

文章编号: 1674-599X(2022)01-0088-09

基坑开挖对既有地铁隧道变形的影响研究

杨坡¹, 袁明², 王昊²

(1. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 2. 常州市轨道交通发展有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 为研究基坑开挖对下穿既有地铁隧道变形的影响, 考虑土体的小应变刚度, 建立了有限元模型, 模拟了基坑开挖过程, 研究竖向开挖卸荷对下覆隧道变形的影响规律, 分析不同开挖深度时下覆隧道的变形特性和变形影响区域, 对比了不同基坑土体加固措施对隧道变形的控制效果。研究表明: 竖向卸载主要引起隧道的竖向变形, 坑底隆起, 隧道竖向变形和影响区范围随着开挖深度的降低而减小, 建议基坑土体加固平面上选择满堂加固, 竖向上选择回掺式加固, 基坑土体加固强度宜为0.5~1.5 MPa。

关键词: 基坑开挖; 既有隧道; 变形; 开挖深度; 基坑土体加固

中图分类号: TU47

文献标志码: A

Study on effects of foundation pit excavation on the deformation of existing metro tunnel

YANG Po¹, YUAN Ming², WU Hao²

(1. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China;

2. Changzhou Rail Transit Development Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: To study the influence of foundation pit excavation on the deformation of existing metro tunnel, the finite element method considering the small strain of soil was adopted to simulate the excavation process. The influence of vertical excavation unloading on the deformation of the underlying tunnels was studied. Besides, the deformation characteristics and the influenced zone of the tunnels were analyzed with different excavation depths. The controlling effects of different soil reinforcement measures on tunnel deformation were compared. The results show that the vertical unloading mainly causes the vertical deformation of tunnels, with the decrease of the excavation depth, the vertical deformation of tunnel and the influenced zone are decreased. It is suggested that the entire basal soil reinforcement selected for the soil reinforcement of foundation pit in horizontal plane, and the back tail reinforcement is selected in vertical plane. The proper strength of soil reinforcement for foundation pit is between 0.5 and 1.5 MPa.

Keywords: foundation pit excavation; existing tunnel; deformation; excavation depth; foundation pit soil reinforcement

随着城市现代化快速发展, 地下空间的合理利用成为城市建设的重点。地铁作为城市公共交通的重要组成部分, 具有运量大、速度快、安全舒适等优点。近年来, 越来越多的基坑开挖在既有地铁隧道的邻近区域进行, 导致地铁隧道产生不

同程度变形, 严重时会导致隧道结构破坏。针对这种情况, 国内外学者结合实际工程进行了大量研究。郑刚等人^[1]采用有限元模拟, 分析了侧向基坑开挖引起邻近地铁隧道的变形参数。邹伟彪等人^[2]采用有限元与现场监测动态分析了基坑开挖卸

收稿日期: 2020-08-07

基金项目: 江苏省常州市科技局科技支撑计划项目(CE20185014)

作者简介: 杨坡(1990—), 男, 北京城建勘测设计院有限责任公司工程师。

载对地铁隧道的影响。李宇升等人^[3-4]则是借助三维数值模拟分析了基坑施工对邻近隧道的力学特性和变形影响。Liang 等人^[5]采用理论解析方法计算相邻开挖时隧道的纵向变形。规范^[6]也对既有地铁隧道变形控制提出了明确要求。

考虑基坑位于隧道上方时, 主要采用现场监测、试验方法、有限元模拟和理论计算等方法^[7-9], 现场监测往往需要较长数据采集周期, 影响工程进度。试验方法模型设计标准不明确, 耗时长, 耗资大, 而理论方法简单方便, 常用于实际工程, 但对实际受力状态进行了一定程度地简化。有限元方法可以较好地模拟施工过程, 充分考虑参数变化的影响。因此, 为了保障既有隧道结构安全, 预防下方隧道因基坑开挖产生管片破裂、接缝处漏水等损害, 研究基坑竖向开挖对下覆既有隧道变形影响, 划分隧道影响区范围, 分析开挖深度与土体加固形式等对隧道变形的影响。

在本研究中, 考虑基坑处于隧道上方时, 对基坑坑底和围护结构的不同位置设置隧道时, 采用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法, 研究基坑竖向开挖卸荷对隧道变形的影响规律。根据隧道隆起变形控制标准, 划分出不同的影响区范围。研究改变基坑开挖深度对隧道竖向位移、坑底隆起和影响区的影响, 分析不同土体加固方案对隧道变形的控制效果, 从而实现对既有隧道影响的预测、评估和控制。

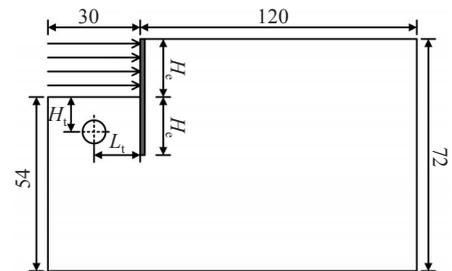
1 计算模型概况

1.1 模型建立

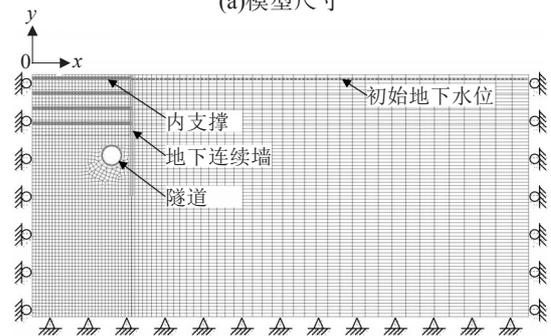
采用与文献[1]近似的模型尺寸, 如图1(a)所示。参考常见地下二层车站基坑深度, 取基坑深度 H_c 为18 m, 基坑宽度为60 m。采用地下连续墙加水平内支撑支护形式, 地下连续墙壁厚0.8 m, 深度36 m ($2H_c$)。首道水平支撑距地表1 m, 其余间距4.5 m。根据模型的对称性, 取基坑尺寸的一半进行建模, 模型坑外取值范围为120 m (约 $6.7H_c$), 坑底以下深度取值54 m ($3H_c$), 目的是消除边界效应影响。隧道为典型的地铁盾构隧道, 其外径为6.0 m。隧道中心距地下连续墙边缘水平距离为 L_t , 距坑底竖向距离为 H_t 。

