

基于流固耦合分析降雨条件下路堤边坡稳定性

袁仕贵, 唐小军

(云南省铁路集团有限公司, 云南 昆明 650118)

摘要: 为研究降雨条件下铁路路堤边坡稳定性, 基于流固耦合分析路堤边坡土体在不同降雨条件下饱和度、孔隙水压力、有效应力相关参数的变化, 进而分析其对路堤边坡稳定性的影响。研究表明: 随着降雨的持续边坡土体饱和度呈现出先快速上升后趋于稳定的变化特点; 当降雨持时不断增加时, 边坡土体孔隙水压力表呈现出路堤边坡顶部土体呈现出阶段式上升的趋势, 路堤边坡底部变化很小的特点; 土体有效应力则随着降雨的持续由最初的受压逐渐转变为受拉, 从而降低边坡的稳定性。

关键词: 流固耦合; 降雨作用; 路堤边坡; 稳定性

中图分类号: K928 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 08—0149—03

1 引言

铁路路堤是铁路路基的重要形式之一, 路堤边坡的稳定对于铁路的运营安全具有重要作用, 我国大部分区域属于亚热带季风性气候夏季降雨量大对于铁路路堤边坡的稳定有重要影响。目前国内学者和专家对于降雨条件下路基边坡渗流与稳定性进行了大量研究, 主要分为两大类: 一是, 只考虑渗流对土体的影响, 认为雨水入渗导致 c 值与 ϕ 值等土体抗剪强度参数值降低, 或者认为雨水入渗增大土体中的渗透力, 或者认为雨水入渗导致土体基质吸力降低, 从而导致边坡稳定性降低, 如: 毕仲辉等^[1]研究了降雨入渗条件下土体内摩擦角及粘聚力的相关系数, 以及二者对边坡失稳概率的影响; 黄明奎等^[2]以重庆某高填方路堤边坡为研究对象, 分析了强降雨作用下路堤边坡土体的基质吸力、土体强度参数以及填方边坡稳定性的变化情况; 杨欣^[3]以含软弱夹层路堑高边坡为分析对象, 研究了此类边坡在降雨条件下边坡不同土体区域的孔隙水压力及含水量变化情况; 童立^[4]针对有夹层公路边坡降雨条件下的渗流进行分析, 认为夹层渗透性的强弱对于边坡的渗流场有重要影响。二是, 既考虑渗流土体的影响, 也考虑土体对流体的影响, 即基于流固耦合分析降雨条件下边坡稳定。如: 吕雨桦等^[5]通过边坡渗流的应力耦合分析, 研究了降雨条件下非饱和土边坡的渗流场、应力场变化情况, 总结出边坡稳定性变化规律。陈亮胜等^[6]利用多场耦合数值分析方法研究了降雨入渗对边坡渐进式破坏的发展过程。李海亮等^[7]通过综合考虑渗流场与应力场相互耦合作用, 研究分析了降雨入渗条件下非均匀质边坡土体稳定性变化情况。张鸿^[8]通过综合利用离散元与计算流体动力学两种方法进行耦合, 从微观角度分析了煤系类土质边坡

在降雨渗流条件下土体孔隙率及破坏变化规律。

通过以上分析, 目前国内对于降雨条件下边坡渗流、稳定性方面的研究范围较广, 研究也较为深入, 但对于考虑流固耦合分析方法来研究铁路路堤边坡在降雨条件下的渗流及稳定性研究相对较少。因此本文主要基于流固耦合基本方法, 利用有限差分软件 FLCA3D 对降雨条件下, 铁路路堤边坡的渗流及稳定性进行分析。

2 工程概况与建模

研究工点为云南某工业园区新建铁路 DK2+000—DK2+100 路堤段, 该路基段原地貌为典型的构造侵蚀。根据地勘报告内容, 路基原地貌主要分为两层, 覆盖层主要为具有一定膨胀性质的膨胀土及碎石组成, 下部岩层主要为风化、中风化的玄武岩层, 此次建模主要基于有限差分软件 FLCA3D, 本次模拟分析模型以 DK2+040 路基断面为建模对象, 通过把断面延伸 20m, 构建成 3 维分析模型。根据设计与勘察单位提供的断面设计图、地质勘查报告中土层分层及土体性质内容, 利用犀牛软件对典型的 CAD 断面图处理后, 再导入 FLCA3D 软件中, 利用软件自带的建模功能进行模型的构建, 模型如图 1 所示。模型中蓝色区域为风化与中风化玄武岩层, 绿色区域为膨胀土性质的覆盖土层, 红色区域为路堤填土层。模型网格划分根据软件自带建模功能建立均匀大小网格, 网格单元均为六面体网格, 六面体网格具有便于计算、节约内存的优点, 本次模型共建立网格单元 56000 个, 网格节点 60516 个。为监测降雨渗流过程中土体渗流的情况, 在模型中共设置 5 个监测点, 其中监测点 1—监测点 4 位于路堤边坡内, 监测点 5 位于膨胀土覆盖层

