

基于 ANSYS 的复杂地基面上高导墙 抗滑稳定有限元分析

程 帅, 李守义

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘 要: 将简单滑动面上的抗滑稳定有限元分析方法加以改进,并推广应用到各种复杂的地基面上,为有限元法计算类似结构的抗滑稳定性提供参考。利用 ANSYS 建立复杂地基面上高导墙的二维有限元计算模型,计算分析了5种方案下结构的抗滑稳定性,为锚索加固方案的选择和结构安全评估提供依据。计算结果表明:锚索布置应选择侧向倾斜锚索方案,且这种方案下结构在运行期中满足抗滑稳定要求。所采用的抗滑稳定计算方法在工程中得以应用,结果符合实际情况,适用性强,有一定的参考价值。

关键词: 复杂地基面; 高导墙; 抗滑稳定; 有限元法; 分析软件

中图分类号:TV223.31

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2016)01-0217-05

FEM analysis of anti-sliding stability for high guide wall on complex foundation surface based on ANSYS

CHENG Shuai, LI Shouyi

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Through improving the finite element method of anti-sliding stability on simple sliding surface and applying it to the complex foundation surface so as to provide a reference for the finite element method of anti-sliding stability calculation of similar structure. The paper used ANSYS to establish two-dimensional finite element model of high guide wall on the complex foundation surface, and analyzed the anti-sliding stability of structure with five schemes in order to provide the basis for the selection of anchor cable reinforcement scheme and the safety assessment of structure. The Results show that the scheme of lateral tilt anchor cable should be taken and the structure can satisfy the requirement of anti-sliding stability in run-time under this scheme. The calculation method of anti-sliding stability has been applied to practical engineering and has a strong suitability and a certain reference value.

Key words: complex foundation surface; high guide wall; anti-sliding stability; finite element method; ANSYS

现代科学技术的发展和水利资源的不断开发利用,使得坝址及其他建筑物的地质条件会越来越复杂^[1-2]。某水电站工程由于受地形和地质条件的限制,溢洪道建基面高程 1 767.0 m,与其相邻的右侧电站厂房建基面高程 1 742.9 m,溢洪道建基面高程远高于厂房建基面高程,建基面为左侧高右侧低的台阶状,对导墙的侧向稳定极为不利,故必须对导墙进行侧向抗滑稳定性分析,评价其安全性。

关于导墙的抗滑稳定性分析的研究很少,工程

中分析其抗滑稳定的主要方法与重力坝的抗滑稳定性相似,对于单平面的抗滑稳定分析,一般取单位长度作为计算单元,采用抗剪强度公式或抗剪断强度公式进行计算,而对于多平面组成的复合面的抗滑稳定分析,目前工程中都采用刚体极限平衡法,有限元法和地质模型试验等3种方法,在水工计算中常采用前两种方法^[3-7]。

本文对简单滑动面上的抗滑稳定有限元分析方法加以改进,并推广应用到各种复杂的地基面上。

收稿日期:2015-06-07; 修回日期:2015-06-23

作者简介:程 帅(1992-),男,陕西商洛人,在读研究生,主要研究方向:水工结构应力分析。

通讯作者:李守义(1955-),男,甘肃庄浪人,教授,博导,主要研究方向:水工结构应力分析。

利用 ANSYS 有限元分析软件建立复杂地基面上高导墙的二维计算模型,以抗滑稳定性极限状态方程为判断依据,对比各方案计算结果,分析了三种锚索加固方案的加固效果,为该工程溢洪道右侧导墙加固处理及结构安全评估提供有力依据。

1 计算原理

现实施的电力行业标准《混凝土重力坝设计规范》(DLS108-1999)采用概率极限状态设计原则,将结构的安全性和适用性量化^[4]。

对于基本组合,结构的承载能力应采用下列分项系数极限状态设计表达式^[8]:

$$\gamma_0 \psi S(\gamma_G G_K, \gamma_Q, \alpha_K) \leq \frac{1}{\gamma_{dl}} R\left(\frac{f_K}{\gamma_m}, \alpha_K\right) \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; ψ 为设计状况系数; $S(\cdot)$ 为作用效应函数; $R(\cdot)$ 为抗力函数; γ_G 为永

久作用分项系数; γ_Q 为可变作用分项系数; G_K 为永久作用标准值; Q_K 为可变作用标准值; α_K 为几何参数的标准值; f_K 为材料性能的标准值; γ_m 为材料性能分项系数; γ_{dl} 为基本组合结构系数。

