

至于对于该权函数次数的最优选择将进一步专门研究。

5 结 论

本文提出了求解力学问题的新型无网格法-IMLS 方形域方法的概念、计算公式以及其算例应用。在数值计算时采用一种有效的无网格离散模型, 这种模型只需在域内和边界上布置一些节点, 数值积分格式毋需单元或网格, 仅需在形成 IMLS 试探函数的影响域, 数值积分在影响域中进行。由算例的结果可以看出: 由于移动最小二乘插值试函数有插值性质, 因此可以满足 Dirichlet 边界条件, 从而减少了未知量个数。该方法具有独特的积分结构, 避免了计算中 Cell 积分网格的划分。此外, 算例的计算结果都有很好的精度。文中的方法及算例初步显示了它的适用性与合理性, 计算中权函数次数的最优选取、节点域内或边界配置以及优化数值积分格式等问题都需开展进一步研究。

参考文献:

- [1] 曹国金, 姜弘道. 无单元法研究和应用的现状及动态[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 526 - 534. (CAO Guo-jin, JIANG Hong-dao. Current study, application and development trend of meshless method [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(4): 526 - 534.)
- [2] 周小平, 周瑞忠. 无单元法研究现状及展望[J]. 工程力学, 2005, 22(1): 12 - 20. (ZHOU Xiao-ping, ZHOU Rui-zhong. Current study and development of Element-free Galerkin method [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(1): 12 - 20.)
- [3] NAYROLES B, TOUZOT G, VILLON P. Generalizing the finite element method: diffuse approximation and diffuse elements [J]. Computational Mechanics, 1992, 10: 307 - 318.
- [4] BELYTSCHKO T, LU Y Y, GU L. Element-free Galerkin methods [J]. Int J for Num Methods in Eng, 1994, 37: 229 - 256.
- [5] ATLURI S N, CHO J Y, KIM H G. Analysis of thin beams, using the meshless local Petrov-Galerkin method, with generalized moving least squares interpolation [J]. Comput Mech, 1999, 24: 334 - 347.
- [6] DE S, BATHE K J. The method of finite spheres [J]. Computational Mechanics, 2000, 35: 329 - 345.
- [7] DE S, BATHE K J. On the method of finite spheres in applications towards the use with ADINA and in a surgical simulator [J]. Computational Mechanics, 2003, 31: 27 - 37.
- [8] SHEPARD D. A two-dimensional interpolation function for irregular spaced data [J]. A C M Nat Conf, 1968: 517 - 524.
- [9] 张延军, 王恩志, 王思敬. 无网格伽辽金法求解固结方程的数值误差分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3117 - 3121. (ZHANG Yan-jun, WANG En-zhi, WANG Si-jing. Numerical errors analysis for consolidation equation by element-free galerkin method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3117 - 3121.)
- [10] 张延军. 无网格法的理论研究及滑坡的渗流作用分析[R]. 北京: 清华大学, 2004. (ZHANG Yan-jun. Study on mesh free method and the analysis of slope seepage [R]. Beijing: Tsinghua University, 2004.)
- [11] 王龙甫. 弹性理论[M]. 北京: 科学出版社, 1979. (WANG Long-fu. Elastic Theory [M]. Beijing: Science Press, 1979.)

饱和软粘土的不排水循环累积变形特性

黄茂松¹, 李进军^{1, 2}, 李兴照¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002)

摘要: 在上海地区典型饱和软粘土不排水循环三轴试验的基础上, 分析了影响软粘土塑性累积变形的主要因素: 循环荷载的作用次数, 初始静偏应力和循环加载动偏应力。基于临界状态土力学理论, 引入了相对偏应力水平参数, 考虑初始静应力、循环动应力和不排水极限强度的相互影响, 研究了不同静、循环动应力组合应力历史影响下饱和软粘土的不排水循环累积变形特性。

