

DOI: 10.11779/CJGE201507003

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

郑刚^{1,2}, 王琦^{1,2}, 邓旭^{1,2}, 杜一鸣^{1,2}

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 随着越来越多的地铁建成并投入运营, 既有地下隧道受邻近基坑施工的影响及控制成为越来越重要的问题。通过建立考虑土体小应变的有限元模型, 针对4种典型围护结构变形模式引起的坑外不同位置处隧道变形特点以及位移影响范围进行分析, 结果表明: 在围护结构最大变形相同而变形模式不同的情况下, 坑外既有隧道的变形也会存在较大的差异。根据隧道拱顶拱底的竖向变形特点, 可将基坑外不同位置的隧道根据其变形分为沉降区、变形过渡区及隆起区。悬臂型模式对坑外隧道的位移影响范围最小, 内凸型与复合型模式影响范围基本相同, 分布大于悬臂型, 而踢脚型模式下范围最大。在实际工程中除控制围护结构最大变形值外, 尚应根据周围环境特点合理控制围护结构变形模式, 并尽可能避免出现踢脚模式变形。

关键词: 围护结构; 变形模式; 既有隧道; 变形特点; 影响范围

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)07-1181-14

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。

Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations

ZHENG Gang^{1,2}, WANG Qi^{1,2}, DENG Xu^{1,2}, DU Yi-ming^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: As more and more subways have been constructed and put into operation, control of the influences of the adjacent excavation on the existing tunnels becomes more and more important. Both the deformation characteristics of the existing tunnels at different locations and the influenced range of displacement caused by four deformation modes of retaining structures are analyzed through FEM modeling. The results show that under the situations of different deformation modes of retaining structures with the same maximal horizontal displacement, the deformations of the existing tunnels outside the excavations can be considerably different. According to the vertical deformation characteristics of the vault and invert of the tunnel, the soil layer outside the excavation can be divided into three zones, i.e., settlement zone, transition zone and heave zone. The effect zone on the deformation of the existing tunnel caused by the cantilever deformation of retaining structures is the smallest; for the convex and composite deformation modes, the ranges are similar and their distribution is larger than that of the cantilever deformation mode; the influenced range caused by the kick-in deformation mode is the largest among these four modes. In practice, besides controlling the maximum horizontal displacements of the retaining structures, the deformation mode of the retaining structures should also be optimized according to the surrounding environment, and the kick-in deformation of the retaining structures should be avoided.

Key words: retaining structure; deformation mode; existing tunnel; deformation characteristic; effect zone

0 引言

目前, 随着城市轨道交通的不断完善, 在既有地铁隧道邻侧进行建筑施工的活动也日益增多, 其中以基坑工程产生的影响最为突出。基坑围护结构在坑内

外水、土压力差的作用下发生向坑内方向的移动, 将

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: 2014-06-04

表 1 邻近既有隧道进行基坑施工的典型案例

Table 1 Typical cases of excavation construction in proximity of adjacent existing tunnels

编号	项目名称	基坑深度 /m	地铁隧道相关资料			隧道最大变形情况 ^①	
			线路编号	顶部埋深/m	与基坑净距/m	水平位移/mm	竖向位移/mm
1	上海某广场基坑 ^[3]	14.4	2	约 9.3	7~11	10	-10
2	上海广场基坑(北坑) ^[4]	约 16	1 ^②	约 14.4	2.8~5	13	-5
3	广州黄沙上盖物业建筑群 ^[5]	12	1	7	6	约 8	-12.3
4	杭州市某控制中心 ^[6]	约 13	1	7.3	8.1	1.52	-4.11
5	上海 1788 地块某项目 ^[7]	约 14	2	约 8.5	10.4~13.5	—	5.5/-3.5 ^③
6	天津某基坑项目	15	铁路隧道	15	16.6	14.56	9.09
7	苏州工业园区公积金大厦 ^[8]	12.2	1	11.4~12.7	9.5~14	1.05	6.5
8	上海市闸北区大宁商业中心 ^[9]	6~6.7	1	11.8	5.45	4	7.1

注:①隧道在水平方向以朝向基坑移动为正,在竖向则以隆起为正;②1 号线下行线隧道;③靠近基坑侧隧道最大竖向位移 5.5mm,远离基坑侧隧道最大竖向位移-3.5mm。

引起坑外土体位移场变化,从而导致地铁隧道随之发生变形,严重时还将引起结构破坏,威胁地铁的运营安全^[1-2]。

本文列举了 8 个邻近既有地铁隧道进行基坑施工的典型案例,将隧道与基坑的位置关系以及引起的隧道竖向与水平向的最大位移列于表 1 中,其中隧道在水平方向以朝向基坑移动为正,在竖向则以隆起为正。

从表中可以看出,坑外土体由于受到侧向卸荷作用产生向坑内的移动,导致坑外隧道的水平位移也均为正值,即发生朝向基坑的移动。而坑外隧道的竖向位移变化却相对比较复杂,部分案例中隧道发生沉降(如案例 1~4 及案例 5 中远离基坑侧隧道),而另一部分案例中隧道则产生隆起变形(如案例 5 中靠近基坑侧隧道及案例 6~8)。引起这种差异的原因不仅与土层分布、支护体系形式、降水、辅助工法施工以及现场施工环境等因素有关,也应与基坑和隧道的相对位置密切相关。

已有研究表明,受水平支撑沿深度的布置间距、水平支撑不同位置提供围护结构的支撑刚度以及施工方法等因素的影响,围护结构变形模式可以归纳为悬臂、踢脚、内凸和复合 4 种^[10]:对柔性围护结构,当不设置支撑或者开挖较浅、还未设置支撑时,表现为顶部位移最大的悬臂式分布;若开挖初期顶部即设置支撑,则表现为墙顶位移不变或向坑外移动,墙体中部向基坑内突出的内凸式模式;悬臂式与内凸式的组合即为复合式变形;而对于墙底位于软土中的围护结构,若插入深度较浅,墙底则会产生较大的位移,表现为踢脚变形模式^[11]。4 种变形模式示意如图 1 所示。郑刚等^[12]对天津某开挖深度 22.5 m 的基坑进行了实测,进一步发现了即使对同一个基坑,不同位置处的围护桩也可发生图 1 所示的不同形式的变形。

目前中国主要的基坑方面的相关规范^[13-14]对基坑

围护结构的变形均是控制围护结构的最大变形。然而,郑刚等^[15]通过大量有限元分析认为,即使围护结构产生的最大水平位移值相同,但由于围护结构的不同变形模式,基坑外地表沉降以及建筑物变形会存在较大的差异。郑刚等^[12]的进一步研究表明,不同的围护结构变形模式下,即使围护结构最大水平位移值相同,坑外深层土体水平和竖向位移规律、开挖对坑外土体扰动影响范围也可存在显著差别。

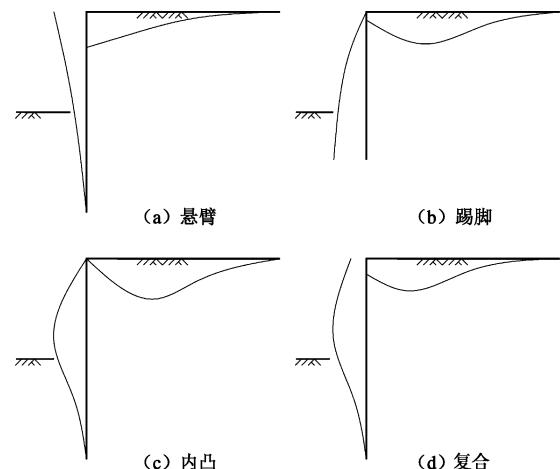
图 1 围护结构典型变形模式^[10]

Fig. 1 Typical profiles of deflection of retaining structures

因此,可以推测,基坑不同的围护结构变形形式也可进而引起基坑外的既有隧道结构产生不同程度的变形。因此,分析基坑开挖对邻近既有隧道结构的影响,不能仅仅控制围护结构的最大位移,尚需考虑围护结构不同变形模式产生的影响。

本文通过采用考虑土体小应变刚度特性的有限元软件,建立包含基坑及盾构隧道的整体模型,针对不同围护结构变形模式下基坑开挖引起的坑外既有隧道变形进行精细化分析,研究各种围护结构变形模式下坑外不同距离、不同深度处隧道的变形特点及分布规

律, 并结合既有隧道变形控制标准, 分别将4种模式下隧道产生过大位移的影响范围进行划分和比较。从而为实际基坑设计过程中, 针对隧道位置选择合理围护结构变形模式, 减小基坑开挖对既有隧道的影响提供参考依据。

1 数值分析模型及参数验证

根据已有研究, 可将围护结构变形模式归纳为内凸型、悬臂型、复合型以及踢脚型4类。本文将首先对内凸型变形模式进行详细介绍, 其余3种变形模式将在内凸型模型基础上通过调整围护结构刚度、支撑位置及支撑刚度来控制。此外, 为满足踢脚型变形模式, 在基坑内坑底以下还设置一层软弱土层以保证围护结构墙底向坑内产生的水平位移最大。

1.1 计算模型及参数介绍

(1) 模型几何尺寸

本文采用Plaxis有限元软件进行建模计算。仍然采用笔者在文献[12]中采用的算例。模型中取基坑的开挖深度为18 m, 考虑对称性取1/2基坑尺寸进行建模, 坑内宽度取为30 m。同时, 模型坑外范围取为120 m, 约为6.7倍开挖深度, 而坑底以下取3倍挖深, 即54 m, 模型尺寸如图2所示, 需要指出的是, 为便于绘图, 尺寸示意图在水平方向未按比例绘制。

