

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

褚峰^{1,2}, 李永盛¹, 梁发云¹, 李彦东¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海陆家嘴金融贸易区开发股份有限公司, 上海 200127)

摘要: 以上海地区一紧邻地铁枢纽的超深基坑工程为分析对象, 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。算例分析表明, 考虑土体小应变刚度特性可以显著减小超深基坑的变形, 计算结果与实际情况更为吻合。对于紧邻地铁枢纽的超深基坑, 开挖顺序对于基坑变形也有着显著影响, 在同样的计算模型下, 先开挖大基坑再开挖紧邻地铁枢纽的小基坑, 可以明显地减小超深基坑的变形, 这与上海地区已有的工程实践经验是一致的。所获得的结论对于紧邻地铁枢纽的深基坑工程设计与施工具有重要参考价值。

关键词: 基坑工程; 小应变刚度; 超深基坑; 变形; 开挖顺序; 有限元法

中图分类号: TU 470^{+.3}

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增1 - 3184 - 09

NUMERICAL ANALYSIS OF DEFORMATION OF DEEP EXCAVATION ADJACENT TO METRO CONSIDERING SMALL-STRAIN STIFFNESS OF SOIL

CHU Feng^{1, 2}, LI Yongsheng¹, LIANG Fayun¹, LI Yandong¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Lujiazui Finance and Trade Zone Development Co., Ltd., Shanghai 200127, China)

Abstract: Based on a case of deep excavation adjacent to metro station in Shanghai City, a two-dimensional finite element model to analyze this typical problem is proposed. Small-strain stiffness of soil is considered to investigate the deformation characteristics of deep pit excavation adjacent to metro station. The calculation data show that the deflection of retaining wall is obviously reduced when the small-strain stiffness of soil is considered in numerical analysis. And it is much close to the observed results. As for the deep pit excavation adjacent to metro station, the excavation sequences have obvious influences on the deformations of retaining wall. Numerical results also show that excavating big parts of the pit foundations firstly can reduce the deformation of retaining wall effectively than that of excavating small parts in advance. The results are consistent with the practical experiences in Shanghai area. The conclusions have some instructions for the designs and constructions of similar engineering.

Key words: pit foundations; small-strain stiffness; super-deep pit foundation; deformation; excavation sequences; finite element method(FEM)

收稿日期: 2009 - 12 - 26; **修回日期:** 2010 - 03 - 21

基金项目: 上海市科技攻关计划重点项目资助(09231200900); 上海市教育委员会科研创新重点项目资助(10ZZ24)

作者简介: 褚峰(1980 -), 男, 2006年于同济大学获岩土工程专业硕士学位, 现为博士研究生, 主要从事桩基础、深基坑工程等方面的研究工作。

E-mail: chufeng@ljz.com.cn

1 引言

目前, 岩土工程设计采用的指标通常是由常规试验得出的, 将常规试验得到的物理力学指标应用于小应变条件下的变形计算, 其结果会明显偏大。因此, 岩土工程变形计算时采用与土体实际应变范围相适应的土性指标非常必要。实测数据表明, 工作荷载作用下重要建筑物基础和深基坑周围的土体通常处于小应变状态, 其应变主要集中在 0.01%~0.1%之间, 一般不超过 0.3%^[1]。J. H. Atkinson 和 G. Sallfors^[2]将土体应变定义为 3 个范围: 非常小应变($\leq 0.001\%$)、小应变(0.001%~1%)以及大应变($> 1\%$), 高精度的小应变试验揭示了小应变区域内土体刚度随着应变的增加而发生剧烈衰减, 有代表性的现象是应变为 1%时所对应的刚度比其最大刚度要小一个数量级, 并随着应变的增大而持续减小直至破坏。

小应变条件下土体特性的研究在最近 20 a 来才受到较多的重视, 目前对其了解还很有限。受试验条件的限制, 工程界很少注意土体小应变刚度对预测变形的重要性, 实践中通常以常规室内试验来确定土体刚度, 这种用破坏状态下的土性指标来反映小应变条件下的土体特性, 常常使得土的力学性质被严重低估^[3]。考虑小应变区域内土体刚度特性对正确预测地下结构周围的土体变形有着重要作用, 特别是位于繁华闹市区的深基坑工程, 出于周边环境保护的需要, 对变形控制有着严格的要求, 例如上海地铁对于一级基坑的地面最大沉降量及围护墙水平位移控制要求分别为 $0.10\%H$ 和 $0.14\%H$ (H 为开挖深度)^[4]。在变形控制要求如此高的条件下, 即便是在软土地区, 地下结构周围的土体也是明显地处于小应变状态。

目前在岩土工程设计所采用的指标通常是由常规试验得出的, 常规试验精度一般只能测出 1% 以后的应变值, 将常规试验得到的物理力学指标应用于小应变条件下的变形计算, 其计算结果会明显偏大, 不得不采取保守的工程措施来满足设计要求。因此, 采用与土体实际应变范围相适应的物理力学指标计算变形是非常必要的^[5]。

