

引用格式:戴仁辉,陈士军,鹿庆蕊,等.连续多孔材料孔隙水压力系数的推导[J].科学技术与工程,2019,19(21):253-257

Dai Renhui, Chen Shijun, Lu Qingrui, et al. Derivation of pore water pressure coefficient for continuous porous materials[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 253-257

连续多孔材料孔隙水压力系数的推导

戴仁辉¹ 陈士军^{1*} 鹿庆蕊^{1,2} 王增亮¹ 易进翔¹

(东华理工大学建筑工程学院¹,南昌 330013;南京工业大学土木工程博士后流动站²,南京 211816)

摘要 进行连续多孔材料的应力计算对分析其上部建筑物变形及稳定有着重要意义。连续多孔材料的实际应力及孔隙水压力系数是计算整体连续多孔材料受力的关键参数。利用弹性力学方法对饱和连续多孔材料进行受力分析,推导了连续多孔材料的实际应力与孔隙水压力的关系表达式,对连续多孔材料在轴对称应力状态下的两种受力情况进行了变形分析,分别推导了两种情况下材料的孔隙水压力系数表达式,并给出了试验验证方法。研究成果对连续多孔材料在基础工程中的应用具有指导意义。

关键词 连续多孔材料 应力 孔隙水压力 孔隙水压力系数

中图法分类号 TU501; **文献标志码** A

随着装配式建筑的迅速发展,在软土地基上进行工程建设时,为了减少地基处理的工程量,减少上部荷载,可采用整体的连续多孔材料进行地基处理。整体的连续多孔材料具有相对密度低、比强度高、比表面积高、重量轻、整体性强等优点,适用于地下水位较高、工期紧张的地下建筑^[1,2]。当外荷载引起地下连续多孔材料应力过大时,会使其上部建筑物发生不可容许的沉降、倾斜,甚至会导致建筑物发生整体失稳^[3]。因此,进行连续多孔材料的应力计算对分析其上部建筑物变形及稳定有着重要意义。

在连续多孔材料的性质及研发方面,姚晓莉^[4]对连续多孔加气混凝土的吸放湿特性进行了测试,发现在同一孔隙率下,试样吸湿过程的动态吸水率随相对湿度的增大而增大,当相对湿度达 80% RH 以上时,材料的吸水率增长幅度变大;放湿过程中,试样的含水率随孔隙率的增大逐渐减小。米亚策等^[5]利用反应诱导相分离法合成了一种具有三维骨架的多孔材料。该材料表面结构与内部孔结构基本一致,孔隙率在 50% ~ 70% 之间,具有广泛的应用前景。汪强兵等^[6]采用离心沉积法,合成了一种

连续梯度金属多孔材料。在相同精度下,该多孔材料的透过性能是常规相同孔径金属多孔材料的 10 倍以上,并且该材料具有精度高处理量大等特点,在气体过滤方面具有明显的优势。

在有效应力原理及孔压系数的研究方面,荣雪宁^[7]基于 Terzaghi 有效应力公式对饱和土的应力-应变关系和强度行为进行了考察,发现在数百千帕的实际应力下,高塑性黏土在广义实际应力公式中的孔压因子 η 值随实际应力的增加显著下降。Mitchell^[8] 和 Skempton^[9] 进行分析和推导后发现对考虑抗剪强度时饱和材料的有效应力原理应表示为

$$\sigma' = \sigma - \left(1 - \frac{\alpha_c \tan \psi}{\tan \varphi'}\right) u \quad (1)$$

式(1)中, σ 与 σ' 分别为作用在饱和材料任意面上的总应力与有效应力; α_c 为接触面积比,即材料截面上颗粒间接触部分的面积与总截面面积之比; ψ 为材料固相的真摩擦角; φ' 为材料固相的有效摩擦角; u 为作用于同一平面孔隙水上的孔隙水压力。

介玉新等^[10] 讨论了黏性土及高压下砂土中的有效应力原理,认为高压下液性指数接近或小于 0 的黏性土的有效应力原理需要修正,不同的考虑对应不同的计算方法。

采用理论推导的方法,对连续多孔材料在饱和情况下的受力进行了分析,推导了其应力表达式。基于不固结不排水试验原理分别对等向压缩应力状态与偏差应力状态下,连续多孔材料的孔压系数进行了推导,并给出了试验验证方法。

