

基于 ABAQUS 土坡降雨入渗应力应变及稳定性研究

独 敏

(新疆玛纳斯河流域管理局水利管理中心第三水利管理站,新疆 石河子 832000)

【摘 要】 降雨会影响土体的力学参数,通过 ABAQUS 对雨水入渗的瞬态渗流对土坡应力、应变的影响进行研究,以一理想边坡作为案例进行建模与计算,不考虑降雨积水的影响,认为静水压力随深度线性增加,建立 CPE4P 网格进行计算。后处理中,对其渗透率、孔压、横纵向位移、偏应力、塑性应变以及应力路径等作了分析,得出一系列降雨入渗作用下应力、应变及稳定性的相关结论。

【关键词】 降雨;渗流;ABAQUS;失稳;边坡;塑性区

中图分类号: TV211.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-0131(2017)010-0039-05

Study on stress strain and stability based on ABAQUS soil slope rainfall infiltration

DU Min

(No. 3 Water Conservancy Management Station, Xinjiang Manas River Basin Authority Water Conservancy Management Center, Shihezi 832000, China)

Abstract: Rainfall affects the mechanical parameters of soil, the influence of rainwater infiltration transient seepage flow on soil slope stress and strain is studied through ABAQUS. On the basis, an ideal slope is regarded as a case for modeling and calculation. The influence of rainfall and water accumulation is not considered. It is believed that hydrostatic pressure increases linearly with depth, and a CPE4P grid is established for calculation. In the post-processing, the permeability, pore pressure, horizontal longitudinal displacement, deviatoric stress, plastic strain and stress path, etc. are analyzed, and a series of related conclusions of stress, strain and stability under rainfall infiltration action are obtained.

Key words: rainfall; seepage; ABAQUS; instability; slope; plastic zone

土体的抗剪强度等力学参数会随着降雨的作用而降低^[1],空隙水的压力会随着地下水位的抬高而升高^[2-3],造成稳定性的下降^[4]。除此之外,高强度、长时间的降雨会导致暂态饱和区的出现,以此,会导致空隙水压力的升高。基于此,很有必要对雨水入渗情况下瞬态渗流影响下的土坡应力、应变等力学特性进行研究。

降雨入渗作为一种典型的非饱和流固耦合现象,

目前已有较多学者对降雨入渗进行了研究,取得了较多成果^[5-10]。但研究领域多在降雨入渗的影响因素、滑坡、初始含水率、稳定性等层面上的分析,而基于多参数的、多指标的综合分析研究较少。本文从数值模拟角度出发,全面对渗透率、孔压、横纵向位移、偏应力、塑性应变以及应力路径等作了分析,以此更好地为降雨入渗对土坡的稳定性研究做参考与支持。

1 基于 ABAQUS 的降雨入渗计算力学原理及边界条件

1.1 计算原理

土体材料的渗透系数与基质吸力关系为

$$k_w = a_w k_{ws} / \{ [a_w + b_w (u_a - u_w)]^{c_w} \} \quad (1)$$

式中 k_w —— 土体饱和时的渗透系数, 取 $5.0 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (0.018 m/h);

u_w, u_a —— 土体中的水压力、气压, 因坡面与大气接触的原因, 在式中取为 0;

a_w, b_w, c_w —— 材料系数, 本例中分别取为 1000、0.01、1.7。

饱和度随基质吸力的关系式为

$$S_r = S_i + (S_n - S_i) a_s / \{ [b_s (u_a - u_w)]^{c_s} \} \quad (2)$$

式中 S_r —— 饱和度;

S_i —— 残余饱和度, 可取 0.08;

S_n —— 最大饱和度, 取 1;

a_s, b_s, c_s —— 材料系数, 分别取为 1、 5.0×10^{-5} 和 3.5。

值得注意的是, ABAQUS 中, 有效应力的定义为 $\sigma' = \sigma - (\chi u_w + (1 - \chi) u_a)$, χ 简单的取为饱和度 S_r , 将 u_a 赋值为 0, 采用基于有效应力的本构关系, 该本构重点体现了基质吸力对模型的影响, 这与反映黏聚力的强度本构具有较大差异。