建立二维平面应变模型, 如图1(b)所示。其中, 土体采用平面应变单元, 地下连续墙、内

支撑和既有隧道采用beam单元。为提高计算收敛性, 网格采用三角形和四边形混合网格, 并在基坑、隧道重点研究区域减小网格尺寸提高精度。对于位移边界条件, 模型两侧设置水平单向约束, 底部设置水平和竖向双向约束, 顶面设置为自由面。荷载边界条件主要考虑自重应力, 不考虑其他荷载。水位边界条件通过节点水头方式施加。模型按照图中坐标系建立, 坐标原点位于模型左上角, x 、 y 方向分别为水平和垂直方向。



(a)模型尺寸



(b)二维有限元计算模型

图1 有限元模型示意 (单位: m)

Fig. 1 Schematic of finite element model (unit:m)

1.2 计算参数选取

相关研究表明^[9-14], 模拟基坑开挖引起的隧道变形, 需要考虑土体的小应变刚度特性, 尤其是高模量和高度非线性。因此, 在本研究中土体采用考虑土体小应变刚度特性的小应变硬化模型 (hardening soil model with small strain stiffness, 简称为HSS模型)^[15]。HSS模型包含13个参数, 为了消除不同土层成层性影响, 计算采用单一土层, 选取典型的粉质黏土层作为计算土层。土体参数通过取样后进行室内试验测量, 单位重度 $\gamma=19.78$ kN/m³, 剪胀角 0° , 孔隙比 $e=0.64$, 初始剪切模量 $G_0^{ref}=99.28$ MPa, 剪切应变值 $\gamma_{0.7}=0.20 \times 10^{-3}$, 有效黏聚力 $c'=13.95$ kN/m³, 有效内摩擦角 $\varphi'=25.66^\circ$, 参考割线模量 $E_{50}^{ref}=7.21$ MPa, 参考切线模量 $E_{oed}^{ref}=5.05$ MPa, 参考卸载再加载模量 $E_{ur}^{ref}=36.77$ MPa, 幂指数 $m=0.8$, 卸载再加载泊松比 $\nu_{ur}=0.2$, 参考压

力 $P^{ref}=100 \text{ kPa}$, 破坏比 $R_f=0.9$, 静止侧压力系数 $K_0=0.57$ 。模型中, 地下连续墙、隧道管片和基坑内支撑结构均为钢筋混凝土材料, 因此, 采用线弹性本构模型模拟, 单位重度取 24.5 kN/m^3 , 弹性模量取 30 GPa 、泊松比取 0.2 。

1.3 模拟工况设置

选取隧道竖向位移作为隧道变形影响区范围的划分指标, 采用等值线法对隧道变形情况进行

分析。改变 L_t 和 H_t 得到不同隧道位置, 而围护墙变形采用典型内撑式基坑的内凸式变形模式。

隧道中心距地下连续墙水平距离 L_t 分别取 9 个不同值, 隧道中心距基坑坑底竖向距离 H_t 分别取 10 个不同值, 组合后得到 90 种不同隧道位置, 如图 2 所示。水平方向上, 隧道中心间隔 3 m ; 竖直方向上, 坑底以下 $1H_c$ 范围内的隧道中心间隔 3 m , $1H_c$ 范围外的隧道中心间隔 6 m 。

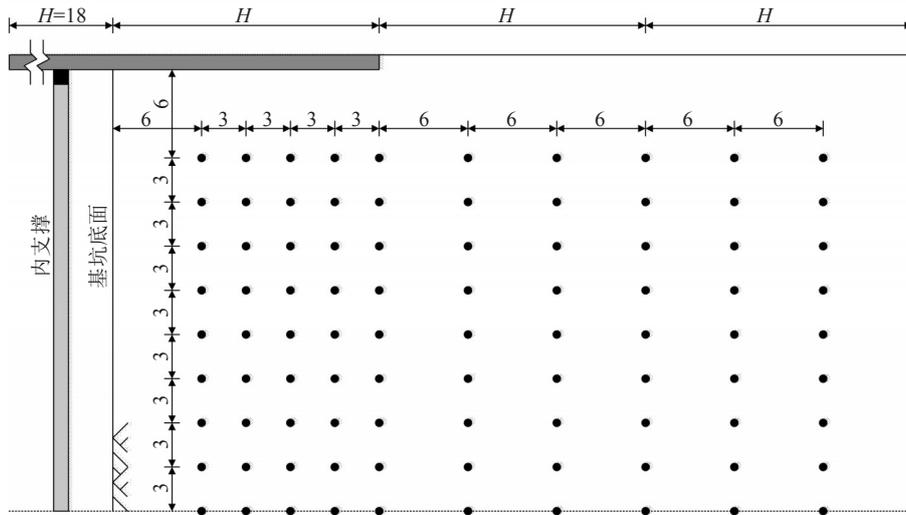


图2 基坑坑底以下隧道不同位置示意 (单位: m)

