

似连续介质边坡从属稳定性的数值试验研究

宋战平^{1,2}, 李宁¹, 张西前¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 拱坝坝肩高边坡的稳定性问题是当前工程研究的热点问题之一。当前, 坝肩边坡作为从属工程, 其稳定性的分析主要是针对边坡本身的稳定性进行的。分析中采用的判定从属边坡稳定性的评价标准并不能保证主要坝体的安全性。为了使边坡的抗滑安全性计算中能考虑坝体的影响, 作者提出了“从属安全度”概念, 并基于应力控制标准给出了从属安全度的计算公式。以某高拱坝为例进行了坝肩边坡的从属稳定性数值试验研究, 研究结果表明: 考虑边坡动力反应过程中坝体稳定性, 坝肩边坡的从属稳定性系数将降低 20%。

关键词: 边坡; 从属安全度; 似连续介质; 裂隙岩体; 数值试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2006)01-0016-04

中图分类号: TU413.62

Hypotaxis Stability Analysis of Seem-continuum Medium Slope

SONG Zhan-ping^{1,2}, LI Ning¹, ZHANG Xi-qian¹

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi Province, China)

Abstract: The “hypotaxis stability” concept and the dynamic stress hypotaxis safety ratio method were presented in order to take the safety of arch dam into consideration because the safety coefficient does not assure the safety of dam. A three dimension dynamical contact unit model was developed to illustrate fractured rock mass of the dam abutment slope. Using the 3D-dynamical constraint joint element, certain dam abutment slope system was analyzed. Numerical analyses show that: with dynamic stress hypotaxis safety ratio method and the three dimension dynamical contact unit model, the “hypotaxis safety ratio” of abutment slope can be decreased by 20%.

Keywords: slope; hypotaxis stability; seem-continuum medium; numerical experiment

1 引言

边坡作为从属性工程, 都是相对独立地服务于采矿、交通、水利、建筑等特定工程的^[1], 评价边坡的抗震安全性必须在保证特定工程安全或满足特定工程使用要求的前提下进行, 即边坡的安全性并不仅仅取决于边坡本身的稳定性, 而同时取决于特定主体工程的承受能力, 其稳定性在一些情况下也是由主体工程控制的。因此, 边坡的安全性在一定条件下是一种“从属安全度”。如对于三峡永久船闸高边坡而言, 坡顶较大变形并不代表边坡不稳定, 但此变形将影响船闸的正常启闭^[2-3]; 再如小湾拱坝坝肩边坡在震动反应的过程中将发生约 1 cm 的瞬时滑移, 此滑移位并不会导致边坡的滑移破坏, 但主体工程拱坝却会因此过大变形的连带作用而导致坝体拉应力急剧升高, 从而导致了坝体的破坏^[4-5]。但目前边坡稳

定性计算或分析中, 边坡通常是作为独立的系统单独考虑, 边坡的稳定性也仅仅是分析其本身的稳定性^[2-3, 6-7]。边坡稳定性分析的目的也仅仅是为了评价边坡自身在假定破坏机理、破坏滑面和相应边坡几何形状下对应一定破坏模式时的安全系数。因此, 边坡的稳定性分析往往是偏于不安全的。特别是对于一些对边坡变形比较敏感的特定建筑物, 如船闸、坝体及塔体而言, 边坡较高的安全系数并不能保证主体建筑物的安全或正常使用, 这使得边坡稳定性的评价往往流于形式而无实际意义^[3]。

已有高拱坝的失事研究表明^[8], 坝肩裂隙岩坡的动力失稳是导致拱坝事故的主要原因之一。对于高拱坝坝肩裂隙岩坡的抗震稳定性分析目前主要采用以下 3 种方法^[6-9]。一种是基于长期工程实践经验的、简便易行的半经验计算方法——刚体极限平衡法; 一种是在连续介质力学有限元分析基础上建立起

收稿日期: 2005-10-20

资助项目: 四川省科技攻关项目

作者简介: 宋战平(1974-), 男(汉族), 陕西蒲城人, 在读博士, 主要从事数值计算和岩土工程现场监测方面的教学和科研工作。E-mail: ZhanpingSong@yahoo.com.cn

