

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0074-04

下穿公路隧道大型三维有限元静力仿真研究

陈佳正¹, 汤 华², 戴永浩²

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院, 湖北 武汉 430060;

2 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

[摘 要] 针对公路隧道近距离穿越既有公路、铁路等构筑物 and 建筑物的工程, 研究当前施工工法和支护方案下隧道围岩变形范围和上方既有公路受影响程度, 并对既有公路的安全性进行评估, 采用大型三维数值模拟方法开展甸头隧道近距离穿越既有公路段的分析, 得出采用三台阶掘进能有效控制既有公路的沉降变形, 且隧道轴向方向变形差异较小, 围岩基本处于受压状态, 塑性区集中于两腰部及以下, 但衬砌在开挖后受拉应力较大易破坏的结论。

[关键词] 公路隧道; 近接工程; 三维模拟; 三台阶法; 沉降变形

[中图分类号] U455 [文献标识码] A

伴随着大型有限元数值模拟软件功能的日渐强大, 软件计算中能更真实地对模型边界条件及围岩的力学特性进行模拟, 在隧道掘进施工过程中能够更为精确、细致地进行模拟计算, 使得人们更加重视有限元对结构工程的模拟计算, 其应用也更为普及和成熟。刘和清^[1]结合软岩隧道下穿高速公路工程, 对隧道支护结构的受力情况进行数值模拟, 通过对支护结构的受力分析, 得出上台侧壁导洞施工过程中, 如何确定支护结构的最不利位置。张顶立等^[2]分别对两、三台阶、双侧壁等施工法进行三维有限元计算, 经过分析之后得出双侧壁施工过程中地面变形最小。谭忠盛、倪鲁肃等^[3]应用 FLAC3D 软件进行了下穿高速公路的结构变形模拟, 得出了地表沉降的纵横向沉降规律及主要影响因素。潘晓明^[4]采用 FLAC3D 软件对浅埋大跨度隧道下穿公路在有无行车荷载作用下施工过程进行了数值模拟, 对比分析, 结果表明, 有无行车对隧道施工影响不大。胡玉林等^[5]依托洺水隧道, 借助数值分析, 结合多个方面, 研究隧道掘进施工对上部公路的影响, 得出有效减小开挖对既有构筑物影响的方法。余晓琳、罗霞^[6]结合隧道工程, 采用二维及三维模型对隧道下穿公路进行模拟, 研究隧道开挖时的受力、变形及沉降, 验证开挖时支护方案的可行性。朱正国等^[7]运用有限元对隧道下穿工程作模拟研究, 总结出有关沉降的相关系数及合理模型。赵继生^[8]结合实例, 数值模拟隧道地表沉降, 得出盾构隧道变形呈

槽状且变形不大。刘庭金^[9]对下穿工程进行立体动态研究, 研究隧道施工时构筑物变形程度, 对施工工艺与方法进行验证。胡献竹^[10]分析隧道开挖时, 隧道相应结构的受力变化, 并结合相应工程以应用。

甸头隧道地处大理到宾川段中的一处公路隧道, 宽约 17.5 m, 中线相隔约 29 m。根据规定: 甸头隧道截面面积为 170 m², 其截面面积大于 100 m² 的为超大断面隧道。隧道下穿大西二级公路处, 上覆岩土性质相对较差, 隧道的开挖极易导致围岩大变形、引起路面沉降过大和开裂、甚至发生路面坍塌。而隧道浅埋交叉段既有的大西二级公路区间车流量大, 保通要求高, 此类安全问题尤为重要。通过大型三维数值模拟隧道施工时相应参数, 及时给施工提供参考, 确保既有公路的有效运行。

1 计算模型

隧道为双洞双向隧道, 左右幅隧道中线距离 28 m, 间距大于隧道净空宽度(17.5 m)的 1.5 倍。因此, 这里左右幅隧道的相互影响很小, 仅考虑单幅隧道的开挖影响。由于隧道的宽度接近 17 m, 隧道下穿的大西二级公路宽度为 15 m, 为消除边界效应的影响, 建立如图 1 所示的三维地质模型图, 其中大西公路走向为 x 方向, 垂直于大西公路为 y 轴。模型的长度(x 方向)和宽度(y 方向)分别为 112 m、45 m, 模型下表面取隧道底板以下 24 m。

数值分析时网格剖分如图 1 所示, 其中隧道部

[收稿日期] 2019—08—07

[基金项目] 国家自然科学基金(51778609)

