

软土变形时效特性的试验研究

陈晓平^{1,2}, 朱鸿鹄¹, 张芳枝³, 张波⁴

(1. 暨南大学, 广东 广州 510632; 2. 武汉大学, 湖北 武汉 430072; 3. 广东水利电力职业技术学院, 广东 广州 510635;
4. 长江勘测设计研究院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 软土变形的重要特征为具有时效性, 这将导致软土工程的工后沉降。根据实际工程需要, 采用原状土样和扰动土样对软土变形机理进行了一系列室内试验, 包括软土的应力-应变特性、固结效应、次固结特性、蠕变特性等。通过试验成果系统分析可得: (1) 初始固结度对应力-应变关系的影响; (2) 次固结系数与固结压力的关系以及应力历史对次固结系数的影响; (3) 次固结系数与压缩指数的关系; (4) 排水蠕变和不排水蠕变的变形特征; (5) 蠕变变形的影响因素和降低蠕变效应的技术路径等。研究结果表明: 软土变形的时效性产生于固结特性和蠕变特性的耦合效应, 土体的变形过程实际是固结和蠕变共同作用的过程, 任一时刻两种变形在总变形中所占比例取决于多种因素, 其中最重要的是应力水平和排水条件。

关键词: 土力学; 变形时效; 次固结; 蠕变; 软土

中图分类号: TU 447

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)12-2142-07

EXPERIMENTAL STUDY ON TIME-DEPENDENT DEFORMATION OF SOFT SOIL

CHEN Xiao-ping^{1,2}, ZHU Hong-hu¹, ZHANG Fang-zhi³, ZHANG Bo⁴

(1. J'nan University, Guangzhou 510632, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China;
3. Guangdong Technical College of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou 510635, China;
4. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract Time-dependence is one of the most important deformation behaviors of soft soil. It brings on post-construction settlement of soft soil engineering. For the need of practical engineering, a series of laboratory tests were done with undisturbed samples and disturbed samples respectively. And the deformation mechanism of soft soil was investigated, including stress-strain behavior, consolidation effect, secondary consolidation characteristics, creep effect, and so on. Based on the results, some special properties are systematically analyzed: (1) the influence of initial consolidation on stress-strain curve; (2) the relationship between secondary consolidation coefficient and consolidation pressure, as well as the influence of stress history on secondary consolidation coefficient; (3) the relationship between secondary consolidation coefficient and compression index; (4) the deformation characteristics of drained shear creep and undrained shear creep; (5) influencing factors on creep and technology of decreasing creep deformation. The study results show that time-dependent deformation of soft soil issues from the coupling effect of consolidation characteristics and creep characteristics. The deformation course of soft soil is actually the process of consolidation and creep concurrently. The ratios of two deformations to total deformation depend on many factors, among which stress level and drainage condition are the most important.

Key words: soil mechanics; time-dependent deformation; secondary consolidation; creep; soft soil

收稿日期: 2004-09-01; **修回日期:** 2004-12-01

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(021145); 广东省科技计划项目(2004B32801003); 广东省水利厅科技计划项目(2003-13)

作者简介: 陈晓平(1957-), 女, 博士, 1982年毕业于武汉水利电力大学, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土力学和基础工程方面的教学与研究。E-mail: Qpy-cxp@263.net.

1 引言

软土在荷载作用下的变形具有明显的时效特性，其产生的原因可归结于软土在各种赋存环境中所具有的固结特性和蠕变特性。研究表明^[1]，软土的时效特征与其他粘滞材料的时效特征的内在机理有明显不同：软土蠕变的过程也是固结的过程，蠕变特性可以影响孔隙水压力的消散，减小固结效应；而固结作用又可弱化蠕变现象，使土体的粘滞流动降低。因此，对于软土来说，土体的变形过程实际是固结和蠕变同时发生作用的过程，任一时刻两种变形在总变形中所占比例取决于应力水平的高低和其他有关因素。

