

连拱隧道下穿城市主干道的地表沉降控制方法研究

乔素云^{1,2} 王少华² 尹金涛² 李泉龙² 李顺涛²

1 宜昌富强工程有限责任公司, 湖北 宜昌 443000

2 湖北三峡职业技术学院, 湖北 宜昌 443000

[摘要] 为了满足城市交通的进一步发展的需求, 大量的地下道路在原有城市主干道下方建设, 如何控制隧道开挖引起的地表沉降至关重要。以某城市地下道路双连拱隧道下穿主干道工程为对象, 建立三维数值模型并计算, 通过分析得到了隧道各部分最优的开挖间距: 中导洞开挖约 40 m 后可开展主洞的开挖; 左主洞左侧开挖约 16m 后可开展右主洞右侧部分的开挖, 且该部分开挖 16 m 后可开展左主洞右侧的开挖; 左主洞右侧开挖约 12 m 后可开展右主洞左侧的开挖。由于受左右主洞开挖影响的叠加, 中导洞上方因此将产生最大的地表沉降。超前大管棚可以减小约 40% 的地表沉降和拱顶下沉量, 具有较好的加固效果。无论是拱顶沉降、地表下沉还是隧道的衬砌应力, 都处于安全范围内。表明按所设计的开挖和支持方法是可行的。

[关键词] 隧道工程; 连拱隧道; 下穿城市道路; 数值计算; 地表沉降

DOI: 10.33142/sca.v5i2.6155

中图分类号: U455.43

文献标识码: A

Study on Surface Settlement Control Method of Multi Arch Tunnel under Urban Main Road

QIAO Suyun^{1,2}, WANG Shaohua², YIN Jintao², LI Quanlong, LI Shuntao²

1 Yichang Fuqiang Engineering Co., Ltd., Yichang, Hubei, 443000, China

2 Hubei Three Gorges Polytechnic, Yichang, Hubei, 443000, China

Abstract: In order to meet the needs of the further development of urban traffic, a large number of underground roads are built under the original urban trunk roads. How to control the surface settlement caused by tunnel excavation is very important. Taking the double arch tunnel under the main road of an urban underground road as the object, a three-dimensional numerical model is established and calculated. Through analysis, the optimal excavation spacing of each part of the tunnel is obtained: the excavation of the main tunnel can be carried out after the excavation of the middle pilot tunnel is about 40 m; After the left side of the left main tunnel is excavated for about 16m, the excavation of the right side of the right main tunnel can be carried out, and the excavation of the right side of the left main tunnel can be carried out after the excavation of this part is 16m; The excavation on the left side of the right main tunnel can be carried out after the excavation on the right side of the left main tunnel is about 12m. Due to the superposition of the influence of the excavation of the left and right main tunnels, the maximum surface settlement will occur above the middle pilot tunnel. The advance large pipe shed can reduce the surface settlement and vault settlement by about 40%, which has a good reinforcement effect. Whether it is vault settlement, surface subsidence or tunnel lining stress, it is within the safe range, which shows that the designed excavation and support method is feasible.

Keywords: tunnel engineering; multi arch tunnel; under the city road; numerical calculation; surface subsidence

引言

为了缓解日益增长的城市交通量, 大量的地下道路被不断修建。城市隧道通常受到浅埋、软弱围岩、邻近基础设施和有限施工场地的影响。此外, 这些隧道通常位于城市主干道下方, 这要求其开挖不得干扰地面交通。因此, 如何控制隧道开挖引起的地表移动和地表沉降至关重要, 这也一直是工程界所关注的重点^[1-3]。如王鹏军^[4]针对某超大断面浅埋暗挖隧道下穿既有城市道路工程, 在进行分析的基础上确定采用超前大管棚和土层注浆技术作为辅助功法来控制地表的沉降; 苗刚锋和项成忠^[5]对某市政隧道下穿快速路引起的沉降进行了分析; 郭海涛^[6]报道了烟台市庆荣城际铁路藁山隧道施工致使上部道路塌陷的工程问题, 进行了原因分析并提出了相应的处理措施; 刘国