2 计算方法

根据上述计算原理,建立结构的有限元模型,施加对应荷载及边界条件,计算得到地基面上的正应力和剪应力,积分得到地基面上的总作用效应和总抗力,进而按(1)式判断结构是否满足抗滑稳定要求。

在实际工程中,由于各种因素的影响,地基开挖面往往比较复杂,大多不是单一的平面或者斜面,而是由许多平面和斜面组成的复合面,常见的地基开挖面形态如图1所示(分为4种情况)。各种复杂程度的地基开挖面上的总抗力与总作用效应计算方法如下:

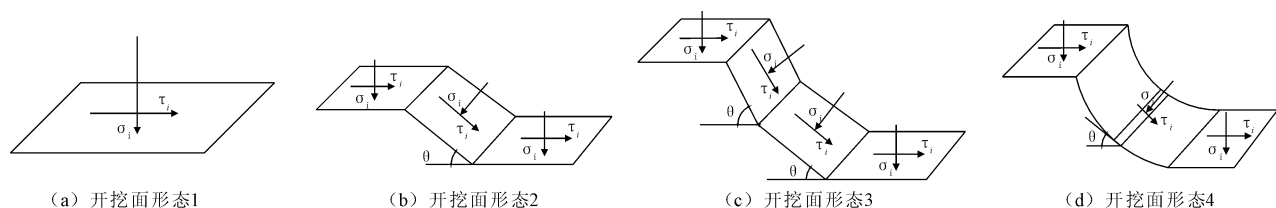


图1 各种复杂程度的地基开挖面示意图

(1) 单平面地基面。如图1(a)中所示。地基面上的作用效应为:

$$S = \iint \tau_i dA \quad (2)$$

地基面上的抗滑力为:

$$R = \iint \left(\frac{f'_{Ki}}{\gamma_m} \cdot \sigma_i + \frac{c'_{Ki}}{\gamma_m} \right) dA \quad (3)$$

式中: τ_i 为地基面上的剪应力; σ_i 为地基面上的正应力; f'_{Ki} 为抗剪断摩擦系数标准值; c'_{Ki} 为抗剪断凝聚力标准值; A 为地基滑动面面积。

(2) 双平面与单斜面组成的地基面。如图1(b)所示,在计算其抗滑稳定时两端的平面与上述方法一致,中间斜面的计算有所不同。

按下式对斜面上的正应力沿斜面进行面积分,求出相应斜面上总的法向力。

$$F_i = \iint \sigma_i dA \quad (4)$$

当斜面上法向力为压力时,将斜面上作用效应和抗滑力分别投影到水平方向,即:

$$s = \iint \tau_i \cos \theta dA \quad (5)$$

$$r = \iint \left(\frac{f'_{Ki}}{\gamma_m} \cdot \sigma_i + \frac{c'_{Ki}}{\gamma_m} \right) \cos \theta dA \quad (6)$$

式中: θ 为斜面与水平面的夹角。

当斜面上法向力为拉力时,作用效应为:

$$s = \iint \tau_i \cos \theta dA + \iint \sigma_i \sin \theta dA \quad (7)$$

由于斜面上法向力为拉力,偏安全考虑不计其抗力。

将各个面上的抗力与作用效应求和即为整个地基面在水平方向上的总抗力与总作用效应。

$$S = \sum s, \quad R = \sum r \quad (8)$$

(3) 双平面与双斜面组成的地基面。如图1(c)所示。其计算方法是逐一分块计算后在水平方向叠加,得到整个地基面在水平方向上的总作用效应与总抗滑力。

(4) 双平面与曲面组成的地基面。如图1(d)所示。把曲面看做多个斜率不同的斜面即可,对各个小斜面按上述方法处理,可得曲面上的抗力与作用效应在水平方向上的投影,将其与其他水平面上的抗滑力与作用效应叠加即可得到整个地基面在水平方向上的抗力与作用效应。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

某水电站工程,正常蓄水 1 818.0 m,死水位 1 814.0m。厂房坝段布置在主河床上,溢洪道位于厂房左侧。溢洪道右导墙坝段宽 18 m,其左侧在导流期为导流明渠底板,在运行期为溢流堰和泄槽,导流明渠底板与右导墙整体浇筑,堰体是在导流期底板的基础上加高而成。右导墙坝段导流期施工至 1 802.50 m 高程,运行期右导墙坝段顶高程为 1 820.5 m。