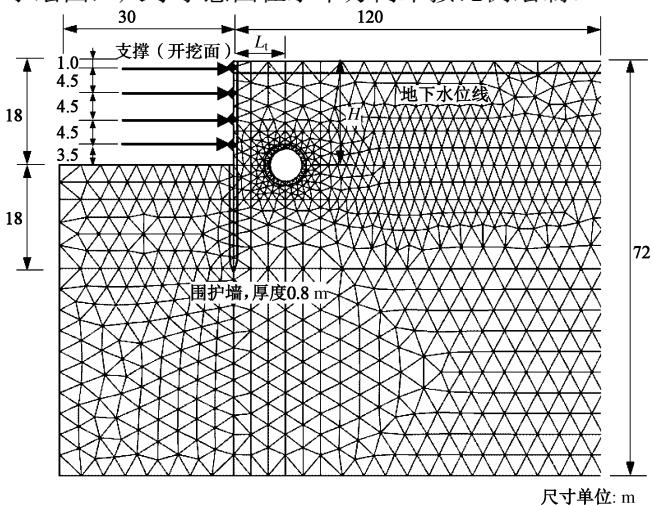


图2 模型尺寸示意图

Fig. 2 Dimension of FEM model

(2) 土层参数

模型中的土体采用Plaxis有限元软件中的小应变硬化模型(HSS)进行模拟, 并选取天津市区土层中典型的粉质黏土层参数。为简化起见, 并专门研究隧道位置变化的影响, 采用单一土层进行计算分析。具体的土体物理力学参数指标: $\gamma=19.78 \text{ kN/m}^3$, $c'=13.95 \text{ kN/m}^2$, $\varphi'=25.66^\circ$, $\gamma_{0.7}=0.2 \times 10^{-3}$, $E_{50}^{\text{ref}}=7210 \text{ kN/m}^2$, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}=5055 \text{ kN/m}^2$, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}=36770 \text{ kN/m}^2$,

$G_0^{\text{ref}}=147100 \text{ kN/m}^2$ 。其中, γ 为土体的重度, c' 为土体的有效黏聚力, φ' 为土体的有效内摩擦角, E_{50}^{ref} 为三轴试验参考围压下50%强度的割线模量, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载/重加载参考模量, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为固结仪试验在参考围压下的切线模量。此外模型中还增加两个指标用以反映土体小应变特性: 初始阶段小应变的参考剪切刚度 G_0^{ref} 和剪切应变水平参数 $\gamma_{0.7}$, 其中 $\gamma_{0.7}$ 表示初始剪切刚度 G_0 减小到70%时的应变水平。为保证上述模型参数的准确性, 取现场土体进行室内试验, c' , φ' 通过固结排水三轴试验取得, E_{50}^{ref} 通过排水三轴试验取得, $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 通过排水加卸载三轴试验取得, $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 通过固结试验取得, 而 G_0 和 $\gamma_{0.7}$ 由于常规试验很难确定, 则结合工程经验^[16]确定。

(3) 隧道参数

模型中坑外既有隧道以天津地铁2,3号线实际设计为依据, 管片外径6.2 m、管片厚度0.35 m。本文采用等效刚度法模拟既有隧道, 假定混凝土管片在基坑开挖过程中一直处于弹性变形阶段, 根据LEE等^[17]的研究成果, 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。弹性模量取为C50混凝土模量值($E_{\text{C50}}=34.5 \text{ GPa}$)的75%, 即 $E=0.75E_{\text{C50}}=25.875 \text{ GPa}$, 泊松比取为0.2。

(4) 隧道与基坑相对位置参数

为了分析基坑开挖对坑外不同位置处隧道变形的影响规律, 定义隧道中心距围护结构水平距离为 L_t 以及隧道中心埋置深度为 H_t , 并分别选取8种不同水平间距 L_t (包括6 m(0.33H)、9 m(0.5H)、12 m(0.67H)、15 m(0.83H)、21 m(1.17H)、27 m(1.5H)、33 m(1.83H)和39 m(2.17H))及5种不同中心埋深 H_t (包括9 m(0.5H)、18 m(1H)、27 m(1.5H)、36 m(2H)和45 m(2.5H))分别进行组合, 组成40种工况, H 为基坑深度, $H=18 \text{ m}$ 。其中, 隧道中心埋深最浅为9 m, 即为隧道拱顶覆土厚度约为1倍管片外径的浅埋隧道; 隧道中心距围护结构水平距离最小为6 m, 即两者之间净距约为0.5倍管片外径。深度36, 45 m虽然目前实际工程中很少采用, 在本文中主要是为了对比考虑加大隧道埋深后的影响。

1.2 模型土体参数验证

为了验证模型中土体所采用的小应变硬化模型(HSS)及相应参数的合理性, 本文计算了不含隧道条件下, 基坑开挖引起的坑外土体变形, 其中计算所得的地表沉降及水平位移曲线分别如图3(a)和(b)中实线所示。而Ou等^[18]、上海地区规范^[19]及永银大厦基坑实测数据^[20]、Schuster等^[21]基于实测及数值分析提出的地表沉降和水平位移经验预测曲线则分别如图中虚线(工程实测数据用点表示)所示。通过比较

可以发现, 在地表沉降方面, 计算曲线与经验预测曲线及实测数据基本吻合, 而对于地表水平位移, 经验曲线反映约在距围护结构水平距离达到 2.5 倍坑深位置处存在转折点, 大小为 0.4 倍最大水平位移值, 而本文模型显示计算所得水平位移曲线的凹槽段范围略小于经验曲线, 但是计算曲线与经验曲线的变化趋势相似, 尤其在水平距离 1 倍坑深范围内吻合较好, 因此可以说明考虑土体小应变特性的本构模型可以很好的反映坑外土体的变形情况。同时也说明本文模型中所采用的土体参数合理可靠, 能够得到比较满意的计算结果, 可以在此基础上进一步研究基坑开挖引起的围护结构不同水平位移模式对于坑外既有隧道变形的影响。

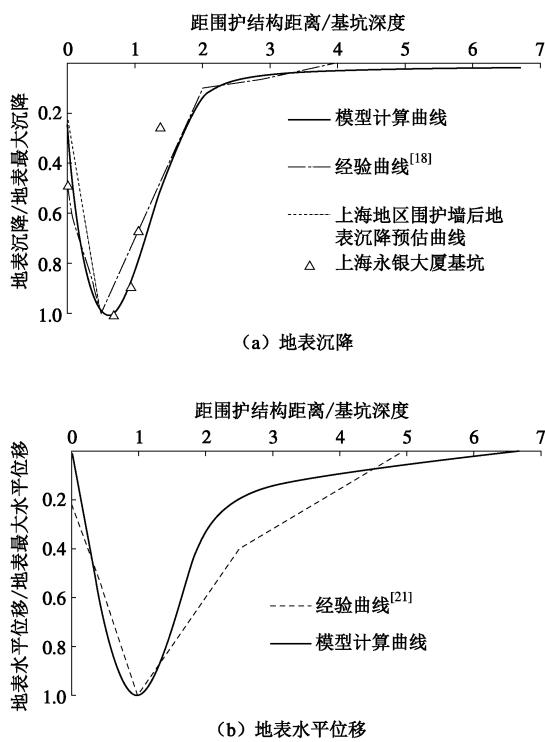


图 3 坑外地表变形曲线对比图

Fig. 3 Comparison of curves of ground surface deformation

2 围护结构内凸型模式下坑外既有隧道的变形特性

首先以内凸型变形模式为例, 分析其引起的坑外既有隧道的变形规律, 然后再与其它围护结构变形模式引起的坑外既有隧道变形进行对比分析。

2.1 不同位置处隧道变形特性

为对比内凸型变形模式下, 不同位置处隧道的变形特性, 将基坑开挖完成后不同位置处的隧道变形示意图绘制在同一图中(变形放大 200 倍), 并在隧道关键位置处标注相应的位移值, 如图 4 所示。图中规定

拱顶、拱底为竖向位移值, 以隆起为正、沉降为负, 而左右拱腰为水平位移值, 以指向基坑方向移动为正、反之为负。需要指出的是, 为便于绘图, 隧道水平方向位置与深度位置并未按照相同比例绘制。

从图 4 中可以看出, 当围护结构产生内凸型变形时, 墙顶位移几乎为 0, 最大位移出现在坑底附近, 导致不同位置处隧道均产生指向围护结构最大位移处的移动和相应的自身相对变形。但是随着隧道距基坑距离以及埋深的变化, 不同位置处的隧道变形特性也有所差异。

如图所示, 对于浅埋隧道 ($H_t=0.5H$) 而言, 由于其位于基坑开挖面以上, 故当基坑开挖完成后, 隧道在竖向均产生沉降, 并且自身产生椭圆形相对变形以及一定程度的旋转。值得注意的是, 当隧道距离基坑较近时(如 $L_t=0.33H$), 由基坑开挖引起的隧道自身相对变形与其余位置相比相对较小, 隧道主要表现为整体性移动。笔者针对基坑开挖引起坑外土体位移场变化进行的研究表明^[12], 围护结构内凸型变形模式下, 坑外靠近基坑处的浅层土体, 其水平位移随着距围护结构距离的增加而逐渐增大(即紧邻围护结构的浅层土体存在水平方向的受压区), 直至一定范围外才转为随距离增加位移逐渐减小(即土体在水平方向受拉)。地表下浅层土体受压区的存在对区域内的既有隧道水平方向卸荷产生一定的补偿作用, 使得隧道更多表现为整体移动, 而没有产生明显的自身相对变形。

当隧道中心埋深位于基坑开挖面深度处时 ($H_t=1H$), 隧道仍表现为沉降, 但是由于围护结构在坑底变形达到最大, 坑外土体在水平方向卸荷明显, 导致该深度处的隧道产生比较显著的水平位移和自身相对变形。随着隧道埋置深度的增加, 深层土体受基坑开挖卸荷影响产生隆起变形, 引起隧道拱底逐渐由沉降过渡为上抬变形, 形成拱顶沉降拱底上抬的变形状态, 此时隧道均产生一定程度的顺时针方向旋转。而当隧道中心埋深超过围护结构底部时, 隧道拱顶也转变为隆起状态, 但此时基坑开挖对隧道变形的影响相对较弱, 引起的隧道位移及自身相对变形均较小。

