

DOI: 10.11779/CJGE202204005

饱和块状混合回填土地基的一维固结分析

胡亚元, 周焕慧

(浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058)

摘要: 用块状渣土置换软弱地基和回填低洼谷地等是处置工程渣土的有效途径。为了分析饱和块状混合回填土地基的固结性状, 运用混合物理论建立了其一维固结模型。首先, 假定块状土固相和充填土固相之间满足等应变条件, 获得了饱和块状混合回填土中各相应变与块状土孔隙变形和充填土孔隙变形的关系式。其次, 在小应变条件下, 根据自由能势函数方程建立了饱和块状混合回填土的一维线弹性本构方程, 再结合达西定律和应力平衡方程获得了一维固结控制方程。再次, 利用分离变量法得到一维固结解析解, 通过退化本文模型与已有模型进行对比, 验证了本文模型的正确性。最后, 基于所得解析解, 分析了充填土孔隙渗透系数、块状土孔隙渗透系数以及流体交换参数等因素对饱和块状混合回填土地基固结性状的影响。分析结果表明: 充填土孔隙渗透系数对饱和块状混合回填土地基整体固结性状起主导作用; 在固结初期, 块状土超孔压会有一定程度的上升, 且3个参数具有相似的作用机理。

关键词: 工程渣土; 饱和双重孔隙介质; 混合物理论; 一维固结; 解析解

中图分类号: TU433 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)04-0632-11

作者简介: 胡亚元(1968—), 男, 博士, 副教授, 主要从事环境土工和岩石本构关系的研究工作。E-mail: huyayuan@zju.edu.cn。

One-dimensional consolidation analysis of saturated lumpy composite backfill foundation

HU Ya-yuan, ZHOU Huan-hui

(Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: It is an effective way to replace the soft foundation waste and backfill the low-lying valley with the lumpy waste. In order to explore the consolidation behaviors of saturated lumpy composite backfill foundation, one-dimensional (1-D) consolidation model is established by using the mixture theory. Firstly, based on the assumption of the equal solid strain condition between lumpy soil and filling soil, the formulations are obtained between each constituent strain and pore deformations in lumpy soil and filling soil. Then, under small strain, the 1-D linear elastic constitutive equations for the saturated lumpy composite backfill soil are derived by applying the free energy potential constitutive equations, and the governing equation for 1-D consolidation is provided based on the Darcy's law and the stress equilibrium equation. Meanwhile, its analytical solution is gained by using the separation variable method, and the contrast between the degenerating model and other existing ones shows the validity of the proposed model. Finally, the influences of two pore permeability coefficients and fluid exchange parameter on the characteristics of 1-D consolidation for the saturated lumpy composite backfill foundation are studied by adopting the analytical solution. The analysis results indicate that the permeability coefficient in filling soil plays a leading role in the consolidation behaviors, and the pore pressure in the lumpy soil increases to a certain extent at the initial stage of consolidation and three parameters have the similar mechanism.

Key words: construction waste; saturated double-porosity medium; mixture theory; 1-D consolidation; analytical solution

0 引言

随着中国经济迅速发展和城市化水平不断提高, 促使旧城改造、轨道交通建设和地下空间开发蓬勃发展, 产生了大量的工程渣土^[1]。工程渣土的另一个来源是采矿工程的开采废料^[2], 如露天矿山开采产生的块状黏土等废弃物。据统计, 中国每年约产生20亿吨

工程渣土^[3]。以往通常采用渣土场方式处置这些工程渣土, 不仅严重占用土地资源, 污染环境, 而且还会诱发滑坡、泥石流等地质灾害, 危害人民生命安全,

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178360)

收稿日期: 2021-01-27

造成巨大财产损失^[4]。为了解决渣土场地逐渐饱和、土地资源日益匮乏等问题, 变废为宝, 在一些发达国家和中国沿海沿湖地区, 经常利用它们置换建筑物软弱地基土层, 回填低洼谷地、围垦沿海沿湖滩涂, 充当民用、工业和基础设施用地^[5-7]。

以往针对回填土地基固结特性的研究中, 通常把回填土地基视为与天然地基一样的单重孔隙介质, 采用经典的 Terzaghi 理论或 Biot 理论进行固结分析。然而, 在实际工程中, 为了提高地基强度和降低沉降, 有很大一部分回填土采用的是块状黏土或块状渣土, 造成孔隙在空间上不均匀分布, 使得此类回填土地基具有明显的双重孔隙结构: 一类是块状土内的小孔隙, 另一类是块状土之间的大孔隙^[8-11], 以下分别简称为块状土孔隙和块状土裂隙。与经典双重孔隙介质略有不同的是, 在块状回填土的块状土裂隙中, 还夹杂着丰富的充填土。本文把具有这种骨架的饱和土体称为饱和块状混合土, 以区别于其它结构的土体。在国外, 针对饱和块状混合回填土地基的研究已逐步突破 Terzaghi 理论或 Biot 理论的局限性, 形成了独特的固结理论和固结方程, 但在国内, 有关饱和块状混合回填土的文献报道凤毛麟角, 尚未开展有效的研究。

国外的饱和块状混合回填土固结理论主要有两种思路:

(1) 借助于 Barrenblatt 等^[12]开创的双重孔隙介质理论来展开。Aifantis^[13]把 Barrenblatt 等^[12]双重孔隙介质概念引入岩土领域, 采用双有效应力理论建立了饱和双重孔隙介质的线弹性本构方程。Li 等^[14]和 Sanchez 等^[15]从混合物功共轭能量方程出发, 建立了非饱和双重孔隙介质的弹塑性本构模型。在本构模型的理论基础之上, 一些学者开展了相关固结理论的研究。Khalili 等^[16]利用自身提出的饱和双重孔隙线弹性本构模型建立固结理论, 运用有限差分法分析了饱和双重孔隙介质在均布荷载作用下的固结沉降特性。Yang 等^[17]利用 Nogami 等^[18]提出的饱和双重孔隙介质一维固结方程, 分析了考虑回填土自重影响的饱和块状回填土地基固结特性。上述固结理论均未考虑块状土裂隙中夹杂的充填土的力学性质。

(2) 采用均匀化理论来研究饱和块状混合土体的固结特性。Shi 等^[19]将饱和块状混合土体视为均质材料, 建立了它在一维条件下的固结模型, 通过对比数值模拟结果和试验数据来研究饱和块状混合土体的一维固结特性。Shi 等^[19]的固结模型虽然考虑了块状土裂隙中充填土的影响, 但忽略了混合物各组分的体积分数之和等于 1 这一基本条件。本文汲取上述两种固结理论的优点, 结合混合物理论和双重孔隙介质理论来建立饱和块状混合回填土的本构方程, 进而建立饱

和块状混合回填土地基的一维固结方程, 并利用分离变量法求解得到一维固结解析解。将退化后的本文模型与已有模型进行对比, 验证了本文模型的正确性。最后, 通过模型参数对比, 分析了饱和块状混合回填土地基固结性状。

1 饱和块状混合回填土组分体积分数

图 1 给出了饱和块状混合回填土的结构特征: 饱和块状混合回填土由块状土固相、块状土孔隙流相、块状土裂隙中的充填土固相和充填土孔隙流相组成。本文用 L 表示块状土, LS 表示块状土固相, LP 表示块状土孔隙流相; 用 F 表示块状土裂隙, FS 表示块状土裂隙中充填土固相, FP 表示块状土裂隙中充填土孔隙流相(块状土裂隙中未被充填土固相所占有的那部分孔隙被流相全部占有)。令 $\alpha \in \{LS, FS, LP, FP\}$ 为各组分指标, φ_α 表示 α 组分体积分数, 有

$$\varphi_{LS} + \varphi_{FS} + \varphi_{LP} + \varphi_{FP} = 1 \quad (1)$$

令 $\rho_{r\alpha}$ 是 α 组分的真实(材料)密度, ρ_α 为 α 组分的平均密度, $\rho_\alpha = \varphi_\alpha \rho_{r\alpha}$ 。

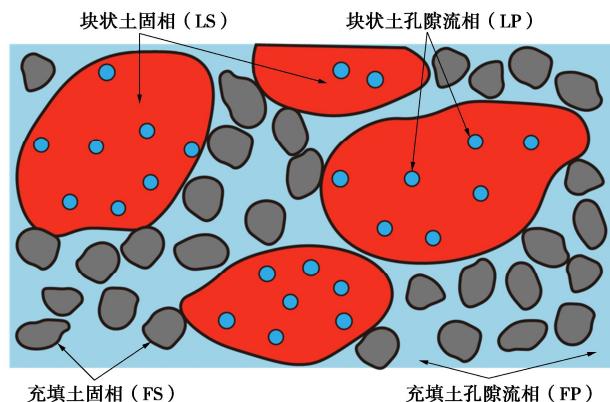


图 1 饱和块状混合回填土特征单元体示意图

Fig. 1 Schematic diagram for representative volume element of saturated lumpy composite backfill soil

从图 1 可以看出, 饱和块状混合回填土可分成块状土和充填土两部分来考虑。块状土部分可视为由块状土固相基质和块状土孔隙流相组成的饱和块状土孔隙介质, 而充填土部分可视为由充填土固相基质和充填土孔隙流相组成的饱和充填土孔隙介质。再将饱和充填土孔隙介质嵌套在饱和块状土孔隙介质之间的裂隙中组合成饱和双重孔隙介质(饱和块状混合回填土)。为了记述简便, 下文将饱和块状土孔隙介质简称为饱和块状土, 把饱和充填土孔隙介质简称为饱和充填土, 把饱和块状混合回填土称为饱和双重孔隙介质。因此, 饱和块状土和饱和充填土在饱和双重孔隙介质中的体积分数分别为 $\varphi_L = \varphi_{LS} + \varphi_{LP}$ 和 $\varphi_F = \varphi_{FS} + \varphi_{FP}$, 满足 $\varphi_L + \varphi_F = 1$ 。当把饱和块状土和饱和充填土视为两个单

