

[文章编号] 1003-4684(2022)02-0081-05

# 三峡库区雪花坪滑坡变形破坏分析及演化规律研究

李婉迪

(湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430068)

**[摘要]** 为探究三峡库区雪花坪滑坡的演化规律以及三维变形破坏分析,通过 Geo-Studio 数值分析软件对雪花坪滑坡进行网格划分得到计算模型。然后,根据有限元软件(Abaqus)模拟了雪花坪滑坡在各种工况条件下的变形破坏过程,得到了滑坡应力场和位移场的变化规律,并对雪花坪滑坡的位移和应力变化特点进行了计算分析。分析结果表明:雪花坪滑坡在工况三的条件下,滑坡的中后库水位的升降对滑坡的变形均有明显影响,其中滑坡中后部滑带较前缘滑带陡,破坏的范围较前缘大。

**[关键词]** 滑坡; 变形特征; 库水位升降; 形成机理

**[中图分类号]** TU431 **[文献标识码]** A

三峡水库区域周围大量天然斜坡开裂形成滑坡,其中影响水库区域库岸边坡稳定性的因素很多,除内在控制因素外,外在因素最普遍体现为库水位升降变化和降雨量上,边坡的稳定性会受到岩土体的抗剪强度和应力状态变化的影响<sup>[1-4]</sup>。因此三峡库区滑坡变形的主要原因是周期性蓄水<sup>[5-7]</sup>。林琰等运用数值模拟软件 Geo-Studio 模拟出不同升降速率下库水位变化对滑坡稳定性的影响,分析了库水位的周期性升降与滑坡稳定性之间的关系<sup>[8]</sup>。梁学战等通过模型试验的方法,分析了滑坡在一个蓄水周期内的演化规律,介绍了整个库水位升降周期内滑坡的全过程变化<sup>[9]</sup>。明成涛等通过对库水位、降雨和滑坡变化过程三者之间的相关性分析,研究了其主要成因机制,建立了一种滑坡变形与外界影响因素之间的对应关系<sup>[10]</sup>。刘艺梁等采用有限元法,模拟出滑坡体内地下水的瞬时渗流场在不同的水库水位升降速率下的特征,陆世轩等通过有限元法计算出不同库水位升降速率下的稳定性系数,并对滑坡采用极限平衡法进行稳定性分析<sup>[11-12]</sup>。曾亚武等将有限元法和极限平衡法相结合,将有限元分析得出的应力结果通过应力张量变换得出条块底部的应力,同时结合极限平衡法得出稳定性系数,更好的反映出边坡变形与稳定性安全系数之间的关系<sup>[13]</sup>。陈祖煜等在三维条件下扩展二维 Spencer 法,提出了一种新的三维极限平衡方法,这种方法保证了滑坡体三个方向的静力平衡,条块之间不再假

定为水平,滑块的剪力方向也不假设为平行于主滑动平面<sup>[14]</sup>。冯树人等也提出了一种新的三维极限平衡方法,即滑面可采用天然不连续面、由剪切作用导致的球面、由剪切作用导致的旋转椭球面和组合面这四种类型滑面,这将有利于对多个滑动方向进行计算<sup>[15]</sup>。郑晓晶等用研究非饱和土力学的渗流和抗剪强度的理论来分析滑坡稳定性,徐平等在此基础上,考虑了黏聚力和内摩擦角两者的变异性,采用 Monte-Carlo 模拟法对滑坡体的稳定性进行分析得到库水位涨落和降雨对滑坡渗流和稳定性的影响<sup>[16-17]</sup>。

现行滑坡稳定性分析中,数值分析方法不仅可以计算滑坡的应力分布和变形规律,而且可以较为准确的反映滑坡的整体状态。因此,在前人的研究基础之上,以三峡库区雪花坪滑坡为例,基于 GEO-SLOPE 软件对雪花坪滑坡有限元网格剖分,采用数值分析软件 Abaqus 对雪花坪滑坡的变形破坏过程进行模拟。并对不同库水位升降下雪花坪滑坡的应力场,位移场进行计算。揭示了在不同库水位变化下滑坡稳定性的位移,应力的变化规律,为水库水位波动条件下三峡库区相似滑坡的稳定性评价和动态发育规律提供参考。