关键词: 循环荷载; 塑性累积变形; 初始静偏应力; 动偏应力; 相对偏应力水平

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)07-0891-05

作者简介: 黄茂松(1965-), 男, 浙江玉环人, 教授, 博士生导师, 主要从事土体本构理论研究和岩土数值分析。

Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests

HUANG Mao-song¹, LI Jin-jun^{1, 2}, LI Xing-zhao¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. East China architectural Design & Research institute Co., Ltd, Shanghai 200002, China)

Abstract: A series of undrained cyclic triaxial tests were performed on a typical Shanghai soft clay. Both the initial static deviatoric stress and the cyclic stress level were analyzed varied. It was shown that the cumulative plastic strain depended not only on the applied cyclic stress and number of cycles, but also on the initial static deviatoric stress level. Based on the concept of critical state soil mechanics, a new parameter called relative deviatoric stress level was introduced considering the effects of initial static deviatoric stress, cyclic deviatoric stress and undrained deviatoric stress at failure. The cumulative plastic strain was found to be closely related to this parameter.

Key words: cyclic loading; cumulative plastic strain; initial static deviator stress; cyclic shear stress; relative deviator stress level

0 前言

长期循环荷载作用下软粘土的沉降计算是软土工程的一个重要问题, 特别是对于东南沿海一带深厚软粘土地质条件。国内外的实测资料表明, 在长期的循环荷载作用下软粘土地基会产生较大的附加沉降。日本道路协会对交通荷载作用下低路基软土地基的沉降进行实测^[1], 对比低路堤施工期间和开放交通期的不同位置沉降仪实测结果, 由于开放交通产生的附加沉降达到 10~15 cm, 约为道路建设期间沉降量的一半, 如图 1 所示^[2]。Miura 等^[3]通过实测发现 Saga 机场道路由于 2 a 的交通荷载作用产生的附加沉降达到了 15 cm 左右。在国内, 公路交通工程和地铁隧道建设中也监测到相同的现象。凌建明等^[4]对上海市外环线北翟路口交通开放后 2 a 的实测表明, 道路路面残余变形达到 9~10 cm; 某地铁隧道的长期沉降监测资料表明^[5]: 在地铁建设的 2 a 时间, 实测的绝大部分沉降点的总沉降量很小, 但地铁试运行之后, 沉降速率急剧

加大, 沉降不断加大。

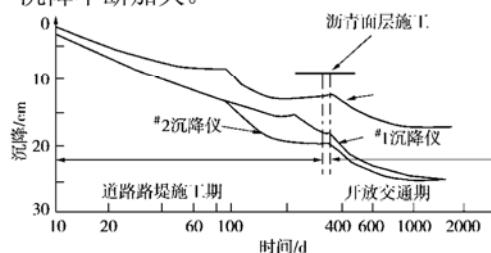


图 1 开放交通引起低路基软土地基附加沉降曲线^[2]

Fig. 1 Traffic-load-induced settlement curves of a low embankment of road on soft subsoil

国内外学者对交通荷载下的长期沉降进行了很多研究。通常的研究软粘土长期残余变形的的方法有两种: 一种是建立较为复杂的软粘土本构模型, 来模拟循环过程的每一个循环, 如王建华等^[6]、钟辉虹等^[7]分别

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10272083); 上海市曙光计划项目(02SG17); 教育部高等学校博士点基金资助项目(20030247005)