根据前文对于围护结构内凸型模式下, 坑外不同位置处既有隧道变形特性的描述, 结合隧道拱顶拱底的竖向变形规律, 可以将距基坑较近范围内, 不同位置处的隧道划分为 3 个变形特性区域, 如图 4 所示。

(1) 沉降区: 从浅层至坑底开挖面以下一定深度以内的区域, 基坑开挖完成后隧道的拱顶、拱底位置均表现为下沉, 隧道产生沉降变形, 定义为沉降区。处于该区域内的隧道, 尤其是浅埋隧道, 竖向表现为明显的沉降变形, 同时其水平位移也比较显著, 两个

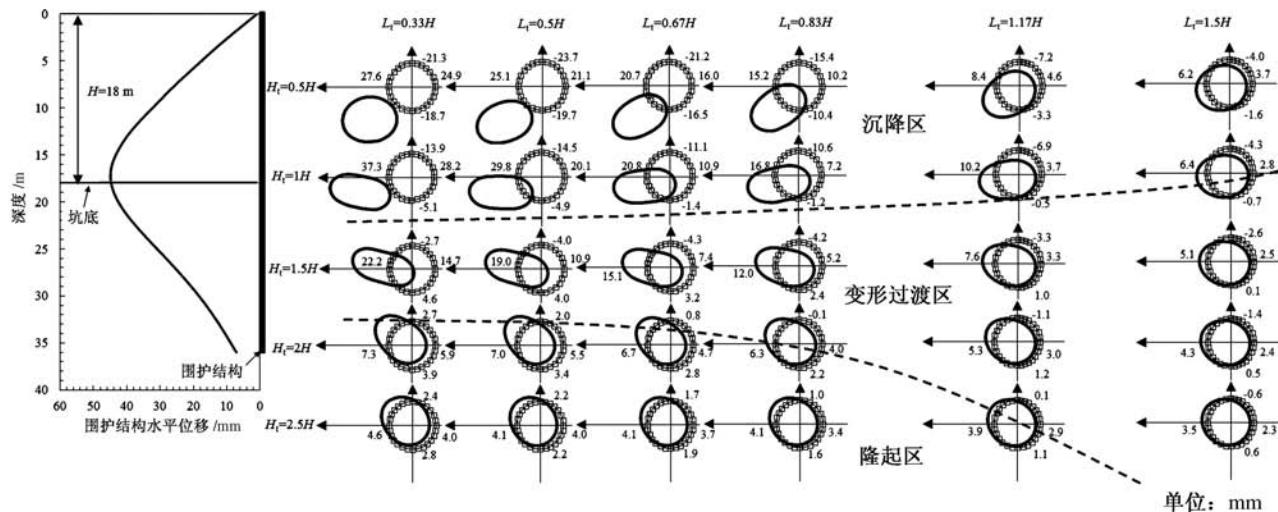


图 4 内凸型模式下, 不同位置处隧道变形及特性分区示意图

Fig. 4 Deformations of tunnels at different locations and classified zones caused by convex deformation of retaining structures

方向的位移均需引起关注; 而随着深度增加, 受围护结构内凸型变形模式的影响, 隧道水平位移逐渐增加, 而沉降逐渐减小, 水平位移成为隧道变形的主要因素。

(2) 变形过渡区: 该区域位于沉降区以下的一定范围内, 主要表现为基坑开挖完成后, 隧道拱顶下沉拱底上抬, 隧道由浅层的沉降变形逐渐向深层隆起变形过渡, 故定义为变形过渡区。该区域内, 隧道拱顶下沉拱底上抬, 隧道中心的竖向位移不大, 但受围护结构变形的影响, 隧道的水平方向仍存在较大的位移。因此对该区域内的隧道, 应更多关注其水平方向的变形情况。

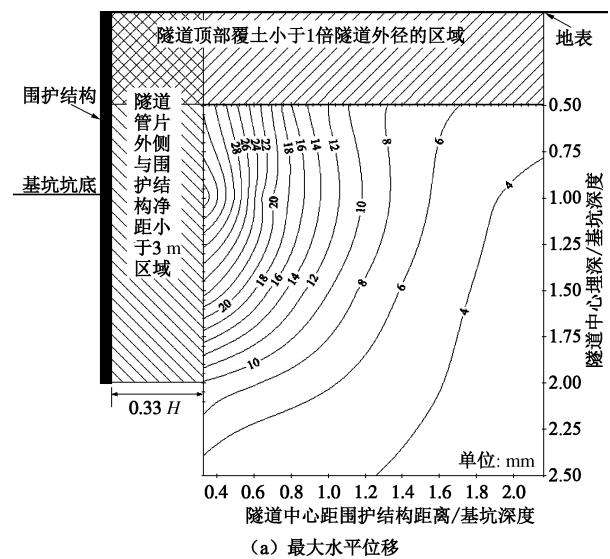
(3) 隆起区: 受基坑开挖卸荷作用的影响, 围护结构墙底附近及墙底以下深度的土体产生隆起, 导致相应位置处隧道拱顶拱底均呈上抬变形, 但由于影响较弱, 与沉降区及过渡区相比, 隧道的隆起变形值很小。并且隆起区在水平方向的扩展范围非常有限, 水平方向距墙底 1 倍挖深范围之外的隧道隆起变形几乎可以忽略。

由分析可知, 隧道位置不同, 受基坑开挖影响的变形特性也有差异, 对于沉降区内的隧道, 尤其是浅埋隧道, 其水平位移与沉降均较大, 而变形过渡区内的隧道则更应重视其水平方向的位移, 因此在实际工程中应结合隧道所处位置区别处理, 制定合适的隧道保护方案。

根据前文对于内凸型模式下隧道位移的计算结果, 将不同位置处隧道产生的最大水平位移和最大竖向位移分别绘制成等值线图, 如图 5 所示。根据相关规范^[22]规定, 地铁两侧的邻近 3 m 范围内不能进行任何工程, 因此隧道应位于基坑围护结构 3 m 以外区域

(如图 5 (a) 中左侧阴影范围), 故隧道中心距围护结构最近距离为 0.33H (约 6 m); 通常隧道埋深不应小于 1 倍隧道外径^[23], 因此隧道应位于地表下 1 倍隧道外径以下区域 (如图 5 (a) 中上部阴影范围), 故隧道中心埋深最浅为 0.5H (约 9 m)。后文中所列各图中的规定均与图 5 (a) 一致, 不再赘述。

从图 5 中可以看出, 当围护结构产生内凸型变形时, 隧道水平位移的最大值出现在紧邻基坑的坑底开挖面深度处, 表示隧道中心埋深位于坑底深度附近时受围护结构内凸型变形模式影响产生的水平位移最大, 并随着距离的增加位移值逐渐减小; 而隧道竖向位移则随着深度增加沉降值逐渐减小, 并且在坑底以下一定深度范围内过渡为隆起变形, 但最大隆起值仅为 5 mm 左右, 说明此时隧道受基坑开挖的卸荷作用影响较小。



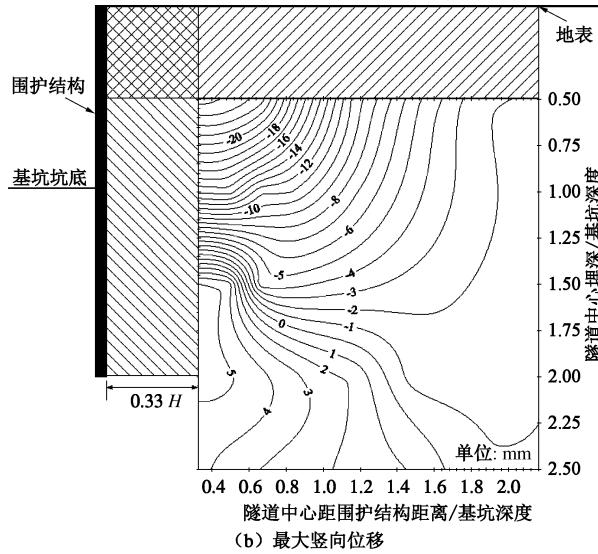


图 5 隧道最大位移等值线分布

Fig. 5 Contours of maximum displacement of tunnels

2.2 隧道位移影响区划分

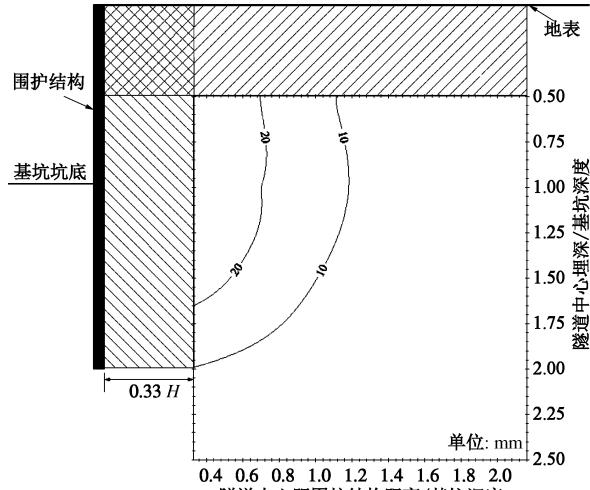
由于既有隧道结构对附加变形控制要求极高, 上海地区规范要求地铁结构设施的绝对沉降量以及水平位移量均应小于 20 mm^[22]; 上海广场项目则将下卧隧道的水平向位移和竖向位移的报警值定为±10 mm, 而两个方向的位移值必须控制在±20 mm 以内^[4]。参考上述规定及类似工程项目的控制要求, 本文规定基坑开挖作用下, 坑外既有隧道最大水平和竖向位移的警戒值为±10 mm, 控制值为±20 mm。此外, 结合上海及广州的相似工程^[24-25], 对隧道收敛变形及两轨横向高差也进行监测, 参考相应控制标准规定隧道收敛控制值为 20 mm, 两轨高差控制值为 2 mm。