土体小应变特性的研究近年来取得了显著的进展, 刘元雪等^[6]通过多应力路径的原状土与重塑土的试验结果比较, 研究了原状土从小应变到大应变

的力学特性及应力路径的影响。曹 权等^[3]采用自钻式旁压试验研究土体刚度随应变的变化规律, 确定小应变条件下土体刚度的非线性特性。T. C. Kung^[7]则对测试土体小应变的三轴试验装置和试验方法进行改进, 以提高试验的测试精度。T. Benz 等^[8, 9]通过理论推导, 提出一种土体小应变层叠模型(small-strain overlay model), 与常规的弹塑性模型相比, 只需要增加 2 个材料参数即可描述土体小应变特性。T. Benz 等^[8, 9]提出的土体小应变模型已被 Plaxis 等商业软件所采用^[10], 使得考虑土体小应变特性进行实际工程的分析成为了可能。吕高峰等^[11]研究了北京地区典型土体的小应变刚度特性, 并以某浅埋暗挖地铁工程为例, 采用 Plaxis 软件对隧道下穿越既有桥梁的变形影响进行分析, 与监测结果的对比表明, 考虑土体小应变特性可提高计算结果的精度, 预测值与实测值较为吻合。

本文以上海地区一紧邻地铁枢纽的超深基坑工程为分析对象, 由于该工程的重要性, 设计要求地面最大沉降量及围护墙水平位移必须满足规程^[4]。在如此严格的变形控制要求下, 土体变形将处于小应变区域。因此, 在变形分析时有必要考虑土体的小应变刚度特性。本文采用 Plaxis 软件, 建立地铁区间隧道和邻近基坑开挖的有限元模型, 通过参数分析, 探讨土体小应变条件下紧邻地铁枢纽的超深基坑变形特性。

2 工程概况

“世纪大都会”2-3 地块工程位于上海浦东新区由世纪大道、张杨路及福山路形成的三角形地带, 占地面积约 38 000 m²。拟建地面建筑物由多幢高层办公楼和商业裙楼组成, 地下空间按地下 4 层(局部二、三层)考虑, 地下室深度 14.75~22.8 m, 功能为商场和车库。整个地块与地铁位置关系复杂, 基坑南侧紧邻地铁世纪大道站, 作为上海目前唯一的四线换乘枢纽, 地铁 2[#], 4[#], 6[#] 和 9[#] 线在此交汇, 特别是轨道交通 6[#] 线明挖区间更是以地下一层的形式直接穿越整个地块, 将地块一分为二。因此, 6[#] 线是该基坑工程最为重要的保护对象, 轨道交通与该地块的相对位置关系如图 1 所示。

该工程采用明挖顺筑法施工, 根据上海地区紧邻地铁枢纽深大基坑的开挖经验, 为减少紧邻地铁位置的基坑施工影响和增加支撑刚度对地铁隧道的

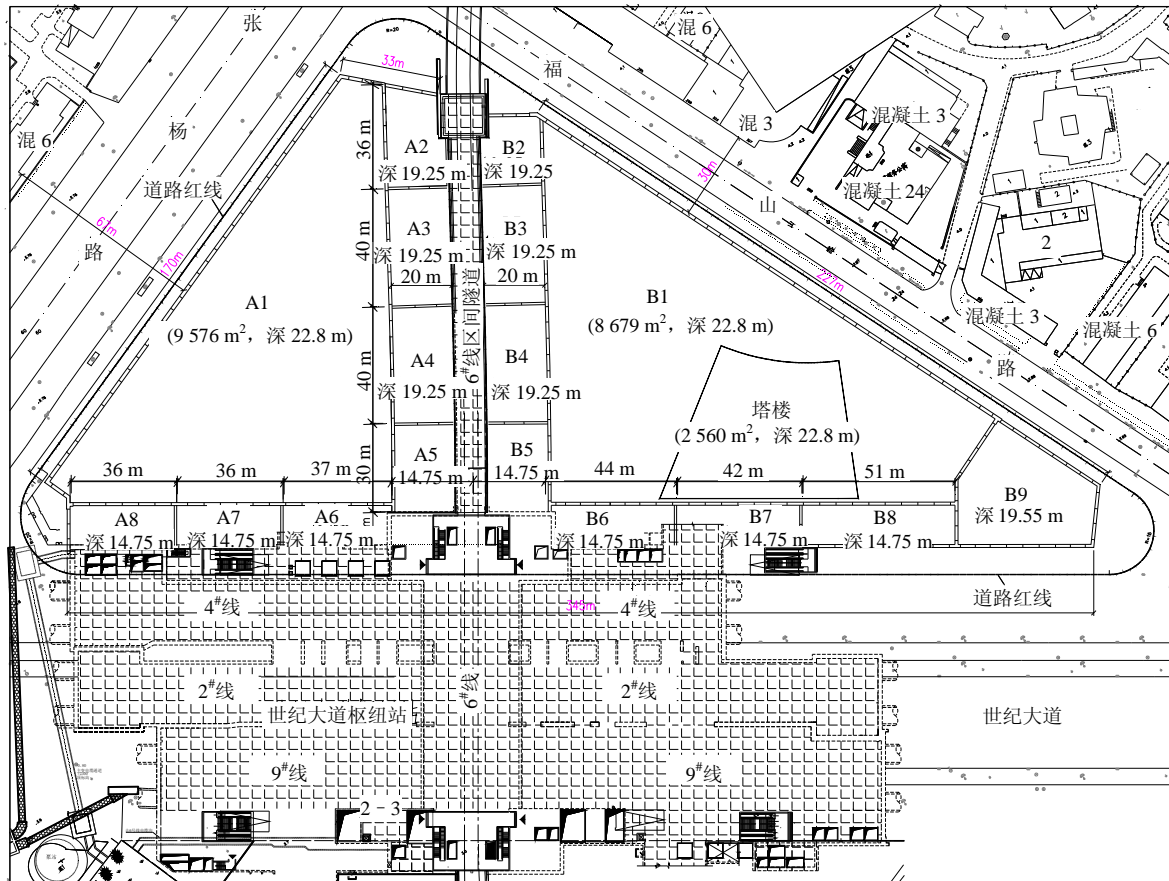


图1 “世纪大都会”2-3地块与地铁位置示意

Fig.1 Sketch of location of Centennial Metropolitan Plaza(Block 2 - 3) and metro lines

