

复杂地质条件下水库高边坡开挖与稳定性研究

黄钊锦

(阳春市合水水库管护中心, 广东 阳春 529600)

摘要 针对复杂地质条件下水库高边坡开挖及防护的问题, 本研究基于数值模拟方法, 探讨了不同开挖方案对卸荷响应的影响, 并提出了相应的防护措施。通过 PFC2D 建立了二维数值模型, 模拟了坡体在开挖过程中的变形行为。研究发现, 不同开挖方法会导致不同的开挖卸荷应力路径, 进而影响坡体的变形行为。斜向柱状开挖被证实是最佳的开挖方法, 能够降低应变集中和裂缝数量。此外, 研究还分析了开挖速率对坡体稳定性的影响, 发现开挖速率的增加会导致裂缝数量和应变水平的增加。

关键词 复杂地质; 水库高边坡; 数值模拟方法

中图分类号: TV62

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)06-0121-03

水库高边坡开挖是工程建设中常见的挑战之一, 其复杂的地质条件和挖掘过程可能会引发坡体失稳和破坏, 对工程安全造成威胁。因此, 对开挖过程中的应力分布、变形行为以及防护措施进行深入研究具有重要意义。本文旨在通过数值模拟方法, 系统分析不同开挖方案对坡体稳定性的影响, 并提出相应的防护建议, 为水库高边坡的设计和施工提供科学依据。

1 施工挖掘引起的应力分析

应力分布决定了坡体的变形和破坏过程。除了自重外, 有时还受构造应力、渗流力、外加荷载、挖掘等影响。坡体挖掘是典型的卸荷过程, 会导致应力重新分布。在挖掘过程中, 靠近挖掘表面的土体会经历复杂的应力变化。例如, 在黏土材料中进行挖掘会导致平均应力减小和剪应力增加。挖掘响应的大小取决于初始应力和挖掘区域。此外, 应力路径对土体变形有明显影响^[1]。

图 1 显示了水库高边坡开挖的示意图。在挖掘之前, 点 A 处的最大主应力 (σ_1) 在垂直方向, 最小主应力 (σ_3) 在水平方向。点 A 处的应力值可以描述为: $\sigma_1 = \gamma h$, $\sigma_3 = \lambda \sigma_1$, 其中 γ 为土体的单位重量, λ 为侧压系数, h 为挖掘深度。

在挖掘过程中, 主应力的方向会发生旋转。在正常重力条件下, 最大主应力的方向大致与挖掘表面平行。而最小主应力会减小, 方向几乎垂直于挖掘表面。靠近挖掘表面的土体元素几乎处于单轴应力状态。随着挖掘表面与土体元素之间距离的增加, 应力逐渐不受挖掘干扰的影响。

2 数值模拟方法

2.1 数值模型

为了估计坡体在趾部挖掘过程中的变形行为, 利用 PFC2D 建立了一个二维数值模型。PFC2D 是一种二维

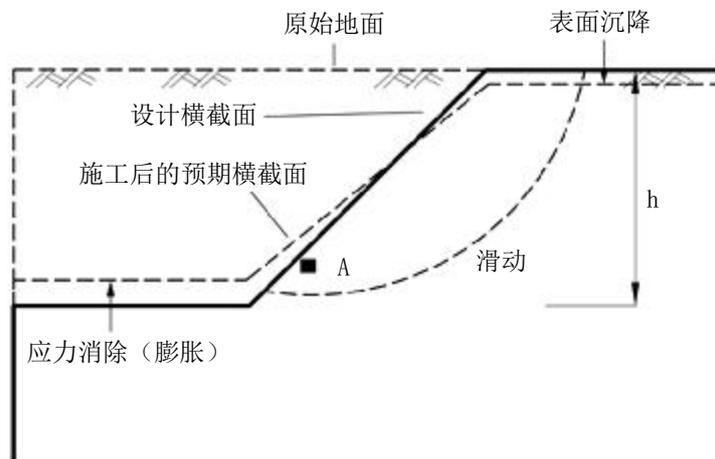


图 1 工程坡体挖掘示意图

离散元软件。颗粒被视为圆盘或团块，可以同时平移和旋转。颗粒的运动遵循牛顿运动定律。在本研究中，建模的坡体高度为15米，坡度为45°。颗粒的半径范围为80毫米至160毫米，在整个模型域内均匀分布，以实现目标孔隙率为0.15。坡体由具有内聚力的土壤组成，并采用接触键模型模拟土壤行为^[2]。