将基坑开挖完成后, 坑外既有隧道水平位移和沉降达到警戒值标准和控制值标准时的位移等值线分别绘制在图 6 (a) 和 (b) 中, 并将上述水平位移和沉降的等值线同时绘制在图 6 (c) 中进行比较。从图 6

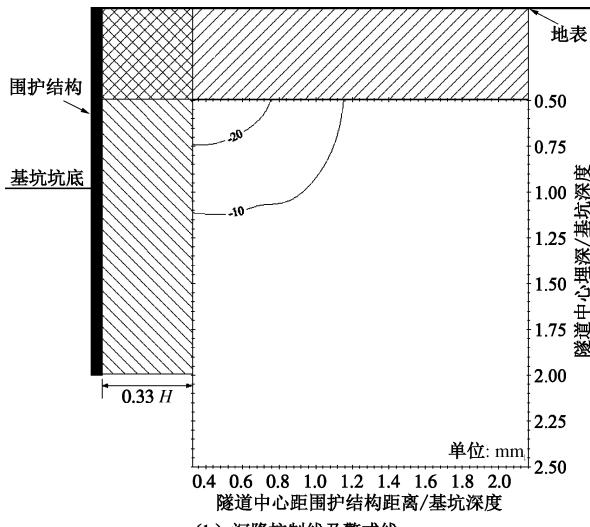
(c) 中可以看出, 当围护结构发生内凸型变形时, 不论是对于警戒值还是控制值, 基坑开挖引起坑外既有隧道的水平位移影响范围均要远大于隧道沉降, 仅在埋深较浅时隧道沉降的影响范围略大于水平位移。

将隧道沉降及水平位移分别达到±10 mm 警戒值时等值线所包围的范围以一条曲线近似代替, 定义为隧道位移警戒线(如图 6 (c) 中右侧粗虚线所示), 当隧道中心位于曲线以外时, 隧道受基坑开挖影响所产生的最大沉降及水平位移均小于警戒值, 即基坑开挖不会对结构安全造成严重威胁, 此范围为隧道安全区; 同样可以近似定义一条曲线作为隧道位移控制线, 包括隧道达到±20 mm 控制值时的等值线(如图 6 (c) 中左侧粗实线所示), 该曲线以内的区域则为危险区, 对于中心位于该区内的隧道, 其位移将会超过控制值, 因此在基坑施工过程中必须采取相应措施对隧道进行

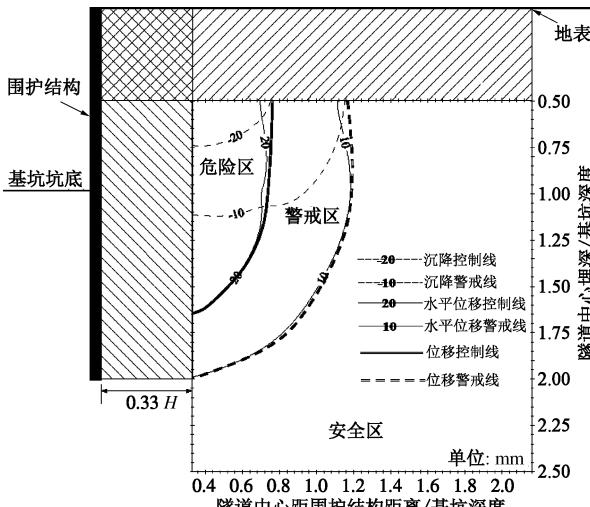
保护与修复, 使隧道位移满足控制要求; 而位于控制线与警戒线之间区域内则为警戒区, 其内的隧道虽然位移尚未达到控制值, 但应引起高度重视, 进行密切监测, 采取有效的防范措施, 并制定应急处理方案, 防止隧道变形继续增加。



(a) 水平位移控制线及警戒线



(b) 沉降控制线及警戒线



(c) 水平位移及沉降综合比较

图 6 隧道位移影响区划分

Fig. 6 Influenced ranges of displacement of existing tunnels

可以看出, 在围护结构内凸型变形模式下, 不论是隧道的位移控制线还是警戒线, 主要均由隧道的水平位移影响范围确定, 仅在浅层土体中由隧道的沉降影响范围控制。

根据计算结果可知, 围护结构产生内凸型变形, 坑外不同位置隧道均随之发生水平直径拉伸、竖向直径压缩的相对变形, 并产生不同程度的旋转。当围护结构最大位移为 45 mm 时, 不同位置处隧道的水平和竖向直径收敛值的最大值仅达到 9.89 mm, 远小于 20 mm 的隧道收敛控制值; 而两轨高差最大值约为 1.64 mm, 也小于两轨间 2 mm 的高差控制值。因此可以看出, 在围护结构内凸型模式下, 当围护结构的最大位移为 45 mm 时, 应重点关注隧道的水平及竖向位移, 尤其是隧道的水平向位移, 必要时应采取措施控制其位移发展; 而对于隧道收敛以及两轨高差应密切监测, 防止其超过相应的控制标准。

3 围护结构不同变形模式下坑外隧道变形特性及影响范围对比

前文详细分析了围护结构内凸型变形模式下坑外不同位置处隧道的变形特性及位移影响区划分。在实际工程中基坑围护结构的变形可表现为不同的分布模式, 相应地, 坑外隧道的变形也会有所差别。因此, 下文将在前述内凸型变形模式基础上进一步探讨悬臂型、复合型以及踢脚型变形模式对坑外既有隧道变形的影响, 并将相应的位移影响区范围进行对比分析, 以深入了解不同围护结构变形模式下坑外既有隧道的变形分布规律。

在内凸型模型的基础之上, 通过在合理范围内调整水平支撑刚度、水平支撑标高和围护结构刚度等方

法, 在保证围护结构最大位移保持 45 mm 不变的前提下, 得到其余 3 种典型围护结构变形模式。

3.1 悬臂型变形模式下隧道变形特性及影响区范围

图 7 为悬臂型变形模式下, 坑外不同位置处既有隧道变形以及特性分区示意图 (变形放大 200 倍); 图 8 为悬臂型模式下隧道产生的最大水平位移和最大竖向位移等值线图。

结合图 7, 8 可以看出, 当围护结构呈顶部位移最大、随深度增加位移逐渐减小的悬臂型变形时, 坑外既有隧道也表现为浅埋隧道 ($H_t=0.5H$) 的变形最大、随着埋深增加变形逐渐减小的变化趋势, 即悬臂型变形模式对浅埋隧道的位移影响更加明显。但是由于围护结构的最大位移出现在顶部, 只引起坑外近基坑处的浅层土体产生较大的变形, 而隧道通常存在一定的埋置深度, 受围护结构的变形影响相应减弱, 尤其是对于隧道的竖向变形, 最大沉降值小于 8 mm。与内凸型模式相似, 悬臂型模式下坑外隧道变形特性同样可以分为沉降区、变形过渡区和隆起区, 但是与内凸型的各区范围相比, 悬臂型中沉降区的深度明显较小, 位于开挖面以上, 变形过渡区范围增加。总体而言, 围护结构悬臂型变形模式下坑外隧道的位移以水平位移为主, 并在整体位移和自身相对变形方面均明显小于内凸型模式。图 9 为悬臂型模式下, 隧道位移影响区划分示意图。可以看出, 隧道产生 10 mm 和 20 mm 的水平位移等值线范围明显小于内凸型模式, 尤其是隧道水平位移超过 20 mm 的范围非常有限, 仅出现在靠近围护结构的一小块浅层区域内。并且由于隧道产生的最大沉降不超过 8 mm, 最大隆起小于 5 mm, 低于 ± 10 mm 的位移警戒值, 导致隧道的位移警戒线与控制线完全由隧道的水平位移等值线确定, 表明当围

