

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.037

深基坑开挖对临近既有地铁隧道的纵向影响分析

裴行凯

(广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 针对地铁隧道临近开挖的深基坑工程, 利用三维有限元模型系统研究了软土地区基坑开挖对地铁隧道纵向衬砌断面应力和弯矩分布规律, 重点针对隧道的危险断面, 进行了局部的应力分析, 将隧道沿纵向分为危险区 I、危险区 II 和无影响区, 在危险区 I 邻近基坑一侧隧道衬砌断面有受拉趋势, 另一侧呈受压趋势; 在危险区 II 隧道衬砌断面受力趋势与危险区 I 相反。同时, 对比计算表明隧道等效刚度折减系数的选取直接决定了数值模拟结果中隧道衬砌内力的分布。

关键词: 基坑开挖; 盾构隧道; 纵向刚度; 临近地铁

中图分类号: TU924

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0205-06

Numerical Analysis of Influences of Excavation on Adjacent Tunnels

PEI Xing kai

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

Abstract: By taking the deep excavation near the underground railway tunnel as an example, we established a three-dimensional model in soft soil foundation pit to analyze excavation longitudinal impact on the cross section stress and moment of adjacent tunnel. especially for dangerous section of the tunnel. The tunnel was divide into danger zone I, danger zone II and the non-affected zone along the longitudinal direction. The lining section of the tunnel near the foundation pit in the dangerous area I has a tensile tendency, the other side is under pressure. The tunnel lining section stress trend of the dangerous area II is opposite to dangerous area I. At the same time, the comparison calculation shows that the selection of the equivalent stiffness reduction coefficient of the tunnel directly determines the distribution of the internal force of the tunnel lining in the numerical simulation results.

Keywords: deep excavation; shield tunnel; longitudinal stiffness; adjacent tunnel

随着地铁沿线地块开发的日益增多, 深大基坑对临近运营中的地铁隧道影响与保护成为工程关注和研究的重点。目前, 利用数值模拟研究基坑开挖对地铁隧道的影 响是进行工程评估和研究的主要手段^[1-6]。

文献[7-8]通过在临地基坑的地铁隧道上进行自动化监测和数值模拟的对比, 分析了基坑开挖对临近隧道位移和变形的影响趋势。文献[9-10]结合现场实测数据分析, 研究了基坑开挖整个施工过程中隧道变形的发展轨迹, 并针对不同阶段提出了相应的控制措施。文献[11-13]对于地铁隧道正上方基坑开挖的保护措施进行数值分析, 锯齿状连续墙结构可以起到有效的抑制土体隆起的作用, 进

而减少了对地铁隧道的影 响。文献[14]利用简化理论计算方法和数值模拟联合, 研究了上海某基坑工程对地铁的影响, 并将分析结果与现场实测进行对比, 隧道的变形规律基本吻合。

本文基于软土地区基坑开挖对地铁隧道影响的数值模型, 着重分析受基坑开挖影响的隧道纵向衬砌断面应力和弯矩分布规律, 为后续工程的设计施工提供明确的理论和计算依据。

1 模型的建立

结合已有工程实例, 拟建一基本分析模型, 该模型中考虑基坑平面尺寸为长方形, 取基坑开挖尺寸为 26 m × 40 m, 考虑对称性取 1/4 作为研究模型。

分析模型(见图 1)中考虑基坑深 20 m。临近地铁区间与基坑最近净距 5 m,隧道埋深 17 m。

由于基坑边沿到模型边界的距离是建模时必须考虑的重要因素。取基坑开挖深度的 4 倍~5 倍,对四周竖向边界面的垂直方向水平位移进行约束,对底部边界面约束竖向位移和水平位移。开挖基坑尺寸为 26 m(宽)×40 m(长)×20 m(深),整体建模范围取 130 m(宽)×140 m(长)×90 m(深)。

