

DOI: 10.11779/CJGE201604003

基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究

郑刚^{1,2}, 杜一鸣^{1,2}, 刁钰^{1,2}, 邓旭³, 朱敢平⁴, 张立明⁴

(1. 天津大学土木工程系, 天津 300072; 2. 天津大学滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;

3. 天津市建筑设计院, 天津 300074; 4. 天津市地下铁道集团有限公司, 天津 300000)

摘要: 既有隧道会因邻侧基坑开挖卸荷产生变形, 对隧道正常使用和安全产生影响, 其变形控制至关重要。基于大量工程案例资料, 以天津市某邻近既有隧道深基坑实测资料为基础, 采用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法对基坑施工对坑外既有隧道变形影响规律进行了参数分析, 结合不同规范变形控制标准, 划分了不同围护结构变形模式和最大水平位移条件下坑外既有隧道变形影响区。研究表明, 坑外变形影响区大致可简化为直角梯形形状。根据实际工程基坑围护结构可能产生的变形形式、最大变形和隧道与基坑的相对位置, 可根据该影响区预估隧道可能产生的变形。围护结构变形模式和变形控制值相同条件下, 变形影响区范围随着围护结构最大水平位移增大而增大; 围护结构最大水平位移和变形控制值相同条件下, 围护结构悬臂型变形模式下变形影响区范围最小, 内凸型和复合型次之, 踢脚型最大。

关键词: 基坑开挖; 既有隧道; 案例分析; 数值分析; 变形; 影响区

中图分类号: TU47

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)04-0599-14

作者简介: 郑刚(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土力学及岩土工程教学与科研工作。E-mail: zhenggang1967@163.com。

Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations

ZHENG Gang^{1,2}, DU Yi-ming^{1,2}, DIAO Yu^{1,2}, DENG Xu³, ZHU Gan-ping⁴, ZHANG Li-ming⁴

(1. Department of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structures and Safety

of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Architecture Design Institute, Tianjin 300074, China;

4. Tianjin Metro Group Co., Ltd., Tianjin 300000, China)

Abstract: The unloading effect of excavations can cause deformation of the adjacent existing tunnels, which may seriously influence the operation and safety of the tunnels and hence should be strictly controlled. Based on the field measurements of a project in Tianjin and a large number of case histories, the finite element method considering the small strain of soil is adopted to conduct parametric studies on the relationship between the deformation of the existing tunnels and the excavation construction. According to various deformation controlling criteria for the existing tunnels, the retaining side of excavation is zoned with different deflection modes and maximum horizontal displacements of retaining structures. It is shown that the influenced zone can be simply characterized by a right trapezoid, which can be used to predict the deformation of the existing tunnels approximately according to the relative locations of the tunnels, deflection modes and maximum horizontal displacements of retaining structures. For a given deflection mode of the retaining structures and a deformation controlling criterion, the influenced zone expands as the maximum horizontal displacement of the retaining structure increases. Under the same criteria and maximum horizontal displacement of the retaining structures, the range of the influenced zone increases with the variation of deflection modes in the order of cantilever type, convex type, composite type and kick-in type.

Key words: excavation; existing tunnel; case study; numerical analysis; deformation; influenced zone

0 引言

城市建设的飞速发展带来了中心地带的交通拥堵, 地下轨道交通网络成为解决这一问题的最佳途径。伴随大量地铁线路的运营, 城市发展过程中不可避免的出现大量邻近既有运营隧道的工程施工, 例如既有

地铁隧道上方、侧面的基坑开挖与降水、地表堆载等。这些因素均会不同程度地导致地铁隧道产生变形, 严

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目
(2010CB732106)

收稿日期: 2015-01-11

表 1 邻近既有隧道的基坑开挖施工典型案例

Table 1 Summary of case histories of excavations adjacent to existing tunnels

编号	项目名称	开挖 深度/m	围护结构 最大水平 位移/mm	地铁隧道相关资料			隧道最大变形情况 ^①	
				隧道 类型	顶部埋深 /m	与基坑净距 /m	水平位移 /mm	竖向位移 /mm
1	台北某高层建筑基坑 ^[1]	21	53	盾构	14.5	6.9	27	33
2	上海新世界城 ^[2]	12.5	14.2	盾构	7.4	3	9	-5
3	台北某基坑 ^[3]	15.9	54	盾构	16.1	7.3	50 (21.5) ^②	(-21.4)
4	台北某地连墙施工 ^[3]	地连墙 成槽	—	盾构	12.9	3	(17)	(-2)
5	新加坡 Tan Tock Seng 医院 ^[4]	15	—	盾构	17	18	6.0/4.0 ^③	3.8/2.1
6	上海地铁七号线静安寺站基坑 ^[5]	23.35	—	盾构	8.5	15	3.2	约-1.3
7	中国东部地区某附楼 ^[6]	7	—	盾构	10	4	1.4	6.8
8	上海某广场基坑 ^[7]	14.4	—	盾构	9.3	7~11	10	-10
9	上海广场基坑(北坑) ^[8]	约 16	—	盾构	14.4	2.8~5	13	-5
10	上海 1788 地块某项目 ^[9]	约 14	22	盾构	8.5	10.4~13.5	—	5.5/-3.5
11	广州海珠城广场 ^[10]	21	—	矿山	14.5	5.7~6.6	6.9	—
12	广州黄沙上盖物业建筑群 ^[11]	12	—	盾构	7	6	8	-12.3
13	上海市裕年国际商务大厦 ^[12]	约 10	—	盾构	7	7.2	4.8	-3.3
14	广州鸿晖大厦 ^[13]	16.9	—	盾构	9.9	8.4	8.5	—
15	上海市闸北区大宁商业中心 ^[14]	6~6.7	20.7	盾构	11.8	5.45	4	7.1
16	广州某拟建综合大楼 ^[15]	18	—	箱体	11	14.8	5.8	-6.8
17	上海市徐汇区某基坑 ^[16]	19.9	—	盾构	11	25	—	-5.54
18	上海淮海中路 3 号地块项目 ^[17]	13.85	6	盾构	8.37	8	—	5
19	天津某基坑项目	15	50	盾构	15	16.6	14.56	9.09
20	上海会德丰广场 ^[18]	18.02	—	盾构	8.5	5.4	—	-16.67
21	苏州工业园区公积金大厦 ^[19]	12.2	—	盾构	11.4~ 12.7	9.5~14	1.05	6.5
22	杭州市某控制中心 ^[20]	约 13	19.5	盾构	7.3	8.1	1.52	-4.11
23	广州大马站商业中心项目 ^[21]	—	—	盾构	—	—	3.5	5
24	新加坡某基坑 ^[22]	8.2	—	盾构	15	3.6	3.2/1.9	3.1/1.6

注：①隧道在水平方向以朝向基坑移动为正，在竖向以降起为正；②括号中数值表示隧道水平方向和竖向收敛变形，正值为拉伸，负值为压缩；③双线隧道变形数值，前者为靠近基坑线路，相关距离均指靠近基坑线路与基坑距离。

重时甚至会引起隧道结构损坏直至破坏。表 1 是一些基坑施工引起隧道变形的实例。

表 1 中大量工程案例表明，在软土地区，基坑开挖过程中邻侧土体的卸荷作用导致基坑围护结构产生相应变形，从而带动坑外隧道随着土体一同产生相应位移变形。坑外既有隧道因与基坑距离、基坑开挖深度、支护形式、现场土质条件、施工工法等诸多因素的不同会产生较大差异的响应。表 1 中案例 6^[5]、案例 10^[9]和案例 22^[20]因施工前对坑内外土体和隧道周边土体进行了加固处理，最终隧道变形控制较好。然

而，亦有如案例 1^[1]，因施工前预判与保护措施不足，导致基坑开挖过程中，隧道出现较大变形，甚至造成了道床板的脱落，最终采取相应措施进行修复与矫正^[23-24]。

现有运营地铁隧道多为预制混凝土管片和高强螺栓连接的盾构隧道，对变形较为敏感。过大的变形不仅会导致管片间连接的张开、错台、轨道翘曲变形，影响地铁列车的运行，严重者甚至会因管片间变形张开量过大造成漏水漏沙导致隧道进一步发生大变形和损坏。因此对既有运营隧道进行严格的变形控制显得