由于软土变形的时效特性可能会使修建在软土地基上的建(构)筑物产生不可忽视的工后沉降，并由此带来稳定性方面的问题^[2]，因此，研究软土变形时效特性的内在机理，探讨固结与蠕变的变形特征，对建于软土地基上的工程有重要意义。本文根据软土变形机理设计了不同的室内试验方案，研究样本取自广州南沙区域原状软土(取样深度 10~12 m)和深圳河区域扰动软土，分别对软土的应力-应变特性、固结效应、次固结特性、蠕变特性等进行了研究。

2 应力-应变特性

2.1 偏应力-轴向应变特性

应力-应变关系采用原状土样的三轴试验确定，试样尺寸为 $\phi = 39.1 \text{ mm}$ ， $H = 80 \text{ mm}$ 。为了探讨土体初始固结度对应力-应变特性的影响，在三轴试验中分别进行了不固结不排水(UU)、施加围压 σ_3 使土体达到 50%，100%固结度条件下的固结不排水剪(CU)和排水剪(CD)试验，图 1 所示为典型土样的试验成果。

由图 1 可知：(1) 无论土体的固结状态如何，受剪过程中的应力-应变关系均呈现典型的加工硬化特征，且破坏后的土样均为腰鼓形状，说明应变硬化特征和塑性破坏特性是软土应力-应变的共性规律；(2) 随着初始固结度的增加，软土不仅会表现出较大的抗剪强度^[3]，且在剪切过程中的偏应力-轴向应变关系也会越来越偏离理想的弹塑性体，且在相同的应力条件下所产生的轴向应变越来越小，

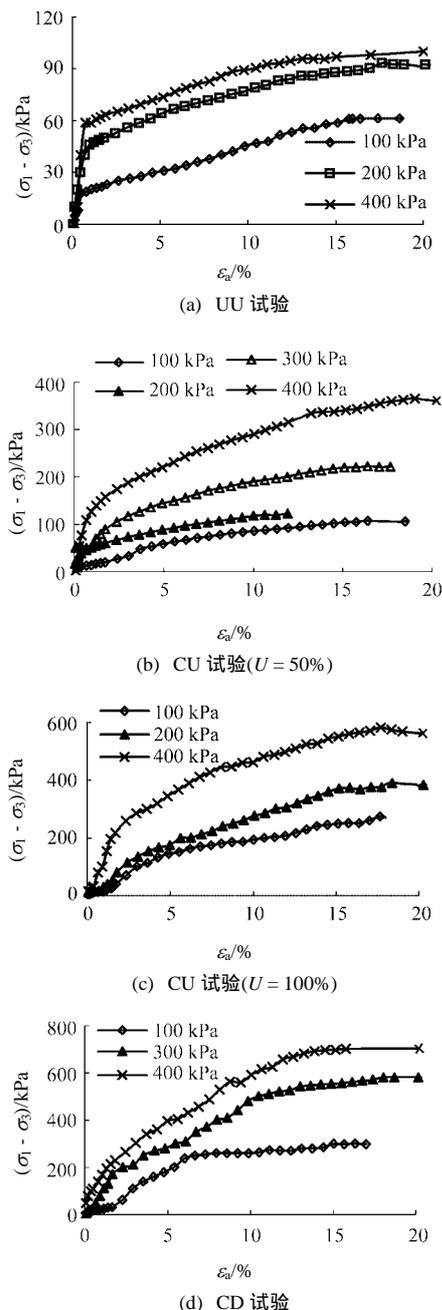


图 1 偏应力-轴向应变关系

Fig.1 Deviator stress-axial strain relationship

表明软土的初始固结状态虽然不会改变其应力-应变规律，但可明显改变土体在荷载下的应变响应；(3) 剪切过程中排水与否对土体的应变特性有较大影响，特别是应力水平较高时，剪切过程中排水比不排水有更高的屈服值。