2019 年 1 月 7 日收到 国家自然科学基金(51609093)、

江苏省博士后基金科研资助计划(1601007A)和

江西省科技厅科技支撑项目(2016BBC70084)资助。
第一作者简介:戴仁辉(1994—),男,硕士研究生。研究方向:轻质高强复合土。E-mail:pe_dairenhui@126.com。

*通信作者简介:陈士军(1979—),男,博士,硕士研究生导师。研究方向:路基填埋研究工作。E-mail:hitcsj@foxmail.com。

1 饱和连续多孔材料的两种应力

饱和连续多孔材料是由固体部分构成的骨架和充满其间的水组成的两相体,骨架部分是连续多孔体形成的构架,它可以传递力。当外力作用于材料后,一部分外力由材料骨架承担,并通过连续骨架进行力的传递,为骨架力;另一部分外力由材料孔隙中的流体来承担,孔隙流体虽然不能承担剪应力,但能承担各向等压的法向应力,并且可以通过连通的孔隙水进行力的传递,这部分水压力为孔隙水压力。

图 1 表示饱和连续多孔材料某一放大的横截面 $a-a$,其中截面面积为 A ,材料骨架由多个断面组成,其断面面积之和为 A_s ,孔隙水的断面积之和为 A_w 。

$$A = A_s + A_w \quad (2)$$

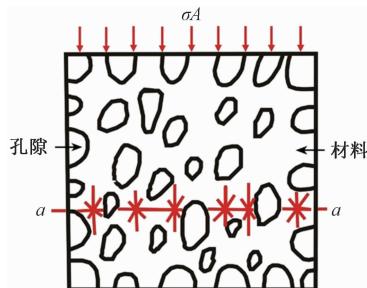


图 1 连续多孔材料的实际应力

Fig. 1 The effective stress of coefficient for continuous porous materials

假设该截面每单位水平投影面积上作用有竖直总应力 σ ,则在 $a-a$ 面上的孔隙水处将作用有孔隙水压力 u ,在第 i 个断面处将存在断面间作用力 P_{svi} 。 P_{svi} 的大小随机,方向均竖直向下。设共有 n 个断面,由 $a-a$ 面竖向力平衡可知

$$\sigma A = \sum_{i=1}^n P_{svi} + u A_w \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{\sum_{i=1}^n P_{svi}}{A} + u \frac{A_w}{A} = \frac{A_s}{A} \frac{\sum_{i=1}^n P_{svi}}{A_s} + u \frac{A_w}{A} \quad (4)$$

$$\sigma = (1 - n) \sigma' + n u \quad (5)$$

式(4)中,右端第一项 $\sum_{i=1}^n P_{svi}/A_s$ 为全部断面作用力之和除以断面面积之和,它表示材料骨架的平均竖直向应力,即连续多孔材料的实际应力,用 σ' 表示; n 为孔隙率, $n = A_w/A$ 。实际应力是由连续多孔材料自身传递的应力,是由材料骨架承担的,是单位面积材料骨架上所有截面处的内力在总应力方向之和。

2 超静孔隙水压力与孔隙水压力系数

在饱和连续多孔材料上施加瞬时荷载时,即

$t = 0$ 时,由于水具有一定的黏滞性,材料内部连通孔隙中的水来不及排出,相当于这些孔隙在瞬时被堵塞而处于不排水状态。材料内部的水在瞬时受压力 σ ,且水不可压缩,故饱和连续多孔材料体积变化 $\Delta V = 0$,材料骨架上的实际应力为 0,外荷载全部由水承担,从而产生超静孔隙水压力。它是由外部作用所引起的,不同于静孔隙水压力,它会随着时间的持续而逐步消散,并伴以材料体积的改变。

孔隙水压力系数是指在不允许材料中孔隙流体进出的情况下,由实际应力引起的超静孔隙水压力增量与总应力增量之比。

2.1 轴对称应力状态

轴对称应力状态为最简单的三维应力状态,如图 2 所示,其应力为 $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_3 = \sigma_r = \sigma_\theta$,用矩阵的形式表示为

