

软土卸荷时效性及其孔隙水压力变化试验研究

付艳斌¹, 朱合华², 杨 骏³

(1. 深圳大学 土木工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 3. 深圳地铁有限公司, 广东 深圳 518026)

摘要: 采用英国 GDS 公司生产的 STDTTTS+UNSAT(7 kN/1 700 kPa)型号三轴测试系统, 对上海淤泥质软土进行一系列室内试验研究, 系统地探讨基坑不同区域的卸荷时效性特性及其孔压变化规律。试验结果表明, 软土卸荷后蠕变可出现 3 个阶段: 衰减蠕变、等速蠕变、加速蠕变。当应力水平较低时, 蠕变曲线只出现蠕变的第 1 阶段; 当卸荷应力水平增大到一定值时, 蠕变曲线出现第 1, 2 阶段; 当应力水平较高时, 变形急剧增加, 土样很快就出现破坏。但不会出现从蠕变的第 2 阶段(等速蠕变阶段)直接过渡到蠕变第 3 阶段(加速蠕变阶段)的情况。孔压系数随时间而变化, 并不是常数。卸荷时基坑不同区域孔压均减小, 然后在不排水蠕变阶段逐渐增加到最大值, 此时基坑安全系数达到最小。

关键词: 土力学; 基坑; 卸荷; 时效性; 孔隙水压力

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2009)增 1-3244-06

EXPERIMENTAL STUDY ON TIME-DEPENDENT PROPERTIES AND PORE WATER PRESSURE OF SOFT SOIL UNDER UNLOADING

FU Yanbin¹, ZHU Hehua², YANG Jun³

(1. College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shenzhen Metro Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518026, China)

Abstract: Using standard stress path triaxial system, STDTTTS+UNSAT(7 kN/1 700 kPa) production of GDS, UK, a series of laboratory tests are conducted with undisturbed muddy clay samples obtained from Shanghai. Time-dependent properties and pore water pressure in passive zone and active zone in excavation are researched. It is shown that three stages appear under unloading: weakening stage, constant speed stage and accelerating stage. Creep curve is in weakening stage when unloading is small and then changes from weakening stage to constant speed stage with the increase of unloading. Soil sample is damaged quickly at high unloading stress level with deformation sharply increased. However, it is not found that creep curve of soil changes with time from constant speed stage to accelerating stage directly. Parameter of pore water pressure is not constant and changes with time. Pore water pressure decreases under unloading whether in passive zone or in active zone of excavation, then increases to the maximum value in undrained creep stage and safety ratio is the smallest at this time.

Key words: soil mechanics; excavation; unloading; time-dependency; pore water pressure

1 引 言

沿海软黏土作为弹黏塑性材料在外力很小的情

况下, 其卸载与加载状态就具有显著的差异性^[1]。

目前卸荷工程如基坑、隧道开挖, 其稳定及变形分析中所采用的土体强度及参数往往都基于加荷试验, 即简单地利用加荷试验结果或将加荷试验结果

收稿日期: 2009-02-18; **修回日期:** 2009-03-11

基金项目: 中国高技术研究发展计划“863”计划资助项目(2006AA11Z102), 深圳市科技计划项目(SY200806270077A)

作者简介: 付艳斌(1977-), 男, 博士, 1997年毕业于西安建筑科技大学冶金工程专业, 现任讲师, 主要从事隧道及地下工程的教学与研究工作。
E-mail: fuyanbin999@163.com

折减一下, 从而造成其计算结果与实际有较大的差异^[2]。对于基坑工程而言, 基坑开挖卸荷引起的坑底隆起、坑侧土体侧向位移等问题与一般土工加载问题所表现的特性显著不同。

