

文章编号:1673-9469(2015)02-0019-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2015.02.005

临近隧道基坑开挖中土体加固的敏感性分析

裴行凯¹,倪小东²

(1. 广州地铁设计研究院有限公司, 广州 510010; 2. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210098)

摘要:结合某软土地区基坑开挖对邻近隧道纵向影响保护方案,利用 ABAQUS 动态模拟基坑开挖对临近隧道纵向变形及隧道断面弯矩的影响,对比分析坑内三轴搅拌桩土体加固强度与加固深度作为保护方案的敏感性。分析得出:随着加固强度的增加,隧道纵向位移有显著减少,达到一定值后,约束作用明显减弱;加固强度的增加对隧道纵向截面弯矩影响较弱;加固深度对隧道的变形有明显的抑制作用,但并非加固深度越深越好;地下连续墙、被动土体加固对临近基坑开挖引起的位移具有阻断作用;针对本案例,提出最优加固强度 200 MPa 及加固深度 6 m,这既能对隧道变形起到很好抑制作用,又能实现最优的经济效益。

关键词:基坑开挖;有限元分析;盾构隧道;临近地铁

中图分类号:TU924

文献标识码:A

Reinforcement sensitivity of soil during excavating of foundation pit being adjacent to tunnels

PEI Xing - kai¹, NI Xiao - dong²

(1. Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd, Guangdong Guangzhou, 510010, China;

2. College of civil and transportation engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

Abstract: Based protection scheme of longitudinal impact of the excavation on the adjacent tunnel in soft soil, the influence of foundation pit excavation being adjacent to tunnel on longitudinal displacement and moment was systematically analyzed by using ABAQUS. Three shaft stirring pile was taken as protection scheme sensitivity by making comparisons between strength and depth of reinforcement. After comparison, it is found that the longitudinal displacement decreased obviously with increasing of reinforcement intension, and restriction effect decreased obviously when the longitudinal displacement reached certain value. The increase of reinforcement intension had little weaker effect on the longitudinal section monment. The reinforcement depth had obvious effect on the distortion of tunnel, but the big reinforcement depth was not optimal. The diaphragm wall and the passive soil reinforcement had blocking effect on the displacement caused by foundation pit excavation being adjacent to tunnel. In this study, the optimal reinforcement intension was 200 MPa and the reinforcement depth was 6 m, which can have good effect on the tunnel distortion and reach the good economical benefit.

Key words: deep excavation; finite element method; shield tunnel; adjacent tunnel

随着城市的发展,以及地铁周边区域的经济开发,越来越多的基坑工程出现在地铁区间隧道或车站的附近。这种近距离的开挖势必影响运营中的地铁,对地铁隧道及车站的保护提出了严峻的挑战。然而,从目前的研究现状来看,由于工

况的复杂性、施工方法的多样性,还没有提出较为精确的理论解析解。大多数工程在其建设前都采用数值模拟的方法来对地铁隧道或车站位移进行预估计。关于此问题,目前已有大量的研究成果发表^[1-9]。文[6]阐述了基坑工程要考虑环境的

收稿日期:2014-12-20

基金项目:教育部博士科研基金项目(20110094120002)

作者简介:裴行凯(1989-),男,河南洛阳人,硕士,主要研究方向为城市地下空间,岩土渗流力学。

影响,分析和总结了现有的一些有效治理措施和解决方案,提出应在勘探和初步设计中就要全面考虑各种影响因素;文[7-8]探索了利用坑内加固和基坑工程的时空效应施工法等措施来控制民用建筑基坑下已建成隧道的上抬变形;文[9]从隧道的垂直沉降、水平移动以及隧道的横向变形等角度探讨了基坑开挖对临近地铁隧道的影响。

本文基于 ABAQUS 建立基坑开挖对临近地铁隧道的三维动态分析模型,重点分析基坑土体加固方案对地铁隧道的保护,探讨不同加固强度与加固深度对临近地铁的敏感性影响,提出最优加固措施。

1 工程概况

拟建项目工程地块位于上海市宝庆路某地块,地处繁华商业区和交通干道,西侧邻近轨道交通 7 号线区间隧道。项目基坑开挖总面积 4 339.4 m²,基坑形状接近长方形,长约 82 m,宽约 53 m,开挖深度 15.8 m,基坑西侧外边界与邻近隧道平行,最近距离约 4.9 m。本地铁隧道为重点保护对象。为预防隧道变形,考虑基坑范围内采用三轴搅拌桩加固。