保护作用，本工程设计时将基坑分为紧邻地铁隧道的小基坑和稍远的大基坑，先开挖大基坑并浇筑完结构楼板，再开挖紧邻地铁隧道的小基坑。

具体开挖方案为：以6#线为界，通过设置分隔墙将本工程分为A1，B1区2个大基坑，以及沿6#线两侧及4#线北侧大致对称的A2~A8，B2~B9区共15个小基坑。其中A1，B1区为地下4层(基坑开挖深度约22.8 m)，A2~A4区，B2~B4区及B9区为地下3层(基坑开挖深度约19.25 m)，A5~A8区及B5~B8区为地下2层(基坑开挖深度约14.75 m)，围护结构均采用地下连续墙。大基坑A1，B1开挖深度约22.8 m，基坑平面内采用整体对撑形式，竖向共设5道钢筋混凝土支撑，支撑截面尺寸为1 200 mm×1 000 mm，间距9 m；地下连续墙厚1.0 m，深度为50 m。小基坑A2~A4，B2~B4开挖深度约19.25 m，布置5道支撑，第一道为钢筋混凝土支撑，其他四道支撑采用φ609 mm钢管(壁厚t=16 mm)，间距3 m，其一端作用于大基坑分隔墙，另一端作

用于6#线地下连续墙；该连续墙厚1.0 m，深度为40 m。

3 计算模型与参数取值

3.1 计算模型简化

以地铁6#线为主要研究对象，对图1所示的工程原型进行简化。由于6#线两侧的基坑对称开挖，考虑到该工程的特点和有限元分析的可行性，以6#线中心线为对称轴，建立平面有限元分析模型，模型简图、支撑布置和土层分布等如图2所示，图2中已对相近的土层进行合并简化。

3.2 土体本构模型

土体小应变刚度模型(HSS模型)是在土体硬化模型的基础上发展起来的^[8-9]，Plaxis软件率先引入了该土体模型^[10]。本文采用Plaxis软件内嵌的HSS模型，为进行对比，计算也采用理想弹塑性的Mohr-Coulomb模型。

土层基本参数以及Mohr-Coulomb模型和HSS

模型的参数分别解释如下:

(1) 土层基本参数

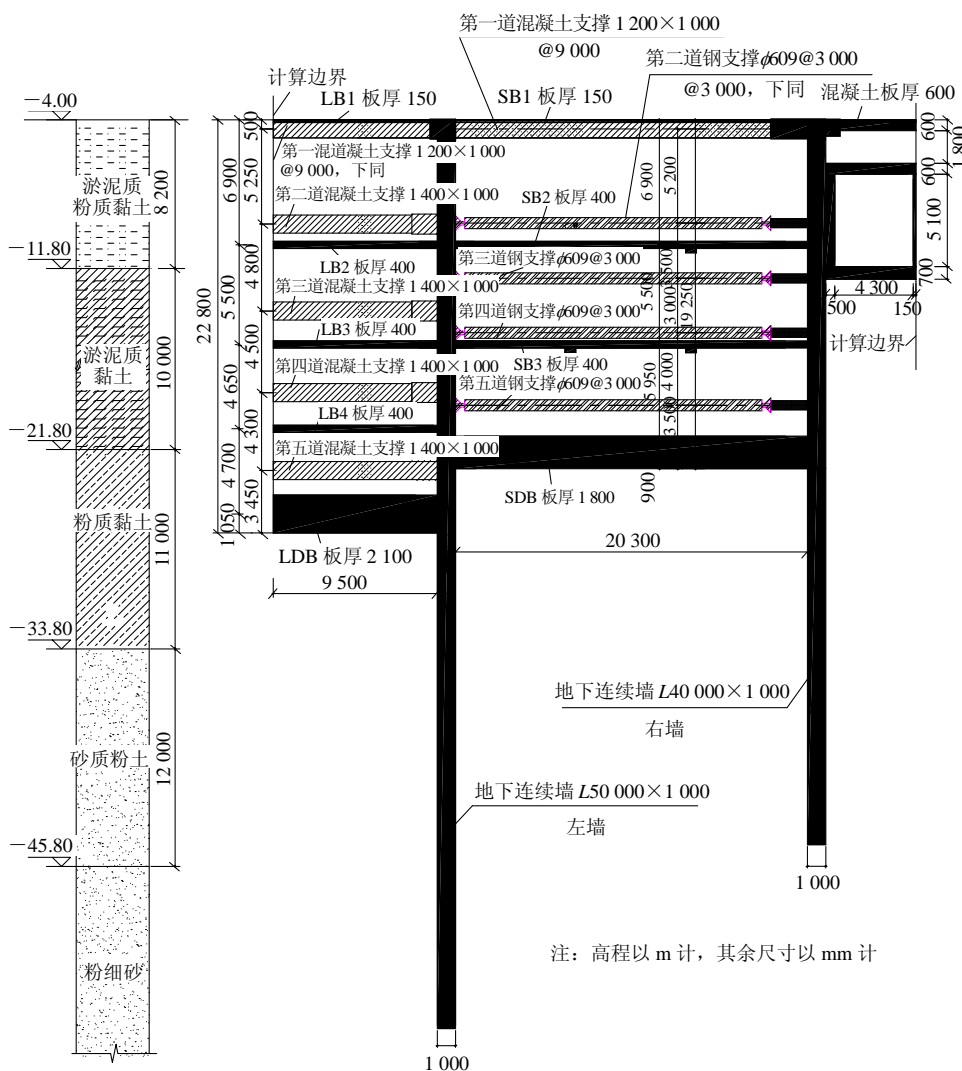


图 2 计算模型和土层分布

Fig.2 Model for analysis and geological information

由于该工程的重要性, 岩土工程勘察报告对各类常规物理力学性质均进行了试验检测, 根据详勘报告, 将相关的土层基本物理力学参数见表 1, 为建模方便, 对相近土层进行了合并处理。

