

超大断面隧道设计计算方法研究

陈福斌

(深圳市交通公用设施建设中心, 广东 深圳 518000)

摘 要: 针对深圳市过境高速公路连接线工程分岔超大断面隧道关键节点, 采用数值模拟的手段, 分析了隧道的围岩开挖后应力应变关系, 提出了荷载计算的新的方法。根据工程的地质, 对隧道结构形式的设计方法、要点及设计中应注意的问题进行了探讨。计算表明, 采用应变指标判断松散拱荷载的方法是较为可靠的计算大断面荷载的计算方法。隧道采用多导洞开挖施工工法是较为安全的, 围岩变形也是可控的。该设计方法可为此类结构的设计提供参考和借鉴。

关键词: 超大断面; 隧道; 荷载结构法; 地层结构法

中图分类号: U452.2

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)04-0200-04

0 引言

深圳市过境高速公路连接线工程(以下简称连接线隧道)地处梧桐山西, 西起爱国路立交, 东西贯穿东湖公园, 位于深圳水库下游, 连接线隧道在塘排山东侧与深圳东部过境高速莲塘隧道相接。

隧道主线为3车道, 其中莲塘主线分岔处3+2的车道实际相当于6车道的设计大断面, 单洞跨度约30 m, 其洞室跨度、单洞面积及设计施工难度均在国内在建隧道之首。

公路隧道中, 隧道断面可以划分为标准断面、大断面、超大断面等断面形式^[1]。日本的工程协会对隧道断面大小的定义中, 将开挖断面120 m²以上断面定义为超大断面, 而国际隧道协会则对100 m²以上断面设定为超大断面。国内超大断面案例较少, 现有实例包括白云山公路隧道, 开挖断面31.5 m × 10.55 m, 扁平率达0.333; 乌孟山二号隧道, 最大开挖宽度28.42 m, 高度17.4 m, IV~V级泥岩; 曾家坪1号隧道进口, 开挖宽度20.68 m, 高度13.83 m, 三线城市隧道。连接线隧道莲塘分岔大跨段, 单洞最大宽度29.87 m, 高度18.97 m, 其开挖断面面积达440 m², 远大于国际隧协的关于超大断面的设计标准。如何准确、合理对超大断面隧道工程进行经济合理的设计, 是整个工程的难点。

1 研究背景

目前关于超大断面隧道的设计和研究方案在国内很少, 可以拱借鉴参考的施工案例极少, 相应的施工方法不成熟, 设计和施工也没有相关的规范可以依据。蒋树屏等^[2]研究了某高速公路八车道超大断面, 对于设计方案和施工工序进行了研究, 根据工程类比总结了一套的施工方法。滕飞^[4]对于东北地区软塑性粘土地层的大断面隧道提出相关的施工技术工法。张全全^[5]采用数值分析的方法对浅埋大断面隧道围岩的变形及是施工方法进行了优化分析, 确定了初衬设计的关键因素。本文在连接线隧道设计与施工过程中, 针对隧道工程超大断面关键节点, 开展大断面隧道结构关键技术研究, 提出关键节点的设计方法和施工工法, 研究施工扰动与控制措施, 对连接线大断面隧道的设计和施工具有重要的意义。

2 工程地质概况

根据地质详勘报告, 隧道莲塘段大断面区域, 埋深为75 m, 岩体较完整, 以微风化岩层为主, 属弱透水地层, 局部存在破碎带, 易形成地下水补给通道。上部覆盖层为第四系(Q)及变质砂岩层(C1), 围岩类别具体如下:

④含碎石粉质黏土: 褐红、褐灰、褐黄色, 不均匀含少量风化岩块, 可塑~硬塑状态。

⑥₁全风化变质砂岩: 灰黄~褐黄色, 不均匀夹少量中风化岩块。

⑥₂强风化变质砂岩: 褐黄、褐灰色, 原岩结构基

收稿日期: 2020-10-25

作者简介: 陈福斌(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事路桥项目管理工作。

本破坏,原岩矿物已基本风化成土状,岩芯呈土夹砂状或土夹块状。

⑥₃ 中风化变质砂岩:灰白~浅灰色,裂隙发育,裂面多铁质浸染,岩芯以碎块~块状为主,少量短柱状,岩石硅化显著,岩质坚硬,锤击声稍哑、不易击碎,合金钻进困难,金刚石可钻进。

