

基于管棚法的双洞隧道非同步开挖沉降分析

李潇

中铁上海设计院集团有限公司徐州设计院

摘要:针对某市地铁某试验段基于管棚法施工的非同步开挖双向地铁区间段的地表沉降问题,采用数值模拟方法研究了非同步开挖双向隧道特定截面处地表沉降规律以及后开挖隧道对既有隧道地表沉降的影响,同时对比分析了非同步开挖引起的额外沉降。结果表明:后开挖隧道近75%的地表沉降量在上断面开挖穿过特定截面前后完成;由于管棚的存在,后开挖隧道对既有隧道上方地表沉降量影响仅占总沉降量的9%,其中下断面开挖造成的影响远大于上断面;非同步开挖造成双洞隧道之间部分围岩变形方向发生变化,从而导致上方地表产生额外沉降,双洞隧道外侧不产生额外沉降。

关键词:双洞隧道;非同步开挖;地表沉降;数值模拟;管棚法

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.19.057

引言

随着城市轨道交通的快速发展,地铁建设成为城市基础设施建设的热门话题。地铁隧道一般是双向平行隧道,间距小,这就导致两隧道开挖过程中相互影响,从而加重了对周围城市环境的负面作用。根据施工案例研究的相关论著^[1],当隧道间距小于 $2.5D$ (D 为隧道直径)时就应该引起重视。首先,一侧隧道的开挖会导致围岩应力释放,继而引起另一侧既有隧道围岩应力重分布,其衬砌受力以及上覆岩土体沉降会产生较大变化。其次,应力释放后,围岩会向隧道中轴线移动,在既有隧道的一侧开挖隧道,会导致两隧道间岩体产生相反的位移^[2],加剧围岩裂隙发育,产生不稳定因素,而这种不稳定因素往往与隧道间距以及围岩类别有关。研究表明^[3-5],地面的整个沉降量的30%-40%和地下地层沉降量的40%-50%是在隧道初期支护产生作用之前发生的。对于地质条件较好、围岩强度较高的施工区域,选用管棚法进行超前预支护并结合矿山法开挖,可在浅埋条件下较好控制上覆土体沉降^[6]。一方面,管棚的预支护作用可有效控制开挖造成的掌子面失稳,降低超挖量;另一方面,管棚较于周边岩体有较大的刚度,在应力重分布中有较大的“承担”能力,限制了非同步开挖导致的土体二次扰动。目前,针对软弱地层双洞隧道开挖的研究较多,一侧隧道的开挖对另一侧既有隧道的影响很大,地表沉降量增幅可达40%左右^[2],且大多采用平面二维模型或者假定平面应变的三维模型^[7];而对于地质条件较好的浅埋双洞隧道,尤其是进行预支护的浅埋双洞隧道,国内外对其沉降相互影响作用却鲜有研究。某市地铁某试验段地质条件良好,采用管棚预支护的浅埋暗挖法施工,该方法成为该地区一次较为成功的工程尝试。通过建立基于平面应变的三维模型对某市地铁管棚预支护浅埋双洞隧道进行模拟计算,以期获得该地区地质条件下基于管棚法的非同步开挖引起的地表沉降规律,为

地铁建设施工提供经验参考。

一、工程背景

工程模拟计算背景为某市地铁某试验段下穿道路部分。该部分隧道采用管棚预支护的矿山法。隧道洞口段埋深为5m~6m之间,且上覆土层为3m左右杂填土及2m左右的黏土层,下部主要为中风化石灰岩,围岩级别为V级。隧道直径约为6.5m,双洞隧道净间距约5m。

二、双洞隧道非同步开挖施工

(一) 施工开挖步序

双洞隧道非同步开挖,即左线先推进15m后,右线开始开挖。开挖步序采用台阶法分步开挖,每次推进1.5m。上断面先开挖4.5m后,上下断面同时推进。

(二) 初期支护步骤及参数

初期支护的主要步骤为:大管棚施工(或超前小导管施工)、土石方开挖、初喷、型钢钢架架设、锁脚锚杆施工、挂网锚喷、二衬施工。

管棚采用 $\Phi 108\text{mm}$,厚6mm无缝钢管,单根总管管长30m,沿上断面拱部 150° 范围布置,环向间距400mm。隧道衬砌结构采用复合衬砌,初期支护采用网喷支护,参数为主筋 $\Phi 22$ 格栅钢架、300mm厚C25喷射混凝土;二次衬砌采用350mm厚C35防水钢筋混凝土。