2.2 剪应力-剪应变特性

为分析软土在排水条件下的剪应力与剪应变的关系，在应变控制式反复直剪仪上进行了原状土样的反复剪试验，典型土样(取土深度为地面以下 10 m)的试验成果见图 2。

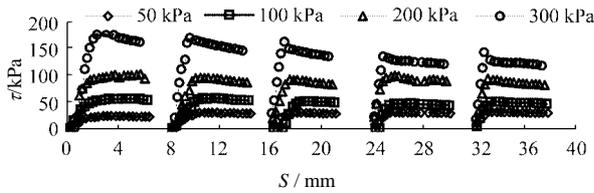


图 2 反复剪过程中的剪应力-剪切位移关系

Fig.2 Shear stress-shear displacement relationships in drained repeat direct shear test

由图 2 可知：在持续剪应力作用下，当固结压力较小时，土体的剪应力-剪应变关系也呈现明显的应变硬化特征；但当固结压力达到 300 kPa、且剪切位移较小时，出现软化现象，随后随着位移的增加，又趋于硬化。该结果说明软土在受剪过程中如果有较好的排水条件，仍然是以应变硬化为主要规律，且在土体处于正常固结状态时没有明显的强度衰减。

3 固结与次固结特性

土的固结是指土体的变形量随时间增长的过程，一般分为主固结(又称渗透固结)和次固结。主固结是指土体中因超静孔隙水压力逐渐消散和有效应力不断增加而引起的渗透压缩过程；而次固结是指在超静孔隙水压力基本消散后，有效压力基本稳定的条件下，因土粒表面的结合水膜蠕变及土粒结构重新排列等引起的较为缓慢的变形。因此，对时间过程而言，一般认为次固结是在主固结后期产生；而对变形机理而言，可认为次固结实际上是指主固结完成之后的蠕变变形。

3.1 e-lg t 曲线

由多级固结试验得到典型土样孔隙比与时间对数的变化过程见图 3。

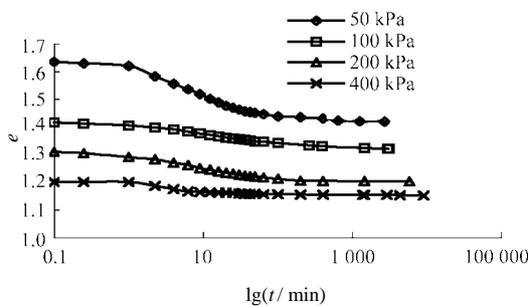


图 3 典型土样的 e-lg t 关系

Fig.3 e-lg t curves of typical samples

文[4]指出，软土固结试验所显示的 e-lg t 曲线一般为前段近似抛物线、中段为斜直线、尾部接近

水平线(如图 3 中 $p = 50 \text{ kPa}$ 所显示的线型)，由此，可认为次固结变形与时间对数基本呈线性关系，并得出次固结系数为

$$C_a = -\Delta e / \left(\lg \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (1)$$

式中： Δe 为次固结阶段的孔隙比变化； t_1 为主固结完成时刻，也被认为是主、次固结的分界时刻(由竖向压力 $p = 50 \text{ kPa}$ 的试验结果可确定相应的主次固结的比例分别为 88.7% 和 11.3%)； t_2 为次固结量的计算时刻。

式(1)及所描述的线型被广泛认可，并被列入土工试验规程^[5]，根据此式，次固结系数与固结压力无关。

但由图 3 可知，不同固结压力作用下的 $e-\lg t$ 曲线并不是相互平行的，随着压力的增加($p = 100, 200, 400 \text{ kPa}$)，次固结变形在总变形中所占的比例越来越大，使得试验曲线的下半段同时包括主固结和次固结，从而导致主次固结的划分越来越不明显，此时仍然采用式(1)所示的时间对数法来确定次固结系数显然不够准确。

