

渗流作用下土体颗粒流失边坡稳定性影响研究

杨冰 付佳宇 曾祥宇 陈雨涵
西藏大学 工学院

DOI:10.12238/gmsm.v7i11.2002

[摘要] 不良级配土体的内部结构和力学特性在渗流作用下会发生改变,土体强度发生变化从而影响坡体的稳定性。本文使用离散元数值模拟方法,模拟了渗流作用下土体内部侵蚀现象,并根据这一现象采用控制删除细颗粒的方法模拟了内部侵蚀之后土体应力应变曲线的变化。结果表明,土体在渗流作用下内部粗颗粒骨架影响较小,承担较少应力的颗粒容易流失,细颗粒流失后改变了土体的孔隙结构和细观应力状态;土体颗粒流失后剪切强度发生变化,并且受到颗粒流失量的影响。

[关键词] 渗流; 颗粒流失; 土体; 应力应变

中图分类号: O357.3 文献标识码: A

Study on the stability of soil particle loss under seepage Tibet University School of Engineering

Bing Yang Jiayu Fu Xiangyu Zeng Yuhuan Chen
College of Engineering, Xizang University

[Abstract] The internal structure and mechanical characteristics of the bad graded soil will change under the action of seepage, and the change of the soil strength will affect the stability of the slope body. In this paper, the discrete element numerical simulation method to simulate the internal erosion of the soil and the strain curve by removing fine particles. The results show that the skeleton of the soil particles is less affected, and the particles with less stress are easy to lose, and the pore structure and stress state of the soil are changed by the fine particles, and are affected by the particle loss.

[Key words] seepage; particle loss; soil; stress and strain

引言

不良级配的土体由于结构的不稳定性,在渗流作用下会发生内部侵蚀。矫滨田^[1]通过在降雨边坡模型中放置红线发现了细颗粒迁移的现象并且也引起了坡体的稳定性。王保亮^[2]通过降雨模型试验分析了细颗粒迁移对崩塌灾害的影响;杨义、丁子玥等^[3,4]分别利用有限元、离散元模拟分析了潜蚀的颗粒迁移现象。李喜安、王明年等^[5,6]分析了颗粒的受力条件,进行了渗流潜蚀的临界条件的推导。参考颗粒的受力分析及利用离散元方法的细观可视化优势,可以更好的分析渗流作用下土体的潜蚀特征。

本文利用计算流体力学和离散元耦合进行土体渗流颗粒流失模拟,并采用二维的离散元进行土体双轴压缩模拟,对颗粒流失前后的土体进行压缩实验,初步探讨颗粒流失后的土体结构和强度变化。

1 流固耦合模拟

1.1 模拟设置

土体颗粒在渗流作用下受到渗流拖曳力、重力、浮力、摩

擦力等,本文模拟颗粒的迁移,并且渗流作用下重力和浮力较于拖曳力作用较小可以忽略,所以主要考虑颗粒受到的拖曳力、摩擦力及其它颗粒的阻力。

模拟简化为两种粒径的颗粒,粒径分别为0.8mm,3.2mm,细颗粒与粗颗粒占比为3:7,数量分别为391和10712个。

下列为流固耦合的控制方程,对颗粒模型施加渗流拖曳力,加上颗粒间摩擦力、阻力等共同对颗粒进行作用。

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \frac{\vec{f}_{mech} + \vec{f}_{fluid}}{m} + \vec{g} \quad (1)$$

$$\vec{f}_{fluid} = \vec{f}_{drag} + \frac{4}{3}\pi r^3(\nabla p - \rho_f \vec{g}) \quad (2)$$

式中, \vec{u} 为速度矢量, \vec{f}_{mech} 为颗粒间作用力, \vec{f}_{fluid} 为流体作用力, ρ_f 为流体密度。水流拖曳力方程如下:

$$\vec{f}_{drag} = \vec{f}_0 \varepsilon^{-x} \quad (3)$$

$$\vec{f}_0 = \left(\frac{1}{2} C_d \rho_f \pi r^2 |\vec{u} - \vec{v}| (\vec{u} - \vec{v})\right) \quad (4)$$

$$C_d = \left(0.63 + \frac{4.8}{\sqrt{Re_p}}\right)^2 \quad (5)$$

$$\chi = 3.7 - 0.65 \exp\left(-\frac{(1.5 - \log_{10} Re_p)^2}{2}\right) \quad (6)$$

$$Re_p = \frac{2\rho_f r |\vec{u} - \vec{v}|}{\mu_f} \quad (7)$$

$$\vec{f}_b = \frac{\sum_j \vec{f}_j^{drag}}{V} \quad (8)$$

式中, \vec{f}_{drag} 为流体拖曳力, \vec{f}_0 为参考阻力, C_d 为阻力系数, χ 为经验系数, Re_p 为雷诺数。

1.2 模拟结果分析

(1) 颗粒流失现象。如图为颗粒渗流前后的颗粒分布, 渗流开始前细颗粒均匀分布于粗颗粒周围, 渗流结束后细颗粒在渗流力的作用下发生了迁移和流失, 模型顶部由于没有颗粒的阻挡, 颗粒流失最为明显, 内部土体也有略微的迁移, 而剩余颗粒则是由于迁移通道被阻塞而留存于孔隙之中不再迁移。