三、非同步开挖隧道计算模型

(一) 模型的建立

针对本试验段下穿道路部分的双洞隧道,采用有限元软件建立三维计算模型。单洞直径为6.5m,双洞净距为5m。根据一般的工程经验^[8],开挖基坑的影响深度为基坑深度的2到4倍,影响宽度为基坑深度的3到4倍。模型的尺寸设定为 $44\text{m} \times 25\text{m} \times 30\text{m}$ 。

模型土体、衬砌以及注浆加固区选用三维实体单元,注浆管棚选用三维梁单元。管棚注浆加固区厚300mm,分布在隧道上断面轮廓线外侧。衬砌截面假定为厚300mm的圆环,无滑动紧密贴合洞壁。土体及注浆加固区选用Mohr-Coulomb弹塑性材料;衬砌及管棚选用均质完全弹性材料。

开挖步骤为台阶法分步开挖,每步开挖1.5m,台阶进深4.5m。左洞超前开挖15m后,右洞开始开挖,双洞先后推进至30m处开挖结束。由于实际开挖时,岩体需经爆破、出渣后才可进行支护,无支护时间较短,一般为3-4小时,岩体应力无法充分释放,变形不完全,为了解决这个问题,需要专门插入一个分析步来降低待开挖岩体的弹性模量。

(二) 材料参数的确定

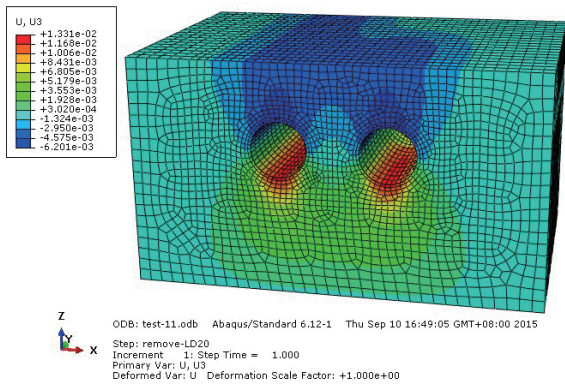
对于岩体,根据该工程勘察报告综合考虑后地层选用单一岩土层。管棚注浆加固区的围岩参数介于所加固围岩与水泥砂浆的参数之间,根据相关文献^[9],对于软弱围岩加固区强度一般在被加固围岩基础上提高2~3倍,围岩等级可以提高一个级别。

对于管棚，弹性模量和重度均应按照管壁与充填浆液进行综合计算。对于管棚弹性模量，可采用等效刚度公式 $E = (E_1 I_1 + E_2 I_2) / (I_1 + I_2)$ 进行计算，其中： E 为注浆管棚弹性模量； I_1 为钢管惯性矩； I_2 为钢管内砂浆惯性矩； E_1 为钢管弹性模量； E_2 为砂浆弹性模量。

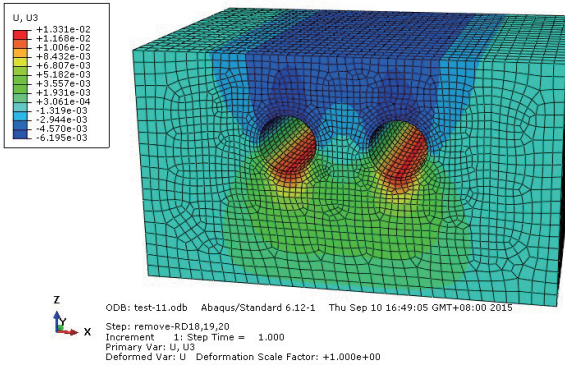
对于衬砌，依然采用上述等效方法计算，将钢拱架的弹性模量折算给予它相邻的混凝土。

四、模拟结果分析

双洞开挖对地层的扰动较大，在特定的地质条件以及设计参数下，不同的开挖步骤和施工顺序会对地表沉降控制带来很大的影响。考虑双洞开挖的先后顺序，即左洞超前开挖15m后右洞开始开挖，双洞先后推进至30m处开挖结束，对中部横向特定截面（ $y=15m$ ）处的地表沉降进行动态分析。