土体模拟考虑上海软土地区典型地层(见表 1),利用修正剑桥模型。连续墙结构和隧道衬砌结构的计算参数如表 2 所示^[15-16]。

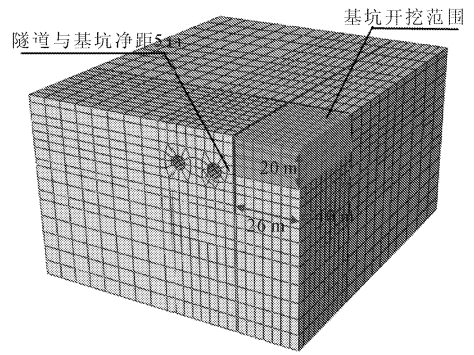


图 1 基坑开挖对临近隧道纵向影响的基本模型

表 1 土层计算参数

层号	层厚 /m	γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	C /kPa	$\varphi/(^\circ)$	ν	e	E_u /MPa	λ	κ	M	μ	f_s/kPa
①	4	18.0	0	32	0.40	0.72	18	0.073	0.0061	0.24	0.3	20
②	34	18.9	19	29	0.38	0.94	19	0.073	0.0061	0.24	0.3	20
③	6	17.8	9	27	0.42	1.18	15	0.105	0.0087	1.38	0.2	20
④	8	17.2	11	23	0.45	1.43	20	0.136	0.0109	0.89	0.2	20
⑤	16	18.2	15	32	0.30	1.03	43	0.106	0.0088	1.10	0.3	40
⑥	64	19.9	34	30	0.32	0.71	57	0.057	0.0047	1.02	0.4	65
⑦	22	18.9	6	37	0.30	0.84	95	0.044	0.0037	1.12	0.4	75
⑧	40	19.1	4	34	0.30	0.76	132	0.054	0.0045	1.02	0.4	75

表 2 结构计算参数

名称	重度 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比
地下连续墙	25	28.000	0.20
隧道等效模型	25	1.798	0.15

此外,连续墙和土体之间的接触采用面-面接触算法,考虑实际开挖分析步建立模拟实施的过程。

2 隧道衬砌纵向受力分析

在基坑开挖以前,既有隧道受上部土体和周围土体的作用,隧道衬砌在横断面上沿隧道纵向表现为受压状态,由于邻近基坑开挖的作用,原有的衬砌横断面受压状态将被打破,出现应力重新分布。

2.1 隧道纵向应力整体分析

本算例中,基坑沿隧道纵向开挖范围为 40 m,由基坑开挖对隧道轴向应力沿纵向分布云图(见图 2)可知,隧道横断面的正应力沿隧道纵向方向主要存在于距基坑开挖中心 60 m 范围内,即基坑沿隧道纵向开挖长度 1.5 倍。在影响显著的 56 m 范围内,根据隧道横断面应力重分布明显的区段,将隧道纵向分为 A、B、C、D 四个区域,其中, A、D 为受拉趋势

区, B、C 为受压趋势区。

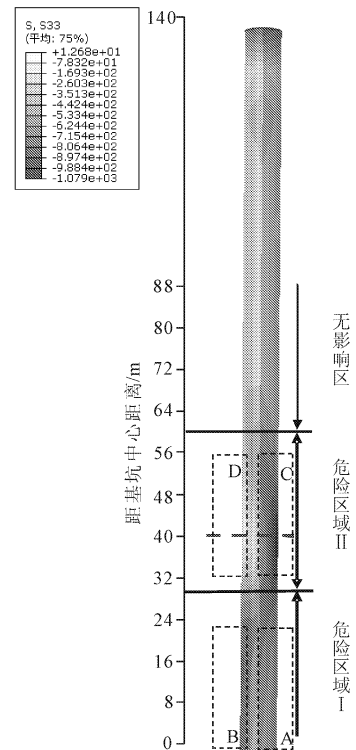


图 2 隧道横断面正应力沿隧道纵向变化云图 (受拉为正,受压为负)

当基坑开挖后,隧道纵向在基坑开挖长度范围内出现向基坑一侧变形,这种变形导致了隧道衬砌在 A、D 两个区域的横断面正应力呈受拉趋势,而 B、C 两个区域的隧道横断面呈受压趋势。由于隧道衬砌在基坑开挖之前沿纵向有整体的受压应力,因此,在基坑开挖后,隧道衬砌 A、D 区域的受压应力将得到缓解,并可能表现为受拉状态,而 B、C 两个区域的受压应力则呈现加剧趋势。