3.2 固结系数变化特征

文[6, 7]指出，软土的固结系数在压缩过程中并不是一个常数，而与固结压力有关，本次试验进一步证明了这一点。图 4 所示为采用原状土样所确定的固结系数与压力关系，结果表明固结系数的变化范围为 $0.6 \times 10^{-4} \sim 16.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{s}$ ，并与固结压力有较好的相关性。

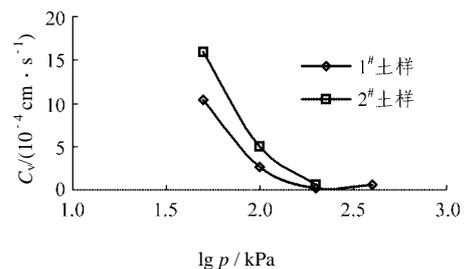


图 4 固结系数与固结压力关系

Fig.4 Relationships of consolidation coefficient vs. consolidation pressure

将图 4 所示曲线用二项式拟合，可得：

1#土样：

$$C_v = 22.5 \lg^2 p + 107.2 \lg p + 127.5$$

2#土样：

$$C_v = 37.0 \lg^2 p + 169.3 \lg p + 200.0$$

式中试验常数项可在一定程度上反映土体的特

性。

3.3 次固结系数变化特征

式(1)所示的次固结系数计算方法没有考虑固结压力对次固结系数的影响, 试验结果却表明这种影响是存在的, 文[8]的研究成果也持同样观点。图 5 所示为典型原状土样(灰黑色淤泥)次固结系数与固结压力的关系曲线, 显然, 次固结系数不仅随固结压力的变化而变化, 而且具有一定的规律性: 当压力小于 100 kPa 时, 次固结系数随压力的增大而增大; 当压力大于 100 kPa 时, 次固结系数随压力的增大而减小, 并近似达到一稳定值。进一步的试验结果表明, 对于具有一定埋深的土样(本次试验表明深于 10.0 m), 次固结系数变化的幅度有一定的差距, 但在总体趋势上比较一致。

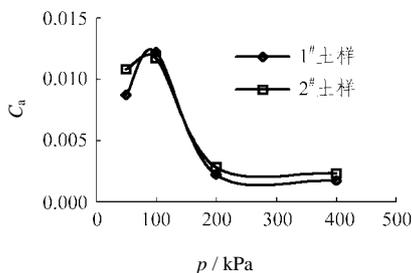


图 5 次固结系数与固结压力关系

Fig.5 Relationships of secondary consolidation coefficient vs. consolidation pressure

根据对试样先期固结压力的确定, 可以推测, 次固结系数其实与应力历史有关, 或者说与超固结比 OCR 有关: 当荷载小于先期固结压力时, 随着荷载的增大, 次固结系数有递增的趋势, 并在 OCR 接近于 1 时达到峰值; 而当荷载大于先期固结压力后, 土样处于正常固结状态, 此时次固结系数与压力基本无关, 可视作常数。

因此, 在分析软土次固结特性时, 必须首先确定土体的固结状态, 很多学者得出的次固结系数与压力无关的结论一般只适用于正常固结土。

另外, 由试验结果还可确定, 次固结系数与压缩指数之比 C_a / C_c 是一个常数, 其值为 0.027 ~ 0.037。此结果与文[9]的分析相吻合, 所反映的规律可为 C_a 值的确定提供新的途径。

4 蠕变特性

土的蠕变特性是土体变形时效特性的最典型反应之一, 从宏观上描述的软土蠕变现象与其他材料有许多相似之处, 不同之处在于蠕变变形受固结特

性的影响, 因此, 分析蠕变变形时必须考虑土体的渗透性和孔隙水压力的消散。

根据土体蠕变变形机理, 土体的蠕变既可在排水条件下产生, 也可在不排水条件下产生。排水蠕变包括剪应变和体积应变两部分, 产生于有效应力为常数的条件下, 不排水蠕变只有剪应变, 产生于常体积和恒定总应力的条件。因此, 土体的蠕变和次固结并非如有些学者认为的总是同一种变形特性: 次固结只是排水蠕变的一部分; 而蠕变是指“在恒定应力作用下, 应变随时间增长”的一个总体现象, 比次固结的内涵更广。