[第一作者] 陈佳正(1994—), 男, 湖北黄冈人, 湖北工业大学硕士研究生, 研究方向为复杂地质公路隧道超前预报及方法

分划分共约 7 万个六面体单元,三维计算模型共有约 40 万计算单元。划分单元在隧道附近划分密集,以隧道为中心往外围单元划分则逐渐稀疏。

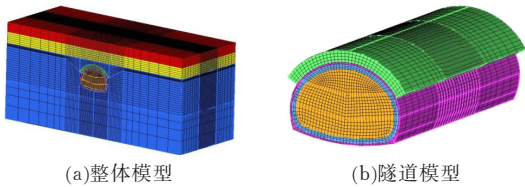


图 1 三维模型有限元网格

数值计算材料参数如表 1 所示。
支护模拟:支护布置如图 2 所示,超前管棚和超

前小导管均选用六面体实体单元,共划分 6480 单元。选用六面体单元来模拟新建隧道的初期支护和二次衬砌,将其切割成 19 980 个单元;选用两个节点的线性模型来模拟新建工程的锚杆,并将其切分为 774 个单元。

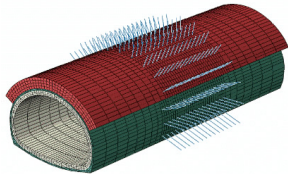


图 2 支护布置图

表 1 数值计算材料参数表

岩土名称	状态	天然密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ
人工填土	稍密	1.85	15	11	0.005	0.35
黏土	硬塑	1.90	35	17	0.01	0.35
玄武岩	全风化	1.85	100	22	0.05	0.3
玄武岩	强风化	2.20	100	28	0.10	0.3
锚杆		7.80			20	0.2
初衬		2.60	2000	40	20	0.20
二衬		2.60	2500	45	30	0.20

在施工中模型分析的边界条件均取为:计算模型下部为全部约束,计算模型两侧定义受法向的约束,地表定义成自由面。施工步骤:根据现场情况及各方面的综合考虑,选用三台阶法进行隧道施工。中、上两部台阶每次掘进进尺 2 m,上部台阶比中部台阶超前开挖 5 m,下台阶一次性掘进 10 m,保持落后中部开挖台阶 10 m。

2 洞顶位移变化

选取隧道下穿大西公路进口处的隧道拱顶(图 3 的点 A)为监测对象,绘制其随着隧道掘进过程的位移曲线,其结果如图 4 所示。

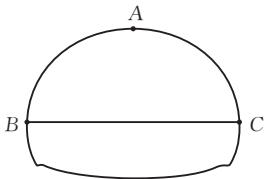


图 3 隧道面监测点

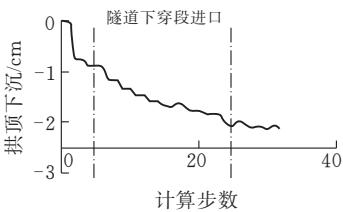


图 4 拱顶沉降图

从图 4 中隧道拱顶沉降曲线可知:1)隧道掌子面掘进过程中,掌子面的推进呈台阶形,相应的拱顶

沉降曲线形态也呈现台阶形;2)隧道顶部的沉降变形主要受掌子面后方开挖的影响。当掌子面掘进至监测控制断面时,拱顶变形为 0.8 cm;当掘进越过监测控制平面后,拱顶变形急剧增加。随掌子面推进,距离监测控制面越来越远后,沉降变缓。最终拱顶沉降达到 2.2 cm。

选取隧道下穿大西公路进口处的隧道收敛线(图 3 的 BC)为监测对象,绘制其随着隧道开挖过程的收敛变化,其结果如图 5 所示。

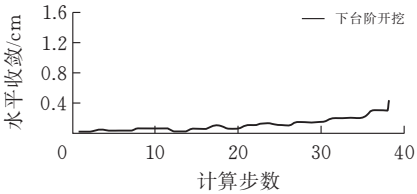


图 5 隧道收敛图

从图 5 中可以看出:在掌子面的下部台阶开挖时,隧道的净空收敛缓慢增加;当开始下台阶的开挖时,净空收敛继续急剧增加,由 0.32 cm 增加至 1.25 cm,后续的开挖净空收敛逐渐趋于稳定,最终为 1.22 cm。

垂直与隧道走向的地表变形:选取隧道下穿大西公路进口处的地表(图 6 的断面 AA')为对象,绘制其随着隧道开挖过程的位移变化,其结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出:1)隧道的开挖导致地表沉降为漏斗形,隧道顶部对应的地表监测点的变形最