3.2 计算模型与条件

采用 ANSYS 来模拟溢洪道右导墙在施工期和

运行期的工作状况,由地基开挖图可知开挖面垂直与水流方向变化复杂,顺水流方向基本一致,故可选择控制性断面建立二维有限元模型进行分析,根据其抗滑稳定性确定锚索的布置方案。

施工期根据钻孔及孔内成像显示,右导墙坝段出现多条不同程度的裂缝,以坝左 0 + 103.80 m 位置处裂缝为代表,实际缝宽约 0.5 ~ 2.0 mm,且已经由坝轴线 0 + 000.00 m 向下游发展至坝下 0 + 052.00 m 位置。计算时以裂缝右侧为研究对象,初步分析坝 0 + 000.00 断面最危险,故以坝下 0 + 000.00 断面为典型计算断面如图 2(b、c)所示。

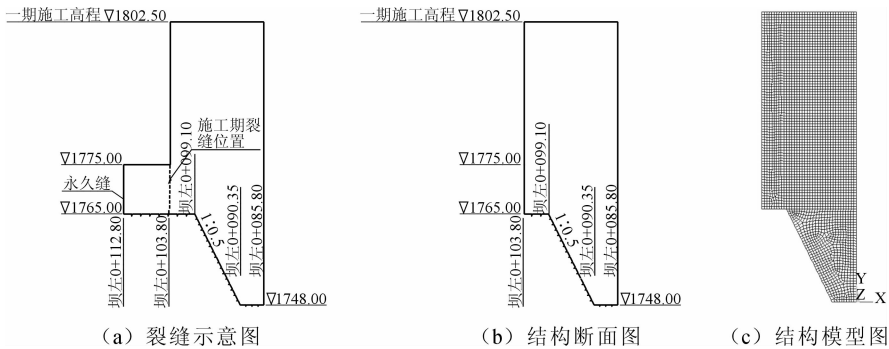


图 2 施工期右导墙裂缝断面图及结构模型图(单位:m)

施工期基岩的计算范围取矩形区域,右导墙范围以外的基岩边界值:深度方向均取 80 m,左、右方向均取 50 m。地基左右侧施加法向约束,底面施加全约束,右导墙两侧均按自由面处理。混凝土结构与地基均采用平面四节点单元 plant42 模拟,锚索用杆单元 link8 模拟。垂直水流方向为 X 轴方向,右岸方向为正;沿高度方向为 Y 轴方向,向上为正。计算模型共 49205 节点,48684 单元。

运行期计算模型在施工期的基础上,右导墙加高至 1820.5 m,已对裂缝采取加固措施,将导墙与溢洪道底永久缝以右作为整体进行分析。初步分析坝 0 + 020.00 断面最危险,选择坝下 0 + 020.00 断面为典型计算断面如图 3 所示。基岩边界、坐标方向,单元类型等与施工期一致,模型共 52248 节点,51757 单元。

3.3 荷载施加

荷载分布如图 4 所示,所加荷载包括:①自重,右导墙结构自重根据混凝土的重度,按惯性力施加在计算模型上,地基自重不考虑。②侧向水压力,施工期导墙左侧导流水位 1 790.5 m,AC 段承受侧向水压力;运行期计算截面处水面线高程为 1 809.5

m,AG 段承受侧向水压力,导墙右侧无水。③水重,运行期 BG 段考虑水重。④扬压力,CD、DE、EO 段(运行期中 BC 段)均承受扬压力,C 到 O 的扬压力值为图 4(a)中两部分之和,即从 C 到 O 点渗透压力沿程衰减,以及从 D 到 E 点随高程降低而增加的扬压力之和。关键点 C 处扬压力水头施工期为导流水位与相应点高程之差;运行期扬压力水头为下游水位(1791.55m)与相应点高程之差。荷载分项系数中混凝土自重,水重及静水压力取 1.0,扬压力主排水孔之前取 1.1,主排水孔之后取 1.2。

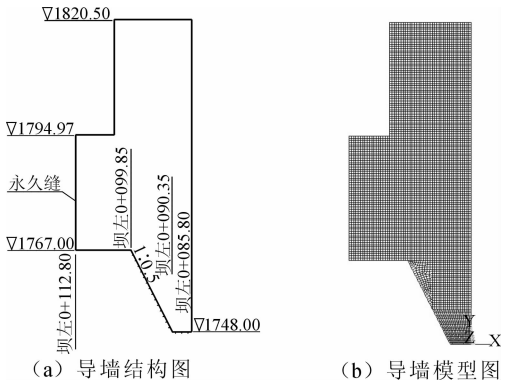


图 3 运行期右导墙结构模型图(单位:m)

