

鲸鱼沟水库蓄水对泥岩-黄土岸坡稳定性的影响评价

曹博^{1,2}, 鲁博^{3*}, 于前伟³, 葛书磊^{1,2}, 秦二乐^{1,2}, 李同录^{1,2}, 李萍^{1,2}

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054; 2. 黄土高原水循环与地质环境教育部野外科学观测研究站, 甘肃正宁 745339; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西西安 710065)

摘要: 库水位上升对库岸边坡的影响程度与水敏性地层位置、水位、滑面倾角等多个因素有关。为了研究白鹿原鲸鱼沟水库蓄水过程中库水位升高对边坡稳定性的影响, 依据水库区的边坡演化、地层结构、库水位与地层的因素, 对库区内的51个边坡剖面进行统计和分类, 可将鲸鱼沟内的边坡分为第三系砂泥岩边坡、黄土-砂泥岩陡坡、黄土-砂泥岩陡坡和残坡积土-砂泥岩缓坡等四种类型, 并选取4个典型的边坡类型建立起地质模型, 采用 Morgenstern-Price 法计算了库水位升高过程中不同边坡类型的稳定系数。结果表明, 任何库水位条件下, 鲸鱼沟内的第三系砂泥岩陡坡、黄土-砂泥岩陡坡和残坡积土-砂泥岩缓坡的稳定系数均高于水利水电工程边坡的设计安全系数。黄土-砂泥岩缓坡由于 Q_{2-3} 黄土披覆于整个坡面, 导致其稳定性差, 在库水位上升过程中, 稳定系数下降率大, 易形成滑坡和库区塌方, 经计算可知危险水位下黄土-砂泥岩缓坡滑移方量约占库区总滑移方量的13%。

关键词: 水库蓄水; 土质边坡; 稳定系数; 滑移方量; 鲸鱼沟

中图分类号: TV22

文献标识码: A

Evaluation of the Influence of Water Storage of Jingyugou Reservoir on the Stability of Mudstone Loess Bank Slope

CAO Bo^{1,2}, LU Bo^{3*}, YU Qianwei³, GE Shulei^{1,2}, QIN Erle^{1,2}, LI Tonglu^{1,2}, LI Ping^{1,2}

(1. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054;

2. Water Cycle and Geological Environment Observation and Research Station for the Chinese Loess Plateau, Ministry of Education, Zhengning, Gansu 745339;

3. Northwest Survey and Design Institute of China Power Construction Group, Xi'an, Shaanxi 710065)

Abstract: The influence degree of reservoir water level rise on reservoir bank slope is related to many factors, such as water sensitive stratum position, water level, sliding surface angle, etc. In order to study the influence of reservoir water level rising on slope stability during the impoundment process of Jingyugou reservoir in Bailuyuan, 51 slope profiles in the reservoir were counted and classified according to the slope evolution, stratum structure, and the relationship between reservoir water level and stratum. The slope in jingyugou can be divided into tertiary sandstone mudstone slope, loess sandy mudstone gentle slope, loess sandy mudstone steep slope and eluvial soil sandy mudstone gentle slope. Four typical slope types were selected to establish the geological model, and Morgenstern price method was used to calculate the stability coefficients of the slope types in the process of reservoir water level rising. The results show that the stability coefficient of the tertiary mudstone slope, loess sand mudstone steep slope, loess sandy mudstone steep slope and eluvial soil sandy mudstone gentle slope in whale ditch is higher than the design safety factor of water conservancy and Hydropower Engineering Slope under any reservoir water level conditions. Due to Q_{2-3} loess covering the whole slope, the stability of loess sandy mudstone

收稿日期: 2020-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41502286); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(300102260507)

作者简介: 曹博(1994-), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 从事黄土边坡稳定以及地质灾害方面的研究。

* 通讯作者: 鲁博(1986-), 男, 陕西榆林人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程勘察及地基基础设计方面的研究。

gentle slope is poor. In the process of reservoir water level rising, the decline rate of stability coefficient is large, which is easy to form landslide and reservoir collapse. The calculation shows that the sliding volume of loess sand mudstone gentle slope under dangerous water level accounts for about 13% of the total sliding volume in the reservoir area.

