

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1804

非饱和土一维大变形固结模型

周亚东^{1,2}, 邓 安³, 鹿 群^{1,2}

(1. 天津城建大学 土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;
3. 阿德莱德大学 土木、环境与采矿工程学院, 澳大利亚 阿德莱德 5005)

摘 要: 基于分段线性差分法, 建立了一种非饱和土一维大变形固结模型。该模型可考虑土性参数非线性变化, 可计算与分析大变形问题, 并编制了 Fortran 计算程序。在现有解答和试验数据的基础上, 对该模型进行了验证, 瞬时加载情况下模型数值解与现有解答基本吻合, 考虑加载过程下的数值解与试验数据吻合。进行了大变形算例分析, 对比了加荷压密与消散固结阶段土层变形, 探讨了孔隙气、水渗透系数比对土层沉降量、饱和度和不同应变情况下固结度的影响规律, 分析了非饱和土大、小变形固结理论计算孔隙水(气)压和沉降量的差异。

关 键 词: 非饱和土; 非线性; 大变形; 一维固结; 沉降量

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018)05-1675-07

A one-dimensional consolidation model considering large strain for unsaturated soil

ZHOU Ya-dong^{1,2}, DENG An³, LU Qun^{1,2}

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
2. Key Laboratory of Soft Soils and Engineering Environment of Tianjin Province, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
3. School of Civil, Environmental and Mining Engineering, The University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia)

Abstract: This paper presents a model developed for one-dimensional consolidation of unsaturated soil. This model uses the piece-linear finite difference approach and considers soil nonlinearity and large strain problems. Fortran programming package is used to implement the computation of the model. This model is verified by analytical solutions and experimental results. The numerical solution of this model agrees with the existing solutions in the case of instantaneous loading. In process of loading, the approximation of consolidation settlement obtained by this model is in good agreement with the test results. Then this model is implemented for a large strain consolidation. The case study compares the settlement occurred at the instantaneous deforming stage and the subsequent consolidation stage. The case study also investigates the effect of the pore air permeability to the hydraulic conductivity ratio on soil layer settlement, saturation degree, and consolidation degree of different strain. It also analyzes the difference of pore water (air) pressures and soil layer settlement on large and small deformation consolidation theory of unsaturated soil.

Keywords: unsaturated soil; nonlinear; large strain; one-dimensional consolidation; settlement

1 引 言

新近吹填土一般为非饱和, 其固结过程比饱和土复杂。Barden^[1]率先提出非饱和黏土固结理论, Fredlund 等^[2]则进行了全面深入的理论构建。陈正汉等^[3]引入混合物理论分析非饱和土固结。在混物流基础上, 殷宗泽等^[4]建立了非饱和土固结方程,

并进行了数值计算。在此基础上, 曹雪山等^[5]提出了改进的计算方法, 苏万鑫^[6]和 Qin^[7]等提出简化模型, 得到非饱和土一维固结解析解。现有方法通常基于小变形假设, 适用于较薄土层。新近吹填土具有深厚、大变形固结特征, 不同于小变形固结问题。黄杰卿^[8]基于大变形假设, 推导了非饱和土大应变控制方程组, 但方程组具有很强的非线性, 未能获

收稿日期: 2017-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 51608351); 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (No. 15JCYBJC48900)。

This work was supported by the National Nature Science Fund of China (51608351) and the Tianjin Research Program of Application Foundation and Advanced Technology (15JCYBJC48900).

第一作者简介: 周亚东, 男, 1985 年生, 博士, 讲师, 主要从事软基处理方面的研究。E-mail: zyd476300@126.com

得数值解答。Yong^[9]、Fox^[10-11]、Zhou^[12]、Deng^[13]等引入分段线性差分法分析大变形固结问题，在算法描述、计算精度上具有优势，同时可以考虑土性非线性。本文拟用分段线性差分法分析深厚非饱和土层的大变形固结。

2 固结模型

2.1 模型建立

非饱和土一维固结模型 UCS1 如图 1(a)所示。土层厚 H_0 ，自上而下均匀划分 n 个单元，每个单元厚 $L_0 = H_0 / n$ 。采用欧拉坐标系，以土层底面为基准面，向上为正，单元 j 的中心点高程为 $z_{0,j}$ ，初始荷载 q_0 。 $t=0$ 时刻，施加竖向荷载 Δq ， Δq 可随时间 t 变化。假设土非饱和，土颗粒和水不可压缩，土层发生竖向变形。某时刻 t ，土层变形以及单元属性定义如图 1(b)所示。

