

论文

# 三峡左厂3<sup>#</sup>坝段深层抗滑稳定三维有限元分析

## 3D-FEM analysis of deep sliding stability of 3<sup>#</sup> dam foundation of left power house of the Three Gorges Project

葛修润<sup>1</sup>, 任建喜<sup>1,2</sup>, 李春光<sup>1</sup>, 郑宏<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 西安科技学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 建立了包含基岩内大量节理裂隙和断层并且反映它们的真实产状和分布的三维有限元计算模型, 研究了三峡工程左厂3<sup>#</sup>坝段的深层抗滑稳定问题, 提出了一个合理实用的坝基安全系数的判断原则, 给出了合理的基于强度储备概念的左厂3<sup>#</sup>坝段抗滑稳定安全系数。

**关键词:** 三维真实产状; 非线性; 安全系数; 深层滑动

**中图分类号:** TV 223.31

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2003)04-0389-06

**作者简介:** 葛修润(1934-), 男, 上海市人, 教授, 博士生导师。1959年毕业于前苏联敖德萨建筑工程学院, 1995年当选为中国工程院院士。自1985年以来共获国家奖及省部级科技进步奖18次。中国科学院岩土力学重点实验室学术委员会主任。现主要从事岩土力学与工程问题的研究工作。

GE Xiurun<sup>1</sup>, REN Jianxi<sup>1,2</sup>, LI Chun-guang<sup>1</sup>, ZHENG Hong<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Geomechanics, Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics, CAS, Wuhan 430071, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** 3D-FEM computation model reflecting the real attitude and distribution of large structures and fault in the 3<sup>#</sup> dam foundation of the Three Gorges Project are created. The deep stability of dam foundation has been studied. A rational and practical method to judge the safety factor of dam foundation is proposed. The safety factor against sliding based on the concept of strength reserve of 3<sup>#</sup> dam foundation is given.

**Key words:** 3D real attitude; non linearity; safety factor; deep sliding

## 0 前言\*

三峡工程左厂1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段基岩为坝区断续缓倾角结构面相对发育区, 长大缓倾角裂隙与岩桥在各坝段呈交互分布。左厂1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段的主要工程地质问题为大坝沿缓(中)倾角断续结构面等组成的潜在滑动面的抗滑稳定问题, 其中, 3<sup>#</sup>坝段坝基断续节理裂隙最为发育, 是整个左厂厂房区坝基抗滑稳定性最薄弱的环节, 由于大坝坝顶高程为185 m, 大坝建基面高程为85~90 m, 坝后布置的坝后式厂房最低建基高程为22.2 m, 致使坝后形成坡度约54°, 临时坡高67.8 m, 永久坡高39 m的高陡边坡。如此高的混凝土坝建造在裂隙密布的高陡岩基台上, 裂隙的存在对大坝的安全运行带来严重问题, 因此, 对左厂1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段特别是3<sup>#</sup>坝段的深层抗滑稳定问题的评价与分析是业主和设计部门极为关注的问题, 它被公认为三峡工程中最重大的工程技术问题之一。由于大坝在2003年6月即将蓄水, 对此问题做出科学的评价是十分紧迫的课题。

左厂1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段的主要工程地质问题为大坝岩基内由缓倾角裂隙面及岩桥岩体组成的潜在滑动面的

抗滑稳定问题。为查清左厂1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段缓倾角结构面的性状及空间展布特征进行了大量的勘探工作。在初步设计及前期工作阶段, 包括大量的地表地质调查, 不同高程的两层平硐勘探, 大量的大口径、小口径钻孔勘探, 基本摸清了影响深层滑动的主要因素——长大缓倾角结构面(长度大于10 m者)的性状及其在坝址范围内的分布规律。在技术设计及施工开挖阶段进行两期特殊勘探工作。特殊勘探工作采取了加密钻孔的方法及先进的钻探方式。其主要方法是: 左厂2<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段布置了四条勘探线, 共29个钻孔, 勘探线间距约为40 m, 同一勘探线内钻孔间距约15~20 m; 采用了先进的钻孔技术, 岩芯获得率为100%; 对钻孔进行彩电录像, 获取孔内岩体结构面构造及其性状资料。

研究分析表明, 对大坝抗滑稳定起重要作用的主要是长大缓倾角结构面, 且这些结构面是断续的, 连通率是11.5%。两次特殊勘探共揭露能构成深层滑动底滑面的长大缓倾面共128条。

关于三峡左厂1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>坝段深层抗滑稳定研究工作已经取得了很多有重要价值的成果<sup>[1,2]</sup>。左厂1<sup>#</sup>~

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10172057, 10202019)

