

# 西北地区水库黄土库岸稳定分析

崔中兴, 柴军瑞, 仵彦卿

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 水库库岸失稳是水利水电工程中常见的边坡变形方式。由于水库蓄水, 水位上涨, 引起地下水位升高, 岩土体内的断层、裂隙和空隙中的水压力发生变化, 使岩土体的强度指标弱化, 将可能引起古滑坡体复活或促成新的不稳定滑体。初步探讨了对西北地区中小型水库的库岸稳定机理, 通过研究分析, 提出了库岸稳定预测的计算方法。

**关键词:** 库岸失稳机理; 滑坡; 崩塌; 稳定分析; 土体渗流; 抗剪强度; 有效应力

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2004)01-0026-03

中图分类号: TV621

## Stability Analysis of Loess Banks of Reservoirs in Northwestern China

CUI Zhong-xing, CAI Jun-rui, WU Yan-qing

(Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** Landslide and collapse are two basic types of bank destruction occurring in medium and small-sized reservoirs in the northwestern region. Based on numerous site investigations, the relationship between the bank stability and the characteristics of medium and small reservoirs is studied, and the destabilising mechanism of reservoir banks is analysed. Calculation methods for several types of evaluation of loess bank slope stability are proposed. It is shown that the results of the calculations agree with reality.

**Keywords:** destabilizing mechanism; landslide; collapse; stability analysis; seepage through soil mass; shearing strength; effective stress

### 1 西北地区水库库岸特点及失稳特征

西北地区有许多中小型水库, 这些水库中的大多数为黄土库岸, 有些基岩库岸在河谷较低部位也常分布有原河床堆积物。调查表明, 中小型水库有其独特的工作特点和区域分布特征, 与库岸稳定形成了特殊的耦合关系。

西北地区中小型水库多数位于山涧峡谷, 风速小、水库弯道多, 吹程较小, 故而风浪作用一般都较小。中小型水库的工作水位变化幅度不大, 一般工作水位较稳定, 尽管有时短期内放空, 但是引起塌岸的因素仍然不能发挥作用。在水库蓄水以后, 一般水库面积小, 水深较小, 所以多数水库浸泡的岸边范围仅仅相当于大山坡的局部坡脚部分, 对大型滑坡的触发作用也较小。但是, 因为水库蓄水而引发的中小型滑坡、崩塌和泥石流等作用, 对水库的安全运用和水土保持以及库岸附近人民生命财产的安全都构成了比较大的威胁。

西北地区中小型水库库岸失稳主要有滑坡和崩塌 2 种型式。滑坡的失稳型式与一般天然条件下的陆地滑坡相同, 而塌岸却自有特点(见图 1)。

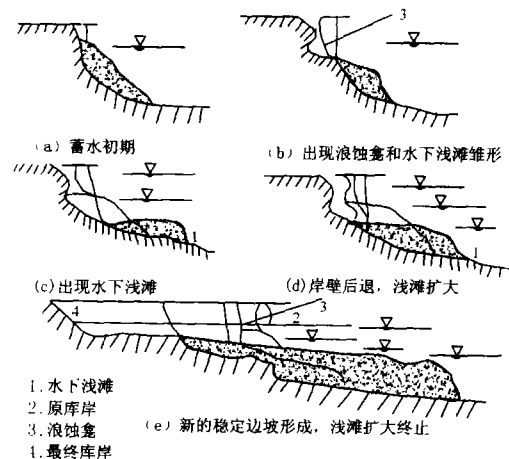


图 1 土质库岸塌岸演变过程示意图

收稿日期: 2003-03-23

资助项目: 国家自然科学基金资助项目(10172071); 陕西省教育厅专项(00JK218)

作者简介: 崔中兴(1954-), 男(汉族), 河南孟州市人, 在读博士研究生, 主要从事岩体力学, 土工合成材料应用等方面的研究工作。  
电话(029)82312688, E-mail: cuizhx@xaut.edu.cn.

## 2 渗流对土体抗剪强度的影响

库岸的稳定性主要取决于岩土体的强度和土体内部的控制结构面,而岩土体的强度又与岩土体的性质和结构构造有密切关系。地下水和库水对黄土强度的影响主要通过物理和化学作用降低土的黏聚力和摩擦角的大小,从而使原本处于稳定的岸坡失稳。所以水的渗流作用对土体的强度有着深刻影响。以下均假定土体中的滑动面呈水平方向。

(1) 库岸土体处于地下水位以上(或干燥状态)时(见图 2),土体的抗剪强度可表示为<sup>[1]</sup>:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c \quad (1)$$

式中:  $\varphi, c$ ——干燥状态土体的抗剪强度;  $\sigma'$ ——干燥状态土体材料的内摩擦角和凝聚力,为土体滑动面的法向总应力(此时等于法向有效应力)。