场地范围内土体从上至下为:①杂填土:主要由碎石类土、砂类土等组成,层厚 0.4~4 m;②粉质黏土:锰质氧化物及其结核,混少量钙质结核,可塑状态,层厚 2.8~7.1 m;③淤泥质粉质粘土:高压缩性,夹粉砂薄层,层厚 3.5~11.0 m;④淤泥质粘土:流塑,中压缩性,夹薄层粉砂,层厚 5.5~27.40 m;⑤粘土:透水性差,层厚 5.6~13.0 m。

2 模型的建立

考虑对称性取 1/4 作为研究模型,基坑开挖尺寸为 26 m×40 m。基本分析模型中考虑基坑开挖深度为 15 m。隧道与基坑最近距离 5 m,隧道中心距地面 15 m。两条盾构隧道位移基坑一侧,隧道中心埋深 15 m,隧道与基坑最近距离为 5 m,两条隧道中心间距为 15.6 m。模型如图 1 所示。该三维模型在平面上取 120 m×140 m,在深度方向上取 80 m。此外,围护结构采用地下连续墙,深度为 30 m,设 3 道水平支撑。

土体模拟根据地勘资料,利用修正剑桥模型,土体物理力学参数详见表 1。考虑盾构隧道的等效刚度模型,隧道弯曲刚度折减系数为 0.069 5,考虑隧道横向等效刚度对纵向等效刚度的折减系

数 0.75,可得隧道整体等效刚度系数为 0.052 1,则隧道等效刚度为 1.798 GPa。连续墙结构和隧道衬砌结构的计算参数如表 2 所示。

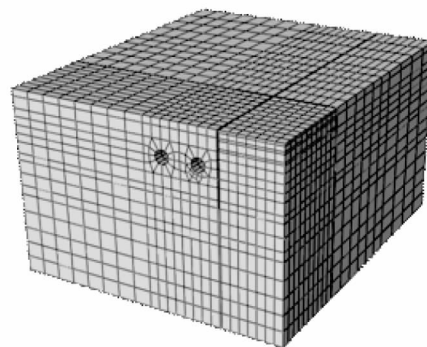


图1 基坑开挖计算模型

Fig.1 Calculation model of foundation pit excavation

表 1 土体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of the soil

序号	地层描述	重度 /kN·m ⁻³	粘聚力 /kPa	内摩擦 角/°	卸荷模 量 Eu/MPa
①	杂填土	18.1	0	22.0	18
②	粉质粘土	19.5	31	17.5	18
③	淤泥质粉质粘土	17.4	12	22.3	15
④	淤泥质粘土	16.9	13	12.1	32
⑤	粘土	17.9	17	13.5	43

表 2 结构计算参数

Tab. 2 Mechanical parameters of structure

名称	重度 /kN·m ⁻³	弹性模量 Eu/GPa	泊松比 ν
地下连续墙	25	28	0.25
隧道等效模型	25	1.798	0.15
混凝土支撑	25	28	0.25

3 土体加固因素的敏感性分析

本节讨论的是满膛式坑内加固。

3.1 坑内土体加固强度

为了考虑不同加固强度在基坑开挖对隧道纵向影响中的作用,选择加固深度至坑底以下 6 m,加固强度分别为 100、150、200 和 250 MPa 四个有限元模型,其他条件均与未加固时一致。

(1) 连续墙水平位移分析

从图 2 可以看出,采用不同加固方案和未加固时连续墙水平位移随深度的变化规律基本相同。坑内土体未加固时,地下连续墙的最大水平位移出现在距地面 12 m 处,最大水平位移为 19.91 mm。在不同加固强度条件下,基坑开挖深

度至 15 m 时,地下连续墙的最大水平位移均出现在距地面 12 m 深度处,为基坑开挖深度的 0.8 倍。可见,坑内土体加固程度对连续墙最大水平位移出现的位置没有影响,这是由于,地下连续墙的最大水平位移出现位置主要取决于开挖深度。