(2) Mohr-Coulomb 模型计算参数

根据上海地区土质情况, Mohr-Coulomb 模型需要用到的变形模量 E_{ref} 一般可取为土体压缩模量

的 2~3 倍^[12], 本文取为 2 倍。其他土体参数 c_{ref} , ϕ 分别取三轴 CU 试验参数 c_{cu} 和 ϕ_{cu} 。

(3) HSS 模型计算参数

HSS 模型是基于土体硬化模型基础上发展起来的考虑土体小应变情况下应力 - 应变关系的模型, HSS 模型用 2 个参数来描述土体小应变下的刚度状态, 分别是 $\gamma_{0.7}$ 和 G_0^{ref} 。 $\gamma_{0.7}$ 表示 $G_{sec} = 0.7G_0^{ref}$ 时对

表 1 土层基本物理力学参数

Table 1 Basic physico-mechanical parameters of soil layers

层序	重度 $\gamma_0 / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	三轴 CU		土层厚度 h / m	静止侧压力系数 K_0	压缩模量 E_s / MPa	泊松比 ν
		c_{cu} / kPa	$\phi_{cu} / (^\circ)$				
① 淤泥质粉质黏土	17.6	11	20.5	8	0.50	1.93	0.33
② 淤泥质黏土	16.8	13	14.1	10	0.56	3.15	0.36
③ 粉质黏土	18.2	21	20.3	11	0.49	7.50	0.33

④ 砂质粉土	18.8	5	34.5	12	0.37	30.60	0.27
⑤ 粉细砂	19.0	5	35.0	19	0.34	39.40	0.25

注： E_s 取值由勘察报告中的 $e-p$ 曲线得到。

应的应变， G_{sec} 为割线剪切模量， G_0^{ref} 为小应变下的参考剪切模量，是基于双曲线法则来描述小应变状态的。

小应变刚度试验可以在计算机控制的应力路径三轴仪上进行，小应变刚度则通过基于高精度的局部应变测量的剪切应变-刚度曲线得到。汪中卫^[13]针对典型的上海淤泥质粉质黏土，得到了上海软黏土归一化剪切刚度与剪切应变的试验曲线，如图3所示，呈现典型的反S型曲线。

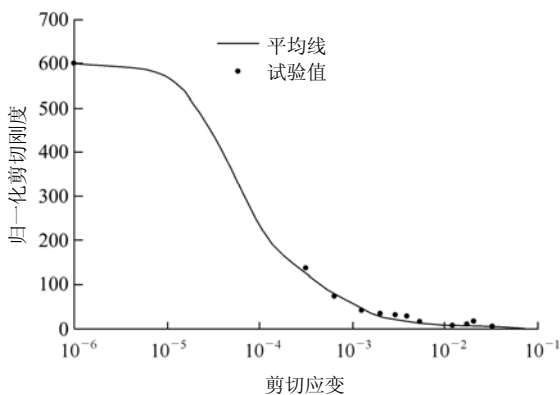


图3 归一化剪切刚度与剪切应变的试验曲线

Fig.3 Testing curve of normalized stiffness vs. shear strain

本文的HSS模型计算参数主要来自于图3给出的试验曲线，HSS模型计算参数如表2所示。

表2 HSS模型计算参数

Table 2 Calculation parameters in HSS model

层序	侧应力系数 K_0^{nc}	特征点应变 $\gamma_{0.7}$	参考剪切模量 G_0^{ref} /MPa	孔隙比 e
① 淤泥质粉质黏土	0.65	8.0×10^{-5}	64.0	1.00
② 淤泥质黏土	0.76	8.0×10^{-5}	50.8	1.15
③ 粉质黏土	0.65	8.0×10^{-5}	88.9	0.78
④ 砂质粉土	0.43	8.0×10^{-5}	92.9	0.75
⑤ 粉细砂	0.43	8.0×10^{-5}	100.3	0.70

注： $\gamma_{0.7}$ 可由图3的归一化剪切刚度与剪切应变曲线得到。

G_0^{ref} (单位: MPa)与土体的初始孔隙比有关，B. O. Hardin 和 W. L. Black^[14]给出了如下的一种估算方法：

$$G_0^{ref} = 33 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \quad (1)$$

式中： e 为孔隙比。

K_0^{nc} 为土体正常固结时的侧应力系数，可由经验公式 $K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi$ 进行估算， φ 为土的内摩擦角。

3.3 算例验证

为验证上述参数取值方法和计算模型的适用性，与G. B. Liu等^[15]中的上海一地铁深基坑工程的变形实测数据进行对比分析。该基坑开挖深度为15.5 m，采用600 mm厚的地下连续墙进行围护，地下连续墙南侧深度为34 m，其他深度为28 m，基坑共布置五道支撑，分别位于地表以下1.5, 4.7, 6.9, 9.7和12.5 m，第一道为钢筋混凝土支撑，水平间距6 m；其余为 $\phi 609$ mm \times 16 mm钢管支撑，水平间距为3 m，地质条件等资料详见G. B. Liu等^[15]的研究，实测结果表明地下连续墙最大水平位移不超过0.3%，土体变形主要位于小应变范围内。分别采用Mohr-Coulomb模型和HSS模型对该工程实测数据进行分析验证，计算参数取值方法同节3.2，计算结果与实测数据对比如图4所示。可见对于变形控制较为严格的基坑工程，考虑土体小应变刚度特性的HSS模型能够更好地模拟基坑实际变形情况，验证了本文方法的可行性。

