采用动力分析软件 ADINA 对某带梯形键槽纵缝的重力坝进行了非线性分析,研究了纵缝梯形键槽随季节温度变化的变形、开度变化规律,地震作用下纵缝的开度和键槽破坏模式,以及纵缝键槽的初始间隙对大坝动力响应的影响。结果表明,梯形键槽沿上斜边随季节温度变化的错动导致纵缝张开,进而会增大重力坝在地震中的动力响应。

**关键词:** 工作性态;热应力耦合接触模型;重力坝;梯形键槽

中图分类号: TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2014)03-0049-05

## Study on Static and Dynamic Working Behaviors of Trapezoidal Shear Keys of Gravity Dam

HAN Jin-ze

(Baoshan City Investigation and Design Institute of Water Conservancy and Electric Power, Baoshan, Yunnan 678000, China)

**Abstract:** The thermomechanical contact model for the trapezoidal shear keys at the longitudinal joints of gravity dams based on the constraint function method was investigated here. The glue mesh was applied to implement the multi-scale modeling. The finite element model for the trapezoidal shear keys are established on the basis of their real construction and arrangement, and the dam-foundation-reservoir interaction with the longitudinal joints of trapezoidal shear keys was analyzed by ADINA. The contact deformation with seasonal variation as well as the opening variation and failure mode of the shear keys under seismic load were investigated and the effects of the initial opening of the shear keys on the seismic resistance of gravity dam were also discussed. The results suggest that the dislocation with seasonal variation along the upper bevel-edge of the trapezoidal shear keys would cause the opening of the longitudinal joints, which would lead to the increase of the dynamic response of the gravity dam under seismic loading.

**Keywords:** working behavior; thermomechanical contact model; gravity dam; trapezoidal shear keys

## 1 引言

在以往重力坝结构的设计和施工中,为防止坝体混凝土开裂并满足施工要求,常采用纵缝和横缝将坝体分割。为了使这些接缝能传递应力,缝面上通常设键槽并进行灌浆,增强整体性,提高抗震性能。纵缝键槽形式主要有三角形键槽和梯形键槽。国内外工程实践表明<sup>[1]</sup>,纵缝按规定要求灌浆以后,随着季节的变化,纵缝会发生张开和闭合的往复变

化。例如丰满大坝、龚嘴大坝、潘家口宽缝重力坝、三峡大坝等重力坝的纵缝都随着季节变化出现了不同程度的张开。纵缝的存在和开合变化降低了坝体的整体性和安全性。尤其是在地震作用下,纵缝的初始间隙、错动、张开和闭合,对坝体结构的动力响应和抗震性能有较大影响。

在过去的研究中,Ghobarach<sup>[2]</sup>等提出了一种简化方法来考虑带纵缝重力坝坝块间的相互作用,坝块用梁单元模拟,坝块间用链杆相连。Avinash<sup>[3]</sup>等

提出了 joint element, 分析了分缝对混凝土坝动力响应的影 响。涂劲和陈厚群<sup>[4]</sup>等配合动接触力模型考 虑纵缝接触非线性问题及纵缝初始宽度、填充情况、 缝面摩擦系数等因素对坝体地震反应影响。刘君和 孔宪京等<sup>[5]</sup>研制了 DDA 与 FEM 耦合法程序对某实 际有缝混凝土重力坝进行了数值计算和变动参数研 究。计算中考虑了纵缝的不同设置形式和缝宽大小 对坝体变形、应力分布的影响。王刚和马震岳<sup>[6]</sup>等 采用基于罚函数的动力接触模型来进行重力坝纵缝 的动力特性模拟。张燎军<sup>[7]</sup>等导出了能够反映键槽 传剪性能的键槽模型本构方程, 采用空间接触单元 模拟结构的施工缝。朱伯芳<sup>[8]</sup>给出了有厚度的带键 槽三维实体接缝单元。目前对水工接缝结构的研究 往往都以等效的方式来考虑键槽的啮合效果, 缝面 都以平直缝近似模拟。另外, 研究中忽略了由坝体 温度随季节变化引起的纵缝初始间隙及其分布规律 对坝体地震作用下动力响应的影响。