受区域地质构造影响,围岩根据地质勘探资料为Ⅲ级围岩,根据规范推荐的围岩参数取值,参数选取如下:黏聚力 $c=1.1\text{ MPa}$, $E=13\text{ GPa}$,泊松比:0.27,内摩擦角 45° ,侧压力系数为 0.44。

3 结构设计及计算

3.1 结构设计

隧道断面内轮廓尺寸综合考虑建筑限界、通风要求、设计合理性、施工便利及经济性采用 5 心圆断面,开挖断面跨度为 29.87 m,高度 18.97 m,见图 1。

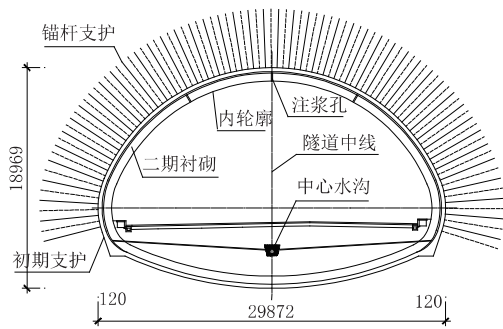


图 1 大跨段复合式衬砌断面设计图(单位:mm)

隧道开挖后应同时施工初期支护,防止围岩应力释放导致变形过大引起坍塌。根据新奥法原理,隧道开挖后先产生一定的随时间的变形,围岩与初期支护达到收敛平衡,此后才施工二次衬砌,这样对二次衬砌的荷载压力的计算应主要是拱顶松散压力,而非隧道开挖后形变压力。设计时应根据不同围岩情况预留不同的变形量,防止隧道围岩变形过大影响隧道限界。

初期支护采用锚喷支护,即由喷射混凝土、锚杆、钢筋网和钢架支护形式组合使用。锚杆采用中空注浆锚杆。根据本隧道工程沿线所处围岩工程地质和水文地质条件及地层岩性、结构和洞跨,在认真分析本隧道工程环境特点和难点及类似工程的基础上,主要根据工程类比并经验算复核得出支护参

数,见表 1。

3.2 荷载与二衬结构计算

地下开挖而没有支护的洞室称为毛洞。毛洞开挖后将引起局部地壳残余应力的释放和一定范围内的岩土体应力重分布,应力重分布范围内的岩土体称为围岩,此时毛洞围岩的应力状态称为二次应力状态,这种应力状态受开挖方式(爆破、非爆破)和方法(全断面法开挖、台阶法开挖等)的强烈影响,并且与岩土体的力学性能、初始应力及洞室断面形状等因素密切相关。

对于矿山法隧道,除了膨胀性地层外,围岩压力主要指变形压力和松动压力。变形压力是由于洞室围岩变形受到支护结构限制后,围岩对支护形成的压力。其大小决定于岩体的力学性质、岩体的初始地应力、洞室形状、支护结构的刚度和支护时间等。松动压力指由于开挖而松动或坍塌的岩体,以重力形式直接作用在支护结构上的压力。俄国学者普氏(简称)于 1907 年提出普氏理论,即自然平衡拱理论,认为在具有定粘结力的松散介质中开挖洞室后,其上方会形成一个抛物线形的自然平衡拱,而作用在支护结构上的围岩压力是自然平衡拱以内的松动岩体的重力。自然平衡拱上方的一部分岩体承受着上覆地层的全部重力,如同一个承载环一样,并将荷载向两侧传递下去,这就是围岩的拱效应。

