

文章编号: 1000-7598 (2011) 08-2391-06

成层非饱和土渗流的耦合解析解

吴礼舟¹, 张利民², 黄润秋¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治国家重点实验室, 成都 610059; 2. 香港科技大学 土木系, 香港 九龙)

摘 要: 成层土在工程中很常见, 研究降雨过程中成层非饱和土的渗流-变形耦合对非饱和土土力学的发展具有重要的意义。由流体质量守恒, Darcy 定律和 Lloret 等的非饱和土本构模型可得到成层非饱和土渗流-变形耦合的控制方程。采用 Gardner 的非饱和土的渗透系数公式以及 Boltzman 模型, 基于 Laplace 变换得到耦合方程的解析解。解析及其参数分析表明, 渗流和变形耦合是具有时间效应的。与吸力变化相关的土的模量 F , 对成层土的孔隙水压力分布有明显影响。两层土的 F 差异越大, 孔隙水压力消散得越慢, 耦合效应越不显著。增大表层土的 F 值有利于降低耦合效应。成层土饱和和体积含水率变化对吸力变化产生有限的影响。

关 键 词: 非饱和土; 渗流和变形; 耦合; 成层土; 降雨入渗

中图分类号: TU 46⁺2

文献标识码: A

Analytic solution to coupled seepage in layered unsaturated soils

WU Li-zhou¹, ZHANG Li-min², HUANG Run-qi¹

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

2. Department of Civil and Environmental Engineering, HongKong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: Layered soil such as landfill and cracked soils are often found in engineering. Its coupled infiltration and deformation during rainfall is significant for development of unsaturated soil mechanics. Based on fluid mass conservation, Darcy's law, and the constitutive model proposed by Lloret et al., coupled governing equations for seepage and deformation in unsaturated soils are obtained. The unsaturated coefficient of permeability is expressed using Gardner's model and the water retention characteristics are expressed using Boltzman's model. The analytic solution to the coupled equation is developed by Laplace transformation. The analytic solution and parameter analysis results show that the effect of coupling between unsaturated seepage and deformation is related with time. The modulus related to suction changes F has a marked effect on the pore water pressure. The larger the F ratio values for two-layer soils are, the more slowly the suction dissipates. The results indicate that a large F for the top-layer soil can effectively reduce the coupling effect. Volumetric moisture content changes in two-layer soils play a limited role in the suction distribution.

Key words: unsaturated soil; seepage and deformation; coupling; layered soil; rainfall infiltration

1 引 言

非饱和土在地球表面广泛分布, 非饱和土由土骨架、孔隙水、孔隙气和水气膜组成^[1]。降雨入渗过程中非饱和土体中的渗流场和位移场均是变化的, 且相互影响。孔隙水压力变化导致应力变化及非饱和土体变形; 应力变化及孔隙改变反过来又影响渗流状态^[2]。因此, 降雨过程中非饱和土的渗流-变形耦合问题是一个重要的课题, 成层土常见于工程中, 如垃圾、废料填埋土。干湿循环易诱发表层

土产生裂隙, 因而表层裂隙的土层作为连续介质, 其渗透系数增大, 与下层未出现裂隙土层一起构成等效的成层土。研究成层非饱和土的渗流-变形耦合对推动非饱和土土力学的发展有着重要的意义。

关于渗流-变形耦合的数值解有不少研究^[3-6]。Kim^[3]提出非饱和土地表加载引起水位波动和变形的耦合数值模型。Thomas^[4]提出了可变形的非饱和土热、水和气转化的理论表达式。田东方等^[5]提出坡面径流-非饱和渗流分析与应力场的耦合计算方法, 并编制了相应的有限元程序。张玉军^[6]从建立

收稿日期: 2010-06-07

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 40902087); 香港 Research Grants Council (No. 622207); 教育部科学技术研究重点项目 (No. 110186); 教育部博士点新教师基金 (No. 20095122120007); 四川省杰出青年学术技术带头人培育计划 (No. 2010JQ0034)。

