

孔隙水压和应力路径对软土卸荷力学参数的影响

贾星

重庆科技学院建筑工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年6月26日; 录用日期: 2023年7月17日; 发布日期: 2023年7月27日

摘要

不同卸荷比和孔隙水压作用下软土的卸荷力学特性是软土地下空间设计计算重点关注的科学问题之一。但目前软土地下空间设计时忽视了孔隙水压和卸荷比对软土力学特性的弱化作用。针对该问题, 为模拟基坑开挖不同位置经受的卸荷应力路径, 以全自动应力应变控制式三轴仪进行卸荷力学特性试验。试验发现, 软土对卸荷应力路径非常敏感, 且随着孔隙水压的增大软土卸荷强度明显降低。

关键词

孔隙水压, 软土, 卸荷力学, 应力路径

The Effect of Pore Water Pressure and Stress Path on Soft Soil Unloading Mechanical Characteristics

Xing Jia

School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing

Received: Jun. 26th, 2023; accepted: Jul. 17th, 2023; published: Jul. 27th, 2023

Abstract

The primary objective of the important scientific difficulties in the design and calculation of soft soil underground space is the unloading mechanical characteristics of soft soil under varying unloading ratios and pore water pressures. However, the weakening effect of pore water pressure and unloading ratio on the mechanical properties of soft soil is ignored in the design of soft soil underground space. An unloading mechanical characteristic test was carried out using a completely

automated stress-strain control triaxial instrument in order to replicate the unloading stress path encountered by various positions of foundation pit excavation. According to the test, soft soil is extremely sensitive to the unloading stress route, and its unloading strength clearly declines as pore water pressure increases.

Keywords

Pore Water Pressure, Soft Soil, Unloading Mechanics, Stress Path

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国深圳等沿海地区存在较高位的地下水, 基坑施工过程中的开挖活动将难以避免地产生超静孔隙水压力。同时, 由于深圳等地域的特殊性, 基坑原状土在开挖前或将存在一定量的孔隙承压水。李广信[1]认为, 较深底层中静止的地下水属于静孔隙水压, 而由外部条件或边界条件的改变而形成的孔隙水压属于超静孔隙水压。土的有效应力原理指出, 不管是静孔隙水压还是超静孔隙水压对软土的卸荷强度均有一定的弱化影响。在实际工程中, 孔隙水压的存在对工程附近的建筑有不良的影响[2] [3] [4]。

大约半个世纪以前, 国内外一些学者便发现孔隙水压的存在对黏土的性能具有较大的影响, 同时学者们通过小孔扩张理论研究了黏土中孔隙扩张引起的黏土应力应变的变化, 得到了孔隙水压对黏土承载力的影响变化; 通过分析孔隙水压力的影响因素, 利用不同地区的黏土进行固结不排水三轴试验, 根据土的有效应力原理分析试验数据, 提出了一组土体临界孔隙水压力的计算公式, 为后续研究软土的非线性应力应变特性提供了基础[5] [6]。但前人对于孔隙水压对软土力学特性的研究重点还是在加荷应力路径上, 对于卸荷应力路径下的孔隙水压弱化软土力学特性的研究还不够深入; 室内三轴固结不排水试验的研究还主要集中在孔隙水压的变化规律和加荷应力路径下的软土峰值变化规律上[7] [8] [9]。

以上研究表明, 超静孔隙水压对软土力学特性的影响不容忽视, 但前人的研究中并未考虑到软土的区域特性, 例如在深圳等沿海地区, 其地下往往存在较高的地下水位, 因此在基坑开挖时便已经存在初始的孔隙水压。而室内试验往往在 K_0 固结之后便直接开始卸荷剪切, 忽视了初始孔隙水压的存在, 而这种忽视初始孔隙水压的试验方案对研究富水软土地区的卸荷力学特性具有阻碍作用。Chow 和 Chen [10] [11] 等利用某工程的桩基施工进行现场试验, 得到软土在埋深 12.5 m 时其孔隙水压在 43~64 kPa 之间。AL-Kami [12] 对无粘性土设置初始孔隙水压 $u = 0、25、50、75$ 和 100 kPa 的常规三轴试验, 试验表明初始孔隙水压与土体的强度参数成反比关系。邓尧[13]、邓晓佳[14] 等通过室内三轴试验已经证明了初始孔隙水压对软土的卸荷力学特性具有明显的弱化, 但其研究的应力路径不够深入, 比如其未研究变现为拉伸变形下的应力路径, 对不同应力路径下初始孔隙水压的影响研究还有待深入研究。