至关重要。

针对既有隧道控制,《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》^[25](下文简称《上海规范》)规定,地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量 ≤ 20 mm(包括各种加载和卸载的最终位移量)。因其提出较早,在中国沿海软土地区得到了广泛借鉴应用。近年来,国家和行业规范相继提出,如《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[26]GJJ/T 202—2013提出了隧道水平位移和竖向位移 10 mm 的预警值和 20 mm 的控制值;而《城市轨道交通工程监测技术规范》^[27]则提出了更加严格的控制标准,其中隧道结构沉降控制值为 3~10 mm,隧道结构上浮控制值 5 mm,隧道结构水平位移控制值 3~5 mm。严格的变形控制标准对施工前进行隧道变形准确预判并采取相应保护措施提出了更高要求。

针对基坑开挖对既有隧道的影响,国内外诸多学者进行了相关研究,方法包括结合工程实践的数值模拟分析^[2, 4, 10, 14, 22, 28],采用理论公式推导结合工程实践^[6]或离心机模型试验^[29]的研究方法,其研究重点均集中在基坑开挖卸荷对既有隧道的变形及受力性状影响,多为针对某一特定工程案例,规律性的研究尚不多见。郑刚等^[30]研究表明,即使围护桩(墙)产生的最大水平位移相同,但基坑外深层土体变形会随着围护结构变形模式的不同产生差异并存在一定规律。而郑刚等^[31]的进一步研究也表明,既有隧道的变形大小和模式等不仅会随与基坑的相对位置不同而变化,也会受到基坑围护桩(墙)变形模式的影响。

《上海规范》^[25]提出,在地铁工程(外边线)两侧的邻近 3 m 范围内不能进行任何工程施工。而相比《上海规范》,《城市轨道交通结构安全保护技术规范》^[26]则给出了一个相对具体的分级影响区,根据既有隧道外部施工活动的接近程度,将其分为强烈影响区(A)、显著影响区(B)和一般影响区(C)并针对深埋矿山法和盾构法隧道进行了影响区划分。《城市轨道交通工程监测技术规范》^[27]则针对基坑开挖对环境影响给出了分区建议,将基坑外划分为主要影响区(I)、次要影响区(II)和可能影响区(III),见图 1。但该方法以基坑底为分区基点而没有考虑围护桩(墙)插入基坑底以下的影响,似乎更适用于柔性板桩支护且基本不需插入深度的传统浅基坑。同样,英国相关规范^[32]也仅对此给出了一个相对简单的范围,规定基坑的开挖影响宽度约为基坑开挖深度的 3~5 倍,影响深度约为开挖深度的 2~4 倍。综上,以上规范虽都对既有隧道的保护提出了变形影响区,但均未考虑不同基坑开挖条件、不同围护结构变形模式、变形大小及不同变形控制标准等因素,还需进一步开展规律

性的研究,找到更适于指导工程实践的影响区划分方法。

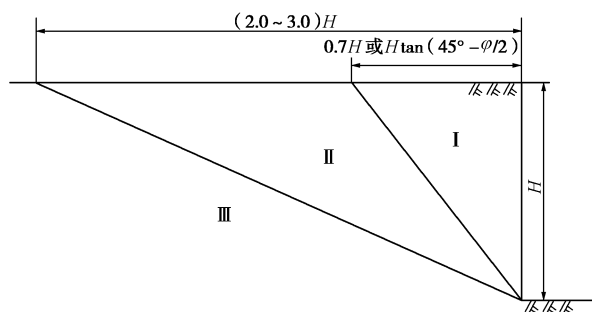


图1 基坑工程影响分区^[27]

Fig. 1 Influenced zones of deep excavation^[27]

本文以天津地区某邻近既有隧道的深基坑工程为背景,开展了基坑开挖过程中地连墙、坑外土体及坑外既有隧道的位移实测。在此基础上采用考虑土体小应变刚度特性的有限元分析方法,针对软土地区地质条件,对基坑开挖引起的坑外既有隧道变形进行精细化分析,在文献[31]研究不同围护结构变形模式下坑外不同位置隧道变形特性及分布规律的基础上,进一步考虑不同围护结构最大水平位移对坑外不同位置隧道变形规律影响,结合不同规范中既有隧道变形控制标准,提出了基坑开挖对基坑外既有隧道变形的影响区划分,从而对邻近既有隧道的基坑施工可能对隧道产生的影响进行预先评估,并提前指导基坑方案和隧道保护措施制定。

1 工程背景

1.1 工程概况

天津市区某工程紧邻既有盾构隧道。工程位于两主干道交口位置,拟建三层地下室,基坑形状为不规则多边形,周长 860 m,面积约 43890 m²。基坑大部开挖深度 15 m,局部塔楼位置挖深 16.25 m 和 17.55 m。工程场地周边情况较复杂,东西北三侧邻路,南侧为既有盾构隧道,最近距离处隧道外衬距基坑围护结构边缘仅 16.5 m。基坑总体平面见图 2。

为保护南侧既有隧道,控制基坑围护结构变形,采取了如下措施:基坑分区开挖,如图 2 所示,将基坑分为南部基坑、中部基坑和北部基坑,其中南部基坑最先施工,北部基坑稍后施工。待南部基坑完成地下结构施工并回填土方后,再开挖中部基坑。南部基坑的南侧围护结构采用厚度 1200 mm 地下连续墙,东西两侧采用厚度 1000 mm 地下连续墙,北侧则采用 $\phi 900@1100$ 排桩,采用两道混凝土支撑。隧道与南部基坑间设置隔离桩,同时预埋袖阀管,必要时启动注浆纠偏。

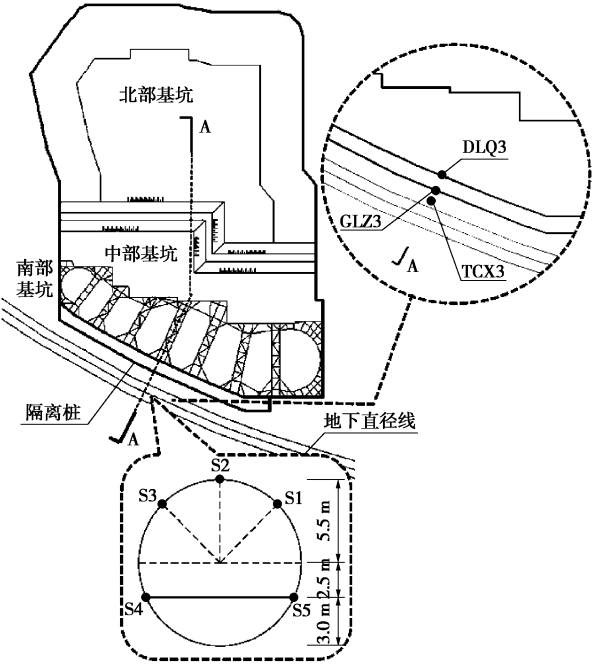


图2 基坑平面示意图

Fig. 2 Schematic layout of excavations

工程场地下覆土层主要以粉质黏土和粉土为主，局部夹有细粉砂层，土层分布情况见表 2，其中土体物理力学参数及开展有限元分析所需的 HSS 模型参数均为采用薄壁取土器取样后进行室内试验所得。

图 2 中 A-A 断面附近测点布置见图 2 局部放大图。其中 DLQ3、GLZ3 和 TCX3 分别为地连墙、隔离桩和坑外土体水平位移的 3 个测斜点，TCX3 距离地连墙 9.2 mm；隧道断面布置 S1~S5 五个监测点，位置及尺寸详见图 2 局部放大图。

1.2 有限元数值模拟

工程设计阶段，为评估基坑开挖对既有隧道的影响，采用 PLAXIS 有限元软件进行施工过程模拟计算。

考虑到模型尺寸及计算能力，计算选取基坑典型 A-A 剖面进行了模拟分析。模型尺寸详见图 3，在此

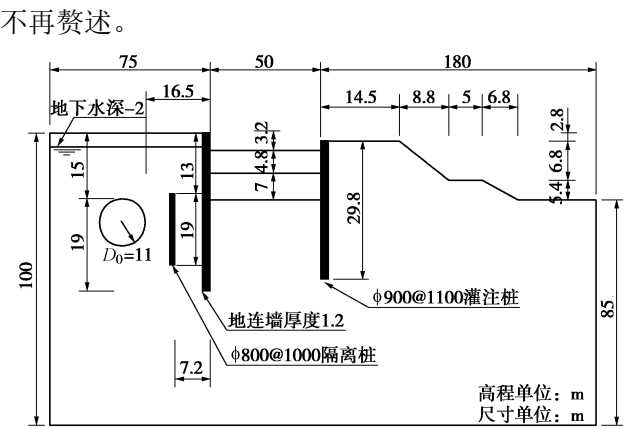


图3 A-A 剖面模型尺寸示意图

Fig. 3 Dimensions of section A-A

Simpson^[33]和 Kung 等^[34]认为，只有考虑土体小应变刚度特性，尤其小应变状态下的高模量和高度非线性，才能更加合理的预测基坑开挖引起的土体或隧道变形。因此，本文模型中土体采用 PLAXIS 中小应变硬化模型（HSS）进行模拟。