1.2 边界条件

降雨入渗的物理过程十分复杂, Larson 与 Mein 研究发现, 通过土壤允许的入渗容量 f_p , 降雨强度 q 以及水力传导系数 k_{ws} 参数的分析, 可以揭示出降雨入渗行为如下:

a. $q < k_{ws}$, 地表径流在该情况下不会发生, 降雨会完全入渗至边坡, 该情况下, 水的入渗率是不变的。

b. $f_p > q > k_{ws}$, 雨水在该情况下全部入渗, 随着入渗度的不断增加, f_p 不断减小, 但该强度下, 降雨强度还未超过允许容量, 因此, 入渗率并不会出现降低的情况, 其仍具有较高的数值。该情况时, 坡面为流量

边界。

c. $q > f_p$, 此时, 降雨强度已经超过了土壤的入渗容量, 因此会出现部分降雨不入渗而形成地表径流的情况。该情况中坡面上的土体为饱和状态的土体, 当达到入渗容量后, 降雨将不断下降。

本文考虑所述第二种情况, 即 $f_p > q > k_{ws}$ 情况, 文中的降雨边界函数用降雨强度 (单位流量) 来表示。同时, 不考虑地表积水的情况, 使分析区域顶面均受到降雨作用, 设置入渗强度和持续时间分别为 20 mm/h 、 66 h 。

2 降雨入渗模型的建立与求解

降雨入渗的模型来自于新疆玛纳斯河边坡。新疆玛纳斯河位于新疆维吾尔自治区准噶尔盆地南部, 源出天山北麓北流注入玛纳斯湖, 长约 450 km , 上游水急多峡谷, 下游平原坦荡, 河曲发育。本文所建立的数学模型即来自于新疆玛纳斯河边坡, 为了便于研究, 将其简化成理想边坡, 该边坡坡角为 40° , 坡高为 30 m , 其初始地下水位位于坝脚处。土体的弹性模量为 10 MPa , 泊松比为 0.3, 黏聚力 c' 为 15 kPa , 摩擦角 φ' 为 30° , 以此进行降雨入渗模型的建立。

基于上文降雨入渗计算力学原理及边界条件的选择, 进行有限元模型的建立。所建立的有限元模型如图 1 所示, 其 element type 选择为 CPE4P, 渗透系数随饱和度以及基质吸力随饱和度的变化可根据公式 (1) 和公式 (2) 得到。

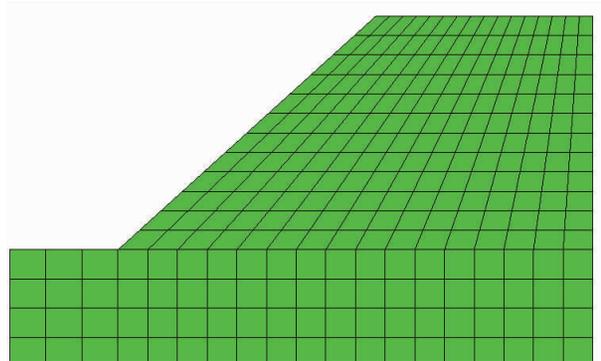


图 1 有限元网格模型

利用 distribution 定义孔压边界条件, 在左、右两侧

水位以下的边界上设置随深度线性增加的静水压力孔,按照式(3)进行设置:

$$p = 10(10 - Y) \quad (3)$$

分析步的时间步长为 72h,以 0.1 作为初始的时间增量步,将孔压设定为沿深度线性关系增加,降雨强度的时程赋值曲线 Amp-1 见下表。

时间和幅值的大小关系表

时间/h	0	24	48	72
幅值大小	0	1	1	0

对所研究的坡顶区域的降雨入渗边界条件进行设置,嵌入有效应力有限元文件,即可进行该模型的降雨入渗有限元分析。

3 降雨入渗后的结果分析

降雨发生后 46h、72h 的孔压等值线云图见图 2、图 3。由图 2、图 3 可知:在降雨入渗发生后,孔压的分布云图与初始状态发生显著差异,在坡顶部范围以下的吸力区发生范围减小的现象,基质吸力参数较初始状态减小;随着降雨时间的增加,法向状态延长,饱和度也随之增大,孔隙水压力参数也随之增大。随着降雨时间的增加,浅层土体的基质吸力不断减小甚至消失。