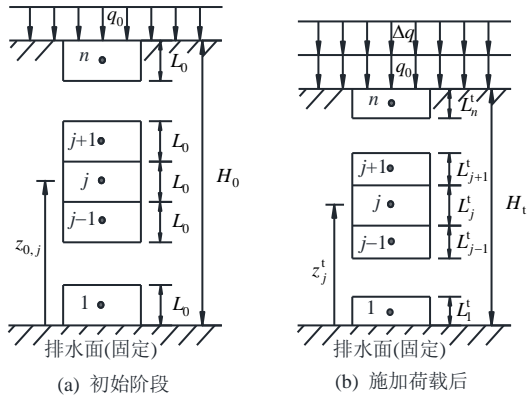


图1 模型几何图形

Fig.1 Model geometry

2.2 非线性关系

模型中土性非线性关系如图 2 所示，包括有效应力、水（或气）渗透系数和水分特征曲线。据定义^[10-13]，单调曲线仅说明变量间趋势性关系，实际物理关系由试验或理论给出，上标 \wedge 、 \sim 和 \sim 用于区分土性在曲线上的输入值。定义单元 j 初始土性参数：孔隙比 $e_{0,j}$ 、孔隙气压 $u_{a0,j}$ 、饱和度 $S_{r0,j}$ ，其余初始参数由图 2 得出。

2.3 加荷压密阶段

土层变形包括加荷压密和消散固结两个阶段^[4-6]。在加荷压密阶段，变形由孔隙气体压缩产生，增量 Δq 由土骨架、孔隙水和孔隙气体共同承担，对孔隙比迭代，压密平衡满足毕肖普非饱和土有效应力原理^[14]：

$$\sigma_{1,j} = \sigma'_{1,j} + \chi_{1,j} u_{w1,j} + (1 - \chi_{1,j}) u_{a1,j} \quad (1)$$

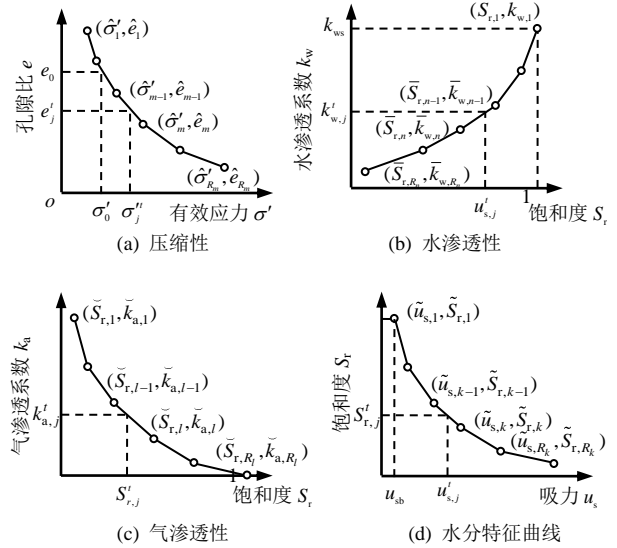


图2 土性非线性关系

Fig.2 Nonlinear soil properties

式中： $\sigma_{1,j}$ 、 $\sigma'_{1,j}$ 、 $u_{w1,j}$ 和 $u_{a1,j}$ 分别为平衡后单元 j 的竖向总应力、有效应力、孔隙水压和气压； $\chi_{1,j}$ 为有效应力系数，据 Aitchison^[15]，有

$$\chi_{1,j} = S_{r1,j} / (0.4S_{r1,j} + 0.6) \quad (2)$$

式中： $S_{r1,j}$ 为单元 j 饱和度。下标 1 用于区分消散固结阶段对应物理量。

压密平衡后，单元 j 孔隙比更新为 $e_{1,j} = e_{0,j} + \Delta e_j$ ， Δe_j 为压密平衡前后孔隙比增量。据图 2(a) 分段线性方法，有效应力更新为

$$\sigma'_{1,j} = \hat{\sigma}'_{m-1} + \frac{\hat{\sigma}'_m - \hat{\sigma}'_{m-1}}{\hat{e}_m - \hat{e}_{m-1}} (\hat{e}_m - e_{1,j}) \quad (3)$$

式中： $\hat{\sigma}'_m$ 、 $\hat{\sigma}'_{m-1}$ 、 \hat{e}_m 和 \hat{e}_{m-1} 为线性数据点坐标。单元 j 在压密阶段含气率保持不变，则有

$$S_{r1,j} = \frac{S_{r0,j} e_{0,j}}{e_{1,j}} \quad (4)$$

由图 2(d)，该饱和度对应的基质吸力为

$$u_{s1,j} = \tilde{u}_{s,k-1} + \frac{\tilde{u}_{s,k} - \tilde{u}_{s,k-1}}{\tilde{S}_{r,k} - \tilde{S}_{r,k-1}} (\tilde{S}_{r,k-1} - S_{r1,j}) \quad (5)$$

式中： $\tilde{u}_{s,k}$ 、 $\tilde{u}_{s,k-1}$ 、 $\tilde{S}_{r,k}$ 和 $\tilde{S}_{r,k-1}$ 为线性数据点坐标。孔隙气压密前后满足波以耳定律：

$$(u_{a0,j} + p_a) e_{a0,j} = (u_{a1,j} + p_a) e_{a1,j} \quad (6)$$

式中： p_a 为大气压力； $e_{a0,j}$ 和 $e_{a1,j}$ 分别为气体压密前后孔隙比。联立式 (4)、(6)，单元 j 孔隙气压可表示为

$$u_{a1,j} = \frac{(u_{a0,j} + p_a) e_{0,j} (1 - S_{r0,j})}{e_{1,j} (1 - S_{r1,j})} - p_a \quad (7)$$