金^[7]对北京市某城市道路下穿铁路路基的设计方案进行了分析比较, 并给出了推荐的方案; 任艳超^[8]以成都地铁车站下穿既有城市道路为研究对象, 采用模糊层次法对该工程的风险进行了评估, 并提出了相应的风险控制措施; 陈立龙和和振海^[9]介绍了浅埋隧道下穿城市道路中采用高精度大管棚的施工精度控制技术; 田明杰^[10]则在系统分析新建隧道对城市道路影响的基础上进行了分区研究并提出了相应的对策。

分析目前研究来看, 现有研究主要集中于马蹄形、直墙拱形以及圆形等常规形状隧道开挖下对地表沉降的影响。而对连拱隧道的研究相对较少。连拱隧道因其空间利用率高、占地少等优点, 在我国城市地下道路中得到广泛应用。然而, 双连拱隧道也存在跨度大、施工过程复杂

等缺点,与其他隧道形状相比,双连拱隧道在开挖过程中的应力和变形响应更为复杂。因此,对于城市地区的浅埋双连拱隧道,如何采取适当的支护措施和开挖方法,有效控制地表沉降对安全至关重要。

1 工程概况

场内地层结构自上而下为:第四系全新统残坡积粘性土夹卵石以及寒武系下统水井沱组炭质页岩组成。其中粘性土夹卵石:褐色,可塑状,干强度中等,韧性中等,刀切面光滑,略有光泽,无摇晃反应。含 20~30%卵石,卵石粒径 15~75mm,母岩主要为灰岩,呈中风化,磨圆度较差,呈次棱状。强风化带炭质页岩:灰黑色、深灰色。主要由粘土矿物组成,泥质结构,页理状构造,风化裂隙较发育,质软,手可折断,岩石破碎,岩芯呈碎块状,少量短柱状。中等风化带炭质页岩:灰黑色、深灰色。主要由粘土矿物组成,泥质结构,页理状构造,岩芯呈柱状、短柱状、碎块状。岩体较完整。根据场地的工程地质条件和岩体的物理、力学性质,最终确定围岩的级别为 V 级。为了控制隧道开挖引起的地表沉降,在洞口处设置了 ϕ 108 的大管棚,长度 30 m,与隧道外轮廓净距 30 cm。

整个隧道为双连拱隧道,为双向四车道,整体跨度为 31.86 m,高度为 10.95 m。整个隧道为主要穿越中风化页岩,顶部路面的距离地表的距离约 24.12 m。结合实际围岩情况,最终确定隧道的开挖顺序如图 1 所示的序号依次进行:首先完成中导洞①的开挖,在进行中隔墙②的施工,之后再对主洞进行开挖和支护,待围岩变形基本稳定后拆除对应的临时支撑并进行二次衬砌的施作。

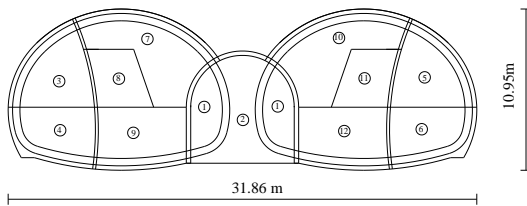
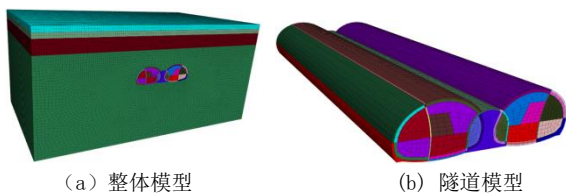


图 1 隧道尺寸及开挖顺序

2 三维数值计算模型

根据隧道所处位置及地层特征,最终建立三维数值模型如图 1 所示。数值模型中,隧道的支护、衬砌以及围岩等材料均采用实体单元,为了消除边界条件的影响,模型的左、右边界和下边界距隧道边界的距离均取 4 倍的隧道直径(约 40m),隧道方向拉伸 80m,上边界为自由地面。最终确定的三维数值计算模型如图 2 所示,模型共有 497664 节点,479760 个单元。