收稿日期: 2002-06-21

5<sup>#</sup> 坝段深层抗滑稳定问题的关键是如何在计算模型中对已探明的起关键作用的众多的结构面和断层进行正确模拟。由于关键结构面和断层的空间面积和产状已经探明,显然,若采用地质结构面的概化模型是不妥的,而前人在左厂坝段三维计算中都将所有结构面的走向视为平行而且沿坝段横截面为连续展布的模型建立方法与实际情况出入很大。本文将重要的长大缓倾角断续结构面和断层按照其真实产状和面积纳入有限元模型中,并对坝后厂房进行了合理简化,建立了符合客观实际的计算模型,完成了左厂 3<sup>#</sup> 坝段深层抗滑稳定三维弹塑性有限元分析。

1 三维有限元分析模型的建立

1.1 计算范围

坝基的计算范围剖面图如图 1 所示,3<sup>#</sup> 坝段的宽度为 38.3 m。

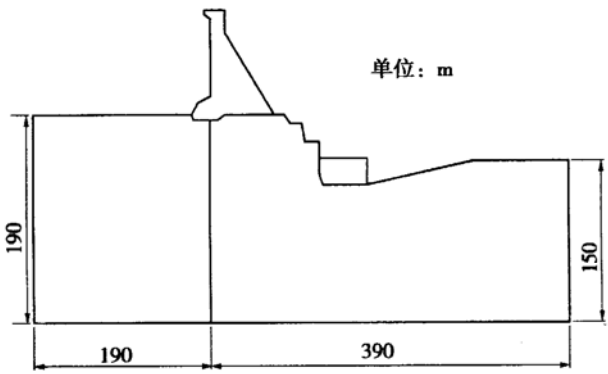


图 1 计算范围剖面图  
Fig. 1 Section of computation range

1.2 结构面和断层的处理方法

地质勘探揭露能构成深层滑动底滑面的 128 条长大缓倾面具有以下特征:

- (1) 裂面平直稍粗,有擦痕,或平直光滑无擦痕;
- (2) 裂隙中有数 mm 至 10 余 mm 的绿帘石、长英质

表 1 左厂 3<sup>#</sup> 坝段坝基抗滑稳定主要控制面  
Table 1 Main structure controlling stability of left power house of 3<sup>#</sup> dam foundation