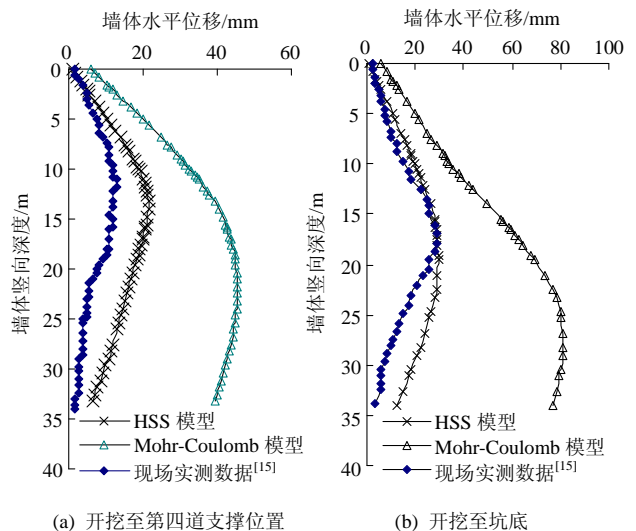


图4 计算结果与现场实测结果的对比验证

Fig.4 Comparison of calculating results with observed data

4 算例分析

本文以“世纪大都会”2-3地块工程为背景，按节3所述方法建立模型进行算例分析，分析重点

主要针对 2 个问题: 一是考虑小应变刚度对本工程基坑开挖变形特性的影响, 二是大基坑和小基坑开挖顺序对基坑变形的影响。

4.1 “先挖大基坑, 后挖小基坑”的方案

4.1.1 开挖顺序

按该工程的实际开挖顺序进行逐步分析, 分为如下 2 个大的阶段:

(1) 先挖大基坑: 开挖前自重应力平衡→第一道混凝土支撑→第一层开挖→第二道混凝土支撑→第二层开挖→第三道混凝土支撑→第三层开挖→第四道混凝土支撑→第四层开挖→第五道混凝土支撑→开挖至坑底→浇筑混凝土底板→拆除第五道混凝土支撑→浇筑第四层楼板→拆除第四道混凝土支撑→浇筑第三层楼板→拆除第三道混凝土支撑→浇筑第二层楼板→拆除第二道混凝土支撑(保留第一道支撑至开挖结束)。

(2) 后挖小基坑: 第一道混凝土支撑→第一层开挖→第二道钢支撑→第二层开挖→第三道钢支撑→第三层开挖→第四道钢支撑→第四层开挖→第五道钢支撑→开挖至坑底→浇筑混凝土底板→拆除第五道钢支撑→浇筑第三层楼板→拆除第四道钢支撑→拆除第三道钢支撑→浇筑第二层楼板→拆除第二道钢支撑→拆除第一道钢支撑→浇筑第一层楼板。

4.1.2 基坑变形分析

为便于分析各工况下的连续墙变形, 选择各个开挖阶段作为代表性工况, 在横坐标轴中分别标记为 0~10, 具体为: (0) 开挖前自重应力平衡→(1) 大基坑第一层开挖→(2) 大基坑第二层开挖→(3) 大基坑第三层开挖→(4) 大基坑第四层开挖→(5) 大基坑开挖至坑底→(6) 小基坑第一层开挖→(7) 小基坑第二层开挖→(8) 小基坑第三层开挖→(9) 小基坑第四层开挖→(10) 小基坑开挖至坑底。

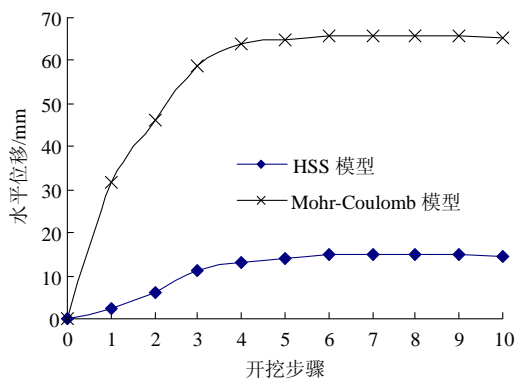
图 5 中的左墙是指邻近大基坑一侧的连续墙, 右墙是指邻近地铁 6#线一侧的连续墙。水平位移为正表示向左侧的位移, 竖向位移为正表示向上的位移。图 5 给出了先挖大基坑, 后挖小基坑条件下连续墙的变形情况, 从中可以看出:

(1) 土体采用 Mohr-Coulomb 模型, 大基坑开挖对左墙水平位移的影响是主要的, 左墙水平位移随着基坑开挖深度的增加而逐渐增大, 对于右墙(邻近地铁 6#线一侧)的水平位移影响较小; 而小基坑开挖则对右墙水平位移产生明显影响, 对于左墙的