2.2 应变测量方法

在PFC中，可以使用两种方法来测量应变。第一种方法是创建测量区域以测量特定位置的应变率。可以通过测量的应变率乘以当前时间步长来获得应变增量。第二种可用方法是基于每个周期内两个颗粒之间的相对位移的计算。在本研究中，我们采用第二种方法来测量坡体的轴向应变。假设B1、B2是坡体中的两个相邻测量颗粒，基于两个颗粒之间的相对位移计算的轴向应变可以表示为：

$$\text{Axial strain}(\epsilon) = \frac{l'-l}{l}$$

其中， l' 是开挖后两个颗粒之间的距离； l 是开挖前的距离。

2.3 挖掘方案

为了研究坡体响应中卸载路径和速率的影响，选择了两组趾部挖掘方案来模拟不同的挖掘方法。第一组包括三种不同的挖掘方法，包括垂直柱状挖掘、水平柱状挖掘和斜向挖掘，用于比较不同挖掘卸载路径下的坡体变形行为。在垂直柱状挖掘过程中，从左到右逐层垂直移除趾部附近的土体。类似地，在水平柱状挖掘过程中，从顶部到底部水平移除土体。在斜向挖掘过程中，每个阶段的挖掘体积相等，但是挖掘表面的坡度变得更陡。需要注意的是，总挖掘步数相同，均为5步。通过改变挖掘速度，进行第二组挖掘方案，以研究卸载速率对坡体变形的影响。采用垂直柱状挖掘方法，将总挖掘步数设置为1、2、5，分别进行。在许多工程实践中，在坡体挖掘期间和之后未及时采取防护措施，可能导致坡体变形或破坏的积累。为了模拟最坏的情况，假定每个挖掘阶段结束后，土体元素达到应力平衡^[3]。

3 坡趾挖掘引起的失稳机制

3.1 裂缝发育

基于前述简化的地质模型，进行了坡趾挖掘以导致坡体失稳。挖掘高度为6米，总挖掘步数为1。挖掘后，执行了一些循环以使系统达到新的平衡状态。如果法向或剪切力超过了拉伸或剪切强度，那么一些先前结合的颗粒将被分离，并且裂缝将同时在土体中生成。

图2展示了不同时间步长下裂缝的分布情况。从

图中可以看出，坡趾挖掘引起的坡体失稳始于坡趾，并逐渐向坡顶扩展。在坡体挖掘后，剪切破坏首先发生在靠近坡趾的地方。同时，在坡表面附近观察到几处拉伸裂缝。随着时间推移，剪切裂缝逐渐向坡顶延伸，并在几乎与剪切破坏区域垂直的区域和剪切裂缝扩展方向形成一些拉伸裂缝。坡顶处剪切和拉伸裂缝的连接表明了失稳面的形成。在这个阶段，靠近坡表面和坡顶部的滑动带土体主要处于拉伸破坏状态，而失稳面下部的土体则处于剪切破坏状态。随着时间的推移，几乎所有滑动带土体中将逐渐发生结合破坏（剪切和张拉破坏）^[4]。

为了验证模拟结果，将变形行为与通过离心机模型试验得到的结果进行比较，模型试验中的坡由黏土组成，高度为21厘米，坡度为2:1。在坡趾设计了一个高度为10厘米的挖掘区。挖掘后，一簇拉伸裂缝在距离坡面8厘米处形成，当达到深度5厘米时停止扩展。随着挖掘的进行，在靠近坡面的新一簇拉伸裂缝逐渐形成，并向下向剪切破坏区域传播。剪切和拉伸裂缝的连接表明了潜在的失稳面的形成。可以得出结论：由坡趾挖掘引起的坡体失稳始于坡趾，并逐渐向坡顶延伸。拉伸破坏主要发生在坡表面和坡顶区域附近，逐渐向剪切破坏区域传播。张拉和剪切的共同作用导致滑动带土体破裂成较小的碎片，从而导致坡体的失稳。

3.2 应变分布

裂缝的数量和分布可用于评估坡的稳定性。由于工程地质环境的复杂性，一些裂缝在工程实践中很难发现。在本研究中，相对容易测量的应变信息用于表示坡的变形行为。由于PFC2D无法直接输出轴向应变和应变等高线，因此采用以下步骤。通过计算两个颗粒之间的相对位移获得轴向应变。然后，根据它们的坐标顺序排列应变数据。最后，将数据读入科学绘图和分析软件OriginLab 8.5中，并获取彩色应变等高线图。当时间步长达到110000时，由于滑动区域中一些土粒子的不规则运动，随着时间步长的增加，应变集中在坡趾部分，并逐渐向坡顶发展。x轴应变的分布和变化规律与裂缝相一致^[5]。

4 不同开挖方案对卸荷响应的影响

4.1 卸荷路径的影响

不同的开挖方法将导致不同的开挖卸荷应力路径，这将导致开挖区域周围的应力重新分布。在本节中，进行包含三种不同开挖方法（垂直柱状开挖、水平柱状开挖和斜向开挖）的开挖方案，以比较在不同开挖卸荷路径下坡体的变形行为。总开挖步数为5，总开挖