来的抗滑极限平衡分析法; 另一种是基于非连续介质理论或块体理论的离散化单元法, 例如离散元法、不连续变形分析法 (DDA) 等。基于长期工程实践经验的刚体极限平衡法, 将坝肩滑移岩体视为不可变形的刚性体, 忽略了坝肩岩体的变形; 且在滑体的受力分析中往往会漏掉某些不利组合, 使求得的安全系数带有一定的假象。基于连续介质力学的有限元理论, 采用极限平衡法确定抗滑稳定性系数, 其实质是一种静力分析方法, 由该方法计算出来的安全系数不能真实地体现坝肩裂隙岩体的稳定性态。而且采用基于非连续介质理论或块体理论所建立的离散单元法, 因此计算中需要考虑坝体和坝基岩体间的动力耦合效应, 使得用该方法进行三维问题求解变得十分困难。并且采用离散元模型本身就与工程实际存在较大的差距, 很难想象拱坝的坝肩是一堆离散岩体。因此, 似乎将坝肩裂隙岩体作为可以考虑局部开裂、各向异性、甚至大变形的非线性连续体来研究更接近于工程实际^[8]。

为在坝肩岩坡的稳定性评价中考虑坝体对坝肩变形的敏感性, 使坝肩岩体的安全评价保证坝体的安全, 本文提出了从属安全度的概念, 并基于坝体应力控制标准给出了坝肩岩坡的动力抗滑从属安全系数的计算公式。为反映坝肩裂隙岩体可考虑局部开裂、各向异性、甚至大变形的非线性连续介质特性, 本文采用动态接触界面单元模型^[5]模拟坝肩裂隙岩体的动力性态。最后就某 300 m 级拱坝进行了三维非线性动力有限元分析, 研究了坝肩边坡的动抗滑从属稳定性。

2 从属安全度的定义及其计算方法

2.1 从属安全度的概念

所谓边坡的从属安全度是指在边坡稳定性计算中, 因考虑了特定主体工程的使用条件或安全性, 以特定工程的从属反应为控制标准进行的边坡稳定性评价, 并依此计算出的边坡安全度。在一般情况, 按此计算的边坡安全系数较不考虑特定工程反应时的安全系数要低一些。为区别以往边坡安全系数的概念, 定义此安全系数为“从属安全系数”。

就边坡从属的主体工程而言, 可作为从属安全度控制标准的主要是主体工程的变形和应力, 如为保证船闸等启闭机械的正常运行, 就必须以边坡的顶部变形为控制标准; 为保证坡前塔体或坝体的安全就必须以塔体或坝体的应力作为标准来分析从属边坡的稳定性。因此从属稳定性的评价就存在 2 种形式, 即位移从属安全系数和应力从属安全系数。

2.2 应力从属安全系数法

对于高次超静定结构的拱坝, 坝体应力对坝肩边坡岩体的变形极其敏感, 在强震作用下, 坝肩边坡裂隙岩体沿潜在滑动面在到达极限滑移状态前的较小滑动或错动就可能会导致坝体因局部拉应力过大而破坏, 因此, 按坝肩裂隙岩体的安全系数进行坝肩边坡的抗震安全性评价并不一定能保证坝体的安全。为之, 提出了应力从属安全系数法, 尝试以坝体拉应力作为坝肩岩坡稳定性的控制标准, 以保证坝肩岩坡的稳定性评价能较好满足坝体抗震安全性的需要。

采用参数折减法分析坝肩岩坡的抗滑稳定性, 在岩坡潜在滑面上取一微元体, 设在原给定强度参数下, 在地震动荷载作用过程中坝体最大拉应力为 σ_{\max}^0 , 此时 σ_{\max}^0 小于坝体混凝土极限动抗拉强度 $[\sigma_t^d]$ 。此时, 坝肩岩坡潜在滑动面上的任一微元体的抗剪强度为:

$$[\tau]_0^e = c_0^e + \sigma_n^e \operatorname{tg} \phi_0^e \quad (1)$$

式中: $[\tau]_0^e$ —— 为坝肩岩坡潜在滑动面上微元体原设计抗剪强度; c_0^e —— 为潜在滑动面上微元体原设定内聚力; ϕ_0^e —— 为潜在滑面上微元体原设定的内摩擦角; σ_n^e —— 为潜在滑面上作用在微元体上的法向平均压应力。

