

水位变动下四种常见滑坡体渗透稳定性研究

张珂

上海勘测设计研究院有限公司

DOI:10.12238/hwr.v6i1.4182

[摘要] 目前对于库水位变动条件下不同渗透系数对四种不同滑面形态的滑坡体渗透稳定性的影响研究多由资料分析于经验总结得来,较少通过数值计算手段进行分析。通过Geo-slope软件建立常见的四种滑面形态,对骤升及骤降工况下不同渗透系数的四种滑面形态滑坡体进行有限元分析,得到浸润线变化曲线,孔压以及安全系数变化规律。

[关键词] 滑坡体; 滑面形态; 渗透稳定; 库水位变动; Geo-slope

中图分类号: TU432 **文献标识码:** A

Research on the Seepage Stability of Four Common Landslide Bodies under the Fluctuation of Water Level

Ke Zhang

Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd

[Abstract] At present the research on the influence of different permeability coefficients on the permeability stability of landslide body with four different sliding surface forms under reservoir water level fluctuation conditions is mostly based on data analysis and experience summary, but less analysis of numerical calculation methods. Four common sliding surface forms are established through Geo-slope software, and the finite element analysis of the landslide body with four sliding surfaces forms under different permeability coefficient of sudden rise and sudden drop conditions is carried out, then the variation curve of the seepage line, the pore pressure and the change law of the safety coefficient are obtained.

[Key words] landslide body; morphology of slip surface; permeability stability; water level change of reservoir; Geo-slope

引言

滑坡是目前我国发生最频繁的地质灾害^[1,2],滑坡体的失稳破坏形式多样,影响因素繁多,三峡库区在2003年-2015年期间发生多次滑坡事故,经统计^[3]其中发生显著变形或失稳的463处涉水老滑坡的资料,根据其滑动面位置及形态、滑坡的变形机制及成因模式,总结出4种典型的滑面形态(图1):弧线形、靠椅形、折线形及直线形。事实上,在这些滑面数量中,弧形滑面发生频率最高,折线形滑动面发生频率最小。陆玉珑^[4]研究了四种典型滑面对滑坡稳定性影响的差异性;钱灵杰^[5]对滑坡变形与滑面形态的相关性进行分析,宏观上说明不同滑面形态在库区运行期间的渗流特性变化,

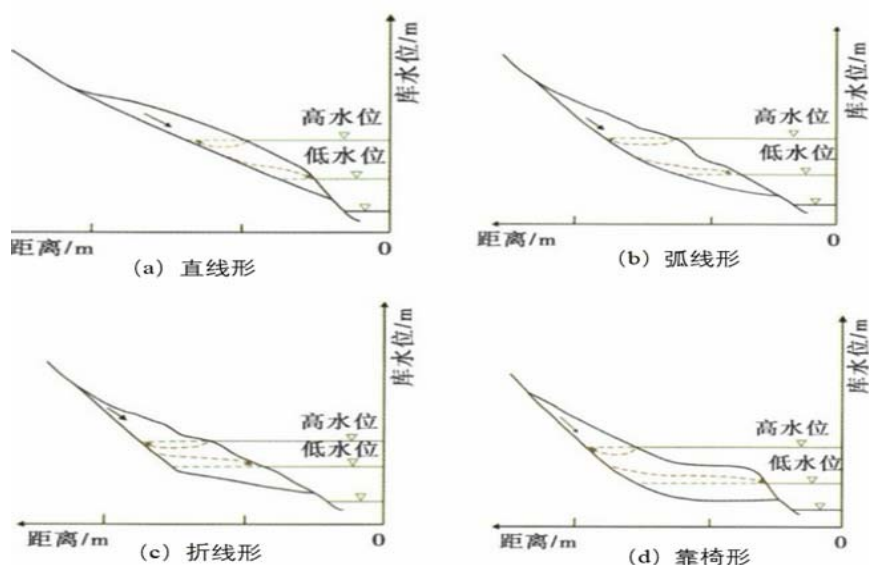


图1 不同滑面形态^[4]