根据 LEE 等^[35]研究成果，定义盾构隧道横向刚度有效率为 75%，用以反映管片间接头存在对既有隧道变形产生的影响。模型中地连墙、隧道衬砌、支护排桩和隔离桩均采用线弹性混凝土材料模拟，弹性模量取值 30 GPa，泊松比 0.2。支护排桩采用 plate 单元近似模拟，其板厚按照抗弯等效的原则确定。隔离桩采用 PLAXIS 中 embedded 桩单元模拟。

模型计算过程中考虑坑内降水对基坑围护结构及坑外土体隧道等变形的影响，计算步设置为分层降水模式，先降水后开挖尔后架设水平支撑。模型共设置 10 个计算步骤，南侧窄坑开挖至底后再开挖北侧放坡部分。

1.3 计算与实测结果对比

图 4 为南部基坑开挖完成后(如图 3 所示)DLQ3、GLZ3 和 TCX3 的实测值与有限元计算结果的对比。

表 2 土体物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of soils

土层编号	土层	层厚 /m	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c' /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	φ' /($^\circ$)	E_{50}^{ref} /($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ /($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	G_0^{ref} /($\text{MN}\cdot\text{m}^{-2}$)	$\gamma_{0.7}$ / 10^{-3}	e
① ₁	杂填土	6.5	18.50	12.4	16.10	4.38	4.38	26.28	70.96	0.20	0.94
③ ₁	粉质黏土	2.0	18.55	5.60	26.29	5.22	4.21	40.58	109.58	0.20	0.88
⑥ ₃	粉土	1.2	18.69	6.00	27.65	15.71	8.38	80.00	216.00	0.20	0.75
⑥ ₄	粉质黏土	7.8	19.46	9.54	28.59	5.31	5.78	53.39	144.15	0.20	0.79
⑧ ₁	粉质黏土	5.5	19.78	13.95	25.66	7.21	5.05	36.77	99.28	0.20	0.64
⑧ ₂	粉土	2.0	18.69	10.00	32.30	8.41	8.41	44.14	119.18	0.20	0.74
⑨ ₁	粉质黏土	6.0	19.83	21.45	21.60	3.10	6.00	38.01	102.63	0.20	0.49
⑩ ₂	粉砂	3.0	20.98	10.20	36.43	11.80	10.54	77.29	208.68	0.20	0.72
	粉质黏土	66.0	20.28	14.62	24.66	4.91	5.86	42.27	114.13	0.20	0.73

中心距离地连墙边缘距离为 L_t ，距离地表距离为 H_t ，两参数均作为变量将在后文介绍。

模型中土体仍采用考虑土体小应变刚度特性的小应变硬化模型 (HSS)。为简化计算分析，消除不同土层成层性的影响，计算采用单一土层进行。计算选取表 2 中天津市区典型粉质黏土⑧₁ 层，即隧道所处土层，土体具体物理力学参数见表 2。模型中地连墙，隧道管片和隔离桩等结构体仍采用线弹性混凝土材料模拟，计算参数参照 1.2 节。

2.2 计算分析参数设置

Kung 等^[36]和 Schuster 等^[37]在研究基坑开挖引起的坑外地表沉降及对坑外建筑物的影响中指出，研究过程宜选择合理的影响因素进行参数分析。为分析不同条件下基坑开挖引起坑外隧道变形的影响区，考虑以下模型分析参数。

(1) 坑外既有隧道不同位置

为划分坑外隧道变形影响区，需明确坑外不同位置处隧道在相同地连墙变形性状条件下变形情况，以进一步结合坑外不同位置处隧道变形预估基坑开挖对坑外整体范围内各位置既有隧道的变形影响情况。通过变形等值线分析方法（详见后文）对坑外隧道变形情况分析进而划分变形影响区。本计算通过改变参数 L_t 和 H_t （见图 6），设置隧道在坑外不同位置。

其中隧道中心至地连墙的水平间距 L_t 选取 8 个不同值：6 m (0.33 H)、9 m (0.5 H)、12 m (0.67 H)、15 m (0.83 H)、21 m (1.17 H)、27m (1.5 H)、33 m (1.83 H) 和 39 m (2.17 H)。隧道中心埋深 H_t 则选取 5 个不同值：9m (0.5 H)、18 m (1 H)、27 m (1.5 H)、36 m (2 H) 和 45 m (2.5 H)。 H 为基坑开挖深度，本计算中 $H=18$ m。二者组合后可得到坑外 40 个不同隧道位置。其中盾构隧道覆土厚度最小为 1 倍隧道直径^[38]。

(2) 不同围护结构最大水平位移

基坑开挖过程中的卸荷作用引起了坑外土体产生向坑内移动趋势，同时引起围护结构发生水平方向变形，坑外隧道随着土体位移产生相应变形。因此，坑外隧道变形势必随着围护结构水平位移的增大而增大。表 1 中多案例对比充分证明了这一规律，工程条件相似的案例中隧道变形与围护结构最大水平位移存在正增长关系。因此围护结构最大水平位移是决定坑外隧道的变形影响区范围主要因素之一。本计算中设计三种不同围护结构最大水平位移，下文以 δ_{hmax} 表示。根据天津地区工程经验，基坑开挖过程中围护结构变形控制较好情况最大水平位移为 30 mm，正常控制为 45 mm，控制效果较差为 60 mm。计算过程中通过调整水平支撑刚度使地连墙最大水平位移达到相应值并产生预设的变形模式。

(3) 不同围护结构变形模式

受水平支撑深度方向的布置间距、支撑刚度、施工方法及工程地质条件等因素影响，围护结构变形大致可分为内凸、复合、悬臂、踢脚 4 种不同模式^[39]，见图 7。郑刚等^[30]研究表明，在不同围护结构变形模式下，即使围护结构最大水平位移相同，坑外深层土体的位移规律、开挖引起的影响范围等也会存在较大差异。

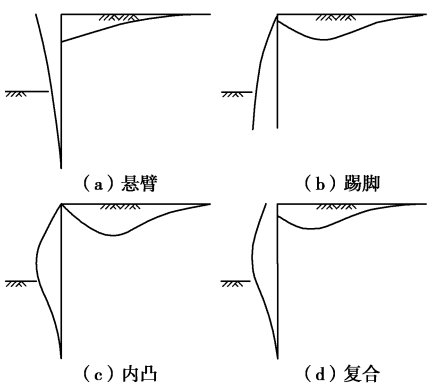


图 7 围护结构典型变形模式^[39]

Fig. 7 Typical profiles of wall deflection^[39]

本文计算模型设计四种不同围护结构变形模式，计算中通过调整不同位置水平支撑刚度对 4 种变形模式及其最大水平位移进行控制。为满足踢脚型变形模式，在基坑底部被动区设置一层软弱土层以满足地连墙墙趾部位产生向坑内方向的最大水平位移。

综合以上参数设置建立多组有限元分析模型分析计算，见表 3。结合参量设置共计算有限元模型 480 个。后文将结合大量有限元模型计算结果进行隧道变形影响区研究与划分。

表 3 模型参数设置

Table 3 Parameters of FEM models

变量名	变量设置	个数
L_t	6, 9, 12, 15, 21, 27, 33, 39 m	8
H_t	9, 18, 27, 36, 45 m	5
δ_{hmax}	30, 45, 60 mm	3
地连墙变形模式	内凸、复合、悬臂、踢脚	4

3 坑外隧道变形影响区的建立

3.1 围护结构内凸型变形最大水平位移 45 mm 情况下坑外隧道变形分析

围护结构内凸型变形最大水平位移为 45 mm 情况为例，作者曾分析了坑外相对于基坑的 40 个不同位置处隧道的变形^[31]，如图 8 所示，在此因版面空间所限，仅绘制坑外较靠近围护结构的 25 个隧道变形情况。