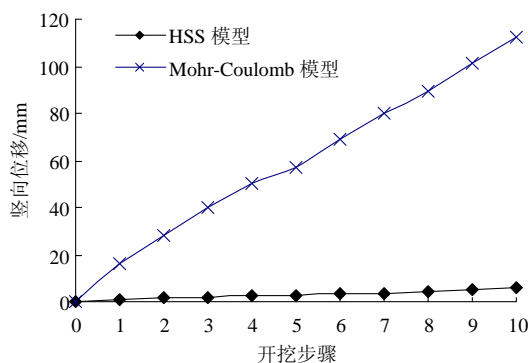
水平位移影响较小。对于左墙, 大基坑和小基坑开挖对竖向位移均有明显影响; 对于右墙, 大基坑开挖对竖向位移影响更为明显。

(2) 土体采用 HSS 模型, 大基坑和小基坑开挖对连续墙变形特性的影响与 Mohr-Coulomb 类似。

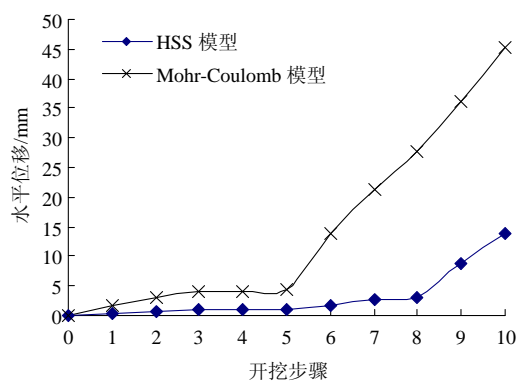
(3) 采用 Mohr-Coulomb 模型, 左墙和右墙水平位移最大值分别为 65.8 和 45.4 mm, 竖向位移最



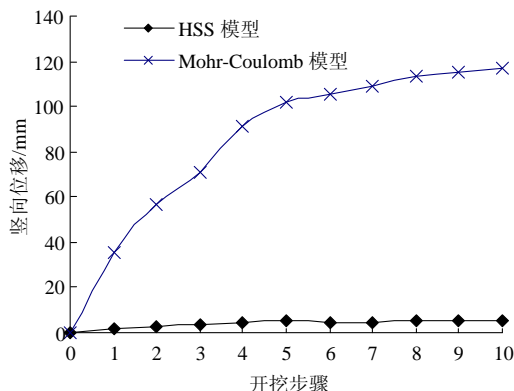
(a) 左墙水平位移



(b) 左墙竖向位移



(c) 右墙水平位移



(d) 右墙竖向位移

图5 先挖大基坑的不同模型计算结果对比

Fig.5 Comparison of calculation results with different soil models after large pit foundation excavation

大值分别为 112.3 和 124.8 mm，明显超过上海地铁对于一级基坑的地面最大沉降量及围护墙水平位移控制要求(对于本工程，左墙地面最大沉降量及围护墙水平位移控制值分别为 22.8 和 31.9 mm，右墙地面最大沉降量及围护墙水平位移控制值分别为 19.3 和 27.0 mm)。因此，在工程上不得不采取包括超深搅拌桩地基加固等在类的各种措施进行处理，以确保基坑开挖的安全性。

(4) 采用 HSS 模型，左墙和右墙水平位移最大值分别为 14.9 和 13.9 mm，竖向位移最大值分别为 5.7 和 6.2 mm，变形可以满足上海地铁对于一级基坑的地面大沉降及围护墙位移控制要求。

4.2 “先挖小基坑，后挖大基坑”的方案

4.2.1 开挖顺序

大的工序采用先挖小基坑后挖大基坑，各工况的具体步骤同节 4.1.1。

4.2.2 基坑变形分析

同节 4.1.2，选择各个开挖阶段作为代表性工况，在横坐标轴中分别标记为 0~10，具体为：(0) 开挖前自重应力平衡→(1) 小基坑第一层开挖→(2) 小基坑第二层开挖→(3) 小基坑第三层开挖→(4) 小基坑第四层开挖→(5) 小基坑开挖至坑底→(6) 大基坑第一层开挖→(7) 大基坑第二层开挖→(8) 大基坑第三层开挖→(9) 大基坑第四层开挖→(10) 大基坑开挖至坑底。