但目前这些研究仅通过资料分析、模型试验及工程经验,很少通过数值计算方面来具体分析探究其渗流场变化规律。

针对以往研究的不足,本文主要探究以下两点内容:(1)研究四种典型滑面类型对库水位升降的敏感性;(2)不同滑面形态库水位升降速率与土体渗透系数的关系对滑坡体稳定性影响,探究浮托减重型与动水压力型造成滑坡体失稳的作用机制。研究结果为充分认识库水变动下不同滑面形态的渗流特性以及滑坡灾害的防治提供了一定的参考。

1 水位变动下边坡稳定性分析原理

1.1 饱和-非饱和理论

依据达西定律建立非饱和渗流的控制方程形式如下^[7]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} [k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3} k_r(h_c)] + Q = [C(h_c) + \frac{\theta}{n} S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

式中, k_{ij} 为饱和渗透张量; k_r 为相对透水性; h_c 为压力水头; Q 为源汇项; $C(h_c)$ 为容水度; θ 为压力水头相关函数; n 为土体孔隙率; S_s 为单位贮水量。

2 有限元计算

2.1 计算模型

计算模型以三峡库区卧沙溪滑坡为基础,分别建立直线形、弧线形、靠椅形、折线形四种典型滑坡体模型,四种滑面坡体的阻滑段依次增大。水位变动区间为滑坡体175m~145m。四种滑面的边坡典型剖面如图2所示。

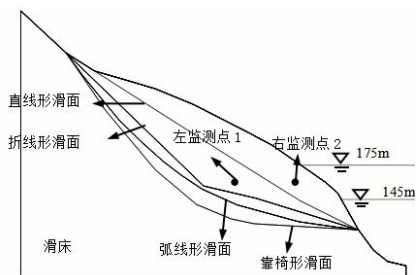


图2 不同滑面滑坡体典型剖面图

2.2 边界条件

库水位变动范围在145m~175m之间,

— 渗透系数 1.9e-3m/d — 渗透系数 0.0075m/d — 渗透系数 0.03m/d — 渗透系数 0.11m/d
 — 渗透系数 0.46m/d — 渗透系数 1.84m/d — 渗透系数 7.38m/d — 渗透系数 29.5m/d