## 1 滑坡概况

### 1.1 地质概况

雪花坪滑坡地处于长江上游的湖北省奉节县。

[收稿日期] 2021-03-25

[基金项目] 国家自然科学基金面上项目(42071264); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212015CC60005)

[第一作者] 李婉迪(1997-),女,湖北随州人,湖北工业大学硕士研究生,研究方向岩土力学理论

滑坡被冲沟分为左右两侧边界。滑坡体前缘高程 150 m, 后缘高程 333 m, 高差 183 m。滑坡长约 600 m, 宽约 480 m, 土层平均厚度 20.85 m, 滑坡体主滑动方向  $355^\circ$ 。滑体总变形规模  $615.075 \times 104 \text{ m}^3$ 。属于二级大型土质滑坡。滑坡体物质主要由碎块石土夹可塑状粘性土组成, 其结构较为松散。滑体整体厚度 16~25.5 m, 前中部薄, 后中部厚。滑动带的物质结构包括堆积而成的土壤物质与下伏基岩的接触滑动面和岩石节理面。滑动面主要沿着堆积体的顶部向下伏基岩发育。滑带岩土物质类型属中侏罗统沙溪庙组(J2S)。岩性为不等厚砂泥岩互层, 泥质和砂质结构, 薄层至中厚层状结构, 节理裂隙发育, 主要分布在滑坡的中后部。滑坡区无基岩露头。经对附近公路路堑边坡出露基岩露头调查, 岩层产状  $210^\circ \angle 15^\circ$ , 发育裂隙二组, 其产状为  $256^\circ \angle 67^\circ$  和  $170^\circ \angle 77^\circ$ 。

## 1.2 水文地质特征

雪花坪滑坡的地质形态特征如图 1 所示。滑坡位于梅溪河右岸, 坡顶与坡底高差达 183 m。该滑坡两侧边界均为冲沟, 这为滑坡的形成提供了条件, 前缘直抵梅溪河, 梅溪河穿过滑坡前缘的坡脚。由于梅溪河的切割和高水位的冲刷和侵蚀, 前缘的自由界面和边坡势能为滑坡的形成埋下了隐患。



图 1 雪花坪滑坡外观全貌

地下水对滑坡的影响较大。滑坡区依据地下水存在条件可分为松散岩类孔隙水和基岩裂隙水。基岩裂隙水一般存在于砂岩、泥岩裂隙中。而大气降水提供了滑坡体内的松散岩类孔隙水, 因此会受到季节变化影响不稳定。由相关调查资料可知, 雪花坪滑坡地下水位埋深为 3.0~14.0m, 滑体中前部地下水位埋深小于体后缘地下水位埋深。松散岩类孔隙水在滑坡体内部会向地表外部排出。地下水一般的来源主要由上部孔隙水入渗、侧向径流和降雨提供, 水量相对较差。

## 2 滑坡变形机理分析

### 2.1 宏观变形

结合现场调查的资料以及监测报告等综合分析, 影响雪花坪滑坡变形的因素主要包括:

1) 地形地貌 雪花坪滑坡为中等切割低山河谷

地貌, 处于梅溪河右岸的斜坡地形上, 坡顶与坡底高差达 183 m。该滑坡两侧边界均为冲沟, 构成了滑坡形成的有利边界。

2) 地层岩性 斜坡的形成创造了另一个有利条件。滑坡区岩性为中侏罗统沙溪庙组(J2S)砂泥岩。泥岩是一种良好的不透水层, 遇水时易崩解软化, 力学强度大大降低。滑体物质由碎块石和粉质粘土构成, 这就导致滑体结构比较的松散, 孔隙发育较大, 会有利于在降雨季节地表水的渗入。