对于围岩较好的诸如Ⅱ级或Ⅲ级围岩,隧道开挖后形变压力便可短时间内释放,由初期支护和围岩自身承担,而二次衬砌主要承担松散压力。传统的松散压力计算方法^[6]有普氏理论、泰沙基理论、经验公式算法,均是基于新奥法原理考虑毛洞一次性开挖后,拱顶塑性区形成压力拱,其拱下方松散土压力可做设计的计算荷载。

按照《公路隧道设计规范》^[7]中的经验公式:

$$h=0.45X2^{(s-1)}w$$
 (1)

$$w=1+i(B-5)$$
 (2)

式中: h 为松散拱高度; S 为围岩级别; w 为宽度影响系数; B 为隧道宽度(m); i 为 B 每增减 1 m 时的围岩压力增减率,当 $B<5\text{ m}$ 时 $i=0.2$,当 $B>5\text{ m}$ 时 $i=0.1$ 。

表 1 隧道复合衬砌设计参数表

衬砌类型	C30 喷混 /mm	锚杆 /m	钢筋网 /mm	工字钢	预留变形量 /cm	二次衬砌
大跨段	350	φ28,长 $L=8.0\text{ m}$,@1 m(环距)× 0.7 m(纵距)	φ6@250×250	I 25b,纵向间距 0.7 m	120	70 cmC35 钢筋混凝土, 设仰拱

然而该公式符合小跨度隧道的荷载计算思路,对于超大跨度隧道设计是不适用额。采用这个规范公式计算大跨度隧道得到的松散土压力过大,导致二衬内力较大,结构设计过于保守。因此如何确定计算荷载是超大断面隧道的设计的重点。

从理论上讲,对于同一围岩,开挖后应力重分布的影响区与位移的影响区是一致的,采用应变指标可以作为判断松散土压力的依据。杨林德、丁文其等(2001、2003)成功应用了洞周围岩径向张应变值判断洞室围岩的稳定性。根据曲海锋(2007)的方法,其论文中围岩(弹性模量为 1.85 GPa)的极限拉应变值为 0.5‰,可以用其方法计算出前文Ⅳ围岩的极限拉应变值,即:

$$\varepsilon = R_{\text{拉}} / E \quad (3)$$

式中: E 为弹性模量; $R_{\text{拉}}$ 为岩石的单轴抗拉强度。该模型中的围岩为Ⅲ围岩,估算其单轴抗拉强度在 6.0~7.0 MPa 之间。考虑到实际围岩中岩体并非完整岩石,抗拉强度小于完整岩石的抗拉强度,因此要对单轴抗拉强度进行折减,取安全系数为 2,那么该模型中弹性模量为 13 GPa 的围岩极限拉应变为 0.27‰。

隧道开挖前,最大主应力矢量为竖直方向,开挖后岩体最大主应力方向发生偏转,如隧道拱顶和拱底的最大主应力矢量由竖直向转为水平向。建立二维有限元模型,岩体的本构模型采用摩尔—库伦,对大跨度隧道开挖后毛洞的围岩应力应变情况进行分析(见图 2~图 4)。

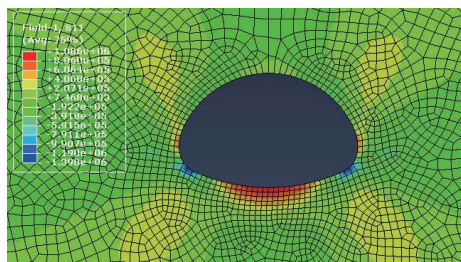


图 2 开挖后水平应力变化图(单位:Pa)

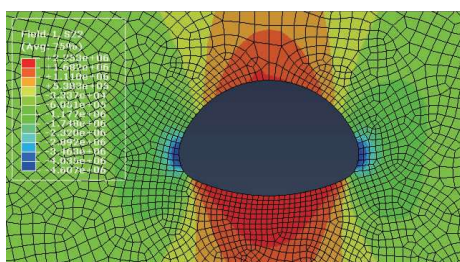


图 3 开挖后垂直应力变化图(单位:Pa)