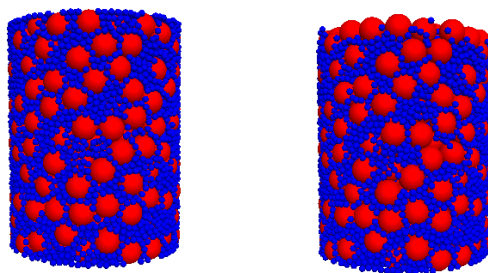


图1 颗粒渗流前后图

(2) 孔隙率。由于颗粒的流失, 土体的整体孔隙率也在增大, 如图为孔隙率变化曲线。开始时孔隙率为0.2862, 结束时孔隙率为0.2883。

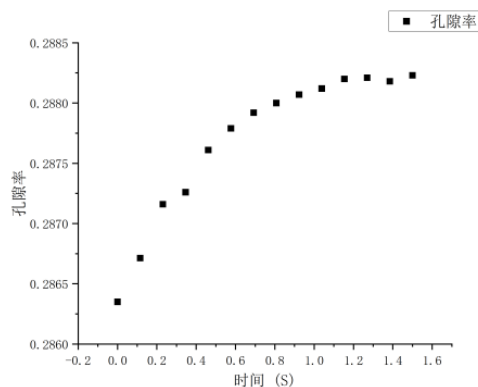


图2 孔隙率变化曲线图

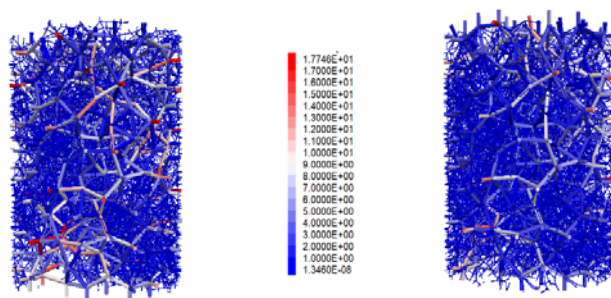


图3 渗流前后力链图

(3) 接触力链。渗流前后细颗粒分布发生了变化, 土体内部的应力也由于颗粒的流失而变化, 接触数由原来的15142变为17111, 但这并不意味着土体的稳定, 而是某些接触较少的颗粒渗流后改变了位置, 并与更多的颗粒相接触。开始时的平均配位数为2.68, 结束时为3.28。颗粒渗流前后的细颗粒应力贡献分别为0.484和0.416。由图可以看出, 渗流之后粗力链颜色变浅, 数值变小, 表明骨架颗粒的部分应力被细颗粒承担。

为了比较渗流前后的力链变化情况, 将接触力进行归一化并绘制其概率密度分布, 渗流前后归一化力概率密度如图。可以发现, 渗流之后峰值较缓并且其余归一化力略有增长, 表明渗流之后颗粒内部接触力发生变化。

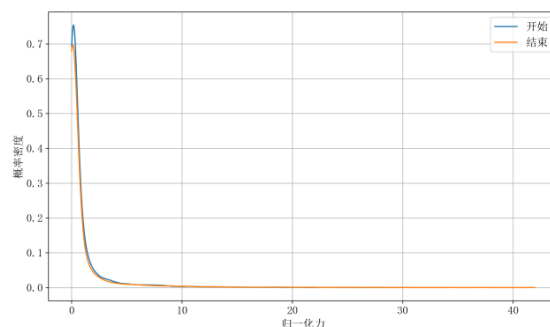


图4 归一化概率密度图

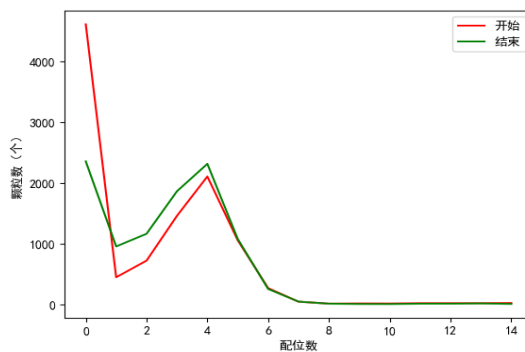


图5 渗流前后连通度比较图

(4) 连通度。图为渗流前后的连通度图, 可以看出, 开始时接触数为0的颗粒即不稳定的颗粒数目占比较多, 渗流之后接触数为0的颗粒数明显减少并且接触数为1至4的颗粒数整体增多, 表明渗流使得不稳定颗粒迁移成为稳定颗粒或流失。

