

邻近地铁隧道的深大基坑退界距离与分坑设计研究

俞璟睿¹ 何海波² 曾 婕¹ 宋林丰^{1,*} 成怡冲¹

(1. 浙江华展研究设计院股份有限公司, 宁波 315012; 2. 宁波市镇海箭湖工程项目管理有限公司, 宁波 315202)

摘 要 本研究基于宁波软土地区邻近地铁隧道的某深基坑工程, 采用有限元法分析了基坑与地铁隧道退界距离、隧道埋深及分坑方案不同时, 基坑开挖施工对邻近地铁隧道的的影响规律。研究表明, 隧道位移随基坑退界距离增加而减小; 相对于改变隧道与基坑距离, 隧道埋深对隧道的水平、竖向位移影响较小; 基坑的合理退界距离宜取 1.5 倍基坑开挖深度; 深大基坑垂直隧道方向可采用近、中、远的分坑方式, 近坑与中坑内部再分坑对控制隧道位移效果较好, 但是近坑内部分坑宽度小于 50 m 及中坑内部分坑宽度小于 80 m 后, 再继续减小分坑宽度对隧道位移的控制效果有限。研究成果可为类似深大基坑退界距离的选择和分坑设计提供参考。

关键词 深基坑, 盾构隧道, 位移影响区, 退界距离, 分坑措施

中图分类号: TU753 文献标志码: A DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0017

Research on Boundary Distance and Division Design of Deep and Large Foundation Pits Adjacent to A Subway Tunnel

YU Jingrui¹ HE Haibo² ZENG Jie¹ SONG Linfeng^{1,*} CHENG Yichong¹

(1. Zhejiang Huazhan Research and Design Institute Co., Ltd, Ningbo 315012, China;

2. Ningbo Zhenhai Jianhu Engineering Project Management Co., Ltd, Ningbo 315202, China)

Abstract Based on a deep foundation pit project adjacent to a subway tunnel in the soft soil area of Ningbo, the finite element method was employed to analyze the influence of excavation construction on the neighboring subway tunnel under varying conditions of boundary distance between the foundation pit and the tunnel, tunnel burial depth, and pit separation schemes. The findings indicate that tunnel displacement decreases as the distance from the excavation boundary increases. Compared to altering the distance between the tunnel and the foundation pit, the effect of tunnel burial depth on both horizontal and vertical displacement is relatively minor. A reasonable setback distance for the foundation pit should be approximately 1.5 times the excavation depth. For deep and large foundation pits, vertical zoning into near, middle, and far sections is recommended. Internal division within the near and middle sections proves effective in controlling tunnel displacement. However, when the width of the internal division in the near pit is less than 50 m and that in parts of the middle pit is below 80 m, further reduction of the division width shows limited effectiveness in controlling tunnel displacement. The results of this study can provide a reference for setback distance selection and pit design in similar deep and large foundation pit projects.

Keywords deep foundation pit, shield tunnel, displacement-affected area, setback distance, pit division measures

收稿日期: 2024-09-06

作者简介: 俞璟睿, 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程施工技术研究。E-mail: 165063640@qq.com

* 联系作者: 宋林丰, 男, 助理工程师, 主要从事岩土工程施工技术研究。E-mail: slfausghem@163.com

0 引言

随着城市轨道交通网络的形成及城市建设逐渐向地下空间发展,大量邻近既有轨道交通设施的工程建设行为不断出现,而宁波等典型软土地区,位于深厚软土中的轨道交通结构对土体位移十分敏感。同时,邻近轨道交通的地下空间是城市的黄金地段,尽可能缩短地下空间与轨道交通的距离,可提高地下空间利用率和土地商业价值。面对提高地下空间利用率和保障邻近地铁隧道安全这一矛盾,有必要开展相关研究以找出其中的平衡点。

近年来国内外学者对基坑开挖引起邻近隧道的扰动问题及邻近隧道基坑外侧土体变形影响区划分问题进行了不少的研究与探讨。郑余朝等^[1]采用 ABAQUS 分析了基坑近接不同空间位置关系下的既有地铁盾构隧道施工的影响程度,以隧道纵向变形曲率半径作为判别准则,划分了强、弱、无影响分区图,大致呈横向椭圆弧型。张建全等^[2]基于 17 个近接既有地铁结构的基坑案例,绘制了工程影响区域分布图,横向及竖向均分别以距基坑边线 0.7、1.0 倍基坑深度为划分临界点。董文斌和钟杨^[3]基于 ANSYS 有限元软件对基坑近接既有地铁隧道进行了施工全过程数值计算,以既有隧道的竖向变形作为判别准则,提出了考虑几何近接度和地质条件的近接施工强、弱、无影响分区界限理论净距。卞荣等^[4]用位移控制有限元法研究基坑围护结构变形对隧道的扰动规律根据 15 mm 扰动控制量划定了基坑邻近隧道所需的保护距离。刘波^[5]等收集了 42 个基坑开挖对侧方既有隧道影响的工程案例,明确了隧道发生隆、沉的判别条件,给出了坑外隧道竖向位移分区。从先前的研究中可以看出,大部分文章着重于基坑与邻近隧道的安全保护距离以及基坑开挖影响区的研究,但是不可忽视的是,基坑分坑方案是影响安全生产的关键手段,合理的分坑方案能够对邻近隧道安全起到积极作用,因此有必要在原来的研究基础上,进一步的研究分坑措施,探讨合理的分坑方案。

