

# 三维刚体极限平衡法在重力坝深层抗滑稳定分析中的应用

吴晨阳, 童伟, 许韬, 嵇红刚

(中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

**摘要:**为解决二维计算方法不能全面反映坝段深层抗滑稳定性的问题,以西南某重力坝深层抗滑稳定性研究为例,分别采用经典二维方法和三维刚体极限平衡方法,计算具有典型三维滑移模式的坝段的深层抗滑稳定安全系数,并据此评价该坝段的抗滑稳定性。计算成果表明,在考虑坝基滑移面的三维效应时,正常工况下该坝段的整体抗滑稳定安全系数由二维的2.960提高到3.270,提高了10%,地震工况下提高了16.6%。

**关键词:**重力坝;抗滑稳定性;等K法;三维刚体极限平衡法

**中图分类号:**TV642.3

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2013)S1-0072-02

现行重力坝设计规范规定,深层抗滑稳定分析采用分坝段、取单宽按平面问题进行稳定计算<sup>[1]</sup>。重力坝由于横缝的存在,对于建基面或者浅层滑动的滑移模式,采用上述方法进行分析计算,力学作用明确,方法合理,比较接近工程的实际情况。但在研究坝基深层抗滑稳定问题时,需要将坝体坝基作为整体进行分析,从严格意义上讲是一个三维空间问题。如何合理地分析坝基下软弱结构面的性状,文献<sup>[2]</sup>已有所阐述。笔者以西南某重力坝某坝段深层抗滑稳定分析为例,采用严格三维刚体极限平衡法<sup>[3]</sup>,分析该坝段在三维效应下的安全性,并和经典二维方法计算结果进行比较,综合评价该坝段的深层抗滑稳定性。

## 1 工程概况

西南某重力坝最大坝高为168 m,坝基岩体为玄武岩。由于卸荷和构造作用,坝基内中、缓结构面较发育,特别是缓倾错动带对大坝抗滑稳定不利,同时中、缓倾结构面的分布及其产状随机性较大,性状差异也较大。同时这些结构面走向与坝轴线呈较大夹角,已构成明显的三维滑移模式,特别是岸坡坝段坝基。为了更加合理地评价该坝段的深层抗滑稳定,分别采用等K法和严格三维极限平衡方法,分析该坝段在各种潜在滑移模式下的稳定性。

## 2 滑移模式和计算参数

坝基可能的失稳破坏模式相对较多,主要可能

有沿坝基面的破坏、坝基岩体中的结构面破坏等。因此,需要结合坝体材料及坝基中的地质特点,对坝段可能的失稳破坏模式及其力学机理进行分析,推断或判定坝段相应失稳类型和位置。

24号坝段位于右岸坝肩,坝基下可能构成滑移通道的裂隙为②近SN/W $\angle 70^\circ \sim 85^\circ$ ,错动带为fx12,产状N60 $^\circ \sim 80^\circ$ W/NE $\angle 35^\circ \sim 50^\circ$ 。深层抗滑稳定计算的二维滑移通道见图1。

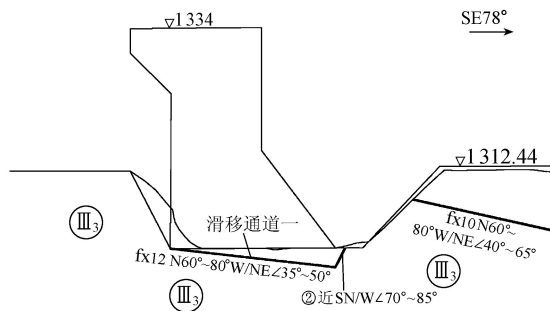


图1 坝段深层抗滑滑移通道二维计算示意图(单位:m)

为了更加合理地反映24号坝段朝河床方向滑动的三维效应,对该坝段的两种滑移模式进行三维刚体极限平衡计算分析。在进行坝段深层抗滑稳定三维计算时,两种滑移模式的结构面组成如下:

滑移模式1: N20 $^\circ \sim 30^\circ$ /SW $\angle 60^\circ \sim 70^\circ$ 、fx11 N40 $^\circ \sim 80^\circ$ W/NE $\angle 35^\circ \sim 50^\circ$ 、IV类岩体开挖面(中间包含IV类岩体与坝基界面)及III<sub>3</sub>岩体水平剪出面(高程1290 m)。

滑移模式2: 在高程1290 m以上与第1种滑移

模式的滑移面相同,而在高程 1290 m 以下的滑移面通过由 23 号坝基的高程 1281 m 平台和 1 : 0.5 坡面构成的坡脚剪出。

两种滑移模式示意图分别见图 2 和图 3,对应的三维计算模型见图 4 和图 5。计算参数见表 1。

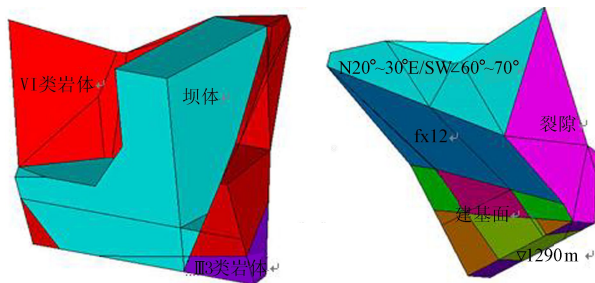


图 5 坝段滑移模式 2 计算模型

表 1 计算参数

类型	抗剪强度		$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	连通率/%
	$f'$	$c'/MPa$		
坝体			2.52	
IV类岩体	0.800	0.500	2.25	
III类岩体	0.850	0.650	2.60	
裂隙②	0.675	0.125		75
裂隙③	0.675	0.125		85
错动带 fx12	0.450	0.04		