(2) 土体处于地下水位以下,但不发生渗流的情况时(即土体处于静水中,详见图 3),孔隙静水压力使有效应力减小,静水也使土体材料的内摩擦角和凝聚力减小。

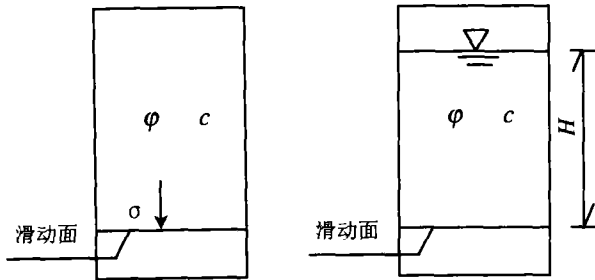


图 2 地下水位以上土体

图 3 静水中土体

针对图 3 的情况,土体的抗剪强度可以表示为:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - \gamma H) \operatorname{tg}(\varphi - \Delta\varphi) + (c - \Delta c) \quad (2)$$

式中:  $\tau_f$ ——处于静水中的土体的抗剪强度;  $\sigma'$ ——滑动面上的法向有效应力;  $\varphi, c$ ——分别为处于静水中的土体材料的内摩擦角和凝聚力;  $\Delta\varphi, \Delta c$ ——分别为静水使土体材料的内摩擦角和凝聚力的降低值;  $H$ ——已知水头;  $\gamma$ ——水的容重。

(3) 土体处于地下水位以下,且发生自上而下的渗流时(见图 4),渗透水流还将给土体施加自上而下的渗流体积力<sup>[4]</sup>。此渗流体积力使滑动面上的法向有效应力增大。此时,土体的抗剪强度可表示为:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - \gamma H + \gamma J H) \operatorname{tg}(\varphi - \Delta\varphi) + (c - \Delta c) \quad (3)$$

式中:  $J$ ——水头高度  $h$  沿渗流方向  $l$  的水力坡度大小,  $J = - \partial h / \partial l$ 。

(4) 土体处于地下水位以下,且发生自下而上的渗流时(见图 5),渗透水流还将给土体施加自下而上的渗流体积力<sup>[4]</sup>。此渗流体积力使滑动面上的法向有效应力减小。此时,土体的抗剪强度可表示为:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - \gamma H - \gamma J H) \operatorname{tg}(\varphi - \Delta\varphi) + (c - \Delta c) \quad (4)$$

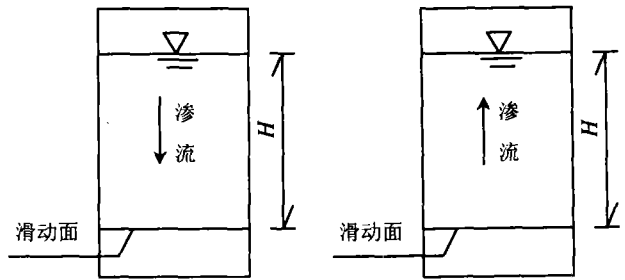


图 4 自上而下渗流的土体

图 5 自下而上渗流的土体

(5) 土体处于地下水位以下,且发生水平方向的渗流时(见图 6),渗透水流还将给土体施加水平方向的渗流体积力<sup>[4]</sup>。此渗流体积力相当于使滑动面的抗剪强度发生变化(增大或减小)。此时,土体的抗剪强度可表示为:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - \gamma H) \operatorname{tg}(\varphi - \Delta\varphi) + (c - \Delta c) \pm \gamma J H \quad (5)$$

式中,当渗流方向和外力方向一致时取负号,和外力方向相反时取正号。

(6) 土体处于地下水位以下,且发生任意方向的渗流时(见图 7),渗透水流给土体施加的渗流体积力可分解为垂直于滑动面的分量和平行于滑动面的分量两部分。此时,土体的抗剪强度可表示为:

$$\tau_f = \sigma' \operatorname{tg} \varphi + c = (\sigma - \gamma H + \gamma J H \sin \alpha) \operatorname{tg}(\varphi - \Delta\varphi) + (c - \Delta c) \pm \gamma J H |\cos \alpha| \quad (6)$$

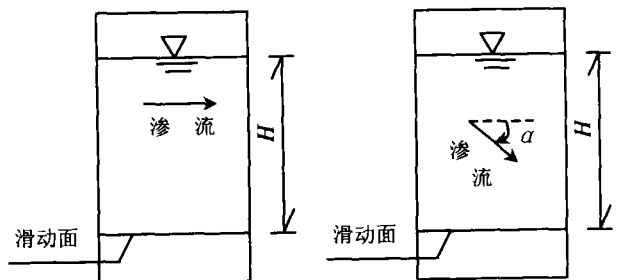


图 6 水平方向渗流的土体

图 7 任意方向渗流的土体

式中： $\alpha$ ——水平方向到渗流方向的夹角，以顺时针为正；当渗流体积力平行于滑动面的分量和外力方向一致时取负号，和外力方向相反时取正号。

### 3 应用算例

假设某土体干燥状态下的内摩擦角  $\varphi = 30^\circ$ ，凝聚力  $c = 0.5 \text{ MPa}$ ，正应力为  $\sigma = 3 \text{ MPa}$  时；水下强度指标变为  $\varphi' = 25^\circ$ ， $c' = 0.4 \text{ MPa}$ ； $H = 50 \text{ m}$ ，沿渗流方向的水力坡度  $J = 2$ ；取水的容重  $\gamma = 9800 \text{ N/m}^3$ ， $\alpha = 45^\circ$ 。由式(1)~(6)可计算出此土体在各种情况下的抗剪强度见表1所示。由表1可以看出，渗流对土体的抗剪强度有比较明显的影响；特别是渗流方向对土体抗剪强度的影响尤为明显。

