

摘要:重庆轨道一号线朝天门至小什字区间隧道根据平面线路要求,需要从已建成朝千隧道上方斜交通过。为了确保朝小区间隧道施工过程中,路面交通和朝千隧道的正常运营,设计单位提出采用连拱隧道或单洞三线隧道跨越朝千隧道的两套方案。本文用三维弹塑性有限元方法,以地表和朝千隧道变形为主要控制目标,对这两套设计方案产生的位移的影响进行预测。计算结果表明,采用连拱隧道方案优于单洞三线隧道方案,并且按照此方案设计可以确保朝小区间隧道与朝千隧道内力满足承载力要求和抗裂要求。这一结论为该工程的顺利实施提供了依据。

关键词:隧道;有限元分析;设计方案

1 工程概述

重庆轨道一号线朝天门至小什字区间隧道(简称朝小区间隧道)根据平面线路要求,需要从已建成朝千隧道上方呈 750 夹角斜交通过。朝千隧道为运营中的单向双洞公路隧道,单洞宽 10m、高 6.4m,洞间隔墙厚 18m,洞室已衬砌,现状基本稳定。朝小区间隧道轨面与朝千隧道路面高差 13.16m。因线路布置要求,该区段通过连接隧道由双洞单线隧道逐渐过渡成单洞三线隧道,其中单洞三线隧道宽 20m、高 12m,线路平面如图 1 所示。

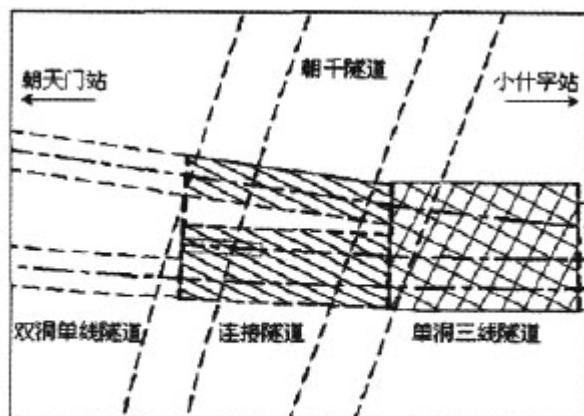


图1 线路平面布置

朝小区间隧道穿越围岩为 V 级泥质砂岩,已建朝千隧道围岩为 IV 级砂质。为确保朝小区间隧道施工时地面和下部朝千隧道的安全,在设计方案中提出采用不对称双连拱隧道或单洞三线隧道两种方式修建连接隧道,如图 2、图 3 所示。其中不对称双连拱隧道衬砌距朝千隧道洞顶 4.47m,距离地面 8.11m。为了正确选择连接隧道的结构形式,对隧道施工时地面和朝千隧道的安全性进行评定,需要采用三维弹塑性数值分析方法对其相互影响及稳定性进行模拟。

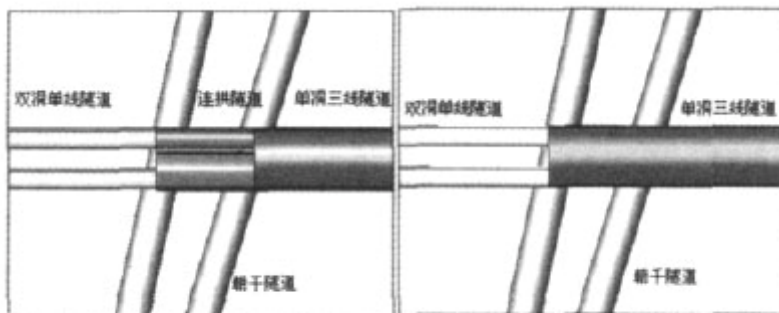


图2 连拱跨越方案

图3 单洞三线隧道跨越方案

2 三维有限元模型

2.1 计算范围和单元划分

计算采用 ANSYS 有限元程序进行数值模拟。根据影响范围为开挖直径 5 倍的原则[1],计算模型沿线路纵向取 130m,沿线路横向取 100m,从地表向下取 60m。计算土体采用 SOLID45 实体单元,隧道衬砌采用 SHELL63 壳体单元,屈服条件采用 Drucker-Prager 屈服准则。建好的三维有限元模型如图 4~图 6。