注:②③为风化晕硬接触;fx12为岩屑夹泥型。

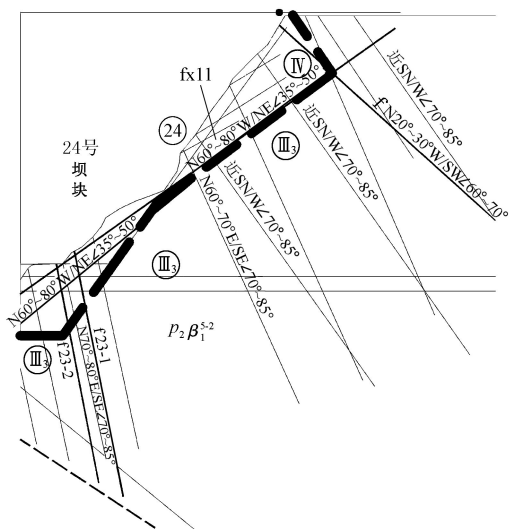


图 2 坝段滑移模式 1 (坝 0+000 地质横剖面)

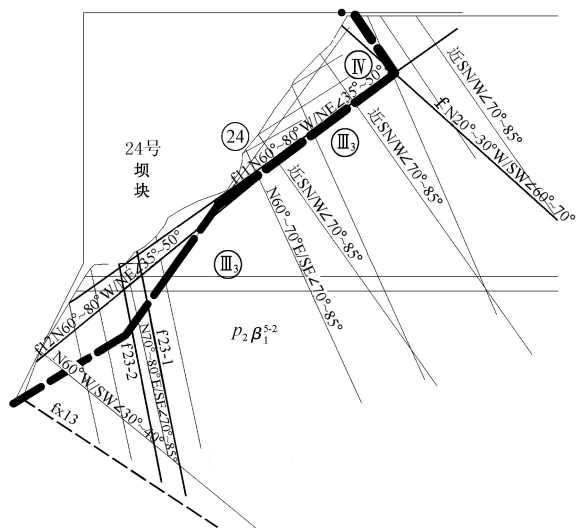


图 3 坝段滑移模式 2 (坝 0+000 地质横剖面)

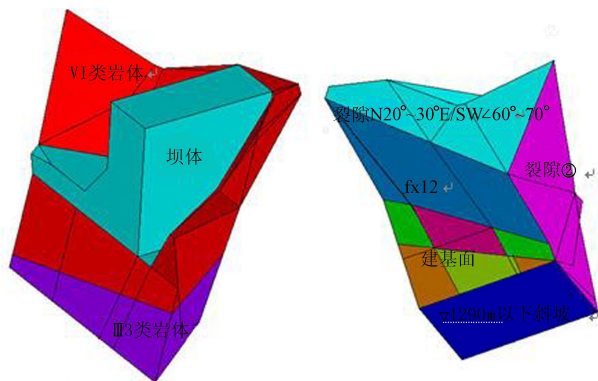


图 4 坝段滑移模式 1 计算模型

### 3 计算工况

考虑以下 3 组荷载工况:①工况 1 为自重+上下游静水压力+泥沙压力+滑移面上的扬压力;②工况 2 为工况 1 载荷+水平载荷系数为 0.345 的设计地震载荷;③工况 3 为工况 1 载荷+水平载荷系数为 0.407 的校核地震载荷。其中,上下游水面高程分别为 1330.00 m 和 1203.70 m,上游迎水面的泥沙作用高程为 1212.90 m。

### 4 计算成果

二维深层抗滑稳定采用等 K 法计算,三维深层抗滑稳定计算采用严格极限平衡方法,计算结果见表 2。从表 2 可以看出,二维计算结果中坝段的滑移通道正常工况下安全系数小于三维的计算结果,地震工况下安全系数也小于规范<sup>[4]</sup>规定的 2.3,不满足要求,需要采取工程措施。但是三维计算结果中,两种滑移模式正常工况下安全系数都大于 3,地震工况下安全系数都大于 2.3。

表 2 计算成果

方法	滑移模式	工况 1	工况 2	工况 3
经典二维方法	1	2.960	2.240	2.160
三维刚体	1	3.270	2.618	2.529
极限平衡法	2	3.318	2.824	2.709

由表 2 可知,在考虑坝基滑移面的三维效应时,正常工况下该坝段的整体抗滑稳定安全系数由二维的 2.960 提高到 3.270,提高了 10%,地震工况下提高了 16.6%。主要原因如下:目前的二维计算不能