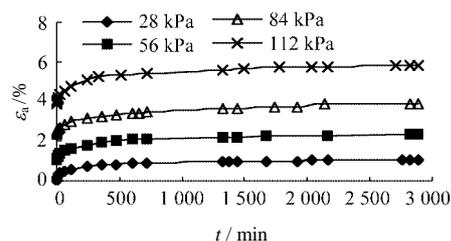
为比较软土的排水蠕变和不排水蠕变特征, 分别采用重塑土和原状土进行了三轴蠕变试验和直剪蠕变试验。

4.1 三轴蠕变试验结果及分析

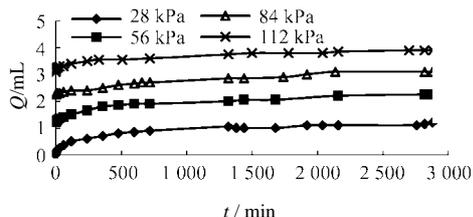
三轴蠕变试验采用重塑土样, 以便能够进行足够的平行试验而获得所需的对比资料。

(1) 排水条件对蠕变变形的影响

为分析排水条件对蠕变变形的影响以及土体的固结蠕变耦合效应, 试验中分别作了不同条件下的排水和不排水蠕变对比试验。其中排水蠕变在试验过程中始终保持充分的排水条件, 以保证孔隙水压力在偏应力施加前后均为零; 不排水蠕变则在施加围压和轴向压力的过程中严格控制排水。两种排水条件下得到的典型土样(含水量为 $w = 64\%$ 、加荷时间间隔为 $\Delta F_i / 48 \text{ h}$, $\Delta F_i = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / 4$, $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 为不排水强度)的蠕变特征见图 6 ~ 7。



(a) 轴向应变 ϵ_a 与时间 t 关系



(b) 排水量 Q 与时间 t 关系

图 6 排水蠕变特征曲线

Fig.6 Characteristic curves of drained creep

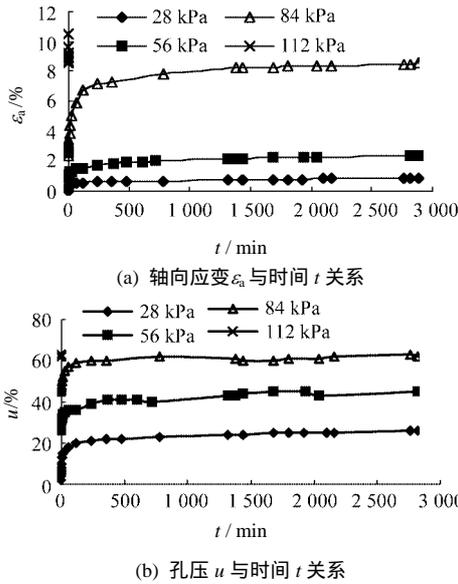


图 7 不排水蠕变特征曲线

Fig.7 Characteristic curves of undrained creep

由图 6, 7 可知, 在含水量相同、加荷条件相同的情况下, 如果土样具有很好的排水条件, 则在荷载较小时土体的蠕变变形特征并不明显(图 6(a)), 土样的轴向应变主要产生于土体中水量的排出(图 6(b)), 且随着偏应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) 的均匀增加, 土样的轴向应变也均匀增加, 并在第 4 级荷载施加后仍然保持稳定。但是如果土体不具备必要的排水条件, 土体的变形则完全来自体积不发生变化的剪切应变, 包括瞬时变形和蠕变变形。如果施加的偏应力比较小, 土体的两部分变形(图 7(a))和相应的孔隙水压力(图 7(b))虽然会随着荷载的增加而增加, 但总的来说都比较小; 如果偏应力达到某一值(图 7(a)显示为 84 kPa), 土体的蠕变变形会明显增加, 继而随着土体的再加荷, 土样发生破坏。