Key words: reservoir impoundment; soil slope; stability coefficient; sliding volume; Jingyugou

水库蓄水会导致库岸边坡岩土体强度降低,诱发滑坡和塌岸,造成直接破坏和淤积、涌浪等工程问题^[1-3]。水库在蓄水过程中,库水位的升降使得水库岸坡的水文地质条件发生动态变化,临水斜坡稳定性也随之改变,一旦低于边坡的临界状态,则会发生失稳^[4-6]。水的浸没产生的浮托力是库区岸坡变形、失稳的主要因素;同时库水位的升降在斜坡内形成水力梯度,产生的渗透力使边坡稳定性进一步恶化^[7-8]。一些学者利用强度折减法分析了水位变化对边坡稳定系数的影响,认为边坡稳定系数随着库水位的增加有先变小后增大的趋势,并不是水位越高,边坡稳定性越差^[9-10]。郑颖人等^[11-16]分析认为边坡最危险的水位大约位于坡体 1/3~1/4 处,表明在涉水边坡稳定分析中有一定的危险水位。对三峡库区滑坡的调查发现,自 2003 年三峡水库蓄水开始,许多涉水滑坡一直在变形,至今还未停止变形,可见水库蓄水对边坡具有长期恶化效应^[17]。因此研究涉水水库边坡的稳定性对水库工程具有重要的实际意义。

目前,对于涉水库区边坡研究大多以三峡岩质水库边坡(滑坡)为主要研究对象,黄土地区的水库边坡研究较少^[18-21]。我国在黄土地区修建了较多类型的水库,蓄水水位的上升对库岸边坡稳定性会造成严重影响,出现滑坡、塌岸等问题^[22-26]。水库作为区域性工程,涉水边坡的类型较多,但对黄土地区的水库边坡仅有个案研究,缺乏系统性、区域性的整体研究,因此针对性的研究只能解决个案问题,着实难以解决水库区域产生的问题^[27-28]。因此,依据水库区的边坡演化、地层结构、库水位与地层的关系等因素,对一个水库的边坡进行分类,按边坡类型进行边坡稳定性分析,是非常有必要的。

本文以新建陕西省引汉济渭二期工程为基础,其水库建设加高了鲸鱼沟内原有水库的坝高,增大了原水库的库容量,导致第三系砂泥岩上披覆的黄土会被淹没,易于诱发滑坡,对水库造成一定危害。新建水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响,是二期工程特别关注的地质问题。本文在现场调查的基础上,针对鲸鱼沟的地层结构和边坡

演化情况,对引汉济渭鲸鱼沟调蓄工程 51 个边坡进行统计与分类,建立起边坡工程地质模型,计算了水库蓄水过程中不同类型边坡的稳定系数,预测了不利水位下危险岸坡类型的滑动方量,对该水库工程的前期设计和后期运营管理具有一定的借鉴和参考价值。

1 鲸鱼沟水库工程地质条件

1.1 水库区地质特征

鲸鱼沟水库位于渭河盆地中部的黄土台塬白鹿塬上。白鹿塬为渭河盆地中骊山隆起断块西南侧的一个次级断块,与骊山断块之间以灞河断裂为界,与秦岭山地以华山山前断裂西段为界,与少陵塬之间以泾河为界,与渭河阶地间以临潼-长安断裂为界。白鹿塬既是一个构造地块,也是一个独立的台原地貌单元,如图 1 所示。

白鹿塬长 25 km,宽 6~9 km,面积 263 km²,是西安境内最大的黄土台塬。塬面自东南向西北倾斜,海拔 680~780 m,东北侧高出灞河 240~320 m,西南侧高出泾河 150~200 m,塬面高亢,与灞、泾河谷高差悬殊。塬内鲸鱼沟顺塬面倾斜方向发育切割,将塬面分割为南北两部分,左侧南塬称炮里塬,塬面平缓;右侧北塬称狄寨塬,起伏较大。

1.2 水库区地层岩性特征

白鹿塬是一个相对独立的构造地块,形成了一套以新生代地层河湖相砂泥岩和风积红粘土、黄土为特征的独特的地层系统。邻近与灞河、泾河和渭河冲洪积地层及秦岭基岩地层截然分界。基座是由第三系渐新统至上新统地层构成,上部覆盖巨厚的第四系风积黄土,如图 2 所示。