(a) 左洞开挖完毕时位移云图

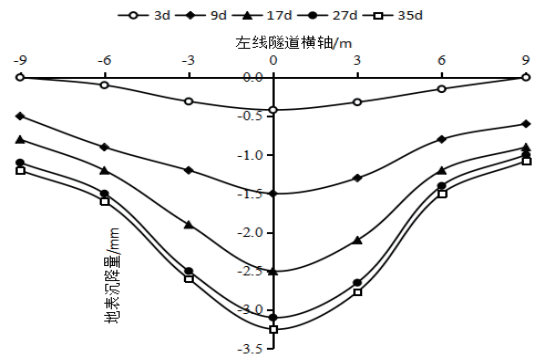


(b) 双洞开挖完毕时位移云图

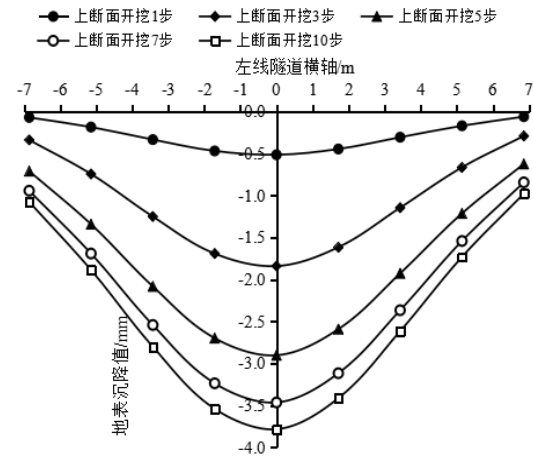
图1 不同开挖阶段竖向位移云图

(一) 模拟结果与监测结果对比分析

选取距离左洞入洞口3m处的地表沉降监测断面，该断面在地表处每3m设置一个监测点，着重分析左洞单独开挖15m，即35天内的地表沉降监测数据，并与 $y=3m$ 处的模拟计算结果进行对比分析，如图2所示。分析表明，数值计算得出的最大沉降量略大于监测结果，其原因在于数值模型存在相应的简化，与实际情况有着一定的差异。因此，考虑到以上原因可以得出，数值计算结果与监测结果基本吻合，能较好的反映出地表沉降的实际规律和大小。



a) 现场实测地表沉降曲线



b) 数值计算地表沉降曲线

图2 地表沉降对比

(二) 特定截面模拟结果分析

右洞开挖6步（9m）至开挖14步（21m）时，中部特定截面处动态地表沉降曲线如图3所示，其中开挖至第10步时，刚好开挖至特定截面处。右洞开挖6步之前时，特定截面右洞地表沉降值几乎为0，此时可认为右洞地表沉降不受左洞影响，这是由于管棚的预支护作用导致的。右洞开挖至第7步时，右洞地表沉降开始产生，开挖至第14步时，右洞地表沉降接近完成，这意味

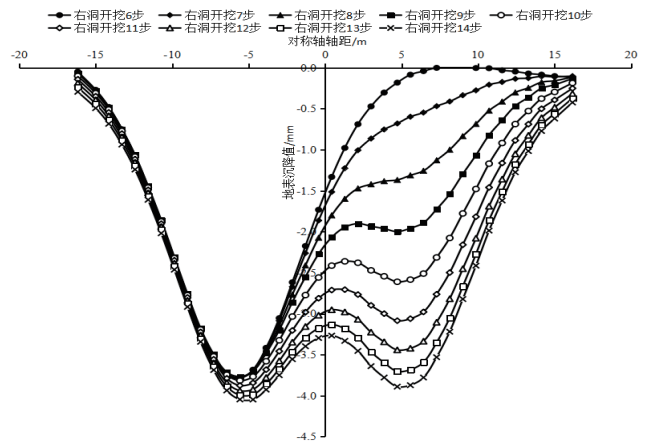


图3 地表沉降曲线

着隧道开挖引起的轴向地表沉降影响范围主要分布在开挖面前后6m距离之内。右洞开挖6步后,右洞洞顶地表沉降最大值显著增加,增加幅度在开挖7至11步内尤为明显,最高可达17%,特定截面处近75%的地表沉降量是在这5步内完成的,这5步的开挖速度以及施工质量对特定截面处隧道的稳定性起着控制作用。

右洞开挖对特定截面处左洞的地表沉降影响有限,最大沉降量从-3.7mm变为-4.2mm,总变化幅度仅为9%。而根据相关研究结果,无管棚支护条件下相邻隧道开挖造成的地表沉降增幅可达40%左右^[2],因此,由于管棚注浆加固区的存在,邻近隧道的相互影响程度被大大降低了。

需要注意的是,7至10步对左洞地表沉降几乎不产生影响,仅占总变化幅度14%,而12至14步所产生的影响占总变化幅度的80%。在7至10步中,上断面逐步开挖至特定截面,而由于阶梯开挖,下断面距离特定截面仍然很远;在12至14步中,下断面逐步开挖并穿过特定截面。由此可以发现,下断面的开挖对邻近隧道地表沉降的影响远大于上断面的开挖。其原因在于,该双洞隧道埋深较浅,洞顶距离地表仅为6m,双洞纵轴距为11.5m,上断面开挖的影响范围有限,且该影响范围均位于管棚注浆加固区以上,加固区的支护作用进一步削弱了对上部地层的影响;而下断面的平均埋深较深,影响范围较广,且开挖卸载伴随着隧道下方岩土体向洞内回弹,而更远处部分岩土体会以沉降的方式对该处回弹进行“补充”,影响范围进一步扩大,因此下断面开挖对邻近既有隧道造成的沉降主要产生于隧道下部岩土体,隧道上方管棚注浆加固区支护作用不明显。