逐步降低坝肩岩坡潜在滑面的强度参数, 当结构面强度参数下降至 C_1^e , ϕ_1^e ($C_1^e = C_0^e/K_C$; $\phi_1^e = \phi_0^e/K_\phi$) 时, 坝体最大拉应力为 σ_{\max}^1 达到了混凝土的极限动抗拉强度 $[\sigma_t^d]$, 此时, 坝肩岩坡相应的抗剪强度 $[\tau]_{cr}^e$ 为:

$$[\tau]_{cr}^e = c_1^e + \sigma_n^e \operatorname{tg} \phi_1^e \quad (2)$$

式中: $[\tau]_{cr}^e$ —— 岩坡潜在滑面微元体强度参数降低后的抗剪强度; c_1^e —— 微元体强度参数降低后的内聚力; σ_n^e —— 强度参数降低后微元体上的法向平均压应力; ϕ_1^e —— 强度参数降低后的平均内摩擦角。

为简化计算, 假定岩坡潜在滑面为平面, 此时岩坡强度参数降低前后潜在滑面上的抗滑力可由以下公式计算:

$$R_0 = \sum_{i=1}^n [\tau]_{0i}^e \delta_i \quad (3)$$

$$R_1 = \sum_{i=1}^n [\tau]_{1i}^e \delta_i \quad (4)$$

式中: n —— 坝肩岩坡潜在滑面强度参数降低后滑面上未完全张开的动接触单元个数。

由式(1) — (4), 可定义坝肩岩坡的应力从属安全度 K^{hy} 为:

$$K^{hy} = \frac{R_0}{R_1} \quad (5)$$

3 边坡从属安全度实例分析

3.1 分析实例数值模拟条件及力学模型

某混凝土双曲拱坝最大坝高近 300 m, 大坝坝址河谷呈“V”字型, 两岸山体基本对称, 山体雄厚, 山坡陡峻。坝基及坝肩边坡基岩主要为致密的角闪斜长片麻岩和黑云花岗片麻岩。坝址边坡地质构造复杂, 在边坡岩体内由断层、蚀变带和节理等在两岸形成了 6 组潜在滑块。分析过程中, 数值分析模型取顺河向 (Y 方向) 1000 m, 横河向 (X 方向) 宽度取 1300 m, 底部高程为 600 m, 顶部高程为 1245 m。对此范围内岩体和坝体进行有限元离散, 在坝肩岩坡接触面上设置动接触单元, 布置双节点(整个问题的描述采用笛卡尔坐标系, 动接触单元采用局部坐标系 n, s, t , 其模型见图 1), 接触单元的几何和静力约束方程参见文献[4—5]。

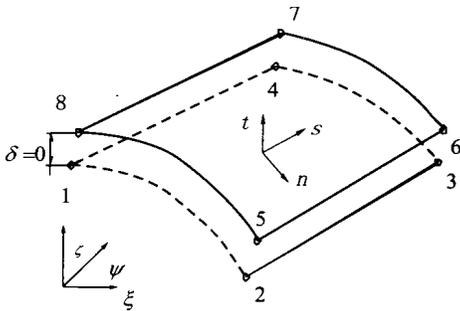


图 1 三维界面接触单元

边坡和主体工程坝体的有限元模型如图 2 所示。其中, 基岩和坝肩岩坡共划分实体单元 8708 个, 采用六面体 8 节点等参元模拟; 坝肩边坡潜在滑动面采用三维动接触单元模拟, 整个模型节点总数 11089 个。在分析中, 拱坝为混凝土材料, 取其变形模量为 21.0 Gpa, 泊松比为 0.18, 剪切模量为 8.90 Gpa。坝体收缩缝参数, 内聚力取 0.8 MPa, 内摩擦角取 σ , 采用最大拉应力和 Mohr—Coulomb 剪切滑动破坏准则。为简化计算, 边坡岩体取同一参数, 其岩体的变形模量取 25.0 Gpa, 泊松比取 0.25, 剪切模量取 8.00 Gpa。边坡潜在滑体强度力学参数见表 1。

基本计算工况是静力计算(初始地应力+ 坝体自重应力+ 高水位静水压力+ 泥沙压力+ 渗流压力)和 10s 人工地震波。地震动荷载由模型底部采用加速度输入法, 在模型固定底面上一层单元的节点上施加以节点质量和地震动加速度乘积组成的外力, 以波动方式逐步向上传播; 地基辐射阻尼影响是通过将各侧面边界相邻的一层单元的阻尼比加大到 0.5, 以近似考虑能量逸散效应; 地震动水压力依据坝面各节点的动水压力附加质量, 按附加质量法分析。