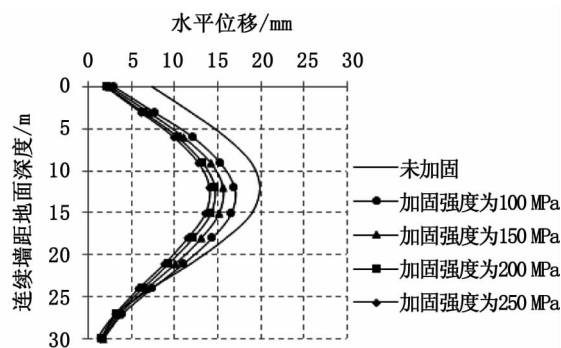


图2 地下连续墙侧移曲线

Fig.2 The horizontal displacement curve of diaphragm wall

由于坑内土体的加固措施,土体强度增强,对连续墙的水平位移起到很好的抑制作用。当坑内土体未加固时,地下连续墙的最大水平位移为 19.98 mm,加固土体墙体为 100、150、200 和 250 MPa 时,所对应的地下连续墙水平位移分别为 16.92、15.61、14.66 和 14.03 mm。坑内土体从未加固至加固强度为 100 MPa 时,地下连续墙最大水平位移的减小幅度为 2.99 mm,抑制效果非常明显。然而,土体强度从 100 MPa 依次增加 50 MPa 至 250 MPa 时,地下连续墙最大水平位移的减小幅度分别为 1.31、0.95 和 0.63 mm。因此,土体加固对地下连续墙的变形抑制非常明显,但土体达到一定强度后,这种影响逐渐减弱。

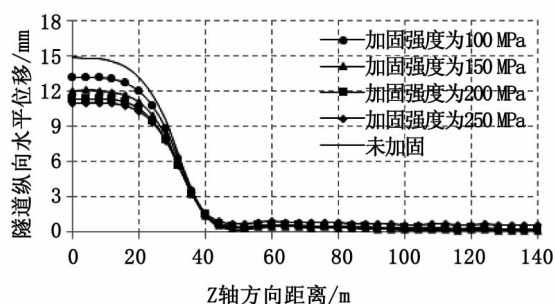


图3 不同加固强度下基坑开挖对隧道水平位移影响曲线
Fig.3 The displacement curve of tunnel with different strength of reinforcement when the foundation pit was excavated

(2) 隧道纵向位移分析

从图 3 来看,不同土体加固强度下,基坑开挖对隧道水平位移的影响在距离基坑中心截面 40 m 处逐渐趋于零,即基坑开挖长度范围内。

不同加固方案对隧道纵向水平位移的影响范围在离基坑中心 30 m 范围内,30 m 以外的隧道纵向水平位移所受土体加固强度的影响可以忽略。土体加固对隧道纵向水平位移的主要影响区域集中在离基坑中心 15 m 范围之内,在该范围内,土体加固对隧道纵向水平位移有明显的抑制作用。随着坑内土体强度的增加,土体强度对隧道纵向变形的影响趋势逐渐减小,为更好分析这种变化趋势,取隧道纵向最大水平位移作为研究对象。

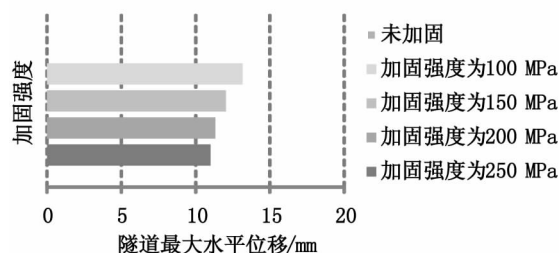


图4 不同加固强度下基坑开挖对隧道最大水平位移影响
Fig.4 The maximum displacement curve of tunnel with different strength of reinforcement when the foundation pit was excavated

从图 4 来看,不同土体加固强度下,基坑开挖对隧道水平位移的影响在距离基坑中心截面 40 m 处逐渐趋于零,即基坑开挖长度范围内,为不同加固强度对隧道纵向最大水平位移影响。未加固时隧道纵向最大水平位移为 14.81 mm,土体加固强度从 100 MPa 依次增加 50 MPa 至 250 MPa 时,隧道的纵向最大水平位移的减小幅度分别为 1.65、1.11、0.72 和 0.32 mm。可见,当土体从未加固至加固强度为 100 MPa 和加固强度为 150 MPa 时,隧道纵向最大有两次明显的减少,土体强度增加至 200 MPa 之后,土体强度对隧道纵向最大水平位移的约束作用明显减弱。

(3) 隧道横截面弯矩沿隧道纵向分析

由图 5 可知,未加固时隧道的纵向最大截面弯矩出现在距离基坑中心截面 20 m 处,最大弯矩值为 2 631 kN·m。基坑内采取加固措施后,隧道纵向整体弯矩有一定的减小,在距基坑中心截面 40 m 处弯矩有明显减小。坑内土体加固后,隧道沿纵向的最大截面弯矩出现在距基坑中心截面 24 m 处,最大弯矩值分别为 2 506、2 393、2 341 和 2272 kN·m。此处,靠近基坑一侧隧道衬砌为受拉应力。当加固强度从 100 MPa 增加至 250 MPa 的过程中,隧道纵向弯矩仅有微量的减小,可认为加固强度的增加对隧道纵向截面弯矩没有明显的影响。