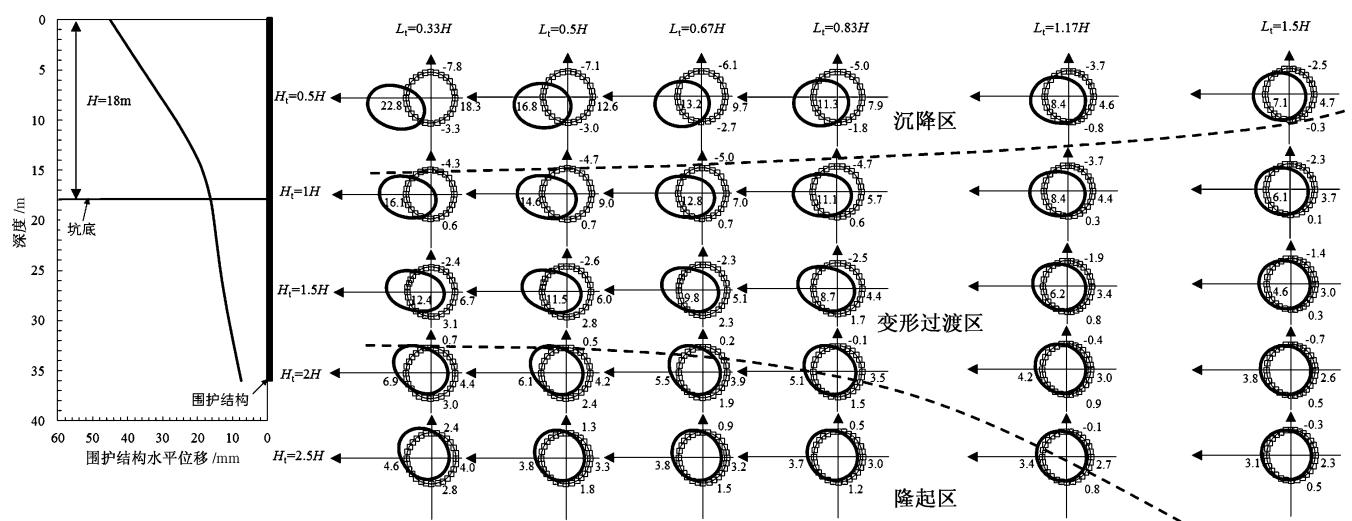
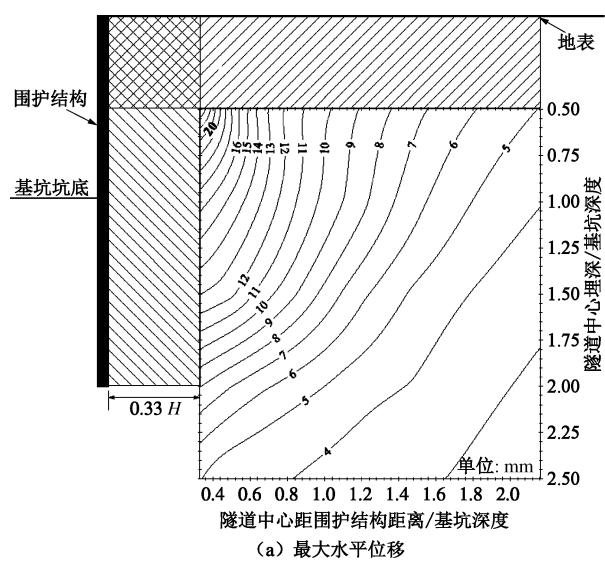
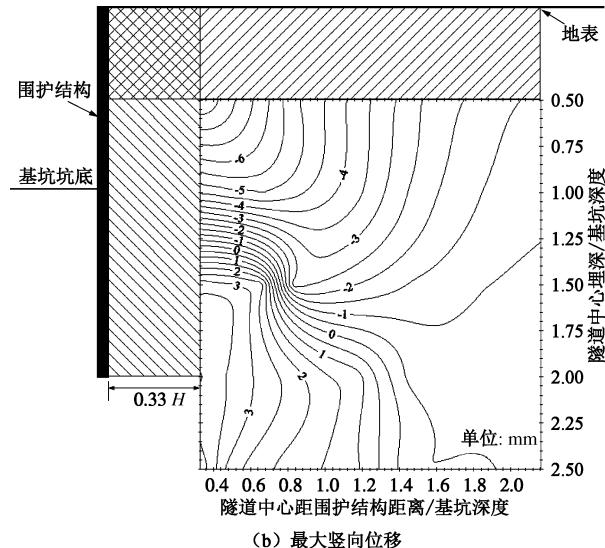


图 7 悬臂型模式下, 不同位置处隧道变形及特性分区示意图

Fig. 7 Deformations of tunnels at different locations and classified zones caused by cantilever deformation of retaining structures



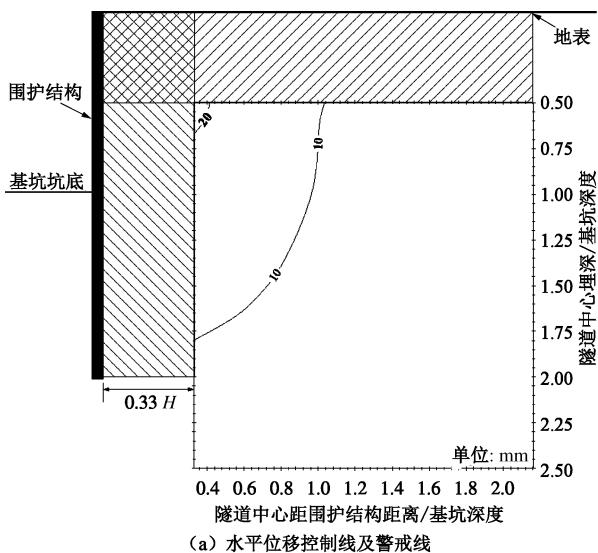
(a) 最大水平位移



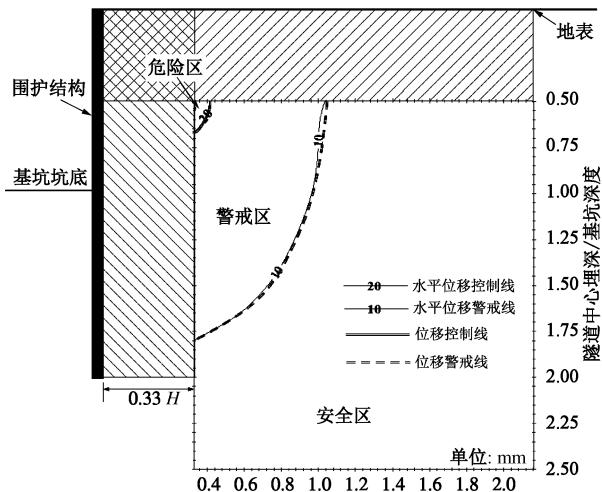
(b) 最大竖向位移

图 8 隧道最大位移等值线分布

Fig. 8 Contours of maximum displacement of tunnels



(a) 水平位移控制线及警戒线



(b) 水平位移及沉降综合比较

图 9 隧道位移影响区划分

Fig. 9 Influenced ranges of displacement of existing tunnels
护结构产生悬臂型变形模式时, 应更多关注坑外隧道在水平方向上的位移, 并有针对性的采取措施减小其水平移动。悬臂型模式下, 当围护结构最大位移达到 45 mm 时, 不同位置处隧道的水平和竖向直径收敛值的最大值仅为 5.85 mm, 远小于 20 mm 的隧道收敛控制值; 而两轨高差最大值约为 0.87 mm, 也小于两轨间 2 mm 的高差控制值。因此, 当围护结构产生悬臂型变形, 最大位移为 45 mm 情况, 应重点注意隧道的水平位移, 采取措施防止其产生超过控制标准的移动, 同时对于隧道竖向位移、收敛变形及两轨高差进行密切监测。

3.2 复合型变形模式下隧道变形特性及影响区范围

图 10 为复合型变形模式下, 坑外不同位置处既有隧道变形和特性分区示意图 (变形放大 200 倍); 图 11 为复合型模式下隧道产生的最大水平位移和最大竖向位移等值线图。

围护结构复合型变形形式与内凸型相似, 墙身最大位移位置出现在坑底深度附近, 区别在于复合型模式下围护结构顶部会产生一定的位移。因此, 通过与图 4, 5 的比较可以看出, 复合型模式引起的坑外不同位置处隧道变形特性和位移等值线分布与内凸型模式趋势相似, 尤其是对于坑底及坑底以下深度的隧道, 其水平和竖向位移基本相同, 导致沉降区、变形过渡区及隆起区的分布也趋于一致。仅对于浅埋隧道 ($H_t=0.5H$) 而言, 由于围护结构顶部的位移引起隧道产生更大的水平方向移动, 需要引起注意。

图 12 为复合型模式下, 隧道位移影响区划分示意图。与内凸型模式下略有不同, 内凸型模式下当隧道埋深较浅时, 隧道沉降的影响范围略大于水平位移, 位移警戒线和控制线在浅层需根据沉降的影响范围确

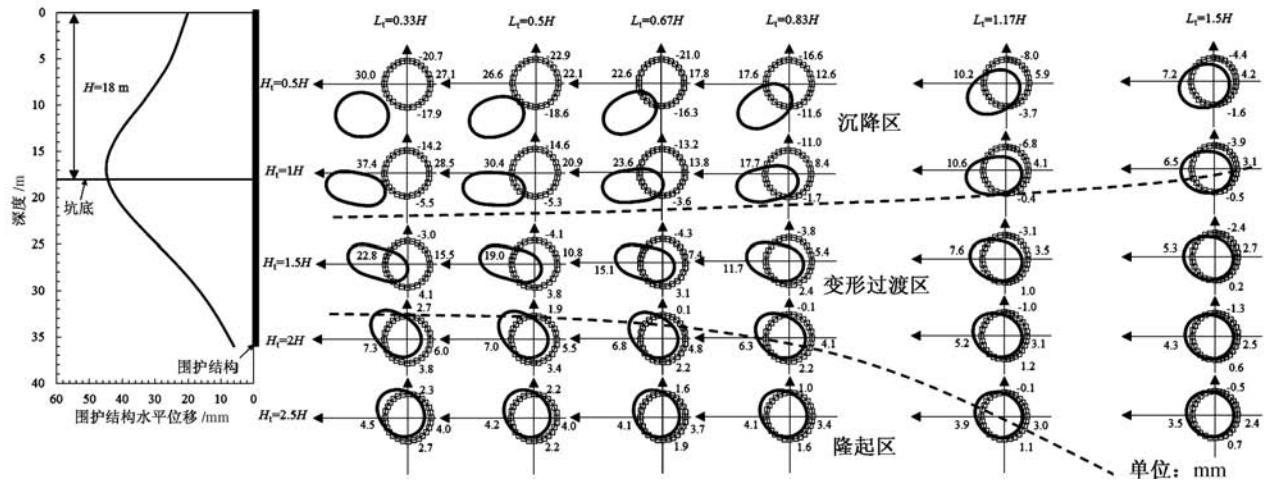
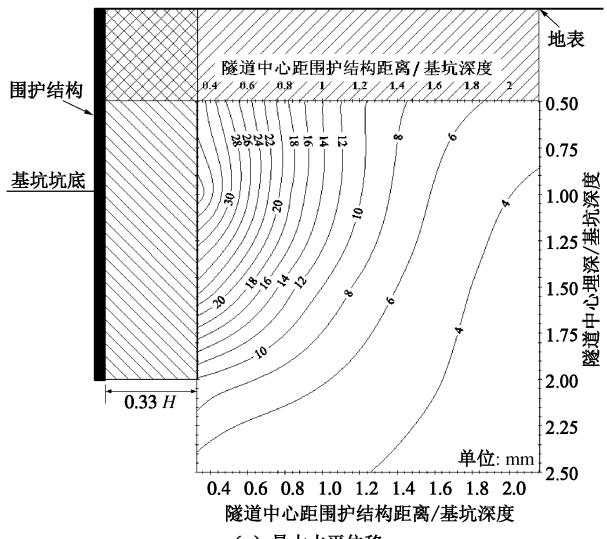