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}.$$

可分解为

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma_1 - \sigma_3 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_3 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中,右侧第一项表示受压的材料上三个方向的主应力相等,为各向等压应力状态,即围压;第二项为偏差应力分量。

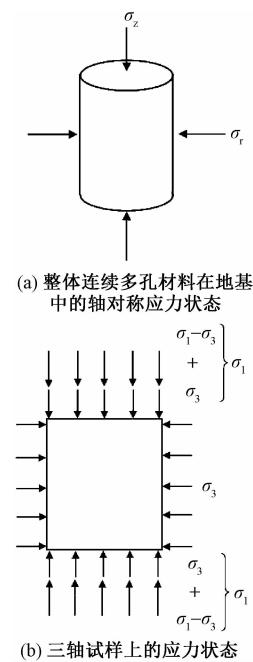


图 2 轴对称应力状态

Fig. 2 Axi-symmetric stress condition

2.2 各向等压应力与孔压系数 B'

由图2(b)所示,轴对称应力状态可以分解为各向等压应力分量 σ_3 与偏差应力分量 $\sigma_1 - \sigma_3$ 两部分。在不排水条件下施加各向等压应力分量的增量 $\Delta\sigma_3$,如图3所示,会在材料孔隙流体中产生超静孔隙水压力增量 Δu_B ,这里的孔隙流体包含孔隙中的水和气体。

$$\Delta u_B = \Delta u_w = \Delta u_a \quad (7)$$

由饱和连续多孔材料的实际应力表达式(5),得:

$$\Delta\sigma_3 = (1-n)\Delta\sigma'_3 + n\Delta u_B \quad (8)$$

实际应力增量 $\Delta\sigma'_3$ 作用于连续多孔材料骨架

$$\Delta\sigma'_3 = \frac{(\Delta\sigma_3 - n\Delta u_B)}{1-n} \quad (9)$$

材料骨架在 $\Delta\sigma'_3$ 的作用下将被压缩,其压缩量为

$$\Delta V_s = C_s \frac{\Delta\sigma_3 - n\Delta u_B}{1-n} V_0 \quad (10)$$

孔隙流体在 Δu_B 的作用下将被压缩,其压缩量为

$$\Delta V_v = C_f \Delta u_B V_v = C_f \Delta u_B n V_0 \quad [11] \quad (11)$$

式中, C_s 为材料骨架的体积压缩系数; C_f 为孔隙流体的体积压缩系数; V_v 为材料孔隙的总体积; V_0 为材料的初始体积。

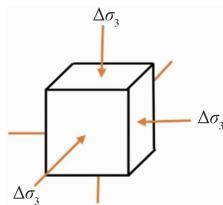


图3 等向压缩应力状态

Fig. 3 Isotropic compression stress condition

对于自身不可被压缩的材料,材料骨架的压缩势必造成孔隙体积的减小。造成材料孔隙体积减小的原因有两种:①孔隙流体被挤压流出;②孔隙流体自身被压缩。在不排水条件下,孔隙体积减小的唯一原因为孔隙流体自身被压缩,材料的总压缩量等于材料骨架的的体积压缩量,也等于孔隙流体的体积压缩量,即

$$\Delta V_v = \Delta V_s \quad (12)$$

式(10)与式(11)相等,得到:

$$C_s \frac{\Delta\sigma_3 - n\Delta u_B}{1-n} V_0 = C_f \Delta u_B n V_0 \quad (13)$$

式(13)经过化简可得到:

$$\Delta u_B = B' \Delta\sigma_3 \quad (14)$$

$$B' = \frac{1}{\frac{C_f}{C_s}n(1-n) + n} \quad (15)$$

式(15)中, B' 为各向等压条件下的孔压系数,表示

单位围压增量引起的超静孔隙水压力增量。对于饱和的连续多孔材料,若孔隙流体的压缩量远小于材料骨架的压缩量,即 $C_f \ll C_s$,式(15)中, $C_f n(1-n)/C_s \rightarrow 0$,可得 $B' = 1/n$;若孔隙流体的压缩量等于材料骨架的压缩量,即 $C_f = C_s$,则 $B' = 1/(2n - n^2)$ 。对于非饱和的材料, $C_f \gg C_s$,式(15)中, $C_f n(1-n)/C_s + n \rightarrow +\infty$,可得 $B' = 0$ 。因此,在已知材料性质的情况下,可根据 B' 值的大小来判定连续多孔材料的饱和程度。