独的混合物时，块状土固相的体积分数为 $\varphi_{LS}^L = \varphi_{LS} / \varphi_L$ ，块状土孔隙流相的体积分数为 $\varphi_{LP}^L = \varphi_{LP} / \varphi_L$ ，满足 $\varphi_{LS}^L + \varphi_{LP}^L = 1$ ；充填土固相的体积分数为 $\varphi_{FS}^F = \varphi_{FS} / \varphi_F$ ，充填土孔隙流相的体积分数为 $\varphi_{FP}^F = \varphi_{FP} / \varphi_F$ ，满足 $\varphi_{FS}^F + \varphi_{FP}^F = 1$ 。令 ρ_{LS}^L 为块状土固相在饱和块状土中的平均密度， ρ_{FS}^F 为充填土固相在饱和充填土中的平均密度，则有 $\rho_{LS}^L = \varphi_{LS}^L \rho_{rLS}$ ， $\rho_{FS}^F = \varphi_{FS}^F \rho_{rFS}$ 。

2 饱和块状混合回填土组分应变

在一维小应变条件下，假定竖向为 x 方向，应变以压为正。令 ε_s 为固相应变， ε_{FP} 为充填土孔隙流相应变， ε_{LP} 为块状土孔隙流相应变。为了考虑块状土孔隙和充填土孔隙变形对饱和块状混合回填土中各相变形相互耦合机制的影响，本文将 ε_s ， ε_{FP} 和 ε_{LP} 进行分解，来获得本构建模所需的应变和应力状态变量。

2.1 固相应变表达式

在双重孔隙介质中，固相应变可拆分为块状土固相应变和充填土固相应变来考虑。令 ε_{LS} 为块状土固相应变， ε_{FS} 为充填土固相应变。假定固相和流相之间不存在质量交换，根据混合物理论^[20-21]可知，块状土固相和充填土固相的质量守恒方程分别为

$$\frac{d\rho_{LS}}{dt} - \rho_{LS} \frac{dv_{LS}}{dx} = \frac{d\rho_{LS}}{dt} - \rho_{LS} \dot{\varepsilon}_{LS} = 0 , \quad (2)$$

$$\frac{d\rho_{FS}}{dt} - \rho_{FS} \frac{dv_{FS}}{dx} = \frac{d\rho_{FS}}{dt} - \rho_{FS} \dot{\varepsilon}_{FS} = 0 , \quad (3)$$

式中， v_{LS} 和 v_{FS} 分别为块状土固相和充填土固相的速度。先来推导块状土固相应变的表达式，求解式(2)并根据初始应变为零可得

$$\varepsilon_{LS} = \ln \frac{\rho_{LS}}{\rho_{LS0}} . \quad (4)$$

式中， ρ_{LS0} 为块状土固相的初始平均密度，令 φ_{L0} 为块状土整体的初始体积分数， φ_{LS0}^L 为块状土固相在块状土中的初始体积分数， ρ_{rLS0} 为块状土固相的初始真实密度，将 $\rho_{LS} = \varphi_{LS} \rho_{rLS}$ ， $\varphi_{LS}^L = \varphi_{LS} / \varphi_L$ 代入式(4)得

$$\varepsilon_{LS} = \ln \frac{\varphi_L}{\varphi_{L0}} + \ln \frac{\varphi_{LS}^L}{\varphi_{LS0}^L} + \ln \frac{\rho_{rLS}}{\rho_{rLS0}} . \quad (5)$$

式(5)中的 $\ln(\varphi_L / \varphi_{L0})$ 与块状土整体在双重孔隙介质中的体积分数有关，鉴于块状土整体在双重孔隙介质中起到骨架作用，而块状土裂隙体积分数 φ_F 与块状土整体的体积分数 φ_L 之和等于 1，故称 $\varepsilon_H = \ln(\varphi_L / \varphi_{L0})$ 为块间裂隙骨架应变；类似地， $\varepsilon_D = \ln(\varphi_{LS}^L / \varphi_{LS0}^L)$ 可称为块状土孔隙骨架应变； $\vartheta_{LS} = \ln(\rho_{rLS} / \rho_{rLS0})$ 可称为块状土固相基质应变，则式(5)可表示为

$$\varepsilon_{LS} = \varepsilon_H + \varepsilon_D + \vartheta_{LS} . \quad (6)$$

式(6)表明，块状土固相应变可分解为块间裂隙骨架应变 ε_H 、块状土孔隙骨架应变 ε_D 和块状土固相基质

应变 ϑ_{LS} 之和。

同理，求解式(3)可以得到充填土固相应变的表达式为

$$\varepsilon_{FS} = \varepsilon_F + \varepsilon_C + \vartheta_{FS} , \quad (7)$$

式中， $\varepsilon_F = \ln(\varphi_F / \varphi_{F0})$ 为块间裂隙应变， φ_{F0} 为充填土整体的初始体积分数， $\varepsilon_C = \ln(\varphi_{FS}^F / \varphi_{FS0}^F)$ 为充填土孔隙骨架应变， φ_{FS0}^F 为充填土中固相组分的初始体积分数， ϑ_{FS} 为充填土固相基质应变， ρ_{rFS0} 为充填土固相的初始真实密度。由式(7)可知，充填土固相应变可分解为块间裂隙应变、充填土孔隙骨架应变和充填土固相基质应变之和。

根据定义， ε_C 与充填土孔隙流相的体积分数相关， ε_D 与块状土孔隙流相的体积分数相关，同时，由于 φ_L 与 φ_F 之和为 1，故从式(5)和式(7)的推导过程可知式(5)中 ε_H 与式(7)中 ε_F 相关联。式(5)和(7)的应变分解方式有利于突显块状土孔隙变形和充填土孔隙变形在双重孔隙介质各相耦合机制中的纽带作用。由于块状土和充填土排列紧密，两者之间可近似认为不存在相对位移，因而本文假定块状土固相和充填土固相满足等应变条件，即 $\varepsilon_{LS} = \varepsilon_{FS}$ 。根据混合物的均匀化理论^[22]，固相应变可表示为

$$\varepsilon_s = \frac{\varphi_L \varepsilon_{LS} + \varphi_F \varepsilon_{FS}}{\varphi_L + \varphi_F} = \varepsilon_{LS} = \varepsilon_{FS} . \quad (8)$$

2.2 流相应变表达式

令 ε_{FP} 为充填土孔隙流相应变， ε_{LP} 为块状土孔隙流相应变。根据混合物理论^[20-21]可知，充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的质量守恒方程为

$$\frac{d\rho_{FP}}{dt} - \rho_{FP} \frac{dv_{FP}}{dx} = \frac{d\rho_{FP}}{dt} - \rho_{FP} \dot{\varepsilon}_{FP} = c_{FP} , \quad (9)$$

$$\frac{d\rho_{LP}}{dt} - \rho_{LP} \frac{dv_{LP}}{dx} = \frac{d\rho_{LP}}{dt} - \rho_{LP} \dot{\varepsilon}_{LP} = c_{LP} , \quad (10)$$

式中， v_{FP} 和 v_{LP} 分别表示充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的速度， c_{FP} 和 c_{LP} 分别表示充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的质量交换率，且两者满足 $c_{FP} + c_{LP} = 0$ 。求解式(9)和式(10)并根据初始应变为零可得

$$\varepsilon_{FP} = \ln \frac{\rho_{FP}}{\rho_{FP0}} - \int_0^t \frac{c_{FP}}{\rho_{FP}} dt , \quad (11)$$

$$\varepsilon_{LP} = \ln \frac{\rho_{LP}}{\rho_{LP0}} - \int_0^t \frac{c_{LP}}{\rho_{LP}} dt , \quad (12)$$

式中， ρ_{FP0} 和 ρ_{LP0} 分别为充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的初始平均密度。令 φ_{FP0} 和 φ_{LP0} 分别为充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的初始体积分数， ρ_{rFP0} 和 ρ_{rLP0} 分别为充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的初始真实密度。利用 $\rho_{FP} = \varphi_{FP} \rho_{rFP}$ 和 $\rho_{LP} = \varphi_{LP} \rho_{rLP}$ ，式(11)和式(12)可表示为

$$\varepsilon_{FP} = \ln \frac{\varphi_{FP}}{\varphi_{FP0}} + \ln \frac{\rho_{rFP}}{\rho_{rFP0}} - \int_0^t \frac{c_{FP}}{\varphi_{FP} \rho_{rFP}} dt , \quad (13)$$

$$\varepsilon_{LP} = \ln \frac{\varphi_{LP}}{\varphi_{LP0}} + \ln \frac{\rho_{rLP}}{\rho_{rLP0}} - \int_0^t \frac{c_{LP}}{\varphi_{LP}\rho_{rLP}} dt \quad . \quad (14)$$

根据式(5)和式(7)并在小应变情况下略去高阶项得

$$\varepsilon_H = \ln(\varphi_L / \varphi_{L0}) \approx (\varphi_L - \varphi_{L0}) / \varphi_{L0} \quad , \quad (15)$$

$$\varepsilon_F = -(\varphi_{L0} / \varphi_{F0}) \varepsilon_H \quad , \quad (16)$$

$$\varepsilon_D = \ln(\varphi_{LS}^L / \varphi_{LS0}^L) \approx (\varphi_{LS}^L - \varphi_{LS0}^L) / \varphi_{LS0}^L \quad , \quad (17)$$

$$\varepsilon_C = \ln(\varphi_{FS}^F / \varphi_{FS0}^F) \approx (\varphi_{FS}^F - \varphi_{FS0}^F) / \varphi_{FS0}^F \quad . \quad (18)$$