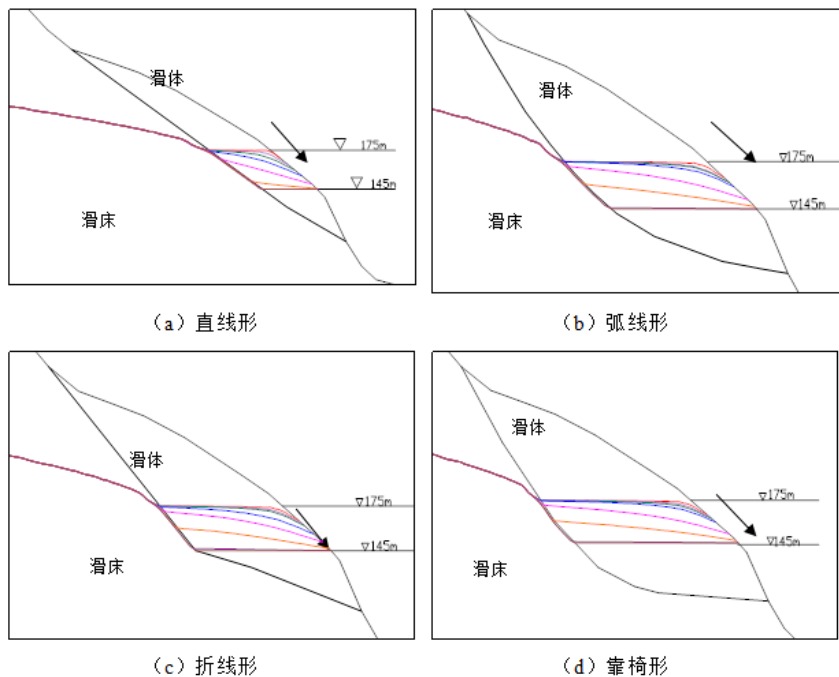


图3 工况1四种滑面60日不同渗透系数浸润线数浸润线

— 渗透系数 1.9e-3m/d — 渗透系数 0.0075m/d — 渗透系数 0.03m/d — 渗透系数 0.11m/d
 — 渗透系数 0.46m/d — 渗透系数 1.84m/d — 渗透系数 7.38m/d — 渗透系数 29.5m/d

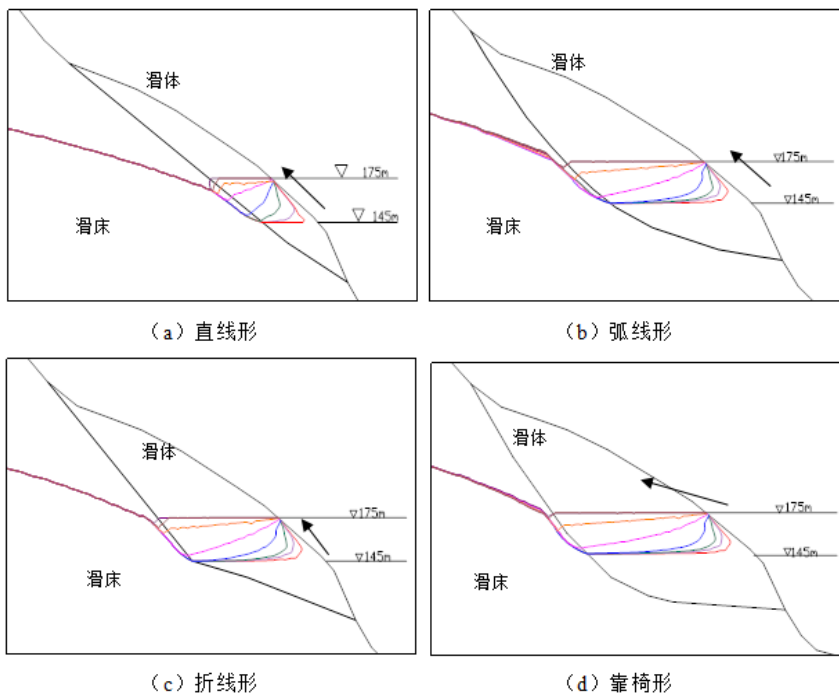


图4 工况2四种滑面60日不同渗透系数浸润线

图2中,斜坡前缘GE段分别设置稳态分析中水头边界以及瞬态分析中流量边界,IB设置为边坡后缘水头,HFE为四个

不同的滑面,AB和BC段设置不透水边界。

2.3 参数选取与计算工况选取

通过砂土土水特征曲线与饱和渗透

系数进行非饱和和渗透系数耦合^[7], 分别设置 $K=Am/d$ [$A=2.53e-6$ (黏土)、0.03、0.11、0.46、1.02 (粉质黏土)、1.84、7.38、29.5 (砂土)] 的8种孔隙介质, 为方便叙述, 分别记为 a^h , 其他力学参数一致。

