

近邻地铁隧道深基坑的流变效应研究

付艳斌^{1, 2}, 杨志银³

(1. 深圳大学土木工程学院, 广东 深圳 518060; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 深圳治建院建筑技术有限公司, 广东 深圳 518054)

摘要: 利用室内三轴蠕变试验结果, 分析和研究了上海软黏土不同应力下的变形时间效应。试验表明, 在弹性范围内软土可以用五元件黏弹性模型进行模拟。将建立的黏弹性元件模型应用到近邻地铁的深基坑开挖, 分析了基坑支护结构倾斜、墙间留土与不留土流变速率的影响以及隧道不均匀沉降的规律, 并与实测数据进行了对比。结论表明五元件黏弹性模型可以模拟软土深基坑的开挖流变效应。

关键词: 流变; 软土; 元件模型; 黏弹性

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-0834-05

作者简介: 付艳斌(1977-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土工程、隧道及地下工程的教学与科研工作。E-mail: fuyanbin999@163.com。

Rheological effects of deep foundation pits near metro tunnels

FU Yan-bin^{1, 2}, YANG Zhi-yin³

(1. College of Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Education Ministry of Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Jingye Engineering Corporation Limited Company, Shenzhen 518054, China)

Abstract: The time-dependent properties of Shanghai soft soils under different loadings are studied based on indoor creep tests. The tests show that the creep curve can be simulated by means of the viscoelastic model which is composed of five elements when the loading is below a certain load limit. The creep effects of deep foundation pits are analyzed by using the viscoelastic model. The incline change of support construction by the excavation, the creep rate and non-uniform settlement of the metro tunnel are compared with the measured data. The results show that the viscoelastic model with of five elements can reflect the creep effects of deep foundation pits.

Key words: rheology; soft soil; element model; viscoelasticity

0 引言

地铁的建设带动了沿线地区房地产开发的高潮, 在隧道附近形成了寸土寸金的建设局面, 随之而来的地下空间利用和深基坑开挖直接导致了临近地铁隧道的纵向变形, 有些基坑更是直接骑跨隧道之上或近邻隧道施工, 由此可能带来隧道产生不均匀变形。而软土地区近邻隧道的深基坑开挖产生的流变效应对隧道不均匀沉降的长期变形严重威胁隧道安全。

土体的变形与时间有关的现象称为土的流变现象^[1]。土体的变形不仅与应力有关, 还与时间有关。流变模型基于同时考虑土体孔隙水压力的消散和土骨架的蠕动变形, 早期研究多是将元件流变模型和固结模型串联或并联后建立组合模型如陈宗基^[2], Folque^[3], Christe^[4], 后来随着软土工程的需求, 各类新的模型不断出现, 如根据黏性土的试验成果提出基

于等效时间线的弹黏塑固结模型如Yin J H等^[5-6]、根据土体本构模型和Biot 固结理论建立的耦合模型和考虑排水条件的蠕变模型如Chen等^[7]、通过扰动状态面模型(DSC)的多功能特征和三轴试验成果建立的固结状态下的土体蠕变模型如Desai等^[8]等等。

在地铁隧道与深基坑的相互作用分析中, 刘涛^[10]采用数值模拟方法计算隧道附加纵向变形值, 应用三次样条插值对其进行拟合, 并通过曲线拟合方程计算基坑影响范围内隧道纵向变形曲率的分布, 以判别隧道纵向差异变形的敏感位置, 为基坑支护的设计提供依据。高广运等^[11]运用FLAC^{3D}软件建立三维数值分析

基金项目: 国家自然科学基金项目(51108270); 住房和城乡建设部项目(2010-k3-14); 同济大学教育部重点实验室资助项目(KLE-TJGE-B0905)

收稿日期: 2013-07-17

模型, 对基坑施工进行全过程动态模拟。提出并采用了坑外二次加固的施工新工艺, 首次指出地基加固体和地下结构物作为异质体对邻近基坑开挖产生的位移传递具有阻断作用。褚峰等^[12]考虑土体的小应变刚度特性, 建立地铁区间隧道和邻近基坑的二维有限元分析模型, 探讨土体小应变条件下超深基坑的变形特性。

鉴于基坑工程对软土隧道的不可逆性伤害, 根据严峻的地铁保护形势, 上海地铁制定了地铁工程(外边线)两侧的临近3 m范围内不得进行任何工程施工的规定。上海地铁隧道保护的主要控制标准为:

- (1) 隧道上方新增附加荷载≤20 kPa。
- (2) 隧道总位移(垂直、水平位移)≤20 mm。
- (3) 隧道曲率半径R>15000 m。
- (4) 相对弯曲曲率≤1/2500。

在上海等沿海地区软土地区, 地铁隧道的施工能有效地将地面沉降控制在(+1~-3) cm的范围内, 同时关于隧道的纵向变形及其对隧道纵横向内力、环境的影响问题日益突出。

本文利用软土室内三轴蠕变试验, 描述了各个不同时刻的应力应变关系曲线。根据室内蠕变试验, 建立了软土五元件黏弹性模型。并将黏弹性元件模型应用到近邻地铁的深基坑工程中, 重点分析了基坑工程开挖的流变效应。

1 土工试验

1.1 试验过程

为了定量地研究上海软黏土流变性态, 进行了上海软土土样的流变试验。土样试验为三轴蠕变试验。试验是通过一个土样, 施加恒载, 变形稳定后, 再施加另一级恒载, 直到新的变形稳定。这样加载, 直到土样破坏为止。通过分析土样的应力应变关系, 可以确定上海软土的流变本构模型。

图1是上海黏土三轴蠕变试验得到的应力-应变等时曲线。对土样施加某一固定不变的荷载(应力也不变), 可记录下同一应力在若干个不同时刻的应变值。当施加若干级荷载后, 就能绘制出图中各个不同时刻的应力应变关系曲线。

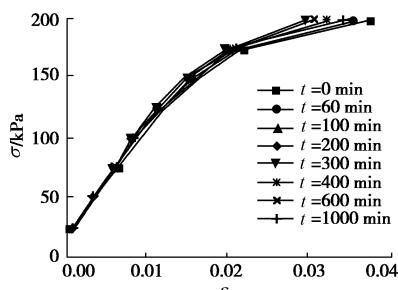


图1 流变试验的等时曲线

Fig. 1 Equitime curves of creep tests

1.2 土体弹性流变阶段的本构关系

图1所示的试验结果证明, 土样在175 kPa以下基本成线性流变。可以将175 kPa视为土样屈服点。在屈服点以下的σ-ε关系曲线基本上是一条直线, 所以可忽略弹性阶段的非线性流变。

既然弹性阶段流变只有线性部分, 故可直接用模型理论来表征。其模型可用两个Kelvin模型串联的五元件模型组合而成(见图2)。

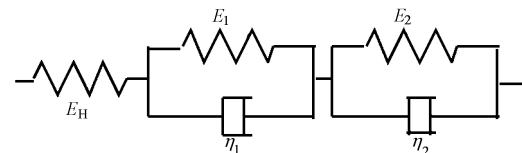


图2 五元件黏弹性模型

Fig. 2 Viscoelastic model with five elements

上述模型本构关系可以写作:

$$J_{(t)} = \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t}{\eta_1}}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t}{\eta_2}}), \quad (1)$$

式中, $J_{(t)}$ 表示蠕变柔量, E_1 , E_2 分别为二个弹簧常数; η_1 , η_2 为黏性系数, 其值可以试验结果确定, 可以由 $t=0, 60, 100, 200, 300$ min 的等时曲线确定。测出每条曲线的斜率, 将其代入方程(1), 可得以下方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{l_0} &= \frac{1}{E_H}, \\ \frac{1}{l_1} &= \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t_1}{\eta_1}}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t_1}{\eta_2}}), \\ \frac{1}{l_2} &= \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t_2}{\eta_1}}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t_2}{\eta_2}}), \\ \frac{1}{l_3} &= \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t_3}{\eta_1}}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t_3}{\eta_2}}), \\ \frac{1}{l_4} &= \frac{1}{E_H} + \frac{1}{E_1} (1 - e^{-\frac{E_1 t_4}{\eta_1}}) + \frac{1}{E_2} (1 - e^{-\frac{E_2 t_4}{\eta_2}}), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

以上方程组可用梯度法求解之得 $E_H = 15486$ kPa, $E_1 = 65843$ kPa, $E_2 = 138555$ kPa, $\eta_1 = 38560$ kPa, $\eta_2 = 11486$ kPa。

2 数值模拟

2.1 工程描述

某基坑工程位于上海市中心区域繁华地段内, 基地面积13192 m²。基坑对应地铁一号线隧道长度为南北方向, 约110 m, 东西方向长约100 m, 呈不规则形状。基坑开挖深度约14 m。基坑围护采用地下连续墙, 其中靠近地铁一侧围护结构采用1000 mm厚地下连续墙, 其余三面采用800 mm厚地下连续墙, 连续