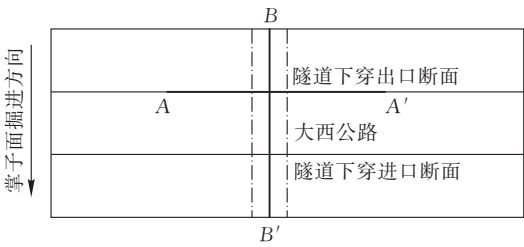


图6 监测断面

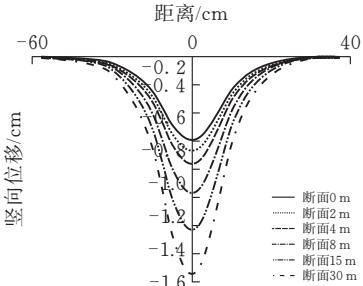


图7 AA'面地表沉降图

大,朝两边沉降变小,符合 Peck 公式;2) 隧道掘进至监测平面时,隧道顶部对应的地表最大沉降为 0.6 cm;掌子面掘进到距离监测断面 30 m 时,掌子面拱部对应的地表最大沉降为 1.55 cm。

隧道轴向对应的地表位移变化:选取隧道下穿大西公路进口处的地表(图 6 的断面 BB')为对象,绘制掌子面推进的过程中隧道轴向对应的地表位移变化(图 8)。

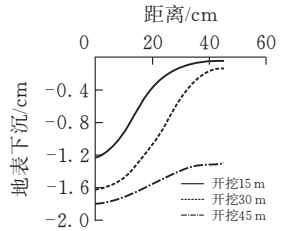


图8 隧道轴向地表沉降图

从图 8 中可以看出:1) 随着隧道掌子面的掘进,隧道轴向地表纵断面的位移逐渐增大;2) 当隧道全部贯通后,隧道进口和出口对应的地表最大变形值为 1.8 cm 和 1.3 cm,沉降斜率为 0.01 cm/m。

3 围岩主应力分析

以监测断面 AA'和 BB'的应力为分析对象,应力分布如图 9 和图 10 所示。从图中可以看出:引水隧道开挖后,围岩基本全部受压,只有在初衬和围岩接触处出现少量受拉部位。压应力最不利位置分布于隧道的两腰部,数值大小为 1.32 MPa。

塑性区分布:以监测断面 AA'和 BB'的塑性部位为分析对象,模拟结构塑性变形图如图 11 所示。从图中可以看出:隧洞开挖后,围岩塑性区主要集中在隧道腰部以下,最大等效塑性应变为 0.0049。

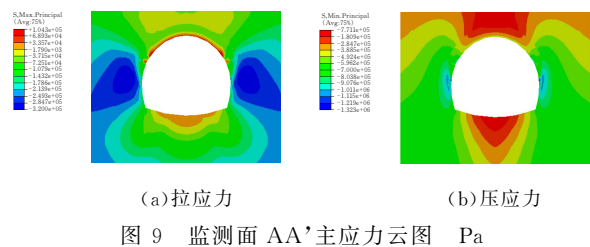


图9 监测面 AA'主应力云图 Pa

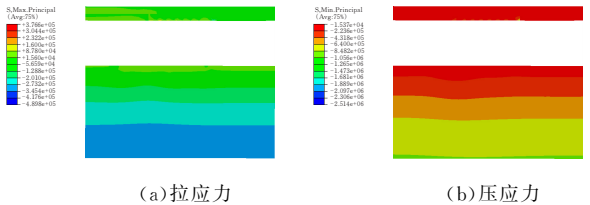


图10 监测面 BB'主应力云图 Pa

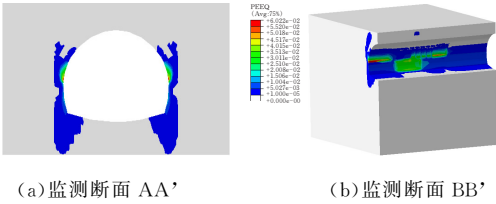


图11 监测断面塑性区分布图

初衬受力分析:隧道开挖完毕后,隧道衬砌结构的受力如图 12 所示。从图中可以看出,衬砌受到的拉应力最不利值为 10 MPa,压应力最不利值为 27 Mpa。拉压应力均超过 C25 混凝土的抗压/抗拉强度的标准值。

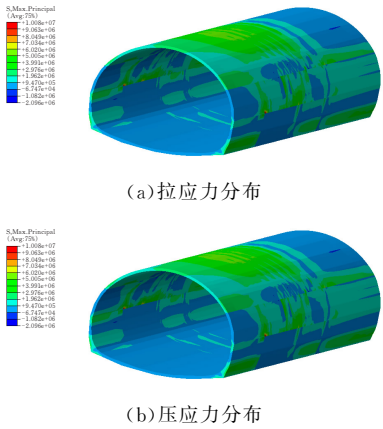


图12 衬砌受力分布图 Pa

4 结论

为研究当前施工工法和支护方案下隧道围岩的变形和上方既有公路受影响程度,运用三维有限数值模拟法开展甸头隧道下穿高速公路分析,得到结果如下:

1) 隧道顶部的变形主要受掌子面后方施工的影响,最终拱顶沉降达到 2.2 cm;隧道的净空收敛数值主要受到掌子面下部台阶施工的影响,最终净空收敛 1.22 cm。因此,隧道的施工对于公路的沉降变形影响在可控范围,且表明该三台阶施工甸头隧

道是可行的;

2) 隧道开挖引起隧道的横断面对应的地表沉降为漏斗形,符合 peck 公式描述的沉降图形形状;掌子面掘进所引起隧道轴向对应的地表变形差异较小,最终隧道进口和出口对应的地表最大沉降值为 1.8 cm 和 1.3 cm,沉降斜率为 0.01 cm/m,表明隧道在进口和出口时,沉降差异不大,且皆符合变形控制要求;

3) 隧道开挖后,隧道围岩基本全部受压,仅在初衬和围岩接触处出现少量受拉部位;最大的压应力数值分布与掌子面的腰部两侧,为 1.32 MPa;隧道围岩结构的塑性部位大部分分布于掌子面两侧腰部以下位置,最大等效塑性应变为 0.0049,即隧道掘进过程中最不利位置位于隧道两侧,即对于上部公路影响较小;

4) 隧道开挖后,初衬受力较大。其所受的最大拉应力值 10 MPa,最大压应力值 27 Mpa。拉压应力均超过 C25 混凝土的轴心抗拉/抗压强度标准值,即开挖时要加强对于初衬结构的监测和强化,避免出现拉压破坏。

[参 考 文 献]

[1] 刘和清.下穿高速公路的浅埋大断面隧道衬砌受力分

析[J].铁道标准设计,2011(4):95-97.

[2] 午向阳,蒋宗全,李鹏飞,等.大断面隧道下穿高速公路施工方案优化研究[J].铁道建筑,2010(11):40-42.

[3] 李健,谭忠盛,喻渝,等.下穿高速公路浅埋大跨度黄土隧道施工措施研究[J].岩土力学,2011,32(9):2803-2809.

[4] 潘晓明.高速铁路浅埋大跨度隧道下穿公路施工安全性分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(9):72-75.

[5] 胡玉林.洺水隧道下穿邢汾高速公路安全性分析[J].北方交通,2016(1):62-66.

[6] 余晓琳,罗霞.隧道下穿高速公路施工方案可行性数值分析[J].公路与汽运,2010(5):182-185.

[7] 朱正国,余剑涛,等.区间隧道零距离下穿既有地铁车站施工方案研究[J].现代隧道技术,2013,50(6):124-130.

[8] 赵继生.不良地质条件下盾构法施工隧道地表沉降规律研究[J].交通标准化,2012(3):128-130.

[9] 胡军,杨小平,刘庭金.盾构下穿施工对既有隧道影响的数值模拟分析[J].铁道建筑,2012(10):50-54.

[10] 胡献竹.浅析高速公路下穿隧道施工技术[J].中小企业管理与科技(上旬刊),2012(4):144-145.

Static simulation of Large Scale Three-dimensional Finite Element for Undercrossing Highway Tunnels

CHEN Jiazheng¹,TANG Hua²,DAI Yonghao²

(1 School of Civil Engin.,Architecture and Environment ,Hubei Univ.of Tech.,Wuhan 430060,China ;

2 State Key Laboratory of Geomechanics Mechanics and Engineering ,
Chinese Academy of Sciences , Wuhan 430071,China)

Abstract: With the development of national highway construction, more and more highways need to pass through densely built areas and dense areas of existing road networks, resulting in a large number of highway tunnels passing through existing highways, railways and other structures and buildings in close proximity. In order to study the deformation range of surrounding rock of the tunnel under the current construction method and supporting scheme and the influence degree of the existing highway above, and to evaluate the safety of the existing highway, the large scale three dimensional numerical simulation method was used to carry out the analysis of Diantou tunnel passing through the existing highway section at short distance. It was concluded that the settlement deformation of the existing highway could be effectively controlled by adopting three-step tunneling. The axial deformation difference of the tunnel was small; the surrounding rock was basically under compression; the plastic zone was concentrated at two waists and below, but the lining was subject to large tensile stress and easy to damage after excavation.

Keywords: highway tunnel; proximity engineering; three-dimensional simulation; three-step method; settlement and deformation WT