而随着降雨的减少直至停止,在时间不断延长的情况下,饱和度出现逐渐减小的情况,孔隙水压力也随之逐渐减小,土体浅层的基质吸力出现逐渐增加的情况。

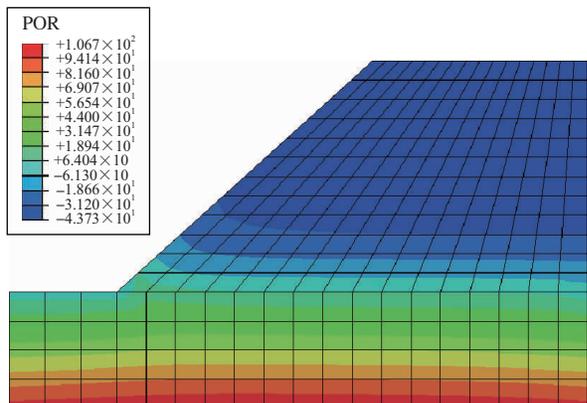


图 2 降雨发生后 46h 的孔压云图

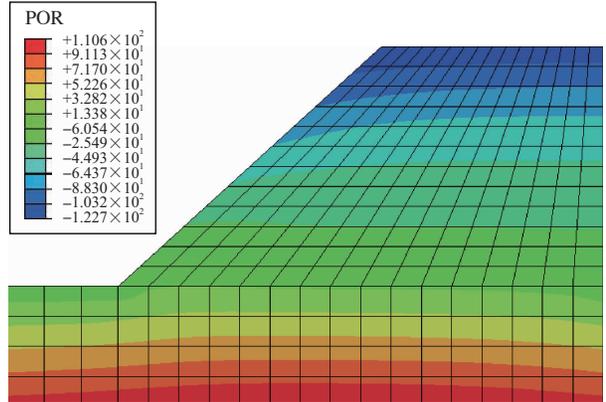


图 3 降雨发生后 72h 的孔压云图

图 4 与图 5 是降雨发生 72h 后的水平位移及沉降的等值线云图。由图 4 和图 5 可知:发生在坡脚的最大水平位移是 9.55mm;土坡的中部发生最大沉降现象,沉降位移是 4.06mm。由于初始设置的分布条件,导致坡顶没有出现最大沉降。

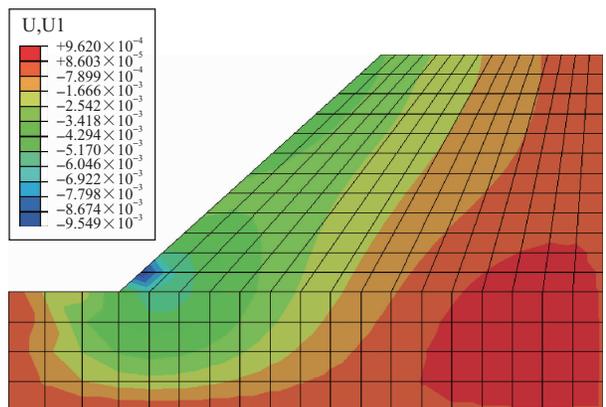


图 4 降雨 72h 后的水平位移云图

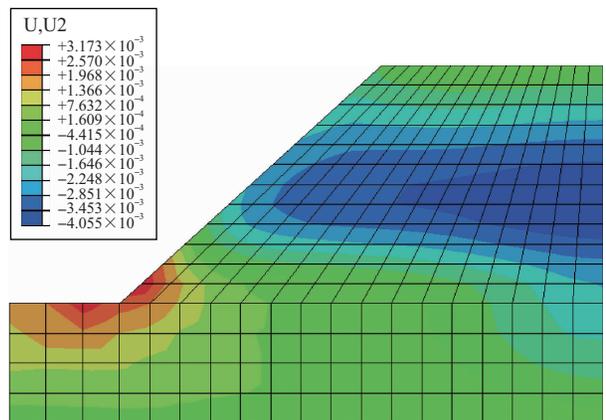


图 5 降雨 72h 后的沉降云图

对坡顶进行单独分析,当降雨入渗发生后,吸力出现降低情况,孔压出现增加情况,有效应力出现减小情况,发生了卸载回弹现象。除此之外,降雨入渗的持续,使得土体容重和含水率增加,进而使得沉降和应力均出现增加现象。

