

河床覆盖层厚度对土石坝边坡稳定的影响分析

张园园¹, 代凌辉², 崔莹莹¹

(1. 开封黄河河务局, 河南 开封 475004; 2. 黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004)

摘要: 为探讨河床覆盖层厚度对土石坝边坡稳定的影响程度, 采用有限元强度折减法进行了计算和分析。在坝体条件相同的情况下, 分别计算了覆盖层厚度为 0.5、10、15 和 20 m 时的坝坡稳定安全系数。结果表明: 覆盖层厚度越大, 坝坡的安全系数越小。但是当覆盖层厚度达到 1 倍坝高时, 安全系数就趋于稳定, 不会再随覆盖层厚度的增加而减小。

关键词: 覆盖层厚度; 土石坝; 边坡; 安全系数

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)05-0182-03

Effect of the overburden's thickness in riverbed on the stability of earth-rockfill dam's slope

ZHANG Yuanyuan¹, DAI Linghui², CUI Yingying¹

(1. Yellow River Kaifeng Bureau, Kaifeng 475004, China;

2. Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China)

Abstract: In order to investigate the effect of the overburden's thickness in riverbed on the stability of the earth-rockfill dam's slope, the work of computation and analysis have been done with strength reduction finite element method. The safety factors of slope stability are calculated when the overburden's thickness is 0, 5, 10, 15 and 20m respectively, and the other conditions are the same. The results show that the thicker the overburden is, the less the safety factor is. However, when the overburden's thickness reaches 1 time of the dam's height, the safety factor keeps invariable, and will not become less when the overburden becomes thicker.

Key words: overburden thickness; earth-rockfill dam; slope; factor of safety

0 引言

土石坝是世界水工建造史上一种非常古老的坝型, 有着深厚的历史渊源。由于土石坝具有易于施工、抗震性好、工作可靠、管理方便、寿命较长等优点, 成为了水库优选坝型之一, 而且每年的建造数量处于上升趋势, 高度也在不断增加。但是现在优良坝址剩余较少, 因此许多大坝的坝址都选在了有覆盖层的河谷, 地质条件相对较差。河床覆盖层是指堆积在河谷中的第四纪松散沉积物, 其主要组成为块碎石、漂卵石、粉细砂等, 颗粒偏粗大, 级配曲线一般表现为由粗粒为主的陡峻型结构突变到平缓型的细粒结构, 常常缺乏中间粒径, 有比较强的透水性。河床覆盖层成因类型比较复杂, 结构松散, 物理、力学等性质呈现出较大的不均匀性, 是一种地质条件较差、较复杂的坝基, 在土石坝的设计和施工中, 必须考虑其对坝体的

影响^[1]。边坡稳定是土石坝设计和施工中需要重点考虑的问题, 目前国内外的相关研究大都单独考虑边坡的稳定或既有覆盖层与边坡共同作用下的稳定, 而没有考虑不同厚度的覆盖层对边坡稳定的影响。本文将采用有限元强度折减法就河床覆盖层厚度对土石坝边坡稳定的影响做一定的分析研究。强度折减法是有限元分析中比较常用的方法, 它将 Bishop 的安全系数定义^[2]与有限元法相结合, 按照某一系数 F_s 逐步将土的实际抗剪强度参数进行折减, 基于折减后的抗剪强度进行一系列的有限元分析, 直至所选定的折减系数 F_s 使得边坡达到临界失稳状态, 此时的 F_s 即为安全系数^[3]。通过这种方法还可以同时得到临界滑裂面的位置。

1 强度折减法的基本原理与屈服准则

1.1 基本原理

强度折减法是將土的抗剪强度除以折减系数,

收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-06-04

作者简介: 张园园(1983-), 女, 河南开封人, 工程师, 主要从事黄河防洪与治理工作。

通讯作者: 代凌辉(1984-), 男, 河南兰考人, 硕士, 助教, 主要从事水利工程教学与研究工。

用于有限元计算,如果算得的边坡恰好达到破坏,则所选的折减系数就是安全系数,其关系为:

$$F_s = \frac{c_0}{c'} = \frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi'} = \frac{\tan \psi_0}{\tan \psi'} \quad (1)$$

式中: c_0 、 φ_0 、 ψ_0 分别为真实的有效粘聚力、内摩擦角、膨胀角; c' 、 φ' 、 ψ' 分别为折减后的有效粘聚力、内摩擦角、膨胀角; F_s 即为安全系数。对土坡强度折减的程度,即土的实际强度与极限状态时所采用强度的比值,具有强度储备的物理意义,和传统极限平衡的方法是一致的^[4]。

