

软土基坑施工引起邻近既有地铁隧道位移的预测方法

王 沛¹ 翟杰群²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 200092, 上海;

2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 200092, 上海//第一作者, 硕士研究生)

摘 要 针对上海市典型的工程地质条件以及当地基坑工程中广泛采用的“大小坑”开挖模式, 建立大量三维数值模型, 计算分析了既有侧向邻近地铁隧道基坑施工时, 引起地铁隧道最大位移受基坑开挖规模及基坑与隧道间相对位置关系影响的规律, 提出了一种隧道位移实用预测方法。工程实例验证表明, 该方法的预测结果是可靠的, 可以为邻近基坑工程的地铁隧道保护提供参考。

关键词 基坑开挖; 地铁隧道位移; 数值模拟; 预估公式

中图分类号 U456.3⁺1

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.08.033

Prediction Method of Metro Tunnel Displacement Caused by Adjacent Foundation Pit Excavation in Soft Soil

WANG Pei, ZHAI Jiequn

Abstract According to the typical engineering geological conditions in Shanghai and the “Big and Small Pit” excavation mode widely adopted in local foundation pit projects, a large number of three-dimensional numerical model is established. The influencing law of the relative position between the foundation pit and the tunnel on the maximum metro tunnel displacement is calculated and analyzed, which often occurs during the construction of metro tunnel foundation pit from nearby the existing side. On this basis, a practical prediction method of tunnel displacement is proposed. The practical engineering cases show that the prediction result of the method is reliable, it can provide reference for the protection of metro tunnel adjacent to the foundation pit.

Key words foundation pit excavation; metro tunnel displacement; numerical simulation; prediction formula

First-author's address Department of Geo-technical Engineering, Tongji University, 20092, Shanghai, China

基坑开挖引起邻近地铁隧道发生位移是一个受到多因素综合影响的复杂过程。文献[1]根据理论研究和实践经验, 提出了7项微扰动设计方法及

技术措施控制软土基坑变形, 减少基坑开挖对周围环境的影响; 文献[2]利用数值模拟的方法研究了“浅埋型”“紧贴型”等7种不同工况下深基坑开挖与单行隧道间的相互影响; 文献[3]通过建立大量二维有限元模型, 结合规范中隧道变形控制标准划分了基坑开挖对临近既有隧道的变形影响区。但目前还缺少一种适用于上海软土地区基坑施工对邻近既有地铁隧道位移的预测方法。

本文针对上海地区基坑工程中广泛采用的“大坑+小坑”开挖模式, 基于当地典型的土层分布条件, 利用 Midas GTS NX 软件, 采用 HS (Hardening Soil) 模型, 进行了三维有限元分析, 以研究侧向邻近地铁隧道的基坑施工时, 引起地铁隧道的最大位移受基坑开挖规模、隧道与基坑相对位置关系等因素影响的规律, 并提出了一种隧道位移预估算法。通过与实测数据的对比分析, 验证了该算法的适用性和可靠性。

1 模型建立

本文研究的基坑最大开挖尺寸(大坑+小坑)为 150 m×150 m×30 m。根据文献[4]中的基坑开挖影响范围数据, 有限元模型整体尺寸取 450 m×450 m×150 m, 以避免模型边界对计算结果造成影响。基坑采用地下连续墙结合内支撑的围护形式, 插入比取 1:1; 大坑内支撑采用双向间距为 10 m 的网状布置, 并在基坑边界处设置八字撑; 小坑内支撑沿长边以 5 m 的间距均匀布置, 并在小坑两端设置间距为 5 m 的斜撑。大坑与小坑的首道支撑均布置于地表深度为 0 处, 各道支撑竖向间距为 5 m。

