

深基坑开挖对邻近运营地铁的影响分析

尹宏磊, 韩 煊

(北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

摘 要: 城市深基坑的施工中, 往往会引起周围建(构)筑物的变形。对于临近运营地铁的基坑工程, 由于其严格的变形控制要求, 分析中对变形的合理预测是重点。本文通过研究小应变硬化本构模型的理论基础, 根据北京地区的工程经验, 针对这一高级本构模型, 初步提出了适用于北京地区工程地质特点的主要参数取值方法。以北京地区某实际工程为例, 本文采用小应变本构模型和莫尔库仑模型分别对其变形进行分析预测, 并与实测结果对比表明, 采用目前工程中最常用的莫尔库仑模型预测的结果与实际有很大的偏差, 不适合用于变形控制设计的基坑分析, 而小应变硬化模型较好的模拟了施工实际引起的变形, 预测的隧道结构变形接近实测结果。

关键词: 深基坑; 变形控制; 刚度变化; 本构模型; 小应变

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0608-05

作者简介: 尹宏磊(1980-), 男, 河南镇平人, 博士, 主要从事基坑工程、地铁隧道工程等方面的研究与风险评估工作。E-mail: yinh103@126.com。

Influence of deep excavation on adjacent subway

YIN Hong-lei, HAN Xuan

(BGI Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: Urban excavations always result in deformations of surrounding buildings. In the analysis, reasonable prediction of deformations is of importance. After studies on the theory of hardening small strain (HSS) constitutive model, a series of experiential parameters are proposed. Adjacent to the operating subway, an excavation is put on by a strict deformation standard. The deformations of diaphragm wall and tunnel are predicted using the HSS model and the Mohr Coulomb model. A great difference is found between the Mohr Coulomb and observed results, while the HSS model reproduces the site deformation well. As a result, incorporating the HSS model into the deformation-control design is feasible.

Key words: deep excavation; deformation control; stiffness variation; constitutive model; small strain

0 引 言

按照规划, 到 2015 年, 北京将形成“三环、四横、五纵、七放射”共 19 条轨道交通线路, 里程达到 561 km, 其中二环内线网密度为 1.08 km/km^2 , 二环外线网密度为 0.51 km/km^2 。但随着城市化的发展, 地下空间的需求越来越大, 如高层建筑的深层地下室, 大型的地下商场及停车场等。开发这些地下空间涉及大量的深基坑工程, 其规模和深度不断增加, 而地铁线路又如此密集, 城市基坑施工往往会遇到邻近运营地铁的问题, 会对地铁运行产生扰动, 而运营地铁对轨道变形的要求极其严格, 因此地下空间开发给基坑设计和施工提出了严峻的挑战。

针对这类特殊工程, 要求在基坑设计中不仅满足自身稳定(强度控制)的要求, 而且要把基坑工程施工引起的周围地层移动控制在一定的范围之内(变形控制), 也即分别要求挡土结构的水平位移及其邻近地

层的垂直沉降限制在某标准值之内, 甚至也限制墙体垂直沉降和地层的水平位移满足周围环境要求^[1]。

现在基坑设计一般规范推荐采用等值梁法和弹性地基梁法, 这两种方法都是以强度控制为主, 无法合理考虑周围重要建(构)筑物的本身特征, 也就不能准确分析对周围环境的影响程度。因此, 对这类基坑工程, 从强度控制设计转变为变形控制设计是城市基坑工程设计的基本理念^[1-2]。

对于基坑施工引起的变形问题, 数值计算(包括有限元、有限差分等)具有坚实的理论基础, 可以模拟基坑施工的全过程, 理论上可以解决现有规范方法所不能解决的问题, 但前提条件是, 数值计算中要合理选择代表土体特性的本构关系及其相关参数。影响本构关系选择的因素有很多, 但基本的原则是区分承

基金项目: 北京市海淀区科技项目(K20110036)

收稿日期: 2012-08-25

载能力极限状态和正常使用极限状态。如果是正常使用极限状态, 需要按变形控制设计, 就必须采用能够基本反映深基坑开挖中土单元所处的复杂的应力状态和经历的复杂应力历史, 这往往只有高级本构模型(硬化模型、小应变硬化模型、修正剑桥模型等)才能考虑这些因素。

本文以紧邻运营地铁的北京某深大基坑为研究背景, 采用小应变硬化模型和莫尔库仑模型, 分别对深基坑工程施工对地铁隧道的影响进行预测分析, 并与现场实测结果进行了比较。通过本例试图强调说明, 在深基坑工程的变形分析中, 采用目前工程中常用的传统的理想弹塑性模型(例如莫尔库仑模型、DP 模型等)已经无法得到合理的结果, 必须考虑采用复杂的高级本构模型。而要合理地使用这类模型, 则需要通过积累大量实测结果的分析与反分析, 获得参数的确定经验。

1 小应变硬化本构模型^[3-5]

土是一种多相的弹塑性材料, 在加载过程中, 土体会收缩或者膨胀, 它的刚度也会随着应力水平变化而改变。在小应变范围内, 土体的刚度很大, 但随着应变的增加, 刚度会快速地减小, 表现出很强的非线性, 如图 1 所示。

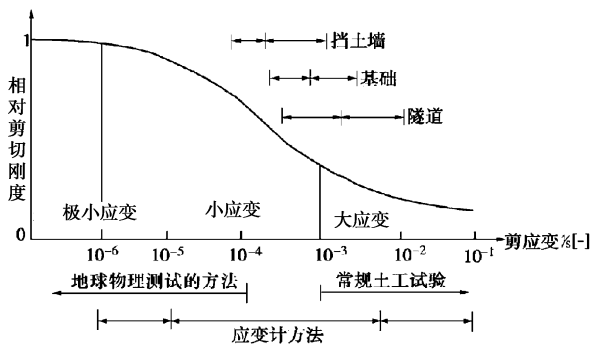


图 1 典型的刚度随应变变化曲线

Fig. 1 Typical representation of stiffness variation in function of shear strain amplitudes

小应变模型主要由以下几种法则构成:

(1) 剪切硬化

剪切的硬化屈服可以比照三轴排水固结试验中偏应力 q 与竖向应变 ε_1 之间的双曲线关系来描述, 屈服条件可以表述如下:

$$f_1 = \frac{q_a}{E_{50}} \frac{q}{q_a - q} - 2 \frac{q}{E_{ur}} - \gamma^{ps} \text{ for } q < q_f, \quad (1)$$

式中, γ^{ps} 是塑性应变硬化参数, q_a 是偏应力的渐近值, 由极限偏应力 q_f 与破坏比 R_f 定义为

$$q_a = \frac{q_f}{R_f}, \quad (2)$$

极限偏应力 q_f 符合莫尔库仑准则,

$$q_f = \frac{2 \sin(\phi)}{1 - \sin(\phi)} (\sigma_3 + c \cot \phi), \quad (3)$$

割线模量 E_{50} 对应于极限偏应力 q_f 的 50%, 与小主应力有关,

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{\sigma_3^* + c \cot \phi}{\sigma^{\text{ref}} + c \cot \phi} \right)^m, \quad (4)$$

式(4)中 $\sigma_3^* = \max(\sigma_3, \sigma_L)$, 一般假定 σ_L 为 10 kPa, E_{50} 控制剪切屈服产生的塑性应变, 根据经验 m 取值范围 0.3~1.0。加卸载模量 E_{ur} 也与小主应力有关,

$$E_{ur} = E_{ur}^{\text{ref}} \left(\frac{\sigma_3^* + c \cot \phi}{\sigma^{\text{ref}} + c \cot \phi} \right)^m. \quad (5)$$

(2) 体硬化

体硬化采用盖帽模型, 屈服条件表述如下:

$$f_2 = \frac{q^2}{M^2 r^2(\theta)} + p'^2 + p_c^2, \quad (6)$$

式中, $r^2(\theta)$ 屈服面的圆滑性, M 描述盖帽的形状, p_c 代表先期固结压力, p' 等压力值的大小, 硬化参数的演化可由式(7)描述:

$$dp_c = -H \left(\frac{p_c + c \cot \phi}{\sigma^{\text{ref}} + c \cot \phi} \right)^m, \quad (7)$$

式中, H 控制体积塑性应变的变化率大小, 其与固结模量 E_{oed} 有关。

(3) 小应变的非线性弹性

为了描述小应变刚度 S 形的非线性折减, 模型利用土动力学中常用的 Hardin-Drnevich 双曲线关系, 把当前的剪切割线模量 G_s 与等效剪应变 γ_{hist} 联系起来。表述如下:

$$\text{加载: } \frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + a \frac{\gamma_{\text{hist}}}{\gamma_{0.7}}}; \quad (8)$$

$$\text{卸载, 再加载: } \frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + a \frac{\gamma_{\text{hist}}}{2\gamma_{0.7}}}, \quad (9)$$

式(8)、(9)中 $\gamma_{0.7}$ 表示当剪应变达到 $\gamma_{0.7}$ 时 G_s 降到 G_0 的 70%。

小应变模型虽然数学形式上看起来复杂, 但它的参数都有明确的物理意义, 都可以通过常规的土力学试验得到。

显然, 工程中常用的理想弹塑性莫尔库仑模型不考虑土的应变水平与土的模量之间的非线性关系, 也无法考虑深基坑工程中土的复杂应力状态, 特别是不能合理考虑土的加卸载状态及其与土的模量之间的关系, 因此在分析中往往计算得到的变形结果严重失真, 例如导致计算的围护桩或墙不合实际的上抬。

2 工程概况

北京某工程用地红线范围的西侧临近既有地铁区

间隧道,地下室结构外墙与地铁隧道外皮的最近水平距离约为 5.0 m,基坑底面与隧道的竖向距离约为 0.89 m。

图 2 是该场地三维地层结构模型,描述了地铁隧道和基坑的空间位置关系。

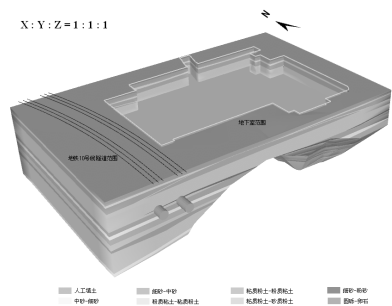


图 2 运营地铁与基坑的空间位置关系

Fig. 2 Spatial relation between tunnel and pit

建筑基坑长约 150 m, 宽约 110 m, 基底埋深约 15.5 m。基坑支护设计图如图 3 所示,共划分为 8 个支护段。

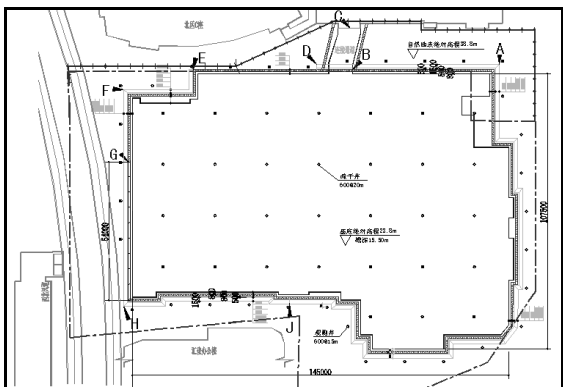


图 3 基坑支护结构平面图

Fig. 3 Plan of support for pit

基坑西侧南段 (GH 段) 距离地铁较近的位置为保证地铁的正常运营不受影响,采用地下连续墙+预应力锚索+土钉墙的支护方案,上 6.6 m 采用土钉墙支护,6.6 m 以下采用“地下连续墙+预应力锚杆”支护,地下连续墙厚度 0.8 m,单板宽度 6 m,嵌固深度 8 m,墙及连梁混凝土强度等级 C25。在放坡的土钉墙部分加了 1 道锚索,防止上部变形过大,地连墙上设置 2 道锚索。

工程场区的地层分布情况如图 4 所示。隧道穿越地层主要为粉质黏土④层,细粉砂④₂层和黏质粉土⑤层。

3 数值模型

邻近地铁的西侧边坡是整个基坑工程的重点,它的变形控制对运营地铁的安全至关重要。本次分析选择西侧边坡的一个典型剖面,考虑为平面应变问题。利用 ZSoil 中的小应变硬化模型和莫尔库仑模型分别预测基坑的变形。

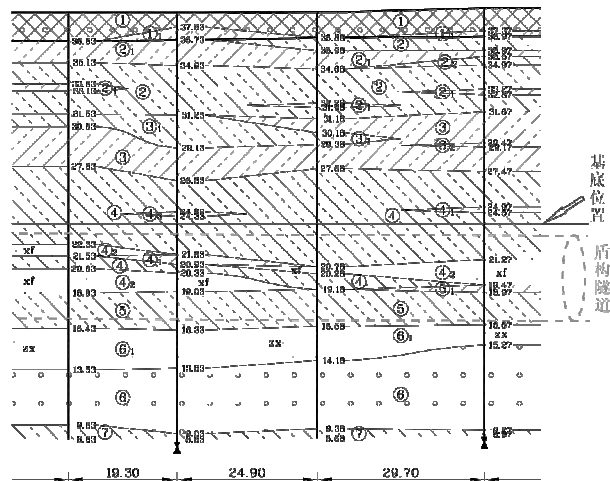


图 4 工程场地地层分布情况

Fig. 4 Strata of site

(1) 网格剖分

在开挖边线一定范围内局部加密网格,可以更精确地捕捉局部的变形特性。考虑开挖对周围土体及隧道的影响范围,整个模型尺寸选取 200 m×80 m,最终剖分 3134 个四边形单元,3351 个结点。如图 5 所示。

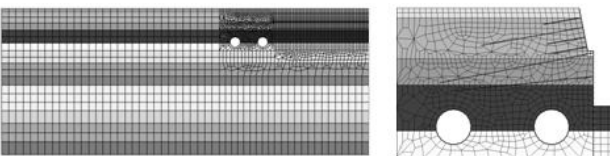


图 5 模型网格剖分、地层及支护结构

Fig. 5 Mesh and support structures of model

(2) 地层基本物理力学参数

根据试验室提供成果,场区的地层参数如表 1 所示。

(3) 莫尔库仑模型的参数

根据地区经验,莫尔库仑模型的变形模量取为试验室提供的压缩模量的 3 倍。其他参数按照表 1 取值。

表 1 基本物理力学参数

Table 1 Basic parameters of soils

土层	土层名称	密度/(g·cm ⁻³)	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)	泊松比	压缩模量 E _s /MPa
①	房渣土	1.75	8	10	0.3	7
②	黏质粉土	1.97	23	24	0.25	6.6
③	粉质黏土	2.07	26	20	0.25	9.8
④	粉质黏土	2.03	53	18	0.26	9.6
⑤	黏质粉土	2.02	35	29.5	0.25	18.7
⑥	卵石	2.05	0	35	0.23	55
⑦	粉质黏土	2	33	28	0.25	19.3
⑧	粉质黏土	1.97	35	30	0.31	14.8
⑨	粉质黏土	2.05	60	33	0.27	40
⑩	中细砂	2.1	0	37	0.25	90
⑪	中细砂	2.03	5	35	0.26	90
⑫	中细砂	2.1	0	35	0.25	100

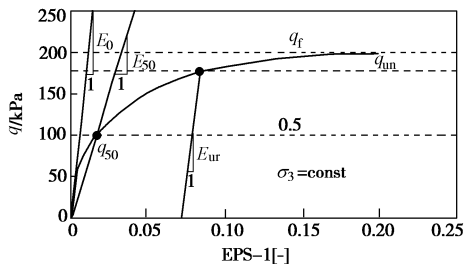
(4) 小应变硬化模型的参数

在小应变模型的应用过程中,模量参数 E_{od} , E_{50}^{ref} , $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$, E_0^{ref} 的取值非常重要,在没有相应的试

验资料条件下, 可以依靠地区经验参考压缩模量 E_s 来给值^[6-10]。根据对部分北京地区工程实例的反分析, 针对北京地区的土层, 可以初步考虑如下取值:

$E_{\text{oed}} \approx 1.3E_s; E_{50}^{\text{ref}} \approx E_{\text{oed}}; E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \approx 3E_{50}^{\text{ref}}; E_0^{\text{ref}} \approx 5E_{\text{ur}}^{\text{ref}}。$ (10)

如果有三轴压缩试验资料, 根据试验曲线可以给出 $E_{50}^{\text{ref}}, E_{\text{ur}}^{\text{ref}}, E_0^{\text{ref}}$ 等模量参数, 具体方法如图 6 所示。固结模量 E_{oed} 可以根据常规固结试验获得。



大于 0.001, 已经进入到大应变的范围。因此, 对于变形控制设计的城市基坑工程, 采用小应变硬化模型预测其扰动变形是合适的。

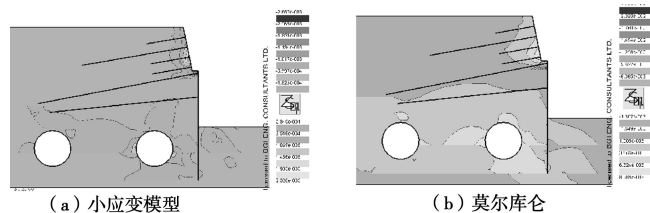


图 10 开挖后的剪应变云图 (小应变模型 (左), 莫尔库仑 (右))
Fig. 10 Shear strain after excavation (HSS (left), M-C (right))

5 结 语

北京纵横交错的地铁网络, 为未来城市基坑设计及施工提出了严峻的挑战, 这就要求我们改变现在以强度控制设计的做法, 必须应用变形控制设计方法来适应复杂的周边环境。现阶段, 采用高级本构关系的数值计算方法是实现变形控制设计的有益尝试。本文通过研究小应变本构模型的理论基础, 根据北京地区的工程实例经验, 尝试提出适合北京地区的参数取值系数。某临近运营地铁的基坑工程, 由于其严格的变形控制要求, 本文采用小应变本构模型和莫尔库仑模型分别对其变形进行分析预测, 与实测结果相比, 莫尔库仑模型的结果有数量级上的差别, 不适合用于变形控制设计的基坑分析, 而小应变模型的结果较好的模拟施工现场的变形情况, 预测的轨道变形接近实测情况。

参考文献:

- [1] 侯学渊, 刘国彬, 黄院雄. 城市基坑工程发展的几点看法 [J]. 施工技术, 2000, **29**(1): 5 - 7. (HOU Xue-yuan, LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong. Several views on the development of urban foundation work [J]. Construction Technology, 2000, **29**(1): 5 - 7. (in Chinese))
- [2] 龚晓南. 基坑工程发展中应重视的几个问题 [J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(增刊): 1321 - 1324. (GONG Xiao-nan. Some major problems in the development of foundation pit engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(S0): 1321 - 1324. (in Chinese))
- [3] OBRZUD R, TRUTY A. The hardening soil model- a practical guidebook[R]. ZSoil.PC 100701 Report, 2011.
- [4] SCHANZ T, VERMEER, P A, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification [C]// Beyond 2000 in Computational Geotechnics-10 Years of PLAXIS. Rotterdam: Balkema, 1999.
- [5] BENZ T. Small strain stiffness of soils and its numerical consequence[D]. Stuttgart University, 2006.
- [6] 尹 骥. 小应变硬化模型在上海地区深基坑工程中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊): 166 - 172. (YIN Ji. Application of hardening soil model with small strain stiffness in deep foundation pits in Shanghai[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S0): 166 - 172. (in Chinese))
- [7] 王海波, 徐 明, 宋二祥. 基于硬化土模型的小应变本构模型研究 [J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 39 - 43. (WANG Hai-bo, XU Ming, SONG Er-xiang. A small strain constitutive model based on hardening soil model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 39 - 43. (in Chinese))
- [8] 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. (CHU 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))
- [9] 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 Jian-yong, CHAI Shou-xi, 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))
- [10] 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): 1518 - 1524. (WANG Zhong-wei, WANG Hai-biao, QI Ke-jun, et al. Summary and evaluation of experimental investigation on small strain of soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1518 - 1524. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)