墙入土深度一般为 34 m。基坑支撑一二三道支撑采用三道钢筋混凝土支撑体系，第四道采用 Φ609 钢管支撑（图 3）。

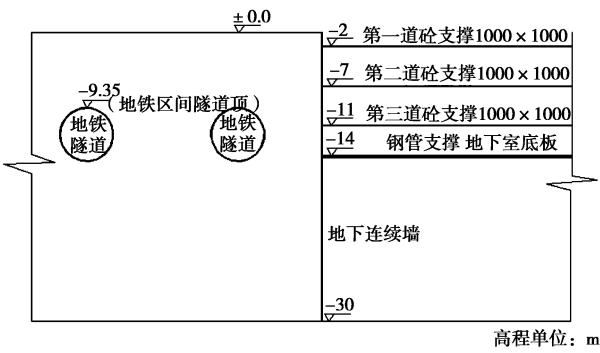


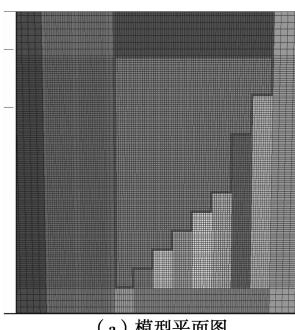
图 3 基坑开挖剖面图

Fig. 3 Section of excavation of foundation pit

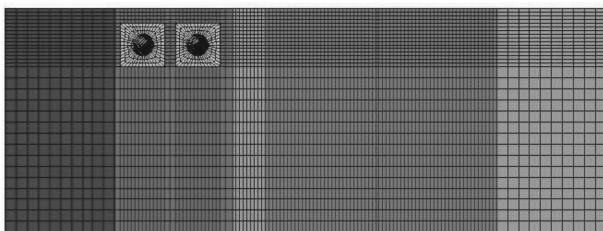
2.2 数值计算模型及边界条件

地铁隧道在宏观上主要是横向受荷的细长结构，而基坑只是在隧道局部对隧道形成卸荷作用。基坑对隧道的影响是一个典型的三维作用。本文根据工程概况，假定地铁隧道为以等效直梁模型，不考虑管片接头影响，计算模型以基坑和隧道所在外边界前后左右各取 30 m，即长 268 m，宽 164 m，深 61 m。模型有 532096 个块体单元，585230 个结点；24576 个结构单元，12384 个结构结点。其中土体和地下连续墙采用块体单元模拟，基坑内支撑和隧道管片采用结构单元模拟。模型如图 4 所示。

位移边界条件的设置。假设位移边界条件在整个有限元计算中不随时间发生变化，具体设置为：地表为自由边界条件，模型四周水平向位移限制为零，竖向自由，底部边界的竖向位移为零。



(a) 模型平面图



(b) 模型剖面图

图 4 数值计算模型

Fig. 4 Numerical simulation model

2.3 基坑开挖工况

基坑开挖工况如表 1 所示。

表 1 基坑开挖工况

Table 1 Excavation sequence of foundation pit

流变时间间隙/d	说明
0	第一层土开挖
20	第一道支撑
0	第二层土开挖
33	第二道支撑
0	第三层土开挖
32	第三道支撑
0	第四层土开挖
41	底板浇筑

2.4 计算参数选取

基坑呈不规则形状，如图 3 所示，开挖深度为 14 m。假设土体服从五元件黏弹性流变模型。围护结构全部为地下连续墙，靠近地铁隧道一侧墙体厚度为 1 m，其余为 0.8 m，视连续墙为弹性体，弹性模量为 31 GPa，泊松比为 0.2。基坑内钢筋混凝土支撑视为弹性体，弹性参数同地下连续墙。钢管支撑视为弹性体，弹性模量为 200 GPa，泊松比为 0.17。隧道视为等效连续直梁，不考虑环片接头损失，取弹性模量为 24 GPa，泊松比为 0.2。

3 数值计算和实测数据比较

3.1 连续墙侧向位移

本文重点分析基坑开挖流变效应对隧道的影响，故取靠近隧道一侧连续墙中间测点对应基坑中间，如图 2 所示进行侧向变形分析。图 5 为考虑开挖顺序连续墙侧向变形的计算和实测结果对比。