钢筋混凝土结构构件均采用弹性本构模型, 忽略钢筋影响。隧道直径取 6.2 m。衬砌等效为 1 个均质圆筒。由于上海地铁隧道大部分采用通缝拼装, 故采用较为保守的 18% 纵向抗弯刚度有效率对其纵向抗弯刚度进行折减^[5]。地下连续墙和底板厚度设为 1

m,隧道衬砌厚度取 0.35 m,支撑截面为边长 1 m 的正方形。模型各结构构件参数如表 1 所示。

将地表以下 30 m 范围内的土层简化为上海地区具有较强代表性的④层灰色淤泥质黏土,30 m 以下范围土层用土质较好的⑦层粉砂代替。土体本构模型为 HS 模型,参数取值结合文献[6-7]及工程经验确定。土层基本物理性质指标如表 2 所示。有限元模型如图 1 所示。

表 1 模型各构件参数

结构构件	单元类型	重度/ (kN/m ³)	泊松比	弹性模量/ MPa
地下连续墙	板单元	25	0.2	3×10 ⁴
底板	板单元	25	0.2	3×10 ⁴
支撑	梁单元	25	0.2	3×10 ⁴
衬砌	板单元	25	0.2	6.39×10 ³

表 2 土层基本物理性质指标

土层	重度/ (kN/m ³)	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
④	17.5	2.33	12.0	9.4
⑦	18.8	14.46	1.5	37.2

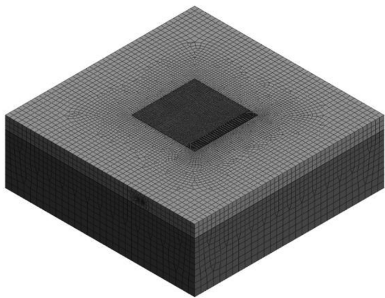


图 1 大坑+小坑的基坑有限元模型

2 参数及工况

基坑与隧道模型横断面如图 2 所示。该模型的基本参数为:隧道与基坑净距 L 、隧道顶部埋深 d 、小坑开挖深度 h 、小坑开挖宽度 B 、大坑开挖深度 H 。该模型的其他参数为:隧道直径 $R=6.2$ m;基坑开挖总宽度 $W=150$ m。根据上海地区软土基坑工程常见工况,对基本参数分别取值,并模拟计算。各工况下, L 分别取 10 m、15 m、20 m、25 m、30 m, d

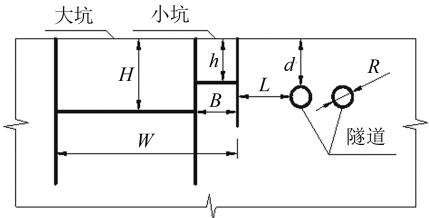


图 2 基坑与隧道的模型横断面示意图

分别取 8 m、14 m、20 m; h 分别取 10 m、15 m、20 m, B 分别取 10 m、15 m、20 m、25 m、30 m, H 分别取 10 m、15 m、20 m、25 m、30 m, $h\leq H$ 且 $h\leq d+0.5R$ 。

3 基本参数分析及计算式推导

由于基坑与隧道模型参数较多,且部分工况类似,故本文仅选取部分具有代表性的数据来分析。

3.1 基本参数分析

3.1.1 L 与隧道最大位移 Δ 的关系

由图 3 可见: Δ 与 L 近似呈负相关的反比例函数关系;当 B 不同时,各曲线的曲率几乎相同,说明 L 对 Δ 的影响程度较稳定。由此可见, L 为十分敏感的影响因素,故应当严格限制在距离地铁隧道较近的区域进行开挖卸荷。

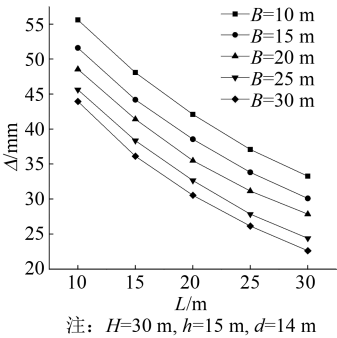


图 3 隧道最大位移与隧道与基坑净距关系

3.1.2 d 与 Δ 的关系

由图 4 可见: Δ 与 d 近似呈负相关的线性关系;当 B 不同时,各曲线斜率几乎相同,说明 d 对 Δ 的影响程度较稳定。由于 Δ 随着 d 的减小而增大,因此在实际工程中应更加注意对浅埋隧道的保护。

