

降雨诱发非饱和土地下水位上涨的耦合效应

李滨铎¹, 吴礼舟¹, 许强¹, 李海亮²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 四川省交通运输厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要:降雨容易诱发地下水位上涨,从而引发多种危害.降雨诱发土体变形与渗流耦合,目前的研究多集中在土体耦合各场的变化规律,对土体水力耦合过程地下水位变化规律及影响因素研究较少.基于渗流理论、弹性理论及VG土-水特征曲线模型,建立了二维非饱和土体的水力耦合的数值模型,从水力耦合的角度去研究降雨诱发地下水位上涨.该模型突破了饱和时的渗透系数是常量的局限,且适用于任意的土-水特征曲线表达式.通过算例对二维非饱和土渗流-变形耦合模型展开分析,并深入探讨了地下水位升高的耦合效应.计算结果表明:降雨强度、初始条件以及饱和渗透系数为变量等因素对地下水位上涨有显著的影响;位移最大值出现在地下水位以上,地下水位以下位移变化梯度相对较大.

关键词:非饱和土;地下水位;渗流-变形耦合;降雨入渗;数值分析

中图分类号:TU46 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2014)03-0053-06

Coupling effect of water table rising in unsaturated soil due to rainfall infiltration

LI Bine¹, WU Lizhou¹, XU Qiang¹, LI Hailiang²

(1. State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu 610059, China;

2. Sichuan Provincial Transport Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: Rainfall easily induces water table rising and leads to a variety of hazards. Infiltration and deformation are coupled during rainfall, while most of the current study focused on changes in seepage field and stress field and there are few studies on the water level and its influence factors. Based on the seepage theory, elastic theory and VG model, the two-dimensional hydro-mechanical model of unsaturated soil slopes was established. The water table rising was studied under rainfall condition based on the hydro-mechanical coupled theory. The model considered not only any soil-water characteristic curve, but also the variation of the coefficient of permeability at saturation. The two-dimensional hydro-mechanical model was analyzed through examples, and the coupling effect of water table change was deeply researched. The results indicate that the effects of rainfall intensity, initial conditions, and the saturated hydraulic conductivity have a great influence on the water table rising. The maximum displacement appear above the underground water level, the displacement gradient is bigger below the water table.

Key words: unsaturated soil slope; water table; coupled seepage and deformation; rainfall infiltration; numerical analysis

近年来,强降雨等极端气候频繁发生,强降雨诱发地下水位上涨,容易引发松散斜坡破坏,基坑

边坡失稳,地表过大沉降,对周围的建筑物及地下管线造成破坏等.地下水位上升与伴随的地下水渗

收稿日期:2014-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41172280, 41272005);四川省杰出青年学术技术带头人计划项目(2012JQ0007);四川省教育创新团队项目

通信作者:吴礼舟(1975-),男,安徽安庆人,博士,教授,主要从事岩土工程研究. E-mail: cewulz@gmail.com

流导致土体应力状态的变化是造成这些危害的原因^[1]. 而目前的研究大多侧重于土体内的渗流场和应力场的变化规律,对降雨作用下地下水位的上涨规律探讨较少,从水-力耦合分析的角度上探讨研究降雨条件下非饱和土中地下水位上涨规律,在评定和防治暴雨次生灾害、水利工程以及农林水土保持等多种领域都具有重要意义.

降雨引起土体水位变化的研究引起了国内外众多学者的兴趣,学者们通过试验以及数值分析等手段,研究了降雨条件下水位上涨的规律,以及水位上涨对土体变形影响^[2-4]. 对于渗流-变形耦合问题,目前国内外研究的焦点是如何定量地描述非饱和土中流体运动和骨架变形的相互作用和相互影响^[5]. 国内外学者也提出了多种非饱和土的多场耦合模型,给出了解析解和数值解的结果,研究了各场相互影响的变化规律,并扩展到实际的应用^[6-8].

本文基于渗流理论、弹性理论并采用 VG 模型得到二维非饱和土的渗流-变形耦合控制方程组,突破了 Gardner 模型和饱和时渗透系数 k_s 为常数的局限. 根据非饱和土渗流-变形耦合模型,采用有限元研究降雨入渗条件下非饱和土带水位上涨规律及其流-固耦合效应,并分析参数对水位上涨的影响.