小应变条件下充填土孔隙流相和块状土孔隙流相基质应变分别为

$$\vartheta_{FP} = \ln(\rho_{rFP} / \rho_{rFP0}) \quad , \quad (19)$$

$$\vartheta_{LP} = \ln(\rho_{rLP} / \rho_{rLP0}) \quad . \quad (20)$$

将式(15)~(20)代入式(13)和式(14), 结合小应变情况下 $\varphi_{FP} \approx \varphi_{FP0}$ 、 $\varphi_{LP} \approx \varphi_{LP0}$ 可得

$$\varepsilon_{FP} = -\frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{F0}} \varepsilon_H - \frac{\varphi_{FS0}}{\varphi_{FP0}} \varepsilon_C + \vartheta_{FP} - \int_0^t \frac{c_{FP}}{\varphi_{FP0}\rho_{rFP}} dt \quad , \quad (21)$$

$$\varepsilon_{LP} = \varepsilon_H - \frac{\varphi_{LS0}}{\varphi_{LP0}} \varepsilon_D + \vartheta_{LP} - \int_0^t \frac{c_{LP}}{\varphi_{LP0}\rho_{rLP}} dt \quad . \quad (22)$$

在实际工程中, 流体的流出量和流入量更具普适性, 定义充填土孔隙流相渗入量 $\zeta_{FP} = \varphi_{FP0}(\varepsilon_{FP} - \varepsilon_s)$, 块状土孔隙流相渗入量 $\zeta_{LP} = \varphi_{LP0}(\varepsilon_{LP} - \varepsilon_s)$, 结合式(8)和式(21)、(22)可得 ζ_{FP} 和 ζ_{LP} 的表达式分别为

$$\zeta_{FP} = \varphi_{FP0} \left(-\frac{\varphi_{F0}}{\varphi_{FP0}} \varepsilon_C + \vartheta_{FP} - \vartheta_{FS} \right) - \int_0^t \frac{c_{FP}}{\rho_{rFP}} dt \quad , \quad (23)$$

$$\zeta_{LP} = \varphi_{LP0} \left(-\frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{LP0}} \varepsilon_D + \vartheta_{LP} - \vartheta_{LS} \right) - \int_0^t \frac{c_{LP}}{\rho_{rLP}} dt \quad . \quad (24)$$

3 饱和块状混合回填土本构方程

3.1 各组分应力关系

在一维小应变条件下, 令 σ 为饱和块状混合回填土的总应力, σ_α 为 α 组分的应力, 则有

$$\sigma = \sigma_{LS} + \sigma_{FS} + \sigma_{LP} + \sigma_{FP} \quad . \quad (25)$$

令 P_{LS} 和 P_{FS} 分别为块状土固相基质和充填土固相基质的真实应力, P_{LP} 和 P_{FP} 分别为块状土孔隙流相和充填土孔隙流相孔压。根据混合物理论^[20-21], 各组分应力和基质真实应力存在以下关系: $\sigma_\alpha = \varphi_\alpha P_\alpha$, 则式(25)可表示为

$$\sigma = \varphi_{LS} P_{LS} + \varphi_{FS} P_{FS} + \varphi_{LP} P_{LP} + \varphi_{FP} P_{FP} \quad . \quad (26)$$

先考虑块状土, 它由块状土固相和块状土孔隙流相组成, 令 P_L 为块状土整体所受的总应力, 则相应的应力关系为

$$P_L = (\varphi_{LS0} P_{LS} + \varphi_{LP0} P_{LP}) / \varphi_{L0} = \varphi_{LS0}^L P_{LS} + \varphi_{LP0}^L P_{LP} \quad , \quad (27)$$

同理可得, 充填土相应的应力关系为

$$P_F = (\varphi_{FS0} P_{FS} + \varphi_{FP0} P_{FP}) / \varphi_{F0} = \varphi_{FS0}^F P_{FS} + \varphi_{FP0}^F P_{FP} \quad , \quad (28)$$

式中, P_F 为充填土整体所受的总应力。最后考虑双重

孔隙介质, 它可视为由块状土整体作为基质和充填土整体作为块状土裂隙组成, 则其应力关系满足:

$$\sigma = \varphi_{L0} P_{L0} + \varphi_{F0} P_{F0} \quad . \quad (29)$$

3.2 内能方程

由于不考虑温度场影响, 在推导过程中可以忽略热流项和热源项。根据混合物理论^[20-21], 饱和双重孔隙介质在小应变条件下的内能方程为

$$\dot{\xi} = \sigma_{LS} \dot{\varepsilon}_{LS} + \sigma_{FS} \dot{\varepsilon}_{FS} + \sigma_{LP} \dot{\varepsilon}_{LP} + \sigma_{FP} \dot{\varepsilon}_{FP} + \sum_{\alpha=LS}^{FP} \dot{\varepsilon}_\alpha \quad , \quad (30)$$

式中, 等号右侧前四项分别为各组分的机械能, 最后一项为固相和流相之间相对运动产生的能量供给量。利用 $\sigma_\alpha = \varphi_\alpha P_\alpha$ 、式(6)~(8)和式(21), (22), 式(30)可进一步表示为

$$\begin{aligned} \dot{\xi} = & \tilde{P}_H \dot{\varepsilon}_H + \varphi_{L0} \tilde{P}_D \dot{\varepsilon}_D + \varphi_{F0} \tilde{P}_C \dot{\varepsilon}_C + \sum_{\alpha=LS}^{FP} \varphi_{\alpha0} P_\alpha \dot{\varepsilon}_\alpha + \\ & \frac{P_{LP} c_{LP}}{\rho_{rLP}} + \frac{P_{FP} c_{FP}}{\rho_{rFP}} + \sum_{\alpha=LS}^{FP} \dot{\varepsilon}_\alpha \quad , \end{aligned} \quad (31)$$

式中, $\tilde{P}_H = \sigma - P_F$ 表示饱和块间裂隙介质有效应力, $\tilde{P}_D = P_L - P_{LP}$ 表示饱和块状土有效应力, $\tilde{P}_C = P_F - P_{FP}$ 表示饱和充填土有效应力。

3.3 本构方程

假定受力过程满足热力学局部平衡假定^[20], 则内能可表示为 $\xi = \xi(\eta, \varepsilon_H, \varepsilon_D, \varepsilon_C, \vartheta_\alpha)$, 对 ξ 求全微分后由式(31)和理性力学的 Coleman 关系式^[23]可得

$$\theta = \frac{\partial \xi}{\partial \eta}, \quad \tilde{P}_H = \frac{\partial \xi}{\partial \varepsilon_H}, \quad \varphi_{L0} \tilde{P}_D = \frac{\partial \xi}{\partial \varepsilon_D} \quad , \quad (32)$$

$$\varphi_{F0} \tilde{P}_C = \frac{\partial \xi}{\partial \varepsilon_C}, \quad \varphi_{\alpha0} P_\alpha = \frac{\partial \xi}{\partial \vartheta_\alpha} \quad , \quad (33)$$

$$\theta \dot{\eta} = \frac{P_{LP} c_{LP}}{\rho_{rLP}} + \frac{P_{FP} c_{FP}}{\rho_{rFP}} + \sum_{\alpha=LS}^{FP} \dot{\varepsilon}_\alpha \quad . \quad (34)$$

引入 Helmholtz 自由能 $\psi = \psi(\theta, \varepsilon_H, \varepsilon_D, \varepsilon_C, \vartheta_\alpha)$, 它与内能之间的关系为 $\psi = \xi - \theta \eta$, 对 ψ 求全微分后由式(32)~(34)得

$$\eta = -\frac{\partial \psi}{\partial \theta}, \quad \tilde{P}_H = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_H}, \quad \varphi_{L0} \tilde{P}_D = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_D} \quad , \quad (35)$$

$$\varphi_{F0} \tilde{P}_C = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_C}, \quad \varphi_{\alpha0} P_\alpha = \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta_\alpha} \quad , \quad (36)$$

式(35), (36)中 ψ 为自由能势函数, 就热力学性质而言是可逆的, 故式(35), (36)是饱和双重孔隙介质在一维小应变条件下的一般弹性本构关系。

假定温度恒定, 饱和双重孔隙介质的初始平衡态为 $(\theta, \varepsilon_H, \varepsilon_D, \varepsilon_C, \vartheta_\alpha) = (\theta_0, 0, 0, 0, 0)$, 在受到微小扰动后到达一个新的平衡态为 $(\theta_0, \varepsilon_H, \varepsilon_D, \varepsilon_C, \vartheta_\alpha)$ 。为了简化本构方程达到工程实用目的, 在饱和双重孔隙介质的本构模型研究中, 通常根据介质的孔隙组合结构和变形机制来选择应力和应变状态变量, 由此各应变状态变

量产生的机械能可以近似地假定相互独立。故小应变线弹性情况下自由能 ψ 可表示为

$$\psi = \frac{1}{2} E_H \varepsilon_H^2 + \frac{\varphi_{L0}}{2} E_D \varepsilon_D^2 + \frac{\varphi_{F0}}{2} E_C \varepsilon_C^2 + \frac{1}{2} \sum_{\alpha=LS}^{FP} \varphi_{\alpha 0} E_\alpha \vartheta_\alpha^2 , \quad (37)$$