因此, 土体的蠕变特性和蠕变破坏是与排水条件密切相关的。当土体具有充分的固结条件、且荷载小于不排水强度时, 土体的蠕变变形都是可以忽略的; 而在没有排水条件时, 同样的荷载却可能导致土体的蠕变破坏。

(2) 含水量对蠕变变形的影响

为分析土体含水量对蠕变特性的影响, 试验中采用同样的加荷时间间隔(2 d)对不同的含水量作了对比试验, 结果见图 8。

由图 8 可知, 虽然从总体上看, 土体的轴向应变会随着含水量的增加而增加, 但无论是排水蠕变还是不排水蠕变, 土体的蠕变特性都只有在含水量较大时才有比较明显的特征。

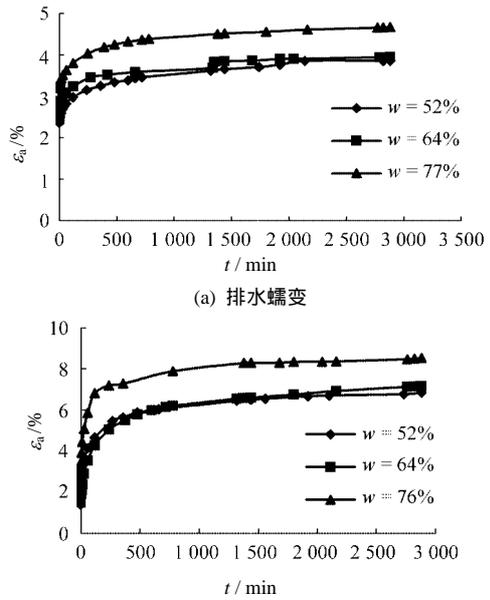


图 8 含水量对蠕变特性的影响

Fig.8 Influence of water content upon creep deformation

(3) 加荷速率对蠕变变形的影响

图 9 为土样在相同条件下 ($w = 77\%$, $(\sigma_1 - \sigma_3) = 84 \text{ kPa}$) 采用不同加荷时间间隔的试验结果。结果表明, 当土体具备良好的排水和变形稳定的前提下, 同一级荷载加荷历时越长, 土样的固结变形越明显。而当土样没有排水条件时, 加荷速率愈大, 剪切变形愈明显, 土样破坏的可能也愈大。

