

建基面强度对拱坝应力、变形的影响

钱向东 赵 引 任青文

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 建基面是传递拱坝和基岩相互作用的纽带, 它的强度直接影响基岩对坝体的约束, 从而影响坝体的应力和变形. 采用非线性有限单元法, 以设计中的某高拱坝为例, 分析建基面强度对坝体应力和变形的影响. 结果表明建基面强度对坝体应力的影响仅限于建基面附近的局部范围, 对最大主拉应力的影响要大于对最大主压应力的影响, 建基面强度的降低不会无限地增大坝体的应力数值; 建基面强度对坝顶位移的影响较小, 但对坝底位移(尤其是顺河向相对位移)的影响较大, 当建基面强度较低时, 坝底顺河向相对位移随建基面强度的降低而增大.

关键词 拱坝; 建基面; 强度; 应力和变形

中图分类号: TV642.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-1980(2001)03-0095-04

在过去的研究中, 关于基岩的柔性、非均匀性和非线性对坝体应力、变形和稳定性影响的工作开展得比较多, 而专门研究建基面强度对坝体应力、变形和稳定性影响的工作则很少有报道. 建基面是联系拱坝与基岩相互作用的纽带, 它给基岩传递作用在坝体上的荷载, 又给坝体提供基岩的支撑. 显然, 建基面的特性和受力后的状态会影响坝体和基岩之间的相互作用力, 即会影响坝体的应力分布和作用于基岩的荷载分布. 当建基面的强度较高、拱坝较低时, 建基面处于弹性工作状态, 使坝体和基岩完整粘结. 当建基面的强度较低、拱坝较高时, 建基面上的应力可能会超出强度极限, 发生局部的破坏(开裂或屈服滑移). 众所周知, 建基面的破坏将使坝体的应力重新调整, 一般认为, 只要设置可靠的止水措施, 这种应力调整会均化坝体的应力, 是有利的. 底缝或周边缝拱坝原理均据于此. 但也有研究者认为这种应力调整会严重恶化坝体的应力, 最终可能导致坝体的整体失稳. 另外, 建基面的强度参数也存在着不确定性和变异性, 很难确保高拱坝在建基面上不发生局部破坏. 因此, 有必要研究拱坝应力、变形对建基面强度参数的敏感性. 本文采用非线性有限单元法, 以设计中的某高拱坝为例分析建基面强度对坝体应力和变形的影响.

1 建基面模型

在拱坝的有限元模型中一般不专门模拟建基面, 而是用靠近建基面的坝体单元的应力来表示建基面的应力, 其应力表征点实际上离建基面有一定的距离. 由于建基面附近应力集中, 这些表征点的应力可能会比真正的建基面应力小很多, 由此得到的建基面破坏区范围可能会偏小, 难以真正反映建基面的特性. 在有限元分析中, 为了模拟建基面的特性, 必须引入特殊的单元. 目前最常用的单元是 Goodman 接触面单元^[1]和薄层界面单元(thin-layer element/interface element)^[2~4]. Goodman 单元的特点是无厚度, 可充分体现建基面的“面”的概念, 但其刚度系数的确定仍有一定的经验性. 薄层单元虽有一定的厚度, 但通常只有坝高的 1/200 左右, 其单元应力已充分接近建基面应力^[3], 而其位移模式与常规单元一样, 便于实现. 参数研究表明, 只要单元的厚度比在 0.001~0.1 之间, 这种薄层单元能够给出满意的解答^[3, 4].

2 强度准则与本构关系

对于拱坝的建基面材料, 有关混凝土/基岩试件的物理力学试验结果表明, 各组试件均在混凝土/基岩接触面处破坏, 剪切面比较平整. 剪应力与剪切变形的关系曲线均具有明显的脆性破坏特征, 即当试件破坏后,

剪应力迅速下降,并在摩擦位移不大的情况下就可获得残余强度.因而,其应力应变关系可用图 1 所示的脆性软化模型来简单表示.

建基面是一个强度弱面,薄层单元内材料的破坏在层面内占优势.假定建基面材料的破坏满足 Mohr-Coulomb 准则:

$$F = \sqrt{\tau_{\xi}^2 + \tau_{\eta}^2} + \sigma_n \tan \varphi - c = 0$$

(1)

式中: τ_{ξ}, τ_{η} ——层面上的两个正交方向的剪应力; σ_n ——层面的法向正应力; c , φ ——材料的凝聚力和内摩擦角.

当 $F < 0$ 时材料处于弹性状态,本构关系满足虎克定律:

$$d\tilde{\sigma} = \underline{D} d\tilde{\varepsilon}$$

(2)

式中 $\underline{D}$ 为各向同性弹性矩阵.

当 $F > 0$ 时材料发生破坏,层面上保留满足残余强度条件的应力 $\tilde{\sigma}$,当 $\sigma_n > 0$ 时,表示受拉破坏,残余应力 $\tilde{\sigma} = 0$,迁移超限应力 $\tilde{\sigma} = \sigma - \tilde{\sigma}$,迁移的单元结点荷载为

$$\underline{f} = \int_V \underline{B}^T \tilde{\sigma} dV$$

(3)

式中 $\underline{B}$ 为单元几何矩阵.