收稿日期: 2005-08-10

采用基于运动硬化的套叠屈服面模型和各向同性弹塑性边界模型来模拟软粘土不排水条件下受循环荷载作用的累积残余变形规律。这种方法对于计算循环次数达到十万、百万次时,计算量很大,工程应用有较大难度。另一种方法是经验拟合法,建立土体残余变形与土的初始固结特性、静应力状态、动应力及循环次数的关系的拟合曲线。最常用的模型是 Monismith 提出的指数模型^[8],得出软粘土的塑性应变与循环次数的关系,但由于没有考虑初始静应力和循环动应力的影响,参数取值的离散性大,计算结果往往与实测的误差较大。Li 和 Selig^[9]考虑土体的类型和物理状态的影响,引进土体的静强度参数,通过室内试验的结果对指数模型进行改进。Chai 和 Miura^[10]又在 Li 和 Selig 的模型基础上,考虑到土体的初始静偏应力,提出了一种新的指数经验公式模型,用来预测软粘土上低路堤在交通荷载作用下的沉降。另外,许多研究者通过室内三轴试验的结果分析软粘土的残余变形特性。Sakai 和 Miura^[11]在 Ariake 未扰动软粘土的三轴循环试验结果的基础上,提出了一个模拟不同围压下软粘土部分排水特性的模型。Hyodo 和 Yasuhara^[12]通过对高塑性海积粘土的不排水三轴试验结果的整理,引入相对循环强度和有效应力空间位置的两个应力参数,采用经验模型模拟软粘土循环加载产生的孔隙水压力和消散过程。蒋军^[13]通过饱和软粘土的一维循环压缩试验,建立了排水条件下粘性土一维循环残余变形的计算模式。

前人的研究结果重点分析了软粘土的动应力大小和循环次数对变形的影响,而在实际工程中,土体初始静偏应力对于软粘土的循环加载特性影响很大。Chai 和 Miura 的修正指数模型中,虽然考虑到土体的初始静偏应力,但对初始静偏应力和动偏应力相互影响未进行分析。本文采用不同静偏应力和动偏应力的组合,对上海地区典型饱和软粘土进行一系列不排水循环三轴试验。首次基于临界状态理论,研究了不同初始静偏应力和动应力的应力历史综合影响下饱和软粘土不排水循环累积变形特性。

1 循环三轴试验

1.1 试验方案

本文的循环三轴试验为固结不排水循环三轴试验,试验土样取自上海第④标准层的灰色淤泥质粘土。该土层属于高压缩性、高灵敏性、低强度、低渗透性的软粘土,是上海地铁一号线区间隧道的主要压缩层。循环三轴土样的直径 39.1 mm,高 80 mm,使用 CSS-2901TS 型土体三轴流变试验机,采用单向等幅应力

控制循环加载方式。循环加载选用三角形波形模拟交通荷载,本试验加载频率取 0.5 Hz 进行循环三轴试验。

考虑静偏应力的影响可以有两种试验方案,一种方案是在完全排水条件下施加静偏应力,这样在循环加载前静偏应力完全转化为有效应力,相当于地基土在静偏应力作用下已经完全固结的情况;另一种方案是在完全不排水条件下施加静偏应力,这样相当于地基土在施加静偏应力不久即施加动应力。值得注意的是实际情况是介于这两种排水条件之间。本文采用第二种试验方案,具体试验步骤如下:首先将试样抽气饱和,然后施加围压,分别采用 $p_c = 100$ kPa 和 200 kPa 两种围压,并在指定的围压下排水固结 48 h;然后在不排水条件下施加不同的静偏应力,分别采用静偏压比为 $\eta_s = 0.2$ 、0.25、0.5,最后,进行不同循环应力比的三轴循环试验,分别选用循环动应力比为 $\eta_d = 0.5$ 、0.25、0.2,循环次数为 10000 次。