土中的超静孔隙水压力性状是土力学的一个基本问题。从以往的研究来看, 对软土卸载问题, 研究重点集中在变形与强度特性上, 对卸载孔隙水压力(以下简称“孔压”)特性涉及极少。此外, 试验方法一般为卸荷-再加荷^[3], 或水平与垂直简单卸载^[4-5], 没有考虑土体前期不同卸载路径的影响。而典型的基坑开挖, 是一个卸载-回弹或隆起-再卸载的过程。沈扬等^[6]采用空心圆柱仪对主应力轴方向突变和连续旋转条件下杭州典型原状黏土的孔压特征进行研究。试验结果表明, 主应力轴旋转会引起土中孔压积累, 积累程度受主应力轴转幅及旋转时剪应力幅值、剪应力水平支配。张荣堂和陈守义^[7]对汉口淤泥质黏土做了一系列不排水减 P 应力路径试验, 并得出孔压随着 $\lambda(\lambda = \Delta q/\Delta p)$ 增加, 与平均应力增量的关系由线性逐步转化为非线性关系。周健等^[8-11]从理论分析和室内试验对软黏土的卸荷孔压特性进行了研究, 并对软黏土孔压特性的归一化问题进行了分析。本文在综合已有研究成果的基础上, 重点探讨了基坑不同区域卸荷时效性及其孔压的变化规律。

2 试验方案

2.1 土样选取

本次试验土样是用直径为 $\phi 100$ mm 薄壁取土器在 30 m 深的钻孔中取土。土样取自上海地区的典型第四层土——淤泥质黏土层。取土深度分布在 7~23 m, 灰色淤泥质黏土基本物理力学参数如表 1 所示。

表 1 灰色淤泥质黏土基本物理力学参数

Table 1 Basic physico-mechanical parameters of gray soft clay samples

w/%	γ (kN·m ⁻³)	e	G _s	S _r /%	c/kPa	ϕ (°)	E ₀ /MPa
53.4	16.7	1.517	2.74	53.4	14.0	8.5	2.54

2.2 方案设计及试验步骤

主要针对 2 种情况进行室内三轴试验: (1) 基

坑被动区坑底土体卸荷回弹时效性规律, 本文采用三向卸荷模拟被动区土体的卸荷流变。(2) 基坑主动区土体侧向卸荷的不排水蠕变。本文采用侧向卸荷模拟主动区的卸荷流变。

对于室内试验, 选择符合土体实际情况加(卸)载应力路径, 控制轴压和围压的变化, 是保证试验成果正确的基本条件。由于基坑卸荷后应力路径比较复杂, 本文采用英国 GDS 公司生产的 STDTS+UNSAT(7 kN/1 700 kPa)型号三轴测试系统, 可灵活控制应力路径, 满足卸荷试验要求。

考虑围压及不同前期卸载路径对土样造成的影响, 保持在 K_0 状态下, 加轴压直至前期固结压力, 然后按照设计卸荷比(围压与轴压卸荷量之比)卸荷。

试验分 3 组进行, A, B 组分别以卸荷比为 1/4, 1/2 模拟基坑被动区土体三向卸荷; C 组模拟基坑主动区土体侧向卸荷。本试验取卸荷速率为 0.1 kPa/min, 以 1 h 应变达 0.012 5%作为蠕变的稳定标准值^[12]。

试验过程为 K_0 固结-比例卸荷-蠕变至稳定-比例卸荷-蠕变至稳定。试验方案见表 2。

表 2 试验方案
Table 2 Test schemes

加卸载过程	A		B		C	
	σ_y /kPa	σ_x /kPa	σ_y /kPa	σ_x /kPa	σ_y /kPa	σ_x /kPa
K_0 固结	245	222	250	220	245	220
卸荷 1	195	210	200	195	245	210
卸荷 2	95	185	150	170	245	160
卸荷 3	75	180	50	120	245	110
卸荷 4	5	162	0	95	245	60

3 试验结果分析

3.1 卸荷状态下变形时效性规律

陈军^[10]通过大量的直剪试验和三轴流变试验发现上海软土加载下的蠕变可分为 3 个阶段: 衰减蠕变和非衰减蠕变(等速蠕变, 加速蠕变)。土体卸荷蠕变规律, 类比加荷蠕变规律, 也可划分为衰减蠕变过程和非衰减蠕变过程。