本文基于宁波市某二层地下室深基坑案例,利用有限元分析软件建立基坑与隧道的整体三维模型。深入研究基坑与地铁隧道退界距离、隧道埋深及基坑分坑方法对邻近地铁隧道的影响规

律,绘制旁侧基坑开挖引起隧道位移影响区图,为案例中地下结构退界优化设计及基坑分坑措施提供设计依据,也为软土地区类似案例提供借鉴参考。

1 工程概况

拟建项目位于宁波市,项目南侧邻近轨道区间隧道,项目地下室与隧道平行方向边长约 160 m,垂直方向边长约 280 m,面积约 44 160 m²。隧道采用盾构法施工,隧道外径为 6.2 m,衬砌厚度为 350 mm,隧道顶部埋深约 20.0 m。

基坑设计方案初步考虑将基坑划分为近、中、远三个坑,其中近坑宽度 20 m,进一步划分为 4 个坑,每个坑开挖面积约 790 m²;中坑宽度 50 m,进一步划分为 2 个坑,每个坑开挖面积约 4 100 m²;远坑开挖面积约 33 300 m²。基坑按照①—⑤的顺序分区块施工,每个基坑顶板施工完毕再开挖下一个基坑。

南侧近坑考虑了以下两种方案:①方案一考虑近坑为一层地下室,开挖深度为 6 m,围护形式采用 600 地连墙+一道混凝土支撑,墙深 20.5 m,插入比约为 1:2.8;②方案二考虑近坑为两层地下室,开挖深度为 10 m,近坑围护形式为 800 地连墙+两道混凝土支撑,墙深 27 m,插入比约为 1:1.8。中坑和远坑开挖均为两层地下室,开挖深度为 10 m,围护形式为 $\phi 800$ 钻孔灌注桩+两道混凝土支撑,桩长 22 m,插入比约为 1:1.3。基坑总平面图详见图 1。

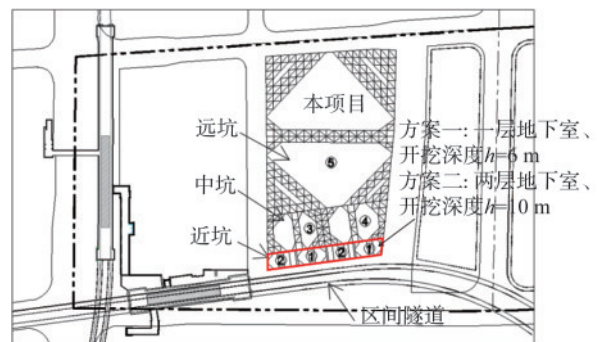


图 1 基坑总平面图

Fig.1 General plan of foundation pit

根据岩土工程勘察报告,基坑开挖范围内土层主要为①_{3b}淤泥质黏土层和②_{2b}淤泥质黏土层;支护桩底主要位于③₂粉质黏土夹粉土层和④_{1b}淤泥质粉质黏土层;盾构隧道主要位于④_{1b}淤泥质粉质黏土层,具体土层参数见表 1。

表1 土层参数
Table 1 Soil parameters

层号	岩土名称	层厚/m	重度/(kN·m ⁻³)	C/kPa	$\phi/(\text{°})$	$E_{\text{sed}}/\text{MPa}$	E_{50}/MPa	E_{ur}/MPa	G_0/MPa	$\gamma_{0.7}$
① ₂	黏土	1	18.3	29.1	16	4.84	4.84	14.52	29.04	0.000 1
① _{3b}	淤泥质黏土	12.5	17.2	11.5	9	1.97	1.97	5.91	11.82	0.000 1
③ ₂	粉质黏土夹粉土	8.5	18.7	15.7	12.6	3.51	3.51	17.55	52.65	0.000 1
④ _{1b}	淤泥质粉质黏土	13	18.0	13.4	10	2.61	2.61	13.05	39.15	0.000 1
④ _{2b}	粉质黏土	8	18.2	17.4	13	3.59	3.59	21.54	64.62	0.000 1
⑤ _{3a}	黏质粉土	10	18.8	16.9	15.5	4.89	4.89	29.34	88.02	0.000 1
⑦ ₂	粉质黏土	9	18.5	18.9	13.2	4.07	4.07	24.42	73.26	0.000 1
⑧ ₂	粉质黏土	5	19.3	25.5	16.6	4.97	4.97	29.82	89.46	0.000 1