结合实际隧道衬砌的状况,如果 A、D 区域出现受拉应力,该拉应力将由链接隧道衬砌的螺栓承担,

若拉应力过大,链接螺栓将发生受拉屈服。如果 B、C 区域的压应力进一步加大,混凝土衬砌将承受被局部压碎的危险。

沿隧道纵向取三个典型断面(见图 3、图 4、图 5)研究横断面正应力分布,图 3 中截面左侧呈现明显受压趋势;当隧道距离基坑开挖中心截面 40 m 处时(见图 4),隧道左侧表现出受拉趋势;之后,随着隧道继续远离基坑开挖中心截面,隧道衬砌断面应力逐渐趋于均匀,且整个横断面表现为受压状态,如图 5 所示。

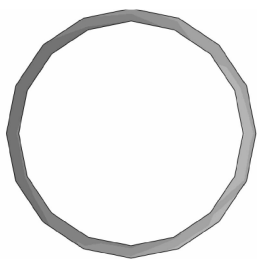


图 3 距基坑中心 0 m 处横断面正应力云图

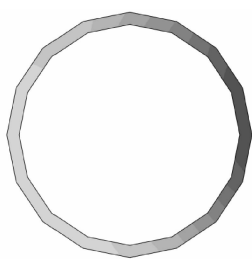


图 4 距基坑中心 40 m 处横断面正应力云图

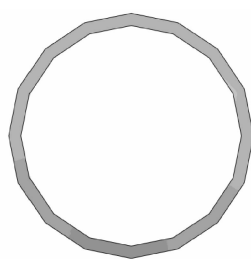


图 5 距基坑中心 80 m 处横断面正应力云图

图 6 为基坑开挖对邻近地铁隧道横断面弯矩影响图。由图 6 可看出,隧道沿纵向距离基坑开挖中心截面 0 ~ 32 m 范围内弯矩为正,即邻近基坑一侧隧道正应力有受拉趋势;在距离基坑开挖中心截面 32 m ~ 60 m 范围内弯矩为负,即远离基坑一侧隧道正应力有受拉趋势;60 m 以后弯矩基本为零,即隧道衬砌正应力恢复开挖前的应力状态。另外,隧道横截面弯矩沿纵向出现的两次峰值,分别位于距离基坑开挖中心截面 20 m 和 44 m 处,最大弯矩值分别为 2 631 kN·m 和 -2 109 kN·m。

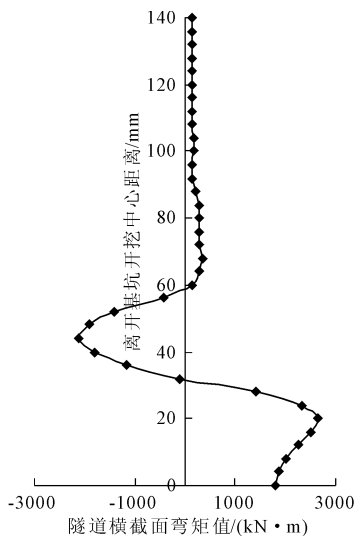


图 6 隧道横截面弯矩沿隧道纵向分布曲线

因此,根据隧道衬砌的受力状态及其最可能发生破坏的位置,将隧道沿纵向分为三个区域危险区 I、危险区 II 和无影响区,具体位置如图 2 所示。

2.2 隧道纵向路径正应力分析

为了进一步研究隧道衬砌横截面所受正应力沿隧道纵向的分布状态,在隧道纵向方向上,沿隧道纵向建立如图 7 所示的四条分析路径(即横断面上某点沿隧道纵向上的连续节点),路径 A 位于隧道最右端外侧、路径 B 位于隧道最右端内侧、路径 C 位于最左端内侧和路径 D 位于隧道最左端外侧,每条路径上选取间隔,分别考虑每条分析路径隧道衬砌的正应力状态,得到不同路径正应力沿隧道纵向分布图,见图 8。