根据该拉应变指标计算得出的压力拱内边界高度为 7.54 m,即采用荷载结构法计算的松散土拱高

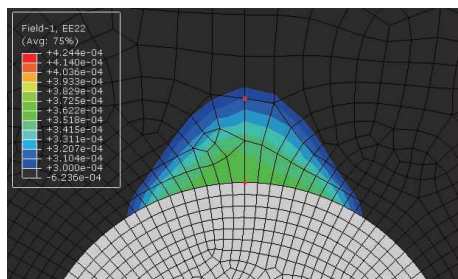


图 4 开挖后围岩竖向拉应变云图(单位:Pa)

度为 7.54 m。

大跨段隧道二次衬砌的配筋和裂缝计算依据隧道正常使用阶段的受力,因此,对大跨隧道进行荷载结构法计算,分析大跨隧道在正常使用阶段,二次衬砌受力大小及最大弯矩和剪力部位。图 5 为荷载分布图及种类。图 6~图 8 为隧道的轴力、弯矩及剪力分布图。计算结果可知,最大弯矩为 667.3 kN·m,最大剪力为 679.5 kN,均处于隧道拱脚部位,该处轴力约为 3847 kN,处于隧道底部仰拱处。

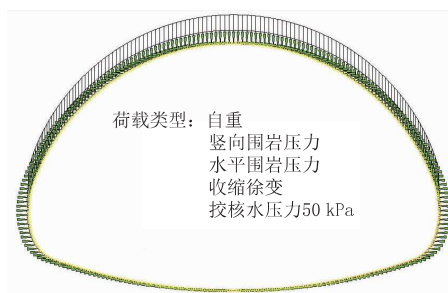


图 5 计算模型及荷载分布图

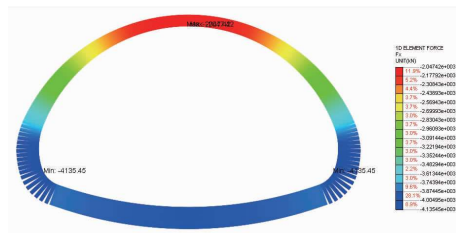


图 6 隧道轴力分布图

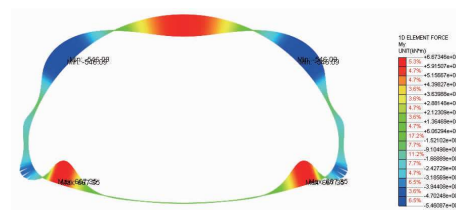


图 7 隧道弯矩分布图



图 8 隧道剪力分布图

3.3 地层结构法计算

设计采用双侧壁导坑法施工,由于隧道断面较大,分多导坑施工有利于减小隧道跨径,控制隧道变形。

按照相应的施工工法、工序和支护方式等,建立数值计算模型,见图9。

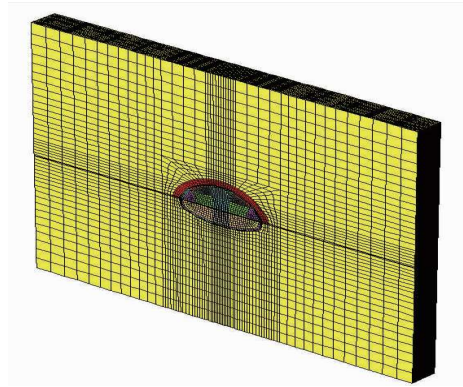


图9 大跨隧道施工地层有限元分析模型

图10和图11为隧道开挖完成后,围岩的竖向变形和水平位移云图,计算结果显示,隧道开挖后拱顶最大变形量约6 cm,侧墙最大水平变形量约1.6 cm,隧道能够保证其整体稳定性。