2 地铁隧道退界三维有限元分析

2.1 研究方案

本项目地下室退区间隧道距离尚需进一步研究,因此,本节研究基坑与地铁隧道退界距离及隧道埋深不同情况下,基坑开挖施工对邻近地铁隧道的影响。分别考虑了方案一(一层地下室:开挖深度 $h=6\text{ m}$)和方案二(两层地下室:开挖深度 $h=10\text{ m}$),共建立了80个地铁隧道与基坑不同距离(L)、隧道不同埋深(H)情况下的三维有限元模型。建模方案分别考虑了不同 L/h 的8种情况以及 H/h 的5种情况。

模型中支护桩、地墙与隧道衬砌均采用板单

元进行等效替代,支撑采用梁单元,支护结构和衬砌采取弹性模型。土体本构关系采用HSS模型,各参数根据岩土工程勘察报告并参考宁波地区类似工程的反演数据取值,具体参见表1;盾构隧道以及基坑支护结构相关参数详见表2。三维有限元模型如图2所示。

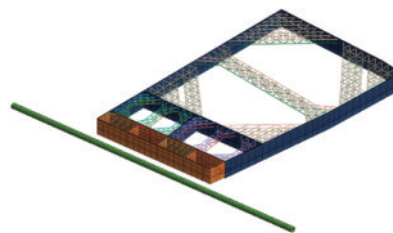


图2 三维有限元模型

Fig.2 Three dimensional finite element model

表2 盾构隧道及基坑支护结构参数

Table 2 Parameters of shield tunnel and foundation pit support structures

结构名称		截面尺寸/mm	材料	本构关系	备注	
一层地下室支撑	一道支撑	700×700	C30混凝土	弹性	梁单元	
二层地下室支撑	一道支撑	700×700	C30混凝土	弹性	梁单元	
	两道支撑	800×800	C30混凝土	弹性	梁单元	
地下室结构	一层地下室	顶板	250	C35混凝土	弹性	板单元
		底板	1 000	C35混凝土	弹性	板单元
	二层地下室	顶板	250	C35混凝土	弹性	板单元
		中板	200	C35混凝土	弹性	板单元
		底板	1 000	C35混凝土	弹性	板单元
区间隧道		350	C50混凝土	弹性	板单元	

2.2 隧道变形随基坑距离变化规律分析

图3和图4分别表明方案一与方案二的隧道水平位移随基坑距离的变化曲线。从图中可以看出,两种方案下隧道的水平位移变化规律基本一致。具体而言,不同埋深隧道的水平位移均为正值,即表现为朝向基坑方向变形;隧道水平位移随距离的增加而逐渐减小,且随着 L/h 的增大隧道水平位移斜率逐渐减小;各模型计算得到的隧道

水平位移均小于9 mm;整体上看方案二的隧道水平位移要大于方案一。

隧道竖向位移随距离变化曲线如图5、图6所示。当方案一基坑距离小于 $1.7h$ 时,隧道表现为隆起;距离大于 $2.5h$ 时,不同埋深隧道竖向位移为负值,表现为沉降。方案二变化趋势与方案一一致,当方案二基坑距离小于 $1.5h$ 时,隧道表现为隆起;距离大于 $2h$ 时,表现为沉降。此外,当方案一距离大于 $2.5h$ 或方案二距离大于 $2h$ 时,隧道竖向

位移随距离变化不显著。

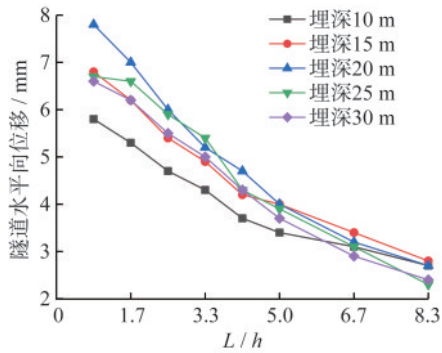


图3 隧道水平位移随基坑距离变化曲线(方案一)

Fig.3 Horizontal displacement curves of tunnel with distance variation (Scheme 1)

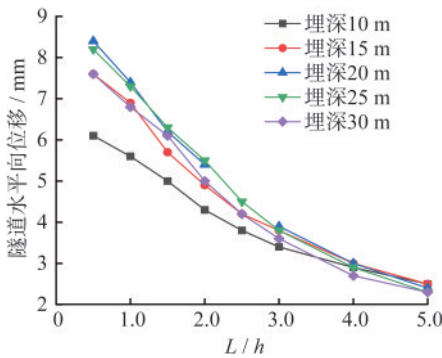


图4 隧道水平位移随基坑距离变化曲线(方案二)

Fig.4 Horizontal displacement curves of tunnel with distance variation (Scheme 2)