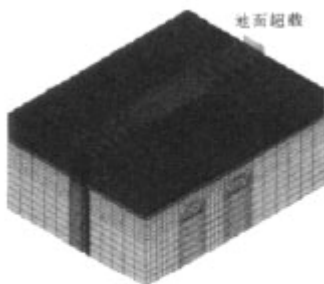


图4 三维有限元模型



图5 连拱隧道有限元模型

图6 单洞三线隧道有限元模型

2.2 围岩参数

有限元计算范围内的围岩,按成因年代可划分为人工填土层、泥质砂岩层和中等风化砂岩层三大类,即分成 3 个主要地层。各层围岩的分布范围可参考图 7,围岩力学参数见表 1。朝小区间隧道穿越泥质砂岩层,该层岩体呈中等风化状态,节理裂隙不发育,岩体较完整,围岩级别 V 级;朝千隧道围岩为 IV 级砂岩。



表1 三维模型计算参数

实体模型	天然重度 (kN/m ³)	弹性模量 (MPa)	泊松比	粘聚力 (kPa)	摩擦角 (°)
围岩1	20	50	0.35	30(综合φ)	
围岩2	25.5	2.78E3	0.35	3.5E5	29.5
围岩3	24.9	2.99E3	0.35	9.8E5	36.3
衬砌	25.0	3.0E4	0.20	-	-

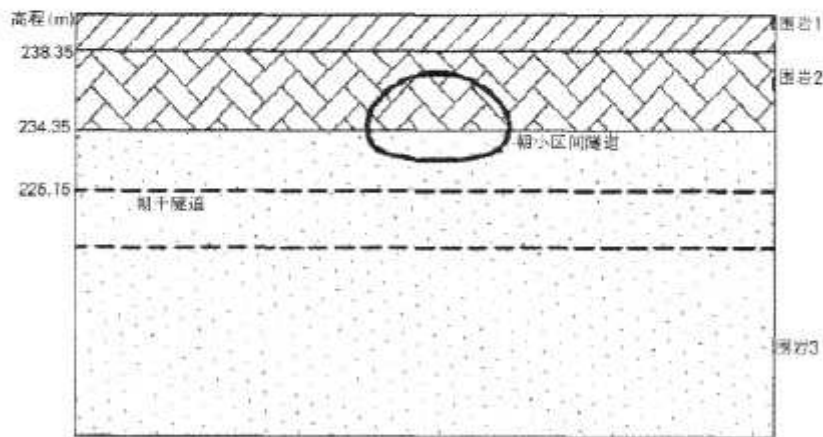


图7 围岩分布

2.3 计算荷载

根据荷载类型,可将荷载分成恒载和活荷载两部分。其中恒载为土体自重;活荷载为地面超载和列车车辆荷载。根据参考文献[2],列车车辆荷载可采用扫频计算的方法得到。当动载系数取 1.2 时,列车车辆荷载可按 33kPa 的均布压力作用在轨道面上,地面超载按 20kPa 取值。

2.4 开挖步和计算工况

针对设计方案提出的两种连接隧道结构形式,有限元计算采用两种工况模拟朝小区间隧道的施工。工况 1 为连拱隧道方案,工况 2 为单洞三线隧道方案。因隧道开挖断面较大,计算时采用双侧壁导坑法模拟隧道开挖,并通过 18 个算步完成计算范围内朝小区间隧道土体开挖和衬砌支护的全过程。隧道开挖和衬砌支护在 ANSYS 中可采用“死”、“生”单元的方法实现[3]。

3 计算结果

3.1 工况计算结果比较

按照上面所述的计算工况和开挖步计算,可以得到各工况下的最大竖向位移值,见表 2。



表2 各工况最大竖向位移结果(单位:mm)