Fig. 2 Different positions of tunnels below the bottom of foundation pit (unit:m)

采用应力-渗流耦合分析考虑坑内降水对隧道变形的影响。初始水位位于地表以下 1.5 m , 采用分层降水模式开挖土层, 随后架设水平支撑。重复该步骤, 直至开挖到设定标高。其中, 初始应力场计算和地下连续墙施工计算结束后, 设置位移清零, 即不考虑初始应力场和地下连续墙施工

产生的变形, 只考虑后续基坑降水、开挖产生的变形。为了研究基坑开挖深度对坑底以下隧道变形特性及影响区的影响, 保持水平方向与竖直方向隧道中心间隔和数值模拟步骤不变, 增设工况见表 1。不同开挖深度 H_t 与 L_t 组合后共计 216 个计算模型。

表1 增设工况

Table 1 Additional working conditions

H_c/m	H_t	L_t	模型个数
15	6、9、12、15、21、27、33、39、45	6、9、12、15、18、21、24、27、30	81
12	6、9、12、18、24、30、36	6、9、12、15、18、21、24、27、30	63
9	6、9、15、21、27	6、9、12、15、18、21、24、27、30	45
6	6、12、18	6、9、12、15、18、21、24、27、30	27

2 竖向卸载的影响

2.1 隧道变形分析

坑底以下 90 个不同位置处隧道拱顶竖向位移如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 当 L_t 相同时, 改变 H_t 对拱顶竖向位移影响显著; 当 H_t 相同时, 改

变 L_t 对拱顶竖向位移影响较小。因此, H_t 对隧道拱顶竖向位移的影响比 L_t 的更大。坑底以下不同位置处隧道变形情况如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 基坑开挖至坑底时, 隧道竖向发生隆起变形, 水平方向发生向坑内位移, 隧道竖向变形大于水平变形, 且拱顶竖向变形最大, 隧道截面变形表现为“竖鸭蛋”形。

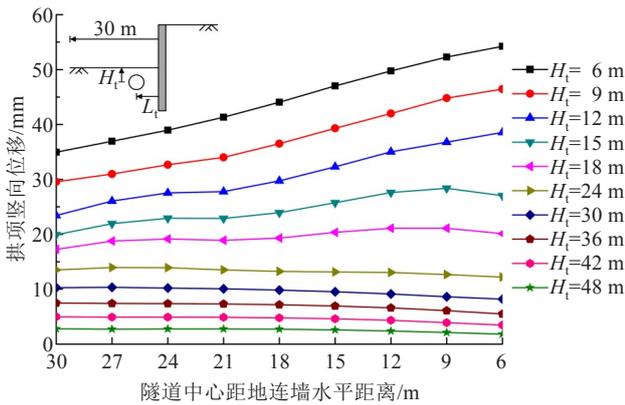


图3 坑底以下不同位置处隧道拱顶竖向位移

Fig. 3 Vertical displacement of tunnels vault at different positions below the pit bottom

2.2 隧道变形影响区分析

隧道三级变形控制标准与变形影响区划分与文献[1]一致, 如图 5 (a) 所示。因隧道边缘 3 m (隧道中心外 6 m) 内一般不允许施工, 但图 5 中等值线范围未包括此区域。可见, 随着变形控制值增大, 坑底以下隧道变形影响区范围逐渐减小, 隧道越靠近坑底, 隧道变形越大。为快速确定隧道变形影响区范围, 在图 5 (a) 基础上引入 3 个坐标值, 即影响宽度 (L)、影响深度 (H_1 、 H_2)。得到隧道变形影响区的统一表达形式, 如图 5 (b) 所示。3 个不同隧道变形控制等级下影响区确定参数见表 2。