2 双轴压缩模拟

2.1 模拟设置

上述渗流模拟表现了渗流作用下颗粒流失及土体部分细观力学变化的特征, 随后模拟土体中细颗粒流失之后的抗剪切强度的变化特征。采用控制删除细颗粒的方法模拟细颗粒的不同流失量, 然后进行双轴压缩模拟。为了良好的模拟效果, 颗粒采用0.07-0.15m和0.02m两种, 接触模型采用接触粘结模型, 参数见表。先生成颗粒形成土体骨架的大颗粒, 再生成0.02m的相对细颗粒。土体模型其他参数见表。

表一 颗粒体力学参数

法向刚度	切向刚度	摩擦系数	颗粒密度	阻尼系数	抗拉强度 (cb_tenf)	抗剪强度 (cb_shearf)
1.00E+06	5.00E+06	0.5	2300	0.7	5.00E+03	5.00E+03

经过测试, 0.02m的颗粒充当土体中不承担主要应力的颗粒, 在土体受到外部荷载下删除细颗粒, 对土体的宏观形态和土体初始受力状态影响较小。将这种粒径的颗粒作为流失颗粒, 并采用命令流控制删除5%, 10%, 15%的颗粒。

2.2 模拟结果分析

对删除颗粒前和删除不同比例细颗粒后的土体单元进行双轴压缩, 得到偏应力应变曲线。观察曲线可知, 三种围压下的土体在不同删除比例下, 呈现出峰值应力下降的趋势。其中, 随着围压由1e5增加到2e5, 删除颗粒前后的峰值应力下降趋势越来越缓, 当围压为3e5时, 各删除比例下的峰值应力变化很微小。

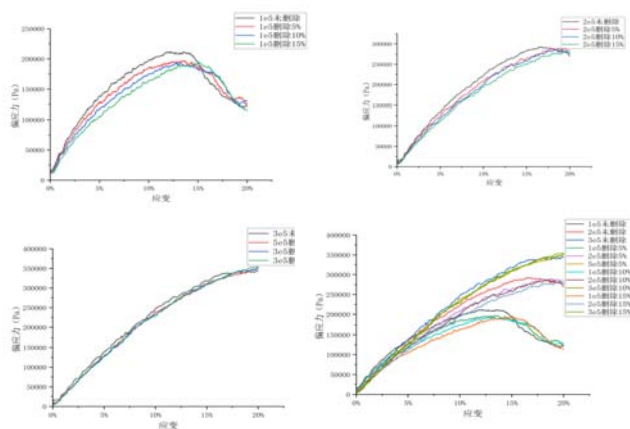


图6 偏应力曲线

峰值应力的变化以及前文的结构及细观力学的变化, 共同表明了颗粒体在渗流以及颗粒流失之后受到了影响, 并且渗流侵蚀的程度不同, 土体力学特征的影响会更为明显, 对坡体稳定性的影响也不同。

3 结论

(1) 土体内部由于颗粒粒径大小不同, 形成了粗颗粒为骨架及细颗粒不稳定的结构特征。

(2) 细颗粒承担了少量的应力, 并且土体骨架中存在允许细颗粒迁移的孔隙, 细颗粒在渗流力作用下容易在土体孔隙中迁移流失, 并且会改变土体的结构和细观力学特性。

(3) 土体在颗粒流失后, 峰值应力会降低, 并且随着围压增大, 峰值应力降低程度越来越小。由细观力学特性和偏应力的变化可以看出渗流对土体强度和坡体稳定性有不同程度的影响。

[基金项目]

西藏大学高水平人才培养计划项目“基于离散元的渗流作用下细颗粒迁移对边坡稳定性的影响研究”(2022-GSP-S009)。

[参考文献]

- [1] 矫滨田, 鲁晓兵, 王淑云. 土体降雨滑坡中细颗粒运移及效应[J]. 地下空间与工程学报, 2005(S1):36-38.
- [2] 王保亮, 李泳, 苟万春, 等. 降雨作用下土体细颗粒迁移特征及其对崩塌的影响[J]. 工程科学与技术, 2017(s2):40-50.
- [3] 杨义, 江兴元, 李阳春, 等. 降雨入渗条件下堆积型滑坡渗流侵蚀过程与稳定性数值模拟——以贵州省下街滑坡为例[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025, 42(01):26-33.
- [4] 丁子玥, 许增光, 曹成, 等. 渗流侵蚀模拟中离散元模型参数影响性分析[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4):143-152.
- [5] 李喜安, 陈文军, 邓亚虹, 等. 渗流潜蚀作用临界发生条件的推导[J]. 水土保持研究, 2010, 17(05):217-221.
- [6] 王明年, 江勇涛, 张艺腾. 渗透侵蚀下砂性土细颗粒流失率预测方法[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6):1704-1712.

作者简介:

杨冰(1998—), 男, 白族, 云南大理人, 硕士在读, 研究方向: 地质工程。