3) 降雨 据资料查阅以及现场调查, 长江三峡库区的降雨持续时间较长, 并且雨量集中。据靠近滑坡区的云阳、奉节、巫山等点的气象资料, 多年平均降雨量在 1049.3~1145.1 mm 之间, 最大日降雨量达 199 mm。在持续降雨的条件下, 由于滑坡体是由碎石土和粘性土构成, 这使得土体堆积会较松散, 土体会更容易饱和。除此之外还会产生导致岩土体的抗剪强度参数  $c$  和  $\varphi$  降低的动水压力和静水压力, 从而引发滑坡的变形。

4) 库水位变化 雪花坪滑坡前缘高程 150 m, 后缘高程 333 m。三峡水库最高蓄水 175 m, 将浸泡滑体前缘; 汛期时水位又会降至 145 m, 从而暴露整个滑坡体。这种大幅度的蓄水位升降将造成滑坡的稳定性降低, 当三峡水库蓄水后, 渗水进入边坡时, 水库蓄水位会与滑坡体内部的地下水位形成一个水位高度差, 导致坡背压力的形成, 有利于滑坡的稳定; 当水库水位急剧下降时, 滑坡中不能及时排出地下水, 将降低滑坡的稳定性; 库水频繁升降, 使滑坡前缘长期遭受冲刷侵蚀, 容易形成前缘塌岸等局部变形, 周而复始, 导致有效临空面的形成, 减小了前缘的滑动阻力, 影响滑坡的整体稳定性。

5) 人类活动 滑坡下部有公路通过, 公路边坡改变了坡体原来的平衡状态, 一方面降低了抗滑阻力, 另一方面形成了高陡的露天地表, 这为滑坡埋下了隐患。坡体上居民种植等人类生产活动使滑坡土体更加松散, 利用降雨迅速入渗, 增加坡体重量, 同时减少坡体物理力学性质, 易引起滑坡变形。

### 2.2 成因与机制分析

雪花坪滑坡位于梅溪河右岸。如图 2 所示, 主要受降雨及库水位的联合作用。这种作用从机理上看主要表现在三个方面, 即降低了力学参数、浮力和动水压力引起的作用。降雨的渗入会降低岩土体力学性能从而软化滑带, 短时间内滑坡体内部的地下水未能及时排出, 则会在坡体内部形成动水压力, 引起内聚力  $C$ 、内摩擦角  $\varphi$  减小, 从而直接导致滑坡稳定性降低。又由于滑坡部分滑段位于库水位以下, 当库水入渗到坡体后, 滑坡在蓄水水位的部分会受

到水对滑坡体向上的浮力作用,这使得滑坡体在水下部分受到的重力减小。浮力作用于抗滑段时,滑坡的抗滑力会减小,滑坡稳定性降低;浮力作用于滑坡段,滑坡滑力减小,滑坡稳定性提高。

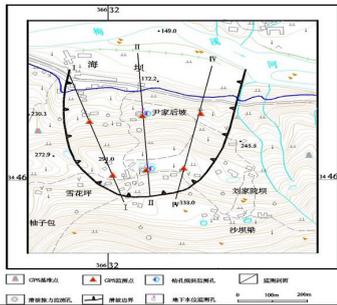


图 2 雪花坪滑坡工程地质平面图

### 3 滑坡三维变形破坏分析

#### 3.1 模型的建立

根据雪花坪滑坡的地质特点,选取沿梅溪河水流方向为 850 m,青干河垂直方向 710 m,模型底高程 60 m 为三维数值计算模型的范围,计算模型位置如图 2 所示。计算区域包括滑体、滑带和基岩。网格划分为 36639 个六面体单元,共 42 000 个节点。如图 3 所示。