| 裂隙<br>编号         | 中心点坐标   |         |      | 长度<br>/m | 结构面性状及填充物特征                        | 产状        |
|------------------|---------|---------|------|----------|------------------------------------|-----------|
|                  | X       | Y       | Z    |          |                                    |           |
| T <sub>1</sub>   | 20046.0 | 48193.0 | 90.0 | 10       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 3~ 7 mm               | 120° ∠36° |
| T <sub>9</sub>   | 20065.6 | 48193.0 | 78.4 | 10       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 2~ 4 mm               | 120° ∠38° |
| T <sub>57</sub>  | 20076.0 | 48192.9 | 72.9 | 20       | 平直稍粗面—光滑面; 充填绿帘石 2 mm、长英质 3 mm     | 135° ∠25° |
| T <sub>129</sub> | 20118.5 | 48193.2 | 49.6 | 20       | 平直稍粗面; 10 mm 左右绿帘石化碎岩充填            | 100° ∠36° |
| T <sub>12</sub>  | 20065.0 | 48193.0 | 72.0 | 20       | 平直稍粗面—光滑面; 充填英帘质 1~ 3 mm           | 150° ∠23° |
| T <sub>58</sub>  | 20076.0 | 48192.9 | 66.8 | 10       | 平直稍粗面—光滑面; 充填石英质 3 mm、绿帘石化碎裂岩 6 mm | 150° ∠23° |
| T <sub>25</sub>  | 20089.0 | 48192.7 | 59.9 | 10~ 15   | 平直稍粗面; 充填绿帘石 5~ 10 mm、钙质 1 mm      | 125° ∠31° |
| T <sub>162</sub> | 20118.5 | 48193.2 | 44.0 | 5~ 10    | 平直稍粗面                              | 115° ∠28° |
| T <sub>100</sub> | 20023.0 | 48193.2 | 90.0 | 30       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 2~ 5 mm、石英 20~ 30 mm  | 135° ∠40° |
| T <sub>161</sub> | 20034.7 | 48193.1 | 78.0 | 5        | 平直稍粗面; 充填绿帘石 1 mm                  | 115° ∠33° |
| T <sub>2</sub>   | 20046.0 | 48193.0 | 73.0 | 20       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 3~ 6 mm               | 110° ∠26° |
| T <sub>13</sub>  | 20065.6 | 48193.0 | 64.8 | 20       | 平直稍粗面—光滑面; 充填绿帘石 2~ 3 mm           | 100° ∠28° |
| T <sub>59</sub>  | 20076.0 | 48192.9 | 59.7 | 20       | 平直稍粗面—粗糙面; 构造岩 50 mm               | 100° ∠30° |
| T <sub>70</sub>  | 20101.0 | 48193.2 | 48.7 | 10       | 微弯粗糙焊合面; 充填绿帘石 3~ 4 mm             | 90° ∠20°  |
| T <sub>132</sub> | 20118.5 | 48193.2 | 44.1 | 10       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 2~ 3 mm               | 92° ∠24°  |
| T <sub>135</sub> | 20118.5 | 48193.2 | 38.2 | 20       | 平直稍粗面, 斜擦痕; 充填绿帘石 2~ 3 mm          | 100° ∠31° |
| T <sub>71</sub>  | 20101.0 | 48193.2 | 43.3 | 20       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 3~ 6 mm、碎裂岩 80 mm     | 95° ∠40°  |
| T <sub>99</sub>  | 20010.5 | 48193.1 | 78.3 | 13       | 平直稍粗面; 充填英帘质 2~ 6 mm               | 115° ∠16° |
| T <sub>159</sub> | 20023.0 | 48193.2 | 74.0 | 5        | 微弯稍粗面; 充填绿帘质 1.2 mm                | 94° ∠16°  |
| T <sub>160</sub> | 20046.0 | 48193.0 | 65.0 | 5        | 平直稍粗面                              | 90° ∠22°  |
| T <sub>17</sub>  | 20065.6 | 48193.0 | 55.7 | 20       | 微弯稍粗面; 充填绿帘石化碎裂岩 2~ 4 mm           | 120° ∠19° |
| T <sub>60</sub>  | 20076.0 | 48192.9 | 50.9 | 20       | 平直稍粗面; 充填绿帘质 8~ 12 mm、钙质 1 mm      | 120° ∠35° |
| T <sub>28</sub>  | 20089.0 | 48192.7 | 42.9 | 10       | 平直稍粗面; 充填绿帘质 6~ 10 mm、钙质 1 mm      | 110° ∠25° |
| T <sub>74</sub>  | 20101.0 | 48193.2 | 36.1 | 20       | 平直稍粗—光滑面, 具倾向擦痕; 充填绿帘石 2~ 3 mm     | 120° ∠36° |
| T <sub>170</sub> | 20118.5 | 48193.2 | 26.0 | 15       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 4~ 8 mm               | 135° ∠46° |
| T <sub>144</sub> | 20143.0 | 48191.8 | 13.7 | 13       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 2~ 4 mm; 碎裂岩 5~ 8 mm  | 110° ∠23° |
| T <sub>147</sub> | 20143.0 | 48191.8 | 10.9 | 15       | 平直稍粗面; 充填绿帘石 2~ 4 mm; 石英 10~ 20 mm | 116° ∠26° |
| T <sub>105</sub> | 20074.6 | 48210.4 | 64.9 | 20       | 平直焊合面; 充填碎裂岩 30 mm                 | 121° ∠33° |
| T <sub>110</sub> | 20078.3 | 48177.6 | 53.6 | 15       | 平直稍粗, 局部光滑; 充填绿帘石 2~ 3 mm          | 120° ∠30° |

矿物或断层中有数 cm 或数十余 cm 碎裂岩、碎斑岩等构造岩;

- (3) 裂隙面附绿帘石膜, 且有明显擦痕;
- (4) 数条缓倾角裂隙成组出现, 其间构造岩厚度为数 cm 至 10 余 cm;
- (5) 长大缓倾面均为硬性结构面, 其充填物多为绿帘石及长英质等坚硬物质, 无泥质或较弱物质充填;
- (6) 长大缓倾面中绝大多数为平直稍粗面和粗糙面, 平直光滑面仅占 3.8%。

我们建立三维计算模型时的做法是根据三峡勘测院基于多年的勘察工作总结出来对 3<sup>#</sup> 坝段稳定性起决定作用的结构面和断层考虑到三维计算模型中, 这样可以抓住关键问题, 并能得到满足工程需要的计算结果。经与长委会设计院及长委会地质部门协商讨论, 最终 3<sup>#</sup> 坝段选择了 29 条主要结构面以及影响 3<sup>#</sup> 坝基稳定性的 5 条关键断层在三维计算模型中给以考虑。表 1 是其详细的空间分布规律, 显然, 29 条结构面的走向在 90°~ 150°之间, 若采用各结构面走向平行的假设, 必然会引起较大的误差, 计算结果将与实际情况有很大的出入。表 2 是考虑的 5 条断层的有关地质参数。