第一层土开挖，基坑仅开挖 2 m，墙体水平位移的形状和悬臂式开挖相似，由于连续墙自身刚度较大，开挖导致水平位移量小，最大位移发生在地表。见图 5 (a)。

第二层土的开挖引起连续墙的侧向变形。开挖到 -7 m 时，由于已经施加了第一道支撑。连续墙在主动土压力作用下对坑内支撑产生挤压作用，支撑对挡土墙产生反作用力，墙体变形形状和开始时完全不同，呈抛物线状。计算最大位移在 -11 m 深度处，实测最大位移在 -9 m 处。计算连续墙变形形状和实测数据基本吻合。见图 5 (b)。

采用有限元模拟表明：流变本构模型进行数值模拟，连续墙侧向变形形状和最大位移峰值位置和实测基本相符。参考隧道所在位置，可预测连续墙变形对隧道的影响并及早的采取施工对策。

3.2 流变速率的发展

考虑周边留土和不考虑周边留土时最大侧向水平位移与时间的对数关系见图 5。对于不考虑基坑周边留土, 一次性开挖时位移与时间对数基本呈直线关系。对于周边留土情况, 在前 30 d 一次性开挖第四层土中间时, 位移与时间对数也呈线性关系, 但斜率原小于不考虑留土情况。30~45 d 之间是开挖墙边留土过程, 斜率较前 30 d 更大, 显示墙边土体的开挖对基坑围护结构影响较大, 流变速率显著增大, 这也说明基坑不同区域开挖, 对围护结构倾斜敏感性不一样。越靠近基坑周边, 流变速率越大, 故在靠近基坑边缘时, 常常要求短时间限时开挖, 限时支撑。因此在实际施工中, 常常采取分段、限时、平衡、对称开挖。

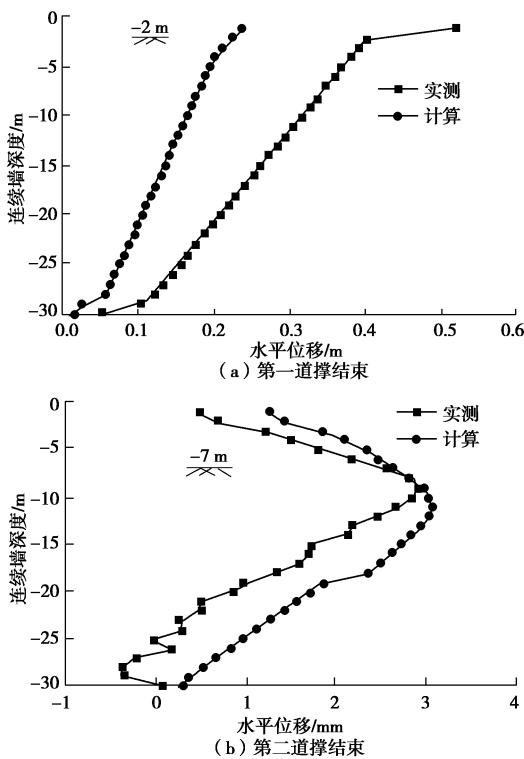


图 5 连续墙变形计算与实测值对比

Fig. 5 Comparison between calculated and measured results of diaphragm wall

从图 6 可以看出, 不考虑留土开挖, 一次性释放荷载太大, 流变速率过大。而考虑墙边留土, 可分段释放荷载, 一次性释放荷载较小从而使流变速率较小。在距离基坑边缘等对围护结构敏感的地方, 可通过分段, 限时开挖减小连续墙的倾斜。虽然考虑留土开挖增加了流变时间, 但总变形减小了一半, 有力的保证了基坑工程的安全。