第一作者简介: 吴礼舟, 男, 1975 年生, 博士, 副教授, 主要从事工程地质和岩土工程科研教学工作。E-mail: wulizhoucn@yahoo.com.cn

应力平衡方程、水连续性方程着手, 使用 Galerkin 方法将各控制方程分别在空间域和时间域进行离散, 开发出了一个用于分析非饱和岩土介质中水-应力耦合现象的二维弹塑性有限元程序。

非饱和土的降雨入渗采用解析解或数值解来分析, 解析解的优点是比数值解清楚简洁^[7]。学者们已提出非饱和土渗流的解析解^[8-9]。Morel-Seytoux^[8]采用 Green-Ampt 入渗公式作为基本方程获得了一个解析解。Basha^[9]使用了 Green 函数获取了规定边界的多维非稳态解。这些解未考虑耦合效应, 继而有学者开展多场耦合解析的研究^[10-11]。白冰^[10]对半无限体温度荷载下, 饱和和多孔介质热-水-力耦合响应的一维情形进行研究, 给出温度、孔压和位移等的解析表达式。吴礼舟等^[11]也给出非饱和土变形-渗流耦合的解析解。而实际工程土多是非均匀的、成层的, 研究成层土的渗流就显得很有必要^[7, 12]。目前成层非饱和土的渗流-变形耦合还有待于研究。

基于流体质量守恒、Darcy 定律和 Lloret 的非饱和土本构模型^[13], 尝试分析成层非饱和土渗流和变形的耦合控制方程, 再通过 Laplace 变换得出成层非饱和土耦合渗流方程的解析解。通过对耦合控制方程参数的分析, 试探成层非饱和土不同土层参数对耦合过程中孔隙水压力产生的影响。

2 控制方程及其解析

为了有效地分析成层土渗流和变形耦合问题, 作出如下几个假设: ①每层土是均匀线弹性的; ②土结构是可变形的, 水是不可压缩的; ③每层土体积改变仅因为土的变干或湿化; 不考虑总应力变化引起的体积变化; ④饱和状态下的渗透系数保持一定值; ⑤不考虑土-水特征曲线的滞后性; ⑥在土中孔隙气压力为常数值。

Lloret 等^[13]提出

$$d\varepsilon_v = \frac{d(p - u_a)}{E} + \frac{d(u_a - u)}{F} \quad (1)$$

式中: ε_v 为体积应变, 对于一维问题, $\varepsilon_v = \varepsilon_x$; $u_a - u$ 为基质吸力; $p - u_a$ 为平均净应力; u_a 为孔隙气压力; u 为孔隙水压力; E 为净正应力变化相关的土的弹性模量; F 为吸力变化相关的土的模量。

对于一维问题, 由式 (1) 与几何方程代入力学平衡方程, 可以得出耦合变形的控制方程如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[E\varepsilon_v - \frac{E}{F}(u_a - u) \right] + [nS_w\rho_w + (1-n)\rho_s]g = 0 \quad (2)$$

式中: x 为高程; γ_w 为水的重度; S_w 为饱和度; ρ_w 为水密度; n 为孔隙率; ρ_s 为固体密度; g 为重力加速度。

根据 Darcy 定律和质量守恒定律, 可获取一维的耦合控制方程^[3, 11]如下:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\gamma_w} + x \right) \right] = nS_w\beta_w \frac{\partial u}{\partial t} + n \frac{\partial S_w}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t} - \alpha_c S_w \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (3)$$

式中: k 为 x 方向上的渗透系数; β_w 为水的压缩率, $\beta_w = 5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$; α_c 为 Biot 水力耦合系数或有效应力系数, $0 \leq \alpha_c \leq 1$ 。