为了深入了解键槽在静力荷载和地震作用下的 工作性态。本文基于约束函数法的热应力耦合接触 模型对重力坝纵缝梯形键槽的工作性态进行数值模 拟。应用 ADINA 软件对某带梯形键槽纵缝的重力 坝进行了静动力非线性分析, 研究了纵缝梯形键槽 随季节温度变化的接触变形、开度变化规律、地震作 用下纵缝的开度和键槽破坏模式, 以及纵缝键槽的 初始间隙对大坝动力响应的影响。

## 2 热应力耦合接触模型

### 2.1 基于约束函数的接触条件

重力坝纵缝键槽缝面的错动和张合过程是一种 非线性的接触行为, 当抽象为力学模型时, 应满足法 向接触条件和切向接触条件。引入法向约束函 数<sup>[9]</sup>  $w(g, \lambda)$  用于描述法向接触条件, 其对任意  $g$  与  $\lambda$  的取值都是连续可导的。当  $w(g, \lambda) = 0$  时, 约 束函数  $w(g, \lambda)$  的表达形式为:

$$w(g, \lambda) = \frac{g + \lambda}{2} - \sqrt{\left(\frac{g - \lambda}{2}\right)^2 + \epsilon_N} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$  为接触面间的法向接触力;  $g$  为接触面法向 间距。当  $\lambda = 0$ , 并且  $g > 0$  时, 表示接触面张开; 当  $\lambda > 0$ , 并且  $g = 0$  时, 表示接触面闭合。 $\epsilon_N$  是一个极小 的常数。

采用摩擦约束函数  $v(\dot{u}_T, \tau)$  来描述切向接触条 件。当  $v(\dot{u}_T, \tau) = 0$  时, 约束函数  $v(\dot{u}_T, \tau)$  的表达形 式为:

$$\tau + v - \frac{2}{\pi} \arctan\left(\frac{\dot{u}_T - v}{\epsilon_T}\right) = 0 \quad (2)$$

式中:  $\dot{u}_T$  为接触面间相对滑动的速度;  $\tau$  为一无量纲 变量,  $\tau = |f_{cT}| / (\mu\lambda)$ ,  $\mu$  为接触面间的摩擦系数;  $f_{cT}$  为触面间的切向摩擦力;  $\epsilon_T$  是一个极小的常数。

### 2.2 接触面的热传递

接触面处的热传递控制方程由两项组成<sup>[10]</sup>。第 一项类似于热对流边界, 即单位时间内, 从接触面传 向接触体的热量与两接触面的温差成正比。第二项 是由接触摩擦产生的热。于是, 单位时间进入接触体  $I$  的热量等于:

$$q_c^I = \hat{h}(\theta^J - \theta^I) + q_c^I \quad (3)$$

式中:  $\hat{h}$  为接触面热传导系数;  $\theta^I$  和  $\theta^J$  分别为两接 触体  $I$  和  $J$  在接触面的温度。

$$q_c^I = f_I q_c^{II} \quad (4)$$

式中:  $q_c^{II} = f_{cT} \dot{u}_T$ ,  $f_I$  为由接触摩擦产生的热在接触 体  $I$  和  $J$  间的分配系数, 一般取  $f_I = f_J = 0.5$ 。

### 2.3 热应力耦合接触有限元控制方程

综上, 纵缝随季节变化发生的张开 - 闭合的往 复变化的热 - 应力耦合接触问题的有限元控制方 程如下<sup>[10]</sup>:

$$M\ddot{u} + K_u u = R - R_c \quad (5)$$

$$C\dot{\theta} + K_\theta \theta = Q - Q_c \quad (6)$$

$$F_c = 0 \quad (7)$$

$$F_p = 0 \quad (8)$$

其中:  $M$  为质量矩阵;  $K_u$  为刚度矩阵;  $u$  为节点位 移向量;  $R_c$  为接触面上的等效节点接触力向量;  $C$  为热容矩阵;  $K_\theta$  为热传导矩阵;  $\theta$  为节点温度列阵;  $\dot{\theta}$  为节点温度对时间的导数列阵;  $Q_c$  为接触面上节 点温度荷载列阵。式(7)为接触约束方程; 式(8)为 接触面热传递方程。