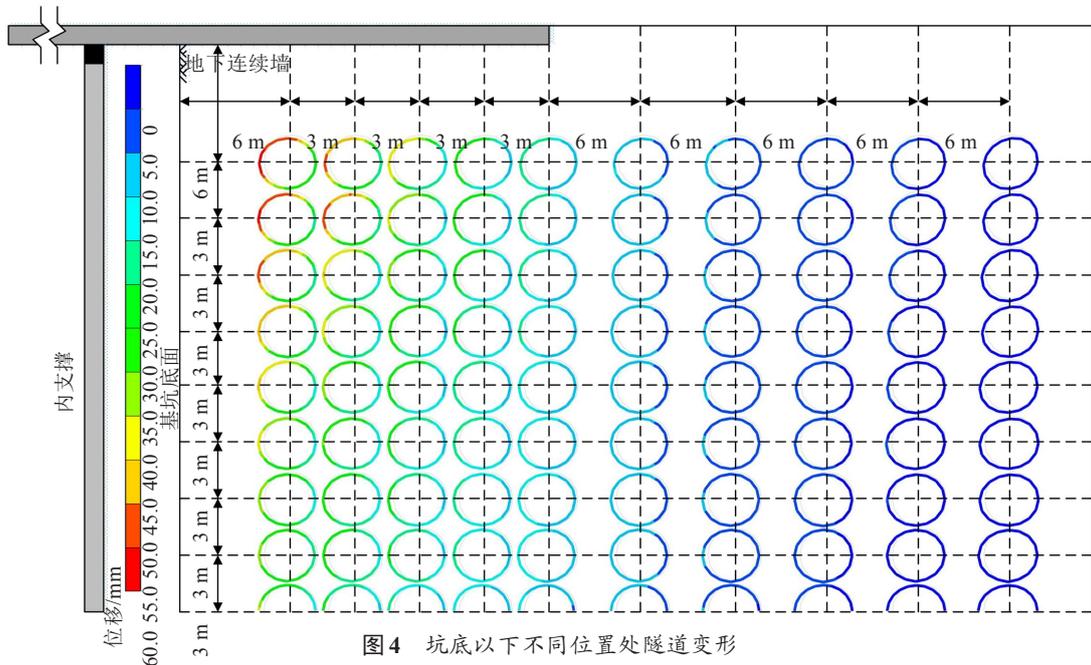
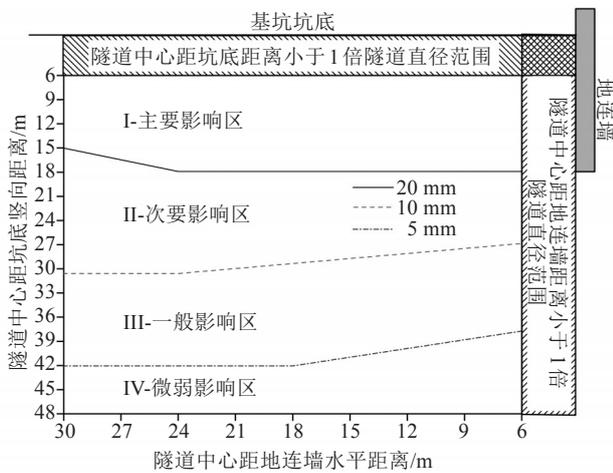
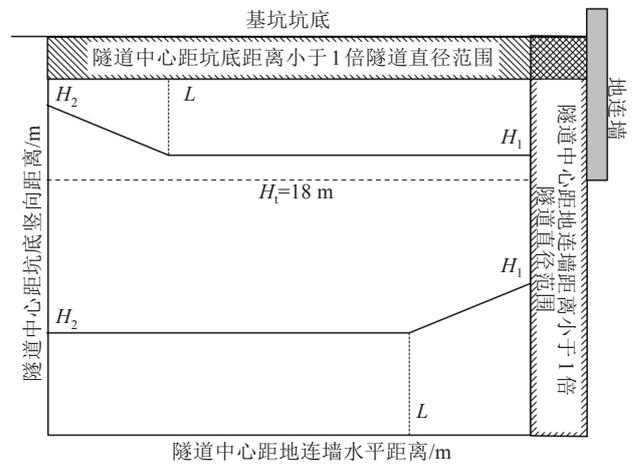


图4 坑底以下不同位置处隧道变形

Fig. 4 Tunnel deformation at different positions below the pit bottom



(a)简化后的隧道变形控制标准对应的影响区



(b)基坑坑底以下隧道变形影响区模式

图5 既有隧道变形影响区

Fig. 5 Influenced zones of existing tunnels

表2 影响区范围确定参数

Table 2 Scope determining parameters of the influenced zones

参数	控制值/mm		
	20	10	5
L	24	24.0	18.0
H_1	18	27.0	37.5
H_2	15	30.5	42.0

3 开挖深度的影响

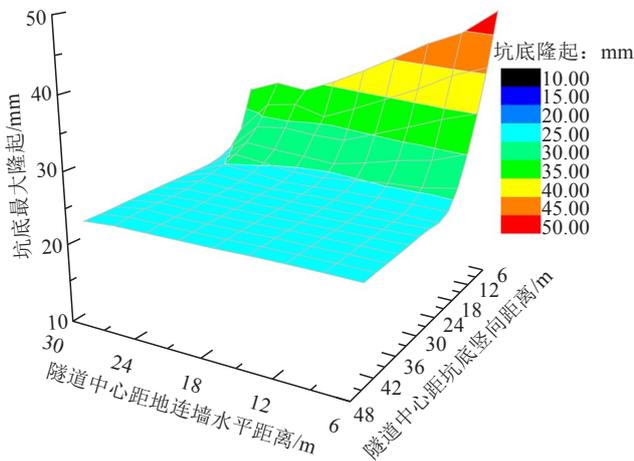
在模型的基础上，仅改变 H_e 的大小，保持其余参数不变，模拟工况见表1，进一步考虑基坑开挖深度对下覆隧道变形特性及变形影响区的影响。

3.1 对坑底隆起的影响

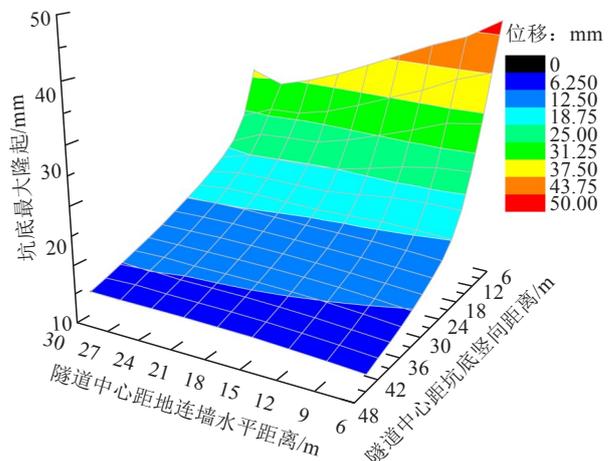
当基坑开挖深度为15、6 m时，坑底以下隧道不同位置的坑底最大隆起($\delta_{sv_{max}}$)如图6所示。从图6中可以看出，坑底隆起随基坑开挖深度降低而降低。同一基坑开挖深度时，坑底隆起随着 H_1 增加而减小，而 L_1 增加对坑底隆起影响较小。