白鹿塬第三系至第四系地层出露完整,据前人研究,将第四系以黄土为主,自上而下分为全新统、上更新统、中更新统和下更新统地层;第三系以砂泥岩为主,自上而下分为上上新统蓝田组、下上新统灞河组、中新统寇家村组和渐新统-始新统白鹿塬组。白鹿塬区域的地层自北东向西南缓倾,在工程区的鲸鱼沟两侧只出露第四系黄土到下上新统灞河组的地层,寇家村组和白鹿塬组地层未出露。因此鲸

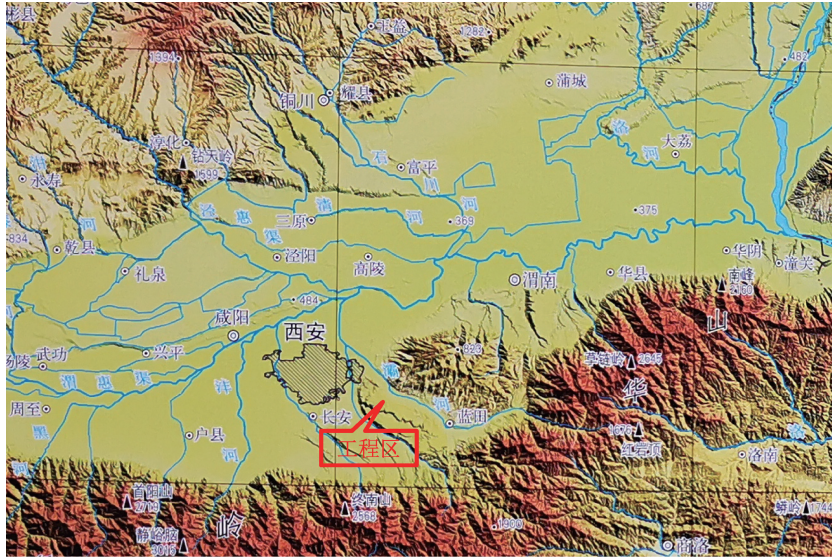


图 1 鲸鱼沟水库大坝位置

Fig. 1 Dam Site of Jingyugou reservoir

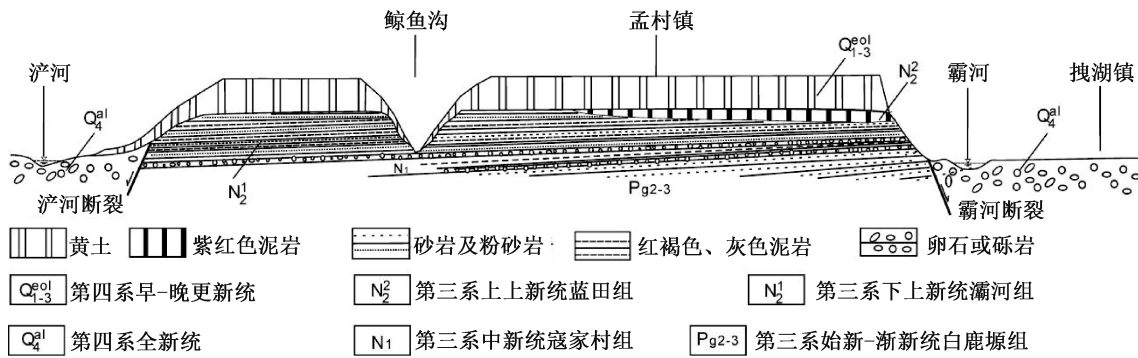


图 2 白鹿塬地质剖面图

Fig. 2 A Geological section of Bailuyuan

鱼沟库区主要为第四系黄土和下上新统灞河组的地层。此外在第三系砂泥岩表层有少量残坡积粉质黏土,在现有水库和沟谷底部有现代淤积的淤泥质土,库区还发育多个黄土滑坡。

白鹿源自第四纪初就开始抬升,在第四纪晚期,塬中间的鲸鱼沟溯源侵蚀逐步形成。因此第三系和中更新世早期的黄土在库区为水平层状分布,中更新世末期至晚更新世的黄土则披覆在沟两侧的较缓斜坡上,在陡边坡上难以存留。