根据假设③和假设⑥, 可由式 (2) 得

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{1}{F} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3), 得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\gamma_w} + x \right) \right] = nS_w\beta_w \frac{\partial u}{\partial t} + n \frac{dS_w}{du} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\alpha_c S_w}{F} \frac{\partial u}{\partial t} \quad (5)$$

如忽略水的压缩性, 即 $\beta_w = 0$, 耦合的渗流和变形的一维问题的数学模型, 即式 (5) 则变成

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\gamma_w} + x \right) \right] = \left[n \frac{dS_w}{du} + \frac{\alpha_c S_w}{F} \right] \frac{\partial u}{\partial t} \quad (6)$$

Gardner^[14]将非饱和土的渗透系数表示为

$$k(u) = \begin{cases} k_s & -\psi_{ac} \leq u \leq 0 \\ k_s e^{\alpha\psi_{ac}} e^{\alpha u} & u \leq -\psi_{ac} \end{cases} \quad (7)$$

式中: k_s 为饱和状态的渗透系数; α 为去饱和系数; ψ_{ac} 为进气值。

根据 Boltzman 模型^[15], 体积含水率与土吸力之间的关系为

$$\theta(u) = \begin{cases} \theta_s & -\psi_{ac} \leq u \leq 0 \\ \theta_s e^{\alpha\psi_{ac}} e^{\alpha u} & u \leq -\psi_{ac} \end{cases} \quad (8)$$

基于体积含水率与饱和度的关系 $S_w = \theta(u)/\theta_s$, 再将式 (7)、(8) 代入式 (6), 可得

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[k(u) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{\gamma_w} + x \right) \right] = M e^{\alpha\psi_{ac}} e^{\alpha u} \frac{\partial u}{\partial t}, \quad u \leq -\psi_{ac} \quad (9)$$

$$\frac{k_s}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = m_v \frac{\partial u}{\partial t}, \quad -\psi_{ac} \leq u \quad (10)$$

式中: m_v 为相应的体积压缩的相应参数; $M = \theta_s \alpha + \alpha_c / F$ 。实际上, 当 $-\psi_{ac} < u$ 时, 土体完全饱和。因而式 (10) 类似于没有考虑耦合效应的 Terzaghi 固结方程。

引入了新的变量 $K = k_s e^{au}$, 令 $X = \alpha \gamma_w x$, $T = \alpha^2 \gamma_w k_s t / M$, 从式 (9) 得

$$\frac{\partial^2 K}{\partial X^2} + \frac{\partial K}{\partial X} = \frac{\partial K}{\partial T}, \quad u \leq -\psi_{ac} \quad (11)$$

假设土由两层组成, $X = 0$ 处为两层土的接触界面。无量纲参数定义如下:

$$\left. \begin{aligned} X &= \alpha_1 \gamma_w x, \quad L_1 = \alpha_1 \gamma_w l_1, \quad -l_1 \leq x \leq 0 \\ X &= \alpha_2 \gamma_w x, \quad L_2 = \alpha_2 \gamma_w l_2, \quad 0 \leq x \leq l_2 \\ K_1 &= K/k_{s1}, \quad q_{A1} = q_A/k_{s1}, \quad q_{B1} = q_B/k_{s1} \\ K_2 &= K/k_{s2}, \quad q_{A2} = q_A/k_{s2}, \quad q_{B2} = q_B/k_{s2} \\ T &= \alpha_1^2 \gamma_w k_s t / M \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: α_1 、 α_2 分别为下层与上层土的去饱和系数; k_{s1} 、 k_{s2} 分别为下、上层土的饱和渗透系数; q_A 为初始流量, 与下边界水压力一起决定初始压力分布^[12]; q_B 为上边界的降雨强度^[12]。