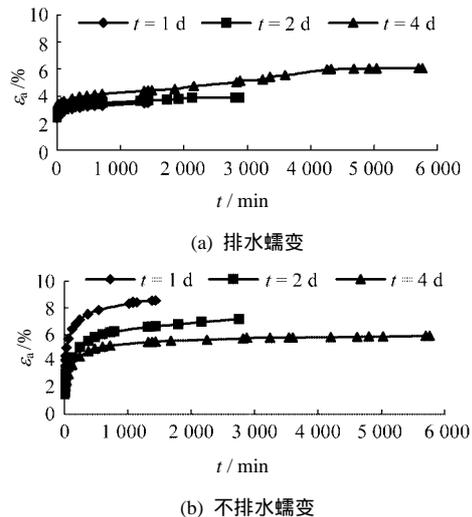


图 9 加荷速率对蠕变变形的影响

Fig.9 Influence of loading rate upon creep deformation

4.2 直剪蠕变试验结果及分析

直剪蠕变试验采用原状土样, 试验前先进行常规慢剪试验, 以确定土样在不同固结压力下的排水强度(峰值强度 τ_f), 然后根据式 τ_f / N 确定各土样在

不同固结压力下蠕变试验的各级荷载,其中 N 为加荷级数,试验中取为 6^[10]。图 10 所示为典型土样的部分试验结果。

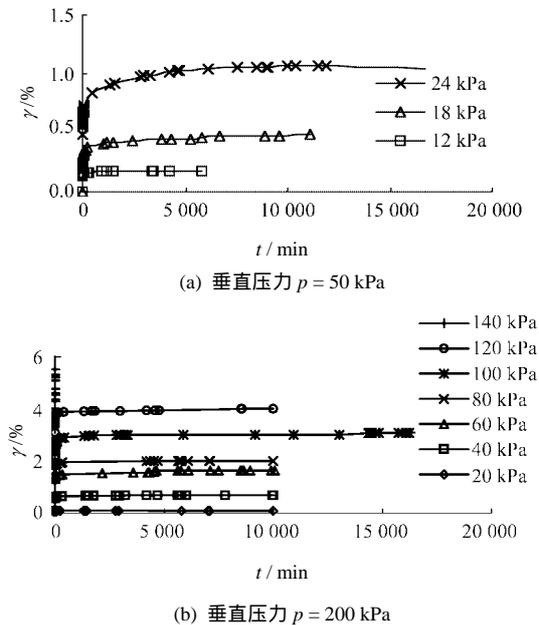


图 10 直剪蠕变试验成果

Fig.10 Results of direct shear creep test

由图 10(a)可知,当土样的固结压力较小、剪应力接近峰值强度时($\tau = 24$ kPa),蠕变可分为非稳定蠕变阶段和稳定蠕变阶段(其中稳定阶段的应变速率趋于零),土样的变形总量包括瞬时变形和蠕变变形,瞬时变形具有应变硬化特征,可以采用 Duncan 模型计算,蠕变变形可采用相应的蠕变模型分析^[11]。当土样的固结压力较大时(图 10(b)),土样在总变形中实际只有瞬时变形,其后蠕变速率为零。

因此,当土体具有良好的排水条件和较大的固结压力时,土体的蠕变效应可以被固结效应弱化,总变形可以在固结过程中基本完成,这一特性给出了降低土体蠕变、减小工后沉降的技术路径。

5 结 语

本文所进行的软土变形时效特性试验成果表明:

(1) 所试验软土的应力-应变特性具有典型的加工硬化特征,但应力-应变关系受初始固结度影响;

(2) 剪切过程中排水条件越好,土样的屈服越延后,即良好的排水可以提高土体的屈服界限;

(3) 次固结系数与固结压力和应力历史有关,

只有当土体为正常固结土时才可将近次固结系数近似视为常数;

(4) 次固结系数与压缩指数之比 C_a / C_c 是一个常数,其值在 0.027 ~ 0.037 之间,这一结果所反映的规律可为 C_a 值的确定提供新的途径;

(5) 土体的蠕变与土体的次固结只有在排水剪切中才是指同一种变形特性,而在一般的情况下,蠕变具有比次固结更广泛的含义;

(6) 蠕变虽然是软土的固有特性,但是在土体具有良好排水条件、或土体的含水量较小、或土体的固结压力较大时,蠕变变形都可在一定程度上忽略,以此简化计算是可行的;