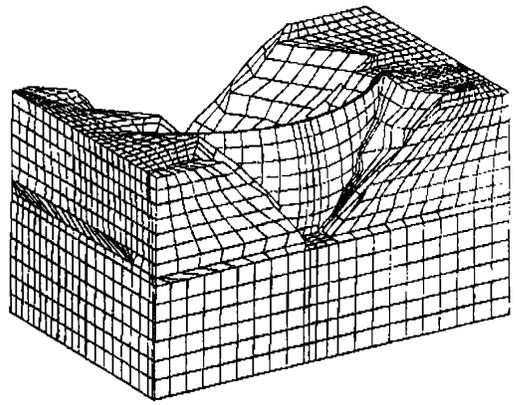


图 2 某拱坝坝肩边坡有限元分析模型

表 1 各块体陡滑面、缓滑面 F, C 值

高程/ m	左岸				右岸			
	陡滑面		缓滑面		陡滑面		缓滑面	
	F_1	C_1/MPa	F_2	C_2/MPa	F_1	C_1/MPa	F_2	C_2/MPa
1210	0.4	0.05	0.99	0.73	1.23	1.37	1.01	0.82
1170	0.4	0.05	1.10	0.97	1.25	1.44	1.02	0.88
1130	0.4	0.05	1.13	1.05	1.26	1.46	1.20	1.27

3.2 边坡从属安全度分析

鉴于边坡内各不连续面的实际力学性态很难准确查清, 且考虑到在边坡开挖过程中因扰动可能导致岩体的强度, 为之, 本文采用强度折减法计算边坡的稳定性。数值试验时设计了 4 种方案。方案 1: 边坡岩体潜在滑面强度参数按原设计给定值; 方案 2: 边坡岩体潜在滑面强度参数降低为原给定强度参数的 80%; 方案 3: 边坡岩体潜在滑面强度参数降低为原给定参数的 50%; 方案 4: 边坡岩体潜在滑面强度参数降低为原给定参数的 30%。对该分析体系进行以上 4 种预设方案的三维抗震稳定性数值试验, 数值试验结果见表 2。

表 2 坝体环向最大拉应力变化

边坡滑面参数(为原参数的倍数)	左岸边坡		右岸边坡	
	坝体拉应力 最大值/MPa	坝体拉应力 增幅/%	坝体拉应力 最大值/MPa	坝体拉应力 增幅/%
1.0	2.85	—	2.85	—
0.8	3.12	9.5	3.21	12.6
0.5	3.49	22.5	3.56	24.9
0.3	边坡滑移破坏	—	边坡滑移破坏	—

实例分析拱坝坝肩两侧边坡分别在 1210 m 高程、1170 m 高程和 1130 m 高程处由上游开裂面、下游空面、陡倾角侧滑面和缓倾角底滑切割而成 6 组潜在滑块。在地震动反应过程中, 坝肩边坡将沿此 6

组潜在滑面下滑。边坡的稳定性将取决于此 6 组滑面中最小的抗滑安全系数。采用强度折减法进行分析时, 边坡潜在滑面上强度参数降低后, 最危险滑面的下滑将引起与边坡连带的坝体应力的变化。由方案 1 数值分析结果可知, 在坝体动力响应全过程中, 在地震动荷载 5.0 s 附近, 坝体动应力反应达到最大。此时, 在坝肩边坡岩体的约束影响下, 在地震动动力响应全过程中, 坝体环向最大拉应力为 2.85 MPa, 出现在坝体中上部拱冠梁附近。由方案 2 的数值分析结果可知, 当边坡潜在滑面的强度参数由原设计参数 $C = 0.73$, $F = 0.99$ 降低为原参数的 80% 时, 在地震动荷载作用过程中, 坝体环向最大拉应力将增加至 3.12 MPa, 即坝体最大拉应力增加了 10%。当右边坡潜在滑面强度参数由原设计参数 $C = 0.82$, $F = 1.01$ 降低为原参数的 80% 时, 坝体环向最大拉应力将增加至 3.21 MPa, 即坝体最大拉应力增加了 13%。在方案 3 中, 当左边坡潜在滑面强度参数为原参数的 50% 时, 由数值试验结果可知, 坝肩边坡潜在滑面强度参数降低导致坝体环向应力增大了 23%; 而右坝肩边坡潜在滑面强度参数降低为原参数的 50% 时, 坝体环向应力增加至 3.49 MPa, 增大了 25%。