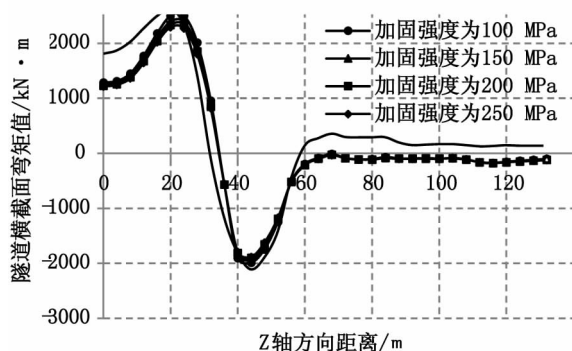


图5 不同加固强度下基坑开挖对隧道横截面弯矩影响纵向分布

Fig.5 The tunnel cross section moment of tunnel with different strength of reinforcement when the foundation pit was excavated

(4) 优化建议

从实际效果和经济角度综合考虑,土体加固深度对于抑制隧道的作用并非越深越好。对于本算例而言,当加固强度从未加固增加至 150 MPa 时,隧道的变形受到明显抑制,当继续增加加固强度时,这种抑制作用逐渐减弱。因此,针对本算例的工况,推荐的优化加固强度为 150 MPa。

3.2 坑内土体加固深度

在加固深度方面,选择相同的加固强度为 150 MPa,考虑不同加固深度在基坑开挖对隧道纵向影响中的作用,分别建立加固深度至坑底以下 3、6、9 和 12 m 四个有限元模型,其他条件均与未加固时一致。

(1) 连续墙水平位移影响

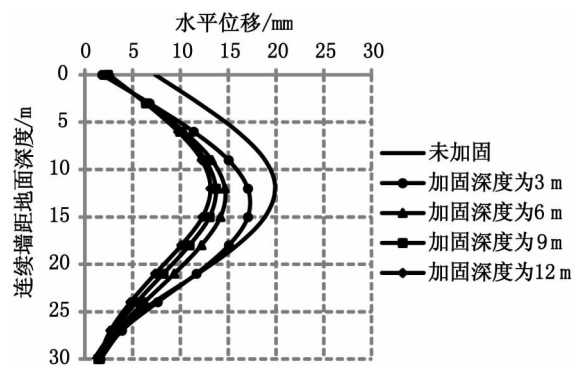


图6 地下连续墙侧移曲线

Fig.6 The horizontal displacement curve of diaphragm wall

由图 6 可知,由于坑内土体的加固措施,土体强度增强,对连续墙的水平位移起到很好的抑制作用。当坑内土体未加固时,地下连续墙的最大水平位移为 19.98 mm,加固土体墙体为 100、150、200 和 250 MPa 时,所对应的地下连续墙水平位移

分别为 16.92、15.61、14.66 和 14.03 mm。坑内土体从未加固至加固强度为 100 MPa 时,地下连续墙最大水平位移的减小幅度为 2.99 mm,抑制效果非常明显。然而,土体强度从 100 MPa 依次增加 50 MPa 至 250 MPa 时,地下连续墙最大水平位移的减小幅度分别为 1.31、0.95 和 0.63 mm。因此,土体加固对地下连续墙的变形抑制非常明显,但土体达到一定强度后,这种影响逐渐减弱。

(2) 隧道纵向水平位移分析

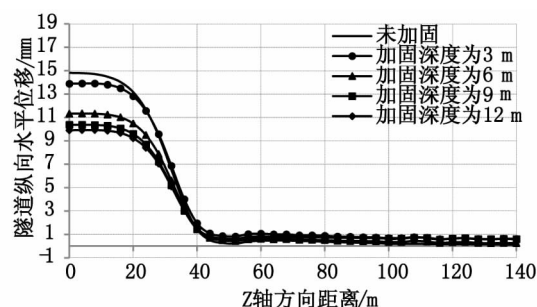


图7 不同加固深度下基坑开挖对隧道水平位移影响曲线

Fig.7 The displacement curve of different depth of reinforcement

从图 7 整体来看,不同加固深度下隧道水平位移沿纵向基本发生在基坑开挖长度范围之内,而不同加固条件对隧道纵向水平位移影响明显的范围集中在距离基坑开挖中心截面 20 m 范围内,从图中可以看出加固深度为 3 m 时对隧道纵向水平位移的影响不是非常明显,当加固深度增加至 6 m 时,隧道纵向水平位移有明显的减小,然而,随着基坑加固深度的继续增加,隧道纵向水平位移的减小趋势变的非常微弱。针对隧道纵向最大水平位移而言,为加固时隧道最大水平位移为 14.81 mm,当加固深度从 3 m 增加至 12 m 的过程中,隧道最大水平位移的减小幅度分别为 0.91、2.57、0.96 和 0.46 mm。可见,加固深度对隧道的水平位移有明显的抑制作用,但并非加固深度越深越好,实际工程中应选择最优的加固深度。

