

拱坝结构非整体性分析与坝体接缝模型综述

孙林松, 王德信

(河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:综述拱坝结构非整体性分析的研究现状以及数值分析中采用的接缝模型, 介绍坝体接缝的分类与构造; 分析比较国内外学者进行拱坝非整体性分析研究的方法与结论; 讨论坝体接缝模拟的数值分析模型, 指出合理的坝体接缝模型应能正确反映其接触非线性的本质; 同时应充分利用现有实测资料, 对接缝材料的本构模型和力学参数作进一步研究; 另一方面高效的非线性求解方法也是进行拱坝非整体性分析的一个关键问题。

关键词:拱坝; 非整体性; 接缝模型; 数值分析; 综述

中图分类号: TV37 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2001)01-0018-04

传统的拱坝结构分析是将拱坝看成一种整体性很好的高次超静定空间壳体结构^[1]。随着拱坝修建高度的不断增加与研究工作的逐步深入, 人们开始认识到这种简单的理想化模型不尽合理, 坝体中的各类接缝对拱坝工作特性的影响是不容忽视的。

1 拱坝分缝与结构的非整体性

1.1 拱坝接缝的类型与构造

拱坝分缝的目的是为了大体积混凝土的施工, 便于施工期间混凝土散热和降低收缩应力, 同时也是适应地形地质变化的需要。拱坝的接缝一般可分为横缝、纵缝、水平接缝和周边缝(底缝)等^[2]。就构造而言, 只有周边缝(底缝)属于永久性接缝, 其余均属临时性接缝, 它们在坝体挡水前的适当时候须进行压力灌浆, 填充缝面。

水平缝是指混凝土分层浇筑时上下两浇筑层之间水平方向的接触表面。这类接缝只要在施工时对缝面处理适宜, 并注意上下层浇筑间歇时间, 一般不会影响拱坝结构的整体性。

纵缝只有当拱坝底宽较大时才需要设置。随着拱坝设计水平和施工技术的提高, 这类接缝在拱坝中将会越来越少。

横缝是拱坝中的主要接缝, 其功能是: 把相邻坝段分开以适应地形地质的变化, 满足施工期内沉降的需要; 有利于混凝土水化热的释放, 以满足防止温度裂缝的需要; 便于分段分块浇筑, 以满足施工的需要, 等等。由于拱坝在平面上是按照整体拱圈设计

的, 所以横缝在适当的时候应进行压力灌浆, 以保证结构的整体性。另外, 为了能咬结牢固, 便于传力, 横缝缝面一般还应设置键槽(图1)。

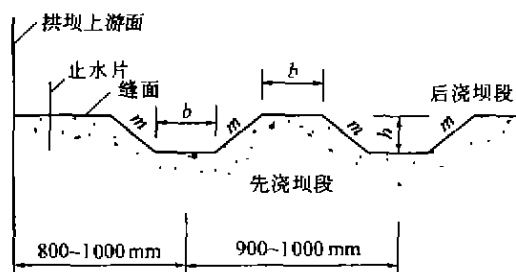


图1 拱坝横缝构造示意图

周边缝、底缝的主要功能是通过放松坝踵处地基的约束, 以降低坝底附近的拉应力, 防止拱坝开裂。在拱坝正常运行时允许缝面张开, 从而达到“以缝克缝”的目的。周边缝常用型式为圆弧形, 而底缝一般采用平缝的型式, 图2为其示意图^[2]。

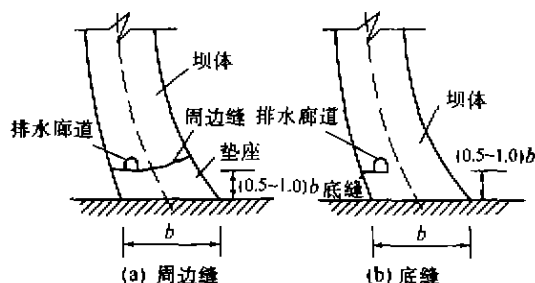


图2 周边缝、底缝示意图

1.2 分缝对拱坝结构特性的影响

虽然拱坝中的临时接缝在适当的时候都要进行

灌浆处理,但经过多年运行后仍有可能张开.它们的存在不可避免地要影响坝体结构的整体性.

人们首先认识到分缝对拱坝工作特性的影响是从对自重应力的研究开始的. Hartley 和 McNeice^[4]的研究表明,假定自重突然作用在已经封拱的坝体结构上和按坝块浇筑的实际情况施加,其结果相去甚远.丁予通^[5]把自重应力分为整体自重应力、分缝自重应力和施工自重应力,认为只有施工自重应力才能真实反映拱坝自重作用下的应力状态.田斌^[6]则将施工自重应力称为累计自重应力,以形象地表达自重荷载的施加方式.

正如上述,横缝是拱坝中普遍存在的接缝.人们对拱坝结构非整体性的研究也主要集中在横缝对拱坝结构特性的影响上面.