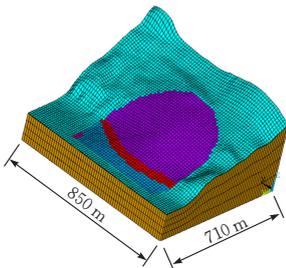


图 3 模型计算网格

#### 3.2 计算参数的确定

在实际现场的地质勘察报告提供的建议参数值基础上,并参考类比其它相似滑坡岩土体的物理力学性质参数值,综合确定了雪花坪滑坡的计算参数,具体见表 1。

表 1 雪花坪滑坡物理力学参数

部位	滑体	滑带	滑床
容重 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	23.0	19.7	25.0
弹性模量 $E / \text{MPa}$	16.0	10.0	15000.0
泊松比 $\mu$	0.22	0.35	0.22
粘聚力 $c / \text{MPa}$	26.0	16.0	1150.0
内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	25.0	13.0	30.0
孔隙率 $n$	0.54	0.22	0.16
饱和渗透系数 $k / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.0 \times 10^{-2}$	$1.5 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-6}$

#### 3.3 边界条件

运用饱和非稳定渗流和应力耦合理论,对雪花

坪滑坡进行了流固耦合分析。渗流边界条件和应力边界条件如图 4 所示,图中水位为坝前 175 m 所对应的滑坡实际水位。

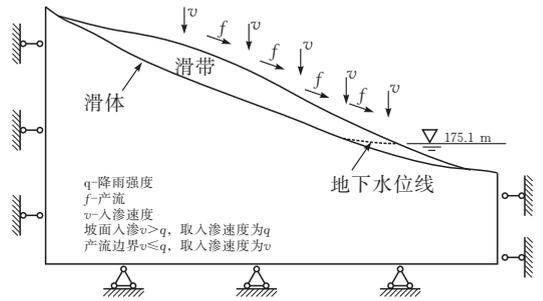


图 4 雪花坪滑坡边界条件示意图

#### 3.4 工况和荷载的组合确定

本次模拟库水位波动下滑坡的变形破坏所采用的计算工况和荷载组合如表 2 所示。

表 2 计算及物理模型试验工况及荷载组合

水库运行水位	工况编号	荷载组合内容
静止水位	1	自重+地表荷载+175 m 水位
	2	自重+地表荷载+水库蓄水位从 175.0 m 降至 145.0 m(下降速率 1.2 m/d)
水位降落	3	自重+地表荷载+水库蓄水位从 175 m 水位降至 145.0 m(下降速率 1.2 m/d)+50 年一遇暴雨

#### 3.5 计算分析

运用数值模拟软件 ABAQUS 模拟了雪花坪滑坡在三种工况下的变形破坏过程,得到了雪花坪滑坡位移场和应力场分布,获得其位移云图和应力云图。

3.5.1 工况 1 计算结果及分析 模拟工况 1(水库蓄水至坝前 175 m 水位)条件下得到其应力和位移分布如图 5~6 所示。

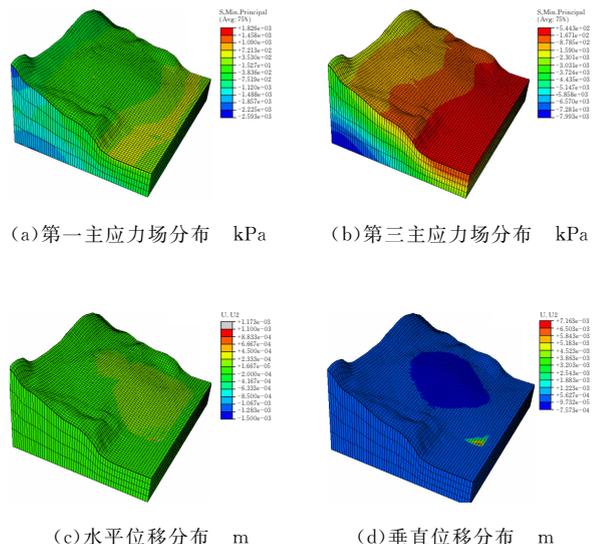
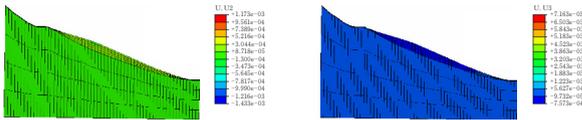