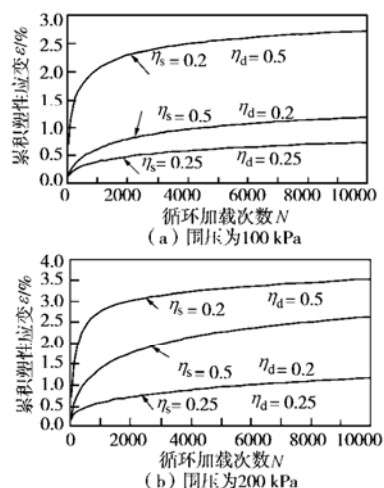


图2 累积塑性应变随加载次数变化曲线

Fig. 2 Variations of plastic strain with number of cycles

1.2 循环三轴试验结果

图2为循环三轴试验得到两组试验的累积塑性应变随加载次数变化的曲线。由曲线的变化结果可以看出,在循环加载 10000 次所测得累积塑性应变随加载次数均呈指数增长规律变化,与前人研究的结果相同。曲线同时表明:由于初始静偏应力不同,对循环动偏应力加载结果产生影响,循环动应力大而初始静偏应力小得出的轴向累积塑性应变可能反而小。同时,围压为 100 kPa 和 200 kPa 表现出相同的规律。图3为循环三轴试验得到两组试验的累积孔压随加载次数变化的曲线。曲线表明:孔压的累积也表现出和累积塑性应变相同的规律。图3(b)表明:围压为 200 kPa 时,由于静偏应力的影响,动应力比 $\eta_d = 0.25$ 加载下累积孔压的发展反而小于动应力比 $\eta_d = 0.2$ 的加载情况。围压为 100 kPa 时也表现出类似的规律。本文侧

重于分析累积变形的发展规律, 对于孔压发展规律将另文分析。

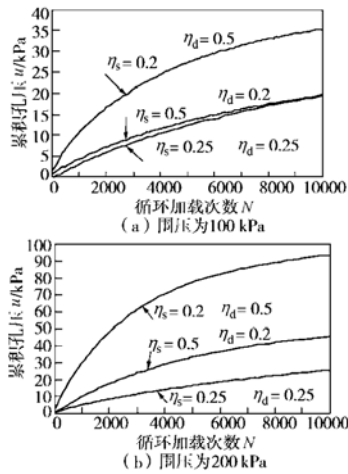


图3 累积孔压随加载次数变化曲线

Fig. 3 Variations of pore-pressure with number of cycles

循环三轴试验结果表明软粘土不排水循环加载的塑性累积变形不仅和加载大小、加载历时和加载次数有关, 还要考虑初始静偏应力加载的应力历史等因素。本文的试验结果对于研究车辆荷载作用下饱和软粘土填土路基变形的工程问题显得十分有意义。在计算路基变形时, 不仅要考虑车辆动荷载大小, 也要考虑施工期间填土路基堆载的静偏应力作用、动应力和静偏应力相互作用对长期沉降结果的影响。因此, 研究初始偏应力水平和动应力水平影响的饱和软粘土塑性累积变形特性显得十分重要。

2 考虑初始静偏应力和动偏应力水平影响的累积塑性变形特性

2.1 应变速率和循环次数关系

已有的研究表明^[10], 一种合理的计算塑性累积应变的计算模型应当考虑到循环荷载的作用次数、土的类别、土的物理状态以及应力历史等因素的影响。以往的研究多基于 Monismith 提出的指数模型^[8], 如下式:

$$\varepsilon^p = AN^b \quad (1)$$

式中, ε^p 为塑性累积应变, N 为循环加载次数。上式主要说明了循环加载次数的影响, 对于其它各种影响因素的描述包含在系数 A 和 b 中, 物理意义模糊。Chai 和 Miura^[10]在式 (1) 的指数公式基础上进行了发展, 提出了修正公式, 如下式:

$$\varepsilon^p = a \left(\frac{q_d}{q_f} \right)^m \left(1 + \frac{q_s}{q_f} \right)^n N^b \quad (2)$$

式中, q_d 为动应力, q_s 为初始静偏应力, q_f 为静破坏偏应力。式 (2) 考虑了初始静偏应力的影响, 对于动

静偏应力的耦合效应也未能进行考虑。

本文参考 Parr 等^[14-15]对伦敦粘土的分析方法, 如式 (3) 所示。考虑累积塑性应变速率和循环加载次数的关系, 见图 4, 对循环三轴试验结果进行整理。

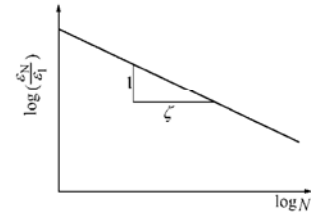


图4 应变速率和加载次数关系

Fig. 4 Relationship between strain rate and number of cycles

$$\log \left(\frac{\dot{\varepsilon}_N}{\dot{\varepsilon}_1} \right) = \log C + \zeta \log N \quad (3)$$