3.4 锚索模拟

图 5 为施工期 3 种锚索施加方案及运行期锚索图,施工期对 3 种锚索布置形式进行了计算研究,3 种情况锚索均为上、下游方向每隔 4.5 m 设置一列,每列两根平行布置,间距 4.0 m。具体位置和方向

不同,第 1 种:Ⅰ号锚索距离导墙左侧 2.5 m,呈铅直方向;第 2 种:Ⅱ号锚索顶部距离导墙右侧 2.5 m,锚索与水平面夹角为 74°;第 3 种:Ⅱ号锚索在导墙右侧面高程 1 771 m 处布置,锚索与水平面夹角 20°。运行期锚索按第 3 种方案施加。

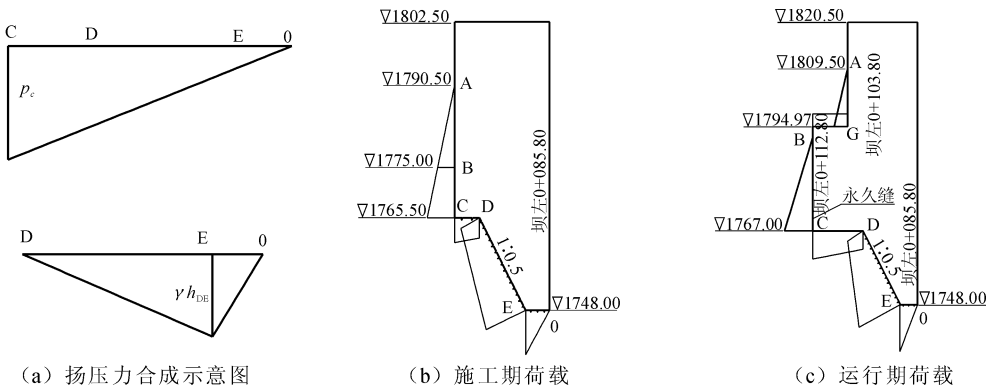


图 4 右导墙结构外荷载示意图(单位:m)

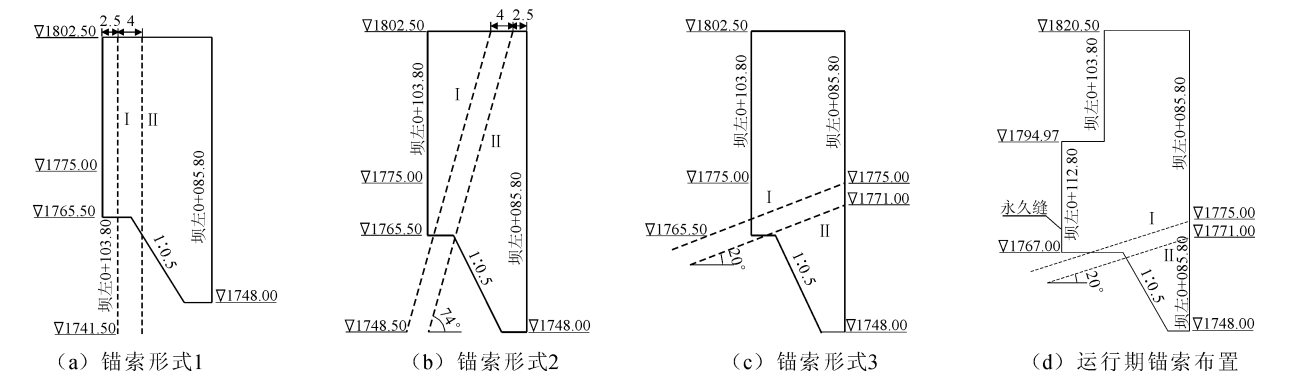


图 5 施工期 3 种锚索施加方案及运行期锚索示意图(单位:m)

锚索预应力的采用降温方法模拟,根据锚索属性与参数按照式(9)计算得到降低的温度值 T ,以温度荷载施加于 link8 单元上。

$$T = \frac{F}{1000 \cdot \alpha EA}$$

(9)

式中: T 为降低的温度差,℃; F 为预应力,kN; α 为锚索线膨胀系数,mm/(mm·℃); E 为弹性模量,MPa; A 为锚索截面面积,m²。

实际工程中每根锚索预应力为 2 000 kN,以二

维模型模拟时将预应力均化到上下游方向单宽上。即每根锚索施加预应力为 2000 ÷ 4.5 = 444.4 kN。由于施加预应力的过程中,混凝土和地基岩体会发生压缩变形,使得有效预应力水平比预计值要低,因此初始预应力水平应适当比预计的预应力水平高一些。计算中以式(9)计算结果为初值,通过试算确定最终的降温值。