从而计算出单元 j 孔隙水压力:

$$u_{w1,j} = u_{a1,j} - u_{s1,j} \quad (8)$$

单元 j 厚度更新为

$$L_{1,j} = \frac{(1 + e_{1,j})L_{0,j}}{(1 + e_{0,j})} \quad (9)$$

单元 j 中心节点的总应力为

$$\sigma_{1,j} = q_0 + \Delta q + \frac{L_{1,j}\gamma_{1,j}}{2} + \sum_{i=1}^{j-1} L_{1,i}\gamma_{1,i} \quad (10)$$

式中: $\gamma_{1,j}$ 为平衡后单元 j 重度, 由 $e_{1,j}$ 和 $S_{r1,j}$ 计算。将 $\sigma_{1,j}$ 、 $\sigma'_{1,j}$ 、 $u_{a1,j}$ 和 $u_{w1,j}$ 代入式 (1) 校核压密平衡, 若式子左右应力差小于设定极小值, 满足平衡。压密平衡后, 土层厚度和表面沉降量分别表示为

$$H_1 = \sum_{j=1}^n L_{1,j} \quad (11)$$

$$S_1 = H_0 - H_1 \quad (12)$$

2.4 消散固结阶段

消散固结在 Deng 等^[13]的基础上改进, 即水、气在单元间渗透至边界排出, 各单元逐步完成固结, 并最终达到平衡, 满足式 (1)。在 t 时刻, 单元 j 和 $j-1$ 间的水 (或气) 单位渗流速率可表示为

$$v'_{x,j} = k'_{xe,j} i'_{x,j} \quad (13)$$

式中: 下标 x 代表 w (水) 或者 a (气); $k'_{xe,j}$ 为单元 j 和 $j-1$ 之间的等效水力渗透系数 $k'_{we,j}$ 或等效气渗透系数 $k'_{ae,j}$, 可由下式计算得出:

$$k'_{xe,j} = \frac{k'_{x,j-1}k'_{x,j}(L'_j + L'_{j-1})}{L'_j k'_{x,j-1} + L'_{j-1} k'_{x,j}} \quad (14)$$

式中: $k'_{x,j}$ 为单元 j 的水力渗透系数 $k'_{w,j}$ 或气渗透系数 $k'_{a,j}$, 可分别从图 2(b)或图 2(c)分段线性求出; 渗流梯度 $i'_{x,j}$ 表示为

$$i'_{x,j} = \frac{h'_{x,j} - h'_{x,j-1}}{z'_j - z'_{j-1}} \quad (15)$$

式中: $h'_{x,j}$ 为 t 时刻单元 j 的水头 $h'_{w,j}$ 或者孔隙气压力头 $h'_{a,j}$, 分别表示为

$$h'_{w,j} = \frac{u'_{w,j}}{\gamma_w} \quad (16)$$

$$h'_{a,j} = \frac{u'_{a,j}}{\rho_a g} \quad (17)$$

式中: 水重度 $\gamma_w = 9.81 \text{ kN/m}^3$, 空气密度 $\rho_a = 1.29 \text{ kg/m}^3$, 重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。

经过时间步 Δt , 式 (13) 产生单元间水、气渗流, 各单元水、气净存量 (体积) 更新。孔隙水体

积更新参照 Deng 等^[13]计算。对于气体体积, 除了气渗流, 还受残余气体压缩影响, 该压缩满足式 (6), 则单元 j 孔隙气体体积更新为

$$A'_{a,j} = \frac{(u'_{a,j} + p_a)A'_{a,j}}{u'_{a,j} + p_a} - (v'_{a,j+1} - v'_{a,j})\Delta t \quad (18)$$

式中: $A'_{a,j}$ 为时间步 Δt 前气体体积。综合水、气体积更新, 单元 j 厚度、孔隙比及饱和度分别更新为

$$L'^{t+\Delta t}_j = L'_j - (v'_{h,j+1} - v'_{h,j})\Delta t - (A'_{a,j} - A'^{t+\Delta t}_{a,j}) \quad (19)$$

$$e'^{t+\Delta t}_j = \frac{L'^{t+\Delta t}_j(1 + e'_{1,j})}{L'_{1,j}} - 1 \quad (20)$$

$$S'^{t+\Delta t}_{r,j} = 1 - \frac{A'^{t+\Delta t}_{a,j}(1 + e'^{t+\Delta t}_j)}{L'^{t+\Delta t}_j e'^{t+\Delta t}_j} \quad (21)$$