(a) 整体模型 (b) 隧道模型

图 2 三维数值计算模型

由于整个隧道处于浅埋状态,模型初始应力仅考虑自重应力场。计算时,上边界为自由边界,下边界、左右边界和前后边界均采用固定位移的控制条件。围岩材料采用 M-C 模型,隧道支护、衬砌则采用弹性模型进行模拟,隧道锚杆单元和管棚支护则采用 beam 单元进行模拟。开挖-支护-衬砌过程中给予一定计算模拟其中间的间隔过程。结合工程地质勘察报告,最终计算采用的参数如表 1-2 所示。

表 1 数值计算参数

材料	重度 (kN/cm ³)	弹性模量 (MPa)	粘聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	泊松比
粘性土夹卵石	21.0	11	0.02	18.5	0.45
强风化页岩	22.5	900*	0.15	24	0.42
中风化页岩	26.3	2200	0.21	32.5	0.40
C25 混凝土	2.5	28			0.167
C30 混凝土	2.5	30			0.167

表 2 锚杆和管棚支护计算参数

材料	密度	弹性模量	泊松比	抗拉强度
	(g/m ³)	(GPa)		(kPa)
锚杆单元	2.85	210	0.20	1000
管棚单元	2.45	186	0.24	100

3 隧道开挖的最优开挖间距分析

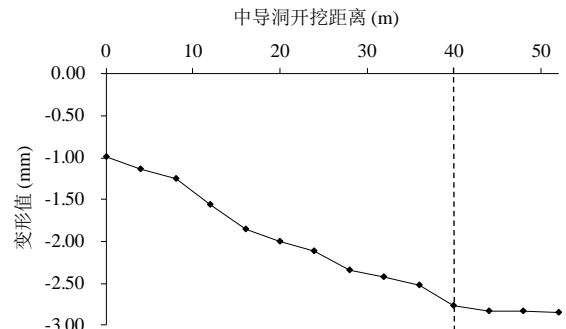


图 3 中导洞开挖后左主洞口拱顶沉降变化曲线

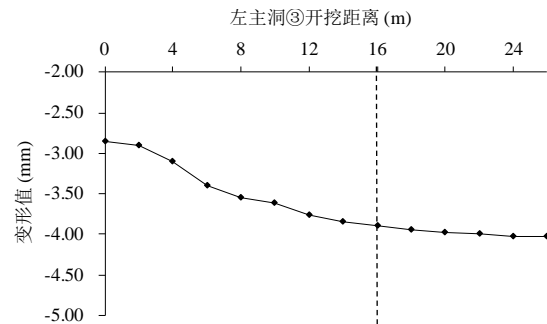


图 4 左主洞③部分开挖后右侧主洞口拱顶沉降变化曲线

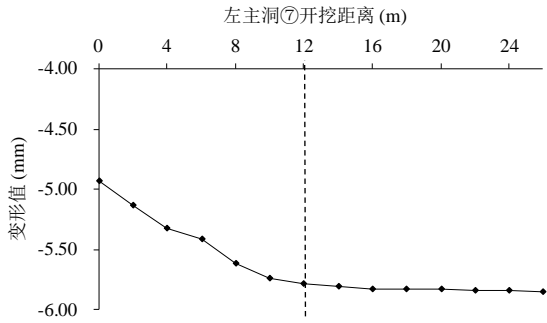


图5 左主洞⑦部分开挖后右侧主洞洞口拱顶沉降变化曲线

一般来讲,隧道采用分部开挖时各部分前后的距离也十分重要。因此分别选取左、右主洞的拱顶为关键点,通过分析隧道开挖后拱顶下沉的变化规律,得到最优的各部分开挖间距。图3为中导洞开挖后左主洞洞口的拱顶沉降值变化曲线,从图中可以看出,中导洞的开挖将使主洞拱顶在开始产生约1.0 mm的拱顶下沉,且随着中导洞的不断前进,拱顶沉降将不断增加。