Herzog^[7]研究了无抗拉强度坝块接缝对拱坝应力和位移的影响,认为无抗拉强度横缝的开裂会使拱坝挠度及基础约束弯矩增大,而拱向水压力分量减小.文中例举的拱坝坝顶位移与基础约束弯矩分别增加了 35% 和 27%,平均拱向水压荷载减少了 15% 左右.因此,他在该文及文献[8]中均强调拱坝应力校核应考虑横缝无抗拉强度的结构状态.

林鹏、朱伯芳^①结合小湾拱坝研究了横缝对拱坝结构特性的影响.研究表明,由于横缝不抗拉,最大拱向应力增加了近 50%,拱端上游侧拱向拉应力减小了 20% 左右.但横缝不抗拉对坝体位移场的影响不大,他们认为这是因为拱坝是受压结构,坝体横缝在拉开、闭合、错动的过程中仍能很好地传递拱向应力.

Fenves 和 Mojtahedi^[9]、赵光恒和杜成斌^[10]考虑地震响应的研究也得出相似的结论,即:拱坝横缝的张开使得拱的作用降低,梁的作用加强.后者还研究了缝面初始压力与抗拉强度的影响,认为两者均有利于拱坝抗震.

随着所建拱坝高度的不断增加和施工技术的发展,人们又开始进行高拱坝分期施工分期蓄水的全过程仿真分析. Carrère 等^[11]结合 Katse 拱坝研究了分期施工分期蓄水对拱坝结构特性的影响,认为考虑施工期间蓄水时,拱坝上部厚度应适当减小,而下部厚度则应有所增加.同时,他们还指出,当保持库水水面高程低于封拱高程约 20% 坝高时,分期蓄水所产生的影响并不显著.林鹏、朱伯芳结合小湾拱坝的研究则表明,分期施工分期蓄水过程对拱坝下部应力场影响不大,而上部应力分布变化比较大,其变化趋势是使上游侧压应力减小而下游侧压应力增大.同时,由于分缝的存在削弱了拱坝的整体作用和

刚度,拱坝最大径向位移增加了约 20%.

2 拱坝分析中的接缝模型

在拱坝结构的非整体性分析中,坝体接缝的模拟是问题的关键.拱坝接缝虽然到一定的施工阶段都要进行灌浆处理,但在一定的荷载作用下仍可能张开.接缝的开裂会引起坝体内应力重分布和接缝性能的改变,这是一个非线性的变化过程.接缝的另一个非线性特性就是两缝面之间的滑移,虽然大部分拱坝的接缝均设有键槽,但在一定条件下发生相对滑移仍是可能的.在对接缝问题的模拟中,人们已经提出了不少模型,就其出发点而言,大致可分为连续介质模型、不连续介质模型和接触模型等.

2.1 连续介质模型

连续介质模型是通过引进一种特殊的单元来模拟坝体的接缝,从而将问题仍然归于连续介质力学的范畴.这类模型常用的有薄层单元模型和接触面单元模型等.

薄层单元模型^[12]假设接缝具有一定厚度,采用与常规实体单元相同的位移模式.但是,由于单元厚度很薄,因而略去一些高阶微量,认为 $\epsilon_x = \epsilon_y = \gamma_{xy}$,从而将单元应变列阵和应力列阵简化为 $\epsilon = [\epsilon_x, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}]^T$ 和 $\sigma = [\sigma_x, \tau_{yz}, \tau_{xz}]^T$ (这里 z 轴垂直于缝面).相应地,其它相关运算矩阵也可得到简化.这样就将接缝问题转化为材料非线性问题求解.接缝的开裂判别准则为

$$F_1 = \sigma_x - f_t \quad (1)$$

当 $\sigma_x < f_t$ 时,缝面发生相对滑移的判别准则为

$$F_2 = \sqrt{\tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2} - c + \sigma_x \tan \varphi = 0 \quad (2)$$

式中: σ_x 以拉为正; f_t 和 c, φ 分别为缝面的抗拉强度和抗剪强度指标.

薄层单元运算矩阵与常规单元基本相同,便于编程处理,用于拱坝结构分析比较方便.林鹏、朱伯芳的研究以及任青文等^②对小湾拱坝横缝和周边缝所进行的分析均采用了这种模型.但由于薄层单元厚度一般很小,扁平的单元形态会影响结构分析的精度.傅作新和钱向东^[13]曾对薄层单元的厚度对计算结果的影响进行了讨论.另外,薄层单元由于采用了实体单元的位移模式和几何矩阵,没有能很好地反映接缝滑移的几何非线性特征.

相对而言,接触面单元在接缝模拟中应用更加广泛.接触面单元是一种无厚度单元,接缝由在其中面上的平面膜单元模拟,接缝的张开滑移用两缝面

①林鹏,朱伯芳.小湾拱坝施工仿真、开裂分析与横缝工作性态研究.“九五”国家科技攻关阶段报告,1998.

②任青文等.分缝拱坝的非线性分析.见:高拱坝学术讨论会论文集,北京,1996.