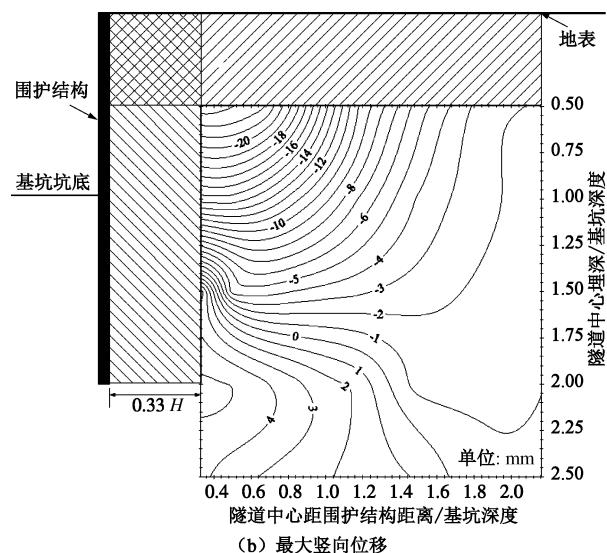
图 10 复合型模式下, 不同位置处隧道变形及特性分区示意图

Fig. 10 Deformations of tunnels at different locations and classified zones caused by composite deformation of retaining structures

故相应的位移警戒线和控制线在浅层和深层均由隧道的水平位移控制。因此当围护结构发生复合型变形时, 需控制围护结构顶部产生的位移, 避免对坑外的浅埋隧道产生过大的影响。



(a) 最大水平位移

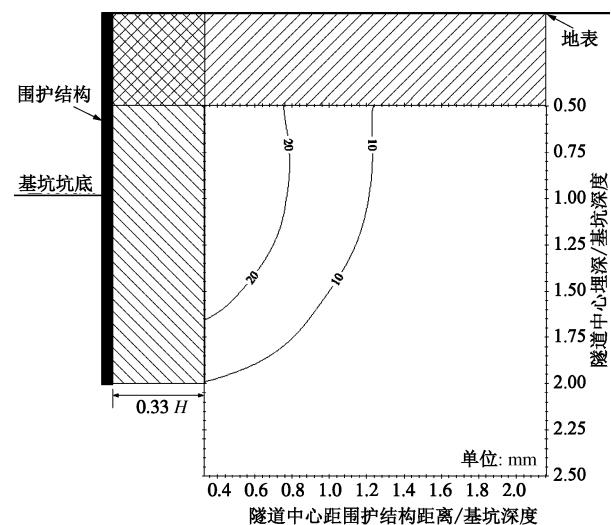


(b) 最大竖向位移

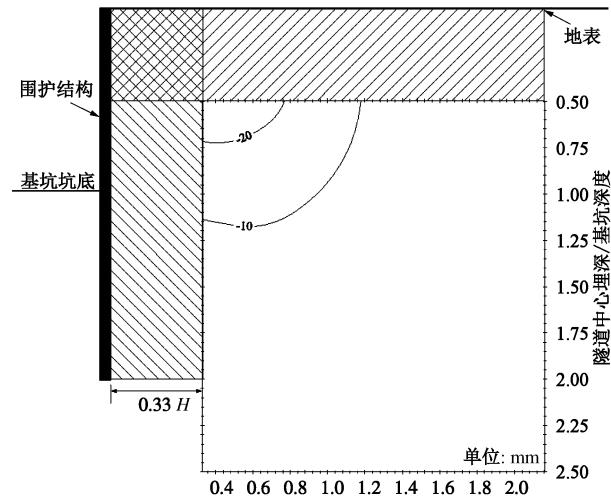
图 11 隧道最大位移等值线分布

Fig. 11 Contours of maximum displacement of tunnels

定, 在达到一定深度后曲线才由水平位移曲线控制。而在复合型模式下, 水平位移超过 10 mm 和 20 mm 的等值线范围均大于相同条件下的沉降等值线范围,



(a) 水平位移控制线及警戒线



(b) 沉降控制线及警戒线

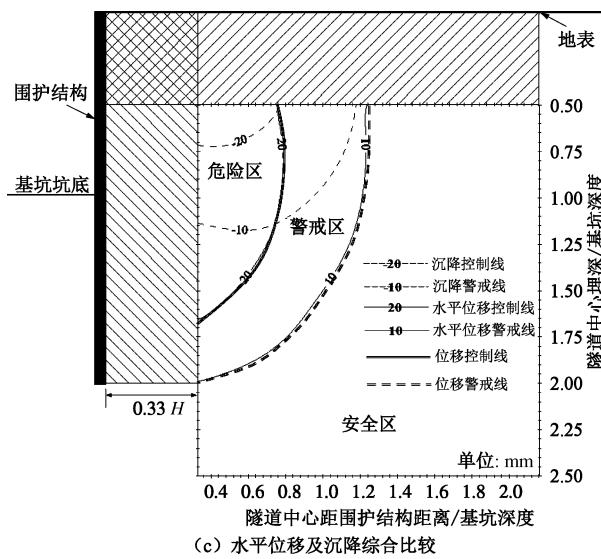


图 12 隧道位移影响区划分

Fig. 12 Influenced ranges of displacement of existing tunnels

当围护结构产生复合型变形,最大位移达到 45 mm 时,不同位置处隧道的水平和竖向直径收敛值的最大值约为 9.75 mm,远小于 20 mm 的隧道收敛控制值;而两轨高差最大值约为 1.68 mm,也小于两轨间 2 mm 的高差控制值。与内凸型模式相似,对于坑外不同位置处的既有隧道同样应关注并限制其水平及竖向位移,尤其是水平向位移的发展,同时对于隧道收敛变形和两轨高差也应密切监测。

3.3 踢脚型变形模式下隧道变形特性及影响区范围

图 13 为踢脚型变形模式下,坑外不同位置处既有隧道变形及特性分区示意图(变形放大 200 倍);图 14 为踢脚型模式下隧道产生的最大水平位移和最大竖向位移等值线图。

结合图 13,14 可以看出,当围护结构发生踢脚变形时,坑外隧道的变形在整体位移与自身相对变形方

面均明显大于内凸型模式,且变形特性分布情况也有较大的不同。踢脚型模式下隧道产生最大水平位移的位置位于坑底以下一定深度,但高于围护结构底部,究其原因,笔者曾对踢脚型模式下坑外土体水平位移场进行研究^[12],在紧邻围护结构处,坑外土体最大水平位移出现在墙底,并且随着水平距离增加,土体最大位移位置逐渐向上转移,而在实际中,隧道通常距围护结构存在一定距离,因而最大水平位移位置出现在墙底深度以上。受踢脚型变形模式的影响,坑外隧道拱顶和拱底均产生沉降的区域与内凸型相比也明显增加,隧道沉降区的范围显著增大,而相应的变形过渡区和隆起区位置均向下转移,并且影响范围明显减小。同时,隧道自身相对变形与内凸型相比也显著增加,尤其是在墙底附近的隧道,变形更加剧烈。值得注意的是,对于近基坑处的浅埋隧道,受周围土体水平挤压作用的影响,隧道表现为竖向拉伸水平压缩的相对变形,与隧道施工完成时的竖向压缩水平拉伸的变形相反,但变形量较小。

总体而言,当围护结构发生踢脚变形时,将引起坑外隧道产生更加剧烈的变形,尤其对于墙底深度附近的深埋隧道极为不利,应尽量避免。

图 15 为踢脚型模式下,隧道位移影响区划分示意图。与内凸型模式相比,踢脚型模式下隧道位移警戒线和控制线均由隧道的沉降与水平位移分布等值线综合绘制而成,浅层由沉降等值线控制而深层则由水平位移等值线控制。可以看出,踢脚型变形模式下隧道沉降与水平位移分别达到 10 mm 和 20 mm 的水平及深度范围均比内凸型有明显的增加,尤其是沉降的影响范围,导致隧道位移警戒线和控制线在坑底开挖面深度以上的区域均是由沉降等值线构成的,可见踢脚型模式对坑外隧道的竖向变形影响更加剧烈。

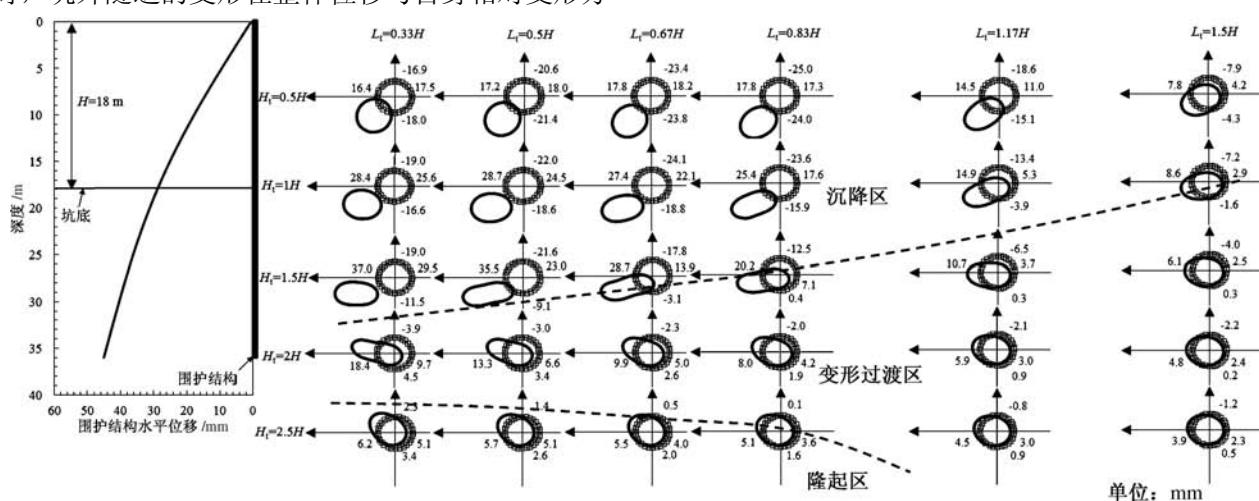


图 13 踢脚型模式下,不同位置处隧道变形及特性分区示意图

Fig. 13 Deformations of tunnels at different locations and classified zones caused by kick-in deformation of retaining structures