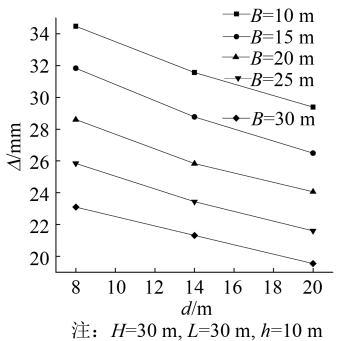


图 4 隧道最大位移与隧道顶部埋深关系

3.1.3 h 与 Δ 的关系

由图 5 可见: Δ 与 h 近似呈正相关的线性关系;随着 L 的增大,曲线斜率降低,说明 h 对 Δ 的影响程度有所减小。由此可见,适当减小 h 有利于减小

邻近基坑施工引起的地铁隧道位移。

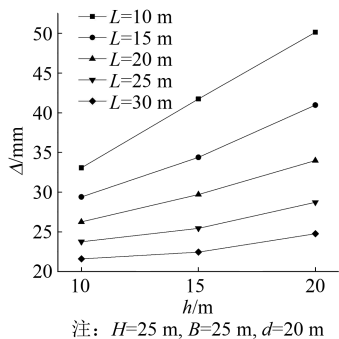


图5 隧道最大位移与小坑开挖深度关系

3.1.4 B与Δ的关系

由图6可见:Δ与B近似呈负相关的反比例函数关系;随着h的增大,B对Δ的影响程度逐渐降低,即B对Δ的影响会随着大小坑开挖深度差的减小而减小。一般情况下,当 $h \geq (2/3)H$ 时, $B < H$ 。

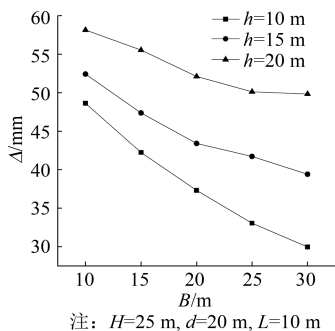


图6 隧道最大位移与小坑开挖宽度关系

3.1.5 H与Δ的关系

由图7可见:H与Δ近似呈正相关的多项式函数关系;随着L的增大,各曲线曲率几乎相同,说明H对Δ的影响程度较稳定。与L类似,H同样是影响Δ的敏感因素。故当基坑开挖深度较深时,应当采取更为严格的变形控制措施。

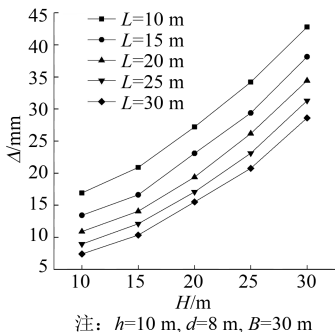


图7 隧道最大位移与大坑开挖深度关系

3.2 隧道位移预估计算式

基于前文所得各参数与Δ的关系,遵循函数形

式简单、物理意义明确的原则进行推导。本文定义参数组合变量 θ ,则有:

$$\theta = \left(\frac{H}{R}\right)^{a_1} \left(\frac{W - a_2 \omega B}{L + a_2 \omega B} - \frac{a_3(2d + R)}{2H}\right) \quad (1)$$

式中:

a_1, a_2, a_3 ——基本参数的组合系数;

ω ——大小基坑深度参数, $\omega = (H - h)/H$;

取多种工况下的计算数据,绘制 θ -Δ关系如图8所示。经过多轮试算,当 $a_1 = 2.5, a_2 = 1.1, a_3 = 2.0$ 时,可以得到最优拟合结果,各数据点呈多项式曲线型分布。