式中, 等式右边的前三项分别是块间裂隙骨架、块状土孔隙骨架和充填土孔隙骨架变形引起的机械能, E_H , E_D 和 E_C 分别为块间裂隙骨架、块状土孔隙骨架和充填土孔隙骨架的压缩模量, 等式右边的最后一项反映的是块状土和充填土固相基质(土颗粒)、块状土和充填土流相基质(孔隙中流体)变形引起的机械能, E_{LS} 和 E_{FS} 分别为块状土和充填土固相基质的压缩模量, E_{LP} 和 E_{FP} 分别为块状土孔隙和充填土孔隙流相基质的压缩模量。由于假定温度保持不变, 故式中不含温度变量。把式(37)代入式(35), (36)再求逆可得

$$\varepsilon_H = \tilde{P}_H / E_H , \quad (38)$$

$$\varepsilon_D = \tilde{P}_D / E_D , \quad (39)$$

$$\varepsilon_C = \tilde{P}_C / E_C , \quad (40)$$

$$\vartheta_\alpha = P_\alpha / E_\alpha , \quad \alpha \in \{LS, FS, LP, FP\} . \quad (41)$$

令 E_S 为饱和双重孔隙介质整体的压缩模量, 结合(5)~(8)、式(26)~(28)、式(38)~(41)和 \tilde{P}_H , \tilde{P}_D , \tilde{P}_C 的定义可得

$$\varepsilon_S = a_{11} \sigma_{LS} + a_{12} \sigma_{FS} + a_{13} P_{FP} + a_{14} P_{LP} , \quad (42)$$

$$b_{11} \sigma_{FS} = b_{12} \sigma_{LS} + b_{13} P_{FP} + b_{14} P_{LP} , \quad (43)$$

式中, $a_{11} = \frac{1}{E_H} + \frac{1}{\varphi_{L0} E_D} + \frac{1}{\varphi_{LS0} E_{LS}}$, $a_{12} = -\frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{F0}} \frac{1}{E_H}$, $a_{13} = -\frac{\varphi_{L0} \varphi_{FP0}}{\varphi_{F0}} \frac{1}{E_H}$, $a_{14} = \frac{\varphi_{LP0}}{E_H} - \frac{\varphi_{LS0}}{\varphi_{L0} E_D}$, $b_{11} = \frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{F0}} \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_C} + \frac{\varphi_{F0}}{\varphi_{FS0} E_{FS}}$, $b_{12} = \frac{1}{E_H} + \frac{\varphi_{F0}}{\varphi_{L0} E_D} + \frac{\varphi_{F0}}{\varphi_{LS0} E_{LS}}$, $b_{13} = -\frac{\varphi_{FP0} \varphi_{L0}}{\varphi_{F0} E_H} + \frac{\varphi_{FS0}}{E_C}$, $b_{14} = \frac{\varphi_{LP0}}{E_H} - \frac{\varphi_{LS0} \varphi_{F0}}{\varphi_{L0} E_D}$ 。

结合式(42), (43)和式(26)并化简可得

$$\varepsilon_S = \sigma / E_S - A_{12} P_{FP} - A_{13} P_{LP} , \quad (44)$$

同理, 将式(38)~(41)代入式(23), (24)后, 再结合 \tilde{P}_H , \tilde{P}_D , \tilde{P}_C 的定义、式(26)~(28)以及式(43)并化简可得

$$\zeta_{FP} = -A_{12} \sigma + A_{22} P_{FP} + A_{23} P_{LP} - \int_0^t (c_{FP} / \rho_{rFP}) dt , \quad (45)$$

$$\zeta_{LP} = -A_{13} \sigma + A_{23} P_{FP} + A_{33} P_{LP} - \int_0^t (c_{LP} / \rho_{rLP}) dt . \quad (46)$$

式中

$$\frac{1}{E_S} = \frac{c_{11} c_{12}}{\varphi_{F0} (c_{11} + c_{12})} - \frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{F0}} \frac{1}{E_H} , \quad (47)$$

$$A_{12} = -\frac{c_{12} c_{13}}{c_{11} + c_{12}} , \quad A_{13} = -\frac{c_{11} c_{14}}{c_{11} + c_{12}} , \quad (48)$$

$$A_{22} = c_{21} + \frac{c_{13} (c_{22} - \varphi_{FP0} c_{12})}{c_{11} + c_{12}} , \quad A_{23} = \frac{\varphi_{F0} c_{13} c_{14}}{c_{11} + c_{12}} , \quad (49)$$

$$A_{33} = c_{23} - c_{14} \frac{\varphi_{LP0} c_{11} + c_{24}}{c_{11} + c_{12}} . \quad (50)$$

式中, $c_{11} = b_{11}$, $c_{12} = b_{12}$, $c_{13} = -\frac{1}{E_C} - \frac{\varphi_{FP0}}{\varphi_{FS0} E_{FS}}$, $c_{14} = -\frac{1}{E_D} - \frac{\varphi_{LP0}}{\varphi_{LS0} E_{LS}}$, $c_{21} = \frac{\varphi_{FS0}}{E_C} + \frac{\varphi_{FP0}}{E_{FP}}$, $c_{22} = -\frac{\varphi_{L0} \varphi_{FP0}}{\varphi_{F0} E_H} + \frac{\varphi_{FS0}}{E_C}$, $c_{23} = \frac{\varphi_{LS0}}{E_D} + \frac{\varphi_{LP0}}{E_{LP}}$, $c_{24} = \frac{\varphi_{LP0}}{E_H} - \frac{\varphi_{F0} \varphi_{LS0}}{\varphi_{L0} E_D}$ 。

c_{FP} 和 c_{LP} 根据文献[24]可表示为

$$c_{FP} = \chi (\rho_{rLP} P_{LP} - \rho_{rFP} P_{FP}) , \quad (51)$$

$$c_{LP} = \chi (\rho_{rFP} P_{FP} - \rho_{rLP} P_{LP}) . \quad (52)$$

式中 χ 为与渗透和孔隙尺寸有关的流体交换参数, 式(44)~(46)是饱和双重孔隙介质的固相、充填土孔隙流相和块状土孔隙流相渗入量的线弹性本构方程。

将应力用应变表示, 式(44)~(46)可转换得

$$\sigma = E_S \varepsilon_S + A_{12} E_S P_{FP} + A_{13} E_S P_{LP} , \quad (53)$$

$$\zeta_{FP} = -A_{12} E_S \varepsilon_S + (A_{22} - A_{12}^2 E_S) P_{FP} + (A_{23} - A_{12} A_{13} E_S) P_{LP} - \int_0^t \chi (P_{LP} - P_{FP}) dt , \quad (54)$$

$$\zeta_{LP} = -A_{13} E_S \varepsilon_S + (A_{23} - A_{12} A_{13} E_S) P_{FP} + (A_{33} - A_{13}^2 E_S) P_{LP} - \int_0^t \chi (P_{FP} - P_{LP}) dt . \quad (55)$$

4 固结控制方程及其求解

4.1 固结控制方程

由于固结方程不考虑体力和加速度, 则饱和双重孔隙介质的应力平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = 0 , \quad (56)$$

将式(53)代入式(56), 再利用 $\varepsilon_S = -\partial u / \partial x$ 可得

$$-E_S \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_{12} E_S \frac{\partial P_{FP}}{\partial x} + A_{13} E_S \frac{\partial P_{LP}}{\partial x} = 0 , \quad (57)$$

式中, u 表示饱和双重孔隙介质整体沿 x 方向的位移。

根据混合物理论, 饱和双重孔隙介质中充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的动量守恒方程可简化为

$$\frac{\partial \sigma_{FP}}{\partial x} + \hat{p}_{FP} = 0 , \quad (58)$$

$$\frac{\partial \sigma_{LP}}{\partial x} + \hat{p}_{LP} = 0 , \quad (59)$$

式中, \hat{p}_{FP} 和 \hat{p}_{LP} 表示充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的动量供给量, 且已忽略体力和加速度相关项。

充填土孔隙流相和块状土孔隙流相动量供给量满足 $\hat{p}_\beta = P_\beta \nabla \varphi_\beta - \varphi_\beta \varphi_{\beta 0} (v_\beta - v_s) \gamma_w / k_\beta$, 将它代入式(58), (59)并利用 $\sigma_\beta = \varphi_\beta P_\beta$ 可得

$$\frac{k_\beta}{\gamma_w} \frac{\partial P_\beta}{\partial x} + \varphi_{\beta 0} (v_\beta - v_s) = 0 \quad , \quad (60)$$

式中, $\beta \in \{FP, LP\}$, v_s 和 v_β 分别表示固相、充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的速度, k_β 为充填土孔隙流相和块状土孔隙流相的渗透系数。对式(60)求微分再结合渗入量 ζ_β 的定义以及 $\dot{\varepsilon}_\beta = \nabla v_\beta$, $\dot{\varepsilon}_s = \nabla v_s$ 可得

$$\frac{k_\beta}{\gamma_w} \frac{\partial^2 P_\beta}{\partial x^2} = \zeta_\beta \quad . \quad (61)$$

再将式(54), (55)代入式(61)可得

$$\begin{aligned} \frac{k_{FP}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 P_{FP}}{\partial x^2} &= A_{12} E_s \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + (A_{22} - A_{12}^2 E_s) \frac{\partial P_{FP}}{\partial t} - \\ &(A_{12} A_{13} E_s - A_{23}) \frac{\partial P_{LP}}{\partial t} - \chi (P_{LP} - P_{FP}) \quad , \end{aligned} \quad (62)$$

$$\begin{aligned} \frac{k_{LP}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 P_{LP}}{\partial x^2} &= A_{13} E_s \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - (A_{12} A_{13} E_s - A_{23}) \frac{\partial P_{FP}}{\partial t} + \\ &(A_{33} - A_{13}^2 E_s) \frac{\partial P_{LP}}{\partial t} - \chi (P_{FP} - P_{LP}) \quad , \end{aligned} \quad (63)$$