3 分析方法

在结构优化、可靠性分析和参数识别等问题中,往往需要研究各参数对结构反应或某些目标函数的影响,从而引入了灵敏度的概念,它实质上是结构反应或目标函数对这些参数的导数.灵敏度的大小可以反映出参数对结构反应或目标函数的影响的大小.在非线性问题中,由于结构反应或目标函数是这些参数的非线性隐函数,无法用解析法求出灵敏度,只能采用差商、摄动等数值方法.研究建基面强度参数对拱坝应力、变形的影响时,也可以在设计点处分析强度参数的灵敏度,但它仅反映强度参数在设计点附近小范围内变化时对拱坝应力、变形的影响.为了避免太多的数值计算,同时又能考虑强度参数的大范围变化,本文不采用灵敏度分析,而是直接分析强度参数偏离设计点(这里只考虑小于设计值的情况)时拱坝的应力和变形,从中分析建基面强度参数对拱坝应力、变形的影响.为此引入强度系数 k ,对一系列的 $k(\leq 1.0)$,计算当 $\underline{x} = k \underline{x}_0$ 时拱坝的应力和变形,其中 $\underline{x}_0$ 为建基面强度参数的设计值.这里取 $\underline{x}_0 = (c_0, f_0)^T$, c_0 和 f_0 是建基面的凝聚力和摩擦系数的设计值.

4 算例分析

以设计中的某双曲抛物线高拱坝为例分析建基面强度对坝体应力和变形的影响.该拱坝高 292 m,坝顶高程 1245 m,厚度 12 m,坝底高程 953 m,最大厚度 72.9 m,坝顶中心线弧长 929.1 m,有限元网格如图 2.3 所示.基岩中有 I, II, III, IV, V 五类岩石,计算模型中把五类岩石归并为两种材料,另考虑了 F_5, F_7, F_{10}, F_{11} 4 条断层.坝体和基岩的物理力学参数见表 1.建基面强度参数的设计值按各高程坝肩岩性的不同分别取值,凝聚力 $C_0 = 1.0 \sim 1.3$ MPa,摩擦系数 $f_0 = 1.13 \sim 1.3$.其残余强度统一取 $C_0' = 0.05$ MPa, $f_0' = 1.08$.

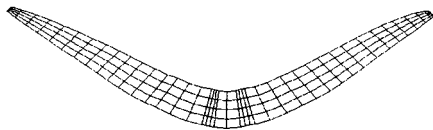


图 2 拱坝建基面有限元网格

Fig.2 Meshes on dam-foundation interface

表 1 坝体和基岩的物理力学参数

Table 1 Physical properties of materials

类型	弹模 /GPa	泊松比	容重 ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
I, II 类岩体	22.0	0.180	27.0
III, IV, V 类岩体	9.0	0.260	27.0
F_5, F_7, F_{10}, F_{11}	2.0	0.300	27.0
坝体混凝土	21.0	0.180	24.0

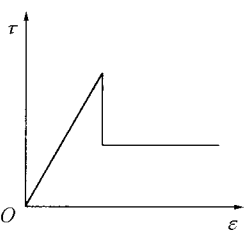


图 1 建基面材料
应力应变关系

Fig.1 The relation between
stress and strain of material
on dam-foundation interface

计算工况为坝体自重 + 正常蓄水位(上游水位高程 1240m) + 温降 + 基岩渗流场. 假定坝基止水完好, 破坏区内不考虑进水. 表 2 列出了各种 k 值下坝体的最大主拉应力和最大主压应力, 从中可以看出, 随着 k 值的不断降低, 即建基面强度的不断降低, 坝体的最大主拉应力不是单调变化的. 当 $k > 1/3.5$ 时, 最大主拉应力随着 k 的降低而增大; 当 $k < 1/3.5$ 时, 最大主拉应力则随着 k 的降低而减小. 整个过程中最大主压应力则变化不大. 由此可见, 建基面的破坏在一定程度上确实会恶化坝体的应力, 但并不是无限制的恶化, 当建基面强度低到一定程度时, 相当于设置了周边缝. 如图 4 所示, 建基面强度对坝体位移的影响也不是单调的, 在 $k = 1/3.5$ 处出现转折点, 对坝底位移的影响要大于对坝顶位移的影响, 尤其是坝底的顺河向位移. 在 $k < 1/3.5$ 后, 坝底顺河向位移随 k 的减小而迅速增大, 当 $k = 1/6$ 时, 坝踵相对于基面的顺河向位移已达 13 mm, 对止水排水设施不利.