## 3 带键槽重力坝模型建立

### 3.1 基于粘结网格的网格衔接

重力坝纵缝键槽的尺度一般是几十厘米到几 米, 其尺度与坝体结构尺度相距甚远, 为了准确模拟 键槽实际的构造特点、布置方式和受力特点, 需要较 密集的网格。如果要使键槽与坝体的网格保持协调 一致, 必然带来巨大的网格数量。因此, 本文采用粘 结网格衔接键槽处精细的网格与坝体结构的网格, 如图 1。

粘结网格<sup>[11]</sup> 是用来连接两个网格不连续的面。 使网格不连续面在粘结面上实现位移和节点力的平

滑过渡。粘结的两个面,一个为主面,一个为从属面。两个面之间的约束关系可以表述为:

$$\int_{\Gamma} \lambda^S \cdot (u^M - u^S) d\Gamma^S = 0 \quad (9)$$

式中:  $u^M$  为主粘结面的位移;  $u^S$  为从属粘结面的位移;  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

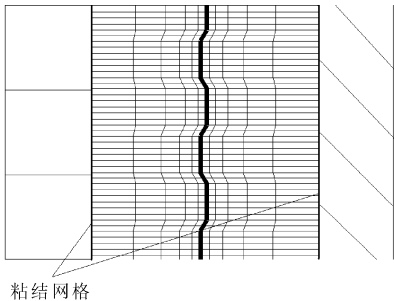


图1 粘结网格

### 3.2 坝体温度变化的模拟

按照设计规范的要求,在自重和水压力的作用下,重力坝纵缝在水平方向上不会出现拉应力,纵缝面上的拉应力和纵缝的张开-闭合主要是由坝体温度随季节的变化引起的。设纵缝灌浆时坝体温度场  $T_0 = (x, y, z)$ , 接缝灌浆后,经过一段过渡期,进入一个温度相对稳定的时期。下游坝面尾水以上的温度主要决定于气温,属于第三类边界条件。上游坝面温度与气温、水温、水位变化有关,属于第一类边界条件。

气温年变化为:

$$T_a = 20.0 + 13.0 \cos\left[\frac{\pi}{6}(\tau - 6.5)\right] \quad (10)$$

式中,  $\tau$  为时间(月)。

库水温度按中国水科院公式<sup>[12-13]</sup>计算:

$$\begin{cases} T_w(y, \tau) = T_m(y) + A(y) \cos\left[\frac{\pi}{6}(\tau - 6.5 - \epsilon)\right] \\ T_m(y) = c + (T_s - c)e^{-0.04y} \\ A(y) = 12.0e^{-0.018y} \\ \epsilon = 2.15 - 1.30e^{-0.85y} \\ c = (T_b - T_{sg})/(1 - g), g = e^{-0.04H} \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $T_w(y, \tau)$  为库水温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_m(y)$  为库水年平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $A(y)$  为水温年变幅( $^{\circ}\text{C}$ );  $y$  为计算点至水面的深度(m);  $H$  为上游库水深度(m);  $\epsilon$  为水温相位差(月);  $T_s = 20^{\circ}\text{C}$  为表面年平均水温;  $T_b = 9^{\circ}\text{C}$  为库底年平均水温。

混凝土热学特性指标按《水工混凝土结构设计规范》(SL191-2008)推荐值取,线膨胀系数  $\alpha = 1.0$

$\times 10^{-5}$ , 导热系数  $\lambda = 10.6 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 比热容  $c = 0.96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ , 放热系数  $\beta = 70 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。坝体在  $20^{\circ}\text{C}$  时进行接缝灌浆。