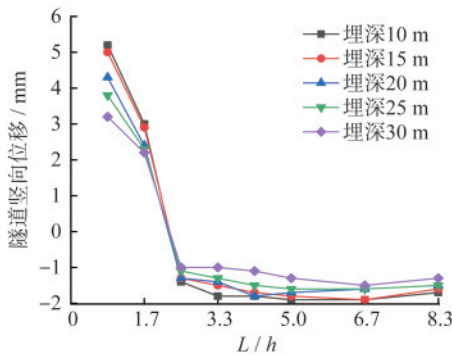


图5 隧道竖向位移随基坑距离变化曲线(方案一)

Fig.5 Vertical displacement curves of tunnel with distance variation (Scheme 1)

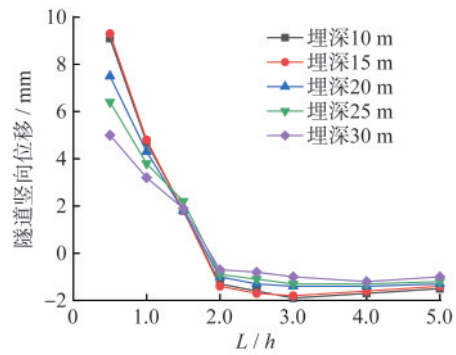


图6 隧道竖向位移随基坑距离变化曲线(方案二)

Fig.6 Vertical displacement curves of tunnel with distance variation (Scheme 2)

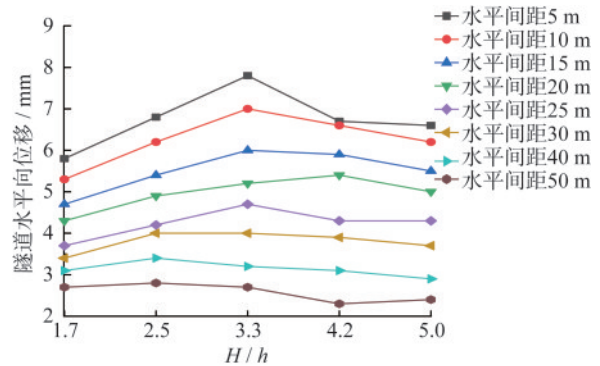


图7 隧道水平位移随隧道埋深变化曲线(方案一)

Fig.7 Horizontal displacement curves of tunnel with tunnel depth variation (Scheme 1)

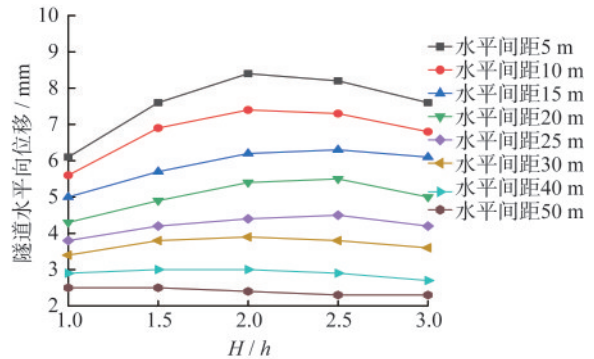


图8 隧道水平位移随隧道埋深变化曲线(方案二)

Fig.8 Horizontal displacement curves of tunnel with tunnel depth variation (Scheme 2)

2.3 隧道变形随隧道埋深变化规律分析

隧道水平位移随隧道埋深变化曲线如图7、图8所示。从图中可以看出,当方案一基坑与隧道水平距离小于15 m(2.5h)时或方案二小于20 m(2h)时,隧道的水平位移随隧道埋深呈现先增大后减小的趋势;当方案一基坑与隧道水平距离大于

15 m(2.5h)或基坑与隧道水平距离大于20 m(2h)时,隧道的水平位移随隧道埋深增加变化不明显。

从图9、图10中可以看出,方案一与方案二中隧道竖向位移随隧道埋深变化规律相似。当基坑与隧道水平距离小于10 m时,隧道隆起随隧道埋深增加而逐渐减小;其他水平距离情况下,隧道竖向位移随隧道埋深增加而变化不明显。相对于改变隧道与基坑距离,改变隧道埋深对隧道的水平、

竖向位移影响较小。当隧道距离基坑较近时,改变隧道埋深对隧道变形有影响,当隧道距离基坑较远时,改变隧道埋深对隧道变形影响较小。

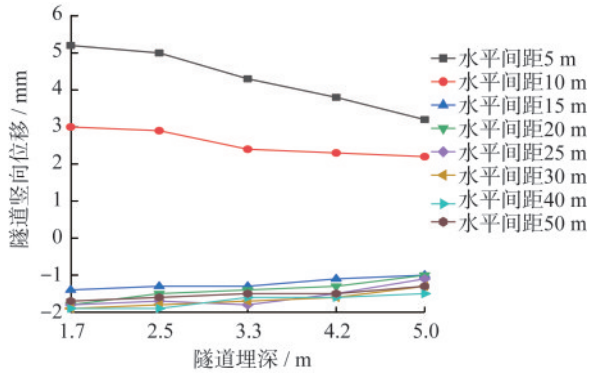


图9 隧道竖向位移随埋深变化曲线(方案一)