表1 土体各种情况下的抗剪强度

序号	情况	抗剪强度/MPa	百分比/%
1	地下水位以上	2.23	100.0
2	静水中	1.57	70.4
3	自上而下的渗流	2.03	91.0
4	自下而上的渗流	1.11	49.8
5	水平方向的渗流	0.59(-)	26.5(-)
		2.55(+)	114.3(+)
6	任意方向的渗流	1.20(-)	53.8(-)
		2.58(+)	115.7(+)

### 4 库岸失稳机理分析

水库蓄水后，随着水位的上升，周围的地下水位也随之上升，使地下水和库水共同作用于岩土体介质中和岸坡表面，对岩土体产生物理、化学和力学的作用。物理作用主要是软化和泥化岩土体中断层带物质和软弱夹层物质以及黄土层岸坡，从而使岩土体的强度降低；化学作用主要是通过水—岩土体离子交换、溶解（黄土湿陷和岩溶）、水化等作用来改变岩土体的结构而降低其强度；力学作用主要通过空隙静水压力和空隙动水压力作用对岩土体的力学性质施加影响。空隙静水压力减小岩土体中法向应力而降低岩土体强度，空隙动水压力对岩土体产生推力而降低岸坡的稳定系数。

岩土体的强度取决于岩土体的性质和结构构造。地下水和库水对黄土强度的影响主要通过物理和化学的作用降低土的黏聚力和摩擦角的大小，从而使原本处于稳定的岸坡失稳。当考虑地下水作用时，黄土的抗剪强度为：

$$\tau = (\sigma - P)\tan(\varphi - \varphi_w) + c - c_w \quad (7)$$

式中： $\tau$ ——抗剪强度； $\sigma$ ——土体的应力； $P$ ——空隙水压力； $\varphi$ ——干燥土的摩擦角； $\varphi_w$ ——长期地下水作用下摩擦角的减小量； $c$ ——干燥土的黏聚力； $c_w$ ——长期地下水作用下土体黏聚力的减小量。

对于裂隙岩体而言，其强度主要取决于结构面或软弱夹层的强度，其抗剪强度通常为：

$$\tau_f = (\sigma - p)\tan(\varphi - \varphi_w) + c - c_w - \gamma\Delta H \quad (8)$$

式中： $\gamma_f$ ——岩体结构面抗剪强度； $\Delta H$ ——单位渗径上的水头差； $\gamma\Delta H$ ——空隙动水压力引起的沙土抗剪强度的降低值。

综上所述，水对岩土体强度的影响主要有3个方面：(1)地下水通过物理、化学的作用改变岩土体的结构，从而改变岩土体的  $c, \varphi$  值；(2)地下水通过孔隙静水压力的作用，影响岩土体中的有效应力从而降低岩土体的强度；(3)地下水通过空隙动水压力的作用，对岩土体施加一个推力，即在岩土体中产生一个剪应力，从而降低岩土体的抗剪强度。

水对岸坡岩土体作用而产生的物理、化学效应，孔隙静水压力效应以及空隙动水压力效应等，改变了岸坡岩土体的结构和它们的应力状态，从而诱发了岸坡的变形破坏。

### 5 结 语

(1)中小型水库库岸失稳破坏的主要形式有滑坡和崩塌2种。库岸失稳的机理是由于水的作用，对岸坡岩土体产生了物理化学、空隙静水压力等效应，改变了岸坡岩土体的结构和应力状态，从而诱发岸坡变形破坏。(2)岩土体的强度取决于岩土体的性质和结构构造。地下水和库水对黄土强度的影响主要通过物理和化学的作用降低土的黏聚力和摩擦角的大小，从而使原本处于稳定的岸坡失稳。

#### [参 考 文 献]

- [1] 钱家欢,殷宗泽. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,1996.
- [2] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京:水利电力出版社,1983.
- [3] 王育平,王永红. 水—土相互作用对土体裂隙水流的影响[J]. 岩石力学与工程学报,1999,18(5):554—557.
- [4] 柴军瑞,仵彦卿. 岩体渗流与应力耦合机理研究综述[M]. 中国水利水电发展文库,北京:中国水利水电出版社,2000.
- [5] 宋克强,崔中兴. 黄土滑坡及水库塌岸问题研究[R]. 中科院基金报告. 西安理工大学水利水电学院,1989.