于是式 (11) 可写为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 K_1}{\partial X^2} + \frac{\partial K_1}{\partial X} &= \frac{\partial K_1}{\partial T}, \quad -L_1 < X < 0 \\ \frac{\partial^2 K_2}{\partial X^2} + \frac{\partial K_2}{\partial X} &= \beta \frac{\partial K_2}{\partial T}, \quad 0 < X < L_2 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $\beta = \frac{\alpha_1^2 k_{s1} M_1}{\alpha_2^2 k_{s2} M_2}$ 。

其控制方程由初始条件和边界条件组成, 第 1 层土的初始条件为

$$K_1(X, 0) = q_{A1} - (q_{A1} - e^{\alpha_1 u_0}) e^{-(L_1 + X)} \quad (14)$$

第 2 层土的初始条件为

$$K_2(X, 0) = q_{A2} - \left\{ q_{A2} - \left[q_{A1} - (q_{A1} - e^{\alpha_1 u_0}) e^{-L_1} \right]^{\alpha_2 / \alpha_1} \right\} e^{-X} \quad (15)$$

下边界 ($x = -l_1$) 的水头边界条件为

$$K_1(-L_1, T) = e^{\alpha_1 u_0} \quad (16)$$

上边界 ($x = l_2$) 流量边界为

$$\left[\frac{\partial K_2}{\partial X} + K_2 \right]_{X=L_2} = q_{B2} \quad (17)$$

接触面 ($x = 0$) 的流量相等,

$$K_{s1} \left[\frac{\partial K_1}{\partial X} + K_1 \right]_{X=0^-} = K_{s2} \left[\frac{\partial K_2}{\partial X} + K_2 \right]_{X=0^+} \quad (18)$$

接触面 ($x = 0$) 的压力相等,

$$\left[\frac{\ln K_1}{\alpha_1} \right]_{X=0^-} = \left[\frac{\ln K_2}{\alpha_2} \right]_{X=0^+} \quad (19)$$

耦合作用下两层非饱和土渗流的解析解由 Laplace 变换获得^[12], 其解析解为

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= q_{B1} - (q_{B1} - e^{\alpha_1 u_0}) e^{-(L_1 + X)} - 4(q_{B2} - q_{A1}) e^{(L_2 - X)/2} \cdot \\ &\quad [RA_1 + RB_1 \text{ 或 } RC_1], \quad -L_1 \leq X \leq 0 \\ K_2 &= q_{B2} - [q_{B2} - q_{B1} + (q_{B2} - e^{\alpha_1 u_0}) e^{-L_1}] e^{-X} - \\ &\quad 4(q_{B2} - q_{A1}) e^{(L_2 - X)/2} [RA_2 + RB_2 \text{ 或 } RC_2], \\ &\quad 0 \leq X \leq L_2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: RA_1 、 RB_1 、 RC_1 、 RA_2 、 RB_2 和 RC_2 均是 X 和 T 的函数。这些函数详见文献[12]。

于是, 两层非饱和土渗流-变形耦合中暂态的孔隙水压力可由下式计算:

$$u(X, T) = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{K}{k_s e^{\alpha \psi_{ac}}} \quad (21)$$

3 参数分析

成层土为两层, 每层厚各 5 m, 总厚为 10 m。初始孔隙水压力分布由式 (14)、(15) 来定义。底部边界为稳定的地下水位, 即 $u_0 = 0$ 。边界流量条件为 $q = 0.8 k_s$, 其他参数分别为: $q_{A1} = q_{A2} = 0.006$, $q_{B2} = q_{B1} = 0.8$, $\alpha = 0.01 \text{ kPa}^{-1}$, $\psi_{ac} = 0 \text{ kPa}$, $k_{s1} = k_{s2} = 10^{-6} \text{ m/s}$ 。下面分别研究 F 与 θ_s (饱和体积含水率) 对孔隙水压力分布的影响。