2. 实验与材料

2.1. 试验土样

试样取自深圳某基坑, 深度为 10~12 m。取得原状土后, 采用比重瓶法测土颗粒比重 G_s , GYS-2 光电式液塑限测定仪测塑限, 环刀法测土体天然密度 ρ , 烘干法测土体含水率 ω 。并制备直径 39.1 mm,

高度为 80.0 mm 的扰动土样，最后利用 TSZ-2S 型全自动应力控制式三轴，经前期等压固结后测得土样在不排水条件下的内聚力 c 和摩擦角 φ ，得到软土的基本物理参数如表 1 所示。

Table 1. The mechanical and physical characteristics of soft soil

表 1. 软土物理力学指标参数

土样	$\rho/\text{g}/\text{cm}^3$	e	G_s	$w/\%$	$w_L/\%$	$w_P/\%$	I_p	I_L	c	φ
原状土	1.8	1.1	2.4	38.5	42	23.9	16	1	17.9	29.2

2.2. 试验过程

(一) 试样饱和

将制好的扰动土样通过三轴仪进行反压饱和，与此同时计算孔隙水压增量并计算 Skempton's B-value。当 Skempton's B = 0.95 或以上时，认为土样达到饱和状态。

(二) 试样 k_0 固结

本试验固结围压分别为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa，为了还原土体的初始应力状态，本试验采用 $k_0 = 0.53$ 进行不等向 k_0 固结。当固结围压为 100 kPa、200 kPa 和 300 kPa 时，对应的轴向压力分别为 189 kPa、377 kPa 和 566 kPa。

(三) 施加超静孔隙水压

在土样 k_0 固结完成之后，分别向土样施加初始超静孔隙水压 $u_0 = 20$ kPa、40 kPa 和 60 kPa，同时设置 $u_0 = 0$ kPa 的对照组。

(四) 软土卸荷强度试验

针对不同固结围压和超静孔隙水压的土样进行卸荷试验，卸荷速率为 0.8 mm/min。

2.3. 试验方案

试样在 k_0 固结和施加孔隙水压之后，开始卸荷剪切试验，本次试验主要针对竖向和水平向均卸荷为主，卸荷比 $R = 0.5$ 同时以基坑开挖中具有代表性的 UU0.0 竖向保持不变、水平卸荷的情况作对比试验。本次试验 UU0.0 和 UU0.5 属于压缩变形，以应变值达到 15% 作为试验结束，具体试验方案如表 2 所示。

Table 2. The Stress Path Unloading of experiment method

表 2. 卸荷应力路径试验方案

应力路径	固结围压/kPa	孔隙水压/kPa	卸荷过程
UU0.0	100	0, 20, 40, 60	$R = \Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = 0.0$
	200	0, 20, 40, 60	σ_1 保持不变
	300	0, 20, 40, 60	σ_3 减小
UU0.5	100	0, 20, 40, 60	$R = \Delta\sigma_1/\Delta\sigma_3 = 0.5$ σ_1 和 σ_3 均减小
	200	0, 20, 40, 60	
	300	0, 20, 40, 60	