在具体的计算中,本文利用 ABAQUS 有限元软件中材料参数可以随场变量的变化而改变的功能来引入场变量 θ ,从而实现自动直接修改材料参数的目的。定义场变量 θ 随增量步 t 从 0 线性增长到 1, ABAQUS 软件会默认二者实时相等。从而得到:

$$\theta = t \quad (2)$$

在分析过程中,将强度参数中的粘聚力输入成关于场变量 θ 的函数 $c'(\theta)$,将内摩擦角输入成关于场变量 θ 的函数 $\varphi'(\theta)$ 。由于在 ABAQUS 有限元软件中输入参数时,粘聚力 c 不能为 0,因此在整个分析步中,设定 $1/F_s$ 由 1 折减到 0.1,而不是折减到 0,即当 $\theta = 0$ 时, $c' = c_0$, $\tan \varphi' = \tan \varphi_0$; 而当 $\theta = 1$ 时, $c' = 0.1c_0$, $\tan \varphi' = 0.1 \tan \varphi_0$; 从而得到:

$$c'(\theta) = (1 - 0.9\theta)c_0 \quad (3)$$

$$\varphi'(\theta) = \tan^{-1}[(1 - 0.9\theta)\tan \varphi_0] \quad (4)$$

由(1)~(4)式可以得出安全系数和增量步 t 的关系:

$$F_s = \frac{1}{1 - 0.9t} \quad (5)$$

1.2 屈服准则

相同的计算模型可以采用不同的屈服准则^[3],在本文的有限元计算中采用 Mohr - Coulomb 准则作为屈服准则。根据主应力的定义和以压应力为负的规定,该准则可以写为:

$$F = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} \sin \varphi' - \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - c' \cos \varphi' \quad (6)$$

式中: σ'_1 、 σ'_3 分别为大主应力和小主应力; c' 、 φ' 分别为有效粘聚力和内摩擦角。

在有限元计算中,采用关联还是非关联的流动法则,取决于膨胀角 ψ 值: $\psi = \varphi$ 时,为关联流动法则; $\psi = 0$ 时,为非关联流动法则。本文计算中采用膨胀角 $\psi = 0$ 的非关联流动法则。

2 极限状态的判别

对于有限元计算中极限状态的判别,不同的研

究者有不同的方法。Griffiths 等通过绘制边坡内某一点的位移与强度折减系数之间的关系来判定极限状态,当边坡内某一点的位移曲线发生突变时,认为突变点对应的强度折减系数即为边坡达到极限状态时的折减系数,进而计算出边坡的安全系数^[5];郑颖人等认为解的不收敛即为极限状态^[3];栾茂田等认为随着材料强度的降低,塑性区会由一个自由面向另一个自由面贯通,此时即为极限状态^[6]。本文依据 Griffiths 的观点,采用固定测点位移与有限元计算增量步的关系来判定极限状态,即绘制固定测点位移与增量步的关系曲线,当曲线发生突变时,则认为突变点对应的增量步即为边坡达到极限状态时的增量步,进而根据(5)式计算出边坡的安全系数。

3 计算分析

3.1 无覆盖层时的计算分析

本文将采用数值算例就河床覆盖层对土石坝边坡稳定的影响进行计算和分析。首先计算没有覆盖层时的坝坡稳定情况,即认为坝基是由良好基岩构成的。大坝基本情况为:坝高 20 m;坝顶宽 10 m;上游坝坡为 1:2.8,下游坝坡为 1:2;计算网格如图 1 所示。坝壳料的材料参数为:弹性模量 $E = 1.1 \times 10^8$ Pa;泊松比 $\nu = 0.3$;重度 $\gamma = 2.4 \times 10^4$ N/m³;粘聚力 $c = 2.4 \times 10^4$ Pa;内摩擦角 $\varphi = 40^\circ$ 。坝底采用刚性边界,其余为自由边界。荷载施加分为两步:一、施加重力;二、强度折减。本文采用 ABAQUS 有限元软件进行计算,重力通过 Gravity 命令输入重力加速度实现;强度折减则通过输入与增量步实时相等的场变量来带动材料参数的折减。

计算完成后,选取坝顶与下游坝坡的交点作为固定测点,以观测其位移与增量步的关系,如图 2。当增量步 $t = 0.631$ 时,固定测点的位移为 0.009 m;当 $t = 0.659$ 时,位移为 0.050 m;当 $t = 0.662$ 时,位移为 0.331 m;当 $t = 0.664$ 时,位移为 1.260 m;故认为增量步 $t = 0.659$ 的点为位移突变点,代入(5)式,得到对应的安全系数 $F_s = 2.457$ 。从图 2 中可以看出,在整个强度折减的过程中,计算在 $t = 0.673$ 时因不收敛而终止,而固定测点在此时的位移是 5.8 m,说明坝坡早已破坏,证明本文选用固定测点位移值与增量步关系曲线的突变处作为判别极限状态的临界点是合理的。由于坝坡的安全系数 $F_s = 2.457 > 1$,所以坝坡是安全稳定的。对应极限状态的大坝网格变形图和等效塑性应变反映出的滑裂面分别如图 3、图 4 所示。