图 5 雪花坪滑坡三维模型工况 1 条件下计算结果分布图

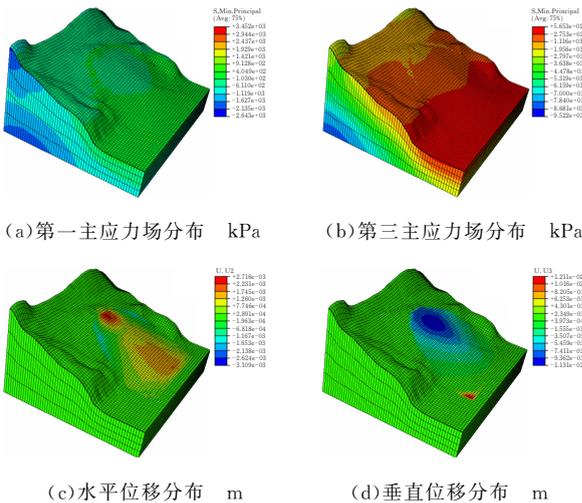


(a)水平位移分布 (b)垂直位移分布  
图6 雪花坪滑坡II-II'纵剖面处工况1条件下  
计算结果分布图 m

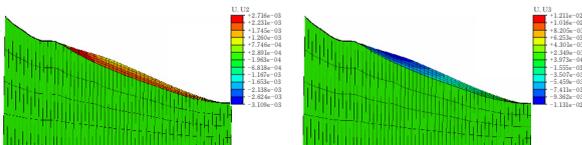
1)应力计算结果及分析 水库蓄水至175 m水位后拉应力(第一主应力)主要分布在滑体前缘和滑体下部,最大值为1826 kPa;压应力(第三主应力)主要分布在滑体中部和上部,其绝对值的最大值为7993 kPa。滑坡175 m水位以下区域的孔压受水位的直接影响。

2)位移计算结果及分析 整个滑体都发生极小的水平向前的位移,量值为0~0.001 m,最大位移值为0.001 m;滑体其他地方会发生极小的垂直向下的位移,最大值不到0.001 m,但滑体前缘偏右位置发生垂直向上的位移,最大值0.007 m。

3.5.2 工况2计算结果及分析 模拟工况2(175 m水位缓降到145 m)条件下得到其应力和位移分布如图7~8所示。



(a)第一主应力场分布 kPa (b)第三主应力场分布 kPa  
(c)水平位移分布 m (d)垂直位移分布 m  
图7 雪花坪滑坡三维模型工况2条件下  
计算结果分布图



(a)水平位移分布 (b)垂直位移分布  
图8 雪花坪滑坡II-II'纵剖面处工况2条件下  
计算结果分布图 m

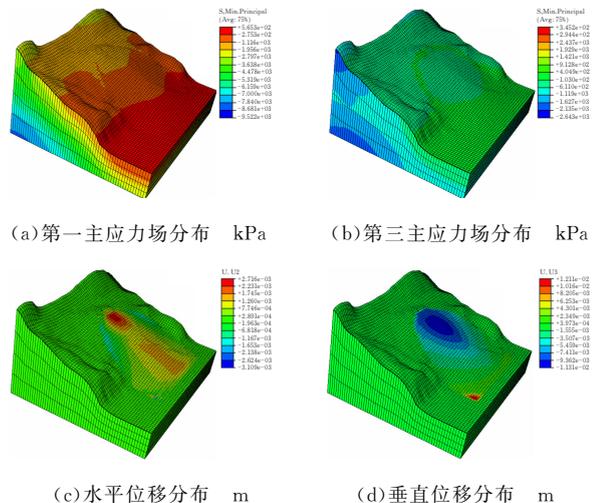
1)应力计算结果及分析 水库蓄水位从175 m缓慢下降到145 m时,会改变拉、压应力的分布,下部和前缘分布的拉应力(第一主应力)的最大值由1826 kPa增大到为3326 kPa,中部与上部分布的压应力(第三主应力)最大值的绝对值由7993 kPa增