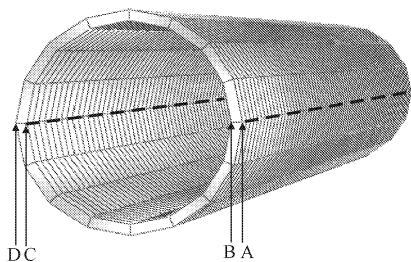


图 7 沿隧道纵向分析路径

考虑四条路径下内外两侧横截面所受应力,整体而言,在距离基坑开挖中心前 60 m 范围内,隧道衬砌横截面应力变化较大,当距离基坑开挖中心超过 60 m 后,隧道衬砌横截面应力基本没有波动,表

现为隧道衬砌开挖前的自身受力状态。

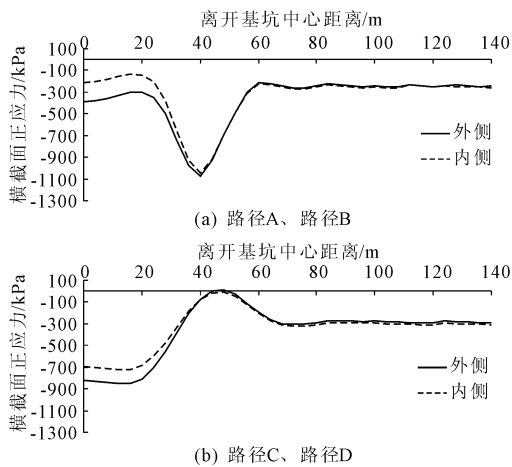


图 8 不同路径横截面正应力沿隧道纵向分布曲线

(1) 图 8(a)为路径 A 隧道衬砌内外两侧所受正应力沿隧道纵向的分布。该路径上,隧道衬砌开挖前承受 300 kPa 左右的受压应力。

在危险区 I 范围内,隧道受拉趋势区(A 区)内侧的压应力小于外侧承受的压应力,且内侧压应力在 130 kPa 左右,外侧压应力在 320 kPa 左右。可见,在该范围内衬砌内侧表现出明显的受拉趋势,而外侧反而受压趋势加强。这是由于在基坑开挖前,隧道在周围尤其是上部土体作用下,呈现横向鸭蛋变形的趋势,这种变形使得隧道最左侧和最右侧衬砌对周围土体的挤土作用非常明显。当基坑开挖以后,隧道危险区范围 I 有向基坑一侧侧移的趋势,这种侧移加剧了隧道右侧对周围土体的挤土作用,作为反作用力,这种局部的土体对隧道右侧衬砌的作用使得隧道内外侧衬砌的应力出现了重新分布,最终使得隧道右侧衬砌的内表面表现出受拉趋势,而未表现的受拉趋势被削弱,甚至表现为受压趋势。

在危险区 II 范围内,隧道衬砌内外表面所受应力基本相同,且受压趋势明显加强,最大受压应力位于距离基坑开挖中心断面 40 m 处,最大受压应力为 1 079 kPa。

(2) 图 8(b)为路径 B 隧道衬砌内外两侧所受正应力沿隧道纵向的分布。与路径 A 相同,该路径上,隧道衬砌开挖前同样承受 300 kPa 左右的受压应力。

在危险区 I 范围内,隧道受压趋势区(B 区)衬砌内侧压应力在 700 kPa 左右,外侧压应力在 900 kPa 左右。衬砌外侧承受的压应力趋势比内侧明显,这与隧道局部弯曲后衬砌截面的内力分布趋势相同。

在危险区 II 范围内,隧道衬砌内外侧所受应力基本相同,且衬砌受拉趋势显著。此时,并未出现衬砌内侧拉应力趋势显著的现象,最大受拉趋势表现在隧道衬砌外侧,这是由于此处未出现隧道左侧的位移,未产生对隧道左侧土体的挤土作用,因此,受拉趋势在衬砌截面上按照正常分布。在距离基坑开挖中心截面 48 m 处出现拉应力,该拉应力发生在衬砌外侧,大小为 12.68 kPa。