当左边坡潜在滑面强度参数降低为原参数的 30% 时, 由数值模拟分析可知, 此时, 左边坡 1210 m 高程处潜在滑块将失稳, 进而引起整个边坡发生滑移破坏; 在右边坡潜在滑面强度参数降低为原来的 30% 时, 右边坡 1170 m 高程潜在滑块也将发生滑移失稳, 引起右边坡破坏; 据此可推算, 在不考虑主体工程受力变化条件时, 左右边坡抗滑安全系数为 3.0。

考虑边坡从属主体拱坝的受力特点, 坝体的抗震设计主要决定于坝体的极限动抗拉强度, 动抗拉强度标准对于拱坝的经济性和安全性具有决定性的影响。目前, 拱坝应力分析主要采用多拱梁法和有限元法, 但就有限元法计算而言, 受计算程序和模型网格尺度差异等的影响, 目前还缺乏合适的拉应力控制标准。据文献的研究结果, 有限元网格尺度的变化引起的坝体主应力的变化很小, 一般情况下可不考虑; 同时, 据文献[4—5]的数值分析结果, 坝体环向应力对坝肩岩体边坡的变形反应明显, 因而, 在进行坝肩边坡的抗滑稳定性分析中, 本文选取了坝体环向拉应力作为坝体强度破坏的主控因素。坝体拉应力控制标准参考文献的研究成果, 取坝体动极限抗拉强度 $[\sigma_L]$ 为 3.5 MPa。由表 2 中所列数值分析结果, 取 $[\sigma_L]$ 为 3.5 MPa, 由式(1) — (5) 计算边坡的从属安全系数, 左边坡应力从属安全系数为 2.0; 右边坡应力从属安全系数为 1.8。与不考虑主体工程坝体的应力变化时坝

肩边坡安全系数比较, 左边坡安全系数降低了 30% 以上; 右边坡安全系数降低了 40%。

4 讨论及结论

从某种意义上讲, 高拱坝坝肩边坡的稳定对拱坝安全是头等重要的事情, 强震作用时坝体和坝肩边坡的动力耦合作用致使坝肩边坡的动变形对坝体应力场产生了较大的影响, 而采用当前评价坝肩边坡抗滑安全性的方法不能反映边坡变形对坝体强度的影响。采用本文提出的从属应力安全系数法进行高拱坝坝肩边坡的抗震稳定性分析时, 以坝体混凝土的极限强度作为坝肩边坡稳定性的控制标准, 坝肩边坡的抗震稳定性理论上可保证坝体的安全, 此时, 坝肩边坡的抗滑从属安全系数表示在边坡和坝体动力耦合作用下, 坝体材料强度破坏时坝肩边坡潜在滑面上抗滑力的衰减水平。因此, 当主体工程对从属边坡的变形比较敏感的建(构)筑物而言, 把主体建筑物和边坡作为统一的系统进行耦合分析, 以从属安全度进行边坡稳定性的评价势在必行。

根据论文提出的从属安全系数的概念, 应用应力从属安全度的计算公式对某在建拱坝坝肩边坡稳定性的数值试验表明: 考虑主体工程与边坡的耦合作用时, 边坡的从属安全度降低约 20%。

[参 考 文 献]

- [1] 祝玉学. 边坡可靠性分析[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [2] 徐平, 杨挺青, 徐春敏, 等. 三峡船闸高边坡岩体时效特性及长期稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 163—168.
- [3] 刘耀儒, 周维垣, 陈欣, 等. 三峡船闸边坡反分析以及稳定性和整体安全储备能力评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 627—632.
- [4] 宋战平, 李宁, 陈飞熊. 高拱坝坝肩裂隙岩体的三维非线性抗震稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(3): 361—366.
- [5] 宋战平, 李宁, 陈飞熊, 等. 拱坝有缝坝体——坝基系统的非线性抗震分析[J]. 水利学报, 2004, 6: 33—40.
- [6] 殷建华, 陈健, 李焯芬. 岩土边坡稳定性的刚体有限元分析法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(6): 898—905.
- [7] 张伯艳, 陈厚群. 用有限元和刚体极限平衡方法分析坝肩抗滑稳定[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 665—670.
- [8] 汝乃华, 姜忠胜. 大坝事故与安全[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [9] 祁庆和. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.