图 8 将多个计算模型中不同位置处隧道在相同围

护结构变形条件下的隧道变形绘制在同一张图上(变形放大200倍)。图中规定拱顶、拱底的竖向位移以隆起为正、沉降为负,而左右拱腰的水平位移则以指向基坑方向移动为正、反之为负。为方便绘图,图中隧道水平方向位置与深度位置未按比例绘制。依坑外隧道变形规律,坑外隧道所处位置大致划分为沉降区、过渡区和隆起区三个部分,隧道变形特征见图8。

3.2 坑外隧道变形影响区的建立

依据模型计算结果,将图8中不同位置处(指隧道中心位置)隧道产生的最大水平位移和竖向位移绘制成等值线图如图9所示。

《上海规范》^[25]提出,地铁两侧邻近3 m范围内不能进行任何工程,同样,盾构隧道埋深不应小于1倍隧道外径^[38],故图9中所示等值线范围不包括此范围。等值线图横坐标起点位置为0.33*H*(约6 m),纵

坐标的起点位置为0.5*H*(约9 m)。

等值线图给出了坑外隧道所处不同位置处隧道的最大水平位移和沉降值,结合规范给定的隧道变形控制标准,可初步划定坑外隧道的变形影响区。

前文提到规范^[25-27]根据不同隧道变形控制要求提出了多个隧道变形控制标准,依据规范现选定隧道最大位移5, 10, 20 mm作为隧道变形控制标准,下文统称为隧道变形控制值。结合3个变形控制值,不难在图9中确定3个控制值对应的等值线位置。将隧道最大水平位移和最大竖向位移3个控制值的等值线绘制在一张图上,并对相同的控制标准等值线绘制包络线(以虚线表示),则得到如图10所示的初步隧道变形影响区。应当指出,图10中在靠近地连墙墙趾位置出现了5 mm竖向位移等值线,即隧道靠近墙趾部位会出现一定程度隆起变形。此部分最终被范围较大的

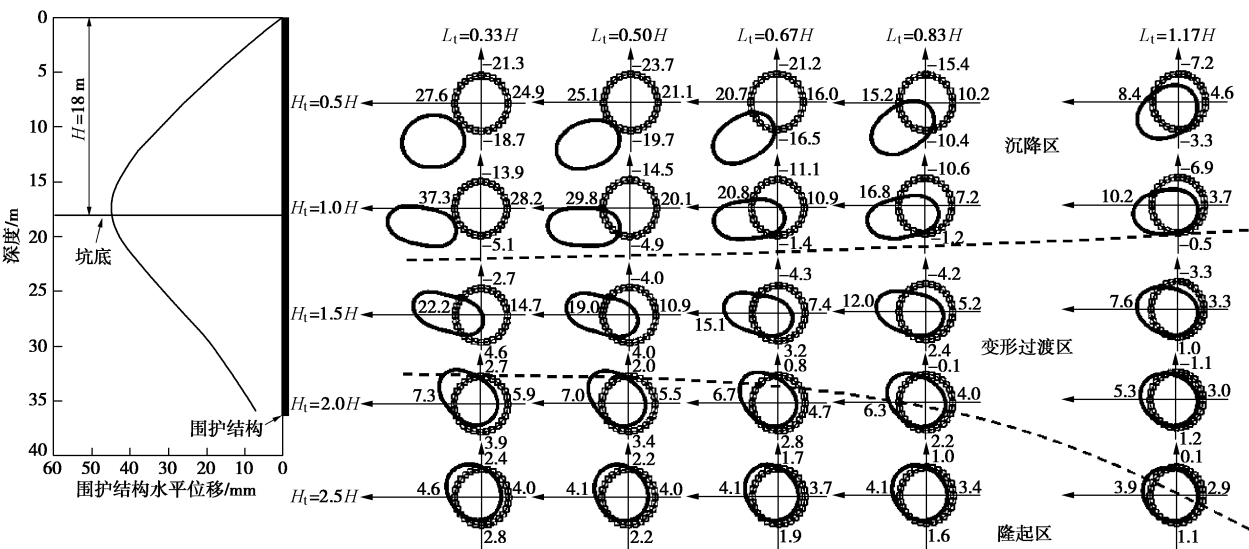


图8 围护结构为内凸型模式最大水平位移为45 mm,坑外不同位置处隧道变形^[31]

Fig. 8 Deformations of tunnels at different locations caused by convex deformation of retaining structures ($\delta_{hmax}=45\text{ mm}$)^[31]

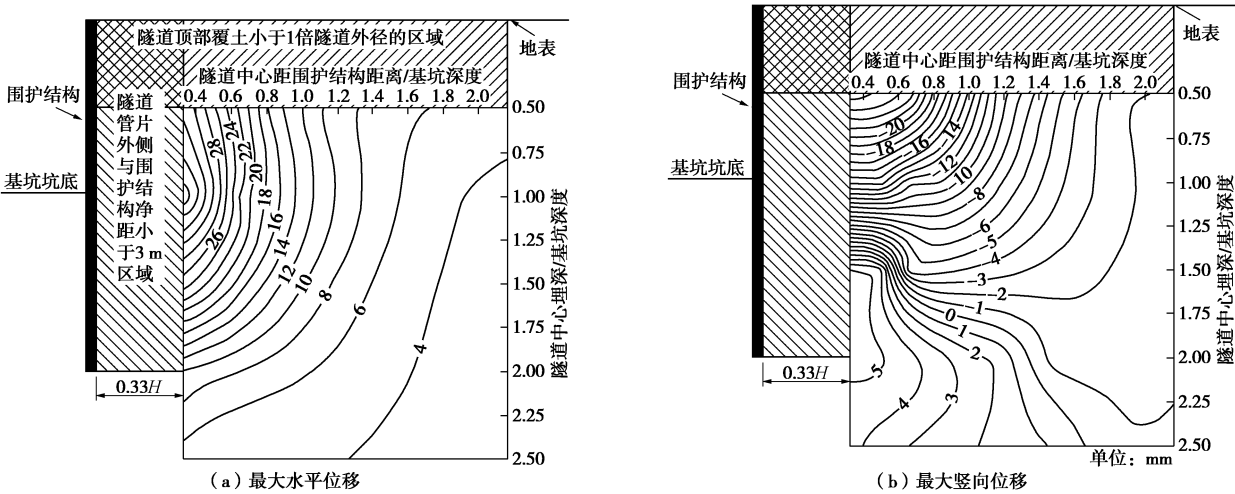


图9 隧道最大位移等值线分布^[31]

Fig. 9 Isolines of maximum displacement of tunnels^[31]

水平位移 5 mm 等值线包络在内。

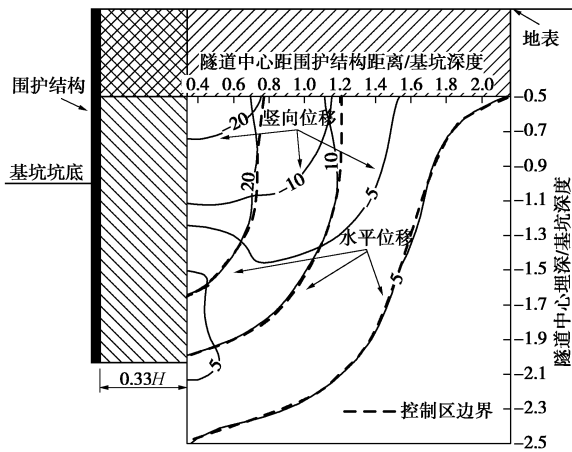


图 10 不同变形控制值的初步影响区

Fig. 10 Primary influenced zones determined by different criteria

在此应当说明,图 10 中绘制的变形标准包络线同时考虑了隧道最大水平位移和竖向位移,即由包络线得到的影响区内隧道最大水平位移和竖向位移必有一指标超出了控制值。由图 10 中包络线绘制过程可知,包络范围主要考虑了水平位移,相应的竖向位移均处在包络线范围以内且均小于包络范围。因此,若只考虑控制隧道竖向位移可仅绘制竖向位移包络线单独研究其相应影响区,其范围将小于图 10 中影响区。但由规范^[27]可得,一般既有隧道的水平位移控制标准要严于竖向位移,即实际过程中按照水平位移控制标准控制隧道变形,相应的隧道竖向位移也能满足控制标准,可按照图 10 中绘制包络线确定变形影响区。

图 10 表明坑外隧道变形影响区范围随着变形控制值减小而逐渐增大。即隧道位置愈是靠近围护结构,隧道变形愈是剧烈,而在此位置的隧道也愈不容易满足相对严格的变形控制值。因此,可依据隧道位置初步判断隧道是否满足变形控制标准。即变形影响区以外位置的隧道变形满足变形控制值,而变形影响区内的隧道则需要采取相应措施使其变形满足控制标准。