3.2 对隧道竖向位移的影响

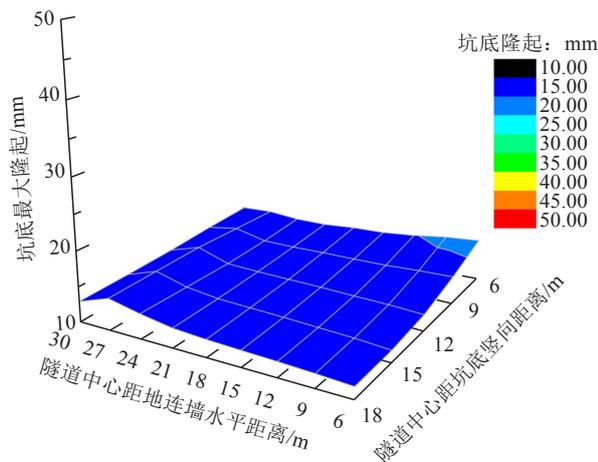
当基坑开挖深度 $H_e=15、6$ m时，隧道坑底以下不同位置的拱顶竖向位移如图7所示。从图7中可以看出，隧道拱顶竖向位移随着基坑开挖深度降低而降低。同一基坑开挖深度时，拱顶竖向位移的变化规律与隧道拱顶竖向位移的相似。



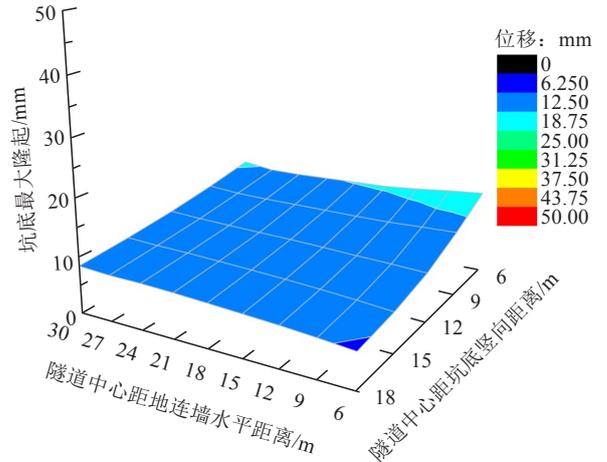
(a) $H_e=15$ m



(a) $H_e=15$ m



(b) $H_e=6$ m



(b) $H_e=6$ m

图6 不同基坑开挖深度时坑底最大隆起

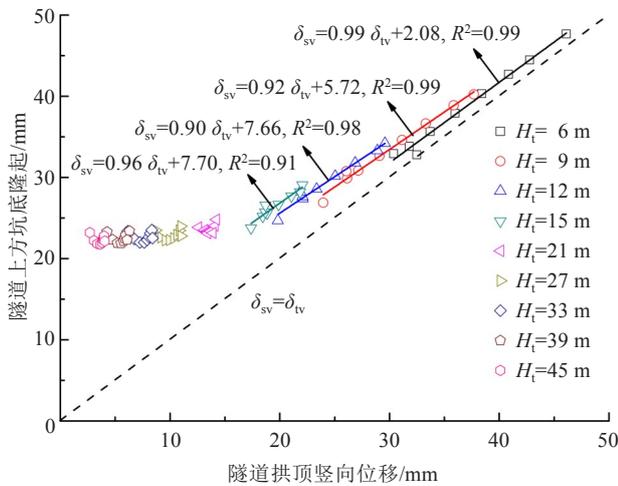
Fig. 6 Maximum heave of pit bottom under different excavation depths

图7 不同基坑开挖深度时隧道拱顶竖向位移

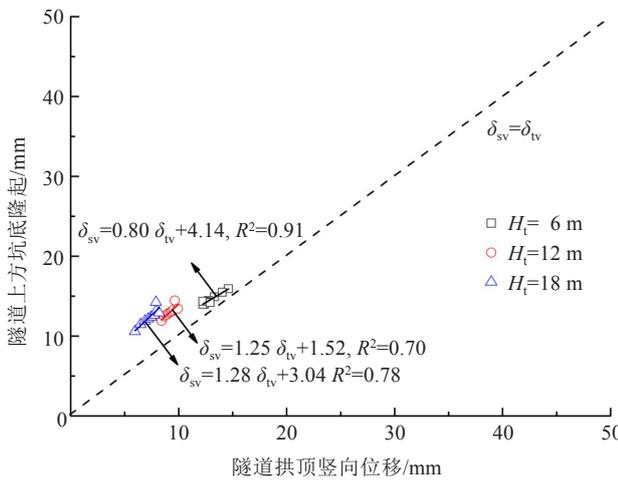
Fig. 7 Vertical displacement of tunnels vault under different excavation depths

3.3 坑底隆起与隧道竖向位移关系

基坑开挖深度为 15、6 m 时, 隧道正上方坑底隆起 (δ_{sv}) 与隧道拱顶竖向位移 (δ_{tv}) 之间的关系如图 8 所示。从图 8 中可以看出, 不论何种开挖深度, 隧道正上方坑底隆起均大于隧道拱顶竖向位移。当隧道中心距坑底竖向距离在 1 倍基坑开挖深度范围内时, δ_{sv} 与 δ_{tv} 为良好的线性关系, H_t 越小, 线性关系越好。当隧道中心距坑底竖向距离在 1 倍开挖深度范围外时, δ_{sv} 与 δ_{tv} 关系曲线的斜率更大, 线性关系较弱。