Fig.9 Vertical displacement curves of tunnel with depth of burial variation (Scheme 1)

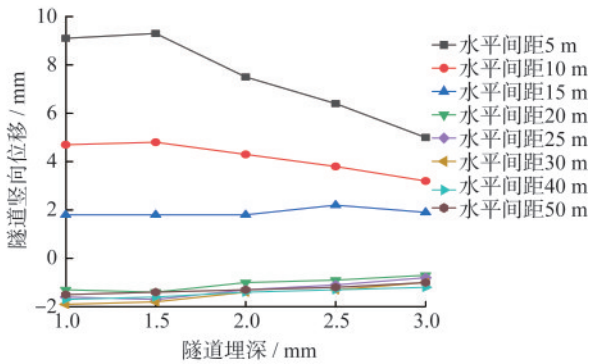


图10 隧道竖向位移随埋深变化曲线(方案二)

Fig.10 Vertical displacement curves of tunnel with depth of burial variation (Scheme 2)

2.4 基坑周边地铁隧道位移影响区划分

对于已铺轨区间隧道,隧道变形控制值一般情况为10 mm,报警值为7 mm,预警值为5 mm。考虑到前期桩基施工可能导致盾构区间产生2~3 mm的位移,为使最终变形在控制值以内,本文将7 mm作为退界控制线,5 mm作为主要影响区控制线。基于此,分别绘制方案一和方案二基坑邻近隧道的水平位移和竖向位移影响区图,如图11—图14所示。图中红色曲线为5 mm控制线,黄色曲线为7 mm控制线,红色点标注为本项目实际位置。

从方案一基坑邻近隧道水平位移影响区图可以看出,隧道埋深为3.3h(20 m)情况下,当隧道与基坑距离大于1.7h(10 m)时,隧道水平位移小于7 mm。从邻近隧道竖向位移影响区图可以看出,隧道竖向位移相对较小,大部分小于5 mm,当隧

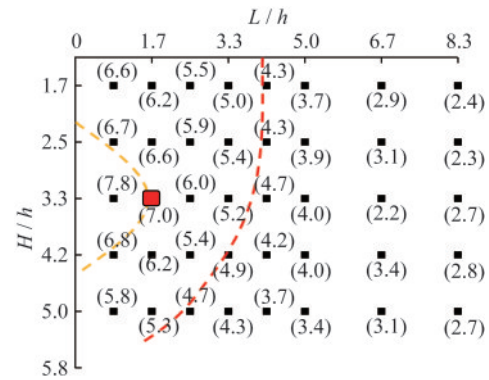


图11 隧道水平位移影响区图(方案一)

Fig.11 Diagram of the horizontal displacement influence zone of the tunnel (Scheme 1)

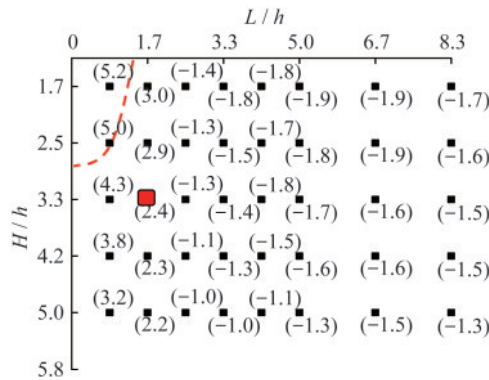


图12 隧道竖向位移影响区图(方案一)

Fig.12 Diagram of the vertical displacement influence zone of the tunnel (Scheme 1)

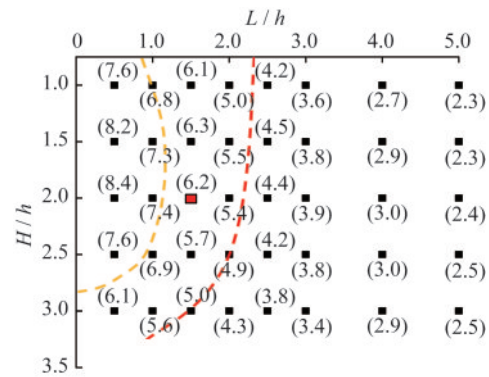


图13 隧道水平位移影响区图(方案二)

Fig.13 Diagram of the horizontal displacement influence zone of the tunnel (Scheme 2)

道与基坑水平距离小于10 m(1.7h)时,隧道表现为隆起,其余情况下隧道表现为沉降。综上,隧道和方案一基坑最小水平距离宜控制在10 m。

从方案二基坑邻近隧道水平位移影响区图可以看出,隧道埋深为2h(20 m)情况下,当隧道与基坑距离大于1.5h(15 m)时,隧道水平位移小于

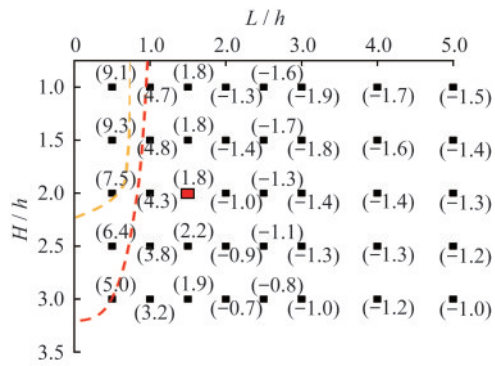


图 14 隧道竖向位移影响区图(方案二)