式(57)和(62), (63)便是一维小应变条件下的固结控制方程。

4.2 解析解

本文采用高度为 h 的饱和块状混合回填土地基模型来进行一维固结性状分析, 如图2所示, 顶面($x=0$)施加均布荷载, 初始总应力 σ_0 , 该顶面假定自由排水, 而底面($x=h$)假定为刚性不透水, 且渗透系数保持恒定。由此可得边界条件为

$$P_{FP}(0, t) = P_{LP}(0, t) = 0, \quad \frac{\partial u(0, t)}{\partial x} = -\frac{1}{E_s} \sigma_0 \quad , \quad (64)$$

$$\frac{\partial P_{FP}(h, t)}{\partial x} = \frac{\partial P_{LP}(h, t)}{\partial x} = 0, \quad u(h, t) = 0 \quad , \quad (65)$$

初始条件为

$$\zeta_{FP} = \zeta_{LP} = 0, \quad P_{FP}(x, 0) = P_{FP0}, \quad P_{LP}(x, 0) = P_{LP0} \quad , \quad (66)$$

其中初始孔压 P_{FP0} 和 P_{LP0} 可结合 $\zeta_{FP} = \zeta_{LP} = 0$ 和式(44)~(46)得到。

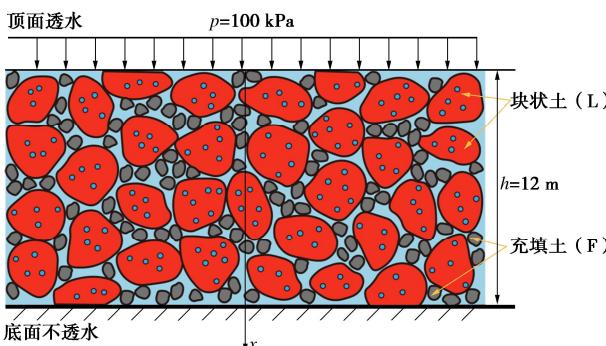


图2 饱和块状混合回填土层示意图

Fig. 2 Sketch of saturated lumpy composite backfill soil layer

现在来推导固结方程的解析解, 先将式(57)对 x 求积分, 代入式(64), 再对时间 t 求导后, 将其代入式(62)和(63)可得

$$\frac{\partial^2 P_{FP}}{\partial x^2} + \chi_{FP} (P_{LP} - P_{FP}) = \frac{1}{C_{FF}} \frac{\partial P_{FP}}{\partial t} + \frac{1}{C_{FL}} \frac{\partial P_{LP}}{\partial t} \quad , \quad (67)$$

$$\frac{\partial^2 P_{LP}}{\partial x^2} + \chi_{LP} (P_{FP} - P_{LP}) = \frac{1}{C_{LF}} \frac{\partial P_{FP}}{\partial t} + \frac{1}{C_{LL}} \frac{\partial P_{LP}}{\partial t} \quad , \quad (68)$$

式中, $\chi_{FP} = \chi \gamma_w / k_{FP}$, $\chi_{LP} = \chi \gamma_w / k_{LP}$, $C_{FF} = k_{FP} / (\gamma_w A_{22})$, $C_{FL} = k_{FP} / (\gamma_w A_{23})$, $C_{LF} = k_{LP} / (\gamma_w A_{23})$, $C_{LL} = k_{LP} / (\gamma_w A_{33})$ 。

对式(67), (68)作傅里叶变换, 再结合式(66)可求解得

$$P_{FP}(x, t) = \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} [C_{FP} \exp(r_1 t) + C_{LP} \exp(r_2 t)] \sin(mx) \quad , \quad (69)$$

$$P_{LP}(x, t) = \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} [(C_{FP} r_1 - A_{FF} C_{FP}) / A_{FL} \exp(r_1 t) + (C_{LP} r_2 - A_{FF} C_{LP}) / A_{FL} \exp(r_2 t)] \sin(mx) \quad , \quad (70)$$

式(44)表明, 孔压变化引起的应变为

$$\varepsilon_{CS} = A_{12} (P_{FP0} - P_{FP}) + A_{13} (P_{LP0} - P_{LP}) \quad , \quad (71)$$

将式(69), (70)代入式(71)后沿深度积分可得 t 时刻的固结沉降为

$$\begin{aligned} u_{CS}(t) &= \int_0^h \varepsilon_{CS} dx = -\frac{A_{12}}{m} \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} [C_{FP} \exp(r_1 t) + C_{LP} \exp(r_2 t)] - \\ &\frac{A_{13}}{m} \frac{2}{h} \sum_{n=0}^{\infty} [(C_{FP} r_1 - A_{FF} C_{FP}) / A_{FL} \exp(r_1 t) + (C_{LP} r_2 - A_{FF} C_{LP}) / A_{FL} \exp(r_2 t)] + A_{12} P_{FP0} h + A_{13} P_{LP0} h \quad , \end{aligned} \quad (72)$$

按沉降定义的平均固结度为

$$U = u_{CS}(t) / u_{CS}(\infty) \quad , \quad (73)$$

式中, $u_{CS}(t)$ 为 t 时刻的固结沉降, $u_{CS}(\infty)$ 为最终固结沉降。式(72)中

$$m = (2n+1)\pi/2h \quad ,$$

$$A_{FF} = \frac{(-m^2 - \chi_{FP}) C_{FF} C_{FL} C_{LF} - \chi_{LP} C_{FF} C_{LF} C_{LL}}{C_{FL} C_{LF} - C_{FF} C_{LL}} \quad ,$$

$$A_{FL} = \frac{\chi_{FP} C_{FF} C_{FL} C_{LF} + (m^2 + \chi_{LP}) C_{FF} C_{LF} C_{LL}}{C_{FL} C_{LF} - C_{FF} C_{LL}} \quad ,$$

$$A_{LF} = \frac{(m^2 + \chi_{FP}) C_{FF} C_{FL} C_{LL} + \chi_{LP} C_{FL} C_{LF} C_{LL}}{C_{FL} C_{LF} - C_{FF} C_{LL}} \quad ,$$

$$A_{LL} = \frac{-\chi_{FP} C_{FF} C_{FL} C_{LL} + (-m^2 - \chi_{LP}) C_{FL} C_{LF} C_{LL}}{C_{FL} C_{LF} - C_{FF} C_{LL}} \quad ,$$

$$C_{FP} = P_{FP0} A_{FL} / (m \sqrt{(A_{FF} - A_{LL})^2 + 4 A_{FL} A_{LF}}) + P_{FP0} [(A_{FF} - A_{LL}) / \sqrt{(A_{FF} - A_{LL})^2 + 4 A_{FL} A_{LF}} + 1] / 2m \quad ,$$

$$C_{LP} = P_{LP0} / m - C_{FP} \quad ,$$

$$r_1 = (A_{FF} + A_{LL}) / 2 + \sqrt{(A_{FF} - A_{LL})^2 + 4 A_{FL} A_{LF}} / 2 \quad ,$$

$$r_2 = (A_{FF} + A_{LL}) / 2 - \sqrt{(A_{FF} - A_{LL})^2 + 4 A_{FL} A_{LF}} / 2 \quad .$$

5 固结性状分析

5.1 固结模型验证

为了验证本文固结模型的准确性, 忽略块状土间裂隙中的充填土, 将本文模型建立的固结控制方程退化为 Khalili 等^[16]获得的固结控制方程。当忽略充填土时, 有 $\varphi_{FS0} \rightarrow 0$ 且当 $\varphi_{FS0} \rightarrow 0$ 时 $\vartheta_{FS} \rightarrow 0$ 。结合式(8),

(16), (28), (40) 和 \tilde{P}_C 的定义可得

$$\lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} \tilde{P}_C = \lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} \frac{\varphi_{FS0}}{\varphi_F} (P_{FS} - P_{FP}) = 0 \quad , \quad (74)$$

再根据 $\vartheta_{FS} \rightarrow 0$ 和式(4), (7) 和式(16) 有 $\varepsilon_C \rightarrow (\varepsilon_H / \varphi_{F0}) + \varepsilon_D + \vartheta_{LS}$, 由于 $(\varepsilon_H / \varphi_{F0}) + \varepsilon_D + \vartheta_{LS} \neq 0$, 故 ε_C 存在不等于零的极限, 把它和式(74)代入式(40)得

$$\lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} E_C = \lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} \frac{\varphi_{FS0} (P_{FS} - P_{FP})}{\varphi_F [(\varepsilon_H / \varphi_{F0}) + \varepsilon_D + \vartheta_{LS}]} = 0 \quad , \quad (75)$$

当 $\varphi_{FS0} \rightarrow 0$ 时 $\vartheta_{FS} \rightarrow 0$, 故可取 $\varphi_{FS0} E_{FS} > 0$, 由式(75)、 c_{11} 表达式可知 c_{11} 是与 $1/E_C$ 同阶的无穷大。

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_S} &= \lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} \frac{c_{12}}{\varphi_{F0}(1+c_{12}/c_{11})} - \frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{F0}} \frac{1}{E_H} = \frac{c_{12}}{\varphi_{F0}} - \frac{\varphi_{L0}}{\varphi_{F0}} \frac{1}{E_H} \\ &= \frac{1}{E_H} + \frac{1}{\varphi_{L0} E_D} + \frac{1}{\varphi_{LS0} E_{LS}} \quad . \end{aligned} \quad (76)$$