(a) $H_e=15\text{ m}$



(b) $H_e=6\text{ m}$

图 8 不同基坑开挖深度时坑底变形与隧道变形关系

Fig. 8 The relationship between pit bottom deformation and tunnel deformation under different excavation depths

3.4 基坑开挖深度对隧道变形影响区的影响

开挖深度分别为 15、12、9、6 m 时, 坑底隧道变形影响区如图 9 所示。纵坐标归一化为隧道中心距坑底竖向距离与开挖深度之比 (H_t/H_e), 横坐

标归一化为隧道中心距地下连续墙水平位移与基坑半宽度之比 (L_t/B)。

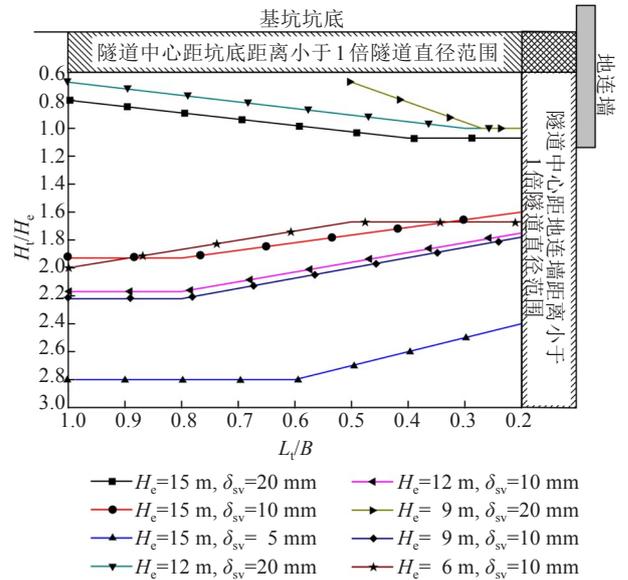


图 9 不同基坑开挖深度时归一化隧道变形影响区范围

Fig. 9 Normalized influenced zones of tunnel deformation under different excavation depths

影响区的划分与隧道变形影响区保持一致, 对于 $H_e=15\text{ m}$ 工况, 主要影响区大约位于坑底以下 $1H_e$ 范围内; 次要影响区大约位于坑底以下 $2H_e$ 范围内; 微弱影响区大约位于坑底以下 $3H_e$ 范围内。对于 $H_e=12、9、6\text{ m}$ 的工况, 主要影响区范围逐渐缩小甚至消失, 次要影响区和弱影响区范围有所扩大。因此, 基坑开挖深度越低对隧道变形的影响越小。

4 基坑土体加固方案对比

4.1 基坑土体加固方案

当隧道处于主要影响区内时, 基坑开挖导致的隧道变形大于 20 mm, 超过规范规定的最大变形控制值, 需要对基坑土体进行加固。建立二维有限元计算模型, 分析基坑土体加固强度和加固方式对坑底以下隧道变形的影响, 确定出最佳加固方案, 并对加固方案的效果进行分析。平面布置形式设置为满堂加固、裙边加固、抽条加固, 如图 10 所示。土体加固竖向布置形式设置为平板式、回掺式、分层式, 两者组合后共 9 种工况, 如图 11 所示。加固土强度分别取 $q_u=0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0\text{ MPa}$, 共 8 种工况。加固形式和加固强度组合后共 72 种工况。

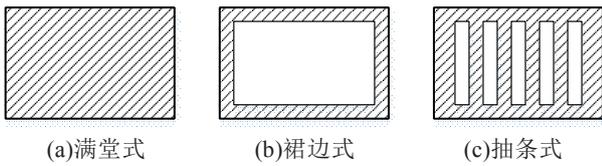


图10 基坑土体加固平面布置形式

Fig. 10 Plane layout form of foundation pit soil reinforcement

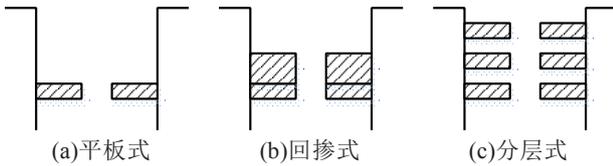


图11 基坑土体加固竖向布置形式

Fig. 11 Vertical layout forms of foundation pit soil reinforcement

加固土的本构模型采用摩尔库伦模型，黏聚力与无侧限抗压强度比值 c/q_u 取 0.25；内摩擦角 φ 根据不同的无侧限抗压强度在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 之间取值；弹性模量取 $E=130q_u$ 。不同无侧限抗压强度对应的水泥加固土物理力学参数见表 3。

表3 水泥加固土物理力学参数

Table 3 Physical and mechanical parameters of cement stabilized soil

无侧限抗压强度/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/°	弹性模量/MPa	重度/(kN·m ⁻³)	泊松比
0.5	125	21	65	20.0	0.34
1.0	250	22	130	20.2	0.32
1.5	375	23	195	20.4	0.30
2.0	500	24	260	20.6	0.28
2.5	625	25	325	20.8	0.26
3.0	750	26	390	21.0	0.24
3.5	875	27	455	21.2	0.22
4.0	1 000	28	520	21.4	0.20

表4 基坑土体加固后隧道变形降低的百分比

Table 4 Percentage of tunnel deformation reduction after foundation pit soil reinforcement