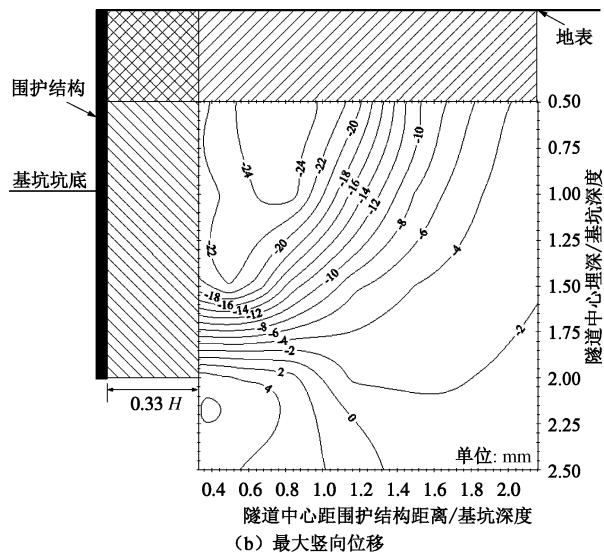
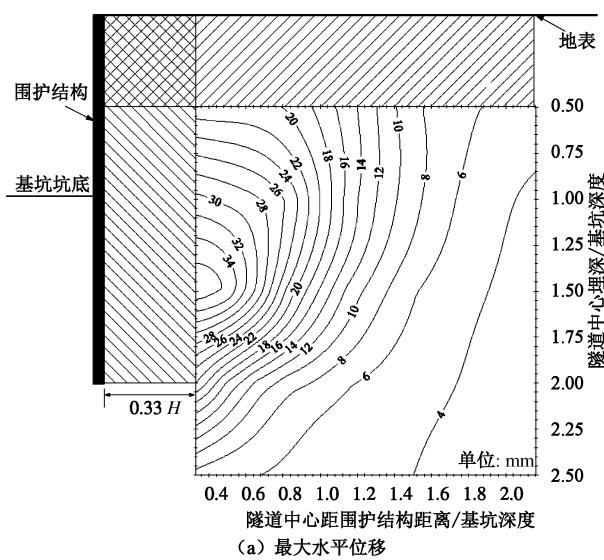


图 14 隧道最大位移等值线分布

Fig. 14 Contours of maximum displacement of tunnels

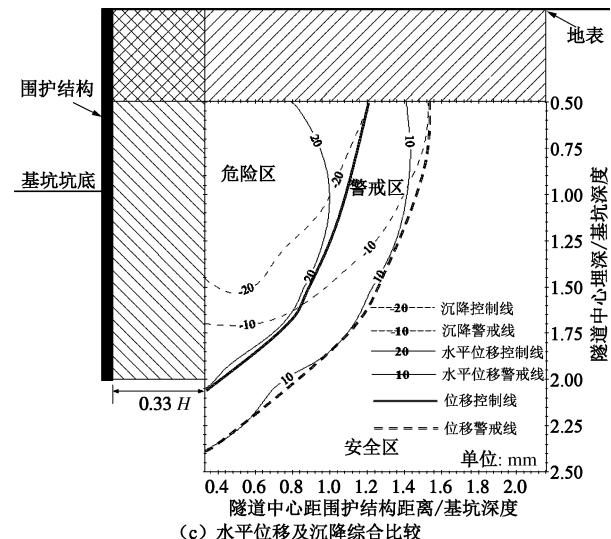
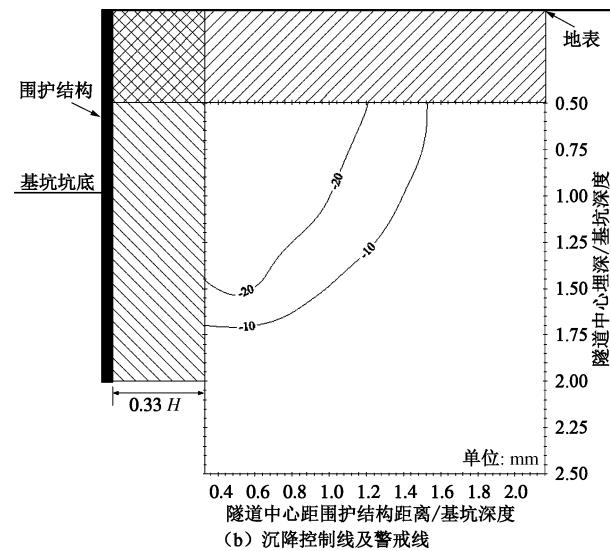
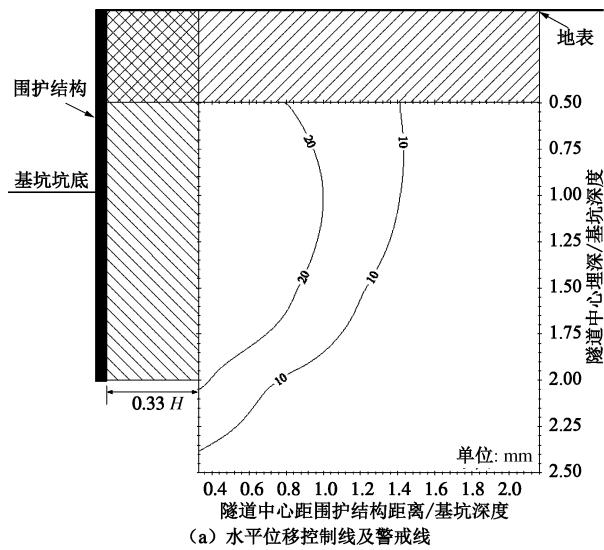


图 15 隧道位移影响区划分

Fig. 15 Influenced ranges of displacement of existing tunnels

当围护结构发生踢脚变形, 且最大位移达到 45 mm 时, 不同位置处隧道的水平或竖向收敛值的最大值约为 14.81 mm, 小于 20 mm 的隧道收敛控制值。但是两轨高差最大值也达到 3.04 mm, 位置出现在中心埋深 1.5H、水平中心距 0.67H 处, 超过两轨间 2 mm 的高差控制值, 因此对位于此区域附近的隧道需要采取措施, 也限制其两轨高差发展, 保护地铁车辆安全行驶。综上分析, 当踢脚型模式下, 当围护结构最大位移达到 45 mm 时, 坑外的既有隧道除了水平及竖向位移会超过位移控制值外, 部分区域两轨高差也会超过控制要求, 需要采取措施加以限制。而隧道的收敛变形虽然未超过控制要求, 但也应密切监测。

3.4 不同模式引起的坑外隧道位移影响区比较

前文对 4 种围护结构变形模式下坑外既有隧道的位移影响分区进行了详细介绍, 为便于进一步对比分析, 将 4 种变形模式下隧道的位移控制线和位移警戒线分别绘制在图 16 中。从图中可以看出:

(1) 不论是位移控制线还是位移警戒线, 均表现为随深度的增加逐渐向基坑方向靠近, 表明各种模式下基坑开挖对坑外隧道的位移影响范围都随深度逐渐减小。对影响范围而言, 悬臂型模式下范围最小, 尤其是位移控制线, 仅包含墙外浅层的一小块区域; 内凸型与复合型模式下范围大致相同, 分布大于悬臂型; 而踢脚型模式下对坑外隧道的位移影响范围是最大的, 在工程中应尽量避免。

(2) 围护结构产生复合型变形与内凸型变形对于坑外隧道位移影响范围的区别在于, 复合型模式允许墙顶产生一定的位移, 导致在墙后一定区域内的浅埋隧道水平位移大于内凸型, 因此对坑外既有隧道的影响范围而言, 浅埋隧道位移控制线与警戒线在复合型模式下分布均略大于内凸型模式, 而当隧道埋深增加到一定深度后, 曲线基本重合, 复合型与内凸型变形模式对隧道位移影响范围的区别基本消失。

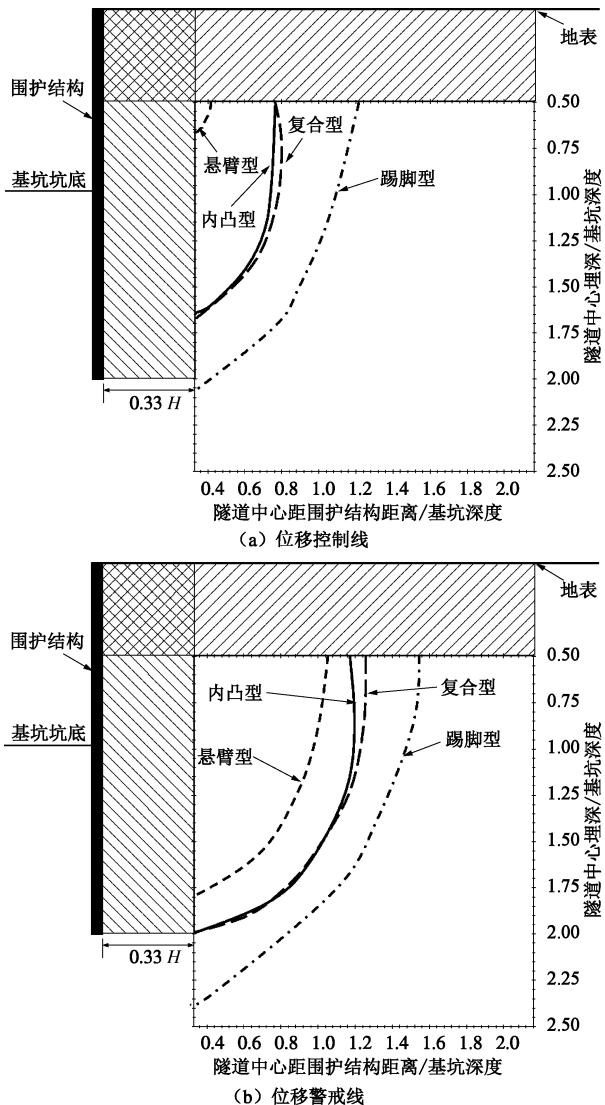


图 16 不同模式引起的坑外隧道位移影响区比较

Fig. 16 Comparison of influenced ranges under different deformation modes of retaining structures