根据式(75)和 c_{13} 表达式可知 c_{13} 是与 $-1/E_C$ 同阶的负无穷大, 因而有

$$\begin{aligned} A_{12} E_S &= \lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} -\frac{c_{12} E_S}{c_{11} / c_{13} + c_{12} / c_{13}} = c_{12} E_S = \frac{E_S}{E_H} + \frac{\varphi_{F0}}{\varphi_{L0}} \frac{E_S}{E_D} + \\ &\quad \frac{\varphi_{F0} E_S}{\varphi_{LS0} E_{LS}} = 1 - \frac{E_S}{E_D} - \frac{E_S}{\varphi_{LS0}^L E_{LS}} \quad , \end{aligned} \quad (77)$$

$$\begin{aligned} A_{13} E_S &= \lim_{\varphi_{FS0} \rightarrow 0} -\frac{c_{14} E_S}{1 + c_{12} / c_{11}} = -c_{14} E_S = \frac{E_S}{E_D} + \frac{\varphi_{LP0} E_S}{\varphi_{LS0} E_{LS}} = \frac{E_S}{E_D} + \\ &\quad \frac{E_S}{\varphi_{LS0}^L E_{LS}} - \frac{E_S}{E_{LS}} \quad . \end{aligned} \quad (78)$$

同理, 当 $\varphi_{FS0} \rightarrow 0$ 时 $\vartheta_{FS} \rightarrow 0$ 可以得到

$$(A_{22} - A_{12}^2 E_S) = (1 - A_{12} E_S) \left(\frac{1}{E_S} - \frac{1}{E_D} - \frac{1}{\varphi_{LS0}^L E_{LS}} \right) + \varphi_{FP0} \left(\frac{1}{E_{FP}} - \frac{1}{E_D} - \frac{1}{\varphi_{LS0}^L E_{LS}} \right) \quad , \quad (79)$$

$$(A_{23} - A_{12} A_{13} E_S) = (A_{12} E_S - \varphi_{FP0}) \left(\frac{1}{E_D} + \frac{1}{\varphi_{LS0}^L E_{LS}} - \frac{1}{E_{LS}} \right) \quad , \quad (80)$$

$$(A_{33} - A_{13}^2 E_S) = (1 - \varphi_{FP0} - A_{13} E_S) \left(\frac{1}{E_D} + \frac{1}{\varphi_{LS0}^L E_{LS}} - \frac{1}{E_{LS}} \right) + \varphi_{LP0} \left(\frac{1}{E_{LP}} - \frac{1}{E_{LS}} \right) \quad . \quad (81)$$

再将式(76)~(81)代入式(57), (62) 和式(63)可得

$$-E_S \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \alpha_1 \frac{\partial P_1}{\partial x} + \alpha_2 \frac{\partial P_2}{\partial x} = 0 \quad , \quad (82)$$

$$\frac{k_{FP}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 P_{FP}}{\partial x^2} = \alpha_2 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \alpha_{21} \frac{\partial P_{LP}}{\partial t} + \alpha_{22} \frac{\partial P_{FP}}{\partial t} - \chi (P_{LP} - P_{FP}) \quad (83)$$

$$\frac{k_{LP}}{\gamma_w} \frac{\partial^2 P_{LP}}{\partial x^2} = \alpha_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \alpha_{11} \frac{\partial P_{LP}}{\partial t} - \alpha_{12} \frac{\partial P_{FP}}{\partial t} + \chi (P_{LP} - P_{FP}) \quad (84)$$

式中, $\alpha_1 = \frac{c_p - c_s}{c}$, $\alpha_2 = 1 - \frac{c_p}{c}$, $\alpha_{11} = \varphi_{LP0} (c_f - c_s) + (1 - \alpha_1 - \varphi_{FP0}) (c_p - c_s)$, $\alpha_{22} = \varphi_{FP0} (c_f - c_p) + (1 - \alpha_2) (c - c_p)$, $\alpha_{12} = \alpha_{21} = (\alpha_2 - \varphi_{FP0}) (c_p - c_s)$, $c_p = 1/E_D + 1/(\varphi_{LS0}^L E_{LS})$, $c_s = 1/E_{LS}$, $c = 1/E_S$, $c_f = 1/E_{FP} = 1/E_{LP}$ 。易对比, 式(82)、式(83)和式(84)分别与文献[16]的式(1)、式(3)和式(2)完全相同。

采用 Khalili 等^[16]的模型参数, 具体数值见表 1, 边界条件同上节所述。将本文退化模型计算所得到的固结度曲线与文献[16]图 2 的固结度曲线作对比, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 本文的计算结果与 Khalili 等^[16]中图 2 的计算结果较为吻合。

表 1 Khalili 等的模型参数

Fig 1 Model parameters of Khalili et al

h/m	σ_0/kPa	E_S/kPa	E_D/kPa	φ_{FP0}
10	100	1.0×10^4	1.111×10^4	0.06
$k_{LP}/(m \cdot s^{-1})$	$k_{FP}/(m \cdot s^{-1})$	$\chi/(kPa^{-1} \cdot s^{-1})$	φ_{LP0}	
1.0×10^{-4}	1.0×10^{-1}	1.001×10^{-4}	0.54	
$\varphi_{FS0} E_{FS}/kPa$	E_C/kPa			
100	1.0×10^{-8}			

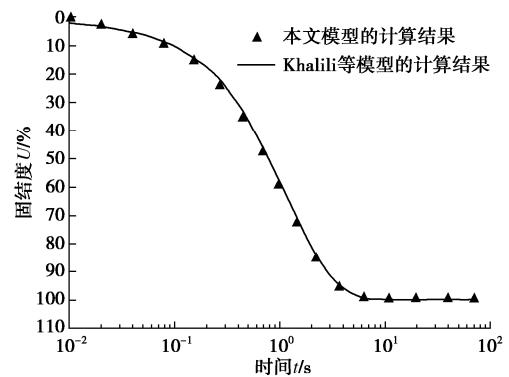


图 3 本文计算结果与 Khalili 等计算结果对比图

Fig. 3 Comparison of calculated results by authors and Khalili et al

5.2 固结性状分析

从第 3 节分析可知, 固结分析总计需要 11 个基本参数: 4 个骨架压缩模量 (E_H , E_D , E_C , E_S), 4 个组分体积分数 (φ_{LS0} , φ_{FS0} , φ_{LP0} , φ_{FP0}), 两个渗透系数 (k_{LP} , k_{FP}) 和流体交换参数 χ , 各下标含义

同上文。其余上文涉及的参数均可由这11个基本参数计算得到。在工程应用时, 上述模型参数可按照文献[16, 19, 25, 26]所述方法测得。

根据文献[19]所给的各组分初始孔隙比数据确定各组分体积分数, 根据文献[19]中的式(20), (21)和渗透参数(A 和 ξ)确定渗透系数 k_{FP} 和 k_{LP} , 根据文献[19]中压缩实验数据(如图4所示), 采用压力间隔100~200 kPa的孔隙比^[27]计算块状混合回填土、块状土和充填土的压缩系数 a_s 、 a_d 和 a_c , 从而得到 E_s 、 E_h 则可由式(47)反算得到, 具体参数值见表2。接下来分别讨论 k_{FP} 、 k_{LP} 和 χ 对饱和块状混合回填土地基模型的一维固结性状的影响, 下文均考虑模型中距顶面2 m处($x=2 \text{ m}$)的超孔压和固结度。

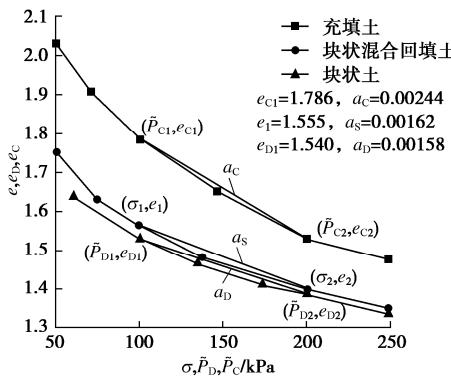


图4 充填土、块状土、块状混合回填土压缩曲线图

Fig. 4 Compression curves of filling soil, lumpy soil and lumpy backfill soil

表2 饱和块状混合回填土地基模型的模型参数

Table 2 Model parameters of samples of saturated lumpy composite backfill foundation

σ_0 / kPa	E_s / kPa	E_h / kPa	E_D / kPa
100	1577.2	1627	1607.6
E_C / kPa	φ_{LS0}	φ_{FS0}	$k_{LP} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1141.8	0.226	0.154	5.03×10^{-11}
$k_{FP} / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	φ_{LP0}	φ_{FP0}	$\chi / (\text{kPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
1.22×10^{-9}	0.271	0.349	1.0×10^{-9}

(1) 充填土孔隙渗透系数 k_{FP} 的影响

本小节分析 k_{FP} 对饱和块状混合回填土地基固结性状的影响。图5(a)和图5(b)显示, 在固结过程中, 充填土超孔压 P_{FP} 先迅速消散, 而后消散速度逐渐降低。块状土超孔压 P_{LP} 的消散过程则呈现出阶段性特征: 在固结初期, P_{LP} 有一定程度地提高, 这是由于 k_{LP} 和 k_{FP} 相差几个数量级, P_{FP} 先迅速消散, 而 P_{LP} 几乎未消散。在这一过程中, 部分荷载从充填土转移到块状土上, 致使 P_{LP} 相应升高。 k_{FP} 越大, P_{FP} 消散越快, 荷载转移到块状土的速率越快, P_{LP} 上升幅度越明显。在固结中期, 随着 k_{FP} 不断减小, 超孔压差($P_{LP} - P_{FP}$)逐渐增大, 块状土孔隙水更快地流向充

填土孔隙, 使得 P_{LP} 消散速度加快。 k_{FP} 越大, P_{FP} 消散越快, 超孔压差($P_{LP} - P_{FP}$)增大越快, P_{LP} 下降速率越大。在固结后期, P_{FP} 和 P_{LP} 都处于较小值, 且两者间的差值也逐渐减小, 超孔压消散速度变得缓慢。图5(c)表明增大 k_{FP} 会提高饱和块状混合回填土地基整体的固结速度, 这是因为本文考虑孔隙之间流体的相互交换, 增大渗透系数意味着两者间流体交换的速率加快, 从而提高了整体的固结速度。