鲸鱼沟内已修建了红旗水库、车村水库、杨家沟水库等,引汉济渭鲸鱼沟工程将在红旗水库与老车村水库之间修建新车村水库,设计库区的正常水位高程为 517.9 m,最高水位 550.0 m,水位较原水库水位抬升了近 60.0 m。

2 库区边坡结构特征

为了对鲸鱼沟水库塌岸和岸坡稳定性进行分

析,勘察期间对两岸岸坡进行了详细调查,鲸鱼沟内涉水边坡高在 55~110 m 之间,坡度在 30°~40° 之间,根据涉水部分边坡地质结构将其分为四种类型,即第三系砂泥岩陡坡、黄土-砂泥岩缓坡、黄土-砂泥岩陡坡和残坡积土-砂泥岩陡坡,各类边坡的特征见表 1。

由图 2 可见,白鹿塬的黄土和第三系砂泥岩为平行不整合接触,产状近水平。第四纪晚期,由于鲸鱼沟溯源侵蚀,沟谷下切,沿沟两岸的黄土披覆在沟两侧的第三系砂泥岩和更老沉积的黄土之上,披覆黄土的产状和坡面平行。根据现场调查,披覆黄土主要为 L₁-S₂ 地层,即晚更新世黄土和中更新世的顶部。随着后期进一步侵蚀,这种披覆结构的黄土沟坡进一步改造,形成了不同地质结构的斜坡。其中下部较陡的黄土-砂泥岩段斜坡,披覆黄土被侵蚀,砂泥岩出露,形成了上述第一种类型,即第三系砂泥岩陡坡,典型斜坡如图 3 所示,坝址附近最高水位线以下出露第三系灞河

表 1 鲸鱼沟边坡特征表

Tab. 1 The characteristics of the slopes in Jingyugou

| 边坡类型 | 坡底高程/m | 砂泥岩顶面高程/m | 当前水位/m | 地层结构 |
|------------|---------|-----------|--------|--|
| 第三系砂泥岩陡坡 | 491~495 | 535~550 | 490 | 坡顶上覆 Q_{3-2} 披覆于水位线以上斜坡,第三系砂泥岩出露斜坡下部,淹没砂泥岩和 Q_1 黄土底部 |
| 黄土-砂泥岩缓坡 | 492~496 | 540~550 | 485 | Q_3 及 Q_2 上部黄土顺坡披覆,斜坡上无砂泥岩出露,淹没披覆 Q_{3-2} 及 Q_1 黄土底部 |
| 黄土-砂泥岩陡坡 | 520~523 | 550~560 | 515 | Q_3 及 Q_2 顶部黄土顺坡披覆,斜坡上无砂泥岩出露,披覆 Q_{3-2} 黄土被淹没 |
| 残坡积土-砂泥岩缓坡 | 537~540 | 560~562 | 535 | Q_3 及 Q_2 上部黄土披覆在水位线以上斜坡,水位线以下为残坡积土覆盖,斜坡上无砂泥岩出露,残坡积土被淹没 |

组砂泥岩,黄土在最高水位线以上出露,地层结构如图 4 所示。下部较缓的黄土-砂泥岩斜坡,上部黄土很少被侵蚀,保持了原有地层结构,黄土自坡顶披覆到沟底,该类边坡为上述第二种类型,即黄土-砂泥岩缓坡,典型斜坡如图 5 所示,上游右岸 L_1-S_2 黄土自坡顶披覆到坡底,其地层结构如图 6 所示。下部较陡的黄土-砂泥岩斜坡,由于位于冲沟堆积岸,侵蚀作用不强,黄土依然存留,自坡顶披覆到沟底,该类边坡为上述第三种类型,即黄土-砂泥岩陡坡,典型斜坡如图 7 所示,寿阳山墓园上游 L_1-S_2 自塬顶顺坡披覆到沟底,下部坡度较陡,其地层结构如图 8 所示。在鲸鱼沟两侧发育的许多大型冲沟两侧形成洼地,有一定汇水面积,地表侵蚀能力强,黄土被侵蚀,第三系砂泥岩被风化剥蚀,形成了一定厚度的残坡积土,该类边坡为上述第四种类型,即残坡积土-砂泥岩缓坡,典型斜坡如图 9 所示,现车村水库坝址下游砂泥岩段斜坡被残坡积粉质黏土覆盖,含砂岩、钙板层大块石和碎石,该类斜坡一般为洼地,地表植被主要为竹林,地层结构如图 10 所示。