的相对位移来表示.接触面单元应力与相对位移之间的关系为

$$\sigma = Kw \quad (3)$$

式中: $\sigma = [\sigma_n \quad \tau_r \quad \tau_s]^T$ 为缝面应力列阵; $w = [w_n \quad w_r \quad w_s]^T$ 为缝面位移列阵;

$$K = \begin{bmatrix} k_n & & \\ & k_r & \\ & & k_s \end{bmatrix},$$

k_n 和 k_r, k_s 分别为接触面的法向刚度系数和切向刚度系数.

Weber 等^[14]以及 Fenves 和 Mojtahedi^[9]的研究均假设接缝无滑动,认为当缝面法向应力大于抗拉强度时接缝张开.杜成斌^[15]在他的研究中考虑了接触面的滑动,认为当 τ_r 或 τ_s 大于 $\mu\sigma_n$ (μ 为缝面的摩擦系数)时,接缝产生滑动, τ_r 或 τ_s 保持定值 $\mu\sigma_n$.该假设忽略了 τ_r 或 τ_s 均不大于 $\mu\sigma_n$,缝面仍可能滑动这一事实.王德信、黄文雄^①在对小湾拱坝进行研究时,采用了式(2)作为判别准则,按理想弹塑性问题处理接缝的滑移.

上述接触面单元不能考虑接缝有初始间隙的情况.刘国明^[16]借鉴薄层单元模型对此进行了改进,提出了连杆接触单元非线性模型,可以考虑有初始间隙、有摩擦接触问题.同时该模型以接触点对间(连杆)的应力判别接触状态,避免了以单元体内的应力作为判据可能带来的失真现象.

薄层单元和接触面单元均必须预先假定接缝的法向刚度和切向刚度,薄层单元的刚度参数用弹性模量来表示,而接触面单元则以弹簧的形式给出.然而,接缝的这些刚度参数实际上是很难准确确定的. Lei 等^[17]提出了一种新的单元模式,以结点位移和接触应力为基本未知量,利用虚位移原理导出不同接触条件所对应的等效单元刚度-约束矩阵和等效荷载列阵,用标准的有限元集成规则迭加到总刚度矩阵和总荷载列阵中去,求解所形成控制方程.该模型可以处理有初始间隙、有摩擦的接触问题,而且不需要假定接触面的刚度.

2.2 不连续介质模型与接触模型

不连续介质模型不要求计算模型满足位移连续性条件^[18-20],目前主要仍用于岩体结构分析.徐振龙^[21]利用界面元法研究了带横缝拱坝的动力稳定问题.界面元是一种基于分块刚体位移模式将单元变形积累在单元界面的非协调位移元.它以单元形心的刚体位移为基本未知量,相临单元界面上的位

移可以不连续,从而在用于模拟坝体接缝时可以方便地描述缝面之间的相互分离与滑移现象,缝面内的应力由相对位移及缝面材料特性确定.在徐振龙的研究中仍然采用式(1)和式(2)作为接缝张开与滑移的判别准则.

坝体接缝问题本质上属于接触问题.接触问题求解方法虽较多^[22],但主要应用于小范围接触问题.部分学者也提出了用接触模型来研究坝体的接缝问题:陈万吉^[23]利用有限元混合法进行了裂缝重力坝的非线性分析.卓家寿等^[24]利用变分不等式理论导出了求解有初始间隙、有摩擦接触问题的变分不等式迭代解法,并将其应用于重力坝纵缝^[25]、横缝^②等工程问题的分析.李同春等^[26]提出了接触问题的混合标架子结构解法,按各子结构形成刚度矩阵并凝聚到接触面,然后根据接触状态形成整体刚度矩阵和荷载列阵求解,并用该方法研究了二滩拱坝坝体和地基接触面的应力分布情况,得出了比较合理的结果.

3 结 语

随着拱坝修建高度的不断增加和分期施工分期蓄水技术应用的日益普遍,拱坝结构的非整体性分析越来越受到广泛的重视.本文介绍了国内外学者在这方面的一些研究成果和结论.笔者认为,为了更好地进行拱坝结构的非整体性分析研究,以下几方面的问题需作更深入的研究探讨.

a. 建立合理有效的坝体接缝模型.模型应能准确反映接缝张开、滑移等非线性特征,从坝体接缝的本质入手建立合适的接触模型是今后研究的方向.

b. 合理确定接缝的本构模型与材料参数.接缝材料的本构模型与力学参数是判断接缝开裂滑移与否的主要依据,而且由于一方面可能存在接缝灌浆不良现象,另一方面受荷以后接缝中的灌浆材料也有可能发生劣化.因此,有必要从接缝材料的力学参数反演入手作进一步研究.

c. 研究高效的非线性求解方法.坝体接缝问题属于较强的接触非线性问题,同时对高拱坝而言,还存在坝踵等关键部位开裂等材料非线性问题.为了能有效地解决两者耦合所形成的强非线性问题,应该对非线性求解方法作更深入的研究.

参考文献:

- [1] 美国垦务局.拱坝设计[M].拱坝设计翻译组译.北京:水利电力出版社,1984.

①王德信,黄文雄.小湾拱坝(有底缝)非线性有限元分析.河海大学,1996.

②卓家寿等.三峡大坝横缝灌浆后孔口应力及变温影响的研究.河海大学,1997.