式中, $\dot{\varepsilon}_N$ 是 N 次循环的塑性应变速率, $\dot{\varepsilon}_1$ 是第一次循环加载的塑性应变速率, N 为循环加载次数, C 和 ζ 是试验常数, 当 $N=1$ 时, 可以得出 $C=1$ 。将 ζ 用 b 代换, 对上式进行修正:

$$\log \left(\frac{\dot{\varepsilon}_N}{\dot{\varepsilon}_1} \right) = b \log N \quad (4)$$

在式 (4) 中, 提出了第一次循环塑性应变, 将循环加载动应力大小和应力历史等因素的影响包含在第一次循环加载塑性应变中。对循环三轴试验的塑性应变进行归一化处理, 得到塑性应变速率 - 循环次数的线性关系公式。图 5 是对两组围压下不排水循环三轴试验结果的整理, 塑性应变速率 - 加载次数的双对数曲线表现为线性关系, 和 Parr 等^[14-15]得到的结论相同。采用 Matlab 程序的最小二乘法曲线拟合工具对 6 条直线进行线性拟合, 得到的试验常数斜率 b 为 -0.5928 ~ -0.6924。可以看出, 归一化的拟合曲线表现出很好的线性规律, 拟合曲线的试验常数斜率 b 基本一致。忽略试验中不确定因素的影响, 6 条直线可以归一化为一条直线, 斜率 b 为 -0.644 左右。表明采用这种处理方法, 可以把循环加载次数和循环累积应变的关系唯一确定。

2.2 第一次循环应变与动、静偏应力水平的关系

上述试验数据可以看出, 无论围压、静偏应力比和动应力比大小的变化, 采用第一次循环塑性应变归一化后, 软粘土的不排水循环三轴试验应变速率和循环加载的双对数曲线均存在基本一致的线性关系。表明了第一次加载塑性应变包含了围压、动应力大小和应力历史等因素。因此, 第一次循环塑性应变 ε_1 是围压 p_c 、静偏应力 q_s 和动应力 q_d 的函数, 可以用下式表示:

$$\varepsilon_1 = F(p_c, q_s, q_d) \quad (5)$$

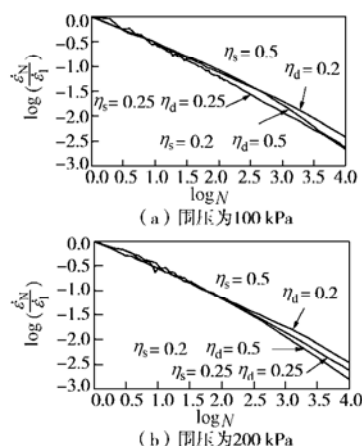


图5 塑性应变率随加载次数变化曲线

Fig. 5 Variations of plastic strain rate with number of cycles

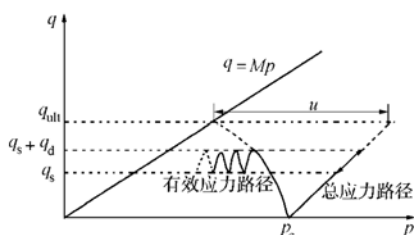


图6 不排水循环加载应力路径示意图

Fig. 6 Stress path in undrained cyclic triaxial test

这些因素对第一次循环塑性应变大小影响对于软粘土的循环加载特性十分重要。图6是不排水循环三轴试验的应力路径示意图, 为了对加载路径应力点的位置进行描述, 基于临界状态理论, 引入偏应力水平, 如下式表示:

$$D = q/q_{ult} \quad (6)$$

式中, D 为偏应力水平, $q = \sigma_1 - \sigma_3$ 为偏应力, q_{ult} 为不排水破坏强度或极限强度, 在图6中表示为不排水应力路径和临界状态线的交点的偏应力大小。用修正剑桥模型理论可以推导出 q_{ult} 的表达式, 如下式表示:

$$q_{ult} = \left(\frac{1}{2}\right)^{1-\frac{\kappa}{\lambda}} M p_c \quad (7)$$