将库水位升降速率设为1.0m/d, 设置两种工况, 工况1: 库水位骤升145m到175m; 工况2: 库水位骤降175m到145m。

3 计算结果分析

3.1 浸润线变化规律

3.1.1 工况1

考虑库水位以1m/d的速率快速消落, 四种滑面形态在滑体材料渗透系数不同的情况下, 水位刚将至145m后第60日的滑坡体内的浸润线变化如图3。

由下图可看出, 渗透系数与库水位骤降速率之间的关系是影响地下水水位的重要因素之一。骤降工况下, 当渗透系数 < 库水位骤降速率时, 即当滑坡体的渗透能力较小时, 四种滑坡体地下水水位线均表现为上凸趋势, 动水压力指向坡体外侧, 此时滑体内与滑体外存在水头差, 滑坡渗透性呈现出滞后效应, 在库水位回落过程中, 坡体地下水水位没有立即下降, 故浸润线为上凸曲线; 当渗透系数逐渐增大到大于库水骤降速率时, 滑体透水能力逐渐增强, 持水能力下降, 动水压力特征明显, 地下水水位线逐渐表现为下凹趋势, 且跟随滑面形态出现拐点, 弯折角度增大, 滑体内外的水头差几乎为0, 渗透特性表现为同步性。但当渗透系数增大一定程度后, 地下水水位变化趋势不再明显。

3.1.2 工况2

库水位以1m/d的速率由145m降至175m, 四种滑面形态在不同渗透系数下, 水位升至145m后第60日的滑坡体内的浸润线变化如图4。

由下图可以看出, 当库水位以1m/d的速率上升时, 坡体内的地下水水位线形态随渗透系数的增大而变化。当滑体材料渗透系数 < 库水上升速率时, 滑体地下水水位变化呈下凹趋势, 随渗透系数增大, 曲线曲率变小, 坡体内外水头差逐渐减小, 这同样是因坡体渗透能力较小形