1 van Genuchten 模型

van Genuchten 提出的土-水特征曲线模型是比较经典的模型之一. VG 模型体积含水量 θ 表达为

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha h)^n]^m}. \quad (1)$$

式中, θ 为土的体积含水量; h 为压力水头, m; α , m , n 均为经验拟合参数, $m = 1 - 1/n$; θ_r 土的残余体积含水量; θ_s 为土的饱和体积含水量.

相应的非饱和土渗透系数为

$$k = k_s S_e^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - S_e^m)^2]. \quad (2)$$

式中, S_e 为有效饱和度, $S_e = 1/[1 + (\alpha h)^n]^m$; k 为非饱和土渗透系数, m/s; k_s 为饱和土渗透系数, m/s, 实际上 k_s 不是一个定值, 是体积应变的函数^[9]

$$k_s = k_{s0} \frac{(1 + \frac{\varepsilon_v}{n_0})^3}{1 + \varepsilon_v}. \quad (3)$$

式中, k_{s0} 为饱和土初始渗透系数, m/s, 是个恒定的值; ε_v 为体积应变; n_0 为初始孔隙率.

2 非饱和土流-固耦合控制方程

在建立非饱和土流-固耦合模型时基于以下假设: 1) 土体是均匀的弹性材料; 2) 土结构可以变形, 水不可压缩; 3) 不考虑土-水特征曲线的滞后特性; 4) 土体中的孔隙气压力为一定值.

2.1 静力平衡微分方程

根据静力学理论, 在平面 xoy 直角坐标系中, 单元土体的平衡微分方程可表达为

$$\sigma_{ij,j} + f_{bi} = 0. \quad (4)$$

式中, σ_{ij} 为土体的总应力张量; $\sigma_{ij,j}$ 为总应力张量对坐标轴 j 的偏导数; f_{bi} 为体积力, kN/m³.

根据 Bishop^[10] 提出的有效应力原理, 有效应力可以表达为

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - [S_r u_w + (1 - S_r) u_a] \delta_{ij}. \quad (5)$$

式中, σ'_{ij} 为土体有效应力张量; S_r 为土体中水的饱和度, $S_r = \theta/\theta_s$; δ_{ij} 为柯氏常数张量.

基于假定 4), 并假定土体总应力不随时间变化, 在平面二维问题中, 有效应力随时间变化的关系可表达为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma'_x}{\partial t} = -\frac{\partial (S_r u_w)}{\partial t}; \\ \frac{\partial \sigma'_y}{\partial t} = -\frac{\partial (S_r u_w)}{\partial t}. \end{cases} \quad (6)$$

根据弹性力学理论, 结合有效应力原理, 在平面应变问题中, 土体骨架本构方程可表达为

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1+v}{E} [(1-v)\sigma'_x - v\sigma'_y]; \\ \varepsilon_y = \frac{1+v}{E} [(1-v)\sigma'_y - v\sigma'_x]. \end{cases} \quad (7)$$

式中, v 为土体的泊松比; E 为土体的弹性模量, kPa.

在平面应变问题中, 单元土体的体积应变 $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y$, ε_x , ε_y 分别为 x , y 方向的正应变. 将式 (7) 代入体积应变 ε_v 的表达式, 并对时间 t 求偏导数, 结合式可以得到:

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{-2}{C} \frac{\partial (S_r u_w)}{\partial t}. \quad (8)$$

式中, $C = \frac{E}{(1+v)(1-2v)}$.

2.2 渗流微分方程

二维的 Richards 方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \left(1 + \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (9)$$

式中, k_x, k_y 分别为 x, y 坐标轴方向上的渗透系数, m/s ; t 为降雨持续时间, s .

当土体处于非饱和状态时,土中水的体积变化与土体体积应变以及基质吸力有关 Dakshanamurthy 等提出非饱和土中的液相本构方程可表达为^[11]

$$\theta = \beta \varepsilon_v + \omega (u_a - u_w). \quad (10)$$

式(10)中的系数 β, ω 可用体积变化模量 H 和 R 来表示:

$$\beta = \frac{E}{H} \frac{1}{1 - 2\nu}; \quad (11)$$

$$\omega = \frac{1}{R} - \frac{3\beta}{H}. \quad (12)$$

式中, H 为与压力水头相关的土体体积变化模量, kPa ; R 为与压力水头相关的水体积变化模量, kPa , $1/R$ 表示土-水特征曲线的斜率. 假设 H 等于常数, R 为变量, 则

$$\frac{1}{R} = \frac{\partial \theta}{\partial \psi} = \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial \psi} = (\theta_s - \theta_r) m \alpha n S_e^{1 + \frac{1}{m}} (-\alpha h)^{n-1} \left(-\frac{1}{\rho_w g} \right). \quad (13)$$

式中, ψ 为基质吸力, kPa .