图 10 中的变形影响区在工程实践中应用不便。为此,将图 10 中的变形影响区范围线简化为图 11 所示的折线形式,3 个折线分别代表隧道位移的 20, 10, 5 mm 分界线。

结合表 3 中参数设置,考虑围护结构 4 种不同变形模式及 3 个最大水平位移 δ_{hmax} 值,可得到 12 个如图 11 所示的变形影响区划分,含 36 个变形影响区。根据不同坑外既有隧道变形控制标准,仿照规范^[27],将坑外变形控制区划分为主要影响区(I)、次要影响区(II)、一般影响区(III)和微弱影响区(IV),如图 11 所示。

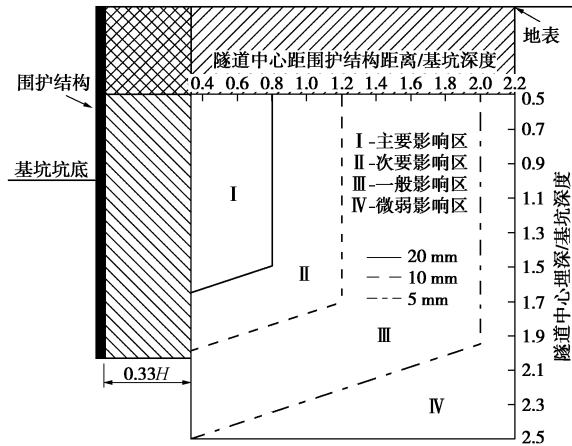


图 11 简化后隧道不同变形值影响区(由 40 个不同位置隧道的模型计算结果得)

Fig. 11 Normalized influenced zones for deformation control of existing tunnels (derived from results of 40 FEM models with tunnels at different positions)

为方便确定不同条件下的坑外隧道变形控制范围,将图 11 坑外既有隧道变形影响区统一用如图 12 所示形式表示。

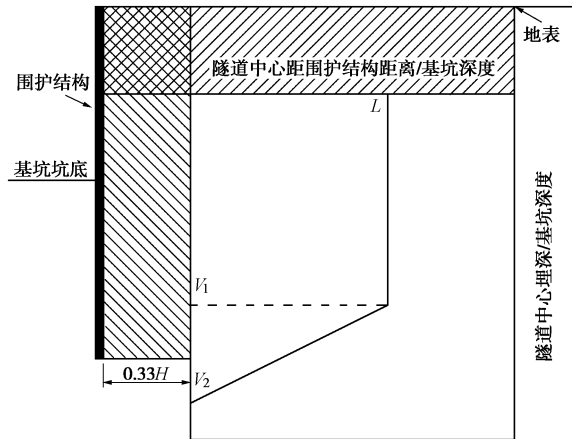


图 12 坑外隧道变形影响区模式

Fig. 12 Model of influenced zones outside of excavation

如图 12 所示,为方便确定不同条件下变形影响区范围,引入 3 个坐标值,分别为影响区宽度 L 、影响区深度 V_1 和影响区深度 V_2 。通过以上三坐标值可快速确定变形影响区。需要注意的是,图 12 中所示阴影部分不包括在影响区范围内。前文已提及,阴影部分水平向距离基坑围护结构 6 m,竖向距离地表应为 1.5 倍隧道直径,图中标示的 $0.33H$ 和 $0.5H$ 仅适用于本文算例。

为方便快速确定不同条件下坑外隧道变形影响区,将 36 种不同条件下的变形影响区确定参数绘制成如表 4 所示形式。结合表 4 中控制参数,可以根据经验估计基坑围护结构可能产生的最大位移、变形模式,结合隧道与基坑的相对位置,判断隧道可能处于的影

响区。

4 不同条件下隧道变形影响区对比及实测分析

4.1 围护结构最大水平位移 45 mm 变形影响区对比

为比较不同条件下坑外隧道变形影响区，现仍以围护结构最大水平位移为 45 mm 的工况为例，4 种不同围护结构变形模式下的变形影响区如图 13 所示。

由图 13 对比分析得，相同变形模式下随着控制值的减小，变形影响区范围逐渐增大，即相同条件下随着隧道远离围护结构，其受影响扰动程度逐渐减小，易于变形控制。4 种不同变形模式对比发现，因内凸型变形和复合型变形类似，图 13 (a) 和 (b) 显示二者变形影响区差别不大，复合型变形模式的变形影响区稍大，这与复合型变形模式围护结构顶部水平位移引起的坑外土体变形有关。从图 13 (c) 中易得，悬臂型模式的变形影响区在 4 种模式中范围最小，除Ⅲ区范围同其余 3 种模式类似，Ⅰ区和Ⅱ区明显小于其余 3 种模式。相较而言，图 13 (d) 中显示的踢脚型

变形模式下变形影响区明显大于其余 3 种模式。尤其影响区深度，踢脚模式要明显大于其余 3 种模型。由于隧道具有相对大的埋深，若仅从保护坑外隧道的角度出发，应尽量使围护结构成悬臂变形模式，控制基坑下部围护结构的水平位移。同时，应尽量避免踢脚型变形模式出现。当然，对深度更大的基坑，当隧道埋深相对较小且距基坑较近时，悬臂型的变形模式则不一定是最有利的变形模式。

如上文所述，因不同条件下变形影响区数量较多，此处仅以 45 mm 围护结构变形条件下为例进行分析，因文章篇幅所限，不再一一列举。

4.2 不同参数对变形影响区的影响分析

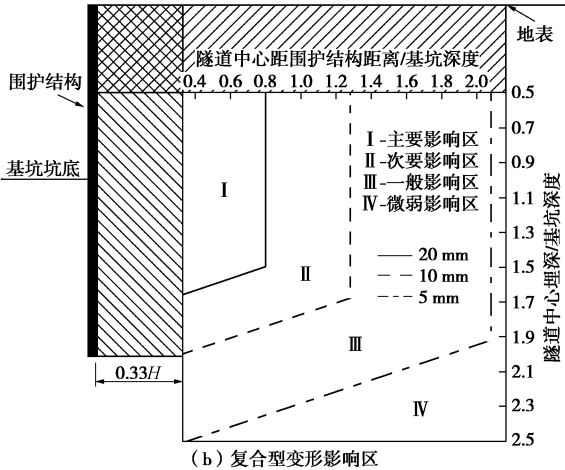
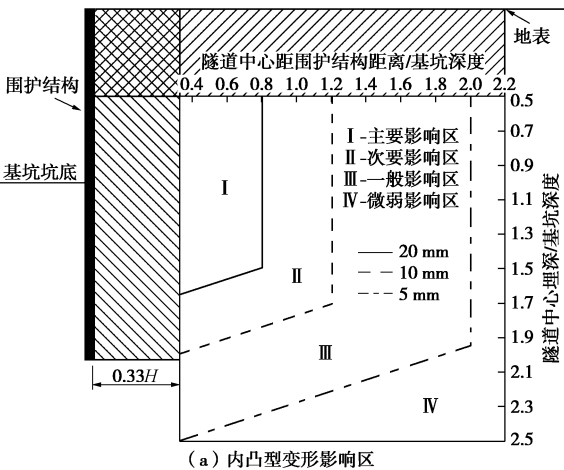
(1) 不同围护结构最大水平位移 δ_{hmax} 对变形影响区影响

选取变形影响区宽度 L 及深度 V_2 作为表征变形影响区范围的指标，研究 4 种不同围护结构变形模式及不同变形控制标准条件下，变形影响区参数与围护结构最大水平位移 δ_{hmax} 的关系，见图 14。图 14 (a) 显示，变形影响区宽度 L 及深度 V_2 均表现出随着围护结

表 4 不同条件下坑外既有隧道变形影响区参数 (由 480 个模型计算结果得)

Table 4 Parameters of influenced zones determined by different conditions (derived from results of 480 FEM models)