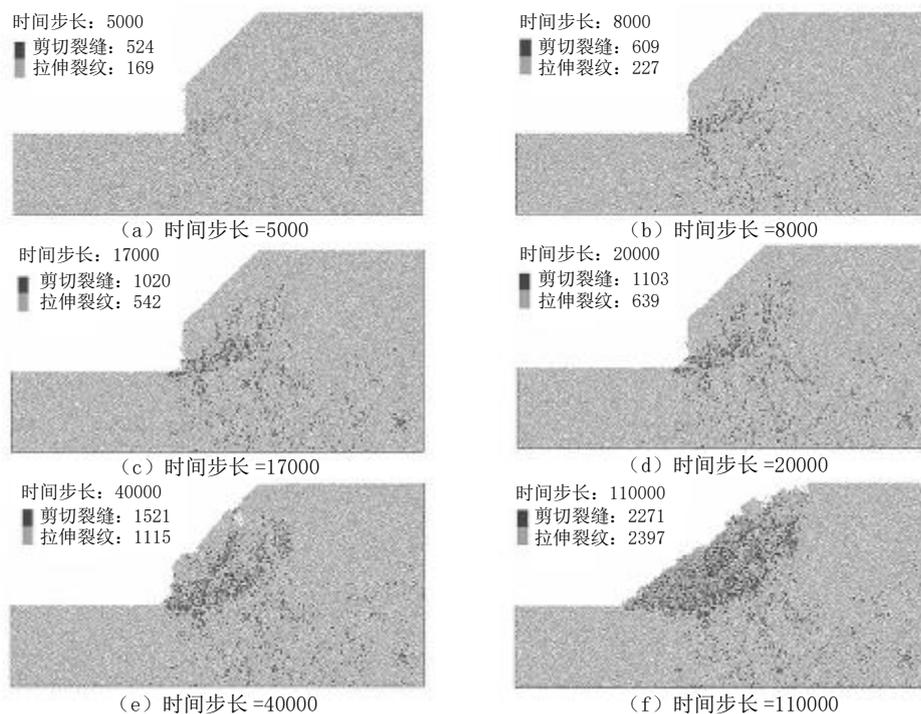


图 2 不同时间步长的裂纹分布

高度为 5 米。在水平柱状开挖期间，开挖表面附近的土体将直接受到干扰，并且这种扰动效应可能会降低土壤强度。为了揭示开挖扰动的的影响，仅考虑最终开挖表面周围的裂缝。裂缝数量表明，最终开挖表面周围形成了更多的裂缝。垂直柱状开挖和斜向开挖过程方法不会直接干扰最终开挖表面周围的土体，水平柱状开挖引起的裂缝数量比其他两种开挖方法要高得多，应变集中更为明显。在斜向开挖过程中，每个阶段的开挖表面坡度比垂直开挖要缓和，开挖表面周围的裂缝数量在三种开挖方法中最少。

4.2 卸荷速率的影响

通过改变总开挖步数，采用垂直柱状开挖方法进行开挖方案，以研究开挖卸荷速率的影响。总开挖步数分别设置为 1、2 和 5。当总开挖步数为 1 时，在坡面附近形成了两个近似平行的张裂缝群。此外，失败面非常明显。裂缝传播区域的范围和应变集中区域要比其他两种开挖速率要宽得多。当总开挖步数分别为 2 和 5 时，黏结破坏主要发生在坡趾部。坡体中尚无法找到失败面的形状和位置。假设没有及时采取加固措施，在开挖后，裂缝数量和应变水平均随着开挖速率的增加而增加。而且，不同开挖速率引起的裂缝数量与应变水平是一致的。正如比较结果所示，坡面平均应变与监测线最大应变平均值之间的差异非常微小。

5 结束语

本研究通过数值模拟方法，深入探讨了复杂地质条件下水库高边坡开挖及防护的关键问题。研究表明，斜向柱状开挖是一种有效的开挖方法，能够降低应变集中和裂缝数量，提高坡体稳定性。此外，合理控制开挖速率也对减小坡体变形和裂缝扩展具有重要意义。本研究为水库高边坡工程的设计和施工提供了重要参考，对提高工程安全性和可靠性具有一定的指导意义。

参考文献：

- [1] 范夏玲.高边坡回填土复杂地质条件下多桩承台连梁基础设计应用研究[J].能源与环境,2024(01):38-40,176.
- [2] 陈闯,张冰,陈锋.复杂地质条件下高边坡开挖及防护措施综合应用:以密云水库第一溢洪道改建工程为例[J].中国水能及电气化,2024(02):62-66.
- [3] 史劲.复杂地质环境下高边坡稳定项目中抗滑桩运用分析[J].中国设备工程,2023(20):256-258.
- [4] 晋良军,张建忠,李剑寒.黄登水电站复杂地质条件下缆机边坡开挖支护设计[J].云南水力发电,2022,38(04):117-122.
- [5] 李冬青.复杂地质条件下高陡边坡开挖支护稳定性研究[J].云南水力发电,2022,38(02):47-51.