(3) 综合图 8(a)和图 8(b)可以看出,隧道衬砌在距离基坑开挖中心截面 20 m 和 44 m 处,最左端和最右端的应力差最大,该现象与隧道衬砌截面弯矩沿隧道纵向分布一致,此两处位置的弯矩出现两次峰值。

2.3 局部分析

为了进一步明确隧道横断面局部的应力分布,沿隧道纵向分别选取沿隧道纵向距基坑中心 0 m、8 m、16 m、24 m、32 m、40 m、48 m、56 m、64 m、72 m 和 80 m 处的横截面正应力进行分析。可以明确的看出不同隧道衬砌截面下的内力分布,以及其沿隧道纵向距离基坑开挖中心截面的位置不同而发生的变化。具体对以上不同截面的内力分布研究分析如下:

(1) 整体而言,沿隧道纵向衬砌的内力分布趋势合乎前节已定义的隧道三个区域。在危险区 I 内,截面 0°位置的受压应力小于 180°位置;在危险区 II 内,截面 180°位置的受压应力小于 0°位置,在图 9(g)中 180°位置出现了受拉应力;在无影响内,截面不同受压应力逐渐趋于平衡。

(2) 在危险区 I 内的截面,0°和 180°附近处(向上和向下各 45°)的内侧受压应力均小于外侧受压应力,但其原因不同。0°处所出现的内侧受压应力小于外侧受压应力是由于隧道衬砌右侧土体对隧道的反作用力导致,而 180°处所出现的内侧受压应力小于外侧受压应力则是由于整体受弯变形趋势引起。

(3) 在横断面上,0°和 180°处的应力差在某种程度上反映了该截面上弯矩的大小。在此 11 个断面应力分布中,距离基坑中心截面 40 m 处断面的 0°和 180°应力差最大,此处弯矩也最大,该趋势与横断面弯矩沿隧道纵向分布趋势相一致。

(4) 从横断面距基坑中心 40 m 后,隧道衬砌内侧与外侧应力基本一致,这是由于沿隧道纵向在距基坑中心断面 40 m 后没有出现局部土体对隧道衬砌的挤压作用。

3 隧道纵向等效刚度对隧道结构纵向受力的影响

本节重点考虑隧道等效刚度在基坑开挖对隧道纵向影响中的作用,在基本模型中,隧道纵向等效刚度折减系数为 0.069 5,另外,分别考虑隧道纵向等效刚度折减系数为 0.380 0、0.690 0 和 1.000 0 时的隧道模型,此三种情况同样考虑隧道横向等效刚度折减系数为 0.750 0,因此,除基本模型外,分别建立隧道等效刚度为 9.833 GPa、17.854 GPa 和 25.875 GPa 的计算模型。

3.1 隧道横截面弯矩沿隧道纵向分析

图 9 为隧道不同等效刚度对隧道横截面弯矩的影响。从图 9 中可以看出,随着隧道刚度的增大,隧道横截面弯矩出现明显的增幅,尤其是隧道离开基坑中心截面 20 m 至 40 m 区间内,隧道衬砌承受了方向更为剧烈的弯矩突变,这表现在内力上,即隧道衬砌沿轴向的应力变化更为加剧。当等效刚度为 1.798 GPa 时,隧道横截面最大弯矩出现在距基坑中心截面 20 m 处,当等效刚度增加为 9.833 GPa 时,隧道横截面最大弯矩出现在距基坑中心截面 44 m 处。