2.3 偏差应力与孔压系数 A'

对于式(6), σ_3 不变,只施加偏差应力增量 $\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$,在不排水的情况下,会产生超静孔隙水压力增量 Δu_A 。孔隙流体在 Δu_A 的作用下将被压缩,其压缩量为

$$\Delta V_v = C_f \Delta u_A V_v = C_f \Delta u_A n V_0 \quad (16)$$

材料骨架的体积变化为

$$\Delta V_s = \Delta\epsilon_{V_0} V_0 = (\Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_2 + \Delta\epsilon_3) V_0 \quad (17)$$

偏差应力状态下,连续多孔材料的总应力与材料实际应力情况如表1所示。

表1 偏差应力状态应力分布

Table 1 Stress distribution of deviation stress condition

参数	轴向	侧向
总应力增量	$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$	0
材料实际应力	$\frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - n\Delta u_A}{1-n}$	$\frac{-n\Delta u_A}{1-n}$

由广义胡克定律^[12]可得:

$$\Delta\epsilon_1 = \left| \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - n\Delta u_A}{1-n} - 2\nu \left(\frac{-n\Delta u_A}{1-n} \right) \right| / E \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta\epsilon_2 = \Delta\epsilon_3 = \\ \left| \frac{-n\Delta u_A}{1-n} - \nu \left[\frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - n\Delta u_A}{1-n} \right] - \nu \left(\frac{-n\Delta u_A}{1-n} \right) \right| \end{aligned} \quad (19)$$

将式(18)、式(19)代入式(17)可得:

$$\Delta V_s = \frac{1-2\nu}{E} [\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - 3n\Delta u_A] \frac{V_0}{1-n} \quad (20)$$

由于:

$$\frac{1-2\nu}{E} = \frac{1}{3} C_s \quad (21)$$

将式(21)代入式(20)可得:

$$\Delta V_s = \frac{1}{3} C_s [\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - 3n\Delta u_A] \frac{V}{1-n} \quad (22)$$

在不排水条件下,材料骨架的压缩量应等于孔隙流体的体积压缩量,即 $\Delta V_s = \Delta V_v$,联立式(16)与式(22)可得:

$$C_f \Delta u_A n V_0 = \frac{1}{3} C_s [\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) - 3n\Delta u_A] \frac{V}{1-n} \quad (23)$$

$$\Delta u_A = \frac{1}{C_f n(1-n) + n} \left[\frac{1}{3} \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \right] = B' A' \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (24)$$

$$\Delta u_A = B' A' \Delta(\sigma_1 - \sigma_3) \quad (25)$$

由式(25)可知,在材料为弹性假设条件下,由单位偏差应力增量引起的孔压增量为 $A' = 1/3$ 。 A' 表示单位偏差应力增量引起的超静孔隙水压力增量,即剪切作用引起的连续多孔材料的孔压响应。 A' 的大小由材料自身决定,对于非弹性材料, A' 需要进行实际测定。

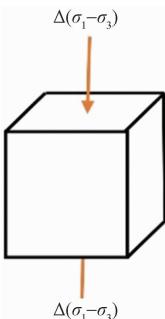


图 4 偏差应力状态

Fig. 4 Deviation stress condition

在材料的压缩系数已测得的情况下,通过不固结不排水三轴试验(UU),对试样施加围压 σ_3 ,量测超静孔隙水压力增量 Δu_B ,通过式(14)计算可得 B' ;施加 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 对试验进行剪切,关闭排水阀门,量测剪切过程产生的超静孔隙水压力 Δu_A ,通过式(25)计算可得 A' 。同理,该试验可对连续多孔材料的实际应力表达式进行验证。

3 结论

(1) 连续多孔材料的实际应力表达式为 $\sigma = (1-n)\sigma' + nu$ 。

(2) 连续多孔材料在各向等压条件下,单位围压增量与超静孔隙水去压力增量的关系为 $\Delta u_B = B' \Delta \sigma_3$ 。

(3) 连续多孔材料在偏差应力条件下,其偏差应力增量与超静孔隙水去压力增量的关系为 $\Delta u_A = B' A' \Delta(\sigma_1 - \sigma_3)$ 。