3.5 计算参数

不同材料的计算参数取值如表 1 所示。

表 1 材料计算参数					
材料	弹性模量/ MPa	泊松比	容重/ (kN·m ⁻³)	横截面 面积/m ²	线膨胀系数/ (mm·mm ⁻¹ ·℃ ⁻¹)
混凝土结构	28000	0.167	24.0		
地基岩体	8000	0.250			
锚索	210000	0.300	78.5	7.85×10 ⁻³	1×10 ⁻⁵

滑动面(混凝土结构与地基的结合面)的抗剪断摩擦系数标准值 f'_{Ki} 取为 0.85,抗剪断凝聚力标准值 c'_{Ki} 取为 650 kPa。

本工程为二等大(2)型工程,永久性主要建筑物按 2 级建筑物设计,按 2 级结构安全级别确定有关结构分项系数如表 2 所示。

3.6 计算方案

施工期计算 4 种方案(方案 1:无锚索情况;方案

2:竖向锚索加固;方案 3:74°斜向锚索加固;方案 4:20°斜向锚索加固)下的右导墙混凝土结构与地基的结合面的抗滑稳定性,并确定最优锚索布置方案。运行期中,在顺水流方向取若干截面粗略计算其稳定性的基础上,选择抗滑稳定性最差的位置加以分析,并结合导墙结构的体型特点及其对相邻建筑物的影响,以最危险断面(0+020.00 断面)作为控制性断面计算其抗滑稳定性。具体计算方案如表 3 所示。

表 2 有关结构分项系数取值

结构重要性系数 γ_0	设计状况系数 ψ		结构系数 γ_{d1}
	短暂状况(施工期)	持久状况(运行期)	(在非地震工况)
1.0	0.95	1.0	1.2

表 3 计算方案

计算方案	工期	计算断面	荷 载					锚索形式
			结构自重	侧向水压力	扬压力	水重	锚索预应力	
方案 1	施 工 期	0+000.00 断面	√	√	√			无
方案 2		0+000.00 断面	√	√	√		√	1
方案 3		0+000.00 断面	√	√	√		√	2
方案 4		0+000.00 断面	√	√	√		√	3
方案 5	运行期	0+020.00 断面	√	√	√	√	√	3

3.7 有限元计算结果分析

根据式(1)中结构的承载能力极限状态设计表

达式 $\gamma_0\psi S(\cdot) \leq \frac{1}{\gamma_{d1}}R(\cdot)$,令一个无量纲数

$$XK = \frac{R(\cdot)}{\gamma_0\psi\gamma_{d1}S(\cdot)} \tag{10}$$

如果 $XK > 1$,则满足抗滑稳定要求^[9-11]。

采用前述计算原理及方法,对照表 1 中的 5 种计算方案,建立相应模型,施加对应荷载,布置各锚索形式。各个方案的抗滑稳定性计算结果见表 4。

表 4 各方案抗滑稳定性计算结果

计算方案	抗力 R / kN	作用效应 S / kN	XK	XK 允许值	核算结果
方案 1	9136.4	10089.5	0.79	1.0	不满足
方案 2	9055.5	8627.4	0.92	1.0	不满足
方案 3	9063.9	8070.0	0.99	1.0	不满足
方案 4	8486.8	6790.1	1.10	1.0	满足
方案 5	17764.1	7500.3	1.9	1.0	满足

由方案 1~4 可知:在不加锚索的情况下 XK 值只有 0.79,不满足抗滑稳定要求,在方案 2~4 中可知,在顺水流方向单宽下所有锚索施加的预应力一

致的情况下,布置锚索的水平角度越小, XK 的值越大。前两种锚索布置都是从一期导流完建期的导墙顶部垂直或小角度向下钻孔施加锚索,从施工角度上较为方便,施工难度较低,节省造价,但这两种锚索的布置方案 XK 值均小于 1.0,不满足抗滑稳定要求,故不能采取这两种锚索布置方案。第 3 种锚索在溢洪道右导墙右侧下部布置,从导墙右侧向左钻孔至基岩深处,锚索与水平面夹角 20°,施工上较上两种方案更加困难,但此方案可使结构更加安全, XK 值达 1.1,满足抗滑稳定要求,故最终采取这种锚索布置方案。