表 2 断层特征

Table 2 Characteristics of fault

| 名称   | F <sub>314</sub> | F <sub>316</sub> | F <sub>36</sub> | F <sub>91</sub> | F <sub>92</sub> |
|------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 产状   | 315°∠65°         | 278°∠60°         | 280°∠52°        | 274°∠58°        | 280°∠56°        |
| 厚度/m | 0.3              | 0.15~0.8         | 0.4~1.5         | 无厚度             | 无厚度             |
| 长度/m | 60               | 52               | 25              | 38              | 31              |
| 中心 X | 20033            | 20073            | 20113           | 20149           | 20160           |
| 点 Y  | 48193            | 48193            | 48193           | 48193           | 48193           |
| 坐标 Z | 66               | 61               | 28.5            | 6               | 7               |

显然, 将如此多的结构面和断层按照其真实产状和展布面积及空间分布位置构筑到三维数值模型上是一项十分艰巨的工作, 这也是本次三维计算分析工作中的关键性工作之一。

### 1.3 厂房的合理简化

本次计算对厂房和尾水管的结构进行了较符合实际的合理简化, 没有采用实体混凝土块来模拟厂房和尾水管的作用, 而是采用中间挖空的混凝土块来模拟厂房和尾水管的作用, 这样将会提高计算结果的可靠性。图 2 是其计算模型。

### 1.4 计算模型中结构面的处理

将地质上提供的潜在滑移面 abc, adefg, ABCDZ, ABCDE, ABCDPQ, JNORSHI, ABCFHTUY 等上的结构面放在三维有限元计算模型中。在模拟结构面时, 按结构面的真实产状及其中心点位置, 正确定位于计算模型之中。图 3 是其空间分布效果图。结构面纳入计算模型后, 我们完成了计算模型中结构面的形态与地质

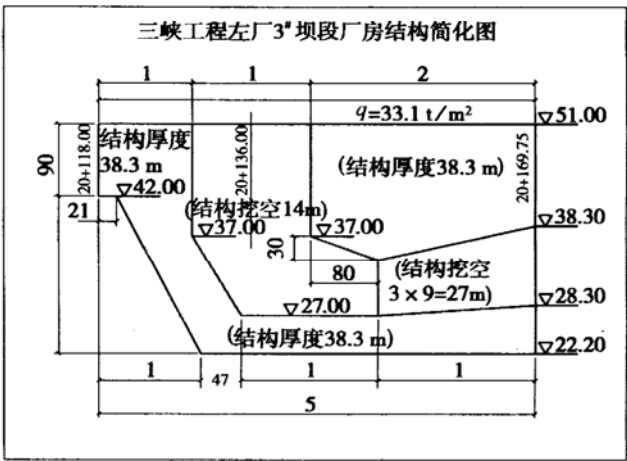


图 2 厂房的简化模型  
Fig. 2 Simplified model of power house

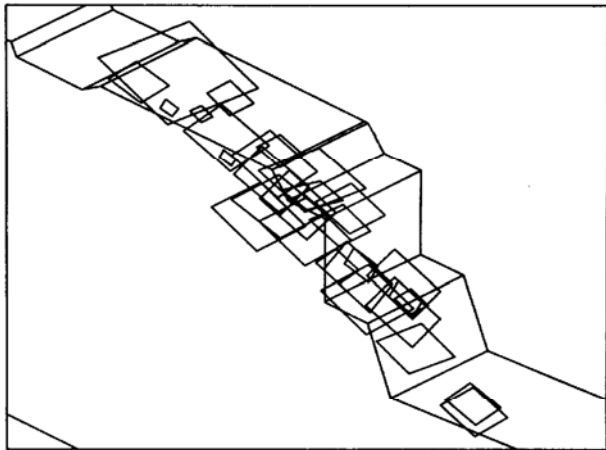


图 3 3<sup>#</sup> 坝段结构面空间分布图  
Fig. 3 Space distribution of structural planes of 3<sup>#</sup> dam foundation

勘察得到的结构面平面图的对照工作, 确保了结构面空间布局的真实性。

### 1.5 网格的剖分

本计算模型中, 坝基花岗岩、砼和断层用的单元类型有四面体单元(三棱锥), 五面体单元(四棱锥, 三棱柱), 等参六面体单元, 结构面用的是等参 Goodman 节理单元。图 4 给出了 3<sup>#</sup> 坝段三维有限元分析模型, 总单元数为 18532, 节点数为 10015, 其中节理单元 459 个, 断层单元 1069 个。