计算工况	区间隧道	地面	朝千隧道
工况1	-2.16	-2.69	1.11
工况2	-2.62	-2.93	1.50

注:正值代表土体隆起,负值代表土体下沉

从表2所列计算结果可以看出,朝小区间隧道施工使朝千隧道向上隆起,这是由于其施工过程相当于在朝千隧道上方卸载而造成的。计算结果中,工况1的位移量小于工况2,这是因为工况1采用连拱结构形式降低了区间隧道土体开挖量,从而减小对地面和朝千隧道的影响。因此有限元分析建议采用工况1结构形式(连拱方案)作为朝小区间隧道跨越朝千隧道的推荐方案。

3.2 位移沉降曲线

区间隧道开挖过程中,朝千隧道位移随区间隧道开挖而不断发生变化。因此对朝千隧道关键截面进行位移监测,有利于找出区间隧道施工中的关键工序,并对今后施工提出指导性建议。这里取三维有限元模型中朝千隧道洞顶纵截面A-A、B-B和朝千隧道上方土体横截面C-C为位移控制截面,如图8,并通过有限元计算结果绘出不同工况施工下这三个控制截面的位移曲线,如图9、图10。

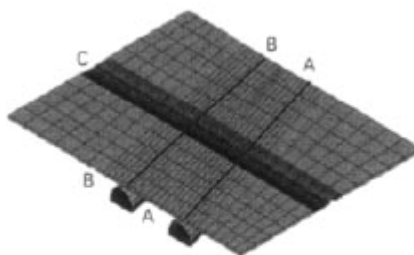


图8 朝千隧道位移控制截面

从图9中可以看出,朝小区间隧道按工况2施工对朝千隧道产生的纵向隆起要大于工况1,这说明工况1采用连拱隧道跨越朝千隧道方案优于工况2采用的单洞三线方案。另外从隧道的变形范围可以看出,区间隧道施工对朝千隧道纵向的影响区大约从纵坐标26m至80m,约为54m的范围。因此,如果施工前需要对朝千隧道进行加固,可以只针对这54m范围进行局部加固。