而当中导洞开挖进尺约40 m时,拱顶下沉基本不再发生变化。因此可认为在中导洞开挖40m后开始主洞的开挖。图4为左主洞③部分开挖后右侧主洞洞口拱顶沉降变化曲线。可以看出,当左主洞左上侧开挖进尺约16 m后,右主洞的拱顶下沉值来到约3.9 mm,且基本不再随左主洞的开挖而增加,因此可以认为,左主洞左侧开挖进尺约16 m后可进行右主洞右侧的开挖。同样,也可以认为右主洞右侧开挖进尺约16 m后可进行左主洞右侧⑦部分的开挖。左主洞⑦部分开挖后右侧主洞洞口拱顶沉降变化曲线,可以看出,在左主洞右侧隧道开挖后约12m后右侧主洞洞口的拱顶沉降基本不再发生变化,即可以认为在左洞右侧开挖12m后可以开始右侧主洞左上侧的开挖。

4 隧道开挖的沉降及管棚加固效果分析

图6为按最优的开挖间距进行开挖完成后隧道的竖向位移云图。从图中可以看出,对隧道来讲,左右主洞拱顶位置的沉降为最大,且基本相等,约6.5 mm。而地表沉降最大位置并不在左右主洞的正上方,而是在中导洞的正上方,值约为3.9 mm。分析其原因,中导洞上方受左右两侧主洞开挖的影响都较大,为受影响的叠加区域,因此将产生最大的地表沉降。一般来讲,隧道开挖引起的地表沉降控制在20 mm是可以接受的,而本工程开挖产生的地表沉降值远小于该控制值。

图7为按最优的开挖间距进行开挖完成后隧道衬砌的主应力云图。从图中可以看出,衬砌产生的最大压应力位于接近中隔墙的拱脚处,值约为2.0 MPa;衬砌的最大拉应力位置右主洞拱顶右侧临时支撑处,值约为1.42 MPa。其值均小于衬砌所能承受的拉应力和压应力值。值得说明的是,虽然处于安全范围,但临时支撑与围岩接触处在临时支撑拆除的时候将产生较大的拉应力。实际中应在临时支撑拆除的时候予以重视,建议采用相应的措施,减小临

时支撑拆除的速度,减小衬砌所产生的弯曲变形。

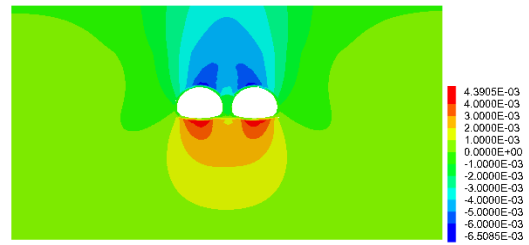


图6 隧道开挖完成后的竖向位移云图(单位:m)

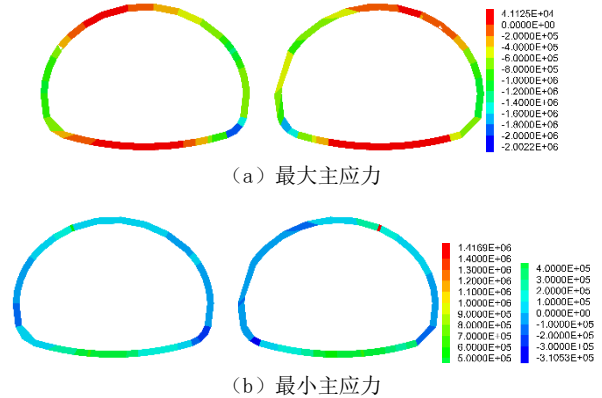


图7 隧道开挖完成后衬砌的主应力云图(单位:Pa)