土层厚度更新为

$$H' = \sum_{j=1}^n L'_j \quad (22)$$

土体表面沉降量为

$$S' = H_0 - H' \quad (23)$$

图 1 模型涉及到表 1 所示边界条件, $h_{w,t}$ 、 $h_{w,b}$ 分别为土层顶、底面水头, $h_{a,t}$ 、 $h_{a,b}$ 分别为顶、底面气压力头 (以标准大气压为参照)。

表 1 模型边界条件
Table 1 boundary conditions

位置	排水 (气) 边界	不排水 (气) 边界
顶面	$i'_{w,n+1} = 2(h_{w,t} - h'_{w,n})/L'_n$	$i'_{w,n+1} = 0$
	$i'_{a,n+1} = 2(h_{a,t} - h'_{a,n})/L'_n$	$i'_{a,n+1} = 0$
底面	$i'_{w,1} = (h'_{w,1} - h_{w,b})/z'_1$	$i'_{w,1} = 0$
	$i'_{a,1} = (h'_{a,1} - h_{a,b})/z'_1$	$i'_{a,1} = 0$

Zhou^[12]、Deng^[13]等的模型用 Fortran 编写计算程序。程序运行时首先读取计算所需参数: 土层厚度 H_0 、竖向荷载 q_0 和 Δq 、单元数目 n 、土颗粒相对密度 G_s 、初始孔隙比 e_0 、初始孔隙气压 u_{a0} 、初始饱和度 S_{r0} 、压缩关系、渗透关系和水分特征曲线的数据点、边界条件及程序终止条件。单元数目根据计算精度和计算时间来决定, e_0 、 u_{a0} 和 S_{r0} 可以随深度非线性变化。施加 Δq 后, 程序首先进入压密阶段计算, 每个单元属性随孔隙比增量 Δe 不断更新直至满足平衡条件式 (1)。进入消散固结阶段, 每个单元属性随时间步 Δt 更新, 直至设定时间或者固结结束。

3 模型验证

现有非饱和固结理论或数值研究通常基于小变形假设,在较小变形情况下,将 UCS1 模型计算结果与 3 种基于小变形固结理论的方法^[4-6]解答对比,验证该模型。文献[4-6]采用案例土样初始条件为:直径为 10 cm、厚 $H_0 = 11.8$ cm、饱和度 $S_r = 78.87\%$ 、含水率 $w = 34.32\%$ 、孔隙水压 $u_{w0} = 163.8$ kPa、孔隙气压 $u_{a0} = 214.1$ kPa。初始荷载 $q_0 = 0$ kPa,荷载增量 $\Delta q = 202.2$ kPa,固结过程控制吸力 u_s 不变,试样单面排水、排气。假定土性参数为常数,包括压缩系数 $a_v = 2.42 \times 10^{-4}$ kPa⁻¹,气渗透系数 $k_a = 1 \times 10^{-13}$ m/s,水渗透系数 $k_w = 1 \times 10^{-10}$ m/s。水分特征关系式为^[2]

$$u_s = u_{sb} S_e^{-\lambda-1} \quad (24)$$

式中: u_{sb} 为土进气值; S_e 为有效饱和度, $S_e = (S_r - S_{res}) / (1 - S_{res})$, S_{res} 为残余饱和度; λ 为 $\lg S_e - \lg u_s$ 关系曲线的斜率。根据土性, $u_{sb} = 44$ kPa, $S_{res} = 15\%$ 以及 $\lambda = 2$ 。

固结结束后土样消散固结阶段的竖向变形仅为 0.7%,可认为是小变形。图 3 给出 4 种方法的解答和试验实测结果,可以看出,UCS1 模型在瞬时加载情况下的数值解与文献[4-6]解答整体基本吻合,模型得以验证。但瞬时加载下 4 种方法的解答在初期都与试验实测结果有较大偏差,这是因为试验荷载并非瞬时加载,而是具有一定发展过程^[6]。

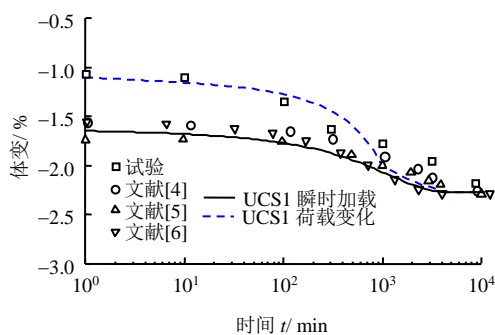


图 3 土层变形随时间变化曲线
Fig.3 Soil layer deformation over time

为更好地模拟试验结果,UCS1 模型进一步考虑加载过程。遗憾的是,该试验^[2]并未给出具体的加载过程,基于试验性状假设荷载增量按下式变化:

$$\Delta q' = \begin{cases} \Delta q_1 + t/t' \cdot (\Delta q_2 - \Delta q_1), & t \leq t' \\ \Delta q_2, & t > t' \end{cases} \quad (25)$$