加固形式	加固土强度/MPa								%
	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	
满堂加固 平板式	28.97	39.67	45.94	50.18	53.51	56.09	58.30	60.15	
满堂加固 回掺式	30.81	41.70	47.79	52.21	55.54	58.49	60.52	62.55	
满堂加固 分层式	30.81	42.25	48.71	53.14	56.64	59.41	61.81	63.65	
抽条加固 平板式	25.28	33.39	37.45	40.22	42.25	44.46	45.94	47.05	
抽条加固 回掺式	27.31	35.06	39.30	42.07	43.91	45.76	47.23	48.52	
抽条加固 分层式	27.31	35.98	40.41	42.99	45.39	47.42	49.08	50.18	
裙边加固 平板式	24.91	32.10	36.35	39.11	41.14	43.36	44.10	44.10	
裙边加固 回掺式	25.83	33.21	37.27	40.22	42.25	44.46	45.94	46.13	
裙边加固 分层式	25.83	33.76	37.82	40.96	42.80	45.39	47.05	47.23	

4.4 基坑土体加固对隧道变形的影响

采用该加固方案后，坑底以下 90 处隧道拱顶竖向位移如图 13 所示，与图 3 对比，基坑土体加

4.2 加固形式对隧道变形控制效果的影响

不同基坑土体加固形式和加固强度时隧道拱顶竖向位移变化曲线如图 12 所示。当 $L_1=6\text{ m}$ 、 $H_1=6\text{ m}$ 时，隧道竖向位移最大，选取该处隧道为研究对象，分析基坑土体加固的控制效果。

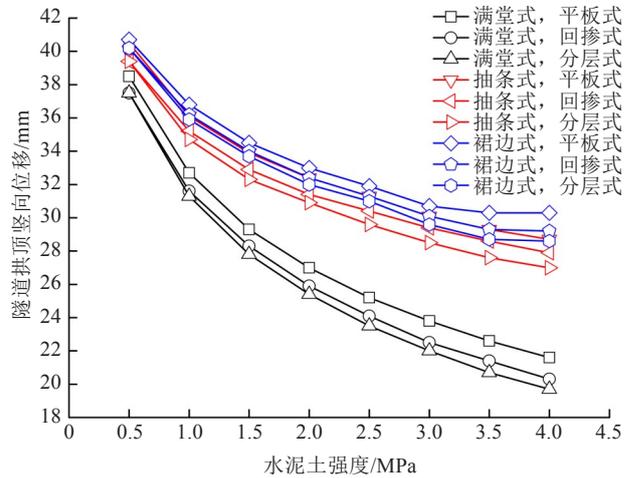


图12 隧道拱顶竖向位移变化曲线

Fig. 12 Vertical displacement change of tunnels vaults

4.3 加固强度对隧道变形控制效果的影响

从图 12 中还可以看出，隧道竖向位移随着加固土强度增加而降低，但降低的幅度逐渐放缓。基坑土体加固后隧道变形情况见表 4。由表 4 可知，隧道拱顶竖向位移降低幅度随着加固土强度的增大而增大。当加固土强度大于 1.5 MPa 时，增大加固土强度对加固效果影响不明显，仅通过增加加固土强度来提高对隧道变形的控制效果是不经济的。因此，加固土强度宜在 0.5~1.5 MPa 之间。

固后隧道变形显著降低，表明：基坑土体加固对隧道变形可以起到明显的控制作用。坑底以下 1 倍开挖深度范围内隧道变形沿基坑半宽度的分布特

征发生改变。因此, 隧道变形等值线被简化为同一种折线形式, 如图 14(a)所示。

根据简化后的折线, 得到隧道变形影响区的统一表达形式, 如图 14(b)所示。3 个不同隧道变形控制等级下影响区确定参数见表 5。与表 2 相比, 基坑土体加固减小了隧道变形影响区, 加固效果良好。

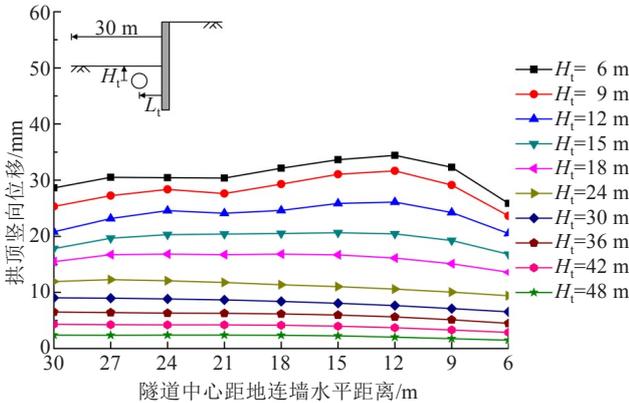
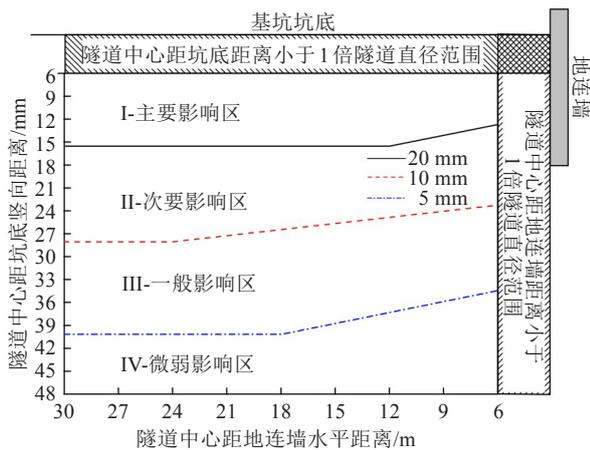
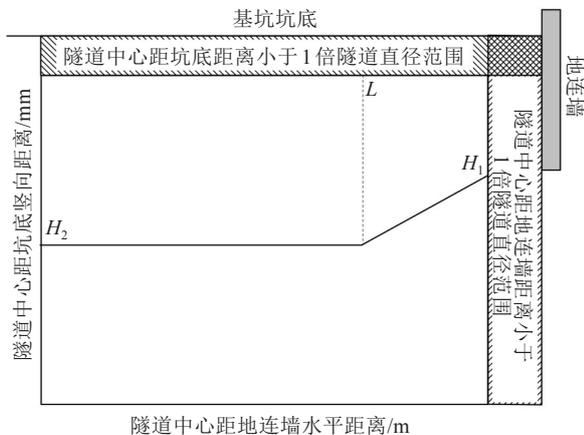