为了进一步分析超前大管棚支撑在控制地表沉降所起的作用,对不施作管棚条件下的隧道进行了开挖模拟。即不施加beam单元,且按最优的开挖间距进行开挖。从计算得到的竖向位移来看,其变形分布和考虑管棚支护的基本一致,但最大的地表沉降和拱顶下沉分别达到了6.3mm和10.9 mm。也就是说超前大管棚的施作使得地表沉降和拱顶下沉分别降低了38.1%和40.3%。

综合上述隧道开挖完成后的变形和受力来看,无论是拱顶沉降、地表下沉还是隧道的衬砌应力,都处于安全范围内。且洞口的超前大管棚措施在控制地表沉降和拱顶下沉方面具有较好的效果。

5 结论

本文以某城市地下道路双连拱隧道下穿主干道工程为对象,建立三维数值模型并计算,通过分析得到了双连拱隧道各部分最优的开挖间距以及超前大管棚辅助支护的加固效果。得到了以下主要结论:

本工程中,双连拱隧道各部分的最优开挖间距为:中导洞开挖约40 m后可开展主洞的开挖;左主洞左侧开挖约16m后可开展右主洞右侧部分的开挖,且该部分开挖16 m后可开展左主洞右侧的开挖;左主洞右侧开挖约12 m后可开展右主洞左侧的开挖;

隧道开挖完成后,左右主洞的拱顶沉降基本相同且最大,而地表沉降最大位置则在中导洞的正上方。这是由于该区域为受左右主洞开挖影响的叠加区域,因此将产生最大的地表沉降。

无论是拱顶沉降、地表下沉还是隧道的衬砌应力,都处于安全范围内。表明按所设计的开挖和支护方法是可行的。且超前大管棚可以减小约 40% 的地表沉降和拱顶下沉量,具有较好的加固效果。

临时支撑拆除时由于应力释放,可能使得衬砌产生较大的弯曲变形以致产生较大的拉应力。实际在对临时职称拆除时应考虑采取措施控制衬砌的应力释放速度,避免因拉应力过大产生裂缝等病害。

项目资金支持:宜昌市自然科学研究项目《长阳清江画廊旅游码头深水基础施工研究》(项目编号 A21-3-023);湖北省教育厅百校联百县项目(项目编号 BXLBX1329)阶段性研究成果之一,2015年湖北省教育厅科技项目(项目编号 B2015126)。

[参考文献]

[1]朱招庚.超浅埋下穿多线铁路和快速路的土质双车道公路隧道综合技术研究[D].成都:西南交通大学,2011.
[2]李俊泓.某城市道路下穿隧道处挡墙处治方案[J].交通世界,2021(12):108-109.
[3]陈荣.浅谈明挖下穿隧道横穿既有道路施工技术[J].中国高新技术企业,2013(7):89-91.

[4]王鹏军.超大断面浅埋暗挖隧道下穿既有城市道路变形控制研究[D].青岛:青岛理工大学,2016.

[5]苗刚锋,项成忠.超浅埋市政隧道下穿快速路施工沉降分析[J].建材与装饰,2020(8):264-265.

[6]郭海涛.城际铁路大断面隧道下穿城市道路塌陷分析与处理[J].国防交通工程与技术,2014,12(1):57-58.

[7]刘金国.城市道路下穿铁路路基设计方案研究[J].铁道建筑,2018,58(7):97-100.

[8]任艳超.地铁大跨隧道下穿既有城市道路隧道施工风险评估及控制[J].建筑结构,2021,51(2):1741-1747.

[9]陈立龙,和振海.高精度大管棚在浅埋隧道下穿城市快速路施工中的应用[J].天津建设科技,2013,23(5):50-51.

[10]田明杰.新建隧道下穿既有城市道路的影响分区及对策研究[D].成都:西南交通大学,2019.

作者简介:乔素云,男(1973-),高级工程师,主要从事路桥施工工作;通讯作者:王少华(1983-)女,硕士研究生,讲师,主要从事路桥工程专业教学;尹金涛,男,讲师,主要从事路桥工程专业教学。