3.1 F 的影响

图 1 为孔隙水压力随时间的变化图。图 1(a) 中, F_1 (下层土, 即 $0 \sim 5 \text{ m}$) 为 10 MPa, F_2 (上层土, 即 $5 \sim 10 \text{ m}$) 为 1 MPa。在图 1(b) 中, $F_1 = 1 \text{ MPa}$, $F_2 = 10 \text{ MPa}$ 。除了上下层 F 不同, 其他参数均相同。图 1 显示上下层的不同 F 值对孔隙水压力分布及耦合效应有明显的作用。图 1 显示耦合效应与时间有关, 初始入渗时考虑耦合与不考虑耦合之间的孔隙水压力差异较小, 而后孔隙水压力差随时间明显增大, 最后孔隙水压力差异减弱, 直至消除。图中显示同一时间, 耦合情况下孔隙水压力运移总是比非耦合情况下的孔隙水压力慢, 是因为 F 为正值。

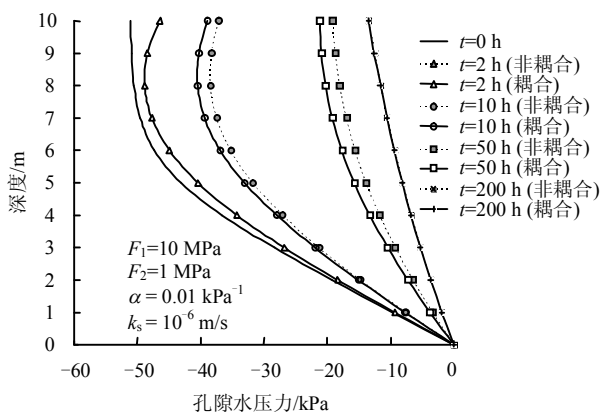
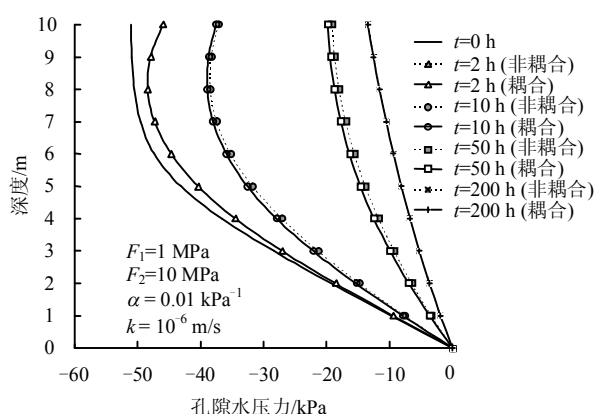
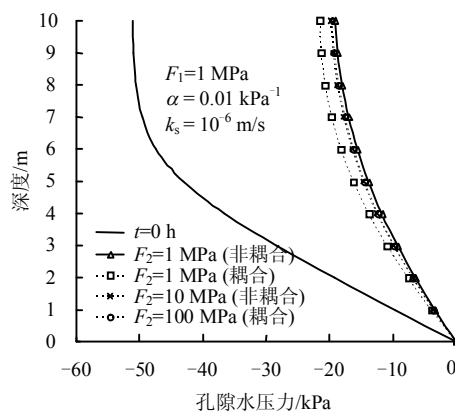
(a) ($F_1 = 10 \text{ MPa}$, $F_2 = 1 \text{ MPa}$)(b) ($F_1 = 1 \text{ MPa}$, $F_2 = 10 \text{ MPa}$)图1 成层土 F 值对孔隙水压力的影响Fig.1 Influence of F for two-layer soils on pore water pressure