(3) 隧道横截面弯矩沿隧道纵向分析

从图 8 中可以看出,基坑加固深度的增加对隧道横截面沿纵向的弯矩影响非常明显,然而,随着加固深度的增加,加固深度对隧道横截面弯矩的削弱作用表现的越来越弱,尤其是加固深度从 6 m 增加至 12 m 时,隧道横截面的弯矩几乎没有变化。基坑加固深度为 3、6、9 和 12 m 时,隧道横截面的最大弯矩分别为 2 525、2 341、2 232 和 2 187 kN·m,位置出现在距离基坑开挖中心 20 m

处。与基坑加固深度对隧道水平位移的影响趋势相近,当加固深度从3 m增加到6 m时,有较明显的抑制作用,当加固深度超过6 m后,这种抑制作用明显减弱。

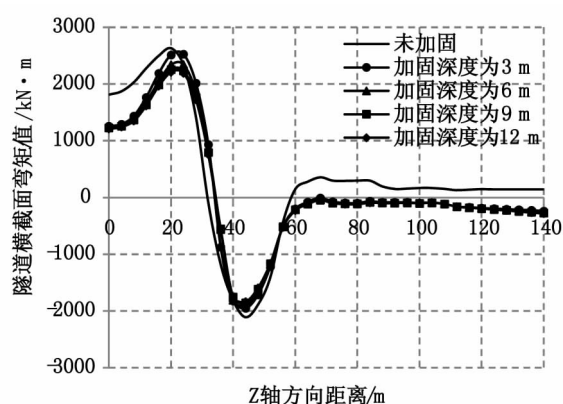


图8 不同加固深度下基坑开挖对隧道横截面弯矩影响纵向分布

Fig.8 The tunnel cross section moment of tunnel with different reinforcement depth when the foundation pit was excavated

4 结论

1)随着加固强度的增加,隧道纵向位移有显著减少,然而,当土体强度增加至200 MPa之后,土体强度对隧道纵向最大水平位移的约束作用明显减弱。在加固强度不断增加的过程中,隧道纵向弯矩仅有微量的减小,可认为加固强度的增加对隧道纵向截面弯矩影响较弱。

2)在加固深度不断增加的过程中,隧道水平位移的减小幅度明显,且呈现显著的收敛趋势。同时,对隧道断面弯矩而言,当加固深度从3 m增加到6 m时,隧道断面弯矩减小幅度较大,当加固深度超过6 m后,这种抑制作用明显减弱。可见,加固深度对隧道的变形有明显的抑制作用,但并非加固深度越深越好,对于本案例条件下,基坑土体的最优加固深度为6 m,此时,土体加固对隧道

纵向变形的影响可以起到很好抑制作用的同时也可实现最优的经济效益。

3)地下连续墙、被动土体加固等作为异质体,刚度远大于土体刚度,具有减小位移的屏障作用,对临近基坑开挖引起的位移具有阻断作用。另外,地下连续墙、支撑体系和被动土体加固组成完整的地下受力体系,能够有效的承受基坑侧向和底部土体产生的应力,对基坑开挖引起周围土体的变形起到关键的抑制作用。

参考文献:

- [1] 刘国彬,黄院雄,侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):202-207.
- [2] 吉茂杰,刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移的预测方法[J]. 同济大学学报,2001,29(5):531-535.
- [3] 董旭光,李忠. 兰州市某地铁车站深基坑开挖支护三维有限元分析[J]. 甘肃科学学报,2014,26(2):58-62.
- [4] 张志国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学,2011,32(7):2085-2092.
- [5] 郭延华,吴龙海. 南京地质地铁隧道施工的Peck公式修正[J]. 河北工程大学学报:自然科学版,2013,30(1):41-44.
- [6] 王卫东,吴江斌,翁其平. 基坑开挖卸荷对地铁区间隧道影响的数值分析[J]. 岩土力学,2004,25(Z2):251-255.
- [7] 况龙川,李志敏,殷宗泽. 地下施工影响地铁隧道的实测分析[J]. 清华大学学报:自然科学版,2000,40(Z1):79-82.
- [8] 况龙川. 深基坑施工对地铁隧道的影响[J]. 岩土工程学报,2000,22(3):284-287.
- [9] 刘国斌,侯学渊. 软土的卸荷模量[J]. 岩土工程学报,1996,18(6):18-23.

(责任编辑 王利君)