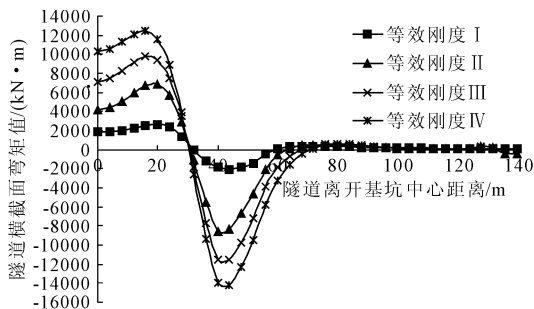


图 9 不同隧道纵向刚度下基坑开挖对隧道横截面弯矩影响沿纵向分布

针对四种不同隧道等效刚度,取距离基坑中心截面 44 m 处,当等效刚度逐步增大时,隧道横截面最大弯矩值分别为 $-2\ 109\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $-8\ 562\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $-11\ 589\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $-14\ 246\ \text{kN}\cdot\text{m}$,增量分别为 $6\ 453\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 、 $3\ 027\ \text{kN}\cdot\text{m}$ 和 $2\ 657\ \text{kN}\cdot\text{m}$,随着隧道等效刚度的增加,隧道横截面弯矩随呈收敛趋势,但增量非常巨大。这是由于,隧道刚度的增大,隧道抵抗周围土体对其作用力所导致的变形能力增强,其必然要承受更大的弯矩作用。可见,上小节分析隧道刚度增大后隧道纵向位移有较明显的减弱,这种纵向位移的减弱是以隧道衬砌承受更大的内力作为代价。

另外,由于本节所采用不同的等效隧道刚度是由连续体隧道刚度乘以不同的折减系数得到,可见

隧道等效刚度折减系数的选取非常重要,其直接决定了数值模拟结果中隧道衬砌内力的分布。

3.2 隧道横截面正应力沿隧道纵向分析

通过对不同隧道等效刚度下隧道四条典型纵向路径的应力分布进行分析可以发现:

(1) 不同隧道等效刚度下,对于危险区域 I 内,隧道衬砌内侧受压应力均小于外侧受压应力。这是因为隧道变形对右侧土体局部的挤土作用,导致隧道右侧土体对隧道衬砌产生的反作用力导致,使得隧道内侧反而表现出更为强烈的受拉趋势。该结果再一次印证了此前的结论。

(2) 隧道衬砌内外侧的应力差仅存在于危险区域 I 内,沿隧道纵向距离基坑开挖中心截面距离大于 30 m 后,隧道衬砌的内外侧应力趋于一致。

(3) 整体来看,隧道衬砌的最大受拉趋势发生在距离基坑开挖中心截面 20 m (此处位移隧道断面右端内侧)和 44 m (此处位移隧道断面左端外侧)位置处,在这两个位置容易发生衬砌链接螺栓的受拉屈服。同样,隧道受压趋势也发生在这两个断面,不过距离基坑开挖中心截面 20 m 处的最大受压趋势发生在隧道断面左端外侧,距离基坑开挖中心截面 44 m 处的最大受压趋势发生在隧道断面右端外侧。

(4) 在隧道等效刚度较弱时,隧道衬砌断面应力的差异幅度较小,随着隧道等效刚度的加强,衬砌断面上应力差异的幅度增加明显,即相应断面的弯矩随着开挖深度加深而加大。值得注意的是,隧道受拉趋势区域出现了明显的大范围受拉应力,而且隧道等效刚度越大,受压趋势区域的受拉应力也越大,这种现象对于隧道的变形和稳定是十分不利的。这也说明,隧道纵向变形随着等效刚度的增强而减小,这一过程是以隧道衬砌或链接螺栓承受更大的应力作为前提的。因此,隧道等效折减系数的选取,在整个基坑开挖对邻近隧道纵向影响分析中有着重要的意义。

4 结 论

(1) 利用三维数值模型系统研究了软土地区基坑开挖对地铁隧道纵向影响规律,将隧道沿纵向分为危险区 I、危险区 II 和无影响区。无影响区内,隧道由于既有应力的作用,衬砌断面处于受压状态;在危险区 I,邻近基坑一侧隧道衬砌断面有受拉趋势,另一侧呈受压趋势;在危险区 II,邻近基坑一侧隧道衬砌断面有受压趋势,另一侧呈受拉趋势。因此,危险区 I 和危险区 II 的衬砌截面弯矩相反。

(2) 通过对隧道衬砌的局部应力分析发现,在危险区 I 范围内,隧道衬砌截面最左端和最右端附近的内侧受压应力均小于外侧受压应力;危险区 I 以外的区域,隧道衬砌截面内侧和外侧应力一致。在危险区 I 内隧道衬砌截面,0°和 180°附近处(向上和向下各 45°)的内侧受压应力小于外侧受压应力,但其原因不同。0°处所出现的内侧受压应力小于外侧受压应力是由于隧道衬砌右侧土体对隧道的反作用力导致,而 180°处所出现的内侧受压应力小于外侧受压应力则是由于整体受弯变形趋势引起。