图2为50 h成层土孔隙水压力的分布图。图中,实线表示未考虑渗流-变形耦合,虚线代表了考虑了耦合效应。下层土的 $F_1 = 1 \text{ MPa}$,而上层土的 F_2 分别为1、10、100 MPa。 $F_2 = 1 \text{ MPa}$ 时耦合效应最明显, $F_2 = 100 \text{ MPa}$ 时耦合效应最弱。图3显示了上下层的 F 值差异越大,耦合与非耦合之间的差异就越小。因而成层土的 F 值差异大有利于减小耦合效应。在图1(a)中 $F_1/F_2 = 10$;在图1(b)中 $F_1/F_2 = 0.1$,其他参数相同。不考虑变形-渗流耦合效应时, F_1/F_2 比值对孔隙水压力分布不产生任意影响。当考虑变形-渗流耦合作用时, F_1/F_2 比值对孔隙水压力的运移产生影响,图1(a)中,50 h时耦合情况下的孔隙水压力比非耦合情况下的孔隙水压力运移慢,此时耦合与非耦合之间的孔隙水压力差为2.04 kPa;图1(b)中,50 h时耦合与非耦合之间的孔隙水压力差为0.62 kPa。这表明 F_1/F_2 比值越大,孔隙水压力消散的越慢。显然,增大表层土的 F 值有利于降低耦合效应。

图2 上层土不同 F 值对孔隙水压力的影响Fig.2 Influence of F for top layer soils on pore water pressure

3.2 体积含水率的影响

图3描述了两层土中不同饱和体积含水率对孔隙水压力分布的影响。图中,下层与上层的饱和体积含水率分别为 $\theta_{s1} = 0.6$, $\theta_{s2} = 0.4$ 。图4显示耦合效应与时间有关,初始阶段耦合与非耦合之间的压力差较小,随后增大,然后再减小。这与文献[11]的结论是吻合的。图中50 h时的耦合效应最突出。

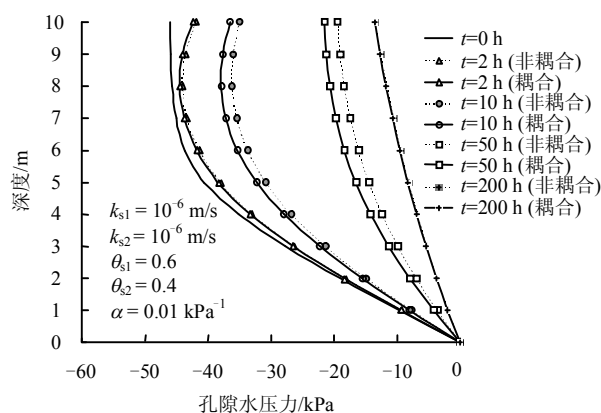


图3 上下层不同体积含水率对孔隙水压力的影响

Fig.3 Influence of θ for two-layer soils on pore water pressure

图4为两层土中不同饱和体积含水率对位移的作用。随着降雨入渗地表下沉,到一定时刻,沉降开始稳定。耦合引起的沉降差异先增大,然后减小,直至沉降稳定时消失。

图5为上层土的饱和体积含水率对孔隙水压力分布的影响,此时 $t = 50 \text{ h}$ 。其中,下层土的 θ_{s1} 为0.4,上层土的 θ_{s2} 分别为0.4、0.6,其他参数与上面相同。由图可知,不考虑耦合情况下,当 $\theta_{s2} = 0.4$ 时孔隙水压力比 $\theta_{s2} = 0.6$ 时孔压小3.45 kPa ($t = 50 \text{ h}$);而考虑耦合情况时 $\theta_{s2} = 0.4$ 与 $\theta_{s2} = 0.6$ 两种