图 6 给出“先挖小基坑，后挖大基坑”条件下连续墙的变形情况，从中可以看出：

(1) 先挖小基坑时，左墙将向右侧(也即向开挖面一侧)发生水平位移，小基坑开挖到底时左墙向右的水平最大，随着大基坑的开挖，左墙向右的水平位移会略有减少。

(2) 土体采用 Mohr-Coulomb 模型，小基坑开挖对于左墙和右墙的水平位移影响都是主要的；而大

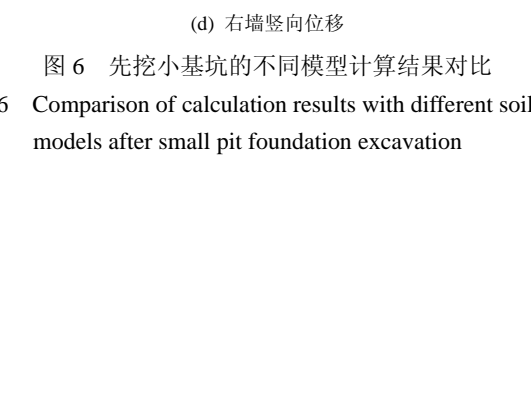
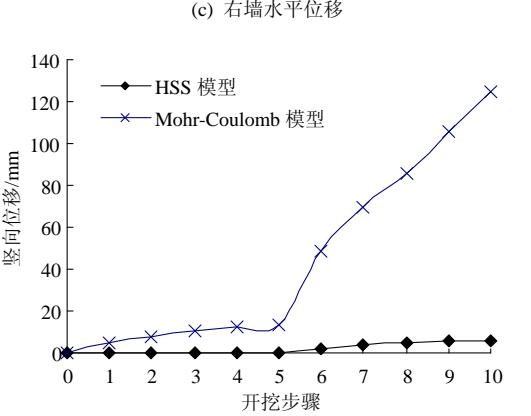
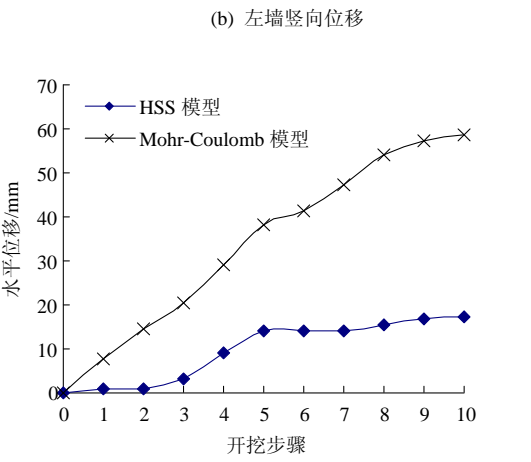
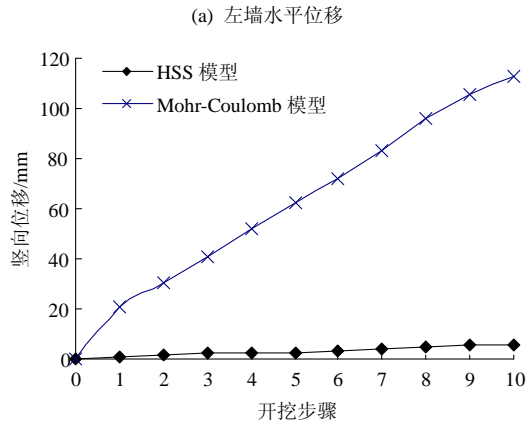
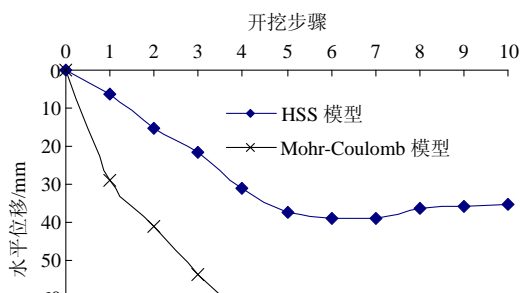


图6 先挖小基坑的不同模型计算结果对比
Fig.6 Comparison of calculation results with different soil models after small pit foundation excavation

基坑开挖则对左墙水平位移影响较小, 对于右墙的水平位移仍有明显影响。对于左墙, 大基坑和小基坑开挖对竖向位移均有明显影响; 而对于右墙, 大基坑开挖对竖向位移影响更为明显。

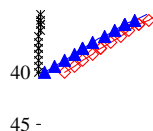
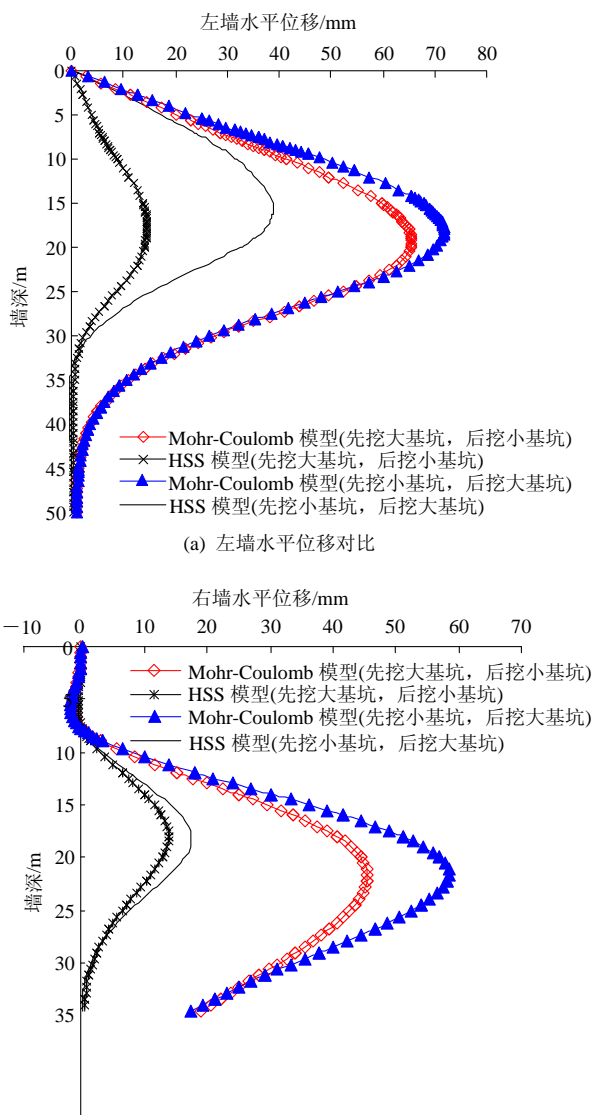
(3) 土体采用 HSS 模型, 大基坑和小基坑开挖对连续墙变形影响与 Mohr-Coulomb 也基本类似。

(4) 采用 Mohr-Coulomb 模型, 左墙和右墙水平位移最大值分别为 71.5 和 58.5 mm, 竖向位移分别为 112.6 和 117.0 mm, 超过了上海地铁对于一级基坑地面沉降及围护墙水平位移控制要求。

(5) 采用 HSS 模型, 左墙和右墙水平位移最大值分别为 39.1 和 17.5 mm, 竖向位移分别为 5.8 和 5.2 mm, 此时, 左墙水平位移超过了上海地铁对于一级基坑围护墙位移控制要求。