## 2 计算条件与方法

### 2.1 荷载与材料参数

三维计算时的荷载组合是: 自重+ 正常蓄水位时的上、下游水压力+ 泥沙压力。其中, 坝体砼容重取 24.5 kN/m<sup>3</sup>, 岩体容重取 27.0 kN/m<sup>3</sup>。正常蓄水时的库水位为 175 m, 下游水位为 62 m。泥沙压力取坝前淤沙高程为 106m, 泥沙浮容重取 5.0 kN/m<sup>3</sup>。本文计算

表 3 材料参数

Table 3 Parameter of material

| 材料    | 变形模量<br>$E$ /(GPa) | 容重<br>$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 泊松比<br>$\mu$ | 抗剪断强度 |          | 抗剪残余强度 |           | 法向刚度 $K_n$<br>$/(\text{MPa}\cdot\text{cm}^{-1})$ | 切向刚度 $K_s$<br>$/(\text{MPa}\cdot\text{cm}^{-1})$ |
|-------|--------------------|---------------------------------------------------|--------------|-------|----------|--------|-----------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|       |                    |                                                   |              | $f$   | $c$ /MPa | $f$    | $c'$ /MPa |                                                  |                                                  |
| 坝体混凝土 | 26                 | 24.5                                              | 0.167        | 1.1   | 3.0      |        |           |                                                  |                                                  |
| 微风化岩体 | 35                 | 27.0                                              | 0.22         | 1.7   | 2.0      | 1.3    | 0.7       |                                                  |                                                  |
| 结构面   |                    |                                                   |              | 0.7   | 0.2      | 0.6    | 0.1       | 90                                               | 25                                               |
| 断面    | 10                 | 26.0                                              | 0.28         | 0.9   | 0.8      | 0.8    | 0.6       |                                                  |                                                  |

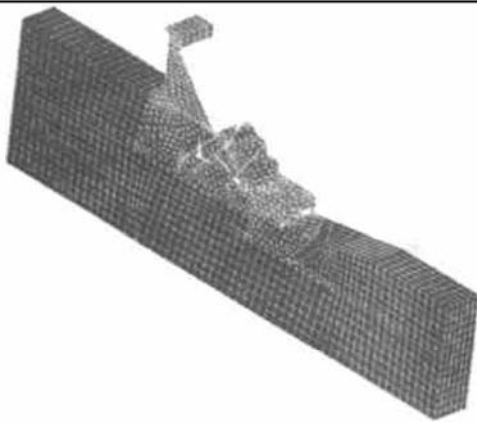
图 4 3<sup>#</sup> 坝段三维有限元计算模型

Fig. 4 3-D FEM computation model

中的材料参数(表 3)由委托单位提供,考虑到三峡勘测院提供的结构面的连通率是 11.5%,岩桥的参数根据委托单位的建议取微风化岩体参数的 88.5%。

## 2.2 左厂 3<sup>#</sup> 坝段重量参考值

根据委托单位建议,坝体在高程 90 m 以上重量为 10270 t/m。厂房总重量为 5130 t/m,其中,高程 51 m 以上厂房结构重可按 33.1 t/m<sup>2</sup> 均布荷载施加。左厂 3<sup>#</sup> 坝段及副厂房总重量为 21270 t/m(高程▽22.2~▽85.0)。

## 2.3 计算软件与强度折减法

本文的有限元分析是用笔者研制的 EBP3 三维非线性有限元软件完成的。三维计算采用抗剪强度指标( $c, c', f, f'$ )同步降低的强度折减方法,文中用  $K$  表示强度折减系数,当  $K = 1$  时按正常情况下的材料参数进行计算,当  $K = 2$  时,将除了混凝土外的其它材料的参数中的  $c, f, c', f'$  进行同步折减(该材料的其它参数如弹模等不变),即取其原值的 50% 进行有限元计算,当  $K = 3, 4, \dots$  时的算法依此类推。

需要说明的是,由于坝基深部岩体的强度指标也一同降低,导致  $K$  等于一定的值时,坝基深部的岩体也进入了塑性,这是与实际不符的,如图 6(d),但这并不影响对厂坝段抗滑稳定性的评价。

## 2.4 安全系数的综合评判方法

如何通过三维有限元分析的结果来给出坝段的抗

滑安全系数目前尚没有一个标准的方法,本文通过研究①坝体关键点(坝踵、坝顶、坝趾)位移( $D$ )与强度折减系数  $K$  的变化规律(下称  $D-K$  曲线),②滑移通道上坝踵和主要长大结构面、岩桥等塑性区发展与  $K$  之间的演化规律来综合判断 3<sup>#</sup> 坝段的安全系数。既把控制点位移出现拐点+坝踵破坏+滑移通道上单元破坏区域接近完全连通,整体滑移通道接近形成时的  $K$  值(基本上)确定为坝段的抗滑安全系数。拐点等具有明确的物理含义,它反映了坝体位移方面的总体特征,并且该点具有确定性。