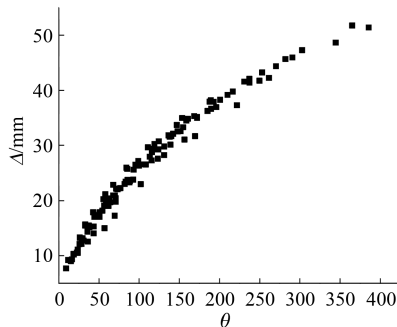


图8 Δ与θ关系

令:

$$\sigma = \Delta/R \quad (2)$$

则 θ 与 σ 均为无量纲变量。选择二次多项式函数为目标,代入各工况下的数值模拟结果,并利用Matlab软件拟合 θ 与 σ 的函数关系式,得到:

$$\sigma = -0.369 \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 + 3.29 \left(\frac{\theta}{100}\right) + 1.22 \quad (3)$$

$$\text{其中, } \theta = \left(\frac{H}{R}\right)^{2.5} \left(\frac{W - 1.1\omega B}{L + 1.1\omega B} - \frac{2d + R}{H}\right)。$$

由式(3)中 $R^2 = 0.98$,可验证式(3)的数据拟合度较高。

4 计算式修正及应用

实际工程中往往会采取一系列施工方法和加固措施来控制基坑围护结构的变形,进而减小其对周围环境的影响,以满足邻近地铁隧道的保护要求。结合工程实际,本文选取部分典型工况,针对大坑分区卸荷、小坑坑内土体加固和小坑钢支撑轴力伺服系统等3种基坑变形控制措施展开进一步研究,并对隧道位移预估计算式进行修正。

4.1 基坑变形控制措施

4.1.1 大坑分区卸荷

在大坑中部设置垂直于隧道方向的中隔墙,大

坑被分为左右两部分开挖(见图 9)。中隔墙厚度及插入比等参数与大坑的地下连续墙相同。此外,先开挖部分的地下结构施工后会产生压重作用,其在模型计算中等效为大坑底板厚度增加为 4 m。

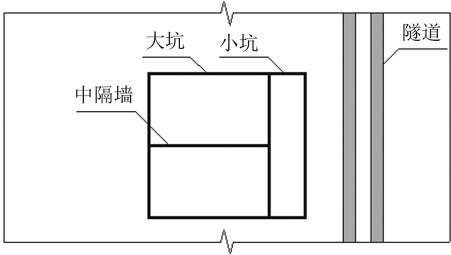


图 9 大坑分区卸荷示意图

4.1.2 小坑坑内土体加固

小坑加固常采用三轴搅拌桩满堂加固。模型中,加固深度范围为从小坑第二道支撑位置到隧道底部以下 5.8 m,如图 10 所示。模型中,土体加固通过增强加固区土体物理力学参数实现,加固土体同样采用 HS 本构模型,其基本物理性质指标如表 3 所示。

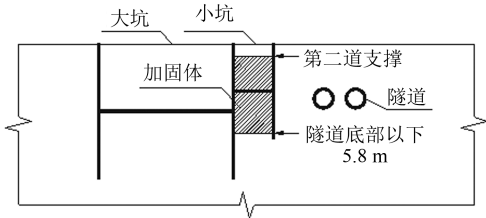


图 10 小坑坑内土体加固示意图

表 3 加固土体基本物理性质指标

土层	重度/ (kN/m ³)	压缩模量/ (MPa)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)
加固土体	19	9.32	30	30

4.1.3 小坑钢支撑轴力伺服系统

计算模型在小坑内除第一道支撑外的各道支撑上设置了与围护结构变形方向相反的集中力,以此来模拟钢支撑轴力伺服系统的作用。根据实际工程中的钢支撑布置密度及惯用轴力大小,可确定该模型中的集中力大小为 2 000 kN。此外,为了模拟钢支撑可快速施作的特点,小坑部分的开挖步骤为:①施作小坑第一、二道支撑,开挖小坑第一层土体,激活第二道支撑集中力。②施作小坑第三道支撑,开挖小坑第二层土体,激活第三道支撑集中力。以此类推,开挖至小坑底后,施作小坑底板。