### 3.3 数值算例

某重力坝最大坝高 173 m, 坝顶宽 16 m, 正常蓄水位深 165.0 m。坝体设置 2 条纵缝, 纵缝设梯形键槽。其中靠近上游面为 I 号纵缝, 靠近下游面为 II 号纵缝。将该重力坝、坝基和库水进行有限元离散。重力坝坝体和坝基岩体均采用四节点等参单元, 库水采用平面势流体单元<sup>[14]</sup>, 以模拟地震时库水与大坝的流固耦合效应。取纵缝键槽上游 5 m 和下游 5 m 的范围, 根据键槽的设计尺寸、构造特点和布置方式精细建模, 键槽与坝体二者之间采用图 1 所示的粘结单元衔接。

坝体混凝土弹性模量取 20 GPa, 泊松比 0.167, 密度  $2400 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 极限抗拉强度 2.5 MPa, 极限抗压强度 25 MPa。地基弹性模量取 18 GPa, 泊松比 0.2。库水体积模量取 2.2 GPa, 密度  $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。纵缝摩擦系数取 0.8。在抗震动力分析计算时, 根据《水工建筑物抗震设计规范》(DL 5073-2000) 混凝土动态弹性模量和动态强度标准值较静态标准值提高 30%。采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼比为 0.05。坝体采用 ADINA 混凝土本构<sup>[15-16]</sup>时, 输入 Koyna 地震加速度记录, 其加速度峰值为  $0.474 g$ , 地震持时 10 s。

## 4 纵缝梯形键槽工作性态

### 4.1 静力作用下梯形键槽的接触变形

键槽在静力荷载作用下会发生相互错动咬合, 单个键槽的变形放大示意图如图 2(a) 所示。考虑坝体温度随季节变化后, 在冬季气温较低的几个月, 纵缝顶部会张开, 图 2(b)~图 2(d) 分别列出了 I 号纵缝顶部、I 号纵缝 80 m 坝高附近、I 号纵缝底部键槽的变形放大图。对于梯形键槽来说, 错动是沿着梯形键槽的上斜边发生的, 由于上斜边的错动, 导致纵缝顶部和下斜边张开。并不是经验想象中的完全平移脱开。总体来讲, 键槽的张开度是随着坝高的降低而减小的, 坝体底部的键槽总是压紧的, 沿坝高呈“丫”型。

### 4.2 纵缝的开度变化

图 3 和图 4 列出了完建期(空库)和正常运行期(正常蓄水位)工况下纵缝 I、II 顶端开度随坝体温度变化的曲线。两种工况下, 在温度较低的 10 月至次年 4 月, 纵缝均有张开。其中 1 月份缝顶开度最大。纵缝 I, 空库工况下, 最大开度 9.9 mm。正常

运行期,最大开度 2.9 mm。纵缝Ⅱ,空库工况下,最大开度 4.0 mm。正常运行期,最大开度 2.0 mm。纵缝Ⅰ的开度大于纵缝Ⅱ。空库工况下开度大于正常蓄水位工况。