内（图1）。

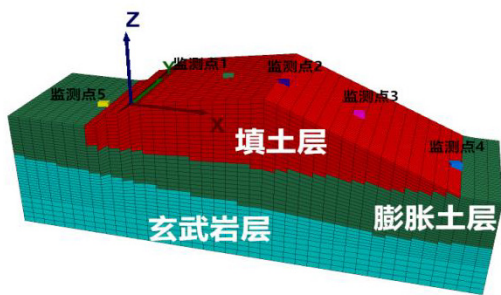


图1 路堤边坡模型

3 基于流固耦合的降雨条件设置

岩土问题的数值模拟与选择较为合适的土体本构模型有重要关系，本次降雨条件路堤边坡采用莫尔-库仑模型（Mohr-Coulomb Model），各土层的物理力学性质如表1所示。模拟边界约束情况为：模型底部为XYZ三个方向进行约束，模型侧面约束其法向方向，模型顶面部分（包括路堤边坡侧面）均设置为自由面，为最大程度还原路堤自然状况，模型采用边界位移约束条件。渗流边界条件设置情况为：模型底面与侧面均设置为不透水面，模型顶面及路堤边坡侧面设置为入渗面。本次降雨模拟中降雨强度设置为70mm/h，降雨时长设置为10h。

表1 各岩土层力学参数参考值

土层	密度 (kg/m ³)	弹性模量 (Gpa)	泊松比	粘聚力 (kpa)	渗透系数 (m/s)	内摩擦角(度)
路堤填土	1960	2.50	0.37	32.5	3.2×10^{-6}	31
膨胀土	1590	0.841	0.37	17	1.0×10^{-9}	12
玄武岩	2020	7.36	0.32	273	1.0×10^{-9}	37

4 渗流场及应力场参数变化

4.1 饱和度变化

路堤边坡在为期10个小时的降雨过程中，各监测点土体饱和度变化及降雨结束时边坡土体饱和度分布情况如图2所示，通过对比研究可以发现：路堤边坡土体各个监测点在降雨过程中饱和度均有不同上升，但监测点位置不同，土体饱和度的变化趋势表现为不同特点。位于路堤顶面的监测点1及监测点2，随着降雨的持续，土体饱和度先表现为随着降雨的持续快速增长，达到峰值点0.62附近后随即表现为下降趋势，之后又表现为

上升当达到第二个峰值点0.5后又表现为下降，随后又表现为小幅度上升，最终稳定在0.3附近，呈现出较为复杂的波动变化趋势；监测点3位于路堤边坡中部区域，土体性质为路堤填土，降雨前期土体饱和度随着降雨的持续，表现为快速增加直到达到土体饱和时不再增加，此后土体一直维持饱和状态；监测点4位于路堤边坡底部区域，土体性质为路堤填土，降雨前期与监测点3一样随着降雨的持续土体饱和度快速增加，但上升速度不及监测点3且相比于监测点3，上升过程中出现明显的一段速度放缓区域；达到土体饱和时间较长，且维持土体饱和的时间也较短；监测点5位于路堤边坡左侧底部区域，土体性质为膨胀土，与监测点4一样前期随着降雨的持续，土体饱和度不断上升，但后期土体饱和度上升速度明显低于监测点4，到降雨结束时土体仍旧没有达到饱和，饱和度的最大值约为0.88。通过对比各监测点土体饱和度变化以及降雨结束时边坡土体饱和度分布情况，可以认为路堤边坡土体饱和度受降雨渗流影响最大的区域为路堤边坡两侧浅表层土体。

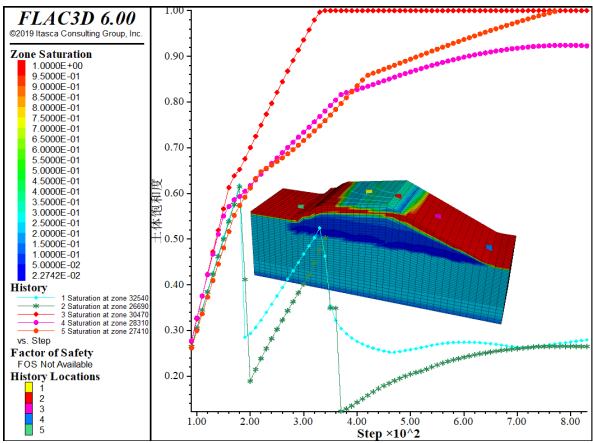


图2 各监测点饱和度及降雨结束时土体饱和度情况

4.2 孔隙水压力变化

通过图3分析可以发现，位于路堤边坡中下部分的监测点3-监测点5土体孔隙水压力降雨开始与降雨结束时相差很小，且在降雨过程中几乎保持不变，表明该区域土体孔隙水压力受降雨的影响很小。而监测点1与监测点2土体孔隙水压力表现为随着降雨的持续，土体孔隙水压力在降雨前期表现为台阶式上升方式，其中监测点1由降雨开始时-200kpa先上升至-80kpa，最后上升到0pa，之后维持不变；监测点2由降雨开始时的-400kpa先上升至-160kpa，再上升至-120kpa，最后