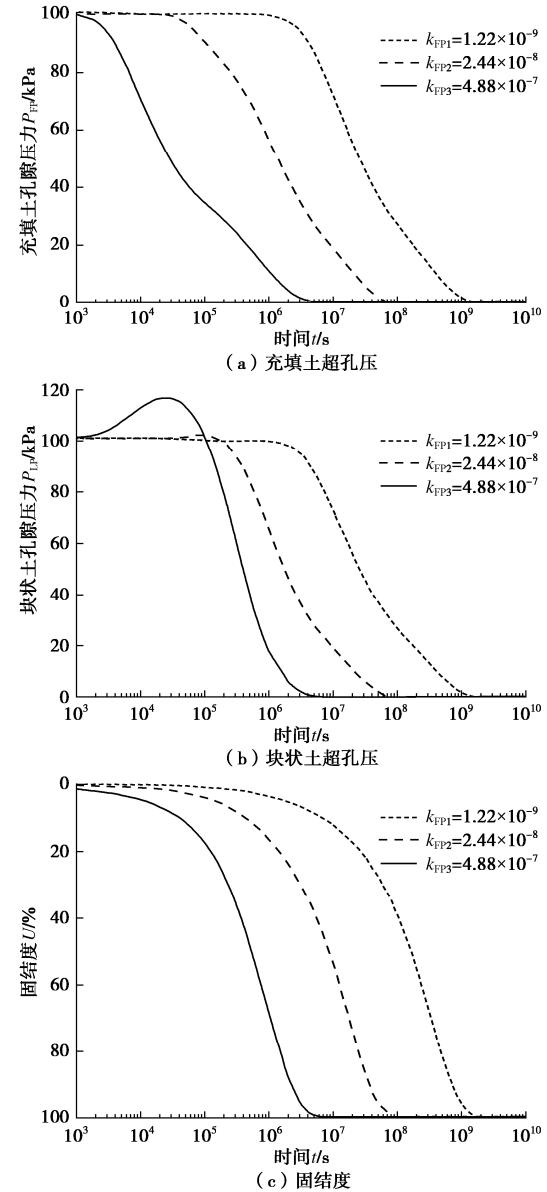


图5 不同 k_{FP} 下的超孔压图和固结度图

Fig. 5 Diagram of excess pore pressure and consolidation degree for varying permeability in filling soil

(2) 块状土孔隙渗透系数 k_{LP} 的影响

本小节分析 k_{LP} 对饱和块状混合回填土地基固结性状的影响。图6(a)和图6(b)显示, 随着 k_{LP} 的增大, 充填土超孔压 P_{FP} 和块状土超孔压 P_{LP} 的消散速度均加快。随着 k_{LP} 和 k_{FP} 的差异逐渐减小, P_{LP} 和 P_{FP} 消散速度逐渐接近, P_{LP} 在固结初期未出现上升现象,

但 P_{FP} 的消散速度仍快于 P_{LP} 。图 6(c) 表明, 增大 k_{LP} , 饱和块状混合回填土地基的固结速度也会相应提高。

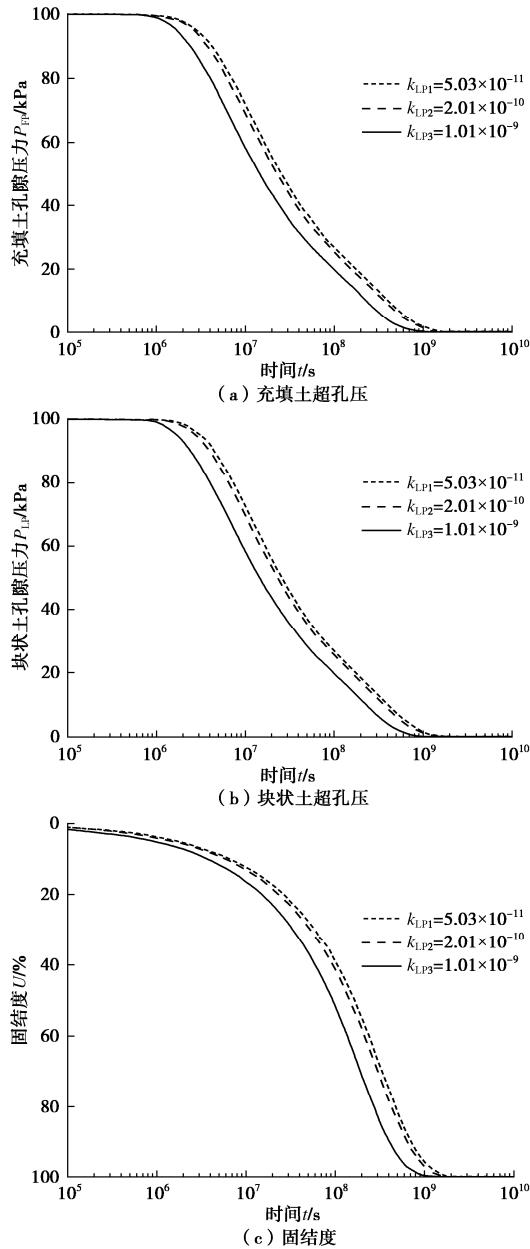


图 6 不同 k_{LP} 下超孔压图和固结度图

Fig. 6 Diagram of excess pore pressure and consolidation degree for varying permeability in lumpy soil

(3) 流体交换参数 χ 的影响

本小节分析流体交换参数 χ 对饱和块状混合回填土地基固结性状的影响。图 7(a) 和图 7(b) 表明, 在固结初期, 随着 χ 的减小, P_{FP} 的消散速度加快。这是因为减小 χ , 也就减小了块状土孔隙流体和充填土孔隙流体的交换速率, 使得从块状土孔隙流向充填土孔隙的流体减少, 因而 P_{FP} 消散变快。

图 7(a) 和图 7(b) 还显示, 在固结后期, P_{LP} 和 P_{FP} 都处于较小值。此时 χ 越小, P_{FP} 消散速度也越慢; 在固结初期, P_{LP} 有一定程度地提高, 且 χ 越小, 升高幅度越大。这是因为 χ 越小, P_{FP} 消散越快, 荷载

从充填土转移到块状土上的速率越快, P_{LP} 升高幅度也越明显。图 7(c) 表明, 减小流体交换参数 χ 的值, 饱和块状混合回填土地基的整体固结速度也随之减小。此外, 由于本文考虑到两个孔隙之间流体的交换, 整体固结度的变化应该与平均孔压的变化进行对比。因而, 在图 7(b) 和图 7(c) 的 χ_2 和 χ_3 情况中, 出现了 P_{LP} 的消散滞后于整体固结度的变化的现象。

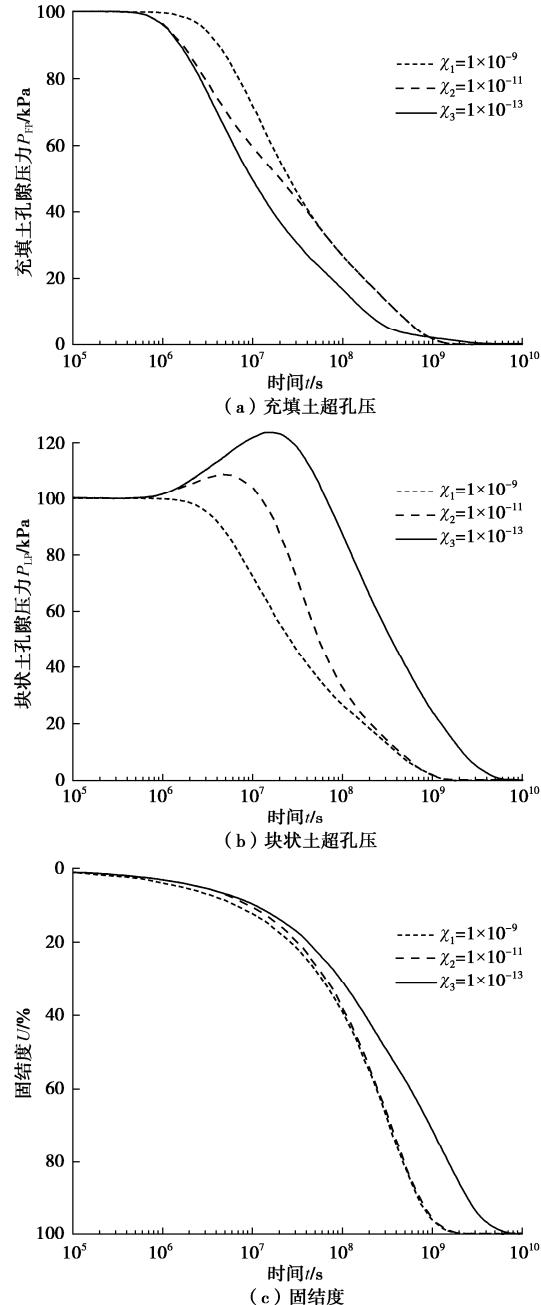


图 7 不同 χ 下的超孔压图和固结度图

Fig. 7 Diagram of excess pore pressure and consolidation degree for varying fluid exchange parameter

6 结 论

(1) 充填土孔隙渗透系数 k_{FP} 、块状土孔隙渗透系数 k_{LP} 和流体交换参数 χ 均影响着饱和块状混合回

填土地基的固结特性, 随着3个因素的增大, 饱和块状混合回填土地基的透水性越好, 固结速度越快。在固结过程中, k_{FP} 占主导作用, 它不仅直接影响 P_{FP} 的消散, 还改变了块状土孔隙和充填土孔隙之间的孔压差($P_{\text{LP}} - P_{\text{FP}}$), 进而影响着 P_{LP} 的消散。