位移矢量图如图6所示。从图6可以看出,降雨入渗发生后,边坡出现明显的滑动变形趋势,由此可知,边坡稳定性逐渐变低。

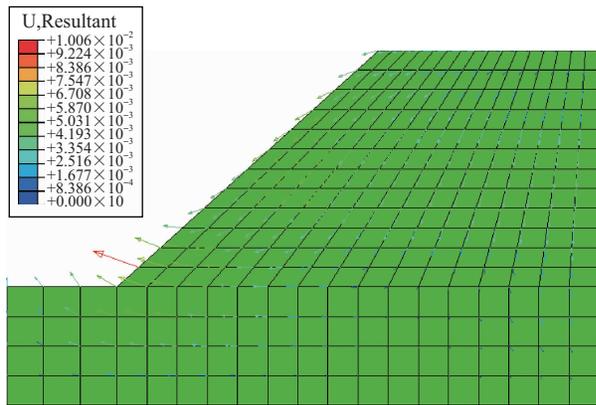


图6 降雨72h后的位移矢量图

图7和图8是降雨入渗23h及72h后的等效塑性应变云图。由图7和图8可知,坡脚浅层由于降雨入渗作用首先出现塑性区,且塑性区沿坡面会不断地向上扩展。

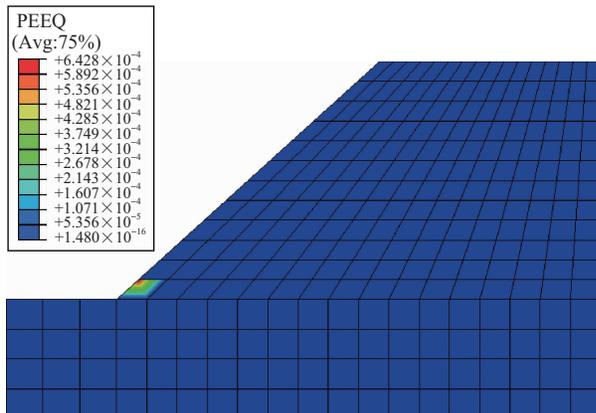


图7 降雨入渗23h的等效塑性应变云图

选取塑性区中心点,给出等效塑性应变时程曲线,如图9所示。由图9可见,当 $t=20h$ 时,塑性区出现在坡脚,随后降雨入渗时间快速增加,当时间增加到50h后,降雨情况开始减小,此后,塑性区便不再向后扩展,