Fig.14 Diagram of the vertical displacement influence zone of the tunnel (Scheme 2)

7 mm。从隧道竖向位移影响区图可以看出,当隧道与基坑水平距离小于 15 m ($1.5h$) 时,隧道表现为隆起,隆起值为 1.8~9.3 mm;隧道与基坑水平距离大于 15 m ($1.5h$) 时,隧道表现为沉降,沉降值为 1.9~2.2 mm。综上,隧道和方案二基坑最小水平距离宜控制在 15 m。

通过查阅相关文献^[5-9]、调研本地案例等方式收集整理了共 45 例信息相对较完善的邻近地铁隧道的深基坑工程案例以构建数据库,如图 15 所示。

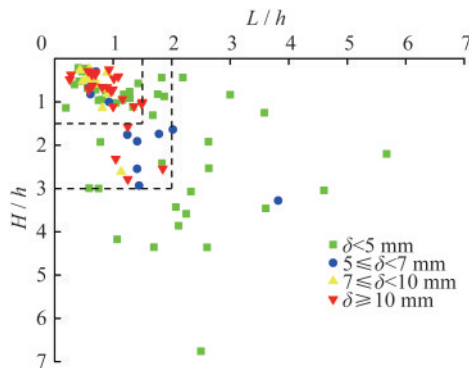


图 15 隧道水平位移与隧道-基坑相对位置的关系

Fig.15 Relationship between horizontal displacement of tunnel and relative position between tunnel and foundation pit

图 15 以基坑-隧道的距离与基坑开挖深度的比值为横坐标,以隧道埋深与基坑开挖深度的比值为纵坐标,对不同程度的隧道变形(δ)予以区分。该图可以较直观地反映隧道变形与基坑-隧道相对位置之间的关系。由图可知,隧道变形超过报警值的项目,隧道位置基本都在水平向距基坑 2 倍挖深、竖向距地表 3 倍挖深的范围内,且水平向和竖向均为 1.5 倍挖深范围内的密度更大。因此,对于挖深 6 m 的基坑而言,退界距离宜大于 10 m;对于挖深 10 m 的基坑而言,退界距离宜大

于 15 m。这与上述通过数值模拟得出的退界结论一致。

3 减少地铁隧道变形的分坑措施研究

3.1 研究方案

根据相关规范^[10],宁波轨道交通控制保护区范围宜根据基坑体量进行修正,本项目修正后保护区范围按 80 m 考虑,即不考虑 80 m 范围外基坑开挖的影响。从第 2 节研究结论可知,方案一基坑与隧道最小距离控制在 10 m 为宜。因此,本节选取方案一,考虑基坑距离隧道 10 m 时,研究距离区间隧道 80 m 范围内基坑分坑对邻近地铁隧道的影响。在靠近隧道侧划分 20 m 宽近坑,并在 80 m 控制线处设置分隔桩,近坑与分隔桩间为 50 m 宽中坑。

研究小基坑分坑影响时,各分坑示意图如图 16 所示。研究中基坑分坑影响时,各分坑示意图见图 17 所示。基坑按照①—④的顺序依次开挖施工,前一基坑顶板施工完毕,再开挖后一基坑。为减小模型计算时间,研究近坑的分坑时,不考虑中坑的影响;研究中坑的分坑时,仅考虑近坑划分为 4 个小基坑情况。