δ_{hmax}/mm	变形模式	控制值 20 mm			控制值 10 mm			控制值 5 mm		
		L	V_1	V_2	L	V_1	V_2	L	V_1	V_2
30	内凸	0.54	1.42	1.50	1.08	1.61	1.93	2.00	1.97	2.45
	复合	0.58	1.50	1.55	1.10	1.66	2.00	2.10	2.00	2.50
	悬臂	0	0	0	0.80	1.50	1.70	1.80	1.66	2.48
	踢脚	0.72	1.66	1.78	1.40	1.77	2.28	2.10	1.97	2.60
45	内凸	0.80	1.50	1.65	1.20	1.70	1.98	2.08	1.93	2.50
	复合	0.81	1.53	1.68	1.28	1.68	2.00	2.12	2.00	2.56
	悬臂	0.40	0.62	0.68	1.00	1.32	1.82	2.00	1.26	2.50
	踢脚	1.20	1.42	2.07	1.53	1.51	2.42	2.20	2.20	2.60
60	内凸	1.00	1.32	1.73	1.37	1.50	2.00	2.20	2.00	2.55
	复合	1.08	1.36	1.78	1.40	1.54	2.10	2.24	2.06	2.60
	悬臂	0.60	1.00	1.15	1.20	1.47	1.88	2.00	1.66	2.50
	踢脚	1.40	1.44	2.11	1.70	1.77	2.50	2.30	2.00	2.84



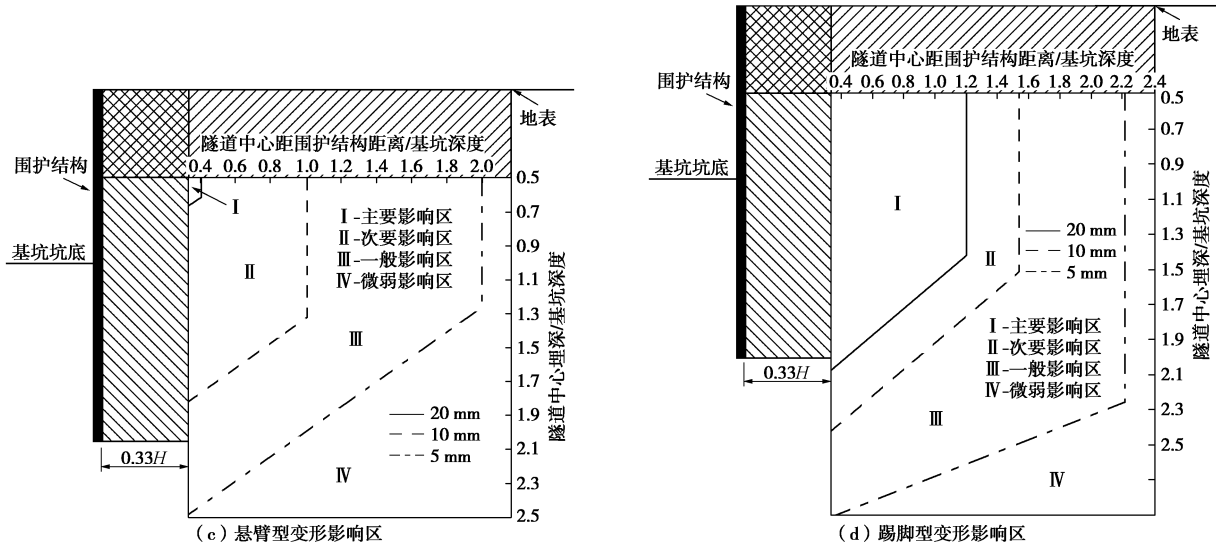


图 13 围护结构最大水平位移 45 mm 不同变形模式下隧道变形影响区 (由 160 个不同位置隧道的模型计算结果得)

Fig. 13 Influenced zones determined by different profiles of deflection of retaining structures for $\delta_{hmax}=45$ mm (derived from results of 160 FEM models with tunnels at different positions)

构最大水平位移 δ_{hmax} 的增大而逐渐增大的趋势。这种变化趋势以 20mm 变形影响区最为显著, 随着变形影响区控制值的减小, 这种增长逐渐趋于平缓。同样, 图 14 (b)、(c)、(d) 显示其余 3 种围护结构变形模式均表现出相同的变化趋势。

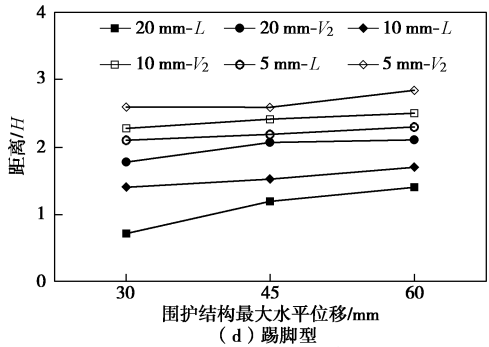
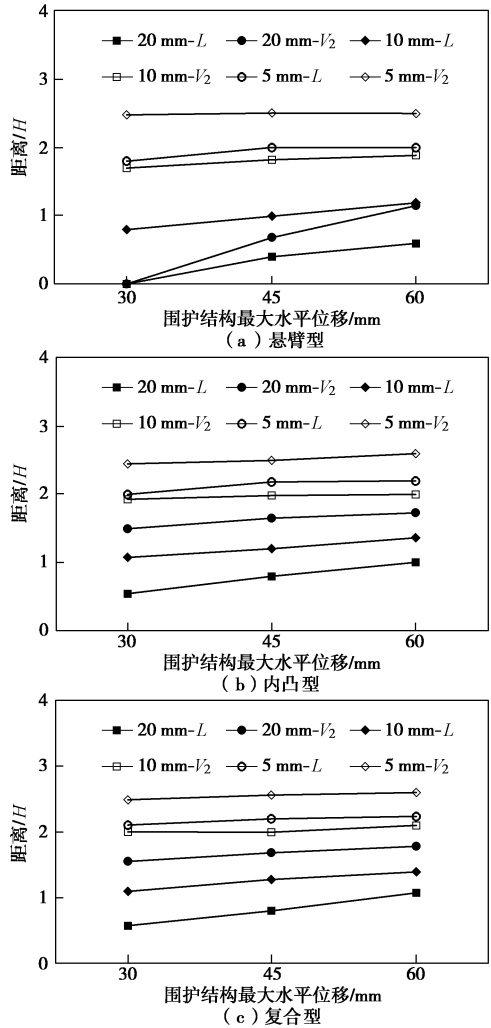


图 14 不同变形模式和不同变形控制值条件下变形影响区参数与 δ_{hmax} 关系

Fig. 14 Parameters of influenced zones determined by different δ_{hmax} under different profiles of deflection of retaining structures and different criteria

基坑开挖过程中, 坑外相同位置处的受扰动程度会随着围护结构变形的增大而逐渐增大, 随着坑外变形增大, 坑外隧道变形影响区范围也随之相应扩大, 表现为影响区宽度 L 和深度 V_2 的增长。但随着控制值的减小, 影响区的范围扩大, 围护结构最大水平位移增长对坑外距离围护结构较远处位置隧道的变形影响逐渐减弱, 变形影响区范围的增长随之放缓。

(2) 不同围护结构变形模式对变形影响区影响

图 15 显示为不同围护结构变形模式与坑外隧道变形影响区的关系。为减少分析图数量, 选取控制值为 20 mm, 不同围护结构最大水平位移 δ_{hmax} 条件下变形影响区参数与不同围护结构变形模式的关系。在围护结构最大水平位移 δ_{hmax} 为 30, 45, 60 mm 条件下, 变形影响区宽度 L 和深度 V_2 均表现为悬臂型最小, 内凸型和复合型次之, 差异不大, 踢脚型最大, 与上文 4.1 节中所得规律一致。踢脚型变形模式因围护结构底部出现较大位移从而增大了影响区范围, 应避免; 反

之,悬臂型变形模式对减小深埋隧道变形较为有利。

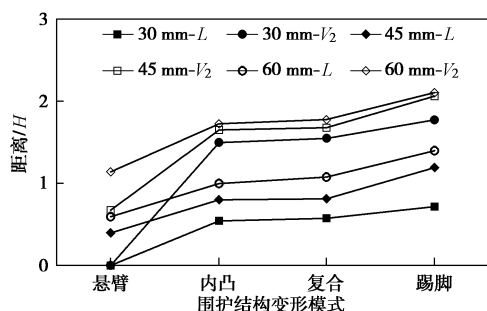


图 15 控制值为 20 mm 不同围护结构最大水平位移条件下变形影响区参数与围护结构变形模式关系

Fig. 15 Parameters of influenced zones determined by different δ_{hmax} under criterion of 20 mm and different profiles of deflection of retaining structures

4.3 工程实例分析

因表 1 中大部分工程案例位于沿海软土地区,与天津地区土质条件较为接近,且大部分案例中既有隧道为地铁盾构隧道,与本文算例相符,故可作为实例验证分析本文变形影响区的划分。因工程资料缺失,仅搜集到部分工程案例^[11-3, 9, 14, 17, 20]中的围护结构最大水平位移,见表 1,结合工程情况将部分案例数据^[11-3, 9, 17, 20]与得到影响区结果进行对比分析。