图 3 第三系砂泥岩陡坡

Fig. 3 Tertiary sandstone and mudstone steep slope

3 边坡稳定性分析

3.1 边坡参数选取

经现场钻探采样及现场和室内试验,对鲸鱼

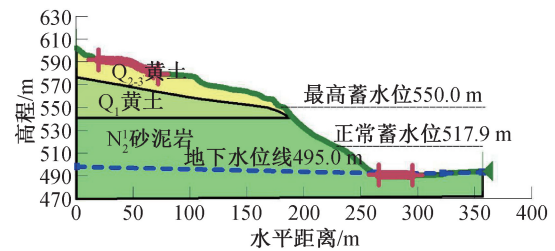


图 4 第三系砂泥岩陡坡

Fig. 4 Tertiary sand mudstone steep slope



图 5 黄土-砂泥岩缓坡

Fig. 5 Loess sand mudstone gentle slope

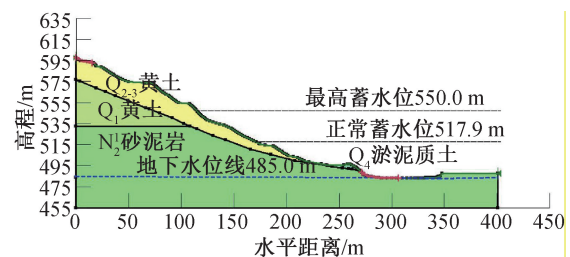


图 6 黄土-砂泥岩缓坡

Fig. 6 Loess sand mudstone gentle slope

沟区内的各层岩土的物理力学参数取值如表 2 所示。

本文借用 Geo-Slope 软件对鲸鱼沟内的边坡进行建模分析,采用 Morgenstern-Price 法计算稳定系数,由于此次水库蓄水时库水位快速上升,则不



图 7 黄土-砂泥岩陡坡

Fig. 7 Loess sand mudstone steep slope

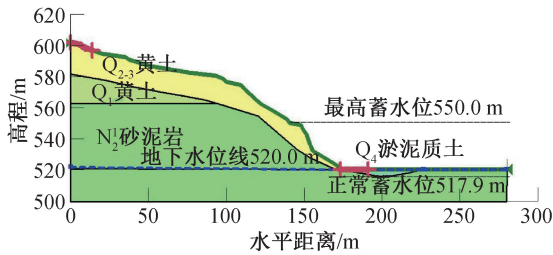


图 8 黄土-砂泥岩陡坡

Fig. 8 Loess sand mudstone steep slope



图 9 残坡积土-砂泥岩缓坡

Fig. 9 Eluvial soil sand mudstone gentle slope

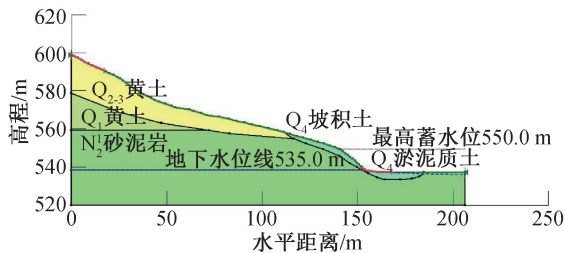


图 10 残坡积土-砂泥岩缓坡

Fig. 10 Eluvial soil sand mudstone gentle slope

考虑非饱和区的渗流场以及水荷载对其安全系数的影响。

3.2 边坡稳定性计算

库水位在现状水位和最高蓄水位之间变动,

表 2 边坡土体参数表

Tab. 2 Parameters of slope soil

| 土层 | 重度 $\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 有效粘聚 力/kPa | 有效摩擦 角/ $^\circ$ | 饱和 度/% |
|----------------|--|---------------|---------------------|------------|
| Q_4 残坡积土 | 18.4 | 30.0 | 25 | 92.7~100.0 |
| Q_{2-3} 黄土 | 18.9 | 35.0 | 25 | 36.2~97.0 |
| Q_1 黄土 | 19.4 | 60.0 | 20.0 | 84.1~100.0 |
| N_2 砂泥岩 | 20.0 | 100.0 | 30.0 | >80.0 |
| Q_{2-3} 饱和黄土 | 20.0 | 0.0 | 25 | >80.0 |