式(10)两端各项对时间 t 求偏导, 并将式代入后可得到考虑土体变形和压力水头变化引起水体积含量变化的表达式:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\rho_w g \left\{ \frac{2\beta_0}{C} \left[S_r + h \frac{\partial S_r}{\partial h} \right] + \omega_0 + h \frac{\partial \left(\frac{1}{R} \right)}{\partial h} \right\} \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (14)$$

式中, S_r 为土体饱和度, $S_r = \frac{\theta}{\theta_s} = \frac{\theta_r}{\theta_s} + (1 -$

$$\frac{\theta_r}{\theta_s}) S_e.$$

在平面直角坐标系中, 将式(14)代入式(9), 得到考虑流-固耦合的渗流控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \left(1 + \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right] = -\rho_w g \left\{ \frac{2\beta_0}{C} \left[S_r + h \frac{\partial S_r}{\partial h} \right] + \omega_0 + h \frac{\partial \left(\frac{1}{R} \right)}{\partial h} \right\} \frac{\partial h}{\partial t}. \quad (15)$$

式(15)中去掉应变项, 即为非饱和土渗流的非耦合控制方程.

3 算例 1

算例 1 对一个矩形土体模型进行了降雨条件下入渗分析, 对比了耦合和非耦合的计算结果, 分析了各参数对降雨条件下非饱和和地下水水位上涨的影响.

3.1 算例概况

二维的土体模型如图 1.

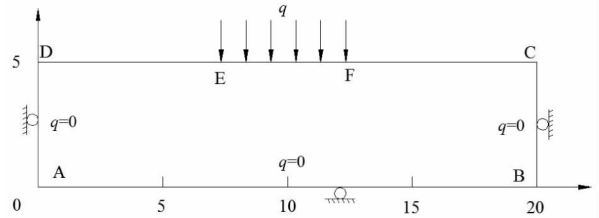


图 1 矩形土体模型 (m)

表 1 为算例 1 选用的非饱和土参数, 表 2 为算例 1 土体的基本物理力学参数^[8].

表 1 非饱和土参数

θ_s	θ_r	$k_{s0}/(m/s)$	α/m^{-1}	n_0	q/k_{s0}	n	m
0.4	0.01	1×10^{-6}	0.01	0.35	0.9	2	0.5

表 2 土体基本物理力学参数

E/MPa	ν	$\gamma/(kN/m^3)$	$\gamma_w/(kN/m^3)$	H/MPa
10	0.3	18.0	10.0	10

边界条件: EF 流量边界 $q = \lambda k_{s0}$, DE, CF 为零流量边界, 且上边界 CD 为自由边界; 下边界 AB 为零流量边界, 且为固定端; 左边界 AD 与右边界 BC 为不透水边界, 且为固定端.

初始条件: $h = -y$, 这里 y 为平面纵坐标.

图 2 为算例 1 的网格划分图, 共划分 512 个三角形单元. 计算选取的时间步长为 0.1 h.

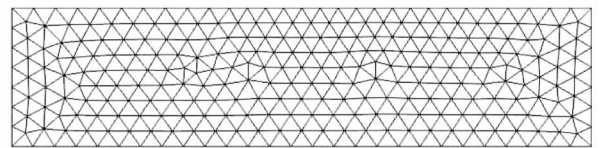


图 2 算例 1 网格划分图

3.2 q/k_s 的影响

图 3 为 q/k_s 取 0.3, 0.6, 0.9 情况下降雨 10 h 地下水水位分布. (a) 没有考虑耦合效应, 而 (b) 分析了耦合作用. 从图 3 中可以看出 q/k_s 值对地下水

位分布都有较大的影响。 q/k_s 的值越大,耦合与非耦合情况下吸力散失的越快,地下水位增长越快.对比耦合和非耦合的结果,非耦合地下水位增长更快,这是由于 H 值为正值(湿陷性土),考虑耦合效应情况的变化总是慢于非耦合情况^[7].降雨过程中,地下水位最高点出现在土体中间,非耦合与耦合情况下地下水位的差异随着 q/k_s 的增大而变得显著.