图 13 隧道拱顶竖向位移曲线

Fig. 13 Vertical displacement change of tunnel vaults



(a)简化的隧道变形控制标准对应的影响区



(b)坑底以下隧道变形影响区模式

图 14 加固后既有隧道变形影响区

Fig.14 Influenced zones of the existing tunnel after reinforcement

表 5 加固后隧道变形影响区范围确定参数

Table 5 Scope determining parameters of the influenced zones

参数	控制值/mm		
	20	10	5
L	12.0	24	18.0
H_1	13.0	23	34.5
H_2	15.5	28	40.0

5 结论

1) 改变隧道与基坑坑底竖向距离对隧道变形影响显著, 竖向卸载是引起隧道竖向变形的主要原因, 随着变形控制值的增大, 隧道变形影响区范围逐渐减小。

2) 随着基坑开挖深度降低, 坑底隆起和坑底以下隧道变形均显著降低, 但二者之间的相关性变化不明显。主要影响区范围缩小直至消失, 次要影响区和微弱影响区范围有所增大。

3) 平面满堂加固形式优于抽条加固和裙边加固, 竖向分层加固形式优于回掺加固和板式加固, 加固土强度的提高可以改善变形控制效果。所以建议加固方案选择满堂加固和回掺式加固, 土体加固强度宜在 0.5~1.5 MPa 之间, 可取得较好的变形控制效果和经济效益。

参考文献(References):

[1] 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 Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 599-612. (in Chinese))

[2] 邹伟彪,张冬梅,蔡雄威.基坑开挖对邻近地铁变形的实时监测与数值分析[J].地下空间与工程学报,2012,8(S2):1728-1731,1736.(ZOU Wei-biao, ZHANG Dong-mei, CAI Xiong-wei.Numerical simulation and real time monitoring of foundation pit excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(S2): 1728-1731,1736.(in Chinese))

[3] 李宇升,喻卫华.深基坑施工对紧邻地铁区间隧道结构影响分析[J].地下空间与工程学报,2013,9(2):352-358.

- (LI Yu-sheng, YU Wei-hua. Analysis on influence of deep pit construction on neighboring metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013,9(2):352-358.(in Chinese))
- [4] Shi C H, Cao C Y, Lei M F, et al. Effects of lateral unloading on the mechanical and deformation performance of shield tunnel segment joints[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 51: 175-188.
- [5] Liang R Z, Xia T D, Huang M S, et al. Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 81: 167-187.
- [6] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911-2013[S].北京:中国建筑工业出版社, 2013. (Beijing Urban Construction Exploration&Surveying Design Research Institute Co., Ltd.. Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering: GB 50911-2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [7] 卜康正,郑先昌,沈翔,等.基坑放坡开挖对下方既有地铁隧道影响计算及风险预测[J].中国安全生产科学技术, 2019,15(7):5-12.(BU Kang-zheng, ZHENG Xian-chang, SHEN Xiang, et al. Calculation for effect of foundation pit sloping excavation on underlying metro tunnels and risk prediction[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019,15(7):5-12.(in Chinese))
- [8] 刘建文,施成华,雷明锋,等.基坑开挖对下卧地铁隧道影响的解析计算方法[J].中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2215-2225. (LIU Jian-wen, SHI Cheng-hua, LEI Ming-feng. et al. Analytical method for influence analysis of foundation pit excavation on underlying metro tunnel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(9): 2215-2225. (in Chinese))
- [9] 陈尚荣,曹传祥,廖志坚.不同支护深基坑开挖对地下通道变形的影响[J].交通科学与工程,2018,34(4):43-52. (CHEN Shang-rong, CAO Chuan-xiang, LIAO Zhi-jian. The influence of deep excavation on the deformation of surrounding rectangular underground tunnel based on different supporting forms[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 43-52. (in Chinese))
- [10] Burland J B. Ninth laurits bjerrum memorial lecture: "Small is beautiful"—The stiffness of soils at small strains [J]. Canadian geotechnical journal, 1989, 26(4): 499-516.
- [11] Tatsuoka F, Kohata Y. Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications[C]//pre-failure deformation of geomaterials. proceedings of the international symposium, 12-14 September 1994, Sapporo, Japan. 2 vols, 1995.
- [12] Jardine R J, Potts D M, Fourie A B, et al. Studies of the influence of non-linear stress - strain characteristics in soil - structure interaction[J]. Geotechnique, 1986, 36(3): 377-396.
- [13] Mair R J. Developments in geotechnical engineering research: application to tunnels and deep excavations[C]// Proceedings of institution of civil engineers. Civil Engineering. 1993, 93: 27-41.
- [14] Atkinson J H. Experimental determination of stress-strain-time characteristics in laboratory and-in-situ tests. General report[C]//Proc. 10th Eur. Conf. Soil Mech. and Fnd Engng. 1991, 3: 915-956.
- [15] Simpson, B. Retaining structures: displacement and design[J]. Géotechnique, 1992, 42(4): 541-576.