图 1, 2 分别为基坑被动区土体 A, B 组在三向卸荷下的蠕变曲线。图 3 为基坑主动区土体 C 组在

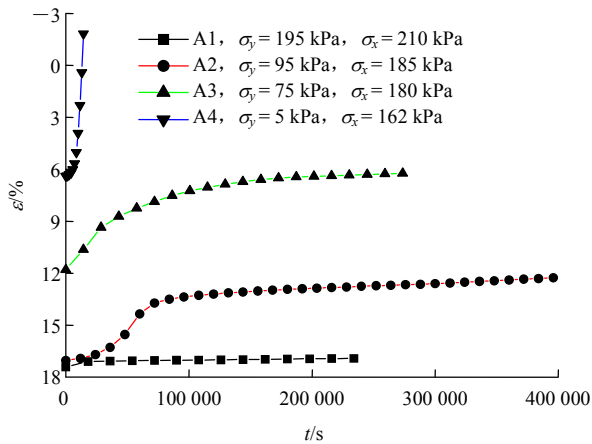


图1 A组(卸荷比为1/4)卸荷蠕变曲线

Fig.1 Creep curves under unloading ratio of 1/4 of soil samples for group A

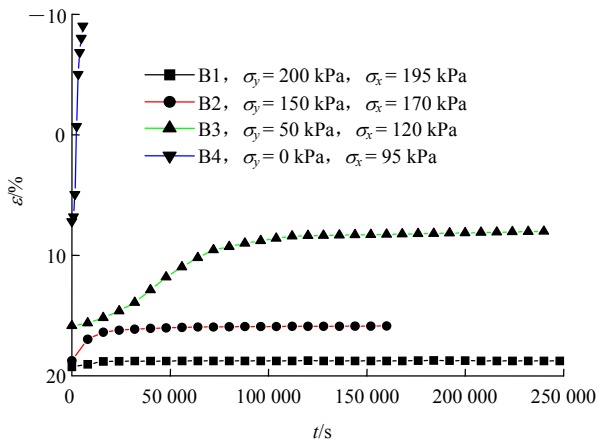


图2 B组(卸荷比为1/2)卸荷蠕变曲线

Fig.2 Creep curves under unloading ratio of 1/2 of soil sample for group B

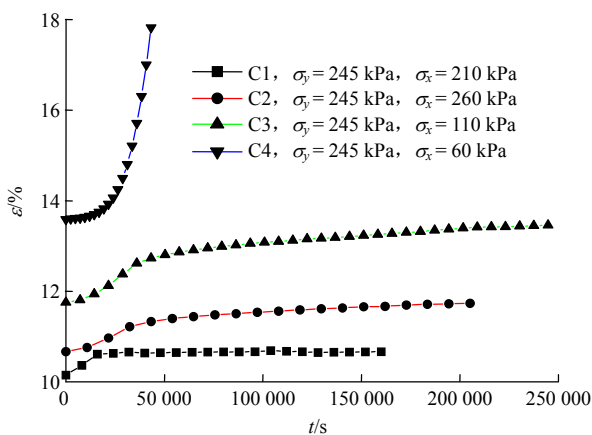


图3 C组(卸荷比为∞)卸荷蠕变曲线

Fig.3 Creep curves under infinite unloading ratio of soil samples of group C

动区还是主动区土体的蠕变,都具有以下共同特点:

(1) 在卸荷的瞬时都有一瞬时变形,无论是被动区的回弹变形还是主动区的压缩变形,随着时间的增长,变形也在增加;应力水平越高,瞬时变形越大,蠕变变形也越大。

(2) 当应力水平较低时,蠕变曲线仅出现蠕变的第1阶段,蠕变呈衰减稳定状态,最终的变形趋近于一常数,变形速率趋近于0。在这种情况下,蠕变变形较小,而且较快达到稳定值,如A1, B1, B2, C1土样所示。

(3) 当卸荷应力水平增大到一定值时,蠕变曲线出现第1, 2阶段,蠕变从衰减稳定变成非稳定的等速蠕变。这使得蠕变变形等速发展下去,变形速率为一常数,但不为0,如A2, B3, C2, C3土样所示。

(4) 当应力水平较高时,变形急剧增加,土样很快就出现破坏。在这种情况下,土样从卸荷到破坏,历时很短,一般不作为蠕变来研究,如A4, B4, C4土样所示。

(5) 通过试验发现,上海软土卸荷蠕变过程一般不会出现从蠕变的第2阶段(等速蠕变阶段)直接过渡到蠕变第3阶段(加速蠕变阶段)的情况。

由于上海淤泥质黏土不存在由等速蠕变到加速蠕变的过渡阶段,而试验因为剪应力过大而造成的瞬时破坏,一般不作为蠕变研究,故土体因为蠕变而造成的工程破坏主要由等速蠕变造成的。