表 2 坝体最大主应力

Table 2 Max-principal stress of dam MPa

$1/k$	主拉应力	主压应力
1.0	2.53	-27.28
1.5	2.82	-27.17
2.0	5.34	-26.83
2.5	7.93	-26.60
3.0	8.55	-26.53
3.5	10.14	-27.45
4.0	9.41	-27.47
4.5	8.75	-27.53
5.0	8.12	-27.64
5.5	7.52	-27.73
6.0	7.04	-27.77

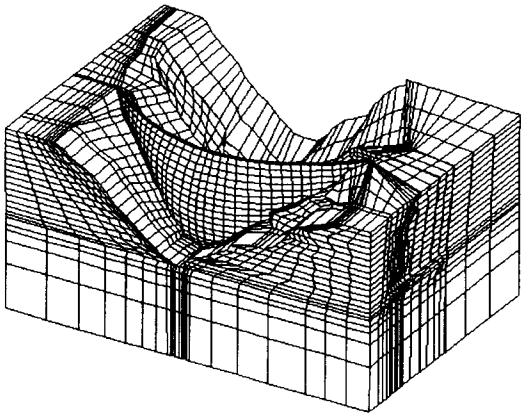


图 3 拱坝三维有限元网格

Fig. 3 3D meshes of dam-foundation system

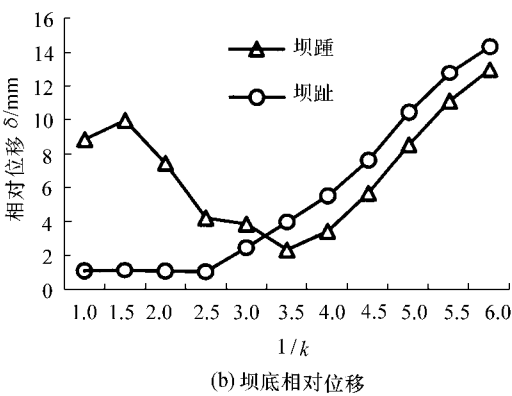
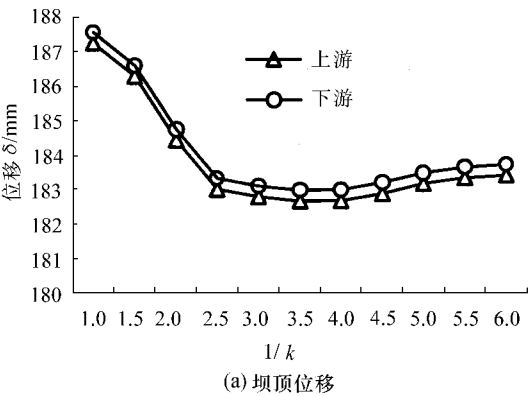


图 4 坝体顺河向位移与 k 的关系

Fig. 4 Relation between k and dam displacement

5 结 语

- a. 建基面是传递拱坝和基岩相互作用的纽带, 它的强度会影响坝体的应力和变形, 但对坝体应力的影响仅限于建基面附近的局部范围. 建基面强度对最大主拉应力的影响要大于对最大主压应力的影响, 建基面强度的降低不会无限地增大坝体的应力数值. 建基面强度对坝顶位移的影响较小, 但对坝底位移(尤其是顺河向相对位移)的影响较大, 当建基面强度较低时, 坝底顺河向相对位移随建基面强度的降低而增大. 因此, 在设计底缝或周边缝拱坝时, 应重视建基面的相对位移, 以保证止水排水设施的安全性.
- b. 建基面强度对建基面附近应力分布和数值影响的同时, 也影响坝体对基岩作用力的分布, 从而也会影响基岩的稳定性. 因此, 拱坝的强度和稳定性研究是不能分开的.

参考文献：

- [1] Goodman R ,et al. A model for the mechanics of joint rock[J]. J of Soil Mech ASCE ,1968 ,94 (SM3) :637 ~ 659 .
- [2] 傅作新 ,钱向东.有限单元法在拱坝设计计算中的应用[J].河海大学学报 ,1991 ,19 (2) :8 ~ 15 .
- [3] Desai C S , Lightner J G. Mixed finite element procedure for soil-structure interaction and construction sequence[J]. Int J Num Meth In Eng ,1985 ,21 :801 ~ 824 .
- [4] Griffiths D V. Numerical modeling of Interface using conventional finite elemen[A]. Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics[C]. Nagoya :1985 .837 ~ 844 .

Influence of the Strength of Bearing Surface on Stress and Deformation of Arch Dams

QIAN Xiang-dong ,ZHAO Yin ,REN Qing-wen

(College of Civil Engineering ,Hohai Univ . ,Nanjing 210098 ,China)

Abstract :A bearing surface transmits the interaction between an arch dam and its foundation ,the strength of which directly affects the constraint of the bedrock to the dam ,and thus affects the stress and deformation of the dam. The influence is studied in this paper with nonlinear finite element method as an example for a high arch dam in design. The results show that the influence on stress is only limited within the local area near the bearing surface ,larger on the maximum principal tensile stress than on the principal compression stress ,and the decrease of the strength does not cause unlimited increase of the maximum stress. The influence on the displacement of the top of the dam is smaller than that of the bottom of the dam ,especially the relative downstream displacement. At the lower strength of the bearing surface ,the relative downstream displacement at the bottom of the dam increases with the decrease of the strength.

Key words :arch dam ;bearing surface ;strength ;stress and deformation