情况下孔隙水压力相差为 3.08 kPa。上层土的饱和体积含水率变化对吸力消散产生一定的影响。上层土的饱和体积含水率越小, 吸力消散得越快。

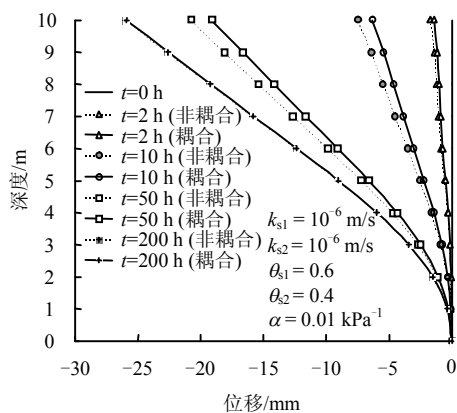


图4 上下层不同体积含水率对位移的影响

Fig.4 Influence of θ for two-layer soils on displacement

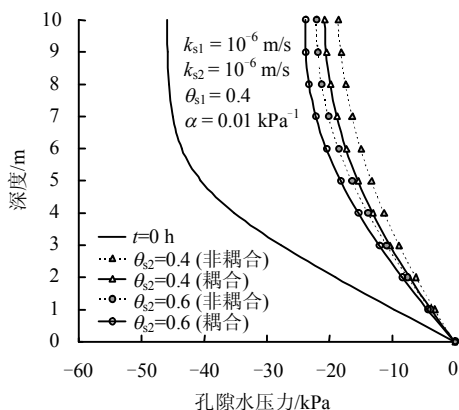


图5 上层土不同饱和体积含水率对孔隙水压力的影响

Fig.5 Influence of θ for top layer soils on pore water pressure

图6为下层土不同饱和和体积含水率对孔隙水压力分布的影响, 此时, $t=50$ h。下层土的 θ_{s1} 分别为0.4、0.6, 上层土的 θ_{s2} 为0.4, 其他参数不变。不考虑耦合情况下, $\theta_{s2}=0.4$ 与 $\theta_{s2}=0.6$ 两种情况下孔压差为0.79 kPa; 而考虑耦合时 $\theta_{s2}=0.4$ 与 $\theta_{s2}=0.6$ 之间的孔压相差为0.68 kPa。此时饱和体积含水率大意味着孔隙水压力运移得慢。在图5、6中, 两层土的饱和体积含水率相同($\theta_{s1}=\theta_{s2}=0.4$)时, 50 h时耦合与非耦合之间的孔隙水压力差为2.15 kPa, 当两层土的饱和体积含水率不同($\theta_{s1}=0.6$, $\theta_{s2}=0.4$)时, 其孔压差为2.04 kPa。当上层土饱和体积含水率(θ_{s2})保持不变, 下层土饱和体积含水率(θ_{s1})变化对耦合效应产生很小的作用, 基本上可忽略。

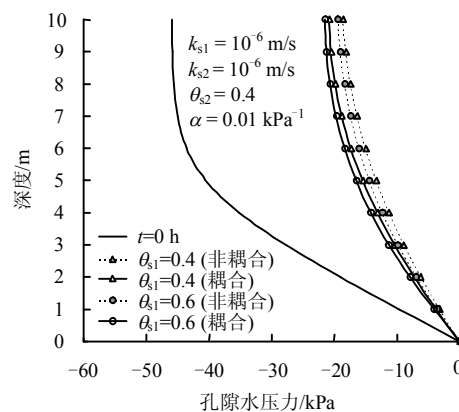


图6 下层土饱和和体积含水率对孔隙水压力的影响

Fig.6 Influence of θ_s for bottom-layer soils on pore water pressure

4 结 论

(1) F 与 θ_s 对成层非饱和土的孔隙水压力分布产生影响。与 θ_s 相比较, F 值引起的耦合效应更为显著。

(2) 耦合效应与时间有关, 入渗初期耦合与非耦合之间的孔隙水压力差较小, 尔后孔隙水压力差随时间逐渐增大, 最后孔隙水压力差异减弱, 直至消除。对于同一时间, 耦合情况下的孔隙水压力运移总是比非耦合情况下的孔隙水压力慢, 是因为 F 为正值。 F_1 和 F_2 比值越大, 孔隙水压力消散得越慢。显然, 增大表层土的 F 值有利于降低耦合效应。

(3) 上层土的饱和体积含水率变化对吸力消散产生一定的影响。上层土的饱和体积含水率越小, 吸力消散得越快。当上层饱和体积含水率保持不变时, 下层的饱和体积含水率变化对耦合效应产生很小的影响, 可忽略。