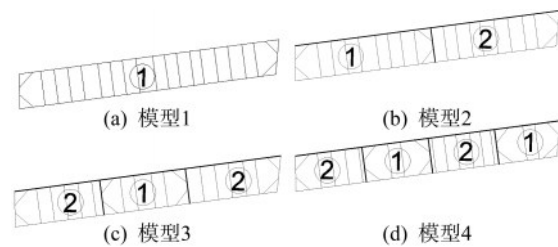


图 16 近坑分坑模型平面图

Fig.16 Plan of the near-pit division model

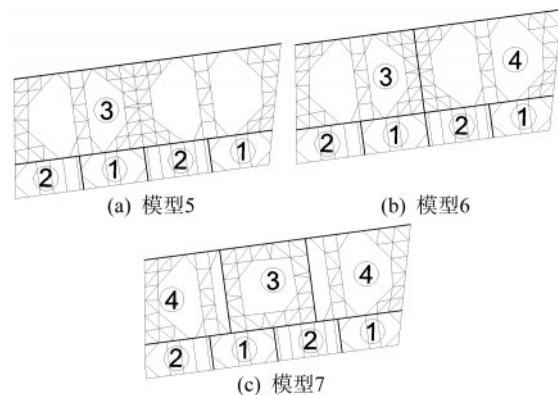


图 17 中坑分坑模型平面图

Fig.17 Plan view of the middle-pit division model

3.2 分坑效果分析

3.2.1 近坑分坑措施对隧道变形的影响

图 18 和图 19 分别为隧道水平位移和竖向位移随分坑数量变化曲线。可以看出,隧道竖向位移和水平位移受分坑数量的影响规律较为接近,即两者随分坑数量的增加(分坑宽度减小)逐渐减小。近坑从 1 个坑增加到 2 个坑时,隧道位移影响较大,水平位移减小了 37%,竖向位移减小了 22%;从 2 个坑增加到 4 个坑时,隧道水平位移减小了 20%,隧道竖向位移减小了 5.5%。当分坑宽度较小(小于 50 m)时,虽然隧道水平位移仍有一定程度减小,但其水平位移已为一个较小值,再继续减小分坑宽度,对减小隧道水平位移意义不大。因此,本项目近坑宜划分为 2~3 个小坑。

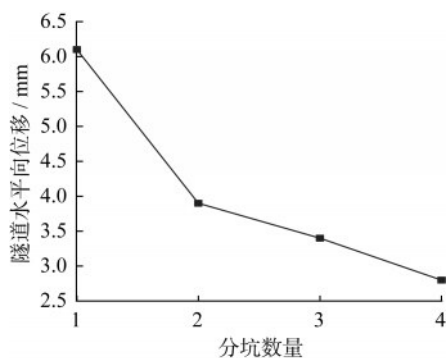


图 18 隧道水平位移随分坑数量变化曲线

Fig.18 Horizontal displacement curves of tunnel with the number of pit divisions

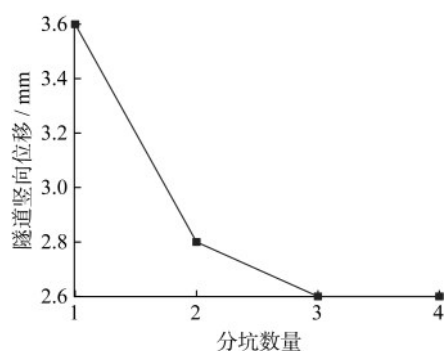


图 19 隧道竖向位移随分坑数量变化曲线

Fig.19 Vertical displacement curves of tunnel with the number of pit divisions

3.2.2 中坑分坑措施对隧道变形的影响

本文同样就中坑分坑措施对隧道变形影响进行模拟,绘制隧道位移随中坑分坑变化曲线,如图 20、图 21 所示。从图上可以看出,近坑分坑确定的情况下,中坑分坑措施对隧道造成的影响规律

与小坑类似。图 20 表明,当中坑从 1 个坑增加到 2 个坑时,隧道水平位移减小了 24%;从 2 个坑增加到 3 个坑(分坑宽度约 80 m)时,隧道水平位移减小了 7%。从图 21 隧道竖向位移随分坑数量变化曲线可以看出,隧道竖向位移随中坑分坑数量的增加变化较小,即相对隧道竖向位移,分坑措施对减小隧道水平位移效果更明显。

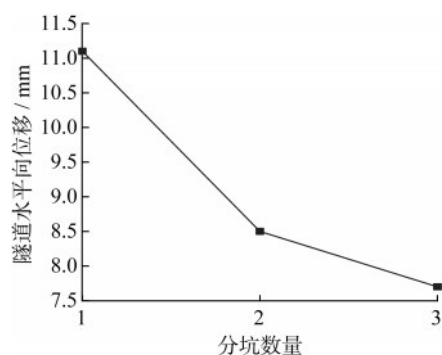


图 20 隧道水平位移随中坑分坑数量变化曲线

Fig.20 Horizontal displacement curves of tunnel with the number of middle-pit divisions

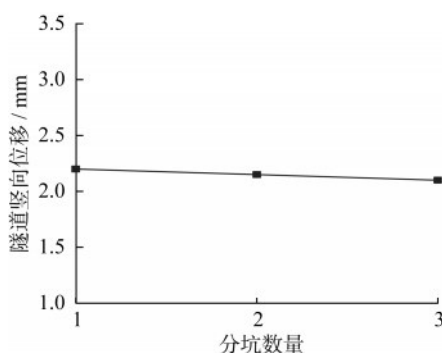


图 21 隧道竖向位移随中坑分坑数量变化曲线

Fig.21 Vertical displacement curves of tunnel with the number of middle-pit divisions

4 结 语

本文结合宁波软土地区某邻近地铁隧道的深基坑工程,对基坑设计中的退界和分坑问题进行研究,主要结论如下:

(1) 邻近基坑的隧道水平位移均表现为朝向基坑方向,水平位移随与基坑距离增加而逐渐减小,水平位移减小速率随距离增加而变缓;隧道竖向位移随与基坑距离增加而减小,距离小于 2~2.5h 时(h 为基坑开挖深度),竖向位移减小速率较快,其他情况竖向位移变化不明显;水平距离小于 1.5~1.7h 时,隧道表现为隆起变形,其他情况表现为沉降变形。

(2) 相对于改变隧道与基坑距离,隧道埋深对隧道的水平、竖向位移影响较小。当隧道与基坑距离小于 $2\sim 2.5h$ 时,隧道埋深对隧道变形有一定影响;当隧道距离基坑较远时,隧道埋深变化对隧道变形影响不明显。

(3) 通过数值模拟和案例统计得出的基坑施工对隧道的影响区图均表明,邻近隧道的基坑的退界距离宜大于 1.5 倍基坑开挖深度。

(4) 隧道水平位移和竖向位移随分坑数量的增加逐渐减小;相对隧道竖向位移,分坑措施对减小隧道水平位移效果更明显;当分坑宽度小于一定值后,再继续减小分坑宽度,对减小隧道位移影响不大,性价比不高。

(5) 建议对于本文所分析的深大基坑,垂直隧道方向总体采用近、中、远的分坑方式;近坑宽度 20 m,平行隧道方向进一步划分为 4 个基坑;中坑宽度 50~70 m,平行隧道方向进一步划分为 3 个基坑。

参 考 文 献

- [1] 郑余朝,施博文,孙克国,等.基坑近接既有地铁盾构隧道施工影响分区方法[J].西南交通大学学报,2017,52(5):910-918.
ZHENG Yuchao, SHI Bowen, SUN Keguo, et al. Zoning method for the construction impact of adjacent subway shield tunnels in foundation pits [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(5): 910-918. (in Chinese)
- [2] 张建全,闫宇蕾,宋伟超,等.地下工程施工工程影响分区综合研究与应用[J].施工技术,2020,49(7):65-67,108.
ZHANG Jianquan, YAN Yulei, SONG Weichao, et al. Comprehensive study and application of impact zoning in underground engineering construction projects [J]. Construction Technology, 2020, 49(7): 65-67, 108. (in Chinese)
- [3] 董文斌,钟杨.基坑近接既有地铁隧道施工影响分区及应用研究[J].交通世界,2020(22):85-89.
DONG Wenbin, ZHONG Yang. Research on the zoning and application of construction impact of foundation pit adjacent to existing subway tunnel [J]. Transportation World, 2020(22): 85-89. (in Chinese)
- [4] 卞荣,贺雷,严远忠,等.基坑围护结构变形对邻近既有隧道的影响及其安全保护距离研究[J].建筑结构,2021,51(增2):1532-1537.
BIAN Rong, HE Lei, YAN Yuanzhong, et al. Research on the influence of deformation of foundation pit enclosure structure on adjacent existing tunnels and its safety protection distance [J]. Building Structure, 2021, 51(Add 2): 1532-1537. (in Chinese)
- [5] 刘波,章定文,李建春.基于多案例统计的基坑开挖引起侧方既有隧道变形预测公式及其工程应用[J].岩土力学,2022,43(增1):501-512.
LIU Bo, ZHANG Dingwen, LI Jianchun. Prediction formula for deformation of existing lateral tunnels caused by excavation of foundation pits based on multi case statistics and its engineering application [J]. Geotechnical Mechanics, 2022, 43(Add 1): 501-512. (in Chinese)
- [6] 徐日庆,申硕,董梅,等.软土地区基坑开挖诱发邻近盾构隧道水平位移的简化算法[J].湖南大学学报(自然科学版),2021,48(3):153-163.
XU Riqing, SHEN Shuo, DONG Mei, et al. Simplified algorithm for inducing horizontal displacement of adjacent shield tunnels during excavation of foundation pits in soft soil areas [J]. Journal of Hunan University (Natural Science Edition), 2021, 48(3): 153-163. (in Chinese)
- [7] 杜一鸣.基坑开挖对邻近既有隧道变形影响及保护研究[D].天津:天津大学,2017.
DU Yiming. Research on the influence and protection of deformation of adjacent existing tunnels during excavation of foundation pits [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017. (in Chinese)
- [8] 顾钰雯,徐勋倩,杨霄,等.基坑开挖引起邻近地铁隧道变形简化计算方法[J].粉煤灰综合利用,2023,37(4):20-30.
GU Yuwen, XU Xunqian, YANG Xiao, et al. Simplified calculation method for deformation of adjacent subway tunnels caused by excavation of foundation pits [J]. Comprehensive Utilization of Fly Ash, 2023, 37(4): 20-30. (in Chinese)
- [9] 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,2016,38(4):599-612.
ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu, et al. Study on the influence zone of adjacent existing tunnel deformation caused by excavation of foundation pit [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599-612. (in Chinese)
- [10] 宁波市建筑基坑工程技术细则:2019 甬 DX-06[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
Technical code for building foundation excavation engineering of Ningbo, 2019 Yong DX-06 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)