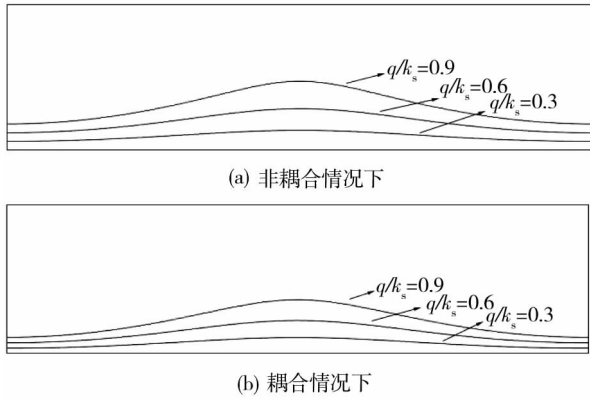


图3 q/k_s 值对地下水位分布的影响($t=10\text{ h}$)

3.3 k_s 的影响

饱和渗透系数 k_s 实际上不是一个定值,是体积应变的函数,即式. k_s 变化对地下水位的变化也有一定的影响.图4为考虑 k_s 变化和不变两种情况下降雨10 h和降雨17 h地下水位分布图.考虑 k_s 变化对土体地下水位的影响与降雨时间有关, $t=10\text{ h}$, k_s 变化与 k_s 不变的情况下地下水位几乎没有差别, $t=17\text{ h}$, k_s 变化与 k_s 不变在土体中部有较小差别,最高水位线差值在 $x=10\text{ m}$ 处,差值为0.14 m.随着降雨时间的增加,考虑 k_s 变化对地下水位的影响变得显著,但都影响较小.对于雨水较慢渗入的土体两侧, k_s 的影响十分微弱.

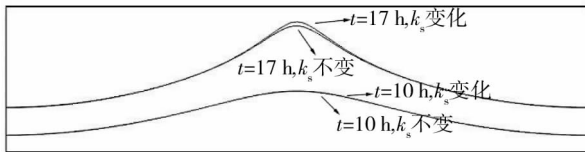


图4 k_s 不同对应的地下水位分布图($t=10\text{ h}, 17\text{ h}$)

3.4 初始条件的影响

图5为不同初始条件(h 分别取 $-0.3y$, $-0.6y$ 和 $-y$)下非耦合和耦合地下水位分布图($t=4\text{ h}$).从图5可以看出,初始条件对降雨过程中

地下水位分布产生重要影响.水头初始值的绝对值越小,耦合与非耦合情况下地下水位增长越快,降雨入渗期间,相同时刻地下水位随初始水头绝对值的减小而升高.初始压力水头为 $-0.3y$ 时耦合与非耦合最高水位差值为0.49 m,初始水头为 $-0.6y$ 时最高水位差值为0.29 m,初始水头为 $-y$ 时最高水位差值为0.23 m.降雨初期,在相同时刻,耦合与非耦合地下水位的差异随初始水头的绝对值的增大而减小.

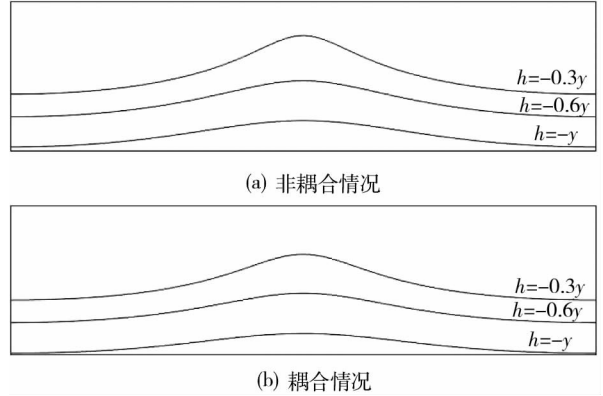


图5 不同初始水头对地下水位分布的影响($t=4\text{ h}$)

4 算例2

算例2考虑实际工程,基于某高速公路中典型的公路填方剖面^[12],并考虑了耦合作用,分别对降雨强度小于土壤入渗能力和降雨强度大于土壤入渗能力2种不同的情况进行非饱和降雨入渗分析.