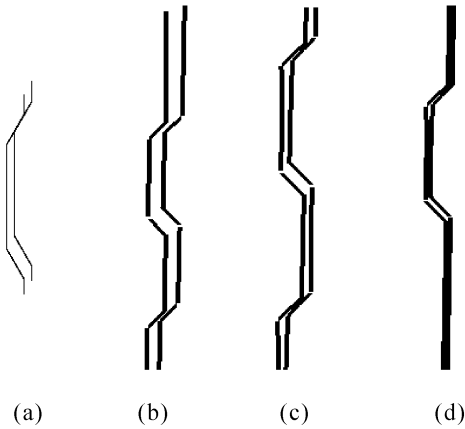


图 2 键槽接触变形放大图

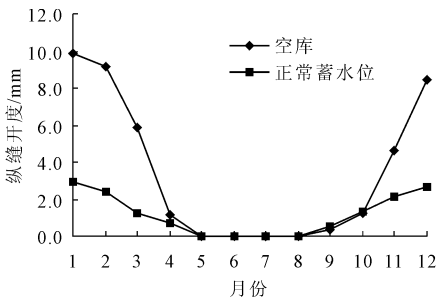


图 3 纵缝Ⅰ顶端开度

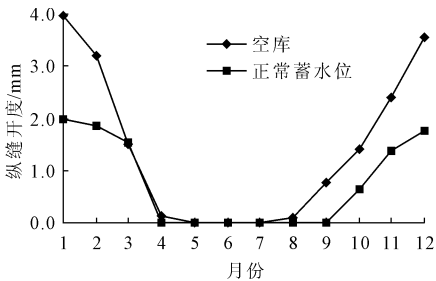


图 4 纵缝Ⅱ顶端开度

正常蓄水位遇地震的工况下,地震过程中,键槽坡面接触后会沿坡面的错动。键槽在地震过程中的往复错动,导致纵缝发生张开、闭合的往复变化,纵缝的张开度是随着坝高的降低而减小的。图 5 列出了输入 Koyna 地震波时,纵缝Ⅰ顶部的开度时程曲线。其中,无初始间隙的开度时程曲线是指计算时没有考虑坝体温度随季节的变化,地震开始时纵缝是压紧闭合的。此时,地震中,纵缝Ⅰ的最大开度为 8.2 mm。地震结束时,纵缝恢复到压紧闭合状态。有初始间隙的开度时程曲线是指计算中考虑坝

体温度随季节变化,以纵缝开度最大的 1 月份的坝体静力受力状况为初始条件。地震前坝体纵缝有初始张开。地震中,纵缝的最大开度为 14.9 mm。整个地震过程中纵缝的开度均大于无初始间隙时纵缝的开度。地震结束时,纵缝仍有残余张开。

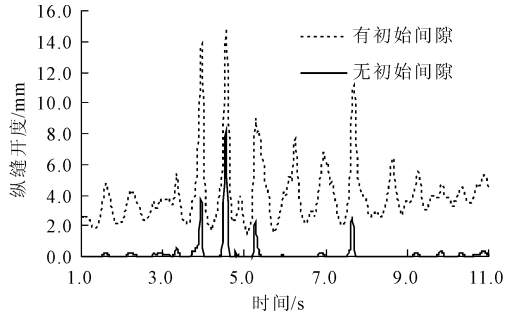


图 5 纵缝Ⅰ顶端开度时程曲线

#### 4.3 地震作用下键槽破坏模式

纵缝的开裂区主要分布在坝体上部的键槽,顶部键槽开裂最严重,随着坝高降低,开裂区逐渐减少。坝底部纵缝下游坝块也会出现开裂。对于梯形键槽,开裂区主要分布在梯形上斜边上部的下游坝块和上斜边下部的上游坝块。总体来讲,Ⅱ号纵缝较Ⅰ号纵缝开裂严重。不考虑纵缝的初始间隙比考虑纵缝初始间隙键槽的开裂严重。

### 5 纵缝键槽对大坝动力响应的影响

图 6 列出了输入 Koyna 地震波时键槽有无初始张开重力坝坝体在地震结束时的开裂区。从图 6 中可以看出,考虑纵缝初始张开时,开裂区主要分布在坝颈下游面折坡处、上游面折坡处和坝踵。不考虑纵缝初始张开时,开裂区只分布在坝踵处。考虑纵缝初始间隙模型开裂比无初始间隙的模型严重。因此,纵缝的初始间隙降低了大坝的整体抗震性能。