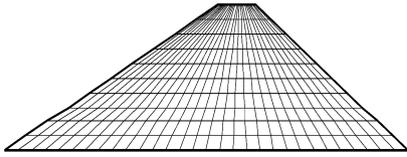


图1 计算网格图

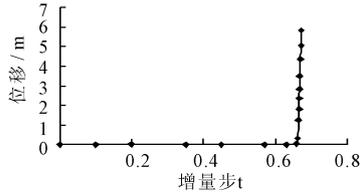


图2 固定测点位移与增量步的关系

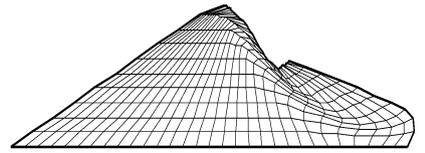


图3 极限状态时的网格变形图

3.2 有覆盖层时的计算分析

为了计算河床覆盖层厚度对土石坝边坡稳定的影响,本文将在3.1节算例的基础上,分别增加不同厚度的覆盖层来计算边坡安全系数,进而进行对比分析。分别选取覆盖层为5、10、15和20 m四种情况进行计算,其断面如图5所示,覆盖层水平方向从上、下游坡脚分别向上游和下游取1倍坝高的长度。坝壳料参数与3.1节保持一致;覆盖层的材料参数为:弹性模量 $E = 1.3 \times 10^8 \text{ Pa}$;泊松比 $\nu = 0.3$;重度 $\gamma = 2.3 \times 10^4 \text{ N/m}^3$;粘聚力 $c = 1.5 \times 10^4 \text{ Pa}$;内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$ 。覆盖层底部采用刚性边界,覆盖层两侧采用水平约束,其余为自由边界。荷载情况与

3.1节的相同。

计算完成后,同样选取坝顶与下游坝坡的交点作为固定测点。安全系数的计算方法与3.1节中的相同,此处不再赘述。包括无覆盖层在内的、共五种情况下计算所得的安全系数见表1。覆盖层厚度与安全系数的关系曲线如图6所示。从计算结果可以看出,在坝体条件相同的情况下,覆盖层厚度越大,坝坡的安全系数越小。河床中10 m范围内的覆盖层对坝坡稳定的影响较大,10~20 m范围内的覆盖层对坝坡稳定的影响较小,当覆盖层厚度达到20 m(即1倍坝高)时,坝坡的安全系数趋于稳定,覆盖层厚度再增加时,安全系数基本保持不变。

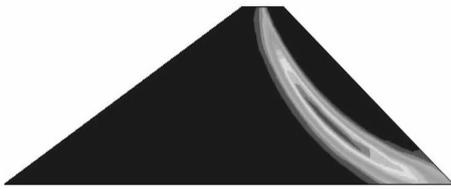


图4 极限状态时等效塑性应变反映出的滑裂面

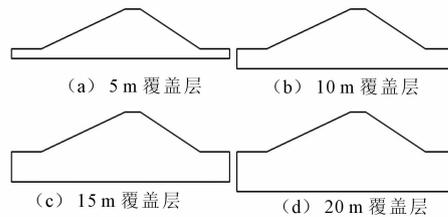


图5 四种不同厚度覆盖层对应的断面图

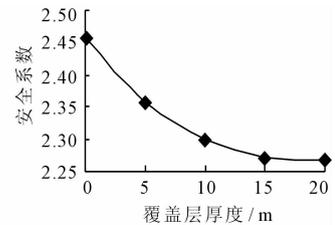


图6 覆盖层厚度与安全系数的关系曲线

表1 不同覆盖层厚度对应的坝坡安全系数

覆盖层厚度/m	0	5	10	15	20
安全系数	2.457	2.358	2.300	2.272	2.267

4 结语

本文采用有限元强度折减法就河床覆盖层厚度对土石坝边坡稳定的影响进行了计算和分析,采用Mohr-Coulomb屈服准则以及固定测点位移与增量步的关系作为极限状态判别依据,主要得出了以下结论:在坝体条件相同的情况下,覆盖层厚度越大,坝坡的安全系数越小。河床中10 m范围内的覆盖层对坝坡稳定的影响较大,10~20 m范围内的覆盖层对坝坡稳定的影响较小,当覆盖层厚度达到20 m(即1倍坝高)时,坝坡的安全系数趋于稳定,覆盖层厚度再增加时,安全系数基本保持不变。本文仅考虑了覆盖层度对边坡稳定的影响,没有考虑覆盖层的材料参数,因此覆盖层的力学性质,即“软”、

“硬”等对坝坡稳定的影响程度需要做进一步的分析 and 研究。本文证明了用有限元强度折减法计算土石坝边坡稳定问题的合理性,为相关类似工程的分析提供了参考和借鉴。

参考文献:

- [1] 代凌辉. 二塘沟水库深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝应力与变形计算分析[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2011.
- [2] Bishop A W. The use of the slip circle in stability analysis of slope[J]. Geotechnique, 1955, 5(1):7-17.
- [3] 郑颖人,赵尚毅. 岩土工程极限分析有限元法及其应用[J]. 土木工程学报,2005,38(1):91-98.
- [4] 曹先锋,徐千军. 边坡稳定分析的温控参数折减有限元[J]. 岩土工程学报,2006,28(11):2039-2042.
- [5] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique,1999,49(3):387-403.
- [6] 栾茂田,武亚军,年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报,2003,23(3):1-8.