将边坡分为饱和区和非饱和区,据表 2 知, Q_4 、 Q_1 以及 N_2 的地层饱和度都在 80% 以上,处于饱和或接近饱和状态,而仅披覆的 Q_{2-3} 土层的饱和度部分低于 40%,属于非饱和土,且 Q_2 的离石黄土和 Q_3 的 马兰黄土是高水敏性土,遇水粘聚力降低显著。因此,仅 Q_{2-3} 土层水位淹没部分取饱和土抗剪强度,未淹没部分取天然强度。其他土层都按表 2,取了天然含水率下的强度参数。高边坡设 10.0 m 水位为上升间隔,低边坡设 5.0 m 水位线为上升间隔计算稳定系数,建立水位逐步上升的工况,将 4 类典型边坡库水位变动与边坡稳定系数的变化关系绘制如图 11。

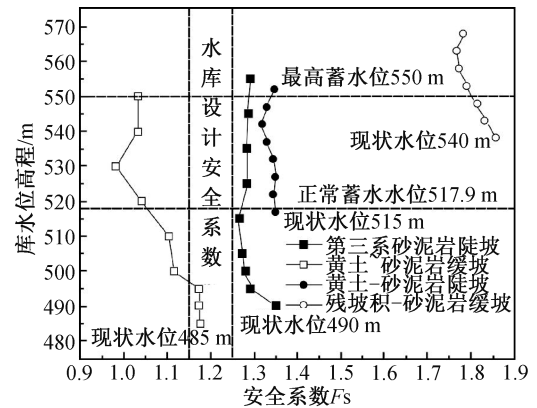


图 11 安全系数与水位上升的关系

Fig. 11 The relationship between factor of safety and water level rise

《水利水电工程边坡设计规范》^[29] 规定边坡的设计安全系数为 1.15~1.25,依据工程设计的安 全系数来评价所选四类典型边坡的稳定性。由图 11 可见,在现状水位情况下,鲸鱼沟内第三系砂泥 岩陡坡、黄土-砂泥岩缓坡、黄土-砂泥岩陡坡和残 坡积土-砂泥岩缓坡的稳定系数分别为 1.35、 1.17、1.35 和 1.86,根据四种类型边坡所在鲸鱼沟 的区域,认为在现状水位下,鲸鱼沟内从下游至上 游的边坡均处于稳定状态。

随着库水位的升高,边坡的稳定系数均有所

下降,在最高水位 550.0 m 时,第三系砂泥岩陡坡下降率为 5.2%;黄土-砂泥岩缓坡下降率为 11.0%;黄土-砂泥岩陡坡下降率为 1.5%;残坡积土-砂泥岩缓坡下降率为 4.3%。黄土-砂泥岩缓坡的稳定系数下降率最大,最低稳定系数仅有 1.04,小于工程边坡的设计安全系数,发生边坡失稳的可能性大。而其他三类边坡均高于设计安全系数,处于稳定状态。

边坡在水库蓄水过程中,都会存在一个“最不利水位”,其对应的边坡稳定系数最小^[30]。根据计算结果可知,最不利水位约在坡体的 2/3 位置处,黄土-砂泥岩陡坡和残坡积土-砂泥岩缓坡的稳定系数较现状水位下降率为 5%左右,而第三系砂泥岩陡坡和黄土-砂泥岩缓坡稳定系数下降率大于 5%,这也是由于高边坡所受的重力条件突出导致的。其中黄土-砂泥岩缓坡的稳定系数下降最多,下降率达 16.2%,对应边坡的稳定系数仅为 0.98,相比区内其他类型边坡最危险。黄土-砂泥岩缓坡边坡分布于鲸鱼沟下游,自塬顶至坡脚披覆大量的 Q_{2-3} 非饱和黄土层,强度对库水位的敏感性较高,本文对粘聚力折减为 0,是较为保守的估计。

4 滑移方量预测

新建车村水库的水位高程为 550.0 m,比当前水位高出 60.0 m,水位抬升以后,在最不利水位的情况下边坡更易失稳,产生的滑移方量也就越大。由上述结果可知,鲸鱼沟下游的黄土-砂泥岩缓坡在蓄水过程中是鲸鱼沟水库内一种较为危险的边坡类型,易于形成滑坡并产生库区淤积。库区内黄土-砂泥岩缓坡的延伸距离约 1.5 km 左右,可用 6 个剖面段估算的滑移方量,滑移方量的预测数据绘制如表 3。