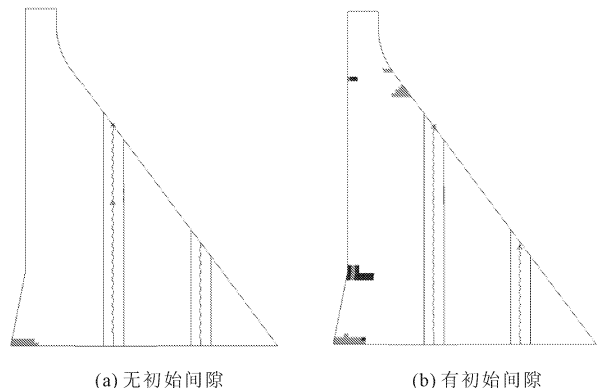


图 6 坝体开裂图

## 6 结 论

计算结果表明,键槽坡面发生接触后,在静力荷载作用下键槽会沿上斜边发生相互错动咬合。考虑坝体温度随季节变化后,键槽的错动会在冬季气温较低的几个月引起纵缝缝顶张开。纵缝的开度是随着坝高的降低而减小的,底部总是压紧的,沿坝高呈“丫”型。空库工况下开度大于正常蓄水位工况。

在地震过程中,键槽坡面接触后会发生沿坡面的往复错动,导致纵缝在地震中的张合。纵缝的张开度是随着坝高的降低而减小的。纵缝的初始间隙会增加地震中纵缝的张开度。纵缝顶部的键槽在地震中会出现开裂损伤,其受损程度随着坝高降低而减弱。

纵缝初始间隙的存在,降低了坝体的整体性,使单个坝块作为悬臂梁的受力特点愈发明显。这使地震作用下坝顶的最大位移和坝踵竖向正应力有所增大。坝体的开裂受损更加严重。综上所述,纵缝键槽的黏结咬合程度对重力坝结构动力响应有一定影响,对已建大坝的纵缝变化进行实时监控和适时修复加固,对大坝的抗震安全是十分必要的。

### 参考文献:

- [1] 周建平,钮新强,贾金生.重力坝设计二十年[M].北京:中国水利水电出版社,2008:245-248.
- [2] Fenves G, Chopra A K. Simplified earthquake analysis of concrete gravity dam[J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(8): 1688-1708.
- [3] Avinash C S, Milton S Z. Dynamic analysis of dams with nonlinear slip-joints[J]. Soil Dynamic Earthquake Engineering, 1998, 3(17): 185-196.
- [4] 涂 劲,候顺载,陈厚群.纵缝对重力坝地震反应影响

的研究[J].水利学报,2000,31(12):53-58.

- [5] 刘 军,孔宪京. DDA 与 FEM 耦合法在分缝重力坝非线性分析中的应用[J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 585-591.
- [6] 王 刚,马震岳,张运良,等.考虑重力坝纵缝结合程度的非线性有限元数值模拟[J].水力发电学报,2009,28(2):41-46.
- [7] 傅作新.考虑有键槽的施工时大体积混凝土结构的应力分析[J].土木工程学报,1994,27(4):63-69.
- [8] 朱伯芳.有限厚度带键槽接缝单元及接缝对混凝土坝应力的影响[J].水利学报,2001,(2):1-7.
- [9] Bathe K J, Bouzinov P A. On the constraint function method for contact problems[J]. Computer & Structure, 1997, 64(5):1069-1085.
- [10] Pantuso D, Bathe K J, Bouzinov P A. A finite element procedure for the analysis of thermo-mechanical solids in contact [J]. Computer & Structure; 2000, 75(6):551-573.
- [11] 王爱明,王勳成.有限元计算中疏密网格间过渡单元的构造[J].清华大学学报:自然科学版,1999,39(8):100-103.
- [12] 朱伯芳,吴龙坤,郑瑾莹,等.重力坝运行期纵缝开度变化[J].水利水电技术,2007,38(4):26-29.
- [13] 朱伯芳,吴龙坤,李 玥等.重力坝运行期年变化温度场引起的应力[J].水利水电技术,2007,38(9):21-24.
- [14] Bouaanani N, Lu F Y. Assessment of potential-based fluid finite elements for seismic analysis if dam - reservoir systems [J]. Computers and Structures, 2009, 87(3):206-224.
- [15] Bathe K J, Walczak Jan, Welch Alan, et al. Nonlinear analysis of concrete structures[J]. Computer & Structure, 1989, 32(3), 563-590.
- [16] Mao M, Taylor C A. Non-linear seismic cracking analysis of medium-height concrete gravity dams [J]. Computer & Structure, 1997, 64(5):1197-1204.