通过前文的分析可知, 即使保证围护结构的最大水平位移相同情况下, 由于围护结构的变形模式不同, 对坑外既有隧道的影响程度也不相同, 而对于隧道位移影响范围表现为悬臂型模式最小, 内凸型和复合型模式居中, 踢脚型模式最大。因此, 针对坑外存在既有隧道的基坑支护体系设计方案, 除了控制围护结构的最大位移外, 同时还应结合隧道位置选择恰当的围护结构变形模式以减小对既有隧道的扰动。若能将围护结构最大变形控制在允许范围内, 则首先推荐悬臂型变形模式的支护体系(如反压土与支护结构相结合体系等), 以尽量减小对坑外既有隧道变形的影响, 但围护结构产生悬臂型变形会导致坑外地表和浅层土体产生较大的水平位移, 对地表道路、建筑物以及浅埋管线的结构安全会产生威胁, 因此若基坑周边环境中存有此类结构则应慎重选择悬臂型模式的支护体系; 其次推荐内凸型或者复合型变形模式, 但这两种模式对于隧道变形影响较大, 尤其当隧道埋深位于基坑底或者以下一定深度范围内, 需密切注意隧道的变形, 必要时应采取适当的保护和修复措施; 此外应避免围护结构产生踢脚型变形, 防止对坑外既有隧道产生过大的影响, 尤其是对于深埋隧道, 踢脚型变形模式的影响更加不利。

4 结 论

为了研究不同围护结构变形形式下, 基坑开挖对邻近既有隧道的影响, 本文在考虑土体的小应变刚度特性的基础上, 对隧道的变形进行了精细化分析, 针对 4 种典型的围护结构变形形式, 分析了围护结构最大水平变形值相同时, 不同围护结构变形模式下坑外不同位置处隧道的变形特性及位移影响范围。在本文算例条件下, 得出以下 6 点主要结论。

(1) 基坑开挖将引起坑外既有隧道产生变形, 根据隧道拱顶拱底的竖向变形特点, 可将其变形划分为沉降区、变形过渡区和隆起区 3 个区域。内凸型模式下, 沉降区内的浅埋隧道沉降明显, 总位移包括水平位移和沉降两方面, 随着深度增加, 沉降减小, 水平位移成为隧道变形的主要因素; 变形过渡区内, 隧道拱顶下沉拱底上抬, 隧道中心的竖向位移不大, 隧道位移以水平方向为主; 而隆起区内, 隧道受基坑开挖卸荷作用的影响较弱, 隆起变形很小, 且范围只扩展至墙底和墙底以下小范围之内。

(2) 围护结构 4 种变形模式下, 根据拱顶拱底的竖向变形特点, 均可将隧道变形按深度分为沉降区、变形过渡区及隆起区。复合型模式下各区域的范围及特点与内凸型基本相同; 悬臂型模式对坑外隧道竖向

位移影响较弱, 沉降区范围明显减小, 隧道位移以水平位移为主; 踢脚型模式中由于围护结构最大位移出现在墙底, 导致坑外的沉降区域明显增加, 变形过渡区及隆起区位置向下转移, 且影响范围明显减小。

(3)对于内凸型、复合型及踢脚型3种变形模式, 坑外靠近基坑处一定范围内的浅层土体, 由于受到围护结构上部变形的制约作用影响, 导致该范围内土体产生水平方向的压应变, 进而对此区域内的既有隧道自身变形存在一定的约束作用, 使得隧道更多表现为整体移动, 踢脚型模式下的隧道甚至产生竖向直径拉伸水平直径压缩的相对变形。

(4)针对4种模式引起的隧道位移影响范围而言, 悬臂型模式下范围最小; 内凸型与复合型模式下范围基本相同, 分布大于悬臂型, 仅由于复合型模式允许墙顶产生一定的位移, 导致浅埋隧道的影响范围大于内凸型; 而踢脚型模式下对坑外隧道的位移影响范围最大, 在工程中应尽量避免。

(5)围护结构变形同时也会引起隧道产生收敛变形及轨道高差变化, 当围护结构最大位移为45 mm时, 对于收敛变形, 悬臂型模式引起的变化最小, 内凸型和复合型居中, 踢脚型最大, 4种模式均未超过控制标准; 而针对轨道高差变化, 影响规律同收敛变形相同, 但在踢脚型模式下, 局部区域内隧道的轨道高差已超过控制要求, 因此应尽量避免围护结构产生踢脚型变形模式。

(6)基坑实际使用过程中, 仅限制基坑围护结构的最大水平位移并不能全面反映围护结构变形对坑外既有隧道的影响, 同时应结合既有隧道与基坑的相对位置, 选择合理的基坑支护体系方案, 控制围护结构变形模式, 从而减小对隧道扰动、保护隧道安全。同时, 在设计施工过程中应保证围护结构刚度及入土深度, 并尽量减小最后一道水平支撑与开挖面之间的距离, 坑底以下分布有软土时可进行坑底土体加固等, 以避免产生踢脚模式的围护结构变形形态, 防止对隧道产生不利影响。

当然, 本文针对不同围护结构变形模式下坑外不同位置处隧道变形特性及位移影响范围的规律还与基坑开挖深度、宽度以及土质条件等因素有关, 今后应继续进行深入研究。此外, 本文的研究成果可应用于基坑支护设计中的初步方案选择与确定, 在实际工程中, 对于基坑开挖对既有结构影响, 也应结合具体情况单独分析, 判断对隧道的扰动程度, 进而有针对性的进行保护。

参考文献:

[1] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, et al. Response of a

- Taipei rapid transit system (RTS) tunnel to adjacent excavation[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, **16**(3): 151–158.
- [2] 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. Osaka, 2011: 83–88.
- [3] 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*, 2003, **32**(5): 53–56. (in Chinese))
- [4] 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))
- [5] 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. Study on shield-bored metro tunnel deformation due to deep foundation pit construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2008(S1): 216–220. (in Chinese))
- [6] 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): 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**(S0): 398–403. (in Chinese))
- [7] 李进军, 王卫东. 紧邻地铁区间隧道深基坑工程的设计和实践[J]. *铁道工程学报*, 2011(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(11): 104–111. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 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, **28**(增刊): 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, **28**(S0): 1340 - 1345. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.(LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ 120—2012 Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [14] YB 9258—97 建筑基坑工程技术规范[S]. 1998. (YB 9258—97 Code for technique of building foundation pit engineering[S]. 1998. (in Chinese))
- [15] 郑刚, 李志伟. 不同围护结构变形形式的基坑开挖对邻近建筑物的影响对比分析[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(6): 969 - 977. (ZHENG Gang, LI Zhi-wei. Comparative analysis of responses of buildings adjacent to excavations with different deformation modes of retaining walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(6): 969 - 977. (in Chinese))
- [16] VUCETIC M, DOBRY R. Effect of soil plasticity on cyclic response[J]. Journal of Geoenvironmental Engineering, 1991, **171**(1): 89 - 107.
- [17] LEE K M, GE X M. The equivalence of a jointed shield driven tunnel lining to a continuous ring structure[J]. Journal of Canadian Geotechnical Engineering, 2001, **38**: 461 - 483.
- [18] HSIEH P G, OU C Y. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998, **35**(6): 1004 - 1017.
- [19] DG/TJ08—61—2010 基坑工程技术规范[S]. 2010. (DG/TJ08—61—2010 Technical code for excavation engineering[S]. 2010. (in Chinese))
- [20] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地表变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(11): 1659 - 1666. (WANG Wei-dong, XU Zhong-hua, WANG Jian-hua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(11): 1659 - 1666. (in Chinese))
- [21] SCHUSTER M, KUNG G T C, 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.
- [22] 上海市市政工程管理局. 上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定[Z]. 沪市政法(94) 第 854 号, 1994.(Shanghai Municipal Engineering Bureau. Provisional prescription on protecting techniques of metro[Z]. No. 854 of Shanghai Municipal Statute (94), 1994. (in Chinese))
- [23] GB50157—2003 地铁设计规范[S]. 2003. (GB50157—2003 Code for design of metro[S]. 2003. (in Chinese))
- [24] 杨俊龙, 孙连元, 沈成明. 盾构机近距离穿越运营中地铁隧道施工技术研究[J]. 现代隧道技术, 2004(增刊 1): 76 - 84. (YANG Jun-long, SUN Lian-yuan, SHEN Cheng-ming. Study on construction technology of shield tunneling under existing adjacent tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2004(S1): 76 - 84. (in Chinese))
- [25] 刘庭金. 地铁盾构隧道弯矩和变形控制值研究[J]. 隧道建设, 2010, **30**(增刊 1): 109 - 102. (LIU Ting-jin. Study on control values of bending moment and deformation of shield-bored metro tunnels[J]. Tunnel Construction, 2010, **30**(S1): 109 - 102. (in Chinese))