4.2 计算式修正

大坑分区卸荷后,大坑部分仅考虑最大分区的卸荷对隧道位移的影响。根据 B 的增大,对其控制效果进行折减:

$$\alpha = a_4 S / (W - B) \tag{4}$$

式中:

- S ——最大分区平行于隧道方向的长度。
- α ——平面形状系数;当 $S \geq W - B$ 时, $\alpha = 1$ 。
- a_4 ——大坑最大分区卸荷的影响系数。

小坑坑内土体加固措施和小坑钢支撑轴力伺服系统往往同时采用。在计算式修正中,简化考虑二者的共同影响。实际工程中,钢支撑轴力伺服系统的轴力设定值根据围护结构变形要求确定,并根据施工过程中围护结构的实测变形情况及时调整。因此在修正计算式时可认为,当同时采用两种加固措施后,小坑开挖不再使邻近隧道产生额外位移,即式(1)中的 $a_2 \omega = 1$ 。修正后的 θ 为:

$$\theta = \left(\frac{H}{R} \right)^{2.5} \left(\frac{\alpha(W-B)}{L+B} - \frac{2d+R}{H} \right) \tag{5}$$

结合式(2)~(5)可以得到修正后的隧道位移预估公式,代入不同工况下的计算参数,将公式计算值与模型模拟值进行比较。经过多轮试算,当 $a_4 = 1.25$ 时计算结果最优。如图 11 所示,计算值与模拟值吻合良好。

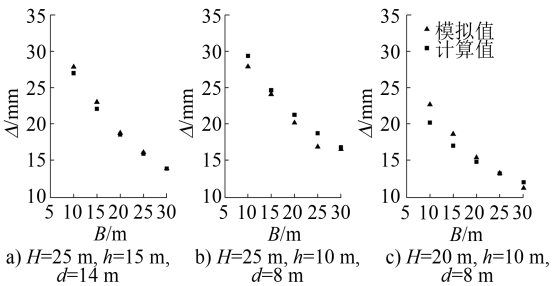


图 11 计算式计算结果与模型模拟结果对比

4.3 工程案例实践

本文选择了两个典型基坑工程开挖案例,对其邻近的地铁隧道位移进行预测。上海协和城二期北地块项目(案例 A)和上海嘉里静安综合发展项目(案例 B)的剖面图分别如图 12 及图 13 所示,工程概况如表 4 所示。