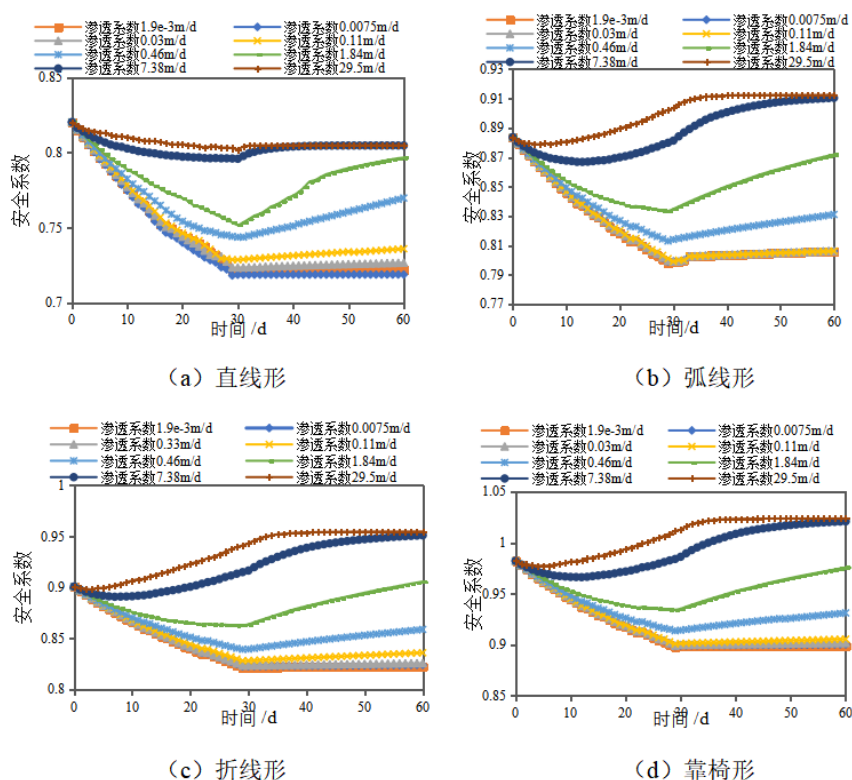


图5 骤降工况下安全系数变化

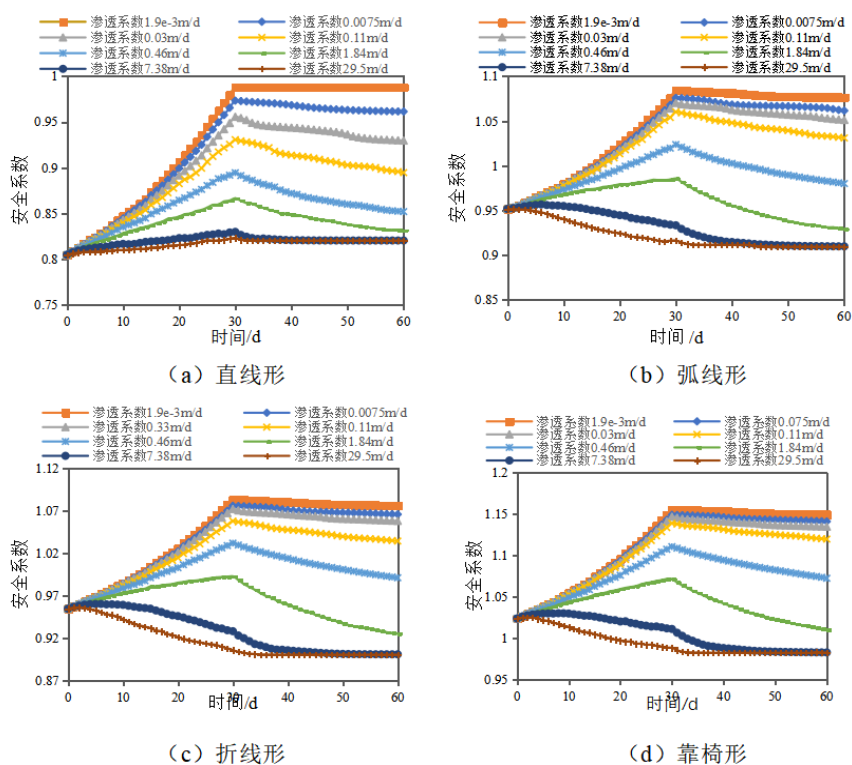


图6 骤升工况下安全系数变化

成, 库水位迅速上升, 但滑体内水位爬升较慢, 其渗透性呈现滞后性, 同时随渗透系数逐渐增大, 可以看到地下水水位曲线

率逐渐减小, 水头差逐渐缩减; 当渗透系数 > 库水上升速率时, 浸润线形态变为上凸趋势, 其曲线弯曲角度增大, 同样跟随

滑面形态出现拐点,末端与水位线持平,坡体渗透性呈现同步性,且当渗透系数增大到29.5m/d时,坡体内浸润线趋势几乎不变。

3.2安全系数分析

3.2.1工况1

将库水位以1m/d条件下四种类型滑面坡体在不同渗透系数下的安全系数变化规律绘制如图5,规律如下:

(1)初始时刻,靠椅形、折线形、弧线形与直线形安全系数逐渐减小,说明在同样的边坡中,直线形滑面形式的滑坡由于阻滑段体积太小而最易发生,稳定性最差,靠椅形滑面安全系数最大;

(2)当库水位骤降速率>滑体渗透系数时,在水位迅速消落过程中,30日时安全系数达到最小,靠椅形、折线形、弧线形与直线形四种滑面的最小安全系数相应依次减小;

(3)当库水位骤降速率<滑体渗透系数时,当两者相差不大,渗透系数为1.84m/d时,则四种类型滑面的坡体安全系数减小。当两者相差较大,渗透系数为7.38、29.5m/d时,对于直线形滑面,平直的滑面削弱了浮托减重效应,在稳定性下降后又逐渐增大,但幅度都较小,变化不明显,最终安全系数趋于不变;对于弧线形、折线形和靠椅形滑面,因滑面形态使坡体抗滑段体积增大,因此抗滑力也随之增加,稳定性在初期较短时间内浮托效应下减小后逐渐增大,最终安全系数趋于不变。

3.2.2工况2

将库水位以1m/d骤升情况下四种类型滑面坡体在不同渗透系数下的安全系数变化规律绘制如图6,规律如下:

(1)初始时刻,折线形、靠椅形、弧线形及直线形安全系数依次减小,说明库水位骤升工况下折线形滑面稳定性较高,直线形滑面稳定性最差。

(2)当库水位骤升速率>滑体渗透系数时,即 $k=1.9e-3$ 、0.0075、0.33、0.11、0.46m/d。在水位迅速抬升至175m过程中,产生指向滑体内侧的渗透压力,此时地下水的内渗压力影响较大,因此尽管存在浮托减重效应,但浮托效应特征不明显,四种类型滑面的坡体稳定性均提高,靠椅形、折线形、弧线形、直线形的最大安全系数依次减小。同时渗透系数越接近库水位抬升速率,浮托效应增大,安全系数增大的幅度明显减弱。库水位稳定后,直线形滑面的坡体安全系数几乎不变,弧线形、折线形、靠椅形三种滑面的坡体安全系数均逐渐降低。

(3)当库水位骤升速率<滑体渗透系数时,即 $k=1.84$ 、7.38、29.5m/d。随着渗透系数增大,在水库蓄水过程中,库水向滑体内渗水速度加快,地下水位更易回升,渗透曲线下凹逐渐不明显,此时滑体内浮托减重效应影响更大,因此坡体稳定性开始出现下降趋势。与库水位骤升速率渗透系数1.84m/d较为接近时,四个滑面安全系数依旧呈小幅上升趋势,说明此时动水压力效应产生的影响依旧大于浮托减重效应,但随着渗透系数进一步增大, k 为7.38、29.5m/d时,动水压力效应减弱,浮托减重作用增大,而弧线形、折线形以及靠椅形滑面因抗滑段体积的浮托减重影响,稳定性呈下降趋势,其中靠椅形、折线形、弧线形最小安全系数逐渐减小,但折线形下降幅度最大,对于直线形滑面因其抗滑段体积较小,浮托减重效应特征不明显,因此安全系数依旧呈小幅度增大趋势。在库水位稳定后,四种滑面的坡体稳定性趋于不变。

4 结论

通过数值计算探究不同渗透系数及不同滑面形态对坡体渗流特性及稳定性的影响,主要结论如下:

(1)在库水位升降速率一致的情况下,若滑体内渗透系数相差较大,会引起动水压力和浮托减重两种效应的滑坡失稳形式,在两者共同作用下会对地下水位变化及稳定性产生完全相反的作用。

(2)在同一工况下,四种滑面形态中,库水位变动对直线形滑面的影响比较直接,因此直线形滑面稳定性最低,靠椅形滑面安全系数则最高。

(3)靠椅形滑面因阻滑段体积较大因此在库水位骤升时所受的浮托减重效应比骤降时更为明显,安全系数变化影响较大,直线形在库水位骤降时所受的动水压力效应比骤升时更为明显,弧线形与折线形安全系数变化在骤升与骤降工况下受到的影响相近。

[参考文献]

[1]李媛,孟晖,董颖,等.中国地质灾害类型及其特征——基于全国县市地质灾害调查成果分析[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(2):29-34.

[2]黄晓维.中国致命性滑坡和黄土高原滑坡的灾害与风险评价[D].兰州大学,2019.

[3]李松林,许强,汤明高,等.库水位升降作用下不同滑面形态老滑坡响应规律[J].工程地质学报,2017,25(3):841-852.

[4]陆玉珑.试论滑坡滑动面及其工程特征[J].路基工程,1993,(01):12-17.

[5]钱灵杰.三峡水库滑坡变形响应规律及机理研究[D].成都:成都理工大学,2016.

[6]Kwok S Y F. Stochastic analysis of coupled surface and subsurface flow model in steep slopes for slope stability analysis[D].Hong Kong University of Science and Technology, 2003.

[7]杨帆.提高三峡水库日降幅对已治理涉水滑坡的影响研究[D].成都理工大学,2015.