需指出的,不能把有限元计算得到的最大  $K$  值作为坝段的抗滑安全系数,这是因为有限元计算能够得到的最大  $K$  值受到有限元计算时的控制方法(如增量的子步步长等)的影响,把此时的  $K$  作为坝段的抗滑安全系数是偏于危险的,也是不很恰当的。如本文的 3<sup>#</sup> 坝段单独作用可以计算到  $K = 6.5$ ,但我们不能把 3<sup>#</sup> 大坝的安全系数确定为 6.5,合理的确定方法见下述。

## 3 计算结果分析

### 3.1 三维问题的分析方法

三维计算虽然较二维计算能更准确的反映岩体的真实情况,但是三维问题在计算结果的形象而准确的表达方面也还存在不少困难。本文在三维问题的后处理中采用“CT”技术,即在模型上平行 3<sup>#</sup> 坝段横缝面切割出若干个剖面,通过这些剖面上的应力等值线、损伤区及变位图等反映三维形体的有关信息。

本文用于结果分析的是三个剖面,即距 3<sup>#</sup> 坝段横缝面 7.66, 19.15, 30.64 m 的剖面,每个剖面选取坝趾 A, 坝顶 B 和坝踵 C 三个关键点上的位移发展情况进行分析。对 3<sup>#</sup> 坝段来说,我们分析了以上 3 个代表性剖面上 9 个关键点的竖向位移、顺流向位移随  $K$  变化时的演化规律,3 个剖面以及整体模型塑性区随着  $K$  变化的演化规律,运用下述的原则对 3<sup>#</sup> 坝段的强度储备安全系数进行了评价。

综合判断时遵循三个优先原则:①关键点 C 的变化情况优先 A 和 B;②中央剖面(19.15 m 剖面)的变化

情况优先于两侧剖面; ③水平位移的变化优先竖向位移的变化。

### 3.2 结果分析

需要指出的是, 由于相对来说, C 点的  $D-K$  变化规律稳定而 A 点和 B 点的  $D-K$  变化有摆动现象, 再加上 C 点是受拉破坏区, C 点的  $D-K$  演化规律也是业主最为关心的, 因此这里重点选择 C 点的  $D-K$  演化规律进行介绍, 限于篇幅, 下面仅详细介绍 19.15 m 剖面 C 点的位移发展规律, 图 5 给出了 19.15 m 剖面坝踵 C 点的顺流向和竖直向位移与  $K$  的变化曲线, 图 6 给出了该剖面  $K=1, 2, 3, 3.2, 3.5, 4$  时的塑性区图。限于篇幅, 其它剖面关键点的  $D-K$  曲线和塑性区发展过程图略去。3<sup>#</sup> 坝段单独作用时, 正常情况下蓄水后 ( $K=1$ , 图 6(a)), 在指定的 4 个剖面上, 很少量的结构面发生屈服。在  $K=2$  时, 4 个剖面的断层和结构面大多数进入塑性(图 6(b))。在  $K=3, 3.2$  时, 各长大结构面之间的岩桥及其附近的岩体进入塑性(集中在  $\nabla 51$  高程以下)。在  $K=3.5$  时(图 6(e)), 随着  $K$  的增加, 各剖面的塑性区不断增加, 结构面、断层之间的岩桥大多数进入塑性, 最为关键的是, 此时, 各剖面坝踵处的基岩屈服, 但坝踵处的塑性区并没有和  $F_{314}$  断层处的塑性区连通, 整体的塑性滑移通道尚未形成。在  $K=4$  时, 各剖面坝踵处、几乎所有的结构面、断层及其岩桥的塑性区连通, 大的塑性滑移通道形成(图 6(f))。