3.2 土体卸荷应力 - 应变非线性特性

三轴卸荷过程时间较短,一般其应力 - 应变视作瞬时弹性变形。将其后的流变变形减去卸荷瞬时变形即为流变而引起的变形,然后作出不同时刻 t 的 D - ϵ 曲线(D 为轴压与围压之差),如图4~6所示。当时间一定时,应力 - 应变关系曲线呈曲线变化,而非直线变化。说明蠕变柔量不仅仅是时间 t 的函数,还是应力的函数。当应力一定时,随着时间增加,曲线越远离 ϵ 轴,说明非线性程度越大,同时也蠕变柔量不仅仅是应力的函数,也是时间的函数,所以三向卸荷下应力 - 应变曲线具有典型非线性特征。

4 卸荷孔压分析

A. W. Bishop 等^[13~15]在分析黏土中的挖方问题定义超静孔隙水压力为

侧向卸荷下的蠕变曲线。通过试验发现,不论是

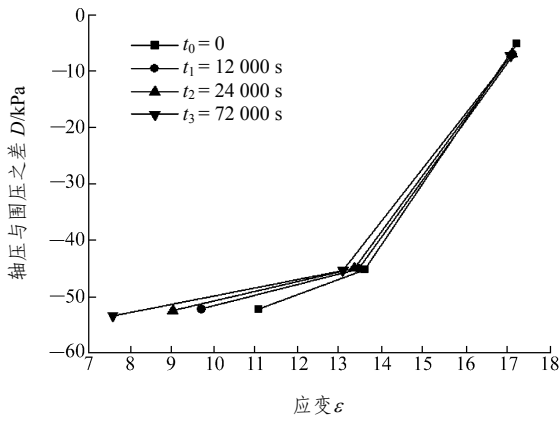


图 4 A 组应力 - 应变曲线(卸荷比为 1/4)

Fig.4 Stress-strain curves of soil samples for group A with unloading ratio of 1/4

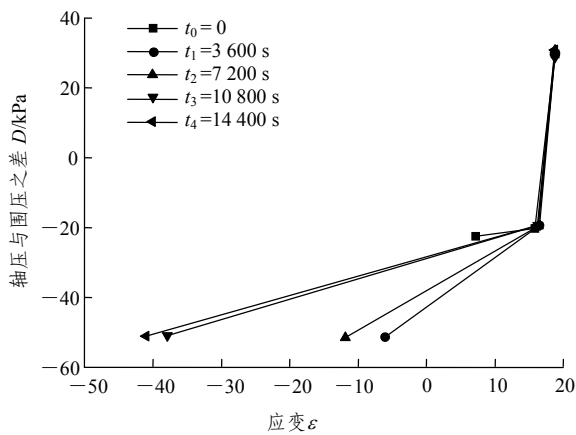


图 5 B 组应力 - 应变曲线(卸荷比为 1/2)

Fig.5 Stress-strain curves of soil samples for group B with unloading ratio of 1/2

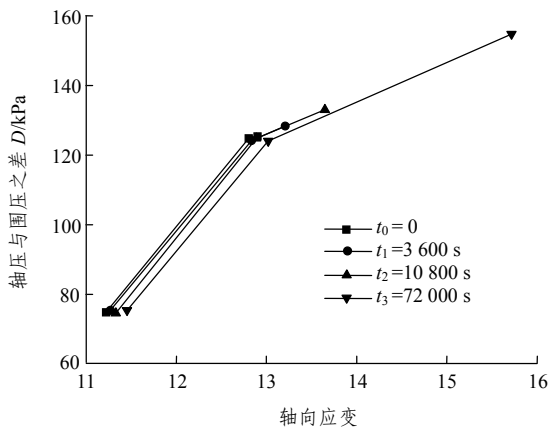


图 6 C 组应力 - 应变曲线(卸荷比为 ∞)

Fig.6 Stress-strain curves of soil samples for group C with infinite unloading ratio