表 3 滑移方量预测表

Tab. 3 Slip volume prediction table

| 剖面 /条 | 滑移区 面积/m ² | 相邻剖面 距离/m | 滑移方 量/m ³ | 总方量 /m ³ | 库区预测总 滑移方量/m ³ |
|----------|--------------------------|--------------|-------------------------|------------------------|------------------------------|
| 1 | 1 237.2 | | | | |
| 2 | 123.2 | 232.5 | 158 139.9 | | |
| 3 | 248.3 | 732.4 | 136 054.2 | | |
| 4 | 1 007.3 | 264.3 | 165 942.7 | 785 077.4 | 5 675 033.7 |
| 5 | 1 132.3 | 42.5 | 45 445.9 | | |
| 6 | 1 100.7 | 250.3 | 27 9494.7 | | |

以两条剖面的塌岸面积和剖面间距离估算剖面段之间的滑移方量,将所有剖面段的滑移方量

累加得到总的滑移方量。通过表 3 可知,黄土-砂泥岩缓坡段预测的总滑移方量为 785 077.4 m³。相比整个库区的滑移方量而言,仅占总体滑移方量的 13%。

5 结论

1)任何库水位条件下,鲸鱼沟内的第三系砂泥岩陡坡、黄土-砂泥岩陡坡和残坡积土-砂泥岩缓坡的稳定系数均高于水利水电工程边坡的设计安全系数。黄土-砂泥岩缓坡在库水位上升过程中,稳定性降低幅度大,容易形成滑坡和库区塌方。因此,在鲸鱼沟新车村水库建设中应特别关注最不利水位下黄土-砂泥岩缓坡的稳定性。

2)黄土-砂泥岩缓坡位于鲸鱼沟下游, Q_{2-3} 黄土披覆于整个坡面,在库区内延伸距离大约 1.5 km,不利水位下预测该类边坡的总滑移方量约为 785 077.4 m³,占库区总滑移方量的 13%。

参考文献:

- [1]冉文波.观音岩水库区主要工程地质问题评价[J].水利科技与经济,2015,21(12):60-62.
- [2]范大波.三峡库区香溪河段滑坡发育特征及水库蓄对岸坡稳定性的影响研究[D].成都:成都理工大学,2011.
- [3]陈思明,杨秀娟.黄土区水库库岸稳定分析[J].科技视界,2015(21):18+119.
- [4]中村浩之,王恭先.论水库滑坡[J].水土保持通报,1990(01):53-64.
- [5]王学武.三峡库区水位升降作用对库岸边坡影响研究[D].成都:成都理工大学,2005.
- [6]郑越馨,章光新,吴燕锋,等.尼尔基水库运行对嫩江水文情势的影响[J].水电能源科学,2020,38(07):20-23.
- [7]崔政权.三峡地区岸坡的变形、失稳动力源及诱发因素[C].中国岩石力学与工程学会.新世纪岩石力学与工程的开拓和发展——中国岩石力学与工程学会第六次学术大会论文集.中国岩石力学与工程学会:中国岩石力学与工程学会,2000:599-604.
- [8]刘晓光,黄勇.平原型水库水位变化对库区附近地下水影响的滞后性研究[J].水电能源科学,2020,38(04):84-86.
- [9]GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope Stability Analysis by Finite Elements [J]. Geotechnique, 1999, 49 (3): 387-403.
- [10]谢磊,王建国,颜丹青.强度折减法分析水位变化对边坡稳定性的影响[J].工程与建设,2009,23(05):693-695.