3. 结果与讨论

3.1. 应力 - 应变曲线

根据实验结果绘制初始固结围压为 100 kPa 和 200 kPa 时，卸荷比 $R = 0.0$ 、0.5 下的试验曲线，如图 1 所示。

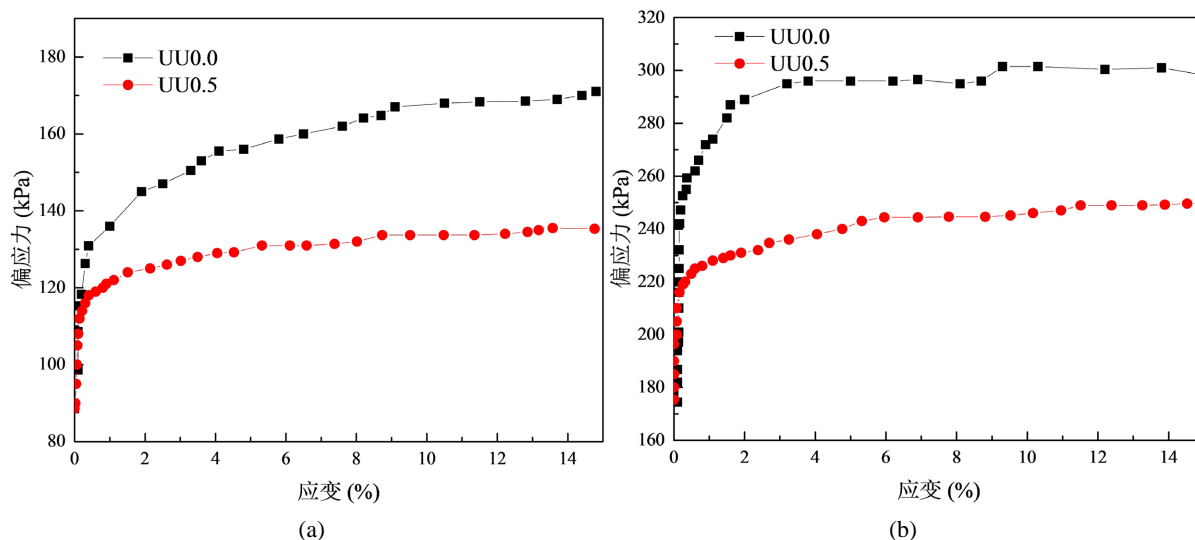


Figure 1. The stress-strain curves of different confining pressures. (a) Consolidation confining pressure $\sigma_3 = 100$ kPa; (b) Consolidation confining pressure $\sigma_3 = 200$ kPa

图 1. 不同围压下的应力 - 应变曲线。(a) 固结围压 $\sigma_3 = 100$ kPa; (b) 固结围压 $\sigma_3 = 200$ kPa

从图 1 可以明显看出当卸荷比 $R = 0.0$ 和 0.5 时, 软土发生压缩变形。图 1 中软土的应力 - 应变曲线接近于双曲线, 应变随应力的增加而逐步增加。在小应变的时候应力增加最快, 其应力值接近软土破坏的峰值应力, 说明本试验软土的卸荷破坏具有显著的突然性。当软土发生压缩变形时, 对比试验得到的卸荷强度, 发现 UU0.5 试验得到的强度明显低于 UU0.0 试验, 这与人(刘国彬)的研究基本一致[15], 但由于软土的区域特殊性, 本试验深圳淤泥质软土得到的卸荷强度与刘国彬的有一定区别。另外, 本文在刘国彬的基础上还研究了初始孔隙水压为 20、40、60 kPa 的情况, 研究发现, 随着孔隙水压的增加, UU0.5 应力路径下的卸荷强度也满足上述所说规律。

所以, 在基坑开挖时软土在不同深度下所受力的情况对软土的卸荷强度等具有显著影响, 即软土对卸荷应力路径较为敏感, 其中基坑坑底较为浅层区域的破坏强度最低, 所以在实际工程中应注意基坑发生卸荷破坏。

3.2. 孔隙水压 - 应变曲线

为了探讨不同孔隙水压对软土的弱化影响, 绘制如图 2 所示的不同孔隙水压作用的应力 - 应变曲线。

对比图 2 和图 1 可知, 当卸荷比相同, 初始固结围压不同时, 随着初始孔隙水压的增加, 软土的卸荷强度明显降低。深入研究发现, 软土在固结围压为 100 kPa、200 kPa 时卸荷强度的降低率分别为 2.8%~21.7%、2.1%~7.7%, 即初始固结围压较小时软土的强度降低更大, 说明孔隙水压对软土卸荷强度的弱化对初始固结围压较为敏感。产生这一现象的原因可能是因为较大的初始固结围压对土体产生了足够的侧向约束力, 使得软土的剪胀现象和孔隙率降低、内粘聚力增加, 提高了软土的卸荷强度。同时, 软土的卸荷强度降低率与初始固结围压和孔隙水压密切相关, 在小应变时的应力更接近峰值应力, 其破坏的突然性更大。因此, 实际工程中应时刻监视孔隙水压的变化情况, 防止基坑开挖过程中由于孔隙水压的增大而引起一系列不好的影响产生。