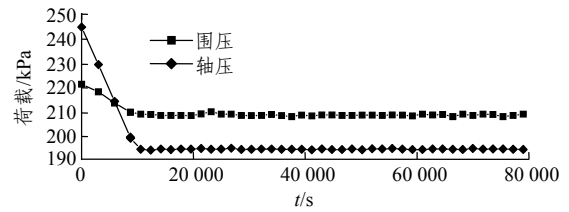
$$\Delta u = B[\Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)] \quad (1)$$

对于饱和黏土, 式(1)中 $B=1$, 此时有

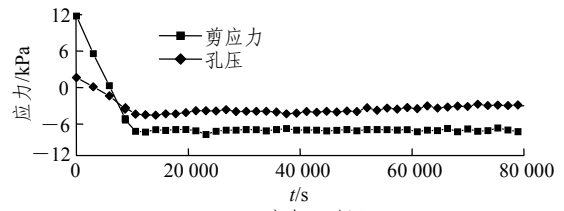
$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad (2)$$

式中: u 表示超静孔隙水压力, σ_1 为轴压, σ_3 为围压, A 为孔压系数。

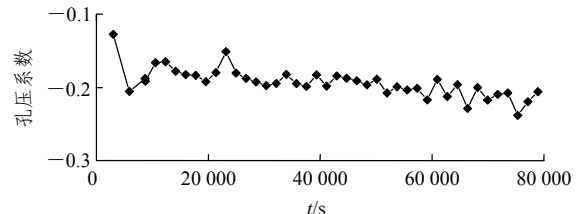
根据式(2)作出荷载 - 孔压系数 - 时间的变化规律如图 7~9 所示。



(a) 荷载 - 时间



(b) 应力 - 时间



(c) 孔压系数 - 时间

图 7 A1 土样荷载 - 孔压系数 - 时间曲线

Fig.7 Curves of load, pore water pressure coefficients and time under unloading for soil sample A1

图 7~9 均表示被动区土体三向卸荷, 由于轴压比围压下降快得多, 引起了超静孔压水压力的下降, 直到卸荷停止孔压下降到最大的负值。在随后保持总应力不变时, 孔压有 2 种不同的表现。当卸荷量较小时, 孔压缓慢恢复到 0, 并随着时间而有轻微向负值增大趋势, 如图 7 所示。当卸荷量较大时(如图 8 所示), 孔压先由卸荷时发展到负的最大值, 然后又逐渐减小至零, 突破零位后, 发展成为正孔压并最后达到正的最大值。卸荷量越大, 产生的负孔压的极值越小, 最终的正孔压越大。孔压系数随孔压减小而减小, 变化范围为 $-0.2 \sim -0.6$ 。

在侧向卸荷时(如图 9 所示), 孔压随围压减小而减小。卸荷结束时, 孔压降低到最小值, 然后在其后的不排水蠕变期间, 孔压随时间逐渐增加到最大值。孔压系数在不排水蠕变期间随着孔压增大而增大, 变化范围为 $1.0 \sim 1.3$ 。

对于基坑开挖工程, 无论被动区还是主动区土体, 孔压总体表现为随卸荷而减小到最小值, 然后

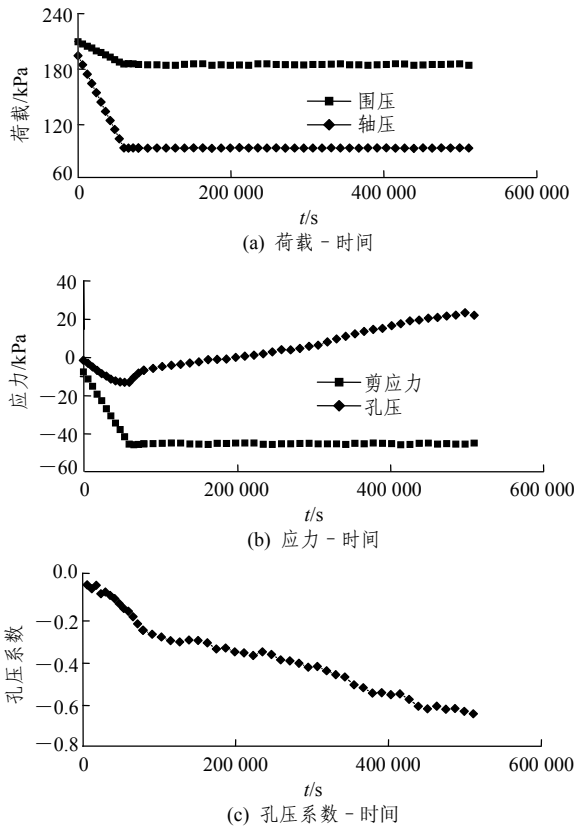


图8 A2土样荷载-孔压系数-时间曲线

Fig.8 Curves of load, pore water pressure coefficients and time under unloading for soil sample A2