4.1 算例概况

图6为填方路基土坡模型,初始地下水埋深2 m,路基填方高度4 m.裸露坡面及地面为降雨条件;路面为不透水面,路基填土及下卧层主要为弱膨胀性粉质粘土.

初始条件:初始地下水位在 -2 m 的位置,初始压力头分布为: $h = -y - 2$.

边界条件:底边界和左右边界均为不透水边界且为固定端,坡顶为不透水边界.对于坡面和坡前部分的入渗边界分为2种情况:1)当降雨强度小于土壤入渗能力时,为定流量边界,对于坡表,表达为 $q = \lambda k_{s0} \cos \alpha$,其中 α 边坡角度,对于坡前,表达为 $q = \lambda k_{s0}$;2)当降雨强度大于土壤入渗能力时,降雨不完全入渗,产生降雨径流,若再忽略径流深度,边界条件可视作为定水头边界,可简化表达为 $h = 0$ ^[14].算例2分别对这2种情况进行了非饱和土降

雨入渗分析.

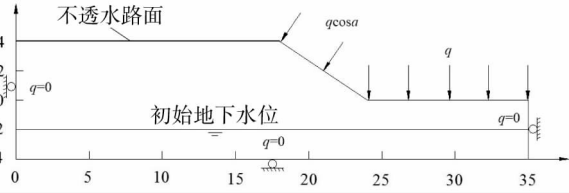


图6 填方路基土坡模型(m)

非饱和和渗透系数采用式(2),对于耦合的情况,考虑饱和渗透系数 k_s 是个变化量,即式(3).算例2的非饱和土降雨分析的计算参数见表3,表4为算例2的物理力学参数^[12].

表3 非饱和土参数

θ_s	θ_r	$k_{s0}/(m/s)$	α/m^{-1}	n_0	q/k_s	n	M
0.43	0.08	6.6×10^{-8}	0.01	0.35	0.8	2	0.5

表4 土体基本物理力学参数

E/MPa	ν	$\gamma/(kN/m^3)$	$\gamma_w/(kN/m^3)$	H/MPa
10	0.3	18.0	10.0	10

图7为算例2的计算的网格图,共划分588个三角形单元.计算选取的时间步长为0.1h.

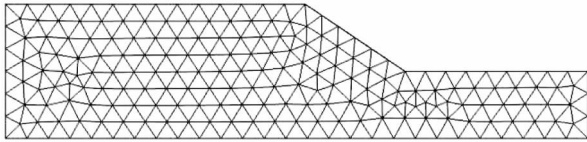


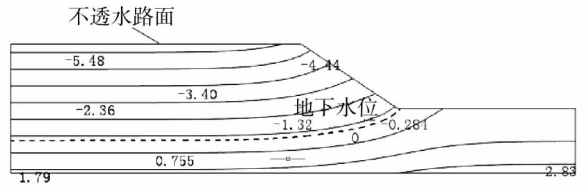
图7 算例2网格划分图

4.2 算例结果及分析

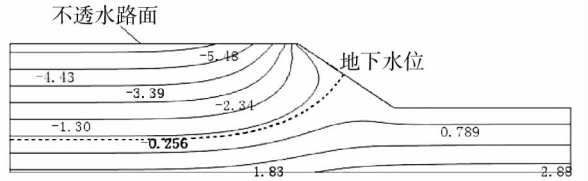
图8为降雨强度小于土壤入渗能力和降雨强度大于土壤入渗能力时压力水头等值线分布($t = 10 d$).从图8中可以看出,坡角处地下水位抬升较快,由于坡顶为不透水路,路面底部的水位几乎没有上涨.地下水以上,吸力逐渐消散,压力头绝对值逐渐减小,地下水以下压力水头为正值.对比(a)和(b)可以发现,降雨强度大于土壤入渗能力情况下地下水位上涨更快.在地下水以上,降雨强度大于土壤入渗能力情况下的压力头绝对值小于降雨强度小于土壤入渗能力的情况,吸力消散得更快.

图9为降雨强度小于土壤入渗能力和降雨强度大于土壤入渗能力时总位移图($t = 10 d$).从图9中可以看出,2种情况下最大位移均出现在坡顶前

缘,且在地下水位以上.地下水位以下的位移等值线分布较密,位移变化的梯度相对较大,地下水位以上的位移变化的梯度稍小.对比2种情况,降雨强度大于土壤入渗能力情况下的位移最大值更大.