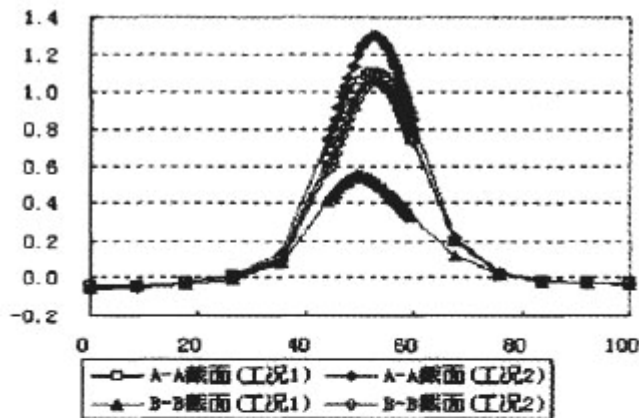


图9 控制截面A、B竖向位移

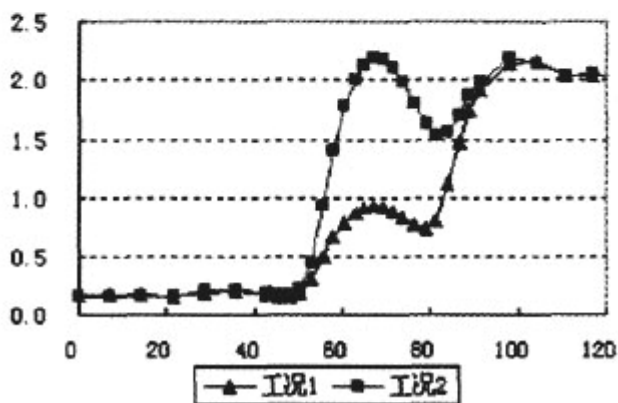


图10 控制截面C竖向位移

图 10 是沿朝小区间隧道开挖方向,朝千隧道上方土体的变形图。从图 10 中可以看出,工况 1 和工况 2 对朝千隧道左右线的影响程度不同。工况 1 中朝千隧道右洞的隆起量大于左洞,而在工况 2 中,朝千隧道左、右洞的隆起量基本不变。这是因为朝千隧道右洞靠近单洞三线隧道,左洞靠近双洞单线隧道,见图 1。当采用工况 1 施工时,连拱隧道的开挖量小于单洞三线隧道,所以朝千隧道左洞的隆起要小于右洞。工况 2 采用单洞三线隧道跨越朝千隧道,所以隧道施工对朝千隧道左右洞的影响相同。另一方面,因朝小区间隧道施工使朝千隧道在横向 40m 至 100m 的范围内发生不均匀变形。这说明朝小区间隧道在此范围施工,会对其下方朝千隧道有较大的影响,因此当区间隧道施工进入该区段时,应采取减小爆破和加强与支护措施等手段,减小隧道施工对朝千隧道的影响。朝小区间隧道施工完毕后,朝千隧道和朝千隧道上方土体的变形图如图 11、图 12 所示。

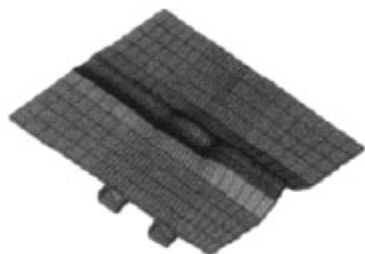


图11 朝千隧道上方土体变形



图12 朝千隧道衬砌变形

3.3 车站结构承载力验算



根据前面位移分析的结果可以得出,工况 1 采用连拱隧道跨越朝千隧道的设计方案是本次计算推荐施工方案。将按工况 1 计算出的朝千隧道应力进行积分,可以得到朝千隧道弯矩,见图 13。将计算弯矩与结构的极限弯矩和裂缝宽度为 0.2mm 时的弯矩进行比较,可以得到朝千隧道修建完成后朝千隧道的安全状态。从表 3 中可以看出朝千隧道因上方朝千小区间隧道开挖产生的弯矩,不仅小于极限弯矩,而且满足抗裂要求。因此按工况 1 所提供的施工方法进行施工,可以满足朝千隧道结构的承载力和抗裂要求。

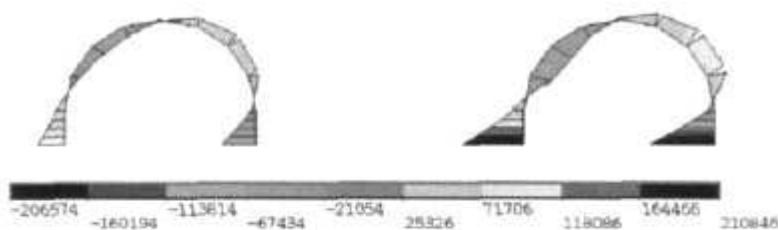


图13 朝千隧道衬砌弯矩图(N·m)

表3 朝千隧道衬砌抗弯承载力(单位:kN·m)

项目	计算弯矩	极限弯矩	0.2mm 裂缝弯矩
顶拱	6.82	790	417
侧墙	160.82	755	380
墙脚	210.85	847	486

4 结论

(1)用有限元模拟隧道开挖,能再现施工过程中的力学现象,从而使设计或施工能够从宏观角度对隧道施工过程进行把握;

(2)本次计算通过对两种开挖方案进行施工模拟,得到方案 1 为朝千小区间隧道跨越朝千隧道的最佳施工方案;

(3)计算结果表明,按方案 1 设计和施工朝千小区间隧道可确保施工和运营阶段,区间隧道和朝千隧道内力满足承载力要求和抗裂要求。

参考文献:

- [1]关宝树.隧道力学概论[M].成都:西南交通大学出版社,1993:49-54.
- [2]翟辉,刘维宁.地铁列车引起的低频地表响应及减振措施研究[J].都市块规交通,2005,(4):101-105.
- [3]吴波,高波,等.城市地铁小间距隧道施工性态的力学模拟与分析[J].中国公路学报,2005,(3):84-89.
- [4]GB50010-2002,混凝土结构设计规范[S].
- [5]李强,王明年.浅埋隧道近接施工地表沉降有限元分析[J].四川建筑,2004,24(5):98-101.
- [6]章立峰,刘建国.地铁区间隧道施工过程动态模拟分析[J].隧道建设,2003,23(6):3-5.