(7) 降低加荷速率是减小土体变形的时效特性和提高土体稳定性的有效措施,实际工程中可以在工程进度约束下根据土体的变形特性确定最优加荷速率。

致谢 参加本项目试验研究的还有程小俊、黄丽娟、吴煌峰、周秋娟等,在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 陈晓平,白世伟. 软土蠕变-固结特性及计算模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 728-734.(Chen Xiaoping, Bai Shiwei. Research on creep-consolidation characteristics and calculating model of soft soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 728-734.(in Chinese))
- [2] 张惠明,徐玉胜,曾巧玲. 深圳软土变形特性与工后沉降[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 509-514.(Zhang Huiming, Xu Yusheng, Zeng Qiaoling. Deformation behavior of Shenzhen soft clay and post-construction settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 509-514.(in Chinese))
- [3] 温耀霖, 潘 健, 吴湘兴. 珠江三角洲软土的微观结构与力学特性[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 1995, 23(1): 144-152.(Wen Yaolin, Pan Jian, Wu Xiangxing. The microstructure and the mechanical characteristics of the soft soil in the Pearl River Delta[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science), 1995, 23(1): 144-152.(in Chinese))
- [4] Bjerrum L. Embankments on soft ground[A]. In: Proceedings of the Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-supported Structures[C]. [s. l.]: Purdue University, ASCE, 1972. 1-54.
- [5] 中华人民共和国行业标准编写组. 土工试验规程(SL273-1999)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(The Professional

- Standard Compilation Group of People's Republic of China. Specification of Soil Test(SL273-1999)[S]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [6] Olson R E. Settlement of embankment on soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998, 124(4): 278-288.
- [7] 马 驯. 固结系数与固结压力关系的统计分析及其研究[J]. 港口工程, 1993, (1): 46-53.(Ma Xun. Study and statistical analysis of the relationship of consolidation coefficient and consolidation pressure[J]. Port Engineering, 1993, (1): 46-53.(in Chinese))
- [8] 殷宗泽, 张海波, 朱俊高, 等. 软土的次固结[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 521-526.(Yin Zongze, Zhang Haibo, Zhu Jungao, et al. Secondary consolidation of soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(5): 521-526.(in Chinese))
- [9] Mesri, Godlewski P M. Time and stress-compressibility interrelationship[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1977, 103(5): 417-430.
- [10] 孙 钧. 岩土材料流变及其工程应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.(Sun Jun. Rheology of Rock-soil Materials and Its Application[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999.(in Chinese))
- [11] 陈晓平, 黄国怡, 梁志松. 珠江三角洲软土特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 137-141.(Chen Xiaoping, Huang Guoyi, Liang Zhisong. Study on soft soil properties of the Pearl River Delta[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 137-141.(in Chinese))

新书简介

《建(构)筑物地基基础特殊技术》一书由史佩栋主编, 人民交通出版社出版, 定价 60.00 元。

该书为编者所策划组织, 并获得中国土木工程学会支持召开的“全国首届建(构)筑物地基基础特殊技术研讨会(2004 年 12 月 7-10 日)”的论文集。该会议以建(构)筑物的纠倾、移位、增层、加载、基础托换及古建筑地基基础维护等技术为主要议题, 文集收入了特邀报告和入选论文共 55 篇。特邀报告 6 篇, 包括刘祖德的“纠偏防倾工程十五年”; 高大钊等的“建筑物纠偏工程预期目标的设定与控制”; 朱瑞赓的“一座高层危楼爆破抢险拆除后的思考”; 莫若楫(台)等的“岩土工程中不确定因素的处理”; 陈斗生(台)的“发展中都会区地盘沉陷问题浅论”; 陈永安(台)等的“台湾凤山县旧城东门段维护工程设计与施工”。论文 49 篇, 包括专题研究 1 篇, 纠倾技术 18 篇, 移位技术 5 篇, 建筑物增层改造 3 篇, 基础托换与加固 14 篇, 规范编制情况 1 篇, 遗迹土调查及其他论述 7 篇。

其中关于比萨斜塔文献研究综述、四川都江堰奎光塔的纠倾、上海某旧公房增层改造的成功范例、梧州某 10 层高楼移位、某基坑异形桩托换、良渚遗迹土调查等文为各专题之代表作。在卷首语中阐述了本领域国内外科技发展概况。本书基本反映了我国各地含港台地区在建(构)筑物纠倾、移位、增层加载、基础托换及古建筑地基基础修复技术领域长期来所积累的工程经验和所达到的科技水平。本书可供建筑行业从事此类特殊技术的设计施工技术人员、房地产业相关技术管理人员、历史文物保护相关人员、高等院校、科研院所相关教师、研究生、研究人员等学习参考。