参 考 文 献

- [1] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [2] ZHANG L L, ZHANG L M, TANG W H. Rainfall-induced slope failure considering variability of soil properties[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(2): 183—188.
- [3] 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(9): 1101—1119.
- [4] THOMAS HR, HE Y. Analysis of coupled heat, moisture

- and air transfer in a deformable unsaturated soil[J]. **Geotechnique**, 1995, 45(4): 677—689.
- [5] 田东方, 刘德富, 王世梅, 等. 土质边坡非饱和渗流场与应力场耦合数值分析[J]. **岩土力学**, 2009, 30(3): 810—814.
- TIAN Dong-fang, LIU De-fu, WANG Shi-mei, et al. Coupling numerical analysis of unsaturated seepage and stress fields for soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 810—814.
- [6] 张玉军. 非饱和地质体中水-应力耦合二维有限元方法及对锚杆支护的分析[J]. **岩土力学**, 2006, 27(2): 233—237.
- ZHANG Yu-jun. 2D coupled hydro-mechanical elastoplastic finite element method for unsaturated geologic body and its application to analyzing bolting support[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(2): 233—237.
- [7] ZHAN T L T, NG C W W. Analytical analysis of rainfall infiltration mechanism in unsaturated soils[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2004, 4(4): 273—284.
- [8] MOREL-SEYTOUX H J. Analytical results for prediction of variable rainfall infiltration[J]. **Journal of Hydrology**, 1982, 59(3/4): 209—230.
- [9] BASHA H A. Multidimensional linearized nonsteady infiltration toward a shallow water table[J]. **Water Resources Research**, 2000, 36(9): 2567—2573.
- [10] 白冰. 循环温度荷载作用下饱和和多孔介质热-水-力耦合响应[J]. **工程力学**, 2007, 24(5): 87—92.
- BAI Bing. Thermo-hydro-mechanical responses of saturated porous media under cyclic thermal loading[J]. **Engineering Mechanics**, 2007, 24(5): 87—92.
- [11] 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.
- WU Li-zhou, ZHANG Li-min, HUANG Run-qiu, et al. One-dimensional analytical analysis of coupled deformation and seepage in unsaturated soil and its parameter study[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(9): 1450—1455.
- [12] SRIVASTAVA R, YEH T C J. Analytical solutions for one-dimension, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils[J]. **Water Resources Research**, 1991, 27(5): 753—762.
- [13] LLORET A, GENS A, BATLLE F, ALONSO E E. Flow and deformation analysis of partially saturated soils[C]// Proc. 9th Eur. Conf. Soil Mech. Dublin: Balkema A. A., 1987: 565—568.
- [14] GARDNER W R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table[J]. **Soil Science**, 1958, 85(4): 228—232.
- [15] MCKEE C, BUMB A. The importance of unsaturated flow parameters in designing a hazardous waste site[C]// Proceedings of Hazardous Waste and Environmental Emergencies. Houston, TX: [s. n.], 1984: 50—58.

书 讯

GB50652—2011 城市轨道交通地下工程建设风险管理规范 (中华人民共和国国家标准)(建工版)

标准规范类, 住房和城乡建设部发布, 大 32 开, 83 千字, 100 页, 精装, 定价: 15 元, 2011 年 6 月出版, 书号: 15112-20566。

本规范主要内容包括: 总则、术语、基本规定、工程建设风险等级标准、规划阶段风险管理、可行性研究风险管理、勘察与设计风险管理、招投标与合同签订风险管理和施工风险管理。本规范经住房和城乡建设部第 941 号公告批准、发布, 自 2010 年 1 月 1 日起实施。读者对象: 城市轨道交通地下工程规划、可行性研究、勘察、设计、施工、验收人员。

(摘自 新华书目报·科技新书目)