(下转第 97 页)

由以上计算结果可知曲线内侧的墩台帽长度比曲线外侧长。长度通过修正系数  $e$  进行调整,修正系数的大小与斜交角度和曲线半径有关; $a$  一定时, $e$  与半径  $R$  成正比; $R$  一定时, $e$  与斜交角度  $a$  成反比。

## 2 斜交盖梁侧挑头板宽度的计算

以申嘉湖杭高速公路练杭段 L7 合同段桥梁<sup>[4]</sup>为例计算斜交盖梁侧挑头板的宽度。申嘉湖杭高速公路练杭段 L7 合同段横港大桥全长 165.48 m,为  $4 \times 20 \text{ m} + 4 \times 20 \text{ m}$  二联预应力混凝土空心板梁先简支后连续结构,该桥平面位于曲线半径  $R = 1650 \text{ m}$  的左偏圆曲线上,各桥墩中心线右斜交角为  $60^\circ$ ,左右幅均设置左向 4% 的横坡,具体尺寸如图 2 所示。

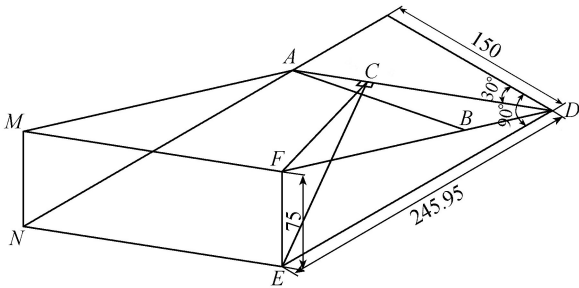


图 2 斜交盖梁侧挑头板宽度计算示意图(单位:m)

求解  $\angle ADF$ ,通过  $F$  点向  $AD$  作垂线交于  $C$  点, $FC \perp AD$ , $FE \perp$  面  $ADEN$ ,则  $EC \perp AD$ 。因为  $\angle ADE = 60^\circ$ ,那么  $AB$  的长度(模板宽度)  $l_{AB} = [(245.95 \text{ m} \times \sin 60^\circ)^2 + (75 \text{ m})^2]^{0.5} / [(245.95 \text{ m})^2 + (75 \text{ m})^2]^{0.5} \times$

$(150 \text{ m} / \cos 30^\circ) = 152.11 \text{ m}$ 。

通过上述计算结果可知,侧挑头板的宽度比底板的宽度宽,桥梁的夹角越大,两者的差值越大,夹角为  $45^\circ$  时,两者的差值可达 7 cm 之多,如果挑头板和底板宽度相等,会造成盖梁尺寸偏小,从而导致保护层偏小或者钢筋骨架尺寸偏小,影响工程质量。

## 3 结 语

本文精确计算了申嘉湖杭高速公路练杭段 L7 合同段公路曲线斜交桥的墩台帽长度及斜交盖梁侧挑头板宽度,分析了墩台帽左右幅长度不一样的原因及斜交盖梁侧挑头板与底板不同宽的原因,可用于指导后续模板制作、钢筋绑扎等工艺。工程实际应用结果表明,桥梁各部分尺寸满足设计和规范要求,施工顺利完成。

## 参考文献:

- [1] 陈志杰. 高等代数与解析几何[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [2] 谙晏中,李洪军. 高等代数与几何[M]. 西安:西安交通大学出版社,1999.
- [3] JTJ/T066—1998 公路全球定位系统(GPS)测量规范[S].
- [4] 申嘉湖杭高速公路练市至杭州段两阶段施工图设计[R]. 杭州:浙江交通勘测设计有限公司,2007.

(收稿日期:2012-12-16 编辑:骆超)

(上接第 73 页)

很好地模拟坝基块体周边接触面的阻滑作用,导致计算结果偏保守,而三维计算可以完全考虑各个滑移通道上滑面的产状和性状,比较客观地反映其稳定状态。

## 5 结 语

由于坝基基础面形态和结构面产状本身的三维特性导致重力坝坝段稳定问题是个三维问题,现有的二维计算方法不能全面反映坝段深层抗滑稳定性。因此,在采用经典二维方法进行稳定分析的同时,有必要辅以三维方法进行分析验证,从而更为科学合理地进行坝段的抗滑稳定安全评价。

尽管目前规范未对三维分析规定安全系数允许值,但是将三维计算得出的安全系数应用于重大工程决策仍然是十分有用的。在研究重力坝工程深层抗滑稳定问题时,当坝基结构面呈现明显的三维效应时,采用传统二维方法和三维刚体极限平衡方法

相结合的方法,对工程设计和风险控制将起到良好的指导作用。

## 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.
- [2] 潘家铮. 重力坝设计[M]. 北京:水利电力出版社,1987.
- [3] 郑宏. 三维严格极限平衡法[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(8): 1539-1547.
- [4] SL 319—2005 混凝土重力坝设计规范[S].

(收稿日期:2013-02-20 编辑:骆超)