3.3 隧道隆起

图 7 为靠近基坑的上行线隧道沉降计算和实测分析。计算表明, 由于基坑开挖导致连续墙的侧向卸荷

和坑底隆起导致的位移场变化, 使隧道呈显著的纵向不均匀变形特征为两端小, 中间大。随着基坑逐层开挖, 隧道沉降亦逐步增大。实测隧道变形形状也证实了这种变形特征。

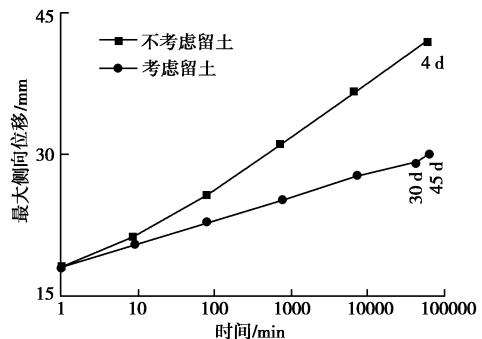


图 6 两种开挖方案的流变速率

Fig. 6 Strain rates of excavation in two schemes

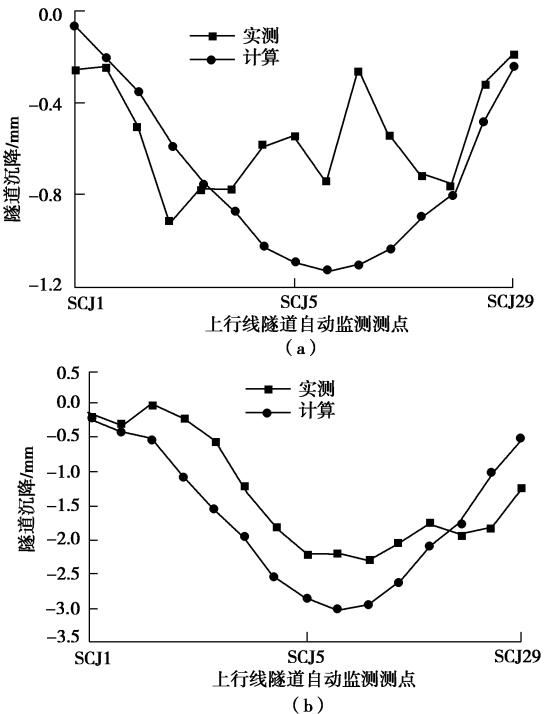


图 7 基坑开挖时隧道变形

Fig. 7 Deformations of tunnel during excavation

4 结语

本文根据室内软土三轴流变试验, 通过模型辨识确定了软土流变规律可通过五元件黏弹性模型进行描述, 并将该模型应用到近邻地铁的深基坑开挖分析中。通过对深基坑支护结构变形、流变速率的发展和隧道隆起的分析, 并和实测结果进行对比。结论表明, 五元件黏弹性模型可以较好地模拟软土深基坑开挖的流变效应。

参考文献:

- [1] 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 and soil and engineering applications[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 陈宗基. 固结及时间效应的单维问题[J]. 土木工程学报, 1958, 5(1): 1 - 10. (CHEN Zong-ji. One-dimensional question of consolidation and secondary consolidation on time-dependent[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1958, 5(1): 1 - 10. (in Chinese))
- [3] FOLQUE J. Rheology properties of compacted unsaturated soils[C]// Proceedings of 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1961.
- [4] CHRISTE I F. A re-appraisal of Merchant's contribution to the theory of consolidation[J]. Géotechnique, 1964, 14(4): 309 - 320.
- [5] YIN J H, GRAHAM J. Equivalent times and elastic visco-plastic modelling of time-dependent stress-strain behavior of clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(1): 42 - 52.
- [6] YIN J H, GRAHAM J. Elastic visco-plastic modelling of one-dimensional consolidation[J]. Géotechnique, 1996, 46(3): 515 - 527.
- [7] CHEN Xiao-ping, BAI Shi-wei, YANG Chun-he. Viscous elastic plastic consolidation model and finite element analysis for soft foundation[C]// 10th Int. Conf. on Computer Method and Advances in Geo. Tucson, 2001.
- [8] DESAI C S, SANE S. Unified constitutive models: simplified for practical applications[M]. Hong Kong: Constitutive Modelling Development, Implementation, Evaluation, and Application, 2007: 39 - 64.
- [9] 付艳斌, 朱合华, 杨 骏. 软土卸荷时效性及其孔隙水压变化试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 3244 - 3249. (FU Yan-bin, ZHU He-hua, YANG Jun. Experimental study on time-dependent properties and pore water pressure of soft soil under unloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3244 - 3249. (in Chinese))
- [10] 刘 涛. 外滩通道基坑开挖对既有隧道结构影响分析[J]. 中国市政工程, 2010(增刊 1): 138 - 141. (LIU Tao On influence analysis of foundation pit excavation to existed tunnel structure of the bund tunnel[J]. China Municipal Engineering, 2010(S1): 138 - 141. (in Chinese))
- [11] 高广运, 高 盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453 - 459. (GAO Guang-yun, GAO meng, YANG Cheng-bin, et al. The influence and control of dip excavation on deformation of Operating Metro tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453 - 459.. (in Chinese))
- [12] 褚 峰, 李永盛, 梁发云, 等. 土体小应变条件下紧邻地铁枢纽的超深基坑变形特性数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 3184 - 3192. (ZHU Feng, LI Yong-sheng, LIANG Fa-yun, et al. Numerical analysis of deformation of deep excavation adjacent to metro considering small-strain stiffness of soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3184 - 3192. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)