式中: Δq_1 为初始瞬时荷载; Δq_2 为最终荷载,即

202.2 kPa; t' 为荷载增量变化时长。

当 $\Delta q_1 = 120$ kPa, $t' = 1\,000$ min 时,如图 3 所示,UCS1 模型计算值与试验实测结果基本吻合。

4 算例分析

4.1 土层参数

算例为高压压缩性非饱和黏土层,初始条件为: $H_0 = 2$ m, $S_{r0} = 80\%$, $e_0 = 1.1$, $G_s = 2.7$, $u_{a0} = 0$ kPa, $q_0 = 20$ kPa, $\Delta q = 100$ kPa,压缩指数 $C_c = 1$ 。水分特征曲线关系式采用式(24),据土性参数,假定 $S_{res} = 15\%$, $\lambda = 2$, $u_{sb} = 30$ kPa。设定计算终止时间 $t_f = 10\,000$ d,取 51 个计算单元。考虑工程常见边界条件:顶面排水、排气,底面不排水、不排气。孔隙水、气渗透系数采用 Brooks 等^[16]提出的关系式:

$$\left. \begin{aligned} k_w &= k_{ws}, (u_a - u_w) \leq u_{sb} \\ k_w &= k_{ws} S_e^{(2+3\lambda)/\lambda}, (u_a - u_w) > u_{sb} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

$$\left. \begin{aligned} k_a &= 0, (u_a - u_w) \leq u_{sb} \\ k_a &= k_d (1 - S_e)^2 [1 - S_e^{(2+\lambda)/\lambda}], (u_a - u_w) > u_{sb} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

式中: k_{ws} 为饱和状态下孔隙水渗透系数,设 $k_{ws} = 1 \times 10^{-9}$ m/s; k_d 为土干燥状态下孔隙气渗透系数。

4.2 结果分析

4.2.1 加荷压密阶段

加荷压密阶段前后,土层孔隙比与饱和度随土层深度的变化如图 4 所示。由于土体自重,初始孔隙比 e_0 自上而下从 1.100 减小到 0.875,加荷压密完成后,孔隙比 e_1 等比例减小。由于加荷压密仅为孔隙气体压缩,饱和度 S_{r1} 升高,且由于土体自重因素,且沿土层深度自上而下略有减小(88.14%~87.92%)。

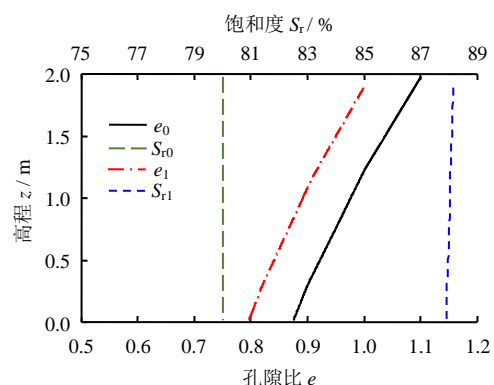


图 4 加荷压密阶段孔隙比与饱和度随土层深度变化
Fig.4 Profile of void ratio and saturation degree during initial compression phase

图 5 给出了加荷压密前后孔隙水压、孔隙气压随土层深度的变化。据式(24),初始基质吸力 $u_{s0} =$

34.30 kPa; 据式(8), 初始孔隙水压 $u_{w0} = -34.30$ kPa。加荷压密完成后, 孔隙水压 u_{w1} 及孔隙气压 u_{a1} 均有不同程度升高, 同样考虑土体自重, 二者沿土层深度自上而下略有减小, 孔隙水压为 54.53~50.58 kPa, 孔隙气压为 86.87~82.97 kPa; 压密前后基质吸力变化不大。伴随孔隙气体压缩, 该阶段土层沉降量为 0.093 m, 竖向应变达 4.65%。

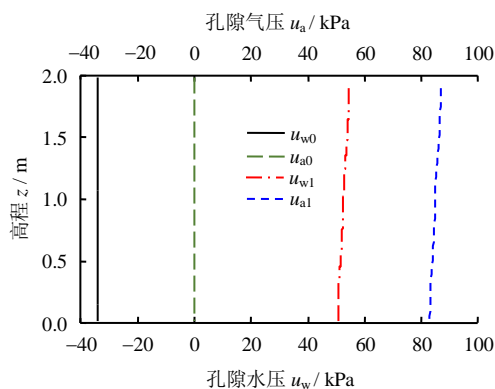


图5 加荷压密阶段孔隙水压与孔隙气压随土层深度变化
Fig.5 Profile of pore water and air pressure during initial compression phase

4.2.2 消散固结阶段

图 6、7 分别给出了土层表面沉降量、土层中部 ($j=25$) 饱和度随时间的关系。两者均考虑不同气、水渗透比 k_d/k_{ws} 对曲线的影响。如图 6 所示, 消散固结阶段土层表面沉降量随固结时间增加, 从 93 mm 增加到 419 mm, 该阶段土层应变达 16.4%。此外, k_d/k_{ws} 值对最终沉降量基本无影响, k_d/k_{ws} 越小, 达到同一沉降量所需时间越长。可见, 孔隙气渗透系数增加可加速土体固结。