3.3. 孔隙水压对强度参数的影响

根据试验数据可以得到不同孔隙水压下的抗剪强度参数指标如图 3 所示。

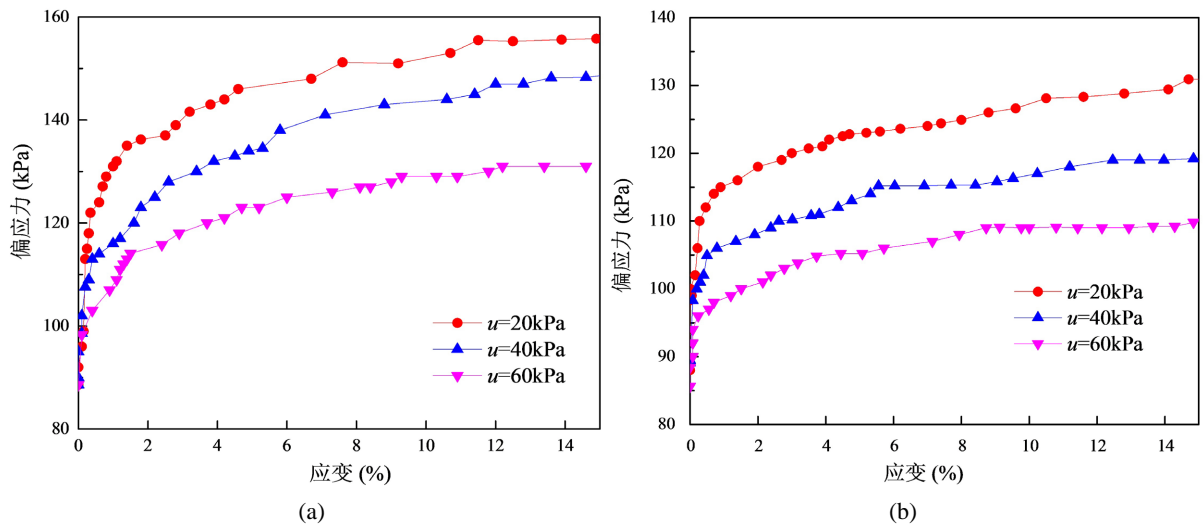


Figure 2. The variation diagram of pore pressure under different initial pore water pressures. (a) The confining pressure of UU0.0 consolidation 100 kPa; (b) The confining pressure of UU0.5 consolidation 100 kPa

图 2. 不同初始孔隙水压下的孔压变化图。(a) UU0.0 固结围压 100 kPa; (b) UU0.5 固结围压 100 kPa

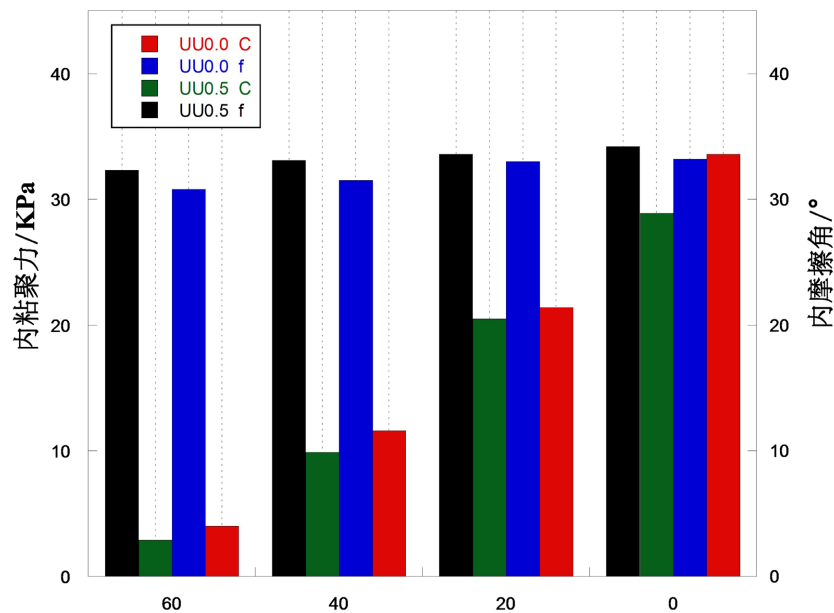


Figure 3. The strength parameters under different pore water pressures

图 3. 不同孔隙水压下的强度参数

通过研究软土抗剪强度参数指标可以发现，不同卸荷比试验得到的强度参数相差不大，但随着初始孔隙水压的增加，软土的内聚力 c 明显减小，摩擦角变化不大，这说明孔隙水压和卸荷比对软土的弱化主要体现在内聚力的削弱。究其原因可能是因为，在高初始孔隙水压作用下，土颗粒之间的有效应力降低，最终弱化了颗粒间的粘聚力。