上升至 0kpa，之后维持不变。这表明路堤边坡顶部土体孔隙水压力受降雨影响较大；而路堤底部土体孔隙水压力受降雨影响较小。

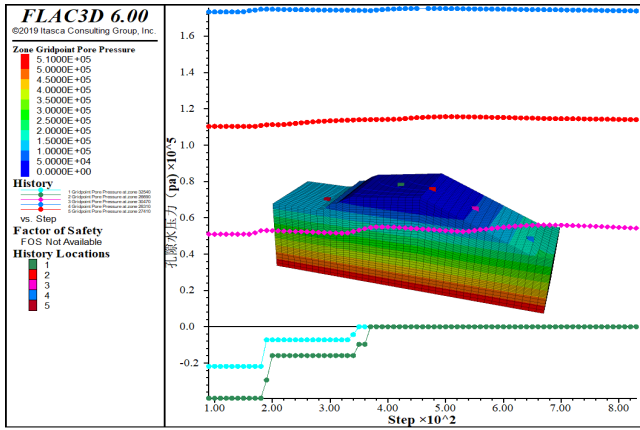


图 3 各监测点孔隙水压力变化图

4.3 有效应力变化

从五个监测点中选取监测点 1 与监测点 2 土体 XX 向有效应力变化情况进行着重分析如图 4 所示，通过对比分析图 4 可以得出：降雨前期监测点 1 级监测点 2 土体 XX 向有效应力由负值快速增加为正值，之后随着降雨的持续呈现出波动式变化，在降雨后期监测点 1 及监测点 2 表现为不同的增长情况，降雨后期位于路堤顶部的监测点 1 表现为随着降雨的继续，土体 XX 向有效应力为正值表现为增加之后又维持稳定；而监测点 2 表现为随着降雨的持续，土体 XX 向有效应力为负值表现为波动式增加，即绝对值越来越小。这表明随着降雨的发展，土体由最初的受压状态逐渐转变为受拉状态，不利于路堤边坡的稳定。

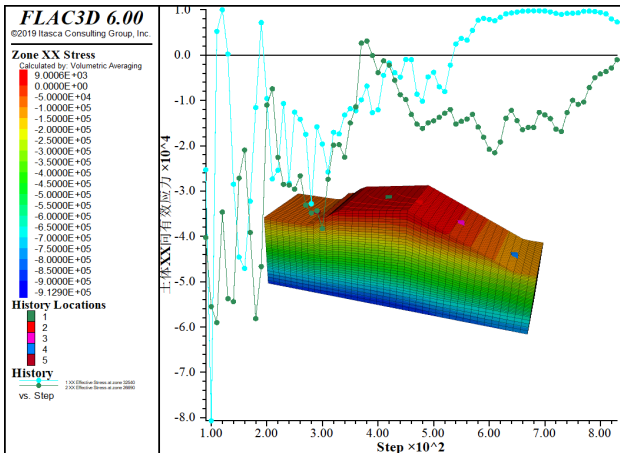


图 4 1-2 监测点 XX 向有效应力变化图

5 结论

通过选取的铁路路堤边坡建立模型，研究其降雨条件下边坡土体的渗流场及应力场特征参数值的变化情况，通过对比分析可以认为：路堤边坡浅层坡面区域在降雨过程中土体饱和度值最高，表明该区域受降雨影响最大；路堤边坡土体孔隙水压力土体表层受到降雨影响较大，路堤边坡底部区域土体孔隙水压力受降雨影响较小；路堤边坡土体在降雨过程中边坡有效应力由降雨前的受压转变为降雨过程及降雨过后的受拉状态，表明降雨导致边坡土体受力状态改变，从而降低边坡的稳定性。通过研究分析可以认为在应对降雨条件下边坡防护时应着重做好坡顶区域与坡面的防雨水入渗，着重做好边坡土体的加固措施。

参考文献：

- [1] 毕仲辉, 翟亚飞, 唐或杰, 崔丙会. 基于有限元强度折减法的降雨入渗基岩型边坡可靠度分析 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(09): 187-192.
- [2] 黄明奎, 马璐. 极端降雨对边坡土体强度的影响及其稳定性分析 [J]. 灾害学, 2021, 36(03): 6-9.
- [3] 杨欣. 降雨入渗条件下含软弱夹层路堑高边坡渗流特性数值分析 [J]. 中外公路, 2020, 40(04): 38-42.
- [4] 童立. 降雨条件下含夹层公路边坡渗流特性分析 [J]. 公路, 2021, 66(06): 37-42.
- [5] 吕雨桦, 梁德贤, 王莹, 黄翔. 降雨条件下非饱和土边坡渗流-应力耦合分析 [J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(02): 318-324.
- [6] 陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰. 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(04): 132-140.
- [7] 李海亮, 黄润秋, 吴礼舟, 方正. 非均质土坡降雨入渗的耦合过程及稳定性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(04): 70-76.
- [8] 张鸿, 张榜, 丰浩然, 吴灿. 基于 DEM-CFD 耦合方法的煤系土边坡失稳机理宏观细观分析 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(04): 63-72.