案例 1 和案例 3 中因设计施工措施等因素影响,围护结构变形稍大,与围护结构变形 $\delta_{hmax}=45$ mm 条件下影响区对比分析;而其余 4 个案例因施工前采取了相应控制措施,有效控制了围护结构最大水平位移,分析过程以围护结构变形控制较好的 $\delta_{hmax}=30$ mm 条件进行对比分析。工程资料显示,案例中围护结构水平位移多为复合型变形模式,下文分析中分别采用复合型变形模式下变形影响区进行对比分析。将以上工程实例中的隧道位置绘制在相应变形影响区图中,如图 16, 17 所示。

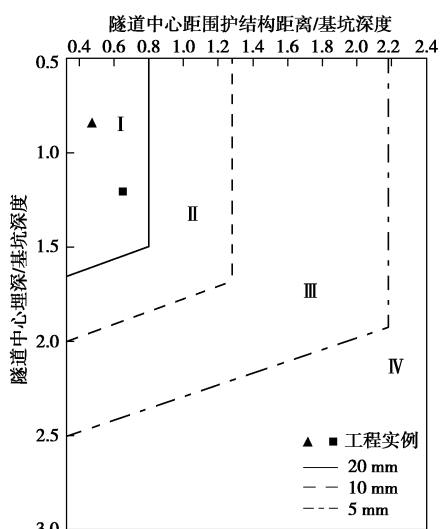


图 16 案例 1 和 3 与变形影响区对比 (复合型 $\delta_{hmax}=45$ mm)

Fig. 16 Influenced zones of case No. 1 and 3 (composite deformation of retaining structures, $\delta_{max}=45$ mm)

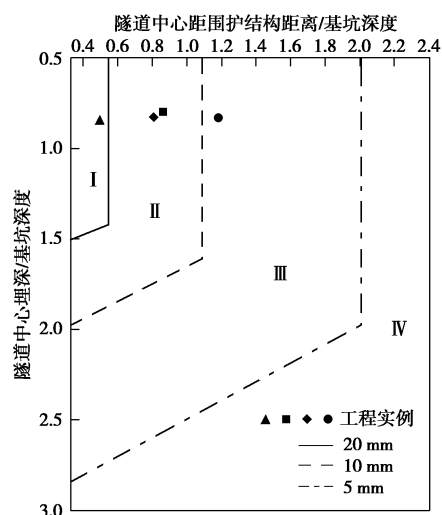


图 17 案例 2、10、18、22 与变形影响区对比 (复合型 $\delta_{hmax}=30$ mm)

Fig. 17 Influenced zones of case No. 2, 10, 18 and 22 (composite deformation of retaining structures, $\delta_{hmax}=30$ mm)

结合表 1 中案例 1 和案例 3 隧道相关资料^[1, 3],将两隧道位置绘制在影响区图中如图 16 所示。分析结果显示,两隧道均位于主要影响区 (I) 范围内。结合工程资料^[1, 3]得,基坑开挖过程中未对隧道采取任何保护措施,表 1 中实测结果显示,两隧道变形均超出了 20 mm 的变形控制值,与图 16 预测结果相符,隧道受到了基坑开挖的强烈影响。

同样,仿照图 16,将案例 2、10、18 和 22 中实际隧道位置绘制在相应变形影响区中如图 17 所示。图 17 显示,案例 2 的隧道位置进入了主要影响区 (I),案例 18 和案例 22 隧道位置进入了次要影响区 (II),案例 10 隧道位置虽位于一般影响区 (III),但距离 10 mm 位移控制线较为接近。结合隧道变形控制要求,案例中隧道变形已超出控制标准,尤其案例 2 位置处隧道预估变形超出 20 mm 控制值。应采取相应保护措施对案例中既有隧道进行保护。由工程资料^[2, 9, 17, 20]得,案例工程均采取了施工前对坑内外土体进行加固的隧道保护措施,同时施工过程中采取各种措施避免过度扰动隧道,对隧道变形控制效果较好,开挖完成后,隧道最大变形值均介于 5~10 mm 之间。故隧道最终的实际变形要较图 17 中的预测结果小。在此应当说明的是,由于案例 2^[2]隧道两侧存在同时对称开挖的情况,两侧卸荷作用抵消,加之工程保护措施设计周密,施工得当,最终隧道变形值较小,与预估值存在一定差异。

相反,如若基坑开挖过程中,围护结构变形控制措施不当,其最大水平位移值达到 60 mm,且未对既有隧道采取相应的保护措施,则其与变形影响区的关系将如图 18 所示。

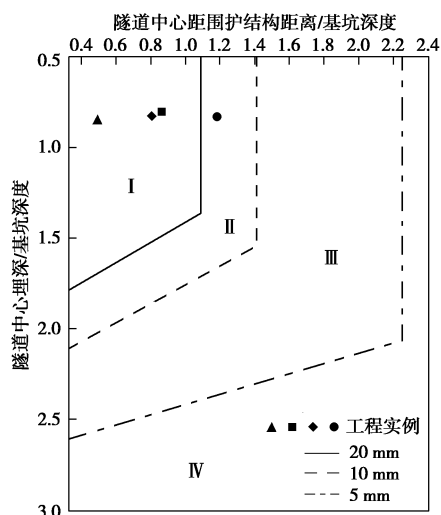


图 18 案例 2、10、18、22 与变形影响区对比 (复合型 $\delta_{hmax}=60\text{ mm}$)

Fig. 18 Influenced zones of case No. 2, 10, 18 and 22 (composite deformation of retaining structure, $\delta_{hmax}=60\text{ mm}$)

图 18 显示,如若围护结构最大水平位移因控制措施不当达到 60 mm,案例 18 和案例 22 中既有隧道位置将由次要影响区(II)进入主要影响区(I),而案例 10 中隧道位移也将由一般影响区(III)进入次要影响区(II),隧道变形将随着所处影响区位置的改变显著增大,对隧道变形控制十分不利。

由图 17, 18 得,可采用本文影响区对隧道变形进行预判,结合预判结果决定是否需对隧道采取保护措施。必要时可采取坑内外土体加固、控制围护结构最大水平位移等措施对坑外既有隧道进行有效变形控制。

5 结论与展望

本文以天津市某邻近既有隧道的深基坑开挖为背景,结合大量工程实例资料,利用考虑土体小应变刚度特性的有限元方法,通过设置不同隧道位置、围护结构变形模式、最大水平位移等参数变化,计算了有限元模型 480 个,结合不同规范给定的既有隧道变形控制标准,划分了不同参数条件下坑外既有隧道的变形影响区,并整理成表格,方便参考查阅。通过对不同条件下变形影响区的对比分析,得到以下结论:

(1) 坑外隧道变形的影响区大致可简化为直角梯形形状,可用于预估隧道可能产生的变形。

(2) 围护结构变形模式和隧道位移控制标准相同的条件下,坑外变形影响区的范围随着围护结构最大水平位移的增大而增大。但随着变形控制值减小,增长趋势放缓。

(3) 围护结构最大水平位移和隧道位移控制标准

相同的条件下,悬臂型变形模式影响区范围最小;复合型和内凸型变形模式下影响区次之,且差异不大;踢脚型变形模式下影响区范围最大。从控制隧道变形的考虑出发,当隧道相对于基坑有较大埋深时,围护结构悬臂型变形模式对控制隧道位移最有利,围护结构踢脚型变形模式则最不利。

本文仅选取某一深度基坑对天津地区土质条件下地铁盾构的变形影响区进行了研究,未考虑不同土质条件、不同隧道形式对变形影响区的影响。因计算工作量限制,本文选取了相当于常见的地下两层地铁车站基坑或房屋建筑地下三层~地下四层基坑的深度(18 m)进行了分析,今后还应继续对不同开挖深度影响区进行研究。同时,因工程资料有限,今后还应结合更多工程实测数据对基坑开挖影响的既有隧道变形影响区进行更加深入的研究。当然,在实际工程中,因地质条件复杂,现场施工工艺等诸多因素影响,利用变形影响区预估的隧道变形会与实测结果存在一定差异。

参考文献:

- [1] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, et al. Response of a Taipei rapid transit system (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 151 - 158.
- [2] HU Z F, YUE Z Q, ZHOU J, et al. Design and construction of a deep excavation in soft soils adjacent to the Shanghai Metro tunnels[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, 40(5): 933 - 948.
- [3] HWANG R N, DUANN S W, CHENG K H, et al. Damages to metro tunnels due to adjacent Excavations[C]// Proceeding of TC302 Symposium Osaka 2011: International Symposium on Backwards Problem in Geotechnical Engineering and Monitoring of Geo-Construction. 2011: 83 - 88.
- [4] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(2): 93 - 98.
- [5] 高广运, 高盟, 杨成斌, 等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 453 - 459. (GAO Guang-yun, GAO Meng, YANG Cheng-bin, et al. Influence of deep excavation on deformation of operating metro tunnels and countermeasures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 453 - 459. (in Chinese))
- [6] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计

- 算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, **35**(1): 7 - 11. (JIANG Zhao-hua, ZHANG Yong-xing. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnels due to excavation[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, **35**(1): 7 - 11. (in Chinese))
- [7] 蒋洪胜, 侯学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影响[J]. 工业建筑, 2002, **32**(5): 53 - 56. (JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. The influence of deep excavation on adjacent metro tunnel in soft ground[J]. Industrial Construction, 2002, **32**(5): 53 - 56. (in Chinese))
- [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 - 288. (KUANG Long-chuan. Influence of construction of deep foundation pit on tunnels of metro[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(3): 284 - 288. (in Chinese))
- [9] 李进军, 王卫东. 紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和施工[J]. 铁道工程学报, 2011, **158**(11): 104 - 111. (LI Jin-jun, WANG Wei-dong. Design and construction of deep excavation engineering adjacent to the subway tunnel[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2011, **158**(11): 104 - 111. (in Chinese))
- [10] 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 excavation on neighboring metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, **9**(2): 352 - 358. (in Chinese))
- [11] 刘庭金. 深基坑施工对地铁盾构隧道的影响分析[J]. 现代隧道技术, 2008(增刊 1): 216 - 220. (LIU Ting-jin. Analysis on influence of deep excavation on tunnels of metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2008(S1): 216 - 220. (in Chinese))
- [12] 邵华, 王蓉. 基坑开挖施工对邻近地铁影响的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011(增刊 1): 1403 - 1408. (SHAO Hua, WANG Rong. Monitoring data analysis on influence of operating metro tunnel by nearly excavation construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011(S1): 1403 - 1408. (in Chinese))
- [13] 唐仁, 林本海. 基坑工程施工对邻近地铁盾构隧道的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014(增刊 1): 1629 - 1634. (TANG Ren, LIN Ben-hai. Analysis on the impact of the foundation pit construction on neighboring metro tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014 (S1): 1629 - 1634. (in Chinese))
- [14] 王卫东, 沈健, 翁其平, 等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报, 2006(增刊 1): 1340 - 1345. (WANG Wei-dong, SHEN Jian, WENG Qi-ping, et al. Analysis and countermeasures of influence of excavation on adjacent tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006(S1): 1340 - 1345. (in Chinese))
- [15] 温忠义, 张丽娟, 陈松, 等. 基坑支护结构变形对邻近地铁隧道的影响研究[J]. 路基工程, 2014, **176**(5): 144 - 148. (WEN Zhong-yi, ZHANG Li-juan, CHEN Song, et al. The study on the influence of retaining wall of excavation deformation on adjacent metro tunnel[J]. Subgrade Engineering, 2014, **176**(5): 144 - 148. (in Chinese))
- [16] 肖同刚. 基坑开挖施工监控对邻近地铁隧道影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, **7**(5): 1013 - 1017. (XIAO Tong-gang. Analysis on effect of deep-pit excavation and monitoring on neighboring metro tunnel in soft ground[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, **7**(5): 1013 - 1017. (in Chinese))
- [17] 薛永申, 黄玉林. 复杂环境下软土地质深大基坑分区施工技术[J]. 上海建设科技, 2014(1): 36 - 39. (XUE Yong-shen, HUA Yu-lin. Partition construction technology of deep and large-scale excavation in soft soil under complex condition[J]. Shanghai Construction Science & Technology, 2014(1): 36 - 39. (in Chinese))
- [18] 闫静雅. 邻近运营地铁隧道的深基坑设计施工浅谈[J]. 岩土工程学报, 2010(增刊 1): 234 - 237. (YAN Jing-ya. Design and construction of deep foundation pits near metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(S1): 234 - 237. (in Chinese))
- [19] 杨德春, 刘建国. 地铁隧道附近软土深基坑设计与施工关键技术分析[J]. 建筑结构, 2012, **42**(7): 109 - 114. (YANG De-chun, LIU Jian-guo. Key technology analysis of soft soil deep foundation pit design and construction near the subway tunnel[J]. Building Structure, 2012, **42**(7): 109 - 114. (in Chinese))
- [20] 袁静, 刘兴旺, 陈卫林. 杭州粉砂土地基深基坑施工对邻近地铁隧道、车站的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(增刊 1): 398 - 403. (YUAN Jing, LIU Xing-wang, CHEN Wei-lin. Effect of construction of deep excavation in Hangzhou silty sand on adjacent metro tunnels and stations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S1): 398 - 403. (in Chinese))
- [21] 郑立常, 卫建东, 郑俊锋, 等. 基坑施工对临近运营地铁

- 隧道影响监测的实践[J]. 测绘工程, 2007, **16**(2): 47 - 50. (ZHENG Li-Chang, WEI Dong-jian, ZHENG Jun-feng, et al. The practice of deformation monitoring of metro tunnel influenced by the construction of adjacent foundation pit[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2007, **16**(2): 47 - 50. (in Chinese))
- [22] 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**(增刊2): 1728 - 1731. (ZOU Wei-biao, ZHANG Dong-mei, CAI Xiong-wei. Numerical simulation and real time monitoring of foundation pit excavation on deformation of adjacent MRT tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, **8**(S2): 1728 - 1731. (in Chinese))
- [23] CHANG C T, WANG M J, CHANG C T, et al. Repair of displaced shield tunnel of the Taipei rapid transit system[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, **16**(3): 167 - 173.
- [24] RICHARDS J A. Inspection, maintenance and repair of tunnels: International lessons and practice[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, **13**(4): 369 - 375.
- [25] 沪市政法(94) 第 854 号. 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[S]. 1994. (No. 854 of Shanghai Municipal Statute (94). Provisional prescription on protecting techniques of metro[S]. 1994. (in Chinese))
- [26] GJJ/T 202—2013. 城市轨道交通结构安全保护技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (GJJ/T 202—2013 Technical code for protection structure of urban rail transit[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [27] GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. (GB 50911—2013 Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese))
- [28] ZHENG G WEI S W. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, **15**(S2): 69 - 75.
- [29] ZHENG G, WEI S W, WU C W Ng, et al. Centrifuge modeling of the influence of basement excavation on existing tunnel[C]// 7th International Conference on Physical Modeling in Geotechnics. Zurich, 2010: 523 - 527.
- [30] 郑刚, 邓旭, 刘畅, 等. 不同围护结构变形模式对坑外深层土体位移场影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(2): 273 - 285. (ZHENG Gang, DENG Xu, LIU Chang, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on displacement field of deep soils outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(2): 273 - 285. (in Chinese))
- [31] 郑刚, 王琦, 邓旭, 等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(7): 1181 - 1194. (ZHENG Gang, WANG Qi, DENG Xu, et al. Comparative analysis of influence of deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside of the excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(7): 1181 - 1194. (in Chinese))
- [32] The International Tunneling Insurance Group (ITIG). The joint code of practice for risk management of tunnel works[S]. British: the British Tunneling Society, 2006.
- [33] SIMPSON B. Retaining structure-displacement and design(32nd Rankine Lecture)[J]. Géotechnique, 1992, **42**(4): 541 - 576.
- [34] KUNG G, HSIAO E, JUANG C. Evaluation of a simplified small-strain soil model for analysis of excavation-induced movements[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, **44**(6): 726 - 736.
- [35] LEE K M, Ge X M. The equivalence of a jointed shield driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, **38**: 461 - 483.
- [36] KUNG G, JUANG C, HSIAO E, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, **133**(6): 731 - 747.
- [37] SCHUSTER M, KUNG G, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(12): 1823 - 1835.
- [38] GB50157—2003 地铁设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003. (GB50157—2003 Code for design of metro[S]. Beijing: China Planning Press, 2003. (in Chinese))
- [39] 龚晓南, 高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (GONG Xiao-nan, GAO You-chao. Construction and design manual of deep excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))