大到为9169 kPa。应力场发生改变的重要原因是由于水库蓄水位从175 m缓慢降低至145 m时会改变其滑坡体内部的渗流场,并且通过渗流场与应力场的耦合作用使得应力场发生改变。随着水位降低了30 m,滑坡前半部分的水位随着下降,滑坡前缘的地下渗流场发生较大变化,滑坡前缘的孔隙水压力在库水波动范围内的分布发生了变化。

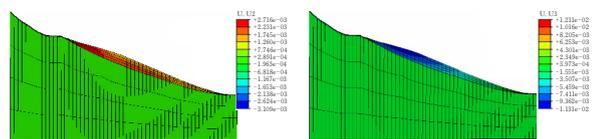
2)位移计算结果及分析 由图8可知发生较大范围水平位移的位置出现在滑体上部和中下部,量值为0~0.002 m,最大位移值为0.002 m;发生较大向下的垂直位移的位置出现在滑体中部与上部,量值为0~0.009 m,最大位移值0.009 m;滑体的前缘偏右位置发生较大垂直向上的位移,量值为0~0.009 m。

工况2所获得的水平和垂直位移大于工况1,这是因为水库蓄水位下降而引起滑坡体向下滑动,并且滑坡体在自身重力的作用下会发生下沉,从而导致滑坡体向下的垂直位移增大,同时滑坡体前缘进一步受到上部土体对其的挤压和连续的水库水位的冲蚀作用,产生较大向上的垂直位移。

3.5.3 工况3计算结果及分析 模拟工况3(175 m水位缓降到145 m+50年一遇降雨)条件下得到其应力和位移分布如图9~10所示:



(a)第一主应力场分布 kPa (b)第三主应力场分布 kPa  
(c)水平位移分布 m (d)垂直位移分布 m  
图9 雪花坪滑坡三维模型工况3条件下  
计算结果分布图



(a)水平位移分布 (b)垂直位移分布  
图10 雪花坪滑坡II-II'纵剖面处工况3条件下  
计算结果分布图 m

1)应力计算结果及分析 水库蓄水位在50年一遇降雨时从175 m缓降到145 m的情况下,拉、

压应力都会有所改变,拉应力分布范围仍主要集中在滑体前缘,最大值为 3452 kPa,比工况 2 略有增加;压应力(第三主应力)最大值由 7993 kPa 增加到 9522 kPa。随着库水位的下降,地下水位也下降但存在滞后性,是因为滑坡前缘的孔隙水压力的消失所消耗的时间;滑坡后缘地下水基本不受库水位变化影响,因为后半部分和库水位变化线有一定的距离。

2) 位移计算结果及分析 水平位移较工况 2 在范围和量值上均有所增加,量值为 0~0.003 m,最大位移值为 0.003 m,最大位移较工况 2 增加了 0.001 m;垂直位移也较工况 2 在范围和量值上有所增加,垂直向下的位移主要分布在滑体中上部,最大值由工况 2 的 0.009 m 增加到 0.012 m。垂直向上的位移主要分布在滑体前缘偏右位置,最大值由工况 2 的 0.009 m 增加到 0.011 m。

位移发生上述改变的原因是在库水下降和自重作用的同时,强降雨使滑体产生的各个方向垂直位移均有所增大。

### 3.6 滑坡的演化规律

雪花坪滑坡的变形与库水位下降和强降雨密切相关。在水库蓄水位下降阶段,滑坡的变形增加最为明显,变形范围主要分布在滑体中上部。在其他阶段内,需考虑水位降速和升速对滑坡稳定性的影响。水库蓄水位下降 30 m 时会改变其滑体内部的渗流场,并且通过渗流场与应力场的耦合作用使得应力场发生改变,从而造成坡前缘的孔隙水压力在库水波动范围内的分布发生了变化。