(2) 在饱和块状混合回填土地基固结初始阶段, 当 k_{FP} 和 k_{LP} 存在较大差异时, P_{FP} 先迅速消散, 而 P_{LP} 几乎未消散, 部分荷载从充填土转移到块状土上, 致使 P_{LP} 有一定程度提升, 且上升幅度随两个渗透系数差值的增大和流体交换参数减小而增大。

(3) 渗透系数和流体交换参数对饱和块状混合回填土地基固结性状的影响具有相似的机理: 较大的渗透系数和流体交换参数加快了充填土孔隙和块状土孔隙之间流体的交换速率, 促进了 P_{LP} 和 P_{FP} 的消散, 从而提高了饱和块状混合回填土地基整体的固结速度。

参考文献:

- [1] 詹良通, 江文豪, 王顺玉, 等. 工程泥浆自重固结及低位真空加载过程的大型模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(S1): 32–37. (ZHAN Liang-tong, JIANG Wen-hao, WANG Shun-yu, et al. Large-scale model test investigation on self-weight consolidation and low vacuum loading process of construction waste slurry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 32–37. (in Chinese))
- [2] 艾啸韬, 王光进, 张超, 等. 宽级配废石的高排土场稳定性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(11): 3777–3788. (AI Xiao-tao, WANG Guang-jin, ZHANG Chao, et al. Stability analysis of high dump with wide graded waste rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11): 3777–3788. (in Chinese))
- [3] 苏夏征, 程峰, 谢廷勇. 工程渣土场回填土的力学性能及扩容分析[J]. 工程地质学报, 2020, 4(45): 1–11. (SU Xia-zheng, CHENG Feng, XIE Ting-yong. Mechanical properties and capacity expansion analysis of backfill soil in engineering muck field[J]. Journal of Engineering Geology, 2020, 4(45): 1–11. (in Chinese))
- [4] 黄刚海. 强降雨入渗下复杂地形排土场稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 292–295. (HUANG Gang-hai. Stability analysis of waste dump with complex terrain under heavy rainfall infiltration[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 292–295. (in Chinese))
- [5] 张先伟, 杨爱武, 孔令伟, 等. 天津滨海吹填泥浆的自重沉降固结特性研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 769–776. (ZHANG Xian-wei, YANG Ai-wu, KONG Ling-wei, et al. Self-weight sedimentation and consolidation characteristics of hydraulic-dredged slurry in Tianjin Binhai District[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 769–776. (in Chinese))
- [6] 张楠, 朱伟, 王亮, 等. 吹填泥浆中土颗粒沉降-固结规律研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1681–1686. (ZHANG Nan, ZHU Wei, WANG Liang, et al. Study of sedimentation and consolidation of soil particles in dredged slurry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1681–1686. (in Chinese))
- [7] 蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 201–225. (CAI Yuan-qiang. Consolidation mechanism of vacuum preloading for dredged slurry and anti-clogging method for drains[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(2): 201–225. (in Chinese))
- [8] SHI X S, HERLE I, YIN J H. Laboratory study of the shear strength and state boundary surface of a natural lumpy soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(12): 04018093.
- [9] HERBSTOVÁ V, HERLE I. Structure transitions of clay fills in North-Western Bohemia[J]. Engineering Geology, 2009, 104(3/4): 157–166.
- [10] SHI X S, HERLE I. Laboratory investigation of artificial lumpy materials[J]. Engineering Geology, 2014, 183: 303–314.
- [11] KOSTKANOVÁ V, HERLE I, BOHÁC J. Transitions in structure of clay fills due to suction oscillations[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 9: 153–162.
- [12] BARENBLATT G I, ZHELTOV I P, KOCHINA I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks[strata][J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1960, 24(5): 1286–1303.
- [13] AIFANTIS E C. Introducing a multi-porous medium[J]. Developments in Mechanics, 1977, 8: 209–211.
- [14] LI J, YIN Z Y, CUI Y J, et al. Work input analysis for soils with double porosity and application to the hydromechanical modeling of unsaturated expansive clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2017, 54(2): 173–187.
- [15] SÁNCHEZ M, GEN S A, VILLAR M V, et al. Fully coupled thermo-hydro-mechanical double-porosity formulation for unsaturated soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2016, 16(6): D4016015.
- [16] KHALILI N, VALLIAPPAN S, WAN C F. Consolidation of fissured clays[J]. Géotechnique, 1999, 49(1): 75–89.
- [17] YANG L A, TAN T S, TAN S A, et al. One-dimensional self-weight consolidation of a lumpy clay fill[J]. Géotechnique, 2002, 52(10): 713–725.
- [18] NOGAMI T, WANG W D, LI M X. Consolidation of lumpy clay fills[C]// 1st Asian-Pacific Congress on Computational

- Mechanics, 2001, Hong Kong.
- [19] SHI X S, HERLE I, MUIR WOOD D. A consolidation model for lumpy composite soils in open-pit mining[J]. *Géotechnique*, 2018, **68**(3): 189 – 204.
- [20] 胡亚元. 基于混合物理论的饱和岩石弹塑性模型[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(12): 2161 – 2169. (HU Ya-yuan. Elastoplastic model for saturated rock based on mixture theory[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, **42**(12): 2161 – 2169. (in Chinese))
- [21] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 201 – 272. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, **36**(2): 201 – 272. (in Chinese))
- [22] 刘艳, 赵成刚, 蔡国庆. 理性土力学与热力学[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 73 – 84. (LIU Yan, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing. *Rational Soil Mechanics and Thermodynamics*[M]. Beijing: Science Press, 2016: 73 – 84. (in Chinese))
- [23] COLEMAN B D, NOLL W. The thermodynamics of elastic materials with heat conduction and viscosity[J]. *Archive for Rational Mechanics and Analysis*, 1963, **13**(1): 167 – 178.
- [24] ZHANG Q, CHOO J, BORJA R I. On the preferential flow patterns induced by transverse isotropy and non-Darcy flow in double porosity media[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, **353**: 570 – 592.
- [25] ZENG L L, HONG Z S, CAI Y Q, et al. Change of hydraulic conductivity during compression of undisturbed and remolded clays[J]. *Applied Clay Science*, 2011, **51**(1/2): 86 – 93.
- [26] ROBINSON R G, TAN T S, DASARI G R, et al. Experimental study of the behavior of a lumpy fill of soft clay[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, **5**(2): 125 – 137.
- [27] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. (LI Guang-xin. *Advanced Soil Mechanics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese))

(上接 631 页)

《岩土工程学报》青年论坛学术活动进展报告

4. 光纤传感技术在桩基监测中的应用 (大连理工大学裴华富教授)
5. 桩-土系统中的应力波传播机制及应用新进展 (中国地质大学(武汉)吴文兵教授)
6. 地下工程开挖诱发被动桩响应分析理论的研究 (同济大学木林隆教授)
7. 超高层建筑超长桩基础设计与实践 (华东建筑设计研究院有限公司吴江斌研究员)

附录 3: 《岩土工程学报》青年论坛第三专题: 极端环境下的岩土工程报告列表

1. 微生物固化多尺度试验、机理与理论 (重庆大学肖杨教授)
2. 极端环境下岩体内应力波传播研究 (北京工业大学范立峰教授)
3. 突发堆载环境下运营软土盾构隧道结构劣化机理与韧性提升 (同济大学张东明教授)
4. 大湾区极端环境桩基服役问题探索 (深圳大学包小华教授)
5. 考虑极端养护温度影响的水泥固化淤泥强度预估方法 (武汉大学章荣军教授)
6. 极端气候条件下土水相互作用理论研究进展 (湖南大学张超教授)
7. 机场道基积水机制、探测及计算探讨 (中南大学张升教授)
8. 高聚物注浆技术在地下排水管道非开挖修复中的应用 (郑州大学方宏远教授)

附录 4: 《岩土工程学报》青年论坛第四专题: 岩石动力学及分析方法报告列表

1. 环境条件对断层活化模式的影响研究 (中科院武汉岩土所张传庆研究员)
2. 基于率型本构模型的动力连续-非连续方法研究及应用 (辽宁工程技术大学王学滨教授)

3. 复杂损伤条件下砂岩动态力学特性研究 (中国矿业大学浦海教授)
4. 4D-LSM 在岩石动力学中的应用初探 (天津大学赵高峰教授)
5. 基于线性储能规律的岩爆倾向性判据 (东南大学宫凤强教授)
6. 超高速动能武器钻地毁伤效应与工程防护 (陆军工程大学李杰副教授)

7. 深部地下工程动力灾害微震监测预警与防控 (四川大学徐奴文教授)
8. 地震触发地质灾害: 数据库、机理与概率评估 (应急管理部国家自然灾害防治研究院许冲研究员)
9. 含结构面岩体应变岩爆特征及其支护理论研究 (河北工业大学聂雯教授)
10. 岩石循环荷载累积损伤的宏观表象与等效表征 (华侨大学俞缙教授)

附录 5: 《岩土工程学报》青年论坛第五专题: 软土地基排水固结理论与工程实践报告列表

1. 透水管桩技术研究进展: 力学性能、沉桩模拟和承载力发挥 (广西大学吴文兵、梅国雄教授)
2. 固废在软土固化利用中的理论探讨 (东南大学邓永锋教授)
3. 真空预压联合电渗处理高含水率淤泥试验及计算理论探讨 (河海大学王柳江教授)
4. Soil Stabilisation by Biopolymers (英国华威大学 Xue-yu GENG 博士)
5. 环保节能式真空预压技术 (鑫泰岩土科技有限公司金亚伟总工)
6. Biodegradable Fibre Drains – A Sustainable Solution for Ground Improvement-Thanh Nguyen 博士 (University of Technology Sydney)
7. 基于谱方法的层状竖井地基固结模型研究进展与应用 (南京水利科学研究院许滨华博士生)