由方案 5 可知:运行期最危险断面抗滑稳定性 XK 值达 1.9,且考虑到实际整体结构与顺水流方向所有锚索联合受力的因素,导墙的抗滑稳定性会进一步提高,故在运行期满足抗滑稳定要求,导墙整体是安全的。

4 结 论

根据概率极限状态设计原则和分项系数极限状态表达式,提出了针对各种复杂地基面上高导墙抗滑稳定性的分析方法,并用 ANSYS 有限元软件加以实现。
(下转第 226 页)

ite and corresponding fracture infill material investigated in column experiments [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299(3): 1625 – 1633.

- [10] 贯鸿志, 张振涛, 苏锡光, 等. Am 在花岗岩中的吸附行为[J]. 核化学与放射化学, 2009, 31(3): 189 – 192.
- [11] Baik M H, Hyun S P, Hahn P S. Surface and bulk sorption of uranium(VI) onto granite rock[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2003, 256(1): 11 – 18.
- [12] 王会, 柴之芳, 王东琪. 腐殖酸与铜系金属离子相互作用的研究进展[J]. 无机化学学报, 2014, 30(1): 37 – 52.
- [13] Huber F, Kunze P, Geckeis H, et al. Sorption reversibil-

ity kinetics in the ternary system radionuclide – bentonite colloids/nanoparticles – granite fracture filling material [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(12): 2226 – 2237.

- [14] Kim J M, Baik M H, Jung H, et al. Reactive transport of uranium with bacteria in fractured rock: model development and sensitivity analysis[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2013, 152(8): 82 – 96.
- [15] 王锦国, 周志芳. 裂隙介质溶质运移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2005, 24(5): 829 – 834.
- [16] 刘君. 放射性核素在花岗岩裂隙介质中迁移数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [17] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1996.

(上接第 221 页)

通过分析可知: 锚索的布置方案是影响其抗滑稳定的重要因素, 在一定的角度范围内, 随着锚索布置的水平角度的减小, 虽在一定程度上引起施工难度的加大, 但可以增强结构的抗滑稳定性, 确保结构整体的安全。

本文所提出的方法, 是基于传统的状态(强度)设计理念, 视混凝土和地基材料为均质连续体, 以经典的弹性力学为基础, 采用的是完全弹性的计算方法。在过程设计理念的研究中用实验、理论、数值等方法对材料破坏过程进行分析, 采用的是弹塑性各向异性损伤本构关系的计算方法^[12]。但在结合面(滑动面)渐进性的破坏过程, 以及在破坏过程中的应力重分布对抗滑稳定的影响方面研究较少。对于一般类似工程抗滑稳定分析, 本文所提出的计算方法合理有效, 简单可行, 可满足其分析的需要。工程中可以由地基开挖面的具体情况, 选择适用于该复杂程度的抗滑稳定计算方法进行分析, 为工程的实际应用提供依据。

参考文献:

- [1] 周维祿, 丁恩俊. 复杂地基应力分析的有限元法[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(5): 702 – 705, 736.
- [2] 季爱洁. 重力坝抗滑稳定分析方法概述[J]. 云南水力

发电, 2014, 30(2): 38 – 42, 142.

- [3] 潘家铮. 重力坝的设计和计算[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [4] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 第 5 版, 2009: 33 – 52.
- [5] 周伟, 常晓林, 徐建强. 基于分项系数法重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 315 – 320.
- [6] 王飞, 李同春, 胡继刚, 等. 复杂地基上重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 人民长江, 2011, 42(Z2): 61 – 63 + 70.
- [7] 邓子谦, 张林, 陈媛, 等. 含双斜结构面重力坝坝基失稳模式及破坏机理研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 235 – 241.
- [8] 中华人民共和国经济贸易委员会. DL5108 – 1999. 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [9] 黄耀华, 廖春武, 陈兴周. 某水电站溢洪道导墙坝段有限元应力分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(6): 684 – 686 + 693.
- [10] 朱双林. 重力坝深浅层抗滑稳定分析方法探讨及其工程应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [11] 杨冬升, 张晖, 龚常青. 基于 ANSYS 的碾压混凝土重力坝坝基面抗滑稳定安全性分析[J]. 井冈山大学学报(自然科学版) 2010, 31(4): 80 – 82 + 86.
- [12] 刘庭金. 混凝土及岩土材料破坏过程的弹塑性各向异性损伤数值模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2843 – 2843.