(三) 双洞相互作用模拟分析

小间距双洞隧道开挖引起地表沉降的机理较为复杂,不能简单地利用Peck公式叠加拟合。左洞单独开挖完成引起的地表沉降曲线与右洞单独开挖完成引起的地表沉降曲线互为镜像。将二者简单叠加所得到的地表沉降曲线与双洞先后开挖得到的地表沉降曲线如图4所示,通过对比可以清楚地看到,位于双洞之间的岩土体有着较明显的地表沉降差异,而双洞外侧岩土体的地表

沉降曲线接近重合,差异可忽略。其原因在于,当隧道开挖后,隧道周边围岩会向隧道轴线移动,在既有隧道的一侧开挖隧道,会导致两隧道间岩体产生相反的位移,继而加剧围岩裂隙发育,降低围岩稳定性,产生约8%的额外沉降;双洞外侧岩土体受另一侧隧道开挖影响较小,且变形方向保持一致,因此几乎不会产生额外沉降,按简单叠加得到的地表沉降曲线较为准确。

五、结论

通过对上文分析可以得到以下结论:

1) 地铁管棚法双洞隧道非同步开挖中,后开挖隧道特定截面处近75%的地表沉降量在上断面开挖穿过特定截面前后完成,该阶段的开挖速度以及施工质量对后开挖隧道自身的稳定性起着控制作用;下断面开挖对后开挖隧道上方的地表沉降影响较小。

2) 在管棚加固区预支护作用下,后开挖隧道对既有隧道上方地表沉降量影响有限,仅占总沉降量的9%,远小于无管棚加固区对地表沉降量的影响。上断面开挖造成的影响几乎可以忽略,下断面开挖穿过特定截面前后对既有隧道造成的影响应引起重视,其产生的沉降量约占总影响沉降量的80%。

3) 非同步开挖造成双洞隧道之间部分围岩变形方向发生变化,稳定性降低,从而导致上方地表产生额外沉降;双洞隧道外侧不产生额外沉降。

参考文献

- [1] 潘晓马,张成满,温向东,等.新建隧道施工对邻近既有隧道安全性影响数值分析[J].铁道建筑技术,2002(1):29-31.
- [2] 毕继红,杜玉东,常斌.浅埋近距离双线软土隧道施工仿真模拟的有限元分析[J].特种结构,2007,24(3):102-105.
- [3] 杨明举.浅埋偏压隧道地表预加固及施工影响分析[J].公路,2009(10):270-272.
- [4] 张明聚,张斌,黄明琦,等.厦门翔安隧道穿越风化深槽施工效应及技术措施[J].北京工业大学学报,2008,34(2).
- [5] 安刘生.隧道洞口施工地表预加固技术及应用[J].北京工业大学学报,2007,33(3):278-282.
- [6] 路庆涛.徐州地铁1号线试验段浅埋暗挖管棚法支护技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [7] 张琼武.基于围岩稳定性的小净距隧道支护结构分析[D].武汉:武汉理工大学,2002.
- [8] 杨桂通.弹塑性力学引论[M].清华大学出版社,2004,2.
- [9] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].合肥:安徽教育出版社,2005.

作者简介:李潇(1989-),男,江苏徐州人,工程师,硕士,主要从事隧道结构设计、研究、标准编制等工作。

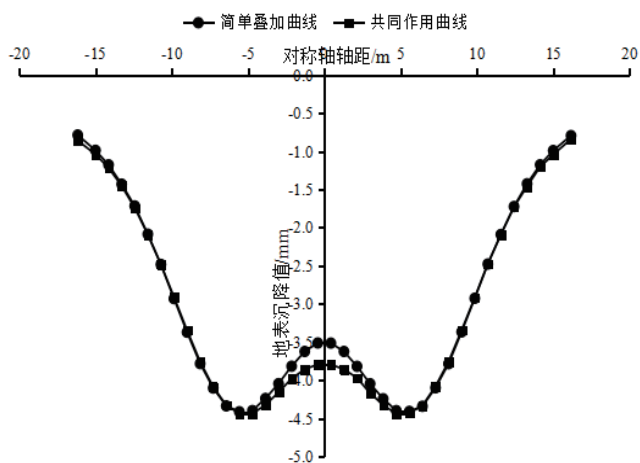


图4 沉降曲线对比