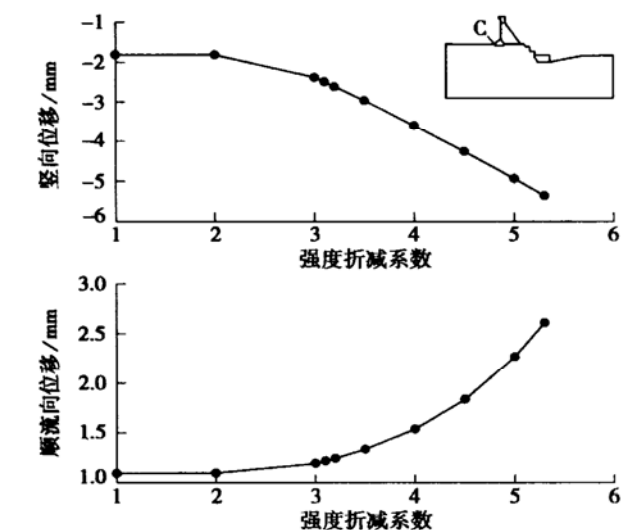


图 5 19.15 m 剖面 C 处位移与  $K$  关系曲线  
Fig. 5  $D-K$  curve of point C in 19.15 m section

在  $K$  从 1 到 2 的过程中, 各剖面坝踵、坝顶和坝趾关键点的顺流向和竖直向位移基本一致(表 4), 几乎没有变化, 这主要是各结构面之间的岩桥没有进入塑性, 几乎没有结构面的连通, 没有大的滑移通道形成的缘故。

在  $K$  从 2 到 3 的过程中, 各剖面坝趾、坝踵关键点的顺流向位移增大, 坝趾向坝基深处移动明显, 这主要是部分结构面之间的岩桥进入塑性, 部分结构面连通, 有大的滑移通道的形成的缘故。而此时各剖面坝顶关键点的顺流向位移几乎没有变化, 坝趾向坝基深处移动非常明显。因此,  $K=3$  时, 各剖面关键点的位移与  $K$  的关系曲线上出现拐点。

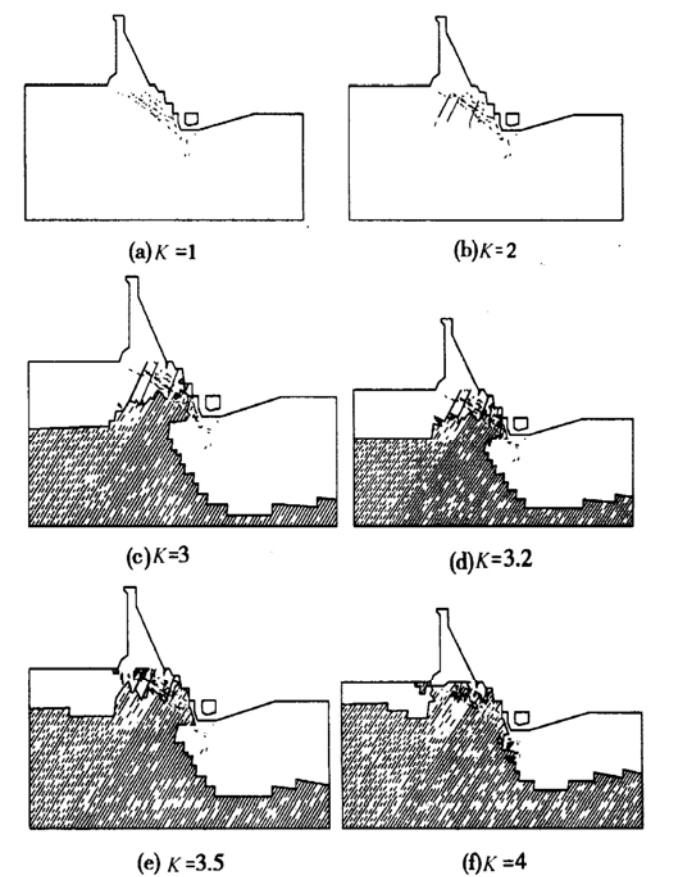


图 6 19.15 m 剖面塑性区  
Fig. 6 Plastic zone of 19.15 m section  
表 4 19.15 m 剖面关键点位移

| Table 4 Displacement of key point in 19.15 m section mm |        |       |        |       |        |       |
|---------------------------------------------------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| $K$                                                     | 坝趾 A 点 |       | 坝趾 B 点 |       | 坝趾 C 点 |       |
|                                                         | 顺流向    | 竖向    | 顺流向    | 竖向    | 顺流向    | 竖向    |
| 1                                                       | 1.22   | -1.33 | 7.68   | -1.01 | 1.10   | -1.81 |
| 2                                                       | 1.26   | -1.34 | 7.71   | -1.04 | 1.10   | -1.81 |
| 3                                                       | 1.48   | -1.73 | 7.67   | -1.71 | 1.20   | -2.37 |
| 3.1                                                     | 1.54   | -1.83 | 7.71   | -1.86 | 1.22   | -2.48 |
| 3.2                                                     | 1.61   | -1.94 | 7.76   | -2.01 | 1.25   | -2.60 |
| 3.5                                                     | 1.84   | -2.31 | 7.98   | -2.51 | 1.34   | -2.96 |
| 4                                                       | 2.47   | -3.11 | 8.61   | -3.50 | 1.54   | -3.60 |
| 4.5                                                     | 3.40   | -4.12 | 9.72   | -4.65 | 1.84   | -4.25 |
| 5.0                                                     | 4.66   | -5.36 | 11.39  | -5.94 | 2.27   | -4.92 |
| 5.3                                                     | 5.63   | -6.25 | 12.74  | -6.83 | 2.61   | -5.35 |