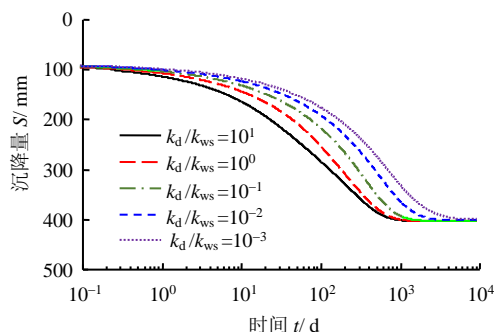


图6 沉降量随时间变化曲线
Fig.6 Soil layer settlement over time

从图 7 可以看出, k_d/k_{ws} 值对土层饱和度影响较大, 当 k_d/k_{ws} 分别为 10^1 、 10^0 或 10^{-1} 时, 固结一定时间后土层中部饱和度 S_r 随固结时间开始增加, 在固结后期达到稳定, 且 k_d/k_{ws} 越大, 饱和度增加

越早, 最终饱和度越大。与此相反, 当 k_d/k_{ws} 分别为 10^{-2} 或 10^{-3} 时, 固结一定时间后, 土层中部饱和度随固结时间减小, 固结后期达到稳定, k_d/k_{ws} 越小, 最终饱和度 S_r 越小。这是因为, 孔隙气渗透系数越大, 相同时间土层排出的气体体积越多。同一时刻, 当土体单元排出的孔隙气体积大于孔隙水体积, 则土体饱和度升高, 反之, 饱和度降低。

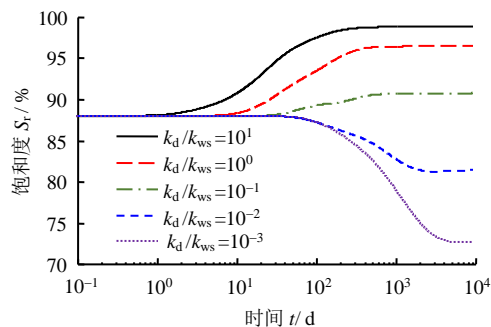


图7 土层中部饱和度随时间变化曲线
Fig.7 Mid-layer saturation degree over time

设非饱和土消散固结阶段的固结度为

$$U^t = \frac{S^t - S_1}{S^\infty - S_1} \quad (28)$$

式中: S^∞ 为最终沉降量。

改变荷载增量 Δq 的大小, 当荷载增量 Δq 分别为 10^{-1} 、 10^0 、 10^1 、 10^2 、 2×10^2 kPa 时, 消散固结阶段土层总应变分别为 0.029%、0.285%、2.62%、16.4%、25.04%。图 8 给出了渗透系数为常数情况下固结度随时间变化规律。从图中可以看出, 土层应变较小时, 固结度接近, 如总应变 0.029% 和 0.285% 情况下的固结度基本重合。相同时刻固结度随应变的增大而增大, 这是因为土体变形越大, 渗透路径越短, 相应的水、气消散的越快, 固结速率也越快。这与饱和土大变形固结理论在不同应变情况下的固结度变化规律相同^[10-11]。

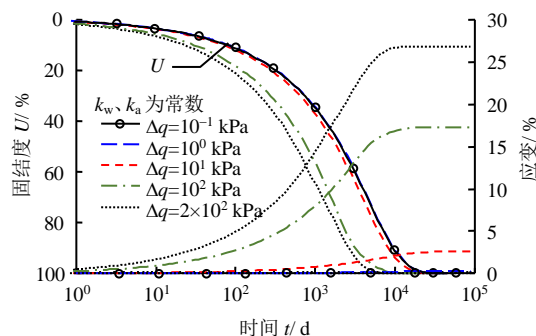
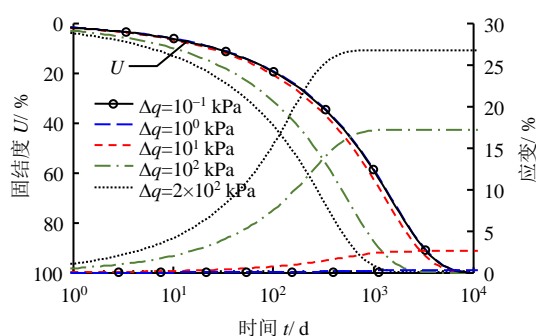
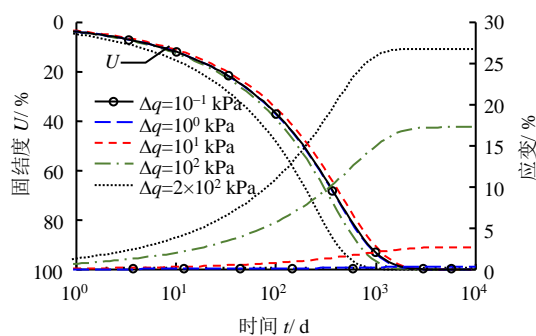
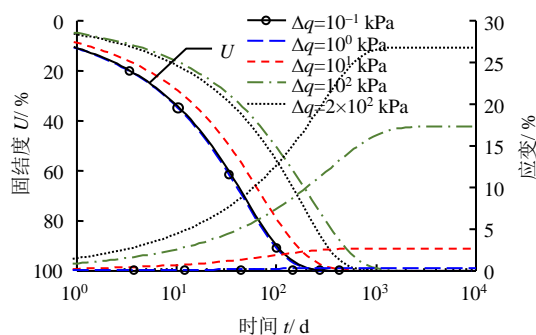