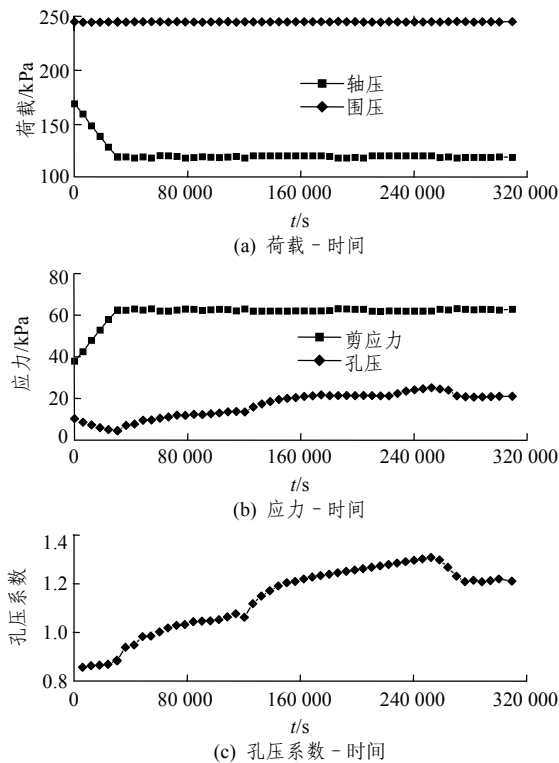


图9 C2土样荷载-孔压系数-时间曲线

Fig.9 Curves of load, pore water pressure coefficients and time under unloading for soil sample C2

在不排水蠕变阶段逐渐增加到最大值。假设不考虑蠕变引起的长期强度损失，则可认为在不排水卸荷时抗剪强度不变，在不排水期间，由于孔压上升到最大的正值，有效应力逐渐减少，伴随而来的有黏土抗剪强度的降低和土体的膨胀。比较该过程的安全系数可以发现，安全系数最小的时候不是在卸荷结束时，而是在孔压上升到最大的正值时刻。该时刻抗剪强度最小，而最大剪应力保持不变。故基坑工程最危险时刻不是在基坑开挖到坑底时，而是在此后一段时间内孔压上升到最大的时刻。

5 结 论

软土基坑工程卸荷时效性与加载时效性有显著区别，通过本文试验，可以发现以下规律：

(1) 在卸荷的瞬时都有一瞬时变形，无论是被动区的回弹变形还是主动区的压缩变形，随着时间的增长，变形也在增加；应力水平越高，瞬时变形越大，蠕变变形也越大。

(2) 当应力水平较低时，蠕变曲线只出现蠕变的第1阶段，蠕变呈衰减稳定状态，最终的变形趋近于一常数；当卸荷应力水平增大到一定值时，蠕变曲线出现第1, 2阶段，蠕变从衰减稳定变成非稳定的等速蠕变；当应力水平较高时，变形急剧增加，土样很快就出现破坏。在这种情况下，土样从卸荷到破坏，历时很短，一般不作为蠕变来研究。

(3) 通过试验发现，上海软土卸荷蠕变过程一般不会出现从蠕变的第2阶段(等速蠕变阶段)直接过渡到蠕变第3阶段(加速蠕变阶段)的情况。

(4) 无论是三向卸荷还是侧向卸荷试验，孔压系数并不是常数，都在随时间而变化。无论被动区还是主动区土体，孔压均表现为随卸荷而减小到最小值，然后在不排水蠕变阶段逐渐增加到最大值。基坑工程最危险时刻不是在基坑开挖到坑底时，而是在此后一段时间内孔压上升到最大的时刻。

参考文献(References):