## 4 结论

结合实例采用三维变形破坏对雪花坪滑坡的变形机制及其动态发展规律进行了研究分析。通过对雪花坪滑坡在三种工况条件下的三维变形破坏分析,获得以下结论:

1) 根据三维变形破坏分析可知,在工况 3 条件下,雪花坪滑坡的变形破坏主要发生在滑坡中后部,滑坡中后部出现局部的拉剪和压剪破坏,但未发生整体破坏。其中滑坡中后部由于比较陡,变形破坏的范围比滑坡前缘要大,滑坡前缘坡度较缓,主要为局部压剪破坏。

2) 综合三种工况的数值计算分析结果,在工况 3 的条件下,库水位下降与强降雨的影响造成滑体内渗流场发生很大的变化,降雨入渗导致坡体内外水位差发生很大的改变,进而引起位移发生很大的变化;相较于其他 2 个工况,雪花坪滑坡在工况 3 的

条件下变形增量最大。因此,工况 3 为对雪花坪滑坡稳定性最不利工况。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 朱朋,卢书强,薛聪聪,等.库水位升降与降雨条件下滑坡的渗流及稳定性分析[J].长江科学院院报,2015,32(11):87-92.
- [2] 易武,孟召平,易庆林.三峡库区滑坡预测理论与方法(科学版)[J].岩土力学,2011,32(7):2145.
- [3] 黄润秋.20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制[J].岩石力学与工程学报,2007(3):433-454.
- [4] 许强,汤明高,徐开祥,等.滑坡时空演化规律及预警预报研究[J].岩石力学与工程学报,2008(6):1104-1112.
- [5] FREDLUND, RAHARDJO. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: Wiley and Sons Inc,1993.
- [6] FOX J A. An introduction to engineering fluid mechanics[M]. London: Macmillan,1977.
- [7] SHUREN WU, LING SHI, REIJIANG WANG, et al. Zonation of the landslide hazards in the fore-reservoir region of the Three Gorges Project on the Yangtze River[J]. Engineering Geology,2001,59(1-2).
- [8] 林琰,邓茂林,李卓骏.库水升降作用下三峡库区三门洞滑坡变形响应特征[J].人民长江,2020,51(5):125-130.
- [9] 梁学战,赵先涛,向杰,等.库水位升降作用下土质岸坡变形特征实验研究[J].土木建筑与环境工程,2014,36(1):92-100.
- [10] 明成涛,肖诗荣,宋桂林,等.三峡库区曾家棚滑坡变形破坏影响因素分析[J].人民长江,2013,44(24):30-34.
- [11] 刘艺梁,江南,易庆林,等.库水位涨落条件下谭家湾滑坡稳定性演化分析[J].水力发电,2017,43(7):26-29+36.
- [12] 陆世轩,肖诗荣,周俊,等.库水升降速率对老蛇窝滑坡稳定性影响分析[J].人民长江,2017,48(8):38-43.
- [13] 曾亚武,田伟明.边坡稳定性分析的有限元法与极限平衡法的结合[J].岩石力学与工程学报,2005(S2):5355-5359.
- [14] 陈祖煜,弥宏亮,汪小刚.边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J].岩土工程学报,2001(5):525-529.
- [15] 冯树仁,丰定祥,葛修润,等.边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J].岩土工程学报,1999(6):657-661.
- [16] 郑晓晶,殷坤龙.基于非饱和渗流的水库库岸滑坡稳定性计算[J].水文地质工程地质,2007(2):29-32.
- [17] 徐平,井卫卫.非饱和渗流作用下库岸滑坡体稳定性的可靠度分析[J].路基工程,2015(1):119-122.