图8 渗透系数为常数时固结度及应变随时间变化曲线
Fig.8 Consolidation degree and strain over time with constant hydraulic conductivity

有意思的是,当水、气渗透系数采用非线性公式(26)、(27)计算时, k_d/k_{ws} 值对不同变形情况下的固结度有显著影响。如图9所示,当 $k_d/k_{ws} = 10^{-2}$ 时(图9(a)),不同变形情况下固结度变化规律与渗透系数为常数时相似。而随着 k_d/k_{ws} 值增大,如图9(b)、9(c)所示,当 k_d/k_{ws} 为 10^{-1} 、 10^0 时,相同时刻固结度随应变的增大而先减小后增大。分析其原因,土体固结变形虽然缩短了渗透路径,但水、气渗透系数是饱和度 S_r 的函数。如前文所述(图7), k_d/k_{ws} 值的大小影响固结过程中饱和度 S_r 的变化,进而影响水、气渗透系数的大小。

(a) $k_d/k_{ws} = 10^{-2}$ (b) $k_d/k_{ws} = 10^{-1}$ (c) $k_d/k_{ws} = 10^0$ 图9 不同 k_d/k_{ws} 值时固结度及应变随时间变化曲线Fig.9 Consolidation degree and strain over time with different k_d/k_{ws}

若固结过程中土体饱和度增大,则水渗透系数增大,气渗透系数减小;反之,若固结过程中土体

饱和度减小,则水渗透系数减小,气渗透系数增大。因此,不同变形情况下固结速率变化是渗透路径缩短和渗透系数变化的综合反映。当 k_d/k_{ws} 分别为 10^{-1} 、 10^0 时,荷载较小时,变形较小,气渗透系数减小对固结度的影响占主导,固结速率减小。而荷载较大时,变形较大,渗透路径缩短对固结度的影响占主导,固结速率增大。

4.2.3 大、小变形固结理论比较

根据小变形固结理论对 UCS1 程序进行简化,不考虑渗透路径变化,且土性参数取大变形计算后得到的平均值。此处仅对比消散固结阶段非饱和土大、小变形固结理论的差异。

采用小变形固结理论(SM)计算时,消散固结阶段的压缩系数和水、气渗透系数分别为

$$a_{v1} = \frac{e_1 - e_{\text{final}}}{\sigma'_{\text{final}} - \sigma'_1} \quad (29)$$

$$\bar{k}_w = k_{ws} \bar{S}_e^{(2+3\lambda)/\lambda} \quad (30)$$

$$\bar{k}_a = k_d (1 - \bar{S}_e)^2 (1 - \bar{S}_e^{(2+\lambda)/\lambda}) \quad (31)$$

式中: e_{final} 和 σ'_{final} 分别为最终孔隙比和最终有效应力; $\bar{S}_e = (S_{e1} + S_{e,\text{final}})/2$, 为大变形计算后得到的平均有效饱和度; $S_{e,\text{final}}$ 为最终有效饱和度。

图10给出了 $k_d/k_{ws} = 10^{-1}$ 时土层中部($j=25$)孔压和表面沉降量的大、小变形固结理论解答。从

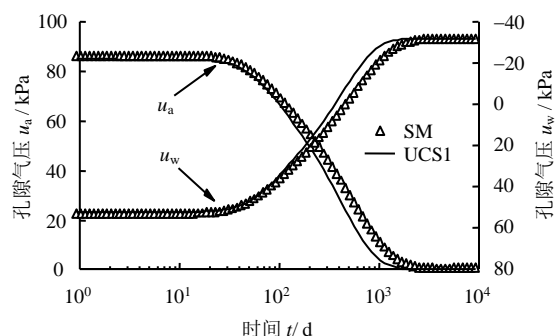
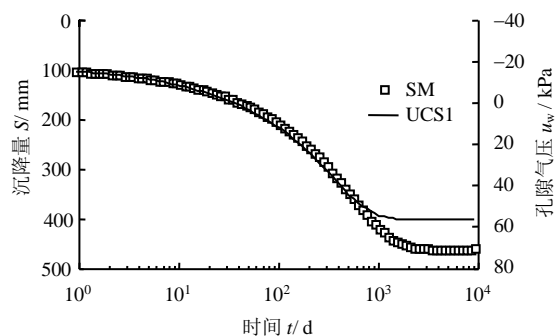
(a) u_a-t-u_w 曲线(b) $S-t-u_w$ 曲线