式中, p_c 为前期固结压力, λ 、 κ 分别为 $e - \ln p$ 空间中正常固结线和回弹线斜率, M 为修正剑桥模型的临界状态线斜率。通过式(6)可以分别定义出不排水循环三轴试验中的静偏应力水平 $D_s = q_s/q_{ult}$ 、动偏应力水平 $D_d = q_d/q_{ult}$ 和峰值偏应力水平 $D_p = (q_d + q_s)/q_{ult}$ 。对于式(6)中的修正剑桥模型参数, 选用袁聚云^[16]对上海淤泥质软土的试验结果确定的参数, $\kappa = 0.03$, $\lambda = 0.13$, $M = 1.49$ 计算出不排水破坏强度 q_{ult} , 得出不同的偏应力水平。对不排水循环三轴试验累积塑性变形整理, 图7为第一次循环塑性应变 ε_1 随着动偏应力水平 D_d 的变化曲线。

图7中可以看出: 第一次循环塑性应变受到静偏应力水平的影响, 因此无法得到第一次循环塑性应变

随动偏应力水平变化的一致规律。要合理地分析不同初始静偏应力下软粘土的循环累积变形特性, 必须综合考虑静偏应力水平和动偏应力水平的相互影响。

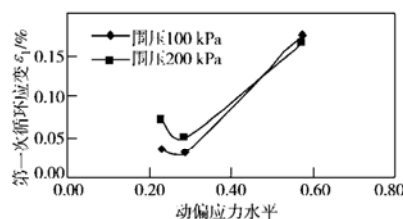


图7 第一次循环塑性应变随动偏应力水平变化

Fig. 7 Variations of plastic strain of first cycle with cyclic deviatoric stress level

为了综合考虑静偏应力和动偏应力水平的影响, 本文提出了相对偏应力水平 D^* 的概念

$$D^* = \frac{D_p - D_s}{D_{max} - D_s} \quad (8)$$

式中, D_{max} 为可能达到的最大偏应力水平, 即 $D_{max} = 1$ 。相对偏应力水平参数描述了当前土体的动偏应力水平, 同时考虑了土体静应力水平和不排水极限强度的大小。采用相对偏应力水平进行试验数据的整理, 图8为相对偏应力水平和第一段循环应变的关系曲线。可以看出, 随着相对偏应力水平 D^* 的增大, 第一次循环塑性应变 ε_1 表现出非线性单调增大的规律。采用相对偏应力水平 D^* 可以考虑 D_s 、 D_d 或 D_p 的综合影响, 第一次塑性循环应变和相对偏应力水平表现出合理的归一化。但同时可以看出, 虽然相对偏应力水平参数中包含了围压的影响, 对于不同围压的影响的归一化还需要进一步工作。

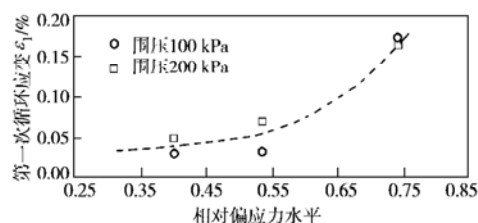


图8 第一次循环塑性应变随相对偏应力水平变化

Fig. 8 Variations of plastic strain of first cycle with relative deviatoric stress level

3 结 论

通过对不同静偏应力和动应力组合情况下上海典型饱和软粘土不排水循环三轴试验, 分析了循环荷载的作用次数、初始静偏应力和动偏应力等因素对饱和和软粘土塑性累积变形的影响, 得出以下结论。

(1) 软粘土不排水循环加载的塑性累积变形不仅和动应力加载大小、加载历时和加载次数有关, 还要