- [11] 郑颖人,时卫民,孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004(18):3203-3210.
- [12] 蔡德钧,黄帅,闫宏业,等. 地下水位上升对边坡稳定性影响的拟静力分析[J]. 铁道建筑, 2015(01):56-62.
- [13] 陈鹏. 水位升高对库岸边坡稳定性影响研究[J]. 黑龙江科技信息, 2017(12):221-222.
- [14] 仇文岗,王尉,高学成. 库区水位下降对库岸边坡稳定性的影响[J]. 武汉大学学报:工学版, 2019, 52(01):21-26.
- [15] 张祖莲,梁谏杰,黄英,等. 库岸边坡倾角及水位变化对红土型库岸稳定性影响研究[J]. 山地学报, 2019, 37(01):62-69.
- [16] 刘战峰,谷天峰,抗兴培. 地下水位上升对黄土斜坡稳定性的影响研究[J]. 地下水, 2017, 39(06):61-63+162.
- [17] 张巷生,卢书强,刘欣,等. 三峡水库蓄水条件下树坪滑坡稳定性影响分析[J]. 水利规划与设计, 2020(05):106-111.
- [18] 杨超. 库水位变化时边坡稳定性分析[D]. 西安:西安理工大学, 2009.
- [19] XIA M, REN G M, XIN L. Deformation and Mechanism of Landslide Influenced by the Effects of Reservoir Water and Rainfall, Three Gorges, China[J]. Natural Hazards, 2013, 68(2):467-482.
- [20] WEI S, CHEN Y, YANG B B, et al. Study on the Stability of Baijiabao Landslide due to the Three Gorgeswater Level Rise[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 488-489:470-474.
- [21] 谢林冲,王明清,周超. 基于降雨-库水联合作用下三门洞滑坡演化过程与机制[J]. 水电能源科学, 2020, 38(06):128-132.
- [22] 刘先华,徐静. 三峡库水位升降对某大型滑坡堆积体稳定性的影响分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2015, 51(01):34-36.
- [23] 濮声荣. 黄土地区水库岸坡变形[J]. 人民黄河, 1983(05):2-5.
- [24] 刘才华,陈从新,冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. 岩土力学, 2005(05):769-773.
- [25] 张扬. 汾河水库库岸边坡特征及稳定性分析[D]. 太原:太原理工大学, 2010.
- [26] 张永忠,张宏家,董国梁. 水位波动对黄土坡滑坡稳定性的影响分析[J]. 地下水, 2010, 32(01):138-140.
- [27] 宋丹青,王丰,梅明星,等. 水库蓄水对库岸边坡稳定性的影响[J]. 郑州大学学报:工学版, 2016, 37(01):60-64.
- [28] 熊茹雪,洪托,白杰. 基于渗流-应力耦合的库岸边坡稳定性分析——以祥云县清水河水库为例[J]. 地质灾害与环境保护, 2019, 30(04):59-66.
- [29] SL 386—2007, 水利水电工程边坡设计规范[S].
- [30] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004(03):76-80.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第62页)

- [10] 刘洋. 区间隧道穿越可液化土层的地震响应分析[D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [11] 段亚刚. 大范围地震液化条件下地下结构设计研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(10):49-53.
- [12] 安军海,陶连金,王焕杰,等. 可液化场地下盾构扩挖地铁车站结构地震破坏机制振动台试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(08):2018-2030.
- [13] 程学磊,崔春义,孙宗光. 饱和软土自由场地地震反应特性振动台试验[J]. 地震工程学报, 2019, 41(01):108-116.
- [14] 段志慧,窦远明,王建宁,等. 软土地基盾构隧道地震动力响应振动台模型试验研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(02):106-110.
- [15] 周军,伍伟林,胡瑞青. 可液化砂土地层盾构隧道地震响应研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(12):83-88.
- [16] 邹德高,孔宪京, LING H I, 等. 地震时饱和砂土地基中管线上浮机理及抗震措施试验研究[J]. 岩土工程学报, 2002(03):323-326.
- [17] 孔宪京,邹德高. 基于液化后变形分析方法的地下管线上浮反应研究[J]. 岩土工程学报, 2007(08):1199-1204.
- [18] 刘华北,宋二祥. 可液化土中地铁结构的地震响应[J]. 岩土力学, 2005(03):381-386+391.
- [19] 陈韧韧. 可液化地层中地下结构地震响应的基本规律与分析方法[D]. 北京:清华大学, 2018.
- [20] 王根龙,林玮,蔡晓光. 基于 Finn 本构模型的饱和砂土地震液化分析[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(03):178-184.
- [21] 彭加强,钟小春,王奇,等. 盾构隧道穿越液化地基上浮振动台试验分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S2):60-67.

(责任编辑 周雪梅)