在  $K$  从 3 到 3.5 的过程中, 各剖面坝趾、坝顶、坝踵关键点的顺流向位移加速增大, 各点向坝基深处移

动明显增大。这主要是大部分结构面之间的岩桥进入塑性, 结构面连通, 有很长的滑移通道形成。

在  $K$  从 3.5 变为 4.5 等值的时候, 各剖面坝趾、坝顶、坝踵关键点的顺流向位移急剧增大, 各点向坝基深处移动也急剧增大, 主要原因是各剖面坝踵处、几乎所有的结构面、断层及其岩桥的塑性区连通, 整体塑性滑移通道形成。

由于是三维有限元计算, 并不是所有的剖面的结构面和断层及其附近的岩桥都进入塑性, 因此应力可以不断调整, 对于 3<sup>#</sup> 坝段单独计算来说, 可以计算到  $K = 6.5$ , 作为计算来说,  $K$  可以继续增大, 但不能认为有限元计算可以进行下去的  $K$  是安全系数。

### 3.3 安全系数

综上所述: ①仅从 3 个剖面的 9 个关键点的  $D-K$  的关系曲线可以看出 3<sup>#</sup> 坝段的安全系数在 3.0 ~ 3.5 之间。②仅 3 个代表性剖面上从坝踵、长大缓倾角结构面、长大缓倾角结构面之间的岩桥几乎全部发生破坏, 潜在滑移通道即将形成来分析, 可以认为 3<sup>#</sup> 坝段的安全系数在 3.5 ~ 4.0 之间。

综合分析 3 个剖面及其上各关键点的位移发展规律和塑性区演化规律, 可以认为 3<sup>#</sup> 坝段的强度储备安全系数为 3.5 左右。

## 4 结论与讨论

(1) 经过三维非线性有限元分析研究, 综合分析各剖面关键点的  $D-K$  曲线及其对应的坝基节理岩体的破坏发展规律, 本文建议 3<sup>#</sup> 坝段的强度储备安全系数为 3.5 左右。

(2) 由于左厂 3<sup>#</sup> 坝段的结构面和断层的赋存情况已经比较清楚, 因此, 在进行三维有限元建模时, 我们

采用的方法与前人不同, 即没有根据统计规律, 运用一些数学概化的方法给出滑移通道来建立计算模型, 而是将这些坝段岩基内赋存的对抗滑稳定性具有重要影响的长大缓倾角断续结构面和断层按照其真实的产状和空间分布面积描述在计算模型之中。为整个三维分析奠定了坚实的基础。

(3) 本文的计算模型对厂房和尾水管的结构进行了较符合实际的合理简化, 采用中间挖空的混凝土块来模拟厂房和尾水管的作用, 这样提高了计算结果的可靠性。

(4) 如何科学地根据三维有限元的计算结果去评定大坝抗滑稳定安全系数, 是有限元法在岩体工程中应用时遇到的一个十分重要的问题。本文采用的研究控制点位移与  $K$  值关系曲线上出现拐点的物理机制, 把控制点位移出现拐点+ 滑移通道上单元破坏区域接近完全连通, 整体滑移通道接近形成时的  $K$  值确定为坝段的抗滑安全系数的方法具有自己的特色。

(5) 由于有限元计算是建立在连续介质基础上的, 对于含有长大结构面的重力坝段的三维计算来说, 如何科学合理的选取关键点来评价其深层抗滑稳定性, 如何解决有限元分析“解不唯一”等许多问题需要进一步的研究。

参加本课题研究工作的还有长江勘测规划设计研究院徐麟祥总工、薛果夫总工、胡进华高工等, 特此致谢。

### 参考文献:

- [1] 水利部长江水利委员会. 三峡大坝左厂 1<sup>#</sup> ~ 5<sup>#</sup> 坝段抗滑稳定深化设计专题报告[R]. 1996.
- [2] 水利部长江水利委员会. 三峡大坝左厂 1<sup>#</sup> ~ 5<sup>#</sup> 坝段深层抗滑稳定综合分析报告[R]. 1997.