(3) 基坑开挖对临近地铁隧道的影响中,隧道等效刚度折减系数的选取尤为重要,其直接决定了数值模拟结果中隧道衬砌内力的分布。

参考文献:

- [1] 朱荣军,席培胜.基坑开挖对既有隧道影响分析[J].安徽建筑大学学报,2018,26(4):40-44.
- [2] 黄福明.既有地铁隧道上方基坑支护设计与实践[J].低温建筑技术,2018,40(7):116-119.
- [3] 胡瑞灵.深基坑施工引起运营隧道变形的数值分析[J].中国市政工程,2012(2):92-95.
- [4] 王浩.临近地铁站深基坑工程安全评估分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):188-209.
- [5] 杨利军.天津某基坑开挖引起隧道变形的有限元计算[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):138-141.
- [6] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J].土木工程学报,2016,49(6):1-24.

- [7] 王卫东,吴江斌,翁其平.基坑开挖卸荷对地铁区间隧道影响的数值分析[J].岩土力学,2004,25(S2):251-255.
- [8] 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):1728-1736.
- [9] 况龙川,李志敏,殷宗泽.地下施工影响地铁隧道的实测分析[J].清华大学学报(自然科学版),2000,40(S1):79-82.
- [10] 况龙川.深基坑施工对地铁隧道的影响[J].岩土工程学报,2000,22(3):284-287.
- [11] 张祁,张敏.基坑施工对紧邻地铁结构安全性的影响分析[J].水利与建筑工程学报,2018,16(5):72-77.
- [12] 胡海英,张玉成,杨光华,等.基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J].岩土工程学报,2014(S2):431-439.
- [13] 李健津,陈俊生,刘叔灼,等.紧邻地铁正上方基坑开挖对地铁保护措施研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(1):348-353.
- [14] 张志国,张孟喜,王卫东,基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J].岩土力学,2011,32(7):2085-2092.
- [15] 钟小春,张金荣,秦建设,等.盾构隧道纵向等效弯曲刚度的简化计算模型及影响因素分析[J].岩土力学,2011,32(1):132-136.
- [16] 叶飞,杨鹏博,毛家骅,等.基于模型试验的盾构隧道纵向刚度分析[J].岩土工程学报,2015,37(1):83-90.

(上接第 204 页)

(4) 交叠隧道施工工序非常关键,合理的施工工序能够有效控制地面沉降,减小对建(构)筑物的影响。根据隧道埋深与围岩类型,采用“先下后上”的施工工序能够有效控制交叠隧道间夹岩层的变形。下线隧道初期支护完成后,建议可用支撑系统主动顶升补偿桥梁沉降,可根据实际开挖地层决定是否进行施作下线隧道二次衬砌结构作为加强;再施作上线隧道时,在下线隧道增设内支撑系统是很有必要的。

参考文献:

- [1] 近接隧道施工的设计与指南[M].东京:日本铁道综合技术研究所,1987.
- [2] 陈卫军,朱忠隆.近距离交叠隧道研究现状及评析[J].

现代隧道技术,2002,39(1):42-47.

- [3] 郑余朝,仇文革.重叠隧道结构内力演变的三维弹塑性数值模拟[J].西南交通大学学报,2006,41(3):376-380.
- [4] 朱正国,余剑涛,朱永全,等.新建隧道超近距离下穿既有地铁施工方案优化[J].铁道工程学报,2013,30(9):111-115.
- [5] 张航.小净距浅埋暗挖隧道下穿密集房屋安全性分析[J].铁道工程学报,2014,31(9):83-87,92.
- [6] 章慧健,郭蕾,郑余朝,等.城市隧道近接建筑物施工的影响与对策分析[J].铁道工程学报,2016,33(4):95-100.
- [7] 公路桥涵地基与基础设计规范:JTG D63—2007[S].北京:人民交通出版社,2007.
- [8] 陈丹华.《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG D63—2007)探讨[J].公路工程,2011,36(2):153-156.