[1] 魏汝龙. 正常压密黏土在开挖卸荷后的不排水抗剪强度[J]. 水利水运科学研究, 1984, (4): 39 - 43.(WEI Rulong. The undrained shear strength of normally consolidated clay during unloading due to excavation[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1984, (4): 39 - 43.(in Chinese))

[2] 郑刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 天津市区第一海相层粉质黏土卸荷

- 变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(5): 1 237 - 1 242.
(ZHENG Gang, YAN Zhixiong, LEI Huayang, et al. Experimental studies on unloading deformation properties of silty clay of first marine layer in Tianjin urban area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(5): 1 237 - 1 242.(in Chinese))
- [3] 陈永福, 曹名葆. 上海地区软黏土的卸荷—再加荷变形特性[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(2): 9 - 17.(CHEN Yongfu, CAO Mingbao. The deformation characteristics of soft clay under unloading and reloading in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1990, 12(2): 9 - 17.(in Chinese))
- [4] 刘祖德, 孔官瑞. 平面应变条件下膨胀土卸荷变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(2): 68 - 73.(LIU Zude, KONG Guanrui. Test research on the deformation of expansive soil during unload under plane strain condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(2): 68 - 73.(in Chinese))
- [5] 刘国彬, 侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(6): 18 - 23.(LIU Guobin, HOU Xueyuan. Unloading modulus of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(6): 18 - 23.(in Chinese))
- [6] 沈 扬, 周 建, 龚晓南. 主应力轴旋转对土体性状影响的试验进展研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1 408 - 1 415.(SHEN Yang, ZHOU Jian, GONG Xiaonan. Experimental progress research on influence of principal stress rotation on soils' characteristics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(7): 1 408 - 1 415.(in Chinese))
- [7] 张荣堂, 陈守义. 减 P 路径下饱和和软黏土应力-应变性状的试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 612 - 616.(ZHANG Rongtang, CHEN Shouyi. An experimental study on stress-strain behavior of soft clay along decreasing average normal stress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 612 - 616.(in Chinese))
- [8] 周 健, 王 浩. 软土的卸载孔压特性的试验与理论计算分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 556 - 559.(ZHOU Jian, WANG Hao. Pore pressure characteristic analysis of soft clay during unloading based on lab data and numerical calculation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 556 - 559.(in Chinese))
- [9] 周 健, 王 浩. 软黏土卸载特性计算模型研究[J]. 力学季刊, 2004, 25(1): 89 - 95.(ZHOU Jian, WANG Hao. Unloading characteristics research of soft soil[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2004, 25(1): 89 - 95.(in Chinese))
- [10] 陈 军. 上海地区饱和和软黏土流变特性的试验与理论研究[硕士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 1993.(CHEN Jun. Test and theoretical research on rheological character of soft soil in Shanghai[M. S. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 1993.(in Chinese))
- [11] 付艳斌. 考虑卸载扰动状态的 3D 弹黏塑性本构模型及其应用[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2008.(FU Yanbin. Establishing and application of 3D elastic viscoplastic constitutive model considering unloading and disturbance[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2008.(in Chinese))
- [12] 张冬梅, 黄宏伟. 集不同应力历史条件下软黏土强度时效特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 1 320 - 1 326.(ZHANG Dongmei, HUANG Hongwei. Time-dependency of undrained behavior of natural soft clay with different pre-shearing stress histories based on laboratory test[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008, 36(10): 1 320 - 1 326.(in Chinese))
- [13] BISHOP A W, BJERRUM L. The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems[C]// Proceedings of Shear Strength of Cohesive Soils. [S. l.]: [s. n.], 1960: 437 - 493.
- [14] 陈存礼, 杨 鹏, 郭 娟, 等. 应力比应力路径下饱和和原状黄土的孔压特性[J]. 水利学报, 2007, 38(8): 907 - 913.(CHEN Cunli, YANG Peng, GUO Juan, et al. Pore water pressure characteristics of saturated intact loess under constant stress ratio stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(8): 907 - 913.(in Chinese))
- [15] 张 茹, 何昌荣, 费文平, 等. 固结应力比对土样动强度和动孔压发展规律的影响[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 101 - 105.(ZHANG Ru, HE Changrong, FEI Wenping, et al. Effect of consolidation stress ratio on dynamic strength and dynamic pore water pressure of soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(1): 101 - 105.(in Chinese))