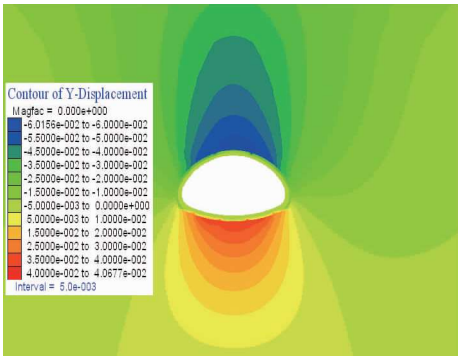


图10 隧道竖向位移分布云图

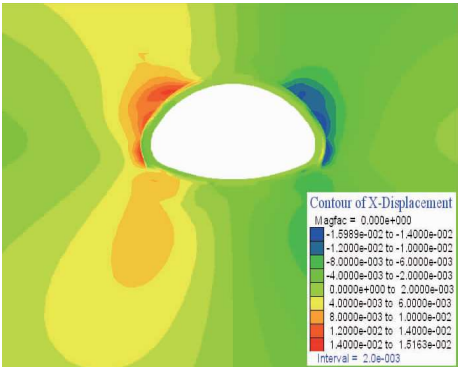


图11 隧道水平位移分布云图

由于岩体受开挖扰动,原先围岩的三向应力平衡被打破,出现应力重分布现象,见图12,垂直应力在隧道两侧边墙部位发生应力集中,最大的垂直应力约3.31 MPa,约为原岩应力的2倍,设计时该段施作了注浆锚杆,能够有效提高该部位岩体的力学特

性,同时,通过对岩体应变能的分析,该部位发生岩爆的可能性较小。

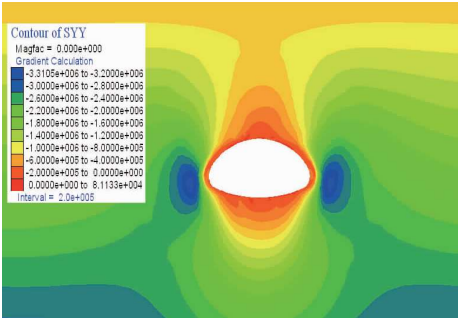


图12 隧道垂直应力分布云图

4 结论

本文针对深圳市过境高速公路连接线工程莲塘超大断面隧道,采用理论分析和有限元数值模拟手段,研究大断面隧道围岩压力的计算理论和设计方法。通过与现有的设计方法对比分析,总结大断面隧道的围岩压力作用模式。

(1)提出了采用应变指标对于的隧道围岩松散拱进行定量计算,通过二维有限元分析找到隧道松散拱的高度。该大跨度隧道荷载计算方法对于常规隧道的规范设计方法是行之有效的改进方法。

(2)根据应变指标下有限元计算的松散拱土压力进行二维荷载结构法计算,考虑结构的尺寸和弹簧边界条件,求出结构的内力用于结构配筋设计。

(3)通过三维地层有限元分析,考虑大跨度复杂的施工步序,研究了施工过程中隧道围岩的应力应变规律。通过计算得出,通过导洞施工的方法有助于隧道的整体稳定性,隧道的变形亦在可控制范围内,对于局部拱脚隧道应力增加区域应采取相应加固措施。

参考文献:

[1] 王梦恕.地下工程浅埋暗挖技术通论[M].安徽合肥:安徽教育出版社,2004.
[2] 龚彦峰,张俊儒,徐向东,等.全风化花岗岩富水地层超大断面隧道设计技术[J].铁路工程学报,2015(10):79-85.
[3] 蒋树屏,黄伦海,胡学兵.超大断面公路隧道的设计与研究[J].地下空间与工程学报,2005(1):54-61.
[4] 滕飞.严寒地区软塑粘土地层大断面浅埋隧道施工方案[J].北方交通,2011(6):143-145.
[5] 张全全.浅埋大断面隧道围岩变形特性与施工参数优化研究[D].云南昆明:昆明理工大学,2015.
[6] 曲海峰,杨重存,朱中华,等.公路隧道围岩压力研究与发展[J].地下空间与工程学报,2007(3):536-543.
[7] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S].