图10 土层中部孔压和表面沉降量随时间变化曲线

Fig.10 Pore pressure and soil settlement over time

图中可以看出, 在固结前期, 由于土体变形较小, 大、小变形固结理论计算的孔隙水压、孔隙气压和沉降量基本保持一致。随着变形量增大, 当土体消散固结阶段总应变达到 5% 左右, 二者开始出现差异, 表现为大变形固结理论计算的孔隙水压和孔隙气压消散速度快于小变形。与此同时, 土体表面沉降量也略大于小变形固结理论计算值。而固结后期, 随着孔隙水压和孔隙气压完全消散, 大、小变形固结理论计算的孔隙水压和孔隙气压趋于一致, 但最终表面沉降量的小变形固结理论计算值大于大变形固结理论的解答。因此, 采用小变形固结理论会高估非饱和土层的沉降值。

5 结 论

本文建立了一种非饱和土一维固结模型, 对模型进行了验证, 并开展了算例分析, 得到如下结论:

(1) 该模型可以考虑消散固结过程中土性参数的非线性变形, 可以分析大变形问题。

(2) 气、水渗透系数比 k_d/k_{ws} 越大, 土层消散固结越快, k_d/k_{ws} 大于一定值后土体饱和度随固结时间延长而增加; 随 k_d/k_{ws} 值增大, 相同时刻固结度随应变的增大而先减小后增大。

(3) 土层应变大于 5% 时, 大、小变形固结理论的解答开始出现差异, 小变形计算的非饱和土层最终沉降量偏大。

参 考 文 献

- [1] BARDEN L. Consolidation of compacted and unsaturated clays[J]. **Geotechnique**, 1965, 15(3): 267—286.
- [2] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons Inc., 1993.
- [3] 陈正汉, 谢定义, 刘祖典. 非饱和土固结的混合物理论[J]. 应用数学和力学, 1993, 14(2): 127—137.
CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, LIU Zu-dian. Consolidation theory of unsaturated soil based on the theory of mixture[J]. **Applied Mathematics and Mechanics**, 1993, 14(2): 127—137.
- [4] 殷宗泽, 凌华. 非饱和土一维固结简化计算[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 633—637.
YIN Zong-ze, LING Hua. Simplified computation of 1D consolidation for partially saturated soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(5): 633—637.
- [5] 曹雪山, 殷宗泽. 一维非饱和土固结简化计算的改进方法[J]. 公路交通科技, 2009, 26(10): 1—5.
CAO Xue-shan, YIN Zong-ze. An improved method of simplified computation of 1D consolidation for unsaturated soil[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2009, 26(10): 1—5.
- [6] 苏万鑫, 谢康和. 非饱和土一维固结混合流体方法的解析分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2661—2665.
SU Wan-xin, XIE Kang-he. Analytical solution of 1D consolidation of unsaturated soil by mixed fluid method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2661—2665.
- [7] QIN A F, SUN, D A, TAN Y W. Analytical solution to one-dimensional consolidation in unsaturated soils under loading varying exponentially with time[J]. **Computers and Geotechnics**, 2010, 37(1—2): 233—238.
- [8] 黄杰卿. 非线性大应变固结理论与试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
HUANG Jie-qing. Theoretical and experimental study on nonlinear finite strain consolidation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [9] YONG R N, SIU S K H, SHEERAN D E. On the stability and settling of suspended solids in settling ponds. I: Piece-wise linear consolidation analysis of sediment layer[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1983, 20: 817—826.
- [10] FOX P J, BERLES J D. CS2: A piecewise-linear model for large strain consolidation[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1997, 21(7): 453—475.
- [11] FOX P J, DI NICOLA M, QUIGLEY D W. Piecewise-linear model for large strain radial consolidation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2003, 129(10): 940—950.
- [12] ZHOU Y D, DENG A, WANG C. Finite-difference model for one-dimensional electro-osmotic consolidation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013, 54: 152—165.
- [13] DENG A, ZHOU Y D. Modeling electroosmosis and surcharge preloading consolidation. I: model formulation[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2016, 4: 04015093.
- [14] BISHOP A W, ALPAN I, BLIGHT G E, et al. Factors controlling the shear-strength of partly saturated cohesive soils[C]//ASCE Conference on Shear Strength of Cohesive Soils. Boulder: [s. n.], 1960: 503—532.
- [15] AITCHISON G D. Relationship of moisture and effective stress functions in unsaturated soils[C]//Conference of Pore Pressure and Suction in Soils. London: Butterworths, 1961: 47—52.
- [16] BROOKS R H, COREY A T. Hydraulic properties of porous media[R]. Fort Collins: Colorado State University, 1964.