张坤勇[16]的试验得到了不同的结论，但他的试验是基于排水条件下的卸荷试验，得到的强度参数是有效强度参数，而本文是不排水条件下的试验，由于孔隙水压的存在，其得到的强度参数是总应力参数。由此可知，卸荷比对排水条件下的强度参数影响不大，而对不排水条件下的强度参数具有一定的影响。

4. 结论

本章以深圳某基坑淤泥质软土为研究对象进行了一系列三轴卸荷试验, 其中包括两种卸荷比、四种超静孔隙水压、两种固结围压, 得到结论如下:

- 1) 软土在小应变情况下应力值接近其峰值应力, 且围压相同时, 随着初始孔隙水压的增加软土的卸荷强度始终呈现减小趋势。
- 2) 随着软土应变的增大孔隙水压始终呈下降趋势, 特别在初始孔隙水压为 0 kPa 时, 随着应变的增加孔隙水压始终为负。
- 3) 孔隙水压和卸荷比对软土强度参数有显著弱化作用, 且对内粘聚力的影响最大。

基金项目

重庆市级大学生科技创新训练计划项目(s202211551018)。

参考文献

- [1] 李广信. 静孔隙水压力与超静孔隙水压力——兼与陈愈炯先生讨论[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(5): 957-960.
- [2] 秦朝辉, 邓检良, 彭加强, 宋春雨, 刘世明, 陈龙珠. 高频振动时振动频率对饱和和密砂动力特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(10): 2148-2154.
- [3] 师旭超, 孙运德. 线性卸荷作用下软土超孔隙水压力变化规律分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1333-1338.
- [4] 邓华锋, 王哲, 李建林, 姜桥, 张恒宾. 低孔隙水压力对砂岩卸荷力学特性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3266-3275.
- [5] 刘雪颖, 王永洪, 张明义, 孙绍霞, 桑松魁, 苗德滋. 粉质黏土中静力沉桩过程产生的孔压试验研究[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(8): 106-112.
- [6] 王永洪, 徐泽强, 张明义, 张腾, 银吉超, 吴江斌, 魏家斌. 均质黏性土中静压沉桩桩土界面孔压增量及有效土压室内试验研究[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-7, 2023-06-26.
- [7] Wang, B.H., Chen, G. and Jin, D.D. (2010) Pore Water Pressure Increment Model for Saturated Nanjing Fine Sand Subject to Cyclic Loading. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, **9**, 569-576. <https://doi.org/10.1007/s11803-010-0038-9>
- [8] Gu, C., Wang, J., Cai, Y., et al. (2012) Undrained Cyclic Triaxial Behavior of Saturated Clays under Variable Confining Pressure. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **40**, 118-128. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2012.03.011>
- [9] Belkhatir, M., Schanz, T., Arab, A., et al. (2014) Experimental Study on the Pore Water Pressure Generation Characteristics of Saturated Silty Sands. *Arabian Journal for Science and Engineering*, **39**, 6055-6067. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1238-9>
- [10] Chow, S.H., O'Loughlin, C.D. and Randolph, M.F. (2014) Soil Strength Estimation and Pore Pressure Dissipation for Free-Fall Piezocone in Soft Clay. *Geotechnique*, **64**, 817-827. <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.107>
- [11] Chen, Q., Haque, M.N. and Abu-Farsakh, M. (2014) Field Investigation of Pile Setup in Mixed Soil. *Geotechnical Testing Journal*, **2**, 268-281. <https://doi.org/10.1520/GTJ20120222>
- [12] Al-Karni, A.A. (2011) Evaluation of Shear Strength of Cohesionless Soil Due to Excess Pore Water Pressure. *Arabian Journal of Geosciences*, **4**, 1095-1101. <https://doi.org/10.1007/s12517-009-0112-7>
- [13] 邓尧. 海相软土卸荷力学特性研究及其基坑开挖数值模拟[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [14] 邓晓佳. 超静孔隙水压下海相沉积软土卸荷蠕变特性及本构模型研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- [15] 刘国彬, 候学渊. 软土的卸荷应力——应变特性[J]. 地下工程与隧道, 1997(2): 16-23.
- [16] 张坤勇, 李广山, 梅小洪, 等. 基于 K₀ 固结排水卸荷应力路径试验粉土应力-变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(7): 1182-1188.