等效塑性应变随之也不再增加,保持稳定不变。

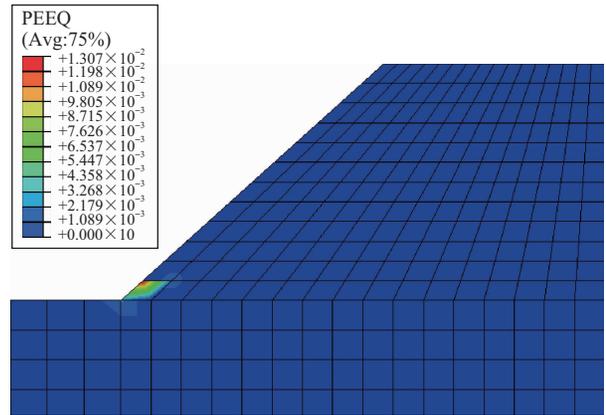


图8 降雨入渗72h的等效塑性应变云图

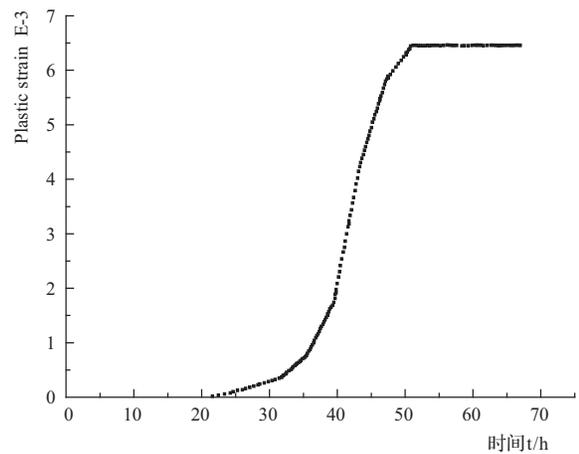


图9 塑性中心单元等效塑性应变时程曲线

利用ABAQUS提供的combine函数,绘出塑性区中心点和非塑性区中心点的有效应力路径,如图10和11所示。

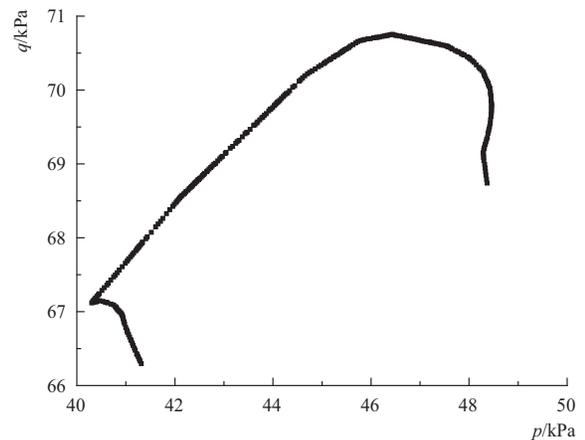


图10 塑性中心单元有效应力路径曲线

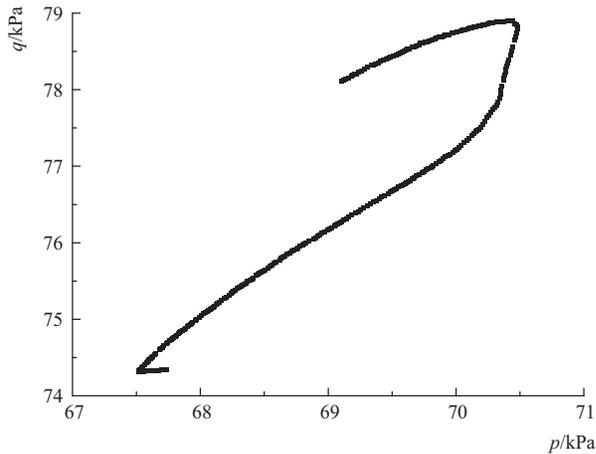


图 11 非塑性区单元有效应力路径曲线

由图 10 和图 11 可知,塑性中心单元和非塑性区中心单元的有效应力路径明显出现了不同的力学特征。对于出现在坡脚的塑性中心单元(见图 10),由于降雨入渗,孔压开始增加,有效平均应力出现减小的情况,而减小到一定阈值后,有效应力路径表现出屈服现象,其处于屈服面位置,此时,应力路径向左下方逐渐下移,其沿着摩尔库仑强度包线形成的屈服面朝左下方移动,当降雨量减小后,移动停止,此时,吸力开始增加,孔压开始减小,在有效应力开始增大后,其逐渐远离屈服面。

而对于非塑性单元(见图 11),其处于土方内部,上方的单元吸水后容重增加,导致塑性区单元的平均有效应力和偏应力都是增加的,直至降雨的后期,接近降雨结束时平均有效应力和偏应力都有所下降,即降雨入渗作用下主要是边坡浅层可能会出现失稳现象,该区域具有较高的失稳倾向性。

4 结 语

基于 ABAQUS 软件及其计算力学原理,以理想边坡为研究对象,对土坡降雨入渗现象进行了非饱和和流固耦合分析,主要结论为:

a. 在降雨入渗的作用下,位移矢量图表明,边坡有明显的滑动变形的趋势,边坡稳定性由此逐渐降低。

b. 坡脚浅层会首先出现塑性区,并沿着坡面不断向上扩展。

c. 塑性点和非塑性点的有效应力路径表现出了不同的特征。◆

参考文献

- [1] 李振宇. 利用地面核磁共振研究滑坡地下水特征及稳定性[D]. 北京:中国地质大学, 2004.
- [2] 汪仕旭. 降雨入渗对土坡稳定性的影响[D]. 广州:广东工业大学, 2011.
- [3] 曾耀. 水库库岸老滑坡复活过程中地下水作用机制研究[D]. 北京:中国地质大学, 2010.
- [4] 季洪涛. 基于突变理论的土石坝坝坡安全稳定分析[J]. 水利建设与管理, 2015(12): 24-34.
- [5] 张家明. 植被发育斜坡非饱和带土体大孔隙对降雨入渗影响研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
- [6] 周家文, 徐卫亚, 邓俊晔, 等. 降雨入渗条件下边坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2008, 39(9):1066 -1073.
- [7] 蒋中明, 熊小虎, 曾铃. 基于 FLAC~(3D)平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(30): 855-861.
- [8] 陈洪松, 邵明安, 王克林. 土壤初始含水率对坡面降雨入渗及土壤水分再分布的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 25(1):44-47.
- [9] 朱伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11):1873-1879.
- [10] 王协群, 张有祥, 邹维列, 等. 降雨入渗条件下非饱和路堤变形与边坡的稳定数值模拟[J]. 岩土力学, 2010, 31(11):3640-3644.