4.3 不同开挖顺序基坑变形对比

从图 5, 6 可以看出, 不同开挖顺序对基坑变形是有明显影响的, 图 7 为 2 种开挖顺序左墙和右墙最大水平位移的工况进行对比分析, 从图 7 可以看出:



(b) 右墙水平位移对比

图 7 不同开挖顺序结果对比

Fig.7 Comparison of results with different excavation sequences

(1) 对于左墙, 土体采用 Mohr-Coulomb 模型和 HSS 模型时, “先挖小基坑, 后挖大基坑”的水平位移均大于“先挖大基坑, 后挖小基坑”方案, 增幅分别为 9%和 162%, 开挖顺序对 HSS 模型影响较为显著。

(2) 对于右墙, 土体采用 Mohr-Coulomb 模型和 HSS 模型时, “先挖小基坑, 后挖大基坑”的水平位移也均大于“先挖大基坑, 后挖小基坑”方案, 增幅分别为 29%和 26%。

5 结 论

通过对“世纪大都会”2-3地块工程所抽象出来的分析模型, 分别采用Mohr-Coulomb 模型和 HSS模型对深基坑开挖变形特性进行对比分析, 可以得出以下结论:

(1) 考虑土体小应变刚度特性对基坑变形分析具有显著影响, 对于在工程上处于小应变范围的基坑工程, 如果能够合理地考虑土体在小应变范围内的刚度特性, 可以使得基坑变形计算更加合理, 提高设计水准, 从而避免过于保守的工程设计和施工技术措施。

(2) 开挖顺序对于基坑变形具有较为显著的影响, 对于紧邻地铁枢纽的深大基坑, 先开挖大基坑并浇筑完结构楼板, 再开挖紧邻地铁隧道的小基坑, 可以有效地减小基坑的变形, 对于紧邻地铁隧道的保护是有益的。

目前关于软土小应变刚度特性所积累的试验数据还很有限, 如何充分利用现有的有限试验数据, 合理确定计算参数将是下一步研究工作中亟待重点解决的问题。

参考文献(References):

[1] BURLAND J B. Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains[J].

- Canadian Geotechnical Journal, 1989, 26(4): 499 - 516.
- [2] ATKINSON J H, SALLFORS G. Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and in-situ tests[C]// Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence: [s. n.], 1991: 915 - 956.
- [3] 曹 权, 施建勇, 柴寿喜, 等. 小应变下土体刚度非线性分析的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(5): 699 - 703.(CAO Quan, SHI Jianyong, CHAI Shouxi, et al. Non-linear analysis of stiffness of soils under small strain[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(5): 699 - 703.(in Chinese))
- [4] 中华人民共和国行业标准编写组. SZ - 08 - 2000 上海地铁基坑工程施工规程[S]. 上海: 上海市市政工程管理总局, 2000.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SZ - 08 - 2000 Specification for excavation in Shanghai metro construction[S]. Shanghai: Shanghai Municipal Engineering Authority, 2000.(in Chinese))
- [5] 汪中卫, 王海飙, 戚科骏, 等. 土体小应变试验研究综述与评价[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1 518 - 1 524.(WANG Zhongwei, WANG Haibiao, QI Kejun, et al. Summary and evaluation of experimentation on small strain of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1 518 - 1 524.(in Chinese))
- [6] 刘元雪, 蒋树屏, 赵燕明. 原状欠固结土的力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(增 1): 4 409 - 4 413.(LIU Yuanxue, JIANG Shuping, ZHAO Yanming. Testing study on mechanical characteristics of natural underconsolidated soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(Supp.1): 4 409 - 4 413. (in Chinese))
- [7] KUNG T C. Equipment and testing procedures for small strain triaxial tests[J]. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2007, 30(4): 579 - 591.
- [8] BENZ T, VERMEER P A, SCHWAB R. A small-strain overlay model[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2009, 33(1): 25 - 44.
- [9] BENZ T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences[Ph. D. Thesis][D]. Stuttgart: Stuttgart University, 2007.
- [10] BRINKGREVE R B J, BROERE W. Plaxis 2D manual[R]. Delft: Delft University of Technology, 2007.
- [11] 吕高峰, 魏庆朝, 倪永军. 考虑土体小应变特性的浅埋暗挖地铁隧道施工扰动影响的数值分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 72 - 78.(LU Gaofeng, WEI Qingchao, NI Yongjun. Numerical analysis of construction disturbance of shallow excavation tunnelling considering small strain behavior of soil[J]. China Railway Science, 2010, 31(1): 72 - 78.(in Chinese))
- [12] 梁发云. 基于多孔介质理论的地基土变形模量估算方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1 147 - 1 150.(LIANG Fayun. An approach for estimating deformation modulus of subsoil based on porous medium theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1 147 - 1 150.(in Chinese))
- [13] 汪中卫. 考虑时间与小应变的地铁深基坑变形及土压力的研究[博士学位论文][D]. 上海: 同济大学, 2004.(WANG Zhongwei. Research on deformation and earth pressure of deep metro excavation in soft clay based on time and small strain[Ph. D. Thesis][D]. Shanghai: Tongji University, 2004.(in Chinese))
- [14] HARDIN B O, BLACK W L. Closure to vibration modulus of normally consolidated clays[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1969, 95(SM6): 1 531 - 1 537.
- [15] LIU G B, NG C W W, WANG Z W. Observed performance of a deep multistrutted excavation in Shanghai soft clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(8): 1 004 - 1 013.