参 考 文 献

- 李明东. 砂土 EPS 颗粒混合轻质土(LSES)的击实特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2008

Li Mingdong. Study of compaction properties of lightweight sand-EPS beads soil(LSES)[D]. Nanjing: Hohai University, 2008

- Das B M, Sobhan K. Principles of geotechnical engineering[M]. San Francisco: Cengage Learning 2014;94-123
- 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2013;46-124
- Li Guangxin, Zhang Bingyin, Yu Yuzhen. Soil mechanics[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013;46-124
- 姚晓莉. 面向建筑节能的加气混凝土吸放湿特性与有效导热系数研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015
- Yao Xiaoli. The moisture absorption/desorption behavior and effective thermal conductivity of autoclaved aerated concrete toward energy-efficient buildings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015
- 米亚策, 张荣月, 苏志国, 等. 具有三维双连续骨架的多孔材料的合成与应用[C]//2014 年全国高分子材料科学与工程研讨会学术论文集(上册). 北京: 中国化学会, 中国机械工程学会, 中国材料研究学会, 2014;66-69
- Mi Yace, Zhang Rongyue, Su Zhiguo, et al. The preparation of epoxy-based porous material with 3D bicontinuous skeleton[C]//Academic Papers Collection of National Symposium on Polymer Materials Science and Engineering in 2014 (Volume 1). Beijing: China Chemical Society, China Society of Mechanical Engineering, China Society of Materials Research. 2014;66-69
- 汪强兵, 汤慧萍, 杨保军. 连续梯度金属多孔材料的研究[J]. 中国材料进展, 2016, 35(2):136-140, 135
- Wang Qiangbing, Tang Huiying, Yang Baojun. Research on the continuously graded porous metal materials[J]. Materials China, 2016, 35(2):136-140, 135
- 荣雪宁. 饱和土的有效应力分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017
- Rong Xuening. Analysis of effective stress for saturated soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017
- Mitchell J K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1993
- Skepton A W. Effective stress in soils[C]//Proceedings of Conference on Pore Pressure and Suctions in Soils, Butterworth, London, 1960: 4-16
- 介玉新, 温庆博, 李广信, 等. 有效应力原理几个问题探讨[J]. 煤炭学报, 2005(2):202-205
- Jie Yuxin, Wen Qingbo, Li Guangxin, et al. Discussion on the principle of effective stress[J]. Journal of China Coal Society, 2005(2):202-205
- 杨桂通. 弹塑性力学引论[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013;6-40
- Yang Guitong. Introduction to elasticity and plasticity[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013;6-40
- 徐道远, 黄孟生, 朱为玄, 等. 材料力学[M]. 南京: 河海大学出版社, 2011;124-147
- Xu Daoyuan, Huang Mengsheng, Zhu Weixuan, et al. Mechanics of materials[M]. Nanjing: Hohai University Press, 2011;124-147

Derivation of Pore Water Pressure Coefficient for Continuous Porous Materials

DAI Ren-hui¹, CHEN Shi-jun^{1*}, LU Qing-rui^{1,2}, WANG Zeng-liang¹, YI Jin-xiang¹

(School of Architectural Engineering, East China University of Technology¹, Nanchang 330013, China;

Postdoctoral Research Station of Civil Engineering, Nanjing Tech University², Nanjing 211816, China)

[Abstract] The stress calculation of continuous porous materials is very important for analyzing the deformation and stability of the upper building. The actual stress of the continuous porous material and the pore water pressure coefficient is the main parameters for calculating the force of the overall continuous porous material. The elastic mechanical method is used to analyze the stress of saturated continuous porous materials. The relationship between the actual stress and the pore water pressure of unremitting porous materials is derived. The two stresses of continuous porous materials under axially symmetric stress are deformed. The analysis of the pore water pressure coefficient of the material in two cases is deduced, and the experimental verification method is given. The research results just have to guide significance for the application of continuous porous materials in basic engineering.

[Key words] continuous porous material stress pore water pressure pore water pressure coefficient