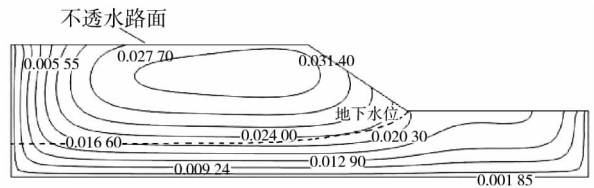


(a) 降雨强度小于土壤入渗能力的情况

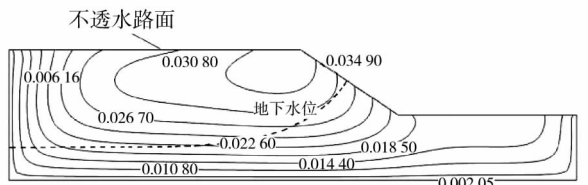


(b) 降雨强度大于土壤入渗能力的情况

图8 $t = 10 d$ 不同降雨强度的压力水头等值线和地下水位分布(m)



(a) 降雨强度小于土壤入渗能力的情况



(b) 降雨强度大于土壤入渗能力的情况

图9 $t = 10 d$ 不同降雨强度的总位移图分布(m)

5 结论

1)在降雨入渗阶段,考虑耦合的地下水位上涨要落后于不考虑耦合的地下水位上涨($H > 0$). q/k_s 值越大,地下水位上升越快,非耦合与耦合情况下地下水位的差异随着 q/k_s 的增大而变得显著.

2)饱和渗透系数 k_s 变化对非饱和土降雨入渗产生影响,随着降雨时间的增加, k_s 变化对地下水位的影响在局部(如对称轴的中心)变得明显.对于土体两侧, k_s 的影响非常微弱.

3)初始条件对降雨过程中地下水位分布产生

重要的影响,也对耦合效应产生影响.初始压力水头的绝对值越小,地下水位抬升越快.耦合效应引起的地下水位的差异随初始压力水头的绝对值的增大而减小.

4)对于2种不同降雨强度的情况,降雨强度大于土壤入渗能力情况下地下水位上涨更快,吸力消散更迅速;边坡最大位移在地下水位以上,地下水位以下位移变化的梯度相对较大,地下水位以上稍小.

5)非饱和土流-固耦合模型分析是基于一种较为理想化的模型,假定土体中的孔隙气压力为一定值.实际上忽略了气体对雨水入渗的影响,而土体内部的气体对降雨入渗也有一定的影响,边坡高度也会影响到地下水位的上涨情况,这些将在下一步的研究中进行讨论.

参考文献:

- [1] 明海燕,李相崧,张瑞华. 地下水位上升引起斜坡变形的完全耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 510-516.
- [2] Reto S, Matthias B, Hans R S, et al. Effect of rising water table in an unsaturated slope[J]. Engineering Geology, 2010(114): 71-83.
- [3] Upadhyaya A, Chauhan H S. Water table rise in sloping aquifer due to canal seepage and constant recharge[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(3): 160-167.
- [4] Kim J M. A fully coupled finite element analysis of water - table fluctuation and land deformation in partially saturated soils due to surface loading[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000(49): 1001-1119.
- [5] 陈正汉,卢再有,朱元清. 非饱和土的理论 and 实践[J]. 力学与实践, 2001, 23(5): 8-15.
- [6] 孙德安,陈振新. 非饱和上海软土水力和力学特性耦合弹塑性模拟[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 16-20.
- [7] 吴礼舟,张利民,黄润秋,等. 非饱和土中变形与渗流耦合的一维解析及其参数分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1450-1455.
- [8] Cho S E, Lee S R. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28: 185-208.
- [9] 陈成意,宋修海. 各向异性弹性孔隙介质中的热-流-变形耦合模型[J]. 兰州理工大学学报, 2009, 35(4): 70-73.
- [10] Bishop A W. The principle of effective stress[J]. Teknisk Ukeblad, 1959, 106(39): 113-143.
- [11] Dakshanamurthy V, Fredlund D G, Rahardjo H. Coupled three - dimensional consolidation theory of unsaturated porous media[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Expansive Soils. New York: Society of Civil Engineering, 1984.
- [12] 李守德,王保田,张福海,等. 降雨入渗与蒸发过程中非饱和土边坡土体吸力[J]. 水力水运工程学报, 2005(3): 31-36.