案例 A、B 侧向邻近地铁隧道的基坑施工时,使用式(2)~(5)对地铁隧道位移进行估算,并与实测值进行比较,结果如表 5 所示。

对比结果表明,利用本文提出的隧道位移预估

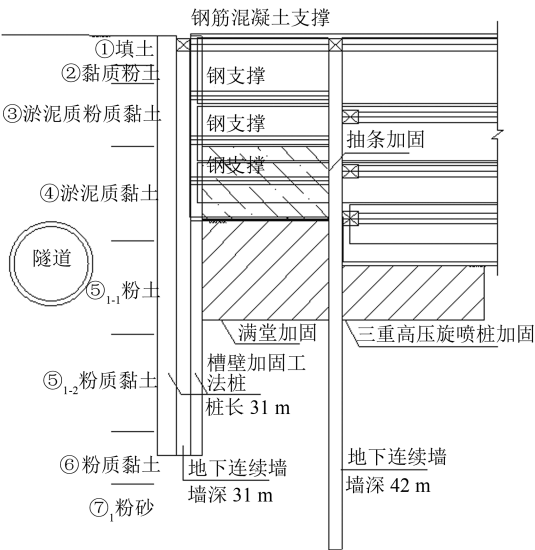


图 12 案例 A 基坑剖面图

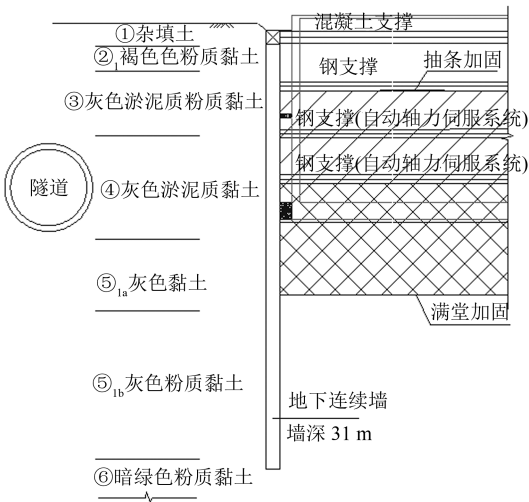


图 13 案例 B 基坑剖面图

表 4 工程概况

案例	L/m	d/m	B/m	h/m	H/m	W/m	S/m	R/m
A	7.3	14.0	13.6	13.70	17.00	45.3	168.8	6.2
B	8.0	8.3	16.0	14.95	16.65	95.3	103.8	6.2

表 5 隧道位移计算值与实测值对比

案例	实测值/mm	计算值/mm
A	4.00	5.87
B	9.80	11.10

计算式得到的预估结果较为可靠。由于实际工程中采用的基坑支撑体系刚度更大、变形控制措施更多,且预估计算式难以反映“分层、分段、分块、留

土护壁、限时对称平衡开挖支撑”的土方开挖过程,因而计算结果偏大。此外,施工质量的好坏、设计方案及施工统筹的合理与否,也会影响计算误差。

5 结论

1) 既有侧向邻近地铁隧道基坑施工时引起地铁隧道最大位移,同小坑开挖宽度和隧道与基坑净距间近似呈负相关的反比例函数关系,同隧道顶部埋深间近似呈负相关的线性关系,同小坑开挖深度间近似呈正相关的线性关系,同大坑开挖深度间近似呈正相关的最高次数大于一次的多项式函数关系。

2) 基坑开挖时,减小小坑开挖深度对隧道位移控制是有益的。小坑开挖宽度对隧道位移的影响程度随大小坑开挖深度差的增大而减小。一般情况下,当小坑开挖深度不小于大坑开挖深度的三分之二时,小坑开挖宽度不宜超过大坑开挖深度。各参数中,隧道与基坑的净距,以及大坑开挖深度对隧道位移影响尤为突出,在实际工程中应当特别注意基坑开挖深度较大、隧道与基坑净距较小的浅埋隧道,并加强对其的保护。

3) 本文提出的隧道位移预估计算式适用于上海软土地区。计算值与实测值的对比结果表明,计算结果较为可靠,可以作为工程实施前方案评估及措施比选的参考依据。

参考文献

[1] 贾坚,谢小林,翟杰群,等. 软土基坑变形控制的微扰动技术[J]. 上海交通大学学报(自然科学版),2016(10): 1651.

[2] 高广运,吴勇,张先林,等. 深基坑开挖与邻近隧道相互影响的分析[J]. 土木工程学报,2011(增刊2): 114.

[3] 郑刚,杜一鸣,刁钰,等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报,2016(4): 599.

[4] 贾坚,谢小林. 上海软土地区深大基坑的卸荷变形及控制[J]. 岩土工程学报,2008(增刊1): 376.

[5] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等. 基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J]. 岩土工程学报,2015(1): 83.

[6] 王卫东,王浩然,徐中华. 基坑开挖数值分析中土体硬化模型参数的试验研究[J]. 岩土力学,2012(8): 2283.

[7] 梁发云,贾亚杰,丁钰津,等. 上海地区软土 HSS 模型参数的试验研